HAL
open science

Modélisation et simulation de la formation, la compression et le transport des bulles d'air en milieux fibreux à double échelle de pores : application au procédé RTM

Bouchra Aaboud

To cite this version:

Bouchra Aaboud. Modélisation et simulation de la formation, la compression et le transport des bulles d'air en milieux fibreux à double échelle de pores : application au procédé RTM. Matériaux. Université du Havre, 2016. Français. NNT : 2016LEHA0023 . tel-01668481

HAL Id: tel-01668481

https://theses.hal.science/tel-01668481v1

Submitted on 20 Dec 2017

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

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

THESE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité : Matériaux Composites

Préparée au sein de « Université du Havre »

Modélisation et Simulation de la Formation, la Compression et le Transport des bulles d'air en Milieux Fibreux à Double Echelle de Pores : Application au Procédé RTM

Présentée et soutenue par
Bouchra AABOUD

Thèse soutenue publiquement le 08 Novembre 2016 devant le jury composé de		
M. Abdelhak AMBARI	PU, ENSAM Angers	Examinateur
M. Philippe BOISSE	PU, INSA Lyon	Examinateur
M. Christophe BINETRUY	PU, Ecole Centrale de Nantes	Rapporteur
M. Joël BREARD	PU, Université du Havre	Examinateur
M. Abdelkhalek EL HAMI	PU, INSA de Rouen	Examinateur
M. Abdellatif IMAD	PU, Polytech'Lille, Université Lille 1	Rapporteur
M. Chung Hae PARK	PU, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Douai	Examinateur
M. Abdelghani SAOUAB	PU, Université du Havre	Directeur de thèse

Thèse dirigée par Abdelghani SAOUAB, Laboratoire Ondes et Milieux Complexes

Remerciements

Mes remerciements vont d'abord au Laboratoire Ondes et Milieux Complexes UMR 6294 CNRS, Université du Havre, où ce travail a été réalisé, et à la région Haute Normandie qui a financé ce projet.

Mes sincères remerciements vont également aux Professeurs Christophe BINETRUY et Abdellatif IMAD pour leurs patience et investissement pour rapporter ce mémoire de thèse. Aussi, je remercie chaleureusement les Professeurs Abdelhak AMBARI, Philippe BOISSE, Abdelkhalek EL HAMI et Chung Hae PARK, d'avoir accepté d'examiner et juger ce travail. C'était un grand plaisir de discuter avec vous, de partager mon petit savoir avec des personnes assez compétentes et qui ont donné beaucoup dans le domaine.

Je souhaite remercier aussi le Professeur Innocent MUTABAZI, Directeur du LOMC, de m'avoir accueilli au sein du laboratoire, de ses encouragements et de l'intérêt qu'il a porté à mon avancement dans le domaine de la recherche.

Je remercie vivement le Professeur Abdelghani SAOUAB, mon directeur de thèse, pour sa confiance, ses encouragements et son investissement en temps et en effort qu'il a déployé tout au long de ces trois années. Je suis très reconnaissante de votre confiance monsieur le directeur.

J'adresse mes remerciements également au Professeur Joël BREARD pour ses encouragements, ses conseils et ses idées.

Mes remerciements vont également à l'équipe composite du LOMC : Cédric LE BER, Laurent BIZET et Benoit DUCHEMIN. Ainsi qu'à toutes les personnes du laboratoire, et spécialement Carole LEGUEN, Faroudja HADJAZ et tout le personnel de l'université pour leur aide administrative, Valérie pour les petits coucous de chaque jour, et Sébastien ZERKAOUI pour sa disponibilité le jour de ma soutenance.

Remerciements

Un HUGE GIRL POWER MERCI à tous les doctorants du laboratoire. Les gens du premier étage, vous savez que vous faites partie du LOMC, et pourquoi s'isoler donc. Rinah la gentille, Joanna la festive, Abdessamad weld bladi, Kamal english man, Florian qu'on ne va pas oublier et Antoine le vol parabolique. Puis les dames et messieurs du bureau d'à côté, qui sont jaloux du nôtre. Amal fire women, Xuezhou la tendre, Mélanie à qui je souhaite bon rétablissement, Raounak le code puis le code et aussi le code et merci, Arnaud qui n'admet pas son affiliation au bureau 223, Hocine le serviable, Jonathan le nouveau et Clément le noir et blanc. Aussi les séniors : Hind, Zakia, Marine, Mathieu, Guillaume, Simon et Nadjibou. Les gens de l'autre rive : Nesrine, Camille et Soheil. Bien sûr ce n'est pas la peine de les remercier, ceux qui m'ont rendu la vie difficile avec leur méchanceté ; ceux que rien de se rappeler de leurs noms me fait chaud au cœur : Céline nain Joyeux (que toute la joie du monde t'envahisse), Anthony nain Simplet (que ton bon cœur soit toujours en paix), Nezha nain Atchoum (que ta bonne humeur t'accompagne où tu vas), Jean Baptiste nain Dormeur (que ta science te ramène vers les étoiles), Timothée nain Timide (que ta curiosité te fasse découvrir le monde), Benoit nain Grincheux (que ta sagesse t'emmène vers la présidence) et Safa Blanche Neige (que ta pureté te protège). [Moi nain Prof, pour ceux qui font les comptes :p].

Un énorme merci à tous mes amis au Maroc et en France : Sara, Meriem, Bouthaina, Ayoub, Otman, Hicham, et la liste est longue.

Chacun a sa lumière qui lui montre le chemin, sa source d'amour qui lui rend la vie paradisiaque et des personnes qui lui sont le tout absolu. C'est ma famille, qui a fait de moi l'être que je suis et qui va continuer à être, c'est mon trésor à moi. Je ne vous dis pas merci, parce qu'il ne suffira pas, mais je vous dis : je suis entièrement à vous, quel que soit le quel que soit.

Sommaire

Remerciements 3

Table des Figures 11

Table des Tableaux 21

Liste des symboles 23

Introduction générale 31

Chapitre 1 : Introduction aux matériaux composites, leurs procédés de mise en œuvre et défauts 37

1.1. Généralités sur les matériaux composites 37

1.1.1. Introduction 37

1.1.2. Renforts 38

1.1.3. Matrices 43

1.1.4. Performances mécaniques des composites 45

1.1.5. Charges et additifs 46

1.2. Procédés de mise en œuvre des matériaux composites 47

1.2.1. Généralités sur les procédés de mise en œuvre 47

1.2.2. Procédés LCM 48

1.2.3. Procédé RTM 50

1.3. Défauts dans les composites 52

1.3.1. Zones riches et pauvres en résine 53

1.3.2. Déformations résiduelles 53

1.3.3. Gonflement (blister) 54

1.3.4. Flambement 54

1.3.5. Délaminage 54

1.3.6. Fracture 55

1.3.7. Vides 56

1.4. Conclusion 57

Chapitre 2 : Etat de l'art 61

2.1. Bibliographie 61

2.2. Contribution de l'équipe composite du LOMC 65

2.2.1. Etude des défauts de type vides pour la maîtrise du procédé RTM 66

2.2.2. Mécanismes d'imprégnation en milieux fibreux 71

2.2.3. Modélisation et simulation de la saturation en milieux fibreux à double échelle de pores 74

2.2.4. Analyse expérimentale de la saturation des milieux fibreux à double échelle de pores 76

2.2.5. Contribution à la compréhension de la formation de défauts d'élaboration par RTM d'un composite stratifié Carbone/Epoxy 79

2.3. Limitations et apports 82

2.4. Approche numérique 83

2.4.1. Principe de modélisation 83

2.4.2. Méthodes numériques 84

2.5. Conclusion 87

Chapitre 3 : Modélisation des phénomènes de création, de compression et de transport des bulles d'air 91

3.1. Phénomène de création des bulles d'air 91

3.1.1. Principe de création 91

3.1.2. Schématisation 93

3.1.3. Modélisation de la création des bulles d'air 94

3.1.4. Résultats de la simulation numérique 112

3.2. Phénomène de compression des bulles d'air 118
3.2.1. Principe de compression 118
3.2.2. Compression dans les macro-capillaires 119
3.2.3. Saturation de la mèche dans les micro-capillaires 120
3.2.4. Résultats de la simulation numérique 123
3.3. Phénomène de transport des bulles d'air 125
3.3.1. Modèle existant 125
3.3.2. Equation de transport 126
3.3.3. Résultats de la simulation numérique 130
3.4. Conclusion 152
Chapitre 4 : Pore Doublet Model 157
4.1. Problématique 157
4.2. Le Pore Doublet Model (PDM) 158
4.2.1. Principe 158
4.2.2. Développement analytique 163
4.3. Equations gouvernantes 171
4.3.1. Modèle de création des bulles d'air 171
4.3.2. Modèle de compression des bulles d'air 171
4.3.3. Modèle de transport des bulles d'air 173
4.4. Simulation numérique 178
4.4.1. Etude paramétrique 178
4.4.2. Résultats de simulation avec le PDM 182
4.5. Comparaison expérimental-numérique 201
4.5.1. Injection à pression imposée 201
4.5.2. Injection à débit imposé 205

4.6. Conclusion 208

Chapitre 5 : Comparaison des modèles et applications 213

5.1. Comparaison des modèles présentés 213

5.2. Effets des paramètres d'injection 217

5.2.1. Injection à pression imposée 217

5.2.2. Injection à débit imposé 220

5.3. Perméabilité relative 222

5.3.1. Introduction 222

5.3.2. Simulation numérique 228

5.4. Conclusion 231

Conclusion générale et perspectives 233

Bibliographie 237

Table des Figures

Figure 1-1 : Armature unidirectionnelle....41
Figure 1-2: Mats de fibres de carbone....41
Figure 1-3 : Armature taffetas [2] 41
Figure 1-4 : Armature sergé 2/2 [2] 42
Figure 1-5 : Armature satin de 8 [2]....42
Figure 1-6 : a) Armature orthogonale trois dimensions, b) Armature multiaxiale [2]....42
Figure 1-7 : Etapes des procédés LCM 49
Figure 1-8 : Etapes du procédé RTM 50
Figure 1-9 : Procédés de mise en œuvre des composites : performances, cadences et matériaux [5] 52
Figure 1-10 : Défaut de zones riche et/ou pauvre en résine [6] 53
Figure 1-11 : Déformations dues aux contraintes résiduelles [7]....53
Figure 1-12 : Défaut de gonflement d'un matériau composite thermoplastique [8]....54
Figure 1-13 : Défaut de flambement d'un sandwich [9] 54
Figure 1-14 : Défaut de délaminage dans une structure composite [9]....55
Figure 1-15 : Défaut de fracture dans un composite [10] 55
Figure 1-16 : Défaut de vides de type zone sèche [11] 56
Figure 1-17 : Défaut de vides de type bulles d'air, a) Echelle macro, b) Echelle micro [13]....57
Figure 2-1 : Schématisation du flux de liquide entre les fibres [14] 62
Figure 2-2 : a) Evolution du signal électrique en fonction du temps au passage du front de résine, b) Evolution de la saturation en fonction de la position longitudinale [29]....70
Figure 2-3 : Taux volumique de vides global en fonction du nombre capillaire modifié Ca* (Pinj = 2.7 bar) [33]....75
Figure 2-4 : Schéma du montage électrique du capteur diélectrique [35]....77
Figure 2-5 : Taux de vide en fonction de la position après saturation maximale (eau/glycérol et débit de 1.7 cm3/min) [35] 78

Figure 2-6 : Taux volumiques de vides moyennés sur la longueur de la plaque en fonction de la position [36] 80
Figure 2-7 : Répartition spatiale du champ de pression à différents instants [33] 84
Figure 2-8 : Maillage par la méthode CVFEM [23].....85
Figure 2-9 : Approximation du front de liquide par la méthode VOF [23].....85
Figure 2-11 : Approximation du front de liquide par la méthode FINE [23].....86
Figure 2-10 : Différence entre les champs de pression de la méthode CVFEM et le cas réel [23]86
Figure 3-1 : Positions du front de flux, a) Echelle macro, b) Echelle méso et c) Echelle micro [31] 92
Figure 3-3 : Architecture de la préforme simulée 93
Figure 3-2 : Piégeage des bulles d'air, a) Echelle macro et b) Echelle micro [25] 93
Figure 3-4 : Schématisation de l'injection 94
Figure 3-5 : Schématisation de l'expérience de Darcy 95
Figure 3-6 : Forme tensorielle 96
Figure 3-7 : Domaine de validité de la loi de Darcy 97
Figure 3-8 : Géométrie de la préforme fibreuse [57] 101
Figure 3-9 : Surface de la mèche [57] 103
Figure 3-10 : Microstructure des renforts, a) Linéaire et b) Sinusoïdale 104
Figure 3-11 : Evolution de la surface de la mèche en fonction de la position, sur deux périodes 104
Figure 3-12 : Evolution de la perméabilité géométrique en fonction de la position, sur deux périodes 105
Figure 3-13 : Evolution de la perméabilité géométrique macro, en fonction de la position.....105
Figure 3-14 : Evolution de la perméabilité géométrique micro, en fonction de la position.....106
Figure 3-15 : Evolution de la perméabilité géométrique en fonction de la position.....106
Figure 3-16 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et analytiques de la perméabilité géométrique.....107
Figure 3-17 : Création d'une macro-bulle d’air.....110
Figure 3-18 : Création d'une micro-bulle d'air 110
Figure -19 : Dimensions de la préforme simulée 112

Figure 3-20 : Architecture des renforts de la préforme UD, a) Linéaires parallèles, b) Sinusoïdales périodiques 113
Figure 3-21 : Taux de création des bulles d'air à double échelle de pores, en fonction de la position à perméabilité constante 114
Figure 3-22 : Taux de création des bulles d'air à double échelle de pores, en fonction de la position à perméabilité variable 115
Figure 3-23 : Distribution spatiale de la Perméabilité géométrique et de la surface de la mèche sur une période 116
Figure 3-24 : Taux de création des bulles d'air sur une période 116
Figure 3-25 : Taux de création des bulles d'air à double échelle de pores, en fonction de la position à perméabilité variable et à valeurs moyennées 117
Figure 3-26 : Pression de la résine et volume de la bulle d'air avant compression [33] 119
Figure 3-27 : Pression de la résine et volume de la bulle d'air après compression [33] 119
Figure 3-28 : Saturation de la mèche 121
Figure 3-29 : Aire effective de la zone d'imprégnation 121
Figure 3-30 : Réduction de la taille de la micro-bulle d'air 122
Figure 3-31 : Taux de compression des bulles d'air à double échelle de pores, en fonction de la position à perméabilité constante 123
Figure 3-32 : Taux de compression des bulles d'air à double échelle de pores, en fonction de la position à perméabilité variable 123
Figure 3-33 : Taux de compression des bulles d'air à double échelle de pores, en fonction de la position à perméabilité variable et à valeurs moyennées 124
Figure 3-34 : Vitesse de la bulle en fonction de la vitesse de la résine [33] 125
Figure 3-35 : Lubrification de la paroi du capillaire [31] 127
Figure 3-36 : Phénomène de conservation 128
Figure 3-37 : Phénomène de migration 129
Figure 3-38 : Vitesse du liquide, vitesse des bulles d'air et le nombre capillaire modifié à l'échelle macro, en fonction de la position 131
Figure 3-39 : Vitesse du liquide, vitesse des bulles d'air et le nombre capillaire modifié à l'échelle micro, en fonction de la position 131

Figure 3-40 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité constante, avec fmic = 0 et fmac = 0 133
Figure 3-41 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité variable, avec fmic = 0 et fmac = 0 134
Figure 3-42 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité variable et à valeurs moyennées, avec fmic = 0 et fmac = 0 134
Figure 3-43 : Saturation totale en fonction de la position a) A perméabilité constante, b) A perméabilité variable, avec fmic = 0 et fmac = 0 136
Figure 3-44 : Saturation totale en fonction de la position à perméabilité variable et à valeurs moyennées, avec fmic = 0 et fmac = 0 136
Figure 3-45 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité constante, avec fmic = 0.5 et fmac = 0.5 137
Figure 3-46 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité variable, avec fmic=0.5 et fmac=0.5 139
Figure 3-47 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité variable et à valeurs moyennées, avecfmic=0.5 et fmac=0.5 139
Figure 3-48 : Saturation totale en fonction de la position, a) A perméabilité constante, b) A perméabilité variable, avec fmic=0.5 et fmac=0.5.....140
Figure 3-49 : Saturation totale en fonction de la position à perméabilité variable et à valeurs moyennées, avec fmic=0.5 et fmac=0.5.....141
Figure 3-50 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité constante, avec fmic = 0.01 et fmac = 0.5 142
Figure 3-51 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité variable, avec fmic = 0.01 et fmac = 0.5.....142
Figure 3-52 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité variable et à des valeurs moyennées, avec fmic = 0.01 et fmac = 0.5 143
Figure 3-53 : Saturation totale en fonction de la position, a) A perméabilité constante, b) A perméabilité variable, avec fmic = 0.01 et fmac = 0.5 143

Figure 3-54 : Saturation totale en fonction de la position à perméabilité variable et à valeurs moyennées, avec fmic = 0.01 et fmac = 0.5 144
Figure 3-55 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité constante, avec fmic = 0.5 et fmac = 0.01 145
Figure 3-56 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité variable, avec fmic = 0.5 et fmac = 0.01 146
Figure 3-57 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité variable et à valeurs moyennées, avec fmic = 0.5 et fmac = 0.01 146
Figure 3-58 : Saturation totale en fonction de la position, a) A perméabilité constante, b) A perméabilité variable, avec fmic = 0.5 et fmac = 0.01 147
Figure 3-59 : Saturation totale en fonction de la position à perméabilité variable et à valeurs moyennées, avec fmic = 0.5 et fmac = 0.01 148
Figure 3-60 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité constante, avec fmic = 0.25 et fmac = 0.1 149
Figure 3-61 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité variable, avec fmic = 0.25 et fmac = 0.1 150
Figure 3-62 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité variable et à valeurs moyennées, avec fmic = 0.25 et fmac = 0.1 150
Figure 3-63 : Saturation totale en fonction de la position, a) A perméabilité constante, b) A perméabilité variable, avec fmic = 0.25 et fmac = 0.1 151
Figure 3-64 : Saturation totale en fonction de la position à perméabilité variable et à valeurs moyennées, avec fmic = 0.25 et fmac = 0.1 151
Figure 4-1 : Connectivité parallèle [40] 159
Figure 4-2 : Réseaux périodiques de tubes [39] 160
Figure 4-3 : Piégeage d'air par le liquide [39] 160
Figure 4-4 : Schématisation du réseau périodique [39] 161
Figure 4-5 : Connectivité au nœud [39] 161
Figure 4-6 : a) Combinaison des connectivités, b) Emprisonnement d'une macro-bulle d'air, c) Emprisonnement d'une micro-bulle d'air [41] 162

Figure 4-7 : Schématisation du Pore Doublet Model 163
Figure 4-8 : Régimes d'écoulement 164
Figure 4-9 : Vitesses du liquide et de l'air, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro 173
Figure 4-10 : Taux de création des micro-bulles d'air en fonction de la position, à $\beta = 0.028$ et α variable 179
Figure 4-11 : Taux de création des macro-bulles d'air en fonction de la position, à $\beta = 0.028$ et α variable 180
Figure 4-12 : Taux de création des micro-bulles d'air en fonction de la position, à $\alpha = 0.043$ et β variable 180
Figure 4-13 : Taux de création des macro-bulles d'air en fonction de la position, à $\alpha = 0.043$ et β variable 181
Figure 4-14 : Angle de contact dynamique en fonction de la vitesse du liquide, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro 183
Figure 4-15 : Taux de création des bulles d'air en fonction du nombre capillaire modifié, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro 183
Figure 4-16 : Taux de création des bulles d'air en fonction de la position, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro 184
Figure 4-17 : Distribution spatiale des taux de création des bulles d'air, a) Echelle macro, b) Echelle micro 184
Figure 4-18 : Taux de compression des bulles d'air en fonction de la position, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro 185
Figure 4-19 : Taux de transport des bulles d'air en fonction de la position, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro 186
Figure 4-20 : Taux de porosité en fonction de la position, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro 186
Figure 4-21 : Taux de création des bulles d'air et de porosité en fonction de la position, à double échelle de pores 187
Figure 4-22 : Distribution spatiale de la porosité, a) Echelle macro, b) Echelle micro 188
Figure 4-23 : a) Saturation totale en fonction de la position, b) Agrandissement de a) 188
Figure 4-24 : Saturation de la préforme 189
Figure 4-25 : Emplacement des trois positions choisies 189

Figure 4-26 : Taux total de création des bulles d'air et de porosité en fonction du temps 190
Figure 4-27 : Taux total de compression des bulles d'air en fonction du temps 191
Figure 4-28 : Taux total de transport des bulles d'air en fonction du temps 191
Figure 4-29 : Saturation totale en fonction du temps 192
Figure 4-30 : Vitesses du liquide et de l'air, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro 193
Figure 4-31 : Angle de contact dynamique en fonction de la vitesse du liquide, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro 193
Figure 4-32 : Taux de création des bulles d'air en fonction du nombre capillaire modifié, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro 194
Figure 4-33 : Taux de création des bulles d'air en fonction de la position, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro 194
Figure 4-34 : Distribution spatiale des taux de création des bulles d'air, a) Echelle macro, b) Echelle micro.....195
Figure 4-35 : Taux de compression des bulles d'air en fonction de la position, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro.....195
Figure 4-36 : Taux de transport des bulles d'air en fonction de la position, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro.....196
Figure 4-37 : Taux de porosité en fonction de la position, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro.....196
Figure 4-38 : Distribution spatiale de la porosité, a) Echelle macro, b) Echelle micro 196
Figure 4-39 : Taux de création des bulles d'air et de porosité en fonction de la position.....197
Figure 4-40 : a) Saturation totale en fonction de la position, b) Agrandissement de a).....198
Figure 4-41 : Saturation de la préforme 199
Figure 4-42 : Taux total de création des bulles d'air et de porosité en fonction du temps 199
Figure 4-43 : Taux total de compression des bulles d'air en fonction du temps 200
Figure 4-44 : Taux total de transport des bulles d'air en fonction du temps 200
Figure 4-45 : Saturation totale en fonction du temps 201
Figure 4-46 : a) Atténuation moyenne en fonction de la position [68], b) Porosité finale numérique en fonction de la position 202
Figure 4-47 : Porosité finale expérimentale en fonction de la position, a) Eau/Glycérol, b) Silicone [35] 203

Figure 4-48 : Porosité finale numérique en fonction de la position 203
Figure 4-49 : Saturation totale en fonction de la position, a) Expérimentale [35], b) Numérique 204
Figure 4-50 : Saturation totale en fonction du temps, a) Expérimentale [35], b) Numérique.....204
Figure 4-51 : Porosité finale en fonction de la position, a) Expérimentale [36], b) Numérique..205
Figure 4-52 : Saturation totale expérimentale en fonction de la position, a) Gueroult [35], b) Gascon [69] 206
Figure 4-53 : Saturation totale numérique en fonction de la position 206
Figure 4-54 : Saturation totale expérimentale en fonction du temps, a) Gueroult [35], b) Gascon [69] 207
Figure 4-55 : Saturation totale numérique en fonction du temps 207
Figure 5-1 : Taux de création des bulles d'air à double échelle de pores en fonction de la position, a) M.1 à perméabilité constante, b) M.2 214
Figure 5-2 : Taux de compression des bulles d'air à double échelle de pores en fonction de la position, a) M.1 à perméabilité constante, b) M.2.....215
Figure 5-3 : Taux de création des bulles d'air à double échelle de pores en fonction de la position, a) M.1 à perméabilité constante avec $fmic = 0.25$ et $fmac = 0.1$, b) M.2 avec $fcoal = 0.4$, $facc = 0.1$ et $ftur = 0.01$ 216
Figure 5-4 : Taux de porosité à double échelle de pores en fonction de la position, a) M.1 à perméabilité constante, b) M.2 216
Figure 5-5 : Saturation de la préforme en fonction de la position, a) M.1 à perméabilité constante, b) M.2 217
Figure 5-6 : Taux de porosité en fonction de la position à différentes pressions d'injection 218
Figure 5-7 : Taux de porosité en fonction de la position à différentes pressions à l'évent 219
Figure 5-8 : Taux de porosité en fonction de la position à différents débits d'injection 220
Figure 5-9 : Taux de porosité en fonction de la position à différentes pressions à l'évent 221
Figure 5-10 : Saturation de la préforme en fonction de la position, a) A pression imposée, b) A débit imposé 229
Figure 5-11 : Perméabilité relative numérique en fonction de la position, a) A pression imposée, b) A débit imposé 229

Figure 5-12 : Perméabilité relative expérimentale le long de la préforme, a) A Pression constante, b) A Débit constant [35] 230
Figure 5-13 : Perméabilité relative numérique en fonction du temps, a) A pression imposée, b) A débit imposé 230
Figure 5-14 : Perméabilité relative expérimentale en fonction du temps [85] 231

Table des Tableaux

Tableau 1-1 : Comparaison entre les caractéristiques mécaniques des métaux, des composites à matrice organique et des composites à matrice métallique [3] 45
Tableau 1-2 : Comparaison entre les caractéristiques mécaniques des composites à fibres végétales et synthétiques [4] 46
Tableau 2-1 : Classification des vides selon leurs volumes [36] 80
Tableau 2-2 : Classification des vides selon leurs rapports d'aspects [36].....81
Tableau 3-1 : Caractéristiques des renforts utilisés.....113
Tableau 3-2 : Caractéristiques de la résine utilisée 114
Tableau 3-3 : Fréquences de migration proposées 132

Liste des symboles

Exposant F, C, T et R	Formation (Création), Compression, Transport et Reste (Porosité) ;
Indice mac et mic	Grandeur macro et micro ;
Indice x et y	Direction longitudinale et transversale ;
Indices w et nw	Phase mouillante et non mouillante ;
A	Section (m^2) ;
$A_A(P_{mac})$ et $A_A(P_{mic})$	Fractions surfaciques de macro et micro-vides ;
A_e	Aire effective de la zone d'imprégnation de la mèche (m^2) ;
A^*	Coefficient empirique ;
$A_A(P)$	Fraction volumique globale de pores ;
a	Petit demi-diamètre de l'ellipse (m) ;
$A', B', A"$ et $B"$	Constantes déterminées expérimentalement ;
b	Grand demi-diamètre de l'ellipse (m) ;
Ca	Nombre capillaire ;
Ca^{**}	Nombre capillaire relatif à la vitesse des bulles d'air ;
Ca^*	Nombre capillaire modifié ;
C_0	Constante ;
CS et CV	Surface de contrôle (m^2) et Volume de contrôle (m^3) ;
d_f	Diamètre des fibres (m) ;

dt	Pas de temps (s) ;
D	Dispersion mécanique $(m^2/_s)$;
F_u	Facteur de glissement des bulles d'air ;
f	Facteur de remplissage de l'élément de contrôle ;
f_{mic}	Fréquence de migration des micro-bulles d'air qui passent dans les macro-capillaires ;
f_{mac}	Fréquence de migration des macro-bulles d'air qui passent dans les micro-capillaires ;
f_{coal}	Fréquence de coalescence des micro-bulles d'air ;
f_{acc}	Fréquence de fragmentation des macro-bulles d'air par accélération ;
f_{tur}	Fréquence de fragmentation des macro-bulles d'air par turbulence ;
g	Gravité $(m/_{s^2})$;
h	Hauteur entre deux plis (m) ;
H	Demi hauteur moyenne de la mèche (m) ;
h_{air}	Demi hauteur moyenne de la bulle d'air (m) ;
h_v	Facteur de forme ;
h_J	Hauteur de Jurin (m) ;
J	Fonction J de Leverett ;
$\overline{\overline{K}}$	Tenseur de perméabilité (m^2) ;
K	Perméabilité (m^2) ;

$K_{\parallel}$ et $K_{\perp}$	Perméabilités géométriques de la mèche dans la direction longitudinale et transversale (m^2) ;
K_{sat} et K_{unsat}	Perméabilité géométrique saturée et insaturée (m^2) ;
K_{geo}	Perméabilité géométrique (m^2) ;
k_{rel}	Perméabilité relative ;
k_{ck}	Constante de Kozeny-Carman ;
k	Coefficient de proportionnalité entre a et b ;
L	Longueur de la connectivité au nœud (m) ;
l	Longueur de la connectivité parallèle (m) ;
l_{ch}	Longueur de la chaîne (m) ;
$\overline{L(P_{mac})}$ et $\overline{L(P_{mic})}$	Libres parcours moyens macro et micro(m) ;
M	Quantité de bulles d'air migrées ;
m	Masse du liquide présent dans le tube (Kg) ;
n_f	Nombre de fibres par mèche ;
P	Pression locale de la résine (Pa) ;
P_0	Pression d'entrée (initiale) de la résine (Pa) ;
$P_{g/a}$	Pression du gaz/air (Pa) ;
P_{inj}	Pression d'injection (Pa) ;
P_{vent}	Pression à l'évent (Pa) ;
$P_{cap,\parallel}$ et $P_{cap,\perp}$	Pressions capillaires dans la direction longitudinale et transversale (Pa) ;

$P_{cap,e}$	Pression capillaire d'entrée (Pa) ;
q_f	Vitesse du front de résine $({}^{m}/_{s})$;
Q_{inj}	Débit d'injection $({}^{m^3}/_{s})$;
$q_{\parallel}\ et\ q_{\perp}$	Flux longitudinal et transversal ;
R	Constante des gaz parfaits ;
R_{sp}	Rayon de la sphère (m) ;
R_f	Rayon des fibres (m) ;
$R_{mic}\ et\ R_{mac}$	Rayon du micro et macro-capillaire (m) ;
Re	Nombre de Reynolds ;
R_h	Rayon hydraulique (m) ;
$\bar{r}$	Rayon moyen des fibres (m) ;
S	Saturation de la préforme ;
$\dot{S}$	Terme source ;
S'	Surface de la mèche (m^2) ;
S_0	Surface spécifique des fibres $({}^{1}/_{m^2})$;
S_V	Surface spécifique d'interface $({}^{m^2}/_{m^3})$;
S_{moy}	Surface moyenne de la mèche (m^2) ;
S_{min}	Surface minimale d'une mèche (m^2) ;
S_{max}	Surface maximale d'une mèche (m^2) ;

T	Température absolue ($K°$) ;
T'	Période spatiale entre deux fils de trame identiques successifs (s) ;
t	Temps (s) ;
u_b	Vitesse des bulles d'air ($^{m}/_{s}$) ;
u_l	Vitesse du liquide (résine) ($^{m}/_{s}$) ;
u_{crit}	Vitesse critique de la résine ($^{m}/_{s}$) ;
V	Volume de l'élément du contrôle (m^3) ;
V_0	Volume initial des bulles d'air (m^3) ;
V_{air}	Taux volumique d'air ;
V_a	Volume des bulles d'air (m^3) ;
V_{total}	Volume total effectif de la zone d'imprégnation de la mèche (m^3) ;
V_M	Taux de macro-vides ;
V_m	Taux de micro-vides ;
$V_V(P)$	Fraction volumique de pores ;
$V_{f,t}$	Taux volumique de fibres dans la mèche ;
V_T	Taux volumique de mèche du renfort ;
V_f	Taux volumique des fibres ;
$V_{f,ch}$ et $V_{f,tr}$	Fraction volumique des fibres dans la direction chaîne et trame ;
w	Largeur de la cellule déterminée sur le tissu (m) ;
X	Position du liquide (m) ;
X_f	Position du front de liquide (m) ;

α	Rapport des rayons des capillaires ;
α_t	Facteur de l'effet de transition (s) ;
β	Rapport des longueurs des connectivités ;
γ	Tension de surface $({}^{N}/_{m})$;
$\Upsilon\ et\ \delta$	Constantes expérimentales ;
Γ	Constante ;
θ	Angle de contact entre le renfort et la résine (°) ;
θ_d	Angle de contact dynamique (°) ;
θ_e	Angle de contact à l'équilibre (°) ;
τ	Tortuosité ;
ρ	Densité ;
ρ'	Masse spécifique $({}^{Kg}/_{m^3})$;
Δt	Temps de passage du liquide dans un canal (s) ;
μ	Viscosité dynamique de la résine $(Pa.s)$;
η	Rapport de surfaces minimale et maximale ;
ζ	Taux volumique de la matière isolante (sphère) ;
ε	Porosité ;
λ	Ratio de la tortuosité ;
Λ	Indice de distribution de la taille des pores ;
ϕ	Taux volumique de bulles d'air ;

Φ	Diamètre du capillaire (m) ;
$\mathfrak{R}$	Résistance électrique du milieu (Ω) ;

Introduction générale

Le large choix qu'offrent les matériaux composites, fait que leur domaine d'utilisation est de plus en plus exploité et développé. La grande diversité des matrices et des renforts utilisés dans la fabrication de ces matériaux, confère au produit de différentes microstructures, de multiples caractéristiques mécaniques et physico-chimiques et s'impose aussi dans le choix du procédé de mise en œuvre.

Les matériaux composites à matrices organiques (CMO) sont les plus répandus parmi tout autre type, vu leur bon rapport qualité-prix et leur compatibilité avec la grande majorité des natures de fibres. Notamment, il y a une grande créativité et adaptation des procédés de mise en œuvre vis-à-vis des besoins industriels. Le Resin Transfer Molding (RTM) fait partie des procédés qui ont suscité plus d'attention tant au niveau expérimental que numérique.

L'optimisation des procédés et la standardisation des démarches, en passant par l'expérimental, nécessite un lourd coût d'investissement. D'où l'orientation vers la simulation numérique dans le but d'élaborer des codes de calcul modélisant la mise en œuvre des pièces composites, de façon à pouvoir alterner facilement et rapidement entre différentes configurations d'injection. Une comparaison expérimental-simulation est toujours de vigueur afin de valider l'approche numérique et le protocole expérimental.

Toute méthodologie de simulation numérique exige de considérer des hypothèses et de négliger quelques éléments. Ce sont la démarche et les limitations de la modélisation numérique. Au fait, nous partons d'un phénomène physique que nous détaillons et décrivons mathématiquement pour qu'ensuite l'intégrer dans le code de calcul avec un langage de programmation convenable à l'outil de visualisation utilisé. Par ailleurs, nous ne pouvons pas prendre en compte tous les paramètres à la fois, nous passons par des simplifications qui n'affectent pas le processus et des hypothèses qui n'alternent pas les résultats.

Ce présent travail traite la simulation numérique des phénomènes observés lors de la mise en œuvre par le procédé RTM, des pièces composites à matrices organiques et à fibres longues

synthétiques. C'est une modélisation de l'écoulement de résine dans un milieu fibreux à double échelle de pores. En effet, durant cette opération de mise en œuvre, plusieurs problématiques peuvent être soulevées et constituer des sujets d'études riches et variés. Par exemple, faire changer les matrices et les renforts utilisés tout en restant dans la catégorie des CMO et des fibres longues ; étudier l'effet de l'ajout des charges lors du procédé ; traiter la thermocinétique du procédé RTM ; …

Dans ce travail, nous allons se focaliser sur l'étude du problème de la présence des bulles d'air présentes dans le produit final en fin de l'injection par le procédé RTM. Nous allons nous intéresser précisément à la modélisation et la simulation des trois phénomènes qui gouvernent la physique de cette problématique, à savoir : la création, la compression et le transport de ces bulles d'air. En effet, la présence de ce type de défaut modifie la microstructure du matériau et affaibli les caractéristiques mécaniques de la pièce élaborée. Par conséquent, l'objectif ultime recherché à partir de ce type de simulation est de proposer une combinaison optimale des paramètres d'injection afin de minimiser le taux final de porosité.

Dans cette optique, l'objectif de la thèse sera abordé de la façon suivante :

Le premier chapitre porte sur l'introduction des éléments clés du développement de notre travail ; à savoir le procédé de mise en œuvre utilisé et le type de défauts traité. Les procédés de mise en œuvre des matériaux composites sont multiples et variés, nous les aborderons dans leur globalité en mettant l'accent sur le procédé RTM. Egalement, nous introduirons les défauts composites les plus répandus en se focalisant sur ceux de type bulles d'air.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude bibliographique des travaux antérieurs concernant la même thématique traitée dans ce travail. Un état de l'art sera présenté, ainsi qu'une synthèse de la contribution de l'équipe Composites de notre laboratoire. Ensuite, nous allons enchaîner avec une discussion sur ces derniers, en soulignant les points à améliorer dans les anciens travaux et les apports visés dans cet actuel travail. Puis au final, nous allons présenter l'approche numérique utilisée dans la réalisation de cette étude.

Le troisième chapitre aborde deux problématiques. La première est la modélisation des phénomènes de création, de compression et notamment celle du transport des bulles d'air ; où une nouvelle approche sera proposée. La seconde concerne la prise en compte de la variation spatiale

de la perméabilité géométrique dans l'étude de ces phénomènes. Le but du premier élément est l'estimation des quantités de bulles d'air piégées, compressées et expulsées à l'extérieur de la pièce. Quant au deuxième, il vise l'identification de la distribution spatiale de la perméabilité géométrique et son effet sur les trois phénomènes par lesquels les bulles d'air passent.

Le quatrième chapitre est dédié à la présentation détaillée d'un nouveau protocole de modélisation de création des bulles d'air, c'est le Port Doublet Model. En effet, nous allons expliquer le principe et la formulation de ce dernier. Divers résultats numériques avec ces nouvelles approches pour modéliser la création et le transport, seront présentés et analysés. Ces résultats concernent la description de la distribution spatiotemporelle des quantités de bulles d'air créées, comprimées, transportées et restées dans la pièce produite.

Le cinquième chapitre est Composé de deux parties. Une première étude relative à l'identification des paramètres d'injection optimaux, qui minimisent le taux de porosité final dans la pièce mise en œuvre par RTM. Puis, une seconde qui établit une approche d'estimation de la perméabilité relative.

Sommaire du Chapitre 1

1.1. Généralités sur les matériaux composites 37
1.1.1. Introduction 37
1.1.2. Renforts 38
1.1.2.1. Fibres naturelles 38
1.1.2.2. Fibres synthétiques 39
1.1.2.3. Architectures des renforts 40
1.1.3. Matrices 43
1.1.4. Performances mécaniques des composites 45
1.1.5. Charges et additifs 46
1.1.5.1. Charges 46
1.1.5.2. Additifs 47
1.2. Procédés de mise en œuvre des matériaux composites 47
1.2.1. Généralités sur les procédés de mise en œuvre 47
1.2.2. Procédés LCM 48
1.2.3. Procédé RTM 50
1.3. Défauts dans les composites 52
1.3.1. Zones riches et pauvres en résine 53
1.3.2. Déformations résiduelles 53
1.3.3. Gonflement (blister) 54
1.3.4. Flambement 54
1.3.5. Délaminage 54
1.3.6. Fracture 55
1.3.7. Vides 56
1.3.7.1. Zones sèches 56

1.3.7.2. Bulles d'air 56

1.4. Conclusion 57

Chapitre 1 : Introduction aux matériaux composites, leurs procédés de mise en œuvre et défauts

Entre autres, les constituants du matériau composite choisis et le procédé de mise en œuvre employé, affectent la qualité et la santé matière des pièces composites produites. De ce fait, ce chapitre mettra l'accent sur les composantes d'un matériau composite et leur influence sur les propriétés physiques de celui-ci. Une présentation des procédés de mise en œuvre sera fournie et notamment celle du procédé RTM concerné par ce travail. Egalement, une introduction aux défauts les plus fréquents dans les pièces composites sera donnée.

1.1. Généralités sur les matériaux composites

1.1.1. Introduction

D'après le Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL) [1], un matériau est un type de matière qui entre dans la constitution d'un objet fabriqué ; et un composite est tout ce qui est composé d'éléments de l'ordre corinthien (architecture) et de l'ordre ionique, et caractérisé par l'hétérogénéité des éléments d'un tout. Ainsi, un matériau composite sera un objet composé de plusieurs éléments, dont le résultat est hétérogène. En d'autres termes, c'est l'association d'aux moins deux matériaux non miscibles, et dont l'assemblage acquière des caractéristiques plus importantes que celles des constituants pris séparément.

Les principaux constituants d'un matériau composite sont les renforts et la matrice. Dans cette structure, les renforts (fibres) représentent le squelette du composite et ils sont maintenus par la matrice (résine). Notamment, les fibres confèrent leurs propriétés mécaniques au produit composite, tandis que la résine assure la liaison entre celles-ci et répartit les efforts. Néanmoins, pour avoir une bonne liaison, il faut se garantir une bonne adhésion, c'est la contrainte qui conditionne le choix du couple matrice/renfort et est appelée l'interface fibre-matrice.

En plus de ces éléments, un matériau composite peut également contenir des charges et des additifs. Le rôle de ces derniers est de faciliter la mise en œuvre, tandis que les premiers sont utilisées dans le but d'améliorer les caractéristiques mécaniques et physiques du composite.

Dans la suite, nous allons détailler les types de fibres et résines disponibles dans le marché et aussi donner des exemples des ajouts en termes de charges et additifs.

1.1.2. Renforts

Des renforts naturels aussi bien que synthétiques sont présents dans le marché. En effet ; les fibres naturelles s'inscrivent sous trois différentes catégories selon leurs origines. Par ailleurs, celles synthétiques sont obtenues par voie physicochimique.

1.1.2.1. Fibres naturelles

Les fibres naturelles sont utilisées depuis 3000 ans dans le domaine des composites. Elles étaient présentes dans la construction des pyramides égyptiennes par exemple. Vers la fin du 20ème siècle, elles ont refait surface grâce à l'attention apportée à la biodégradabilité des matériaux.

Leur origine peut être végétale, animale ou minérale :

- **Fibres végétales** : elles sont les plus utilisées, vu leur grande disponibilité. Elles sont soit à base de poils séminaux de graines (coton kapok), ou de fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ramie), ou de fibres dures extraites de feuilles (sisal), de troncs (chanvre de manille), d'enveloppes de fruits (noix de coco). Nous en citons :
    - Lin : longueur élevée, bonne résistance et grande abondance ;
    - Chanvre : plus légère, plus solide et moins chère que la fibre du verre ;
    - Coton : légèreté et résistance au pliage ;
    - Chanvre manille (abaca) : importante porosité (utilisée comme filtre) et bonne résistance au déchirement ;
    - Kénaf : un important rendement 10t/ha/an ;
    - Coco : ce sont les fibres qui entourent les noix de coco. Elles sont filées et tissées après avoir été assouplies dans l'eau. Le filage grossier et irrégulier donne au coco un aspect rustique (s'adapte à tous les climats). Le coco est très résistant, il est isolant, imputrescible (ne pourrit pas) et antibactérien.

- **Fibres animales** : elles sont peu utilisées dont leur grande majorité est destinée au textile. Nous en citons :
    - Laine : résilience et élasticité exceptionnelles et largement meilleures que celles des fibres synthétiques ;
    - Soie : pouvoir absorbant élevé et faible conductivité thermique, elle est sous forme d'un fil continu résistant mesurant entre 500 et 1500 mètres de long.
- **Fibres minérales** : elles sont rarement utilisées à cause de leur difficile mise en œuvre. Nous en citons :
    - Amiante : bon accrochage, elle peut être utilisée en combinaison avec les fibres de verre afin de diminuer le coût. Elle est également ajoutée aux fibres de sisal pour améliorer les propriétés du matériau. Cependant, elle a le problème d'être cancérigène, donc une réglementation très stricte ;
    - Basalte : une température d'utilisation élevée (820 °C), une bonne résistance au feu, une contrainte et déformation à la rupture supérieures à celles du verre, un module d'Young élevé (89 GPa), une très bonne résistance aux produits chimiques (acides forts, bases et solvants), une très bonne résistance à la corrosion et aux rayonnements UV, matériau inerte, non toxique, non cancérigène, un prix compétitif par rapport à la fibre de verre.

1.1.2.2. Fibres synthétiques

Les fibres synthétiques représentent la grande majorité employée dans la fabrication des matériaux composites. Il existe trois catégories principales de ces renforts : **organiques** (verre, aramide, …), **minéraux** (carbone, céramique, …) et **métalliques** (bore, alumine, …). Ci-après, nous détaillons un élément de chaque catégorie :

- Fibres de verre : elles sont disponibles en différents types selon le besoin. Au fait, le type A représente une haute teneur en alcalins (Li2O, Na2O, K2O) ; puis le type C a une bonne résistance chimique en milieu acide (excepté acide HF) ; ensuite le type D offre de hautes propriétés diélectriques ; tandis que le type E est à usage général avec de bonnes propriétés électriques ; finalement les types R et S amènent une haute résistance mécanique.

Tous les types sont à base de silice (SiO_2), par ailleurs, le verre E couvre presque 98% de la production. De ce fait, les autres types ne sont utilisés que pour des applications spécifiques.

- Fibres de carbone : elles sont utilisées pour les matériaux composites à hautes performances et sont classées selon leurs propriétés. Par exemple la classification des fibres de carbone d'après leurs propriétés en traction se fait en cinq catégories : pour un Usage Général ou pour des applications thermiques, il faut prendre des fibres UG qui ont un module d'Young inférieur à 200 GPa ($E < 200$ GPa) ; en cas de Haute Résistance, des fibres HR sont à employer tel que $200 < E < 250$ GPa ; pour un Module Intermédiaire, il est recommandé de se servir des fibres IM avec $250 < E < 350$ GPa ; quant au Haut Module, il faut faire appel au fibres HM $350 < E < 550$ GPa ; et enfin, si nous avons besoin d'un Très Haut Module, alors les fibres THM sont conseillées $E > 550$ GPa.

  Egalement, il y a des classifications selon les propriétés en cisaillement, en compression, en résistance à la fatigue et en tenue au choc. Cela ne concerne que la caractérisation mécanique. Par ailleurs, ces fibres présentent aussi des propriétés électriques, thermiques, tribologique (frottement) et la propriété de transparence aux rayons X (faible masse atomique conduit à une faible absorption des rayons X).
- Fibres de bore : elles sont utilisées couramment dans la fabrication des matériaux renforçateurs. Ce sont des fibres de haut module insensibles à l'oxydation à hautes températures.

1.1.2.3. Architectures des renforts

Les fibres peuvent être arrangées sous de distinctes architectures, depuis les unidirectionnels jusqu'aux éléments sandwich. Sachant que la majorité des renforts travaillent mieux en traction qu'en compression et cisaillement, alors une manœuvre sur la texture de la préforme est fortement recommandée. D'où les différentes géométries ci-dessous :

- **Unidirectionnels UD** : les fibres sont posées parallèlement dans la direction longitudinale et sont raccordées par le biais des fils de couture en y étant perpendiculaires. Cette architecture est fortement déséquilibrée, vu que la présence des fibres est selon une seule direction.

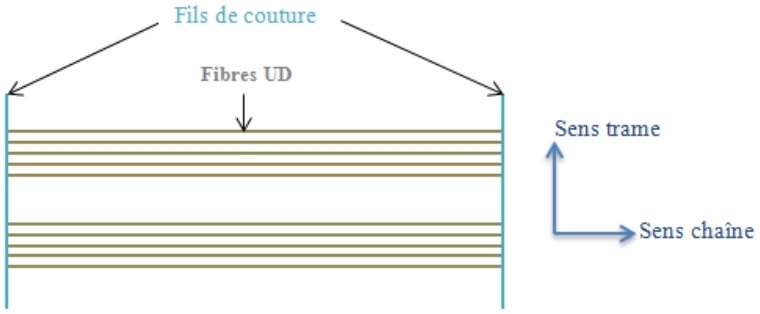


Figure 1-1 : Armature unidirectionnelle

- **Mats** : les fibres sont distribuées aléatoirement dans le plan, ce qui augmente le degré d'anisotropie de leurs propriétés mécaniques.

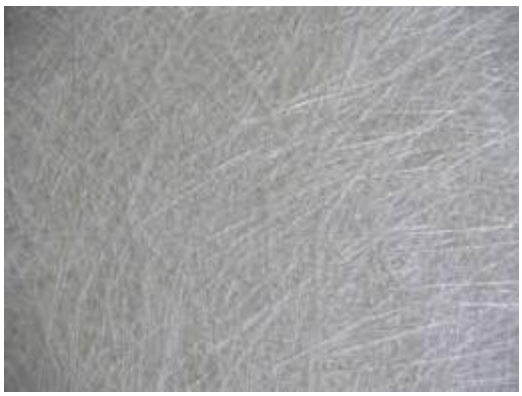


Figure 1-2: Mats de fibres de carbone

- **Toiles ou taffetas** : chaque fil de chaîne passe dessus puis dessous chaque fil de trame et réciproquement. Le grand nombre d'entrecroisements successifs fait que la structure est peu déformable, ce qui réduit ses caractéristiques mécaniques.

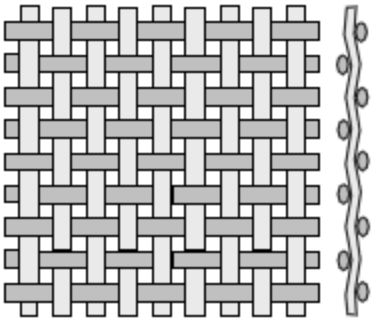


Figure 1-3 : Armature taffetas [2]

- **Sergés** : chaque fil de chaîne passe au-dessus de plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame passe au-dessus de (m) fils de chaîne. C'est une structure plus souple que le taffetas, tout en ayant une bonne densité de fils.

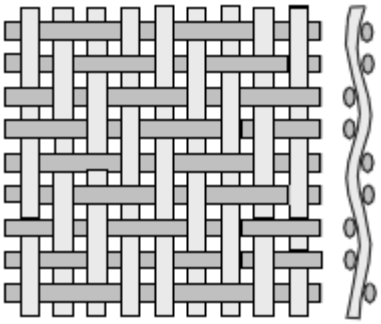


Figure 1-4 : Armature sergé 2/2 [2]

- **Satins** : chaque fil de chaîne passe au-dessus de plusieurs (n-1) fils de trame et réciproquement. C'est une géométrie qui possède de différents aspects de chaque côté, ce qui la rend souple et adaptée à la mise en forme des pièces à surfaces complexes.

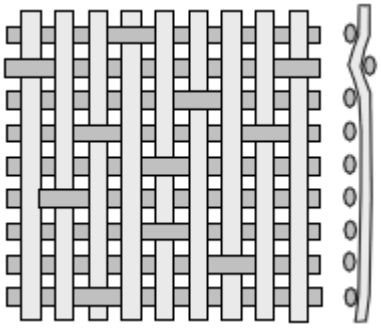


Figure 1-5 : Armature satin de 8 [2]

- **Tissage multiaxial** : il y a également des tissages en trois et quatre dimensions.

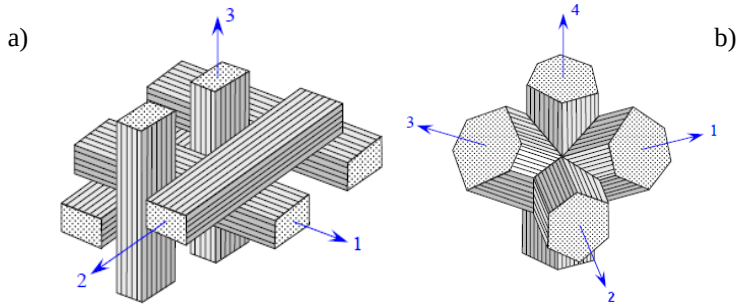


Figure 1-6 : a) Armature orthogonale trois dimensions, b) Armature multiaxiale [2]

- **Sandwichs** : c'est un empilement de trois composantes ; une âme légère qui a de faibles caractéristiques mécaniques et deux peaux externes de hautes caractéristiques mécaniques. L'âme est prise en sandwich entre les deux peaux en conférant, ainsi, au matériau sandwich moins de poids et de bonnes propriétés mécaniques. D'où leur utilisation dans le cadre des structures nécessitant à la fois la légèreté et la rigidité.

1.1.3. Matrices

La matrice assure la liaison entre les fibres, répartit les charges, apporte la tenue chimique et donne la forme désirée au produit composite.

Selon l'utilisation à laquelle le matériau composite est destiné, nous pouvons choisir entre les matrices céramiques, métalliques et organiques.

- **Matrices céramiques** : les céramiques sont connues pour leur résistance aux hautes températures et leur stabilité chimique. Cependant, elles sont fragiles et lourdes. Par conséquent, leur utilisation avec des fibres longues est consacrée aux usages spécifiques.
- **Matrices métalliques** : les métaux sont réputés par leurs propriétés électriques et de transfert de chaleur. Par ailleurs, leur utilisation, avec des fibres courtes en tant que matériau composite, est peu répandue.
- **Matrices organiques** : c'est le type de matrices le plus utilisé dans le monde industriel. Elles sont compatibles avec la majorité des fibres sur le marché en plus de leur facilité de mise en œuvre et leur bon rapport qualité-prix. Les matrices organiques sont regroupées sous deux grandes familles :
    - Matrices thermoplastiques (TP) : elles sont présentes à l'état vierge sous forme de chaînes linéaires qu'il faut chauffer pour mettre en forme et refroidir pour fixer, ce cycle est réversible. Il est à noter que leur : stockage est illimité, tenue au choc est assez bonne, tenue thermique est réduite et mouillabilité des renforts est difficile. Nous en citons :
        - Polyamide (PA) : tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures ;
        - Polytéréphtalate éthylénique et butylénique (PET, PBT) : bonne rigidité et bonne ténacité ;

- Polypropylène (PP) : peu onéreux et assez stable en température, mais combustible.

- Matrices thermodurcissables (TD) : elles ont une forme tridimensionnelle qui construit des doubles liaisons de polymérisation pour durcir en forme, de façon irréversible, lors d'un échauffement. Il est à signaler que leur : stockage est réduit, tenue au choc est limitée, tenue thermique est bonne et mouillabilité des renforts est aisée. Nous en citons :
  - Polyesters insaturés : c'est la résine la plus utilisée dans l'application composite de grande distribution. Il en existe différents types : orthophtalique qui est la plus courante, isophtalique qui donne une meilleure tenue à l'humidité, chlorée qui apporte une autoextinguibilité, bisphénol qui possède de bonnes caractéristiques chimiques et thermiques. En général, les résines polyesters représentent une bonne accroche sur les fibres de verre, elles sont translucides, elles ont une bonne résistance chimique, elles permettent une mise en œuvre facile, elles démontrent une tenue en température (>150 °C) et leur prix est réduit. Par contre, elles sont inflammables (sauf les résines chlorées), elles ont une faible tenue à la vapeur et à l'eau bouillante, elles présentent un retrait important (6 à 15%), leur durée de conservation en pot est limitée et elles émettent du styrène.
  - Vinylesters : ces résines possèdent une bonne résistance à la fatigue et un excellent comportement à la corrosion, mais elles sont combustibles.
  - Phénoliques : elles se caractérisent par une bonne tenue au feu sans fumée, mais elles sont fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à colorer et à mettre en œuvre.
  - Epoxydes : elles sont destinées à la fabrication des composites hautes performances HP. Nous distinguons deux classes de résines en fonction du durcissement à chaud ou à froid, de la tenue en température (120-130 °C ou 180-200 °C). Ces résines offrent une bonne tenue mécanique, thermique, chimique et en fatigue, elles représentent un faible retrait (1 à 2%), elles assurent une excellente adhérence sur les fibres, elles sont auto-extinguibles et elles ont une mise en œuvre facile sans solvant. Par ailleurs,

leur prix est élevé, elles sont sensibles à l'humidité, aux UV et aux chocs, elles vieillissent sous température et elles ont un long temps de polymérisation.

1.1.4. Performances mécaniques des composites

En termes d'exigences industrielles, les pièces composites offrent des caractéristiques mécaniques meilleures que celles de certains équivalents métalliques. Au final, nous obtenons des pièces aux performances souhaitées avec un poids léger. C'est le constat présenté dans ce tableau :

Tableau 1-1 : Comparaison entre les caractéristiques mécaniques des métaux, des composites à matrice organique et des composites à matrice métallique [3]

caractéristiques	**Métaux**			**Composites à matrice organique**					**Composites à matrice métallique**
	Acier 35NCD16	Alliage aluminium AU4SG	Alliage titane TA6V	Bore époxy	Carbone HR époxy	Carbone HM époxy	Aramide époxy	Verre époxy	Bore aluminium
Résistance à la rupture (MPa)	1850	500	1000	2000	1000 à 1300	1000	1300 à 1800	1800 à 2000	1250 à 1800
Module d'Young (GPa)	200	72	110	220	130	200	75	53	230
Masse volumique (g/cm^3)	7.9	2.8	4.45	2.1	1.5	1.7	1.37	2	2.7
Résistance à la rupture massique (Km)	24	18	23	95	65 à 85	60	95 à 130	90 à 100	45 à 65
Module d'Young massique (Km)	2500	2600	2500	10500	8700	11800	5500	2650	8500
Coefficient de dilatation linéique (K^{-1}) Longitudinal Transversal	12.10^{-6} 12.10^{-6}	23.10^{-6} 23.10^{-6}	- -	- -	$-0.2.10^{-6}$ 35.10^{-6}	$-0.8.10^{-6}$ 35.10^{-6}	$-0.5.10^{-6}$ 60.10^{-6}	6.10^{-6} 31.10^{-6}	- -
Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$) Longitudinale Transversale	40 40	170 170	- -	- -	4.2 0.7	55 1.3	- -	- -	- -
Capacité thermique massique ($J.Kg^{-1}.K^{-1}$)	450	900	-	-	840	840	-	-	-
Résistivité (Ωm) Longitudinale Transversale	$0.4.10^{-6}$ $0.4.10^{-6}$	$0.03.10^{-6}$ $0.03.10^{-6}$	- -	- -	40.10^{-6} 66.10^{-3}	20.10^{-6} 100.10^{-3}	- -	- -	- -

Le tableau ci-après présente les propriétés mécaniques d'un exemple de fibres naturelle et synthétique prises toutes seules, d'une résine dans son état initial et d'un produit composite fabriqué à partir de ces dits éléments :

Tableau 1-2 : Comparaison entre les caractéristiques mécaniques des composites à fibres végétales et synthétiques [4]

	Densité	Module d'Young longitudinal (GPa)	Module d'Young transversal (GPa)
Lin	1.5	54.1±15.1	7.0±2.0
Verre	2.5	70.3±5.8	70.3±5.8
PP	0.9	1.7±0.03	1.7±0.03
Lin-PP	1.03	4.27	
Verre-PP	1.13	4.53	

L'élément essentiel relevé par ce tableau est que même avec des fibres naturelles nous pouvons obtenir quasiment les mêmes performances qu'avec des renforts synthétiques. Notamment en mettant en avant l'aspect biodégradable et en favorisant le recyclage du matériau composite élaboré.

1.1.5. Charges et additifs

De manière globale, les charges sont utilisées pour améliorer les propriétés intrinsèques du matériau, tandis que les additifs sont utilisés pour faciliter sa mise en œuvre.

1.1.5.1. Charges

Elles sont présentes en quelques dizaines de pourcents. Il en existe deux familles :

- Charges renforçantes : sont utilisées dans le but d'améliorer les propriétés de la résine. Elles sont soit sous forme sphérique et qui servent à diminuer la concentration des contraintes, soit non sphérique et qui sont destinées aux applications électriques ou électroniques ;
- Charges non renforçantes : ont comme objet de réduire le coût de la résine ou d'en améliorer quelques propriétés. Il y a des charges de faible coût extraites de roches ou de minerais (carbonates, silices, …) ; des charges ignifugeantes qui servent à empêcher les phénomènes de combustion (hydrate d'alumine, oxyde d'antimoine, …) ; des charges

conductrices et antistatiques sont ajoutées sous forme de poudres ou paillettes métalliques (aluminium, fer, …), de microbilles de verre métallisées (cuivre, argent, …), des particules de carbone ou de filaments métalliques.

1.1.5.2. Additifs

Ils sont utilisés à faible quantité et interviennent comme :

- Lubrifiants et agents de démoulage : ils facilitent le façonnage de la résine et aident à son démoulage ;
- Pigments et colorants : ils sont insolubles et disponibles sous forme de poudres ou de paillettes, ils servent à colorer la résine ;
- Agents anti-retrait et agents de fluage : ces produits sont appelés 'low profile' et 'low shrink', ils diminuent le retrait et améliorent l'écoulement de la résine ;
- Agents anti-ultraviolets : ils ont le rôle d'absorber le rayonnement ultraviolet et donc en protéger la résine.

1.2. Procédés de mise en œuvre des matériaux composites

1.2.1. Généralités sur les procédés de mise en œuvre

Le grand développement qu'ont connu les matériaux composites a été accompagné par l'évolution de leurs procédés de mise en œuvre. Par conséquent, une panoplie de ces derniers a été construite au fil du temps et qui peut être classée en deux grandes catégories : les procédés par voie sèche et ceux par voie humide.

La première catégorie concerne les procédés qui utilisent les pré-imprégnés (prépreg). En effet, une préforme fibreuse imprégnée en résine, en amont du procédé, est déposée dans le moule. Dans ce cas, les dimensions de la pièce finales sont maîtrisées, ainsi que ses propriétés mécaniques. En revanche, le coût d'utilisation des prépreg est élevé, notamment le prix de la matière première et le coût de stockage.

Quant à la deuxième catégorie, elle correspond au cas où la résine imprègne la préforme fibreuse au cours du procédé de mise en œuvre. Ce type de procédé a apparu pour réduire le coût de la mise en œuvre par voie sèche tout en assurant la bonne qualité du produit final.

Une des plus intéressantes familles de voie humide est celle appelée LCM (Liquid Composite Molding) dont plusieurs brevets et innovations ont été enregistrés, afin de répondre à toute exigence industrielle en termes de géométrie et de caractéristiques mécaniques des pièces mises en œuvre.

1.2.2. Procédés LCM

La technologie LCM a été destinée initialement aux productions à faible coût, dans l'automobile et le transport maritime. Par ailleurs, ce type de procédés a prouvé ses capacités auprès des industriels et a suscité l'intention, surtout, des entreprises opérant dans le domaine aérospatial. En effet ; la grande majorité des pièces aéronautiques sont mises en œuvre par le biais du procédé autoclave, c'est un procédé qui donne certes des pièces composites de haute qualité, mais qui reste encore trop cher. C'est dans ce sens que les procédés LCM interviennent, afin de produire des pièces de haute qualité satisfaisant les exigences de ce domaine, tout en réduisant les coûts liés à la production.

Ce type de procédés comporte essentiellement deux phases :

- Imprégnation : compression du flux de résine, déplacement d'air, mouillage des fibres et transfert thermique ;
- Polymérisation : effet du transfert thermique.

Ses étapes sont le préformage, la compression, le remplissage, la polymérisation et le démoulage (Fig.1-7). La deuxième et la troisième étape s'avèrent les plus critiques parmi les autres. En effet ; le préformage est préparé en amont du procédé, le démoulage est l'extraction de la pièce à la fin du procédé et la polymérisation c'est le fait de laisser cuire la pièce composite. Par contre, la compression et le remplissage sont conditionnés par différentes lois mécaniques et physicochimiques qui nécessitent des études approfondies et qui feront objet de notre travail, en particulier l'étape de remplissage.

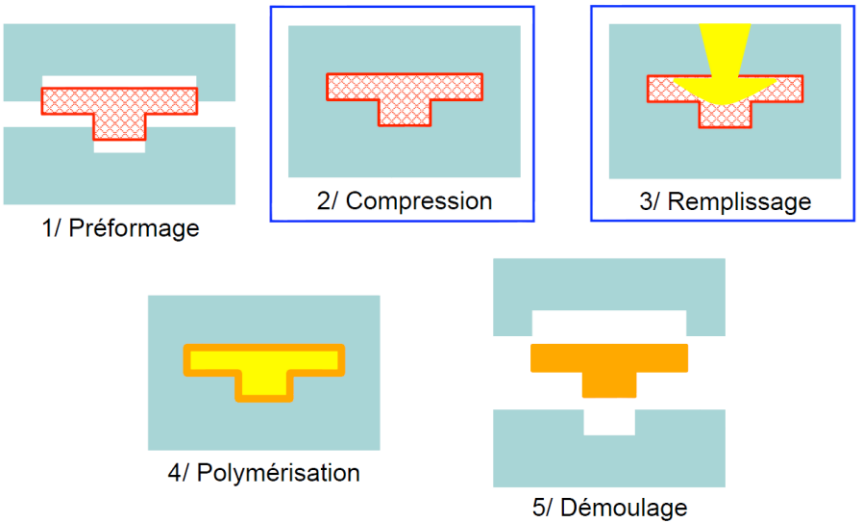


Figure 1-7 : Etapes des procédés LCM

Il existe plusieurs procédés appartenant à la famille LCM, notamment RTM (Resin Transfer Molding), VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding), CRTM (Compression Resin Transfer Molding), RTM-Light (Resin Transfer Molding Light), FASTRAC (FAST Remotely Actuated Channeling), LRI (Liquid Resin Infusion), SCRIMP (Seemann Composites Resin Infusion Molding Process), VARI/VARIM (Vacuum Assisted Resin Infusion Molding), RFI (Resin Film Infusion), etc.

Le mode d'infiltration de la résine divise les procédés cités précédemment en deux sous familles ; soit par infusion ou par injection :

- Le principe de la première catégorie repose sur la création de vide dans la cavité du moule et donc la résine est infusée dans la pièce sous effet de la pression atmosphérique, c'est le VARI. L'infusion peut aussi être assistée par un réseau de canaux préférentiels actionnés à distance (FASTRAC), par l'utilisation d'un milieu drainant (LRI) souvent appelé SCRIMP dans le domaine nautique et par l'infusion de résine disposée en films intercalés entre les couches du renfort (RFI).
- Dans la deuxième catégorie, nous citons le moulage par transfert de résine (RTM), le moulage par transfert de résine light (RTM-Light), le moulage par transfert de résine sous vide (VARTM) et le moulage par compression (CRTM). Le RTM et ses dérivées utilisent la gravité, le déplacement d'un piston ou le différentiel de pression créé par une pompe pour faire avancer la résine dans la cavité via le port d'injection.

1.2.3. Procédé RTM

Dans ce travail nous nous intéressons tout particulièrement au procédé RTM. Dans cette technique de mise en œuvre, les différentes couches des renforts sont prédisposées au préalable dans un moule. Une fois celui-ci est fermé, tout en appliquant une pression externe, nous procédons à l'injection de la résine jusqu'à l'imprégnation complète de la préforme. La chronologie de ce procédé est décrite dans la figure (Fig.1-8) qui suit :

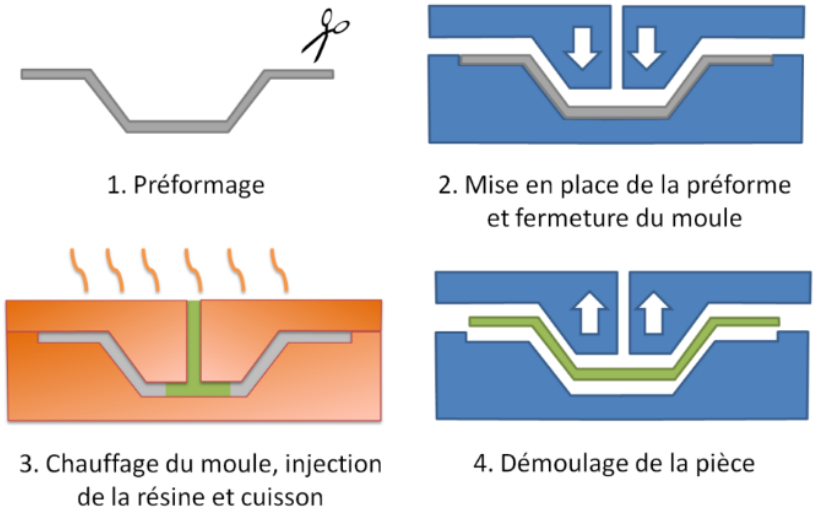


Figure 1-8 : Etapes du procédé RTM

Les pressions et les débits d'injection utilisés en RTM sont respectivement de l'ordre de : 0.1 à 0.4 MPa (1 à 4 bar) et de 4 à 8 kg/min. Le choix de ces paramètres est défini en fonction de la viscosité de la résine, du taux volumique du renfort, ainsi que de la forme et la dimension de la pièce.

Les résines employées ont des viscosités de l'ordre de 0.1 à 1.0 $Pa.s$ et peuvent être chargées avec des carbonates de calcium par exemple. La quantité maximale que l'on puisse ajouter est de 50 pp pour 100 pp de résine.

Les renforts peuvent être des mats à fils coupés ou à fils continus et des tissus. Par ailleurs, les mats à fils continus qui sont les plus utilisés.

En termes d'équipements, le coût des moules est très variable selon leur conception et leur matière. Dans ce type de procédés, l'équipement périphérique pour la manipulation des moules et

l'organisation du poste de travail est très important dans l'investissement. Il y a deux conceptions :

- Le moule est à porte fixe avec un système d'ouverture-fermeture qui peut être aussi bien un treuil (pour lever le substrat) qu'une presse très simple. La machine d'injection vient alimenter le moule, généralement pour la fabrication de pièces sans gel coat (pour la finition) et de grandes dimensions ;
- Le moule se déplace sur un circuit avec des arrêts correspondant à chaque étape importante du cycle de moulage. Cette conception est souvent retenue pour les pièces avec gel coat et plusieurs moules correspondant aux différents types de pièces.

Comme l'injection se fait sous faible pression ($< 10\ bars$) cela constitue la première limitation de ce procédé. En effet, un tel inconvénient peut induire la création de bulles et de vide. La seconde limitation réside dans le fait que l'utilisation de fibres longues entraine un temps de remplissage important. Généralement la résine utilisée est peu visqueuse (0.1 à $1.0\ Pa.s$) et la fraction volumique moyenne en fibres est comprise entre 50 et 60%. Ces deux contraintes, en plus du degré de complexité de la géométrie de la pièce, les interactions matrice/renfort et la taille du moule, sont les éléments influents sur le temps de remplissage de la cavité en RTM. Le taux de rebut assez élevé représente la troisième limitation de ce procédé. Au fait, la faible reproductivité de celui-ci fait que le nombre de pièces rebutées augmente. Néanmoins, le RTM peut être utilisé pour une large gamme de produits. En addition, les moules ne sont pas très coûteux, ce qui représente une bonne accroche de point de vue économique. Par ailleurs, le point le plus important dans le procédé RTM est l'automatisation de ses étapes ce qui le rend attractif industriellement et donc économiquement. D'où la large utilisation dudit procédé dans différents domaines : aéronautique, automobile et matériel agricole.

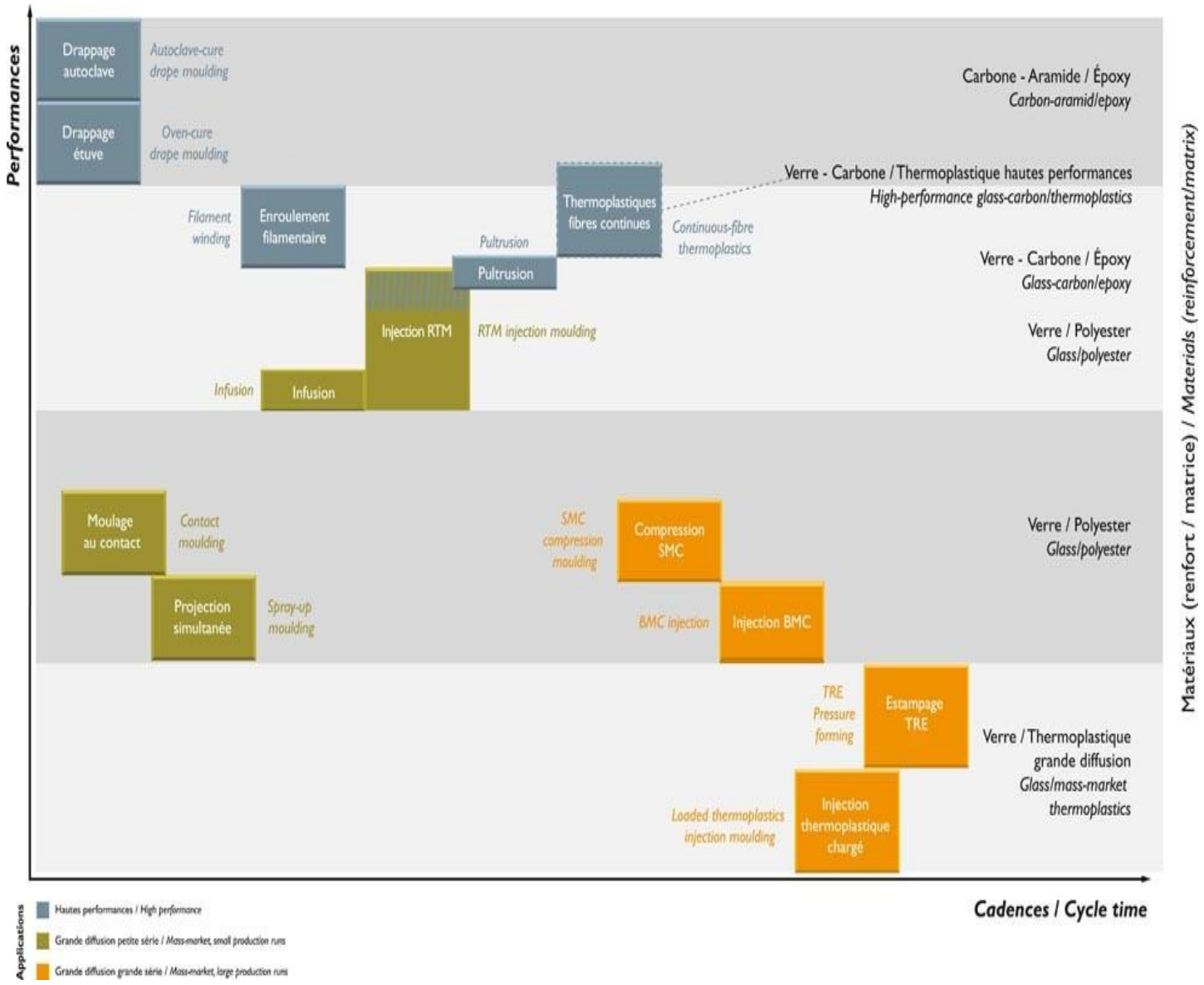


Figure 1-9 : Procédés de mise en œuvre des composites : performances, cadences et matériaux [5]

Ainsi, le RTM est un procédé de grande diffusion et petite cadence, il est situé parmi les procédés de mise en œuvre des matériaux composites qui ont de bonnes performances et des cadences de production moyennes (Fig.1-9).

1.3.Défauts dans les composites

Bien que les procédés de mise en œuvre des matériaux composites sont variés et peuvent être adaptés pour un large étendu d'attentes industrielles, ils sont cependant limités dans certains cas par la difficulté de production des pièces de bonnes caractéristiques mécaniques et de meilleure

qualité en termes de santé matière. D'où l'intérêt de cette partie, dans laquelle nous allons lister brièvement les défauts les plus fréquents et parcourir quelques causes d'apparition.

1.3.1. Zones riches et pauvres en résine

L'élaboration d'un composite à partir d'une préforme qui comporte une distribution de fibres non uniforme, peut conduire à la création de zones riches/et ou pauvre en résine (Fig.1-10). Ce type de défauts est généralement constaté dans les pièces issues des procédés utilisant des fibres courtes dont leur orientation est difficile à contrôler.

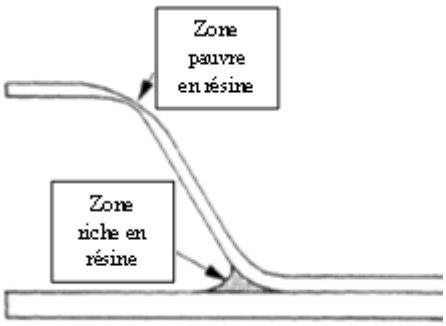


Figure 1-10 : Défaut de zones riche et/ou pauvre en résine [6]

1.3.2. Déformations résiduelles

Durant le cycle thermomécanique de mise en œuvre, les fibres et la matrice subissent des variations dimensionnelles d'origines thermique et chimique qui peuvent mener au développement de contraintes résiduelles (Fig.1-11). Ces dernières donnent naissance aux déformations résiduelles qui dégradent la qualité des pièces produites.

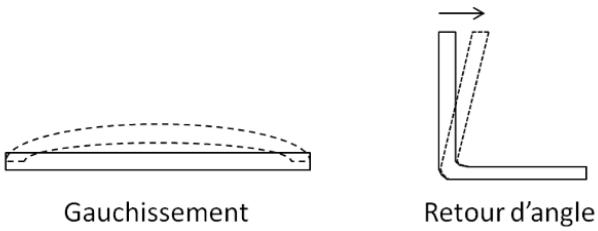


Figure 1-11 : Déformations dues aux contraintes résiduelles [7]

1.3.3. Gonflement (blister)

C'est lorsque la surface de la pièce se gonfle et/ou se détache (Fig.1-12). Ce défaut est causé principalement par la présence de gaz sous pression dans le substrat. Egalement il peut apparaître suite à une mauvaise imprégnation ou une incorrecte valeur de la viscosité de résine.

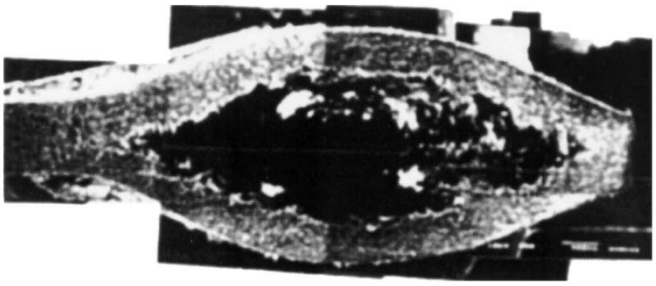


Figure 1-12 : Défaut de gonflement d'un matériau composite thermoplastique [8]

1.3.4. Flambement

Flambement ou flambage (Fig.1-13) est un phénomène d'instabilité d'une structure qui est soumise à un effort normal de compression, et qui a tendance à fléchir et se déformer dans une direction perpendiculaire à l'axe de compression. C'est le passage d'un état de compression à un état de flexion.

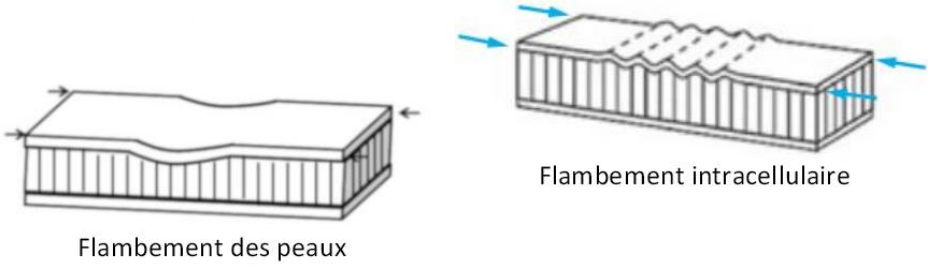


Figure 1-13 : Défaut de flambement d'un sandwich [9]

1.3.5. Délaminage

C'est le mécanisme de rupture qui se caractérise par un décollement ou une décohésion entre plis du stratifié et se produit à l'interface fibre-matrice (Fig.1-14). En effet, un stratifié soumis à un chargement présente différentes étapes de dégradation où la matrice et l'interface sont les premières à se détériorer. Ainsi, les premiers défauts sont la microfissuration de la matrice et la

décohésion fibre-matrice à l'échelle microscopique. Ensuite, ces micro-défauts coalescent et se rejoignent pour former des fissurations transverses. Sous l'effet des contraintes interlaminaires, les fissurations transverses provoquent le délaminage.

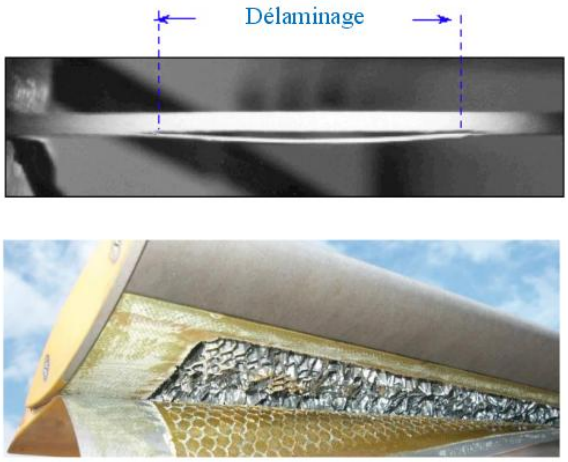


Figure 1-14 : Défaut de délaminage dans une structure composite [9]

1.3.6. Fracture

C'est une rupture dans la structure qui passe à travers tout le substrat (Fig.1-15). Elle peut être causée par une présence insuffisante de renforts, par une vitesse d'injection rapide, par un temps de cuisson court, etc.

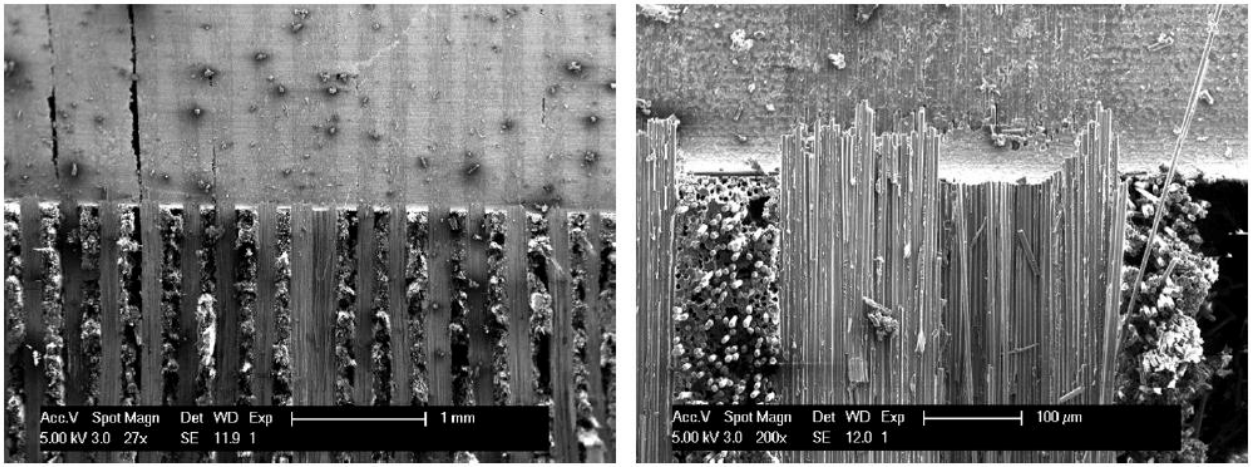


Figure 1-15 : Défaut de fracture dans un composite [10]

1.3.7. Vides

Les défauts de type vides peuvent être présents à l'échelle macroscopique et microscopique. La première catégorie est connue sous le nom des zones sèches, tandis que la deuxième est appelée les bulles d'air.

1.3.7.1. Zones sèches

Ce sont des zones par lesquelles la résine n'a pas passée ou les endroits où l'air a été emprisonné, elles sont de l'ordre du centimètre (Fig.1-16). Les causes principales de ce problème sont le choix des positions des seuils d'injection et des évents, la complexité du moule et la gélation prématurée de la résine.

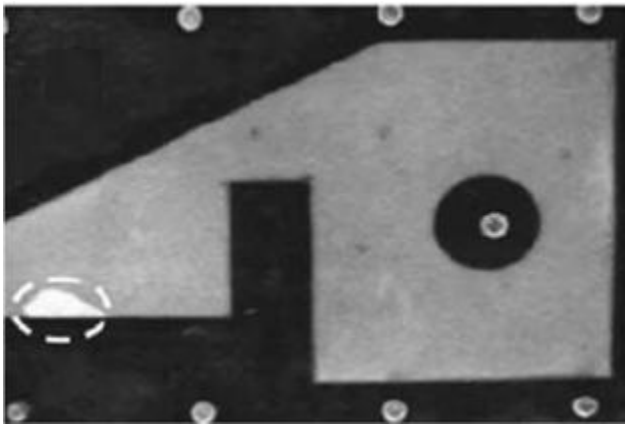


Figure 1-16 : Défaut de vides de type zone sèche [11]

1.3.7.2. Bulles d'air

A l'échelle microscopique, les préformes composites comportent des macros et micro-canaux, dont les premiers sont entre les mèches et les seconds sont entre les fibres dans les mèches. Par conséquent, nous distinguons entre les macros et les micro-bulles d'air, qui se développent respectivement dans les macros et les micropores (Fig.1-17). En revanche, leurs causes de création sont identiques. Parmi ces dernières nous citons la vitesse d'injection, la quantité initiale de l'air contenue dans la résine, la pression à l'évent et la qualité du mouillage.

Durant l'injection la résine emprunte des cheminements préférentiels de manière à rendre le mouillage non uniforme. Par conséquent et en addition des autres causes, des bulles d'air apparaissent et donc fragilisent la structure du composite et affectent sa santé matière.

Des études expérimentales ont montré que des propriétés mécaniques tels que le cisaillement interlaminaire, la résistance à la flexion et le module de flexion diminuent de plus de 5% avec chaque augmentation de 1% du taux de vide. Le vide diminue aussi la durabilité et la résistance à la fatigue des matériaux composites et augmente leur érosion et absorption d'humidité [12].

Ainsi, la présence du vide notamment celui des bulles d'air pose un énorme problème dans l'élaboration des pièces composites de structure. D'où la nécessité d'étude et du développement scientifique afin d'y remédier. Notre travail s'inscrit dans ce cadre et concerne plus spécifiquement l'étude des vides lors de la mise en œuvre des pièces composites par le procédé RTM.

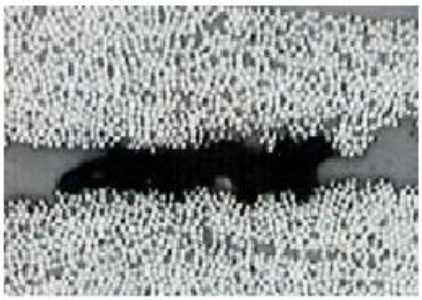
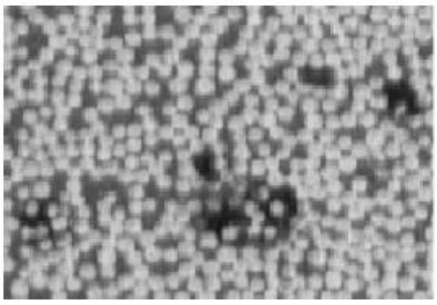
a)   b)

Figure 1-17 : Défaut de vides de type bulles d'air, a) Echelle macro, b) Echelle micro [13]

1.4. Conclusion

Ce chapitre présente une introduction aux matériaux composites, leurs procédés de mise en œuvre et leurs défauts les plus répandus.

Dans un premier temps, nous avons donné un ensemble de généralités sur les matériaux composites. Ensuite, nous avons présenté quelques propriétés mécaniques des matériaux composites à fibres naturelles et synthétiques, et nous avons conclu que les renforts biodégradables peuvent présenter une alternative des renforts synthétiques. Les ressources naturelles ne sont pas assez développées pour remplacer complètement les ressources synthétiques, cependant elles sont sur une voie prometteuse.

L'échelon suivant était celui des procédés de mise en œuvre. Une fois la matière première est définie, alors la méthode de fabrication prend le devant. Nous les avons classés par mode d'imprégnation, soit voie sèche avec les prépreg ou humide avec l'écoulement de résine. Nous étions focalisés sur la famille LCM et plus précisément le procédé RTM. En effet, ce dernier a

monté dans la classification des procédés de mise en œuvre des matériaux composites qui offrent un bon compromis en termes de qualité-prix (performance-cadence).

La suite du chapitre a été menée sur la présentation des défauts qui se forment dans le matériau composite lors de sa mise en œuvre. De nombreux défauts existent, mais nous en avons cité que les plus fréquents en association avec les causes principales d'apparition. Notamment les défauts de type vides et plus spécifiquement les bulles d'air.

A ce stade, les éléments essentiels à notre étude ont été définis. En effet ; ce présent travail concerne les préformes unidirectionnelles à matrice et renforts synthétiques mises en œuvre par le procédé RTM, nous traitons spécifiquement le problème des bulles d'air à la double échelle de pores.

Après cette introduction aux éléments nécessaires à la problématique étudiée, nous allons nous intéresser dans le prochain chapitre à une étude bibliographique sur la thématique des bulles d'air.

Sommaire du Chapitre 2

2.1. Bibliographie 61

2.2. Contribution de l'équipe composite du LOMC 65

2.2.1. Etude des défauts de type vides pour la maîtrise du procédé RTM 66

2.2.2. Mécanismes d'imprégnation en milieux fibreux.....71

2.2.3. Modélisation et simulation de la saturation en milieux fibreux à double échelle de pores 74

2.2.4. Analyse expérimentale de la saturation des milieux fibreux à double échelle de pores 76

2.2.5. Contribution à la compréhension de la formation de défauts d'élaboration par RTM d'un composite stratifié Carbone/Epoxy 79

2.3. Limitations et apports 82

2.4. Approche numérique 83

2.4.1. Principe de modélisation 83

2.4.2. Méthodes numériques 84

2.5. Conclusion 87

Chapitre 2 : *Etat de l'art*

L'étude de la problématique des défauts de type bulles d'air a été abordée dans plusieurs travaux. Dans ce chapitre, nous allons présenter une étude bibliographique des contributions expérimentales et numériques relatives à la modélisation de cette thématique. Ensuite, un récapitulatif des travaux qui ont été menés dans notre laboratoire sur ce sujet sera donné. Puis, une discussion concernant les limitations des contributions existantes et les apports proposés par ce présent travail sera conduite. Et enfin, l'approche numérique employée pour réaliser celui-ci sera explicitée.

2.1.Bibliographie

Les bulles d'air s'incorporent dans les pièces composites au cours de leur mise en œuvre. En effet; ces bulles sont présentes initialement dans la résine et au moment d'injection de cette dernière, elles peuvent s'installer dans la pièce ou être évacuées par les évents. De même que le chauffage de la résine ou la cuisson de la pièce, contribuent aussi à la création des bulles d'air par effet d'évaporation. Mais c'est surtout l'architecture de la préforme du composite qui favorise le plus le phénomène du piégeage des bulles d'air lors de l'avancée de la résine au cours de l'injection. C'est à ce dernier point que l'étude bibliographique suivante va être consacrée.

La problématique de création de bulles d'air a été soulevée pour la première fois par Damani et Lee [14] en 1990. Ils se sont intéressés au principe d'identification des effets de surface par le biais des traitements thermiques et des changements du couple matrice/fibre pour analyser la chimie et la microstructure à l'interface. A partir des analyses par macroscopie optique, ils ont constaté que le trajet parcouru par l'écoulement micro est plus long que celui traversé par l'écoulement macro (Fig.2-1). Ces auteurs expliquent ce fait par la différence de cheminement en périphérique de la mèche et en intra-mèche, en l'occurrence la différence de vitesse qui fait piéger des bulles d'air à l'intérieur du liquide.

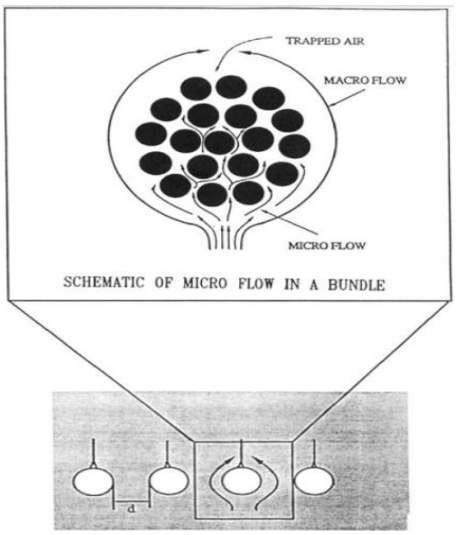


Figure 2-1 : Schématisation du flux de liquide entre les fibres [14]

Ce constat a été également remarqué par Parnas et Phelan [15]. Dans le cadre d'une injection transverse sur un mat, les auteurs ont constaté le lien entre la création des bulles d'air et la vitesse du front de liquide. Egalement Peterson et Robertson [16] et [17] ont étudié la création des bulles d'air en utilisant des tissus de fibres de verre. Ils ont conclu que la non-homogénéité locale de la distribution des fibres est la cause principale du piégeage de ces bulles. En effet ; ils ont argumenté cette conclusion par le fait que la non-homogénéité, surtout avec une faible fraction volumique des fibres, génère des espacements entre les fibres et favorise la création des bulles d'air. Mahale et al [18] ont abordé ce même sujet pour une préforme non tissée de fibres de verre, mais en utilisant une nouvelle technique de visualisation qui se base sur l'indice d'iso-réfractivité. Ils ont constaté qu'au-delà d'un nombre capillaire de $2.5\ 10^{-3}$ il n'y a pas de bulles créées, par contre au-dessous de celui-ci, plus le nombre capillaire diminue plus le taux de création des bulles d'air augmente. Les mêmes constatations qui établissent le lien entre le phénomène de création et le nombre capillaire ont été confirmées par les essais expérimentaux de Patel et al [19] avec un mat de fibres de verre. Puis il y a eu le travail de Chen et al [20] qui a proposé une modélisation du phénomène de création des bulles d'air également, mais en tenant compte de l'effet de la pression capillaire. Ensuite, Chan et Morgan [21] ont appliqué la même approche pour un renfort unidirectionnel dont le flux est injecté parallèlement aux fibres. Ce travail a associé la différence de temps de remplissage avec la double échelle de pores. En 1996, Patel et Lee [22] ont réalisé des expérimentations pour visualiser la formation des bulles d'air au cours de l'injection. A partir de ces visualisations ils ont élaboré un modèle numérique estimant

la quantité de bulles d'air piégées, avec lequel ils ont simulé une injection longitudinale d'une préforme bidirectionnelle. Leur modèle fait appel à deux paramètres d'ajustement : la distance caractéristique L_{bridge} qui illustre le pont permettant le passage du liquide vers la direction transversale et la saturation critique S_{cri} qui représente la valeur à partir de laquelle le liquide envahit le canal suivant. Un an plus tard, Kang a engagé une avancée importante sur le volet numérique [23]. Dans ce travail, la description du phénomène de création des bulles d'air à double échelle de pores est basée sur la comparaison des temps de remplissage de chaque capillaire afin d'en déduire la nature de la bulle d'air piégée : si le macro-capillaire est rempli avant le micro, alors des micro-bulles d'air vont être piégées ; si le micro-capillaire est rempli avant le macro, alors des macro-bulles d'air vont être formées ; si les deux capillaires se remplissent au même temps, alors aucune bulle d'air ne sera créée. L'approche numérique et la logique de programmation ont été également bien détaillées dans ce travail. Sur la base de cette dernière contribution, Kang et al [24], Lee et al [11] et Park et al [13] ont développé leurs travaux concernant la création, la minimisation, le transport et la compression des bulles d'air. Le premier travail [24] porte sur l'explication du mécanisme de formation des bulles d'air au cours du procédé RTM. Au fait, les auteurs ont détaillé le processus qui décide du type de la bulle piégée, ils ont exposé les expressions des temps de remplissage des capillaires à double échelle de pores et en les comparant, la nature de la bulle d'air est déduite. En d'autres termes, si le temps nécessaire au macro-capillaire pour qu'il soit rempli est inférieur à celui nécessaire au micro, alors une micro-bulle d'air sera formée ; dans le cas contraire, une macro-bulle d'air sera créée. Le deuxième travail [11] cerne le phénomène de transport des vides et la minimisation de leur taux final. Pour la première partie, les auteurs ont utilisé le modèle de Eun [25] pour modéliser le mouvement des micro-vides. C'est un modèle expérimental qui repose sur la comparaison des vitesses de la résine et de l'air. En effet, si la vitesse de celui-ci dépasse une vitesse critique de la résine, alors ces vides seront en mouvement et donc ils vont être transportés. Quant à la seconde partie, elle propose des stratégies de minimisation des taux de vides micros (bulles d'air macros et micros) et macros (zones sèches). Afin de réduire le contenu en micro-vides, les auteurs ont suggéré d'agir sur la pression d'injection. En changeant cette dernière, la vitesse des vides est régulée de façon à rester dans la fenêtre de processibilité où la quantité des micro-vides est minimale. D'un autre côté et dans le but de minimiser les zones sèches, les auteurs ont suggéré deux différentes stratégies selon la position du front de résine. La première est issue de la

comparaison entre l'expérimental et le numérique afin d'assurer un front de flux uniforme. En réalisant la simulation numérique d'un cas idéalisé, l'expérience a été ajustée en fonction des résultats prédits par la simulation. La méthode consiste dans un premier lieu en la collecte des temps de passage du flux via des capteurs reliés à un ordinateur. Puis, la comparaison de la position du front, si celui-ci est en avance/retard par rapport à celui prédit par la simulation, alors la zone en question a une faible/forte perméabilité, d'où la nécessité d'augmenter/diminuer la valeur de la pression du point d'injection le plus proche. A la fin de la manipulation, les valeurs des pressions d'injection qui permettent d'obtenir un front de flux uniforme sont déduites. En effet, un front de flux uniforme réduit le taux de création des vides. La seconde stratégie proposée sert comme deuxième remède si la première n'est plus efficace, dans le cas des pièces à géométries complexes par exemple. Les auteurs proposent de comparer le numérique et l'expérimental en activant ou pas des points d'injection et des évents auxiliaires. Par conséquent, si une zone sèches est détectée, alors l'évent et le point d'injection les plus proches sont actionnés. De cette manière, les vides seront repoussés à l'extérieur de la pièce et donc un taux minimal de vide peut être obtenu. Dans le même but de minimisation du taux de création des bulles d'air, Ruiz et al [26] ont réalisé un travail qui se base sur l'identification du nombre capillaire optimal. C'est un paramètre qui nous renseigne sur la partie la moins poreuse de la pièce produite et donc nous oriente vers les conditions d'injection optimales. En effet, lorsque ce paramètre est déterminé soit expérimentalement soit numériquement, alors la vitesse optimale est déduite en l'occurrence le débit d'injection minimisant le taux de bulles d'air. La valeur de ce nombre capillaire optimal reste constante même si les caractéristiques géométriques de la préforme changent. Le troisième travail [13] traite la compression des bulles d'air en différenciant entre l'échelle macro et micro. En effet, la pression de la résine dans un macro-capillaire exerce des efforts de compression sur la bulle, ce qui réduit sa taille initiale. En revanche, à l'échelle micro, toutes les pressions sont prises en compte pour modéliser la compression des micro-bulles d'air. Notamment la pression de la résine, la pression capillaire et la pression de l'air à l'intérieur de la bulle. C'est l'action de ces éléments qui réduit la taille des micro-bulles d'air. Dans ce cas, nous parlons plutôt du phénomène de saturation de la mèche. En 2006 Binetruy et al [27] ont proposé un nouveau modèle numérique permettant la prédiction de la saturation de la préforme fibreuse. Cette grandeur fait référence à la qualité d'imprégnation de la pièce mise en œuvre. Leur modèle repose sur la comparaison de la pression du liquide avec une

pression critique. En effet ; si cette première pression est supérieure à la dernière alors l'élément considéré est saturé, sinon il faut tenir compte de l'effet de la compression pour calculer la nouvelle pression du liquide à comparer encore une fois avec la pression critique. Les résultats obtenus ont été validés expérimentalement, en considérant un renfort UD de verre. Un autre travail de cet auteur en collaboration avec d'autres [28] est dédié à la prédiction du taux de vides. Les auteurs de cette publication ont traité le passage de 1D à 2D, par le biais de l'angle entre la direction du front du flux et les mèches transverses. En effet ; ils ont exprimé le volume insaturé en fonction du taux de fibres et de ce dit angle. Ainsi, des profils de saturation ont été obtenus.

La revue bibliographique présentée ci-dessus présente un ordre chronologique non exhaustif de l'évolution des travaux de recherche au niveau expérimental et numérique par rapport à la problématique de l'étude des bulles d'air lors de la mise en œuvre des structures composites. Notamment la visualisation expérimentale du phénomène de création de ce type de défauts et sa simulation numérique, par le biais d'évaluation des temps de remplissage des macros et micros capillaires. Egalement la modélisation du phénomène de transport des bulles d'air à l'échelle micro, à l'aide de l'estimation des vitesses de la résine et de l'air, par le biais d'une démarche empirique. Aussi, la modélisation du phénomène de compression des bulles d'air, en respectant la double échelle de pores ; à savoir la compression des macro-bulles d'air et la saturation de la mèche à l'échelle micro. Puis, quelques stratégies de minimisation des taux de vides présents dans les pièces composites structurales produites, qui ont été présentées selon différentes optiques. Enfin, des modèles numériques de prédiction de la saturation des préformes fibreuses simulées, qui représentent un bon accord avec l'expérimental et qui renseigne sur la qualité d'imprégnation des préformes.

La suite de cette étude bibliographique est dédiée aux travaux qui ont été menés au sein du Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (LOMC, UMR CNRS 6294) du Havre, sur ce sujet.

2.2. Contribution de l'équipe composite du LOMC

L'équipe composite du LOMC est reconnue par ses travaux menés sur la modélisation des défauts de type "bulles d'air" lors de la mise en œuvre des composites. Il nous a donc paru naturel d'établir un récapitulatif de ces travaux afin de positionner le cadre de travail de cette thèse.

Ces travaux ont débuté par la thèse de Ludovic Labat (Labat et al [29] et [30]). La présentation de ces derniers sera plus détaillée que les autres. Ensuite, nous enchaînons par la description de la contribution de Ben Abdelwahed et al [31] et [32] qui ont abordé, surtout, la caractérisation physico-chimique et géométrique des éléments mis en jeu lors de l'injection. Après, nous allons nous intéresser à la modélisation numérique des phénomènes de formation, compression et transport des bulles d'air, qui ont été étudiés dans le travail de Lebel et al [13] et [33]. Par la suite, nous allons présenter les travaux de Guéroult et al [34] et [35], qui ont combiné la conception des capteurs et la réalisation des mesures expérimentales pour l'étude de ces défauts. Enfin, nous clôturons cette revue avec le travail de thèse d'Arnaud [36] qui est orienté vers la compréhension de la création des défauts d'élaboration par RTM et leurs effets sur les propriétés thermomécaniques des pièces composites mises en œuvre.

2.2.1. Etude des défauts de type vides pour la maîtrise du procédé RTM

La première thèse entreprise dans notre équipe sur ce sujet est celle de Labat, elle avait comme objectif : la détermination expérimentale et analytique du taux de vides lors de la mise en œuvre par RTM d'une pièce composite, sous différentes conditions d'injection [29] et [30].

L'aspect analytique de ce travail repose sur l'élaboration d'un algorithme permettant la quantification du pourcentage des bulles d'air existantes dans la pièce. L'auteur s'est basé sur les travaux de Patel et Lee [22] :

$$V_M(X,t) = -A' - B'.\log\left(q_f(t)\right) \qquad (2-1)$$

$$V_m(t) = A" + B".log(q_f(t)) \qquad (2-2)$$

Les auteurs constatent que les pourcentages des macro-vides dépendent du temps et de la position, cela s'explique par le fait qu'il y a une pression critique à partir de laquelle le taux des macros devient nul [37].

L'estimation de la vitesse du front est calculée à partir de la loi de Darcy qui exprime la vitesse en fonction du gradient de pression :

$$\vec{q} = -\frac{\overline{\overline{K}}}{\mu}\vec{\nabla}P \qquad (2-3)$$

Ce travail a été mené dans le cadre d'une injection en nappe, plus précisément dans le cas d'une injection unidirectionnelle. Alors la relation de Darcy peut s'écrire sous la forme suivante :

$$q(X,t) = -\lambda \frac{\partial P(X,t)}{\partial X} \qquad (2-4)$$

Tel que $\lambda = \frac{K}{\mu}$ est le coefficient de mobilité.

Les expériences effectuées et la simulation exécutée ont été menées sous la condition d'une injection à pression imposée. Le même raisonnement peut être adopté pour une injection à débit imposé.

Les constations relevées pour la présentation des premiers résultats en fonction de la vitesse, sont:

- Au départ, il y a une vitesse importante, alors le taux de micro-vides est élevé ;
- Puis au fur et à mesure que la vitesse diminue, le taux de micro-vides décroit aussi ;
- Jusqu'à ce que nous arrivons à une certaine position de la préforme où nous n'avons pas de bulles, ni macros ni micros ;
- Ensuite, il y a l'apparition des macro-vides. Cela s'explique par le fait que la vitesse est assez faible pour que la pression locale devienne inférieure à la pression critique [37], et par conséquent le pourcentage des macro-vides n'est plus égal à zéro.

La zone de transition du micro vers le macro, correspond à la fenêtre de processabilité. C'est une région dans laquelle aucun vide n'est présent en aucun endroit de la plaque. En se référant au jargon actuel, cette fenêtre correspond au voisinage du nombre capillaire optimal.

Afin de valider ses résultats analytiques, l'auteur a réalisé des expérimentations en essayant de respecter les conditions considérées pour obtenir les lois empiriques issues de la littérature. L'expérience a été réalisée pour trois différentes valeurs de pression d'injection. L'évaluation du taux de vides était faite par un logiciel de traitement d'images. Comme ils ne pouvaient pas visualiser ce qui se passe dans la partie inférieure de la pièce, les auteurs se sont limités à compter que les bulles apparentes entre la face supérieure de la préforme et la vitre.

La comparaison entre le numérique [22] et l'expérimental [29] et [30], a été conduite uniquement par une validation qualitative et non quantitative des résultats obtenus. D'autre part, Patel et Lee

[22] ont travaillé avec l'huile DOP, or les expériences de Labat ont été réalisées avec de la glycérine. Par conséquent, les taux de création et la fenêtre de processabilité ne sont pas les mêmes. Cependant, l'existence de cette dernière ainsi que la chronologie de la création sont confirmées. En conséquent, les résultats numériques sont validés expérimentalement.

Le majeur point faible dans cette étude est la manière avec laquelle les bulles sont détectées. Se contenter d'une vitre transparente pour détecter ces bulles n'est pas suffisant, d'où la nécessité de la mise en place d'un capteur de mesure in situ des taux de vides au cours de l'injection, c'est ce qui a amené l'auteur au deuxième objectif de sa thèse. Il a opté pour la conductivité électrique comme moyen de détection des bulles d'air. De ce fait, il a fallu mettre au point un capteur qui permet la mesure de la conductivité du liquide d'imprégnation et des bulles d'air que la préforme peut contenir.

Après avoir identifié les différentes composantes, il a fallu ensuite choisir une résine qui répondra à la fois aux exigences expérimentales (par rapport à l'injection) et physique (par rapport à la détection). Le point de départ était que les fibres de verre et les bulles d'air sont isolantes. Alors il fallait utiliser un liquide modèle conducteur d'origine ou que nous pouvons rendre conducteur par ajout de charges conductrices. Vu qu'il devait travailler avec des liquides à viscosité constante (donc des fluides Newtoniens), alors le choix de résine devient contraignant. Le choix optimal était la glycérine comme résine et le chlorure de potassium KCl comme agent conducteur. Puis il a passé à l'application dans le moule. Les résultats étaient satisfaisants sauf l'identification de deux problèmes :

- La taille du capteur est presque égale à celle des grosses bulles, alors la mesure sera affectée par le passage des vides de grandes tailles ;
- Les électrodes utilisées étaient en platine, un métal très couteux, alors il fallait trouver un autre substituant.

La solution était l'utilisation d'un capteur en laiton de 5x100 mm². C'est moins cher et ses dimensions moyennent le taux de bulles d'air. Il a été placé transversalement à l'écoulement, par conséquent la densité de bulles mesurée va être moyennée.

A la fin, l'auteur a mis au point un dispositif de mesure de conductivité électrique qui a été adapté à l'échelle du laboratoire. D'où la nécessité de l'optimisation de la nature, la taille et la fréquence

du courant d'alimentation du capteur. Les courbes résultats relevées étaient sous forme d'une présentation de la tension électrique mesurée au fil du temps.

A ce stade de l'étude, Labat et al se sont intéressés à l'établissement de la relation entre le taux de bulles et les variations de la tension mesurée. D'où la formulation d'une relation reliant la résistance électrique du milieu et le taux de la matière isolante, tout en menant un calcul mathématique en considérant des bulles de forme sphérique :

$$\Re(x) = \frac{4}{3}\rho\frac{R_{sp}}{A}\frac{1}{\zeta}\sqrt{\frac{\zeta}{\frac{2}{3}-\zeta}}arctan\sqrt{\frac{\zeta}{\frac{2}{3}-\zeta}} \qquad (2-5)$$

Expérimentalement l'auteur a remplacé les bulles d'air par des billes de verre sphériques, puis il a représenté la tension en fonction du pourcentage de verre (bulles intégrées).

Pour arriver à comprendre la signature de la tension électrique expérimentale, Labat a fait des mesures dans le liquide sans bulles, en admettant l'hypothèse que la vitesse reste constante pendant le mouillage du capteur. Bien entendu, l'ajout des bulles diminue la valeur de la tension.

En analysant l'expression mathématique traduisant la relation entre la tension électrique et la fraction volumique de l'air, nous déduisons que la saturation est proportionnelle à la différence des deux courbes de tension avec et sans bulles. Chose qui envoie vers la détermination du profil de la saturation au cours de l'injection.

Le pont qui lie la saturation et la tension est la valeur théorique maximale de cette dernière V_{max}. Commençons d'abord par le calcul deV_{max}. Pour y arriver il a fallu réaliser une expérience en statique pour laquelle la préforme sera entièrement saturée de liquide. Notamment une absence totale de bulles en fin d'injection, un outillage bien fait et positionné en plus de conditions expérimentales idéalisées. Comme une solution remplissant, d'une manière satisfaisante, ces contraintes, Labat a effectué les mesures en pratiquant le Bleeding et en optimisant les paramètres expérimentaux et l'outillage. Cette expérience a été réalisée dans le moule du laboratoire avec le capteur original étudié précédemment.

En analysant les courbes de la tension et de la pression, toutes les deux tracées en fonction du temps, nous pouvons traduire mathématiquement les phénomènes observés au cours de

l'injection. Par conséquence, nous pouvons déduire l'expression de la tension maximale en fonction de la tension et la pression en deux points distincts.

Afin de convertir la courbe de la tension en fonction du temps, en saturation en fonction de la position, l'auteur a supposé que pour un temps court le profil de la saturation ne change pas. D'un côté, et en utilisant la loi de Darcy donnant la valeur de la vitesse, il peut déduire la position Δx par une intégration de la vitesse entre t et t+Δt. D'où le passage du temps à la position. D'un autre côté, et en remplaçant x(t) dans l'expression liant la résistance du milieu et le taux de bulle, il trouve la formule qui donne la saturation en fonction de la tension. D'où la transformation de la tension en saturation (Fig.2-2).

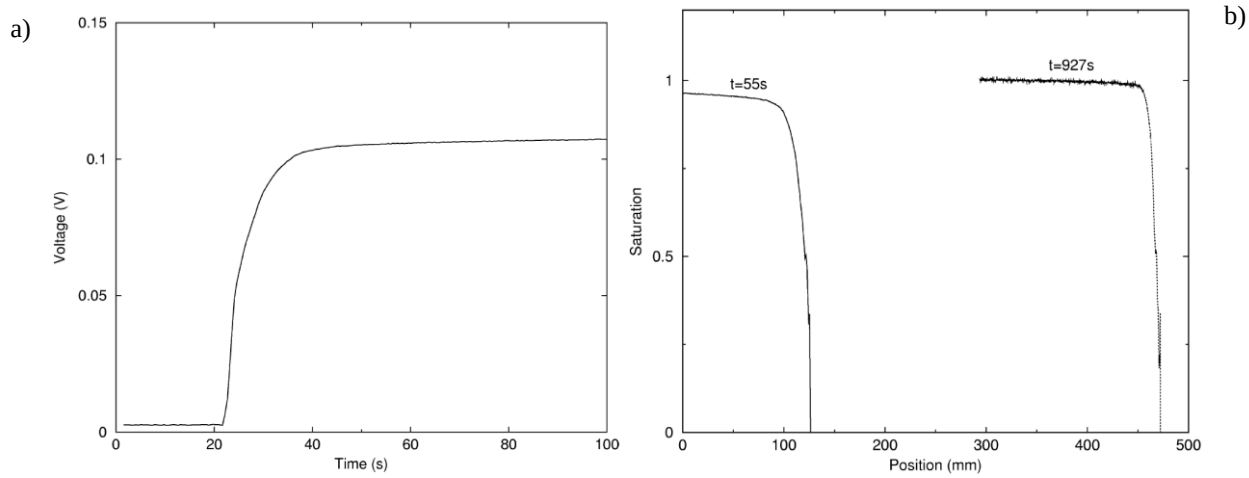


Figure 2-2 : a) Evolution du signal électrique en fonction du temps au passage du front de résine, b) Evolution de la saturation en fonction de la position longitudinale [29]

Conclusion :

Ce travail a mis les premières briques dans le large des composites, que ça soit au niveau théorique ou expérimental pour l'étude des défauts de type "bulles d'air". Le premier apport était d'établir un algorithme qui donne le taux de vides en fonction de la position du front de résine. Puis la mise en place d'un capteur de détection des bulles d'air par perturbation de conductivité. L'étape suivante était de comprendre les courbes résultantes en traduisant la tension électrique mesurée en variation du taux de bulles. Ensuite, il y avait la notion de saturation et l'établissement de courbes estimant la valeur de cette grandeur en chaque position de la préforme. Le dernier point à préciser, est celui de la concordance entre le théorique et l'expérimental dans chaque phase de développement.

2.2.2. Mécanismes d'imprégnation en milieux fibreux

Dans sa thèse [32], Ben Abdelwahed s'est intéressé à l'amélioration des mécanismes d'imprégnation d'un renfort fibreux, notamment lors des procédés de mise en œuvre LCM, en se focalisant sur l'étude des anomalies type bulles d'air. Afin d'éviter les difficultés rencontrées lors de la visualisation au sein du renfort, le choix de l'étude a été limité sur des réseaux modèles. Une analyse multi-échelle a été adoptée pour les expérimentations faisant appel à une approche micro et millifluidique où les forces de mouillabilité sont prépondérantes.

Le travail de Ben Abdelwahed [31] et [32] a été initié par la détermination des tensions de surface et des angles de contact à l'équilibre, afin de caractériser la mouillabilité et l'adhésion entre les phases liquide et solide, qu'il va traiter par la suite.

Pour la mesure de la tension de surface, il a appliqué la méthode de Wilhelmy [38] et celle de Du Noüy, qui ont donné quasiment les mêmes résultats et qui correspondent bien aux données fournisseurs des liquides utilisés (huiles silicone et le mélange eau/glycérol).

Quant à l'estimation des angles de contact à l'équilibre, il a utilisé la méthode de la goutte pendante comme première approche afin de quantifier cette grandeur pour un liquide modèle sur un substrat lisse. Comme projection de la mesure de l'angle de contact à l'équilibre sur les matériaux composites, il a fallu considérer un milieu fibreux imprégné par une résine. De ce fait, il a fait appel à la loi de Jurin, en l'appliquant sous différentes configurations.

Le dernier élément qu'il a mesuré est le diamètre des fibres. Il est à noter que toutes ces mesures étaient effectuées selon deux approches : soit en adoptant l'étude en visuel, qui est une méthode fiable et précise, mais qui est peu adaptée aux géométries complexes comme celles des structures composites. Soit en optant pour l'approche de pesée qui est nécessaire pour la caractérisation des mécanismes d'imprégnation, sauf qu'elle nécessite des corrections de calcul.

Lors de l'injection, nous sommes bien en mode dynamique, car le liquide se met en mouvement pour qu'il imprègne la préforme fibreuse. Notamment la dynamique du mouillage concerne le déplacement de la ligne de contact triple entre les trois phases existantes au cours d'une injection, à savoir : solide, liquide et vapeur ou l'air environnant avant l'atteinte de l'équilibre. D'où la notion de l'angle de contact dynamique, qui décrit le comportement de cette ligne et par conséquent le mécanisme d'étalement d'un liquide sur une surface solide.

Cette dynamique peut être spontanée, due uniquement aux forces appliquées mutuellement par le liquide et le solide ; ou forcée, où l'on impose une vitesse à la ligne de contact triple. Dans les deux cas, l'angle de contact dynamique est fonction d'une combinaison des phénomènes physico-chimiques intervenant lors de l'écoulement. Le modèle adopté pour décrire ce qui se passe au cours de l'injection est celui de Washburn ; en outre la formule la plus utilisée est celle de Tanner-De Gennes qui donne l'angle de contact dynamique en fonction du nombre capillaire.

La complexité des structures composites a amené l'auteur à étudier de près les milieux fibreux et leurs espaces porales afin de modéliser la progression capillaire d'un liquide mouillant dans une préforme en fibres de verre quasi-unidirectionnelles. Pour y arriver il a étudié la progression capillaire verticale sur deux échelles de pores (micro et macroscopique), et il a constaté que les macro-canaux servent de réservoirs d'alimentation pour les micro-canaux qui gouvernent la majore partie de l'écoulement UD. Ce qui fait que le front de liquide micro et en avance par rapport au macro, ceux-ci est dû à la compétition entre deux pressions de ménisques dans deux porosités interconnectées.

Cette dernière conclusion représente l'explication physique des phénomènes de formation et de transport des bulles d'air. Quant à la formation, elle passe par quatre étapes : d'abord la croissance de la bulle au voisinage de son site de nucléation, puis son glissement où elle croit lentement, ensuite la phase durant laquelle apparait un col de détachement et enfin le détachement complet de la bulle d'air. En ce qui concerne le transport, le calcul de la vitesse était la première étape à entamer.

En relation avec le phénomène de formation, Ben Abdelwahed a réalisé des expériences pour pouvoir caractériser les bulles d'air. C'est une caractérisation géométrique donnant la longueur de la bulle, la distance entre deux bulles successives et le diagramme de formes de bulles, illustrant les différentes formes géométriques adoptées par la bulle au cours de son parcours vers l'évent. Ce qui permet la compréhension du phénomène physique de création des bulles d'air.

La vitesse du liquide est calculée par la loi de Darcy. Quant à la vitesse des bulles, l'auteur a proposé une relation qui exprime cette dernière en fonction de la vitesse du liquide et du nombre capillaire (Eq.2-6). La formule a été validée expérimentalement. En connaissant la vitesse de déplacement des bulles, l'approximation du phénomène de transport sera accessible.

$$\frac{u_b - u_l}{u_b} = \frac{2.2\,(Ca^{**})^{2/3}}{1 + 3.4\,(Ca^{**})^{2/3}} \qquad (2-6)$$

Le problème majeur que l'on peut rencontrer lors de l'injection dans des milieux fibreux à double échelle de porosité, est la présence du chemin préférentiel de l'écoulement dans la préforme. La compétition entre les pores est la cause majeure de ce problème. En se référant à la littérature, Panfilova a proposé un modèle à connectivité aux nœuds [39] et Bico a travaillé sur un modèle parallèle [40]. Ben Abdelwahed, dans sa thèse [32] et puis dans un article dont il est co-auteur [41], a étudié les deux modèles séparément et a proposé un modèle combinant les deux configurations, soit en régime libre spontané, ou en régime forcé à pression imposée.

Le modèle parallèle pris seul favorise la création de macro-bulles, vu que le macro-canal permet l'alimentation en liquide du micro-canal. Or le modèle à connectivité aux nœuds, lui seul favorise la création des micro-bulles, du moment où le chemin préférentiel du liquide sera le macro-canal. En combinant les deux modèles : connectivité parallèle puis connectivité aux nœuds, il y aura donc toujours formation de macro-bulles d'air dans la première partie, cependant c'est la combinaison des paramètres d'injection qui décidera du type de bulles d'air que nous allons avoir à la fin de la seconde partie. En d'autres termes : c'est selon la valeur des grandeurs physiques et géométriques (pression, vitesse, dimensions des canaux, …), que nous pouvons dire que l'écoulement dans le micro-canal a gardé son avance, dans la partie de connectivité aux nœuds, ou il a été rattrapé par celui dans le macro-canal, et aussi si ce dernier va maintenir sa position ou il va être dépassé encore une fois. C'est exactement la notion de compétition entre les pores, mais qui est bien encadrée et qui englobe tous les paramètres clés de l'injection ; et c'est elle qui va nous renseigner sur le type de bulles d'air que nous allons créer.

Conclusion :

Le travail de Ben Abdelwahed a porté, dans un premier temps, sur une caractérisation physico-chimique (tension de surface et angle de contact à l'équilibre et dynamique) et géométrique (dimension et vitesse) des éléments clés de l'écoulement. Puis il a étudié en détail la notion de double échelle de pores notamment la notion de compétition entre les pores. Ce qui lui a permis de proposer un modèle combiné pour modéliser l'espace poral dans un milieu fibreux. Ce modèle est appelé le Pore Doublet Model (PDM).

2.2.3. Modélisation et simulation de la saturation en milieux fibreux à double échelle de pores

C'est un sujet de simulation numérique, qui a comme objectif de modéliser les phénomènes de formation, de compression et de transport des bulles d'air dans les préformes fibreuses à double échelle de pores [13] et [33]. Plus précisément, notre travail de thèse se positionne dans la continuité de ceux-ci.

La première partie de la thèse de Lebel [33] concernait la modélisation de la formation des vides à l'échelle macroscopique. Deux types d'analyse peuvent être mis au point lors de la simulation de l'injection : une analyse monophasique dans laquelle la présence de l'air dans le moule n'est pas prise en compte, et une autre diphasique où l'air est pris en considération, par conséquent, lors de l'injection, les bulles d'air ont tendance à se comprimer.

La formule empirique de Darcy a souvent été la base des travaux de modélisation dans le domaine de la simulation de la mise en œuvre des composites par le procédé RTM. Puis en la combinant avec l'équation de continuité, nous arrivons à tirer les premières ficelles de la démarche qui mène à la modélisation de l'écoulement de résine dans les milieux fibreux.

Le traitement numérique employé dans le cadre du travail de thèse de Lebel, repose sur l'approche CVFEM (Control Volume Finite Element Method) combinée à la méthode FINE (Floating Imaginary Nodes and Elements) développée par Kang [42] et Shin [43]. C'est une approche basée sur des éléments finis associés aux volumes de contrôle et dont le point fort est l'intégration de volumes de contrôle fictifs dans le but de raffiner le maillage et d'avoir une description plus précise sur l'avancée et la position du front de résine.

Le principe de formation des bulles d'air est la compétition entre les pores, comme il a été prouvé expérimentalement dans le travail de Ben Abdelwahed [31]. Pour formuler cette conclusion avec un langage compréhensible par la machine, l'auteur a opté pour la comparaison entre les temps de remplissage inter et intra mèches. Par conséquent ; si le temps de remplissage inter-mèches est inférieur à celui intra-mèches, alors il y aura formation de micro-bulles d'air ; sinon, il y aura création de macro-bulles d'air. Quant à l'estimation des taux macros et micros, elle est définie en fonction des paramètres influençant sur les quantités calculées (perméabilités, pressions, …). Sur une échelle en nombre capillaire, Lebel a représenté les taux macros et micros créés sous

différentes pressions d'injection et en considérant une étude en 1D et en 2D. Toutes les représentations convergent vers le fait que les courbes commencent par les macro-bulles d'air, puis elles arrivent à un minimum où nous avons zéro bulle, et ensuite elles remontent en pourcentage de micro-bulles d'air (Fig.2-3). Ce sont des courbes en V qui ont été validées expérimentalement par le travail de Gueroult [34], et qui rejoignent les premières constations de Labat [29], aussi bien pour la fenêtre de processabilité qu'au niveau de la chronologie de création.

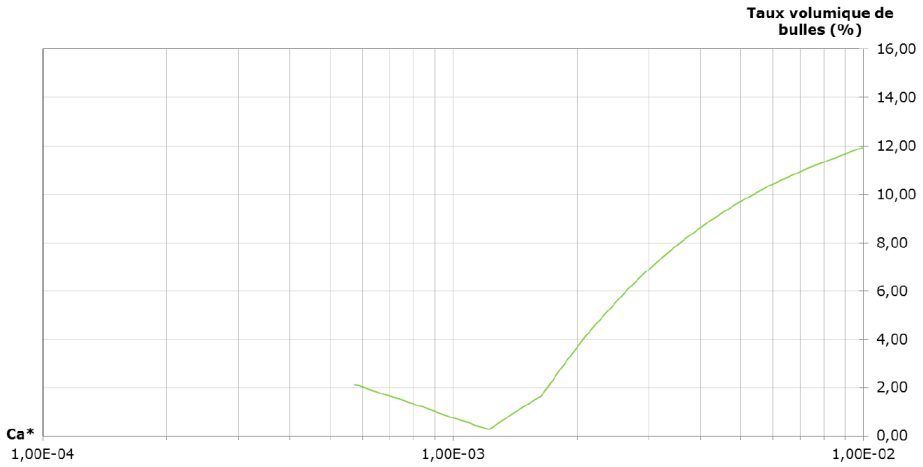


Figure 2-3 : Taux volumique de vides global en fonction du nombre capillaire modifié Ca* ($P_{inj} = 2.7\ bar$) [33]

La compression des macro-bulles est régit par la loi des gaz parfaits. En l'appliquant, l'auteur a obtenu un profil décroissant de pression tout au long de la préforme. Cela est logique, du moment que lorsqu'on s'éloigne des points d'injection, la pression devient de plus en plus faible. Quant aux micro-bulles d'air, elles sont comprimées par le biais de la saturation dans la mèche. C'est une combinaison des paramètres physiques (perméabilités, taux de vides, …) et géométriques (dimensions de la mèches) qui entre en jeu pour déterminer la pression de la micro-bulle d'air au sein de la mèche et après passage du liquide. Avec le même raisonnement, Lebel a trouvé une allure décroissante de la pression en fonction de la position.

Le phénomène de transport est relié étroitement à la vitesse de déplacement des bulles d'air. Afin d'estimer la valeur de cette quantité, l'auteur a utilisé un modèle phénoménologique proposé par Eun [25] et Lee [11]. Il est basé sur une comparaison entre la vitesse du liquide et celle des bulles

d'air, et il fait appel à une vitesse critique à partir de laquelle les bulles se déplacent plus vite que le liquide, d'où le transport de ces dernières.

***Conclusion* :**

Ce travail de thèse [33] concernait la modélisation de la formation et la compression des bulles d'air. La première est basée sur la compétition entre les pores et la comparaison entre les temps de remplissage des micros et macro-canaux. Puis la seconde est décrite par la loi des gaz parfaits au niveau des macro-vides et par la saturation de la mèche pour les micro-vides. Puis enfin, le transport a été initialisé par l'évocation de la comparaison entre la vitesse du liquide et celle des bulles d'air, dans le but de déterminer la vitesse critique à partir de laquelle il y aura le phénomène de transport.

2.2.4. Analyse expérimentale de la saturation des milieux fibreux à double échelle de pores

Le travail de thèse de Gueroult se divise en deux grandes parties. La première concerne la conception d'un capteur de détection de la présence des vides, et la deuxième porte sur la réalisation des mesures de la saturation et de la pression [34] et [35].

Le capteur de conductivité, conçu auparavant par Labat [29], était limité par le choix du liquide et de la préforme. Notamment si le liquide d'injection n'est pas conducteur, comme c'est le cas de l'huile silicone généralement utilisée, alors nous aurons une faible conductivité, quasi nulle, entre le liquide isolant et l'air. D'un autre côté, si la préforme est conductrice, comme les fibres de carbone par exemple, alors cette faible résistance initiale avant l'arrivée du liquide va bruiter le signal. Ainsi, le remplacement de ce capteur de conductivité s'avère nécessaire. Gueroult l'a remplacé par un capteur diélectrique (Fig.2-4) en se basant sur les caractéristiques dipolaires du matériau isolant utilisé pour l'injection.

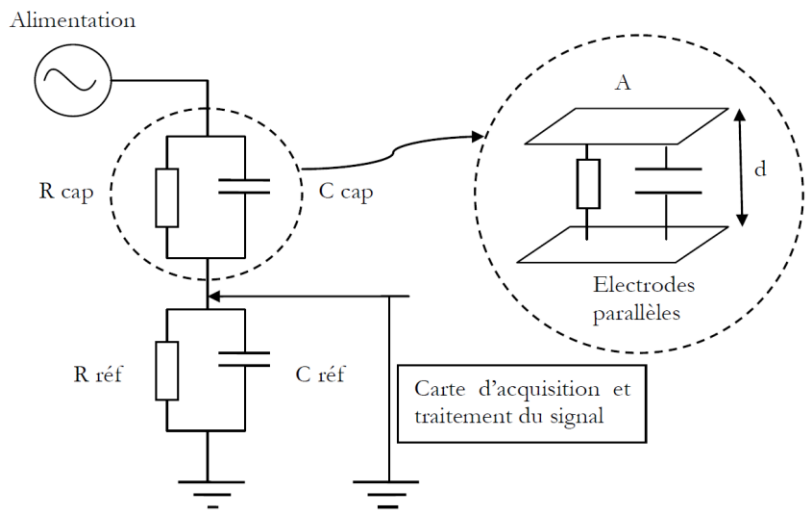


Figure 2-4 : Schéma du montage électrique du capteur diélectrique [35]

Pour la mesure de la saturation, il a fallu instrumenter le moule, mettre en place tous les capteurs bien étalonnés et installer le matériel d'acquisition. Ce montage qu'a réalisé l'auteur, lui a permis de caractériser la préforme (la perméabilité saturée et l'espace poral en UD) et le liquide modèle (la viscosité et l'angle de contact dynamique). La même démarche qu'a suivie Labat pour tracer la saturation a été reproduite par Gueroult afin d'obtenir des courbes d'évolution en fonction du temps et de la position.

Les résultats expérimentaux donnant le taux de vides créés en fonction du nombre capillaire, étaient confirmés numériquement dans le travail de Lebel [33] ; ce sont les fameuses courbes en V. Gueroult a aussi introduit la notion de la 'marche', qui représente le taux de vides transportés en fonction de la position. C'est la notion qui a été étudiée, après, par Arnaud [36] et qui décrit la partie de la pièce où il y a le minimum de bulles et la zone qui en contient le taux maximal (Fig.2-5).

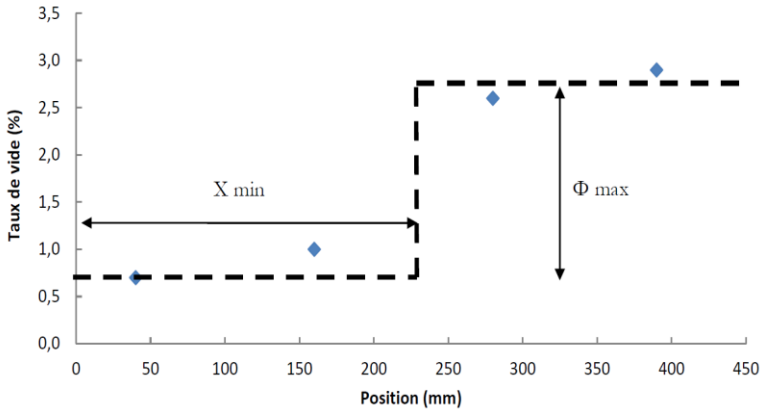


Figure 2-5 : Taux de vide en fonction de la position après saturation maximale (eau/glycérol et débit de $1.7\ cm^3/min$) [35]

Dans le but de mesurer les valeurs de pression, l'auteur a doté le moule par des capteurs de pression. Puis il a tracé des courbes de pression en fonction du temps et de la position, sous différentes conditions d'injection. Ce qui lui a permis de déduire une expression générale des profils de cette grandeur :

$$P(x,t) = \alpha e^{-\beta t} x^2 - \left(\frac{P_0}{x_f} + \alpha e^{-\beta t} X_f\right) x + P_0, \text{à pression imposée} \qquad (2-7)$$

$$P(x,t) = \alpha e^{-\beta t} x^2 - \frac{Q_{inj}\mu}{AK} x + \left(\frac{Q_{inj}\mu}{AK} X_f - X_f^2 \alpha e^{-\beta t}\right), \text{à débit imposé} \qquad (2-8)$$

Où α et β sont deux paramètres expérimentaux.

Par la suite, Gueroult s'est intéressé à la mesure de la pression capillaire avec l'introduction de la double échelle de pores et de la rugosité.

Le dernier paramètre traité dans ce travail concerne la mesure de la perméabilité. L'auteur a réalisé des mesures de cette grandeur en régime saturé, et il en a déduit l'évolution de la perméabilité relative en fonction de la saturation en se basant sur les relations de pression déjà établies.

Conclusion :

Le travail de Gueroult a couplé en même temps la conception de capteurs et la mesure de certaines grandeurs. D'abord il a mis en place des capteurs de détection de bulles d'air et des

capteurs de pression, puis il a passé aux expérimentations. Les résultats obtenus lui ont permis de présenter le pourcentage des bulles d'air créées en fonction du nombre capillaire : courbe en V, le taux des bulles transportées en fonction de la position : courbe en marche, le profil de la pression au niveau du front de résine, l'évolution de la pression capillaire et les valeurs de la perméabilité saturée et celle relative.

2.2.5. Contribution à la compréhension de la formation de défauts d'élaboration par RTM d'un composite stratifié Carbone/Epoxy

Comme tout travail expérimental sur des structures composites, celui d'Arnaud [36] a commencé par la caractérisation du couple fibre/matrice qu'il a utilisé dans son étude. Notamment, la présentation des différents constituants des plaques composites qu'il a testées, ainsi que leur méthode d'élaboration. En effet ; l'auteur a réalisé une caractérisation thermique (enthalpie massique de la réaction de la résine), rhéologique (viscosité) et physique (tension de surface) de la matrice et a décrit le moule instrumenté utilisé et doté des capteurs de pression, de flux et de température. C'est à partir de ces éléments que Arnaud a pu suivre les paramètres réels d'élaboration pendant toutes les étapes de cuisson de la pièce mise en œuvre.

Dans son travail de thèse, Arnaud s'est intéressé à deux sujets : l'influence des défauts d'élaboration par RTM sur le comportement hygrothermique et l'abattement des propriétés thermomécaniques. Le premier sujet consiste en l'étude de la santé matière des plaques composites précédemment élaborées. Tandis que le second concerne l'analyse mécanique des composites de référence.

La caractérisation hygrothermique a été réalisée par le biais de l'analyse thermogravimétrique (ATG) et l'analyse couplée de la thermomécanique différentielle (DMTA) et la calorimétrie différentielle (DSC). L'auteur a effectué ses analyses sur les plaques composites de référence (sans défauts), et il a déterminé les températures de dégradation, d'utilisation et le degré de polymérisation de celles-ci. Ensuite, il a orienté son intention vers l'analyse de la porosité. Il a employé la technique des ultrasons et l'attaque chimique afin de quantifier cette grandeur. En effet ; les plaques ont été analysées à l'aide du dispositif contrôle non destructif (CND) multiélément qui a permis de réaliser deux enregistrements avec des amplifications distinctes. Les données issues des capteurs ont été traitées par le logiciel Matlab afin de reconstruire l'image

de la plaque mise en œuvre. Egalement, des cartographies C-Scan ont été réalisées dans le but de représenter l'évolution du taux de défauts et leur répartition au sein des pièces injectées à différents débits. Afin de traduire l'atténuation des signaux ultrasonores obtenus par analyse C-Scan, en termes de taux volumétrique de vides, l'auteur a procédé aux attaques acides. Ces dernières permettent de quantifier le taux volumique des vides. Ainsi, l'auteur a présenté la teneur globale des vides en fonction de la position sur toute la longueur de la plaque (Fig.2-6). Cette représentation rejoint celle de Gueroult [35].

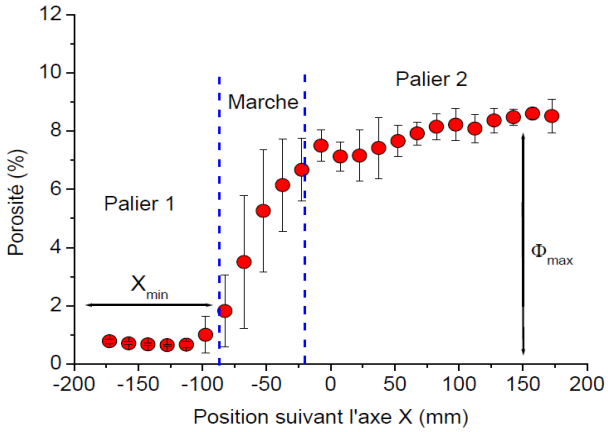


Figure 2-6 : Taux volumiques de vides moyennés sur la longueur de la plaque en fonction de la position [36]

Arnaud a continué cette caractérisation de la porosité par l'étude de la morphologie des vides par tomographie X. A partir des résultats obtenus, il a classifié les vides en plusieurs typologies selon leurs volumes (Tab.2-1) et il a réalisé une étude statique sur leur fréquence de présence dans la plaque en fonction du débit d'injection et du taux volumique des vides. L'auteur a également entrepris la même démarche de classification de ce type de défauts vis-à-vis de son rapport d'aspect (RA) et il en a déduit trois types (Tab.2-2).

Tableau 2-1 : Classification des vides selon leurs volumes [36]

Type	1	2	3	4	5
Volume des vides (μm^3)	8.10^3-1.10^5	1.10^5-1.10^6	1.10^6-1.10^7	1.10^7-1.10^8	$> 10^8$

Tableau 2-2 : Classification des vides selon leurs rapports d'aspects [36]

Type	1	2	3
RA	≈ 1	< 5	> 30

Enfin, l'auteur a clôturé cette partie par l'étude du vieillissement hygrothermique sur les plaques qu'il a précédemment réalisées.

Quant à l'analyse mécanique, elle a été réalisée en deux temps. D'abord des sollicitations quasi-statiques en cisaillement interlaminaire, traction uniaxiale et en flexion pure par flambement pour des éprouvettes non poreuses, puis poreuses. Suivies ensuite par des essais de chargement et déchargement en flexion par flambement. L'auteur a entamé le premier volet en employant les données recueillies sur le vieillissement hygrothermique et l'émission acoustique. En réalisant ces différents essais, Arnaud a déduit la courbe de chaque sollicitation, en donnant les images MEB correspondantes. Concernant les essais de chargement et déchargement, ils étaient effectués avec un suivi de l'endommagement par analyse in situ et émission acoustique. L'auteur a appliqué ces expérimentations sur différents types d'éprouvettes (non vieillies et vieillies). A partir des images collectées, il a décrit précisément le mécanisme de rupture dans chaque cas de figure.

Comme dernière partie de son travail, Arnaud a étudié l'influence de la porosité sur les propriétés mécaniques en cisaillement interlaminaire et en flexion pure par flambement. C'est une partie dans laquelle il a fait appel à l'ensemble des éléments de son travail de thèse et qui met en avant l'aspect industriel de son étude.

Conclusion :

Le travail de thèse de Arnaud [36] était orienté principalement sur la caractérisation hygrothermique et thermomécanique des plaques composites mises en œuvre par le procédé RTM. Le but ultime de son travail était de trouver une corrélation entre ces propriétés et la porosité de la pièce injectée. A travers les différentes expériences réalisées, l'auteur a identifié le comportement thermique de la résine utilisée, a étudié la santé matière des plaques mises en œuvre, a classifié les vides selon différentes typologies, a décrit le comportement en rupture de ces plaques sous distinctes sollicitations et a analysé l'influence de la porosité sur les propriétés mécaniques des pièces produites.

2.3.Limitations et apports

La recherche étant en évolution continue, chaque nouveau sujet dans le même domaine, alimente et complète, de manière directe ou indirecte, celui qui le précédait. Les limitations et apports discutés dans ce paragraphe concernent les travaux de l'équipe composite de notre laboratoire.

Le présent travail de thèse s'inscrit dans le volet de la simulation numérique du procédé RTM pour les milieux fibreux à double échelle de pores, et se positionne dans la suite du travail de Lebel [33]. Ce dernier a permis de décrire l'évolution des quantités de macro/micro bulles d'air créées et comprimées, dans l'espace et en fonction du nombre capillaire, lors d'une injection à pression imposée, sur une préforme bidirectionnelle. Egalement, le phénomène de transport y a été initié. Cependant, l'approche de modélisation employée semble incomplète et pas suffisamment développée. De plus, les résultats obtenus concernent uniquement des simulations avec injection à pression constante, la convergence des simulations des injections à débit constant semble difficile à atteindre. Ainsi, par rapport au travail de Lebel, nous allons, dans cette thèse, remédier à ces deux problèmes en développant des simulations de l'injection RTM à débit imposé avec prise en compte des phénomènes de création, compression et transport et proposer une nouvelle approche pour modéliser ce dernier.

Parmi les résultats importants de la thèse de Gueroult [35], il y a la conception des capteurs de détection des bulles d'air, qui ont permis d'apporter en partie des solutions aux problèmes soulevés par Labat [30]. Ces capteurs ont permis, notamment, la réalisation de la mesure expérimentale du taux de vides créés en fonction du nombre capillaire et de la saturation. Dans ce travail, ces résultats seront exploités pour valiser l'approche de modélisation numérique proposée et c'est dans ce cadre que s'inscrive notre contribution en relation avec le travail de Gueroult. Sur un autre volet, nous allons aussi nous intéresser à l'influence de la variation spatiale de la perméabilité géométrique sur la prédiction numérique des taux de vides et de la saturation de la préforme fibreuse.

En grande partie, le travail de Arnaud [36] portait sur la caractérisation mécanique des pièces composites, via différentes sollicitations. Néanmoins, l'auteur a également présenté l'évolution du taux de vides en fonction du nombre capillaire, en évoquant la notion de la "marche". C'est

l'élément que nous allons utiliser dans le cadre de la validation des résultats de notre simulation numérique.

Ben Abdelwahed [32] a décrit avec précision le processus de piégeage des bulles d'air et il l'a visualisé par le biais de capillaires en T. C'est une confirmation des premiers résultats obtenus dans la thèse de Labat. Par contre et afin de valider et tester le modèle PDM proposé dans ce même travail, il s'avère nécessaire de l'intégrer dans un code simulation. Il s'agit exactement, ici, de son intégration au sein de notre code CVFEM pour décrire la formation des bulles d'air afin d'en tirer profit de ses avantages. C'est notre apport par rapport au travail de Ben Abdelwahed.

2.4. Approche numérique

2.4.1. Principe de modélisation

L'ensemble des développements, qui seront conduits dans le cadre de ce travail, seront intégrés au sein de l'outil de calcul CVFEM disponible au sein de notre équipe.

Le principe de la modélisation considérée dans cette étude, consiste à déterminer à chaque pas de temps et à chaque position du maillage :

- Le champ de pression dans la partie saturée du moule (prédit par le code CVFEM) ;
- Les taux de bulles d'air créées, comprimées et transportées par l'écoulement (notre contribution) ;
- La valeur de la saturation de la préforme et celle de la perméabilité relative (notre contribution).

La modélisation de l'écoulement considérée dans le code CVFEM repose sur une analyse monophasique, dont la résine est supposée un liquide incompressible.

Dans ce cadre, l'équation de Darcy a été tenue comme équation décrivant l'écoulement :

$$q = -\frac{K}{\mu}\nabla P \qquad (2-9)$$

En association avec l'équation de conservation de la masse (Eq.2-10), la loi de Darcy prend la forme de l'expression (Eq.2-11). C'est l'équation gouvernante en champ de pression.

$$\nabla . \vec{v} = 0 \qquad (2-10)$$

$$\nabla \left(\frac{K_{ij}}{\mu_{résine}} \cdot \nabla P_{résine} \right) = 0 \qquad (2-11)$$

Dans le cadre d'une injection rectiligne, le champ de pression de la résine, estimé à partir de l'équation (Eq.2-11), présente le profil décrit par les courbes de la figure (Fig.2-7) :

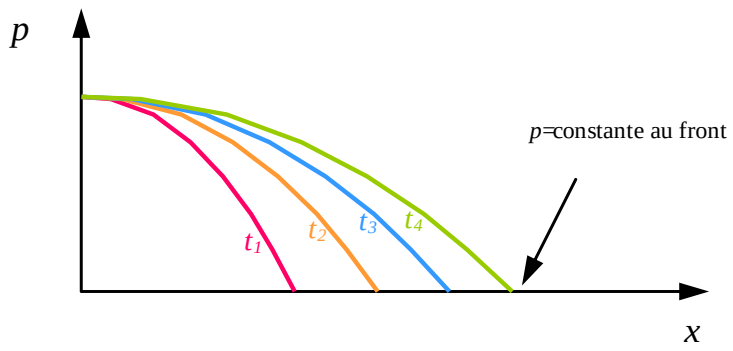


Figure 2-7 : Répartition spatiale du champ de pression à différents instants [33]

Les conditions aux limites associées à cette résolution sont imposées au niveau de la paroi du moule, du seuil d'injection, de l'évent et du front de la résine. Ce sont des conditions de type Dirichlet dans le cas d'une injection à pression imposée, et de type Newman dans le cas d'une injection à débit imposé.

Notre objectif est de suivre le front de la résine tout au long de l'injection.

2.4.2. Méthodes numériques

Les méthodes numériques employées afin de résoudre l'équation gouvernante en champ de pression, sont du nombre de trois :

- D'abord la méthode CVFEM (Control Volume Finite Element Method) qui est une méthode éléments finis basée sur le recours à des volumes de contrôle (Fig.2-8). Elle a comme objectif de résoudre l'équation gouvernante en champ de pression (Eq.2-12).

$$\int_{CV} \nabla.\left(\frac{K}{\mu}\nabla P\right) d\Omega = \int_{CS} \frac{K}{\mu}\nabla P.\vec{n}dS = 0 \qquad (2-12)$$

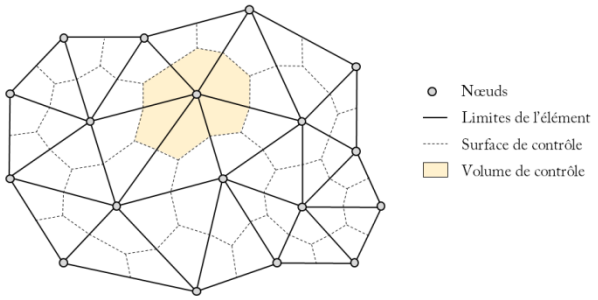


Figure 2-8 : Maillage par la méthode CVFEM [23]

- Puis la méthode VOF (Volume Of Fluid) qui permet d'avoir un algorithme de suivi de front (Fig.2-9), en se basant sur l'actualisation du taux de remplissage des volumes de contrôle (Eq.2-13).

$$f(t+dt) = f(t) + dt\frac{\sum_i Q_i}{V} \qquad (2-13)$$

Où f représente le taux de remplissage.

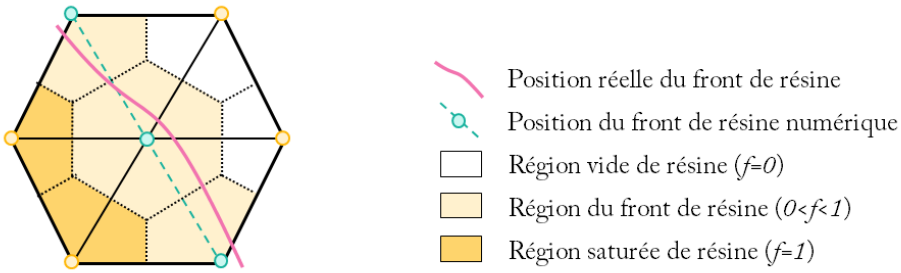


Figure 2-9 : Approximation du front de liquide par la méthode VOF [23]

L'utilisation de ces deux méthodes mène à des valeurs de champ de pression qui sont différentes du cas réel, au niveau du front de l'écoulement (Fig.2-10). En effet, dans le cas réel, le volume de contrôle est scindé en deux zones ; une avec de l'air et une avec de la résine. Ce sont deux milieux fluides qui ont des caractéristiques différentes, telle que la viscosité. Ainsi, au niveau du front de la résine où $0 < f < 1$ et en utilisant l'équation (Eq.2-12), une discontinuité des valeurs du champ de pression est soulevée. Cette dernière n'est pas prise en compte dans la modélisation numérique par CVFEM, car la pression du volume de contrôle prend une seule valeur à la fois ; soit celle de la pression à l'évent (si

$f = 0$), soit celle de la résine (si $f = 1$), et entre ces deux valeurs de facteur de remplissage f, la pression est considérée égale à la plus grande entre P_{vent} et $P_{résine}$.

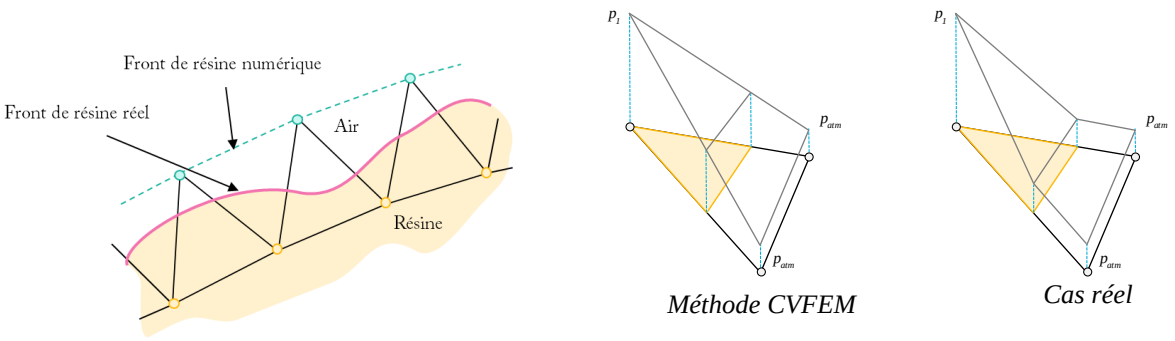


Figure 2-10 : Différence entre les champs de pression de la méthode CVFEM et le cas réel [23]

- Pour un meilleur traitement des conditions aux limites au niveau du front, nous avons fait appel à la méthode FINE (Floating Imaginary Nodes and Elements), qui permet, grâce à l'ajout de nœuds fictifs, une meilleure approximation de la position du front (Fig.2-11). A partir de ces nouveaux nœuds, chaque élément est décomposé en quatre sous éléments, d'où une approximation plus précise du front de la résine.

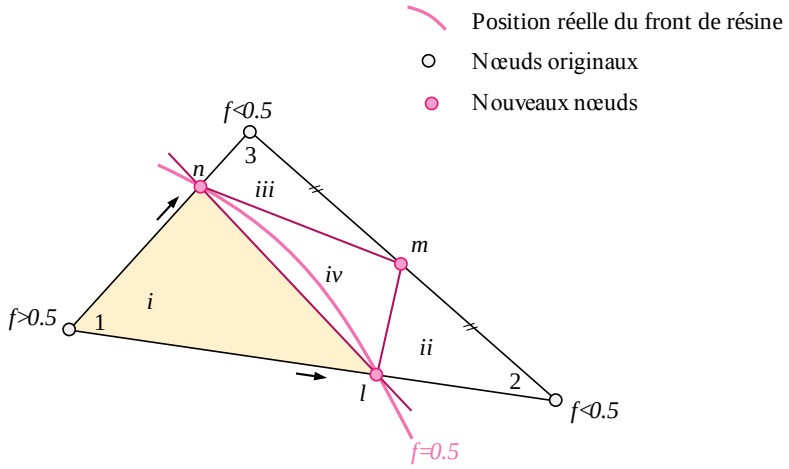


Figure 2-11 : Approximation du front de liquide par la méthode FINE [23]

Ce sont donc les trois piliers de notre interface numérique sur lesquels nous nous sommes basés pour mener cette étude.

L'étude numérique que nous menons est Eulérienne avec des conditions aux limites. Cela veut dire que par le biais de notre code de calcul, nous nous plaçons à un point du maillage et nous regardons les évolutions des grandeurs qui nous intéressent en ce point.

Plus particulièrement dans notre cas d'étude unidirectionnelle, nous sommes en mesure de se positionner en un point donné sur l'axe des abscisses (qui définit la direction de l'écoulement et celle des fibres) et d'estimer le taux de création, de compression, de transport, etc sur une échelle de temps du début jusqu'à la fin de l'injection. Ou, fixer un instant donné et décrire l'évolution de ces paramètres en fonction de la position tout au long de la préforme.

2.5. Conclusion

Ce chapitre présente un état de l'art sur la problématique des bulles d'air lors de la mise en œuvre des structures composites. Nous avons exposé une revue bibliographique sur les phénomènes de création, de compression et de transport des bulles d'air, et aussi sur des stratégies de minimisation des vides au sein des pièces structurales produites. A partir des éléments présentés, les principes de création, de compression et de transport des bulles d'air ont été explicités.

Ensuite, nous avons développé les activités menées dans l'équipe composite de notre laboratoire vis-à-vis de cette thématique. Une chronologie des travaux de recherche conduits au LOMC a été étalée, de manière à expliquer les différentes démarches adoptées afin de cerner les phénomènes par lesquels les bulles d'air passent. Notamment des techniques expérimentales de visualisation de la cinétique du front de résine et des capteurs de détection des bulles d'air ; ainsi que des développements mathématiques pour la simulation numérique des phénomènes en question.

Par la suite, nous avons précisé les liens entre les différents travaux de l'équipe et montré les limitations et les apports de chacun. En particulier, nous avons insisté sur la contribution de ce présent travail par rapport à la modélisation des phénomènes de création et de transport des bulles d'air ; et à l'estimation des valeurs de la perméabilité, de la saturation, des angles de contact dynamiques et des porosités.

Au final, nous avons dressé un récapitulatif de la démarche numérique adoptée, tout en précisant le type d'analyse employée, les équations modélisant l'écoulement et notamment l'équation gouvernante, ainsi que les conditions aux limites associées à notre problème. Puis nous avons

explicité les méthodes constituant l’interface numérique de ce travail ; à savoir la méthode CVFEM, la méthode VOF et la méthode FINE.

En conséquence, la modélisation des bulles d’air lors de la mise en œuvre nécessite la prise en compte de l'ensemble des phénomènes mis en jeu, à savoir : la création, la compression et le transport de celles-ci. Le prochain chapitre sera dédié principalement à l'étude détaillée de ces trois phénomènes et à leurs modélisations numériques.

Sommaire du Chapitre 3

3.1. Phénomène de création des bulles d'air 91
3.1.1. Principe de création 91
3.1.2. Schématisation 93
3.1.3. Modélisation de la création des bulles d'air 94
3.1.3.1. Loi de Darcy 95
3.1.3.1.1. Première loi de Darcy 95
3.1.3.1.2. Seconde loi de Darcy 96
3.1.3.1.3. Domaine de validité de la loi de Darcy 97
3.1.3.2. Perméabilité géométrique 98
3.1.3.2.1. Perméabilité constante 98
3.1.3.2.2. Perméabilité variable 100
3.1.3.3. Temps de remplissage 107
3.1.3.4. Type de bulles d'air 110
3.1.3.5. Taux de création des bulles d'air 111
3.1.4. Résultats de la simulation numérique 112
3.2. Phénomène de compression des bulles d'air 118
3.2.1. Principe de compression 118
3.2.2. Compression dans les macro-capillaires 119
3.2.3. Saturation de la mèche dans les micro-capillaires 120
3.2.4. Résultats de la simulation numérique 123
3.3. Phénomène de transport des bulles d'air 125
3.3.1. Modèle existant 125
3.3.2. Equation de transport 126
3.3.2.1. Vitesse des bulles d'air 127

3.3.2.2. Terme source 128

3.3.2.3. Porosité finale et saturation totale 130

3.3.3. Résultats de la simulation numérique 130

3.3.3.1. Vitesses du liquide et des bulles d'air 130

3.3.3.2. Migration des bulles d'air macro-micro 132

3.4. Conclusion 152

Chapitre 3 : Modélisation des phénomènes de création, de compression et de transport des bulles d'air

Dans ce chapitre, nous allons rappeler en premier lieu le principe de chaque phénomène que les bulles d'air vont subir lors de la mise en œuvre par le procédé RTM. Ensuite, nous présentons en détail l'approche de modélisation employée pour décrire les phénomènes de création, de compression et de transport de ces bulles, lors de l'écoulement d'un fluide à travers un milieu fibreux à double échelle de pores. Plusieurs résultats de simulation seront exposés, notamment pour analyser l'effet de la perméabilité sur la modélisation de type de vide. Une attention particulière sera portée sur l'analyse des résultats du modèle de transport proposé et sa pertinence dans la simulation de la saturation et la porosité finale en fin d'injection.

3.1.Phénomène de création des bulles d'air

3.1.1. Principe de création

L'architecture de la microstructure des renforts composites conduit à un écoulement non uniforme lors de leur imprégnation par un liquide, notamment durant la mise en œuvre par les procédés LCM, ce qui induit le piégeage des bulles d'air. En effet, les renforts à fibres longues utilisés dans ces procédés et notamment le RTM, présentent une double échelle de pores. Ils comportent deux différentes tailles de pores : des macro-pores qui correspondent aux espacements entre les mèches (0.1 à 1 mm) et des micro-pores qui représentent les espacements entre les fibres de la même mèche (1 à 10 µm).

La double échelle de pores du renfort entraine des vitesses différentes d'écoulement de la résine au front, et conduit par conséquent à la création des bulles d'air dans la pièce. En effet, la microstructure du renfort présente des cheminements préférentiels pour le liquide. Cette propriété intrinsèque aux matériaux utilisés, engendre un mouvement non uniforme du front du liquide. C'est la remarque observée à l'échelle macro de la pièce (Fig.3-1.a), méso des macro-canaux (Fig.3-1.b) et micro des micro-capillaires (Fig.3-1.c).

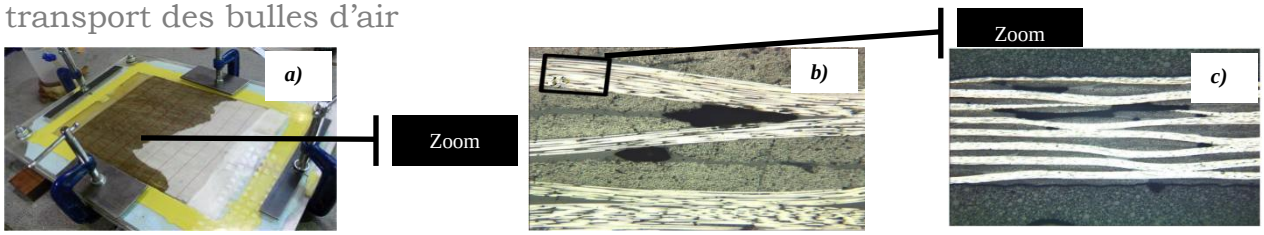


Figure 3-1 : Positions du front de flux, a) Echelle macro, b) Echelle méso et c) Echelle micro [31]

En examinant les caractéristiques physicochimiques des matériaux utilisés, telles que la viscosité et la tension de surface, nous arrivons à expliquer ce phénomène d'avance retard par le biais des effets à l'interface et qui se traduisent par la vitesse d'avancée du front.

Le nombre capillaire qui est le rapport de la force capillaire (tension de surface) sur la force visqueuse est un paramètre clé dans la détermination de la formation des vides à l'échelle microscopique [20] et [44]. Il est défini par la relation (Eq.3-1) :

$$Ca = \frac{\mu\, u}{\gamma} \qquad (3-1)$$

Où :

u est la vitesse au front de l'écoulement (m/s) ;

μ est la viscosité de la résine (Pa.s);

γ est la tension de surface (N.m).

Ce nombre capillaire peut être formulé autrement, pour prendre en compte l'effet de la mouillabilité à travers l'angle de contact θ entre le renfort et la résine. Nous parlons dans ce cas d'un nombre capillaire modifié (Eq.3-2).

$$Ca^{*} = \frac{\mu\, u}{\gamma \cos\theta} \qquad (3-2)$$

Dans le cas de création des macro-bulles d'air, la tension de surface l'emporte sur la viscosité, ce qui se traduit par une vitesse du liquide plus importante dans les micro-capillaires que dans les macros. En effet, cette configuration présente un effet capillaire prédominant ce qui fait progresser le liquide plus rapidement dans les micro-capillaires que dans les macros. D'où l'emprisonnement de l'air dans les canaux entre les mèches par succion (Fig.3-2.a).

En adoptant le même raisonnement pour le cas de création des micro-bulles d'air, nous constatons que la viscosité est dominante, d'où une vitesse macro plus importante. C'est une configuration qui favorise le déplacement inter-mèches du liquide, d'où le piégeage des micro-bulles d'air (Fig.3-2.b).

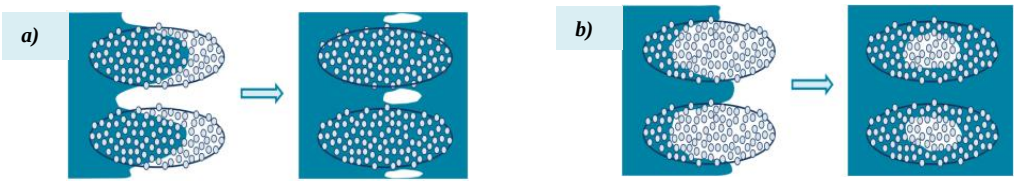


Figure 3-2 : Piégeage des bulles d'air, a) Echelle macro et b) Echelle micro [25]

Concernant l'intégration de la modélisation du phénomène de création des bulles d'air au sein du code de calcul, une simple comparaison des temps d'imprégnation complète des capillaires permet l'identification du type de bulle d'air produite.

Dans la partie qui suit, nous allons expliciter l'approche adoptée qui est basée sur la comparaison des temps nécessaires à la résine pour parcourir la longueur d'une mèche [24].

3.1.2. Schématisation

Notre approche de modélisation concerne des préformes unidirectionnelles (UD), dont l'architecture est représentée dans la figure (Fig.3-3).

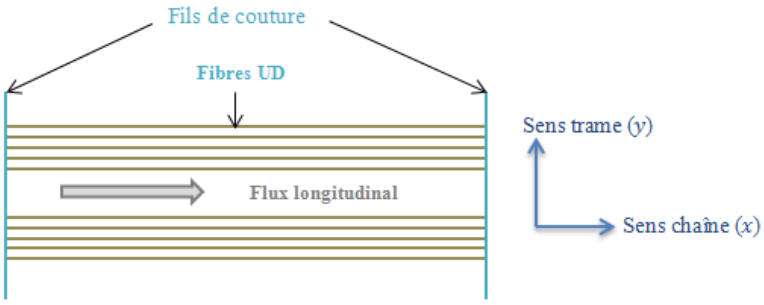


Figure 3-3 : Architecture de la préforme simulée

Les fibres sont positionnées suivant le sens chaîne et attachées avec des fils de couture dans le sens trame.

A partir ce cette configuration nous définissons le Volume Elémentaire Représentatif (VER) comme étant le tronçon de la préforme entre deux fils de couture successifs.

Nous nous intéressons par la suite, à la simulation d'une injection rectiligne longitudinale dans une préforme UD, telle qu'elle est schématisée par la figure (Fig.3-4).

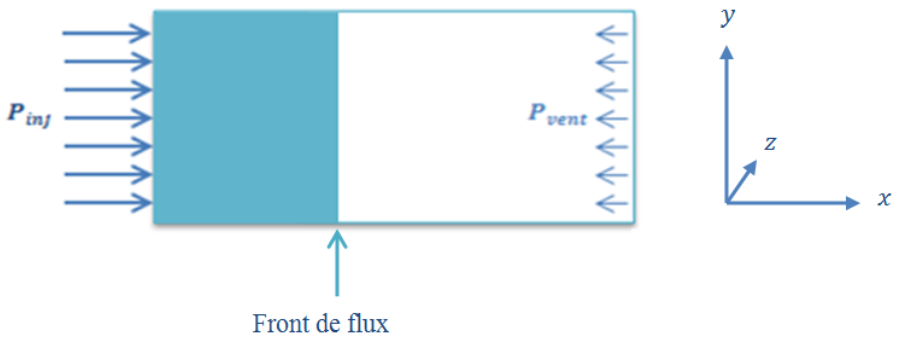


Figure 3-4 : Schématisation de l'injection

Où P_{inj} est la pression d'injection et P_{vent} est la pression à l'évent.

L'écoulement de la résine dans cette configuration est unidirectionnel et son front se déplace de manière rectiligne perpendiculairement à la direction chaîne. Par conséquent, tout le développement qui suivra sera donné selon la direction longitudinale (x).

3.1.3. Modélisation de la création des bulles d'air

La modélisation de ce phénomène repose sur la quantification des temps nécessaires au liquide pour parcourir les espacements intra et inter mèches.

Afin de connaitre ces temps de remplissage, nous avons besoin de connaitre la longueur de la mèche en question et de déterminer la vitesse du liquide. La première grandeur est une donnée constructeur, elle est considérée constante pour toutes les mèches. Par ailleurs, la vitesse du liquide sera estimée par le biais de la loi de Darcy.

D'où ce bref rappel sur la présentation de la loi de Darcy, dans la suite.

3.1.3.1. Loi de Darcy

La loi de Darcy est une relation largement utilisée dans la description à l'échelle macroscopique des écoulements en milieux poreux et notamment dans les milieux fibreux. C'est la formulation sur laquelle repose l'essentiel de notre travail. Sachant qu'il y a deux formulations de cette loi, nous allons donc les présenter et positionner notre problème par rapport à celles-ci.

3.1.3.1.1. Première loi de Darcy

En utilisant le sable homogène comme milieu poreux et l'eau comme fluide. Darcy, en 1856, est arrivé à prouver que le débit volumique est proportionnel à la chute de pression, ce qui est traduit par l'expression suivante :

$$Q = k'A\,\frac{h_1 - h_2}{L} \qquad (3-3)$$

En d'autres termes : le débit volumique Q est proportionnel à la section A et à la différence de hauteur $(h_1 - h_2)$ et il est inversement proportionnel à la longueur L. Ces différents paramètres sont présentés sur le schéma suivant (Fig.3-5) :

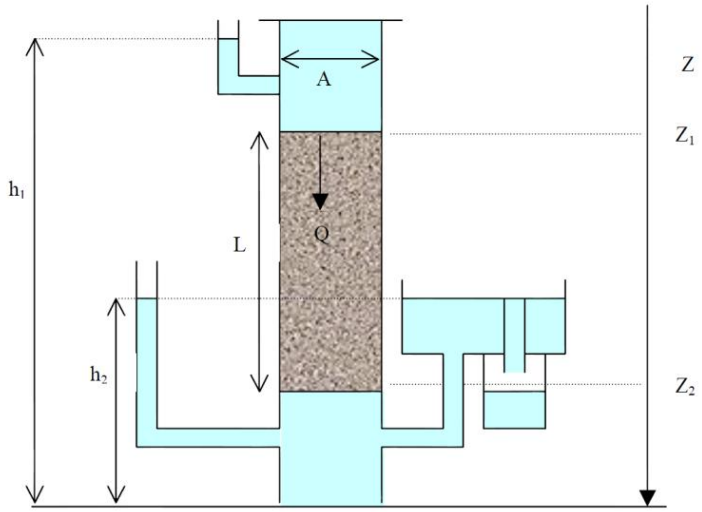


Figure 3-5 : Schématisation de l'expérience de Darcy

Le paramètre k' est un coefficient de proportionnalité dépendant du filtre et du fluide utilisés. Il est appelé le coefficient de la conductivité hydraulique.

Après plusieurs simplifications, Darcy a établi son expression finale :

$$q = -\frac{K}{\mu}\nabla P \qquad (3-4)$$

Elle est communément connue sous le nom de la première loi de Darcy. Elle décrit la facilité avec laquelle le milieu poreux se laisse imprégner par le fluide.

3.1.3.1.2. Seconde loi de Darcy

L'expérience de Darcy a été effectuée dans un milieu isotrope (sable homogène) et en considérant un écoulement vertical. Mais dans le cas général, le milieu poreux considéré est anisotrope et l'écoulement n'est pas unidirectionnel. Par conséquent, la précédente loi de Darcy n'aura de sens physique que si elle est traduite sous forme tensorielle (Fig.3-6).

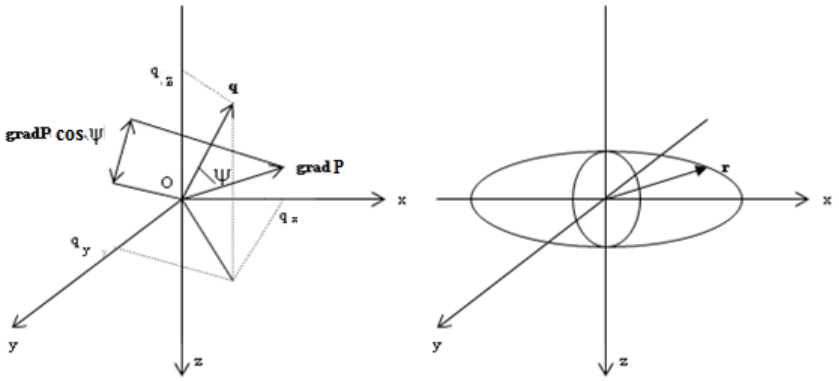


Figure 3-6 : Forme tensorielle

En effet, les directions du gradient de pression et de la vitesse d'écoulement ne sont pas toujours confondues. Lors de l'écoulement en multicouches par exemple : l'écoulement va avoir tendance à suivre les directions de perméabilité les plus grandes (un mouvement plus facile).

La traduction mathématique de cette observation nous amène à considérer la perméabilité $\boldsymbol{K}$ comme une propriété tensorielle, elle pourra être définie comme directionnelle, selon une direction ψ et sa représentation géométrique peut se définir selon une ellipsoïde.

Soit donc :

$$q = -\frac{\boldsymbol{K}}{\mu}\nabla P \qquad (3-5)$$

3.1.3.1.3. Domaine de validité de la loi de Darcy

Chaque postulat a des limites de validité, notamment celle de Darcy ne sera plus valable si les vitesses de filtration du fluide à travers le milieu poreux deviennent assez élevées. Cela impliquera que le gradient de pression va accroître plus rapidement avec le débit volumique que ne voudrait la loi de Darcy. Cette remarque est illustrée par la courbe suivante (Fig.3-7) :

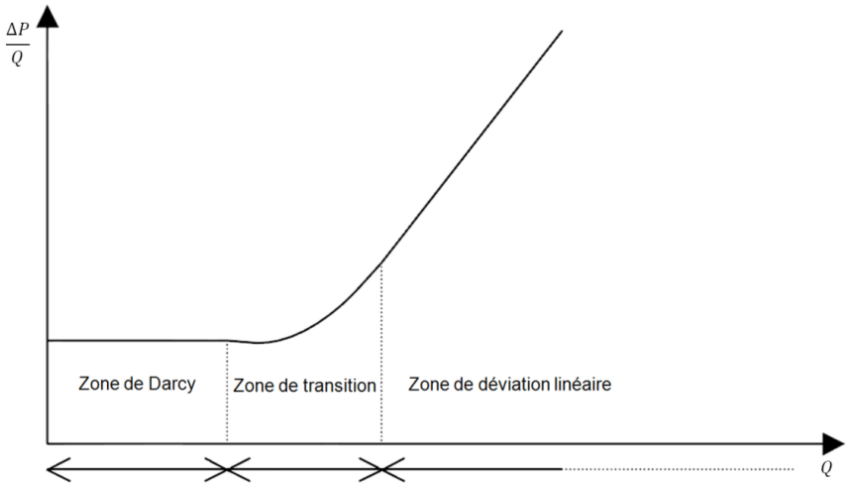


Figure 3-7 : Domaine de validité de la loi de Darcy

Le gradient de pression au-delà duquel la loi linéaire de Darcy n'est plus utilisable, dépend essentiellement du milieu considéré. Dans le but de ramener ce gradient limite à une propriété intrinsèque du milieu, certains auteurs, comme J. Bear [45], ont défini un nombre de Reynolds, sans dimension, caractéristique d'un écoulement en milieu poreux, par :

$$Re = \frac{q\rho'\sqrt{K}}{\mu} \qquad (3-6)$$

En pratique, nous admettons que la loi de Darcy est valable si le nombre de Reynolds en milieu poreux est inférieur à un, auquel cas l'écoulement est purement laminaire à l'intérieur des pores.

Dans le cadre de la modélisation des écoulements dans les procédés de moulage par injection de résine sur renfort fibreux (RTM, CRTM, …) et notamment dans ce travail, la loi de Darcy est considérée comme étant l'équation régissant ce type d'écoulement. En effet, l'écoulement de la résine à travers un renfort est le résultat de son déplacement dans les interstices des fibres du renfort. Ainsi, ce phénomène est identique à l'imprégnation d'un milieu poreux (le renfort) par le

fluide (résine). De plus, les écoulements dans ce type de procédé se font à vitesses de déplacement lentes et leur nombre de Reynolds demeure nettement inférieur à l'unité. D'autre part, dans les applications industrielles, les épaisseurs des préformes sont prises très faibles devant les autres dimensions, en conséquent les effets de pesanteur peuvent être négligés.

Ainsi dans ce travail, nous considérons la seconde loi de Darcy (Eq.3-5) et nous nous focalisons dans ce qui suit sur la perméabilité qui est un élément pivot dans la formulation de cette loi.

3.1.3.2. Perméabilité géométrique

La perméabilité d'un milieu poreux dépend de sa géométrie et évolue en fonction de sa saturation. Elle est généralement modélisée par le produit de deux termes : la perméabilité géométrique et celle relative (Eq.3-7).

$$K = K_{geo} k_{rel} \qquad (3-7)$$

Dans le cadre du présent travail, nous considérons que la perméabilité relative est égale à l'unité, c'est le cas d'un milieu poreux complètement saturé. Par conséquent : $K = K_{geo}$

La perméabilité géométrique (K_{geo}) des milieux fibreux est généralement définie en fonction de la porosité et de la microstructure des renforts. Les modèles développés sont quasiment théoriques, ils ne font pas appel à des grandeurs expérimentales dans leur structuration.

Cette perméabilité géométrique peut être constante ou variable dans l'espace du milieu fibreux considéré.

3.1.3.2.1. Perméabilité constante

Définir une préforme avec une perméabilité constante, suppose la non prise en compte de la variation de son architecture lors de son identification. La perméabilité peut être identifiée selon différentes approches : expérimentale [46] - [47] - [48] - [49] - [50] - [51] - [52], numérique ou théorique [53] - [54] - [55].

Un des modèles le plus utilisé pour la prédiction de la perméabilité est celui de Kozeny-Carman [54]. Les premiers travaux concernant son développement ont été commencés par Kozeny en 1927 [53] qui a assimilé les milieux fibreux à des milieux capillaires. Il a considéré que les

mèches ont une forme capillaire et qu'elles sont agencées comme des cylindres parallèles entre eux, qui peuvent être de différentes sections et à travers lesquels il y a des pores. Ensuite Carman en 1937 a présenté sa fameuse expression de la perméabilité en introduisant l'effet de la tortuosité :

$$K = \frac{\varepsilon^3}{k_{ck}\, S_0^2\, (1-\varepsilon)^2} \qquad (3-8)$$

Dans cette configuration, les fibres sont considérées cylindriques.

La constante de Kozeny-Carman est une fonction de la tortuosité et des effets des frottements visqueux. Sa valeur dépend des caractéristiques géométriques de l'empilement.

Tandis que la surface spécifique prend la forme suivante :

$$S_0 = \frac{2\,(2\tau+1)}{\tau\, d_f} \qquad (3-9)$$

Dont τ est le rapport d'aspect défini par le ratio de la longueur des fibres l et de leur diamètre d_f :

$$\tau = \frac{l}{d_f} \qquad (3-10)$$

Dans le cas où τ est supérieur à 25, l'expression de la surface spécifique devient :

$$S_0 = \frac{4}{d_f} \qquad (3-11)$$

Lorsque les fibres considérées sont de diamètres différents, nous faisons appel à la notion du diamètre moyen des fibres, noté $\overline{d_f}$. Ce dernier est déterminé à partir de la moyenne arithmétique [56] :

$$\overline{d_f} = \sum_{i=1}^{n} y_i\; d_{f_i} \qquad (3-12)$$

Où y_i est la fraction volumique des fibres de diamètre d_{f_i}.

Une autre notation de la surface spécifique peut être utilisée. Elle présente la surface des pores du milieu fibreux par unité de volume. Elle est directement liée à S_0 par la relation :

$$S_F = (1-\varepsilon)S_0 \qquad (3-13)$$

Dans le cas de notre étude et selon les paramètres pris en considération, nous sommes dans la première configuration par rapport à la surface spécifique (Eq.3-11) (nous avons un rapport d'aspect suffisamment grand). Par conséquent, nous sommes dans le cadre de la relation de perméabilité suivante :

$$K = \frac{d_f^2\,\varepsilon^3}{16\,k_{ck}\,(1-\varepsilon)^2} \qquad (3-14)$$

3.1.3.2.2. Perméabilité variable

a. Formulation

Dans cette partie, nous allons tenir compte de la microstructure de la préforme dans l'évaluation de sa perméabilité. Par conséquent, cette grandeur sera variable dans l'espace du milieu poreux et définie en fonction de la position.

Comme il a été mentionné dans le paragraphe précédent, l'expression de la perméabilité géométrique la plus connue et utilisée est celle de Kozeny-Carman [54]. En revanche, il y a eu un travail plus récent (1972) [45] où l'auteur a réécrit ladite formule :

$$K = \frac{k_{ck}\,[V_V(P)]^3}{[S_V]^2} \qquad (3-15)$$

Par ailleurs, il est à noter que lors de l'injection, les fibres ne gardent pas leur forme linéique, mais elles peuvent se déformer en prenant une allure sinusoïdale. La démarche que nous allons présenter et adopter tient compte de cette constatation. Elle est basée sur les travaux de thèse de Bizet [57].

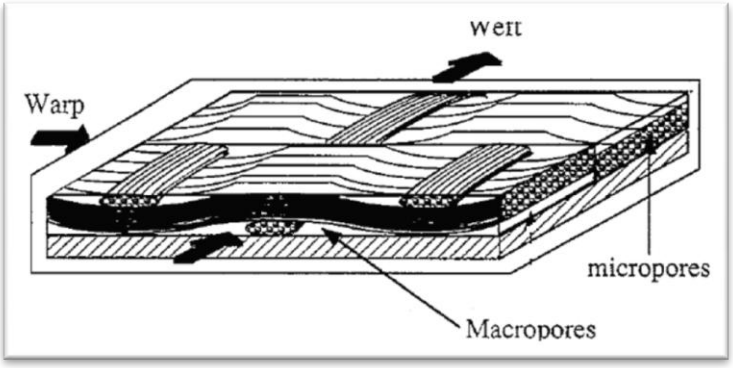


Figure 3-8 : Géométrie de la préforme fibreuse [57]

Dans ce cas, la perméabilité géométrique ne sera pas la même dans les parties larges que celles rétrécies, elle sera décrite dans cette architecture (Fig.3-8) par la relation suivante :

$$K_{geo} = \frac{A_A(P_{mic})\big(1 - A_A(P_{mac})\big)K_{mic} + A_A(P_{mac})K_{mac}}{A_A(P)} \qquad (3-16)$$

Où $A_A(P_{mac})$ et $A_A(P_{mic})$ sont définies dans le milieu biphasé mèches/macro-vides et /micro-vides.

Cette formulation de la perméabilité géométrique tient compte de la double échelle de pores, par l'intermédiaire de K_{mic} et K_{mac}.

Les différents termes intervenant dans cette relation (Eq.3-16) sont déterminés comme suit :

- La perméabilité macro est donnée par :

$$K_{mac} = \frac{C_0\overline{L(P_{mac})^2}\,A_A(P_{mac})}{16} \qquad (3-17)$$

Où :

- C_0 est égale à 0.9 ;
- $\overline{L(P_{mac})} = \frac{a.b.A_A(P_{mac})}{\sqrt{2}.\sqrt{a^2+b^2}.\big(1-A_A(P_{mac})\big)}$ $\qquad (3-18)$
- $A_A(P_{mac}) = \frac{wh-S}{wh}$ $\qquad (3-19)$

Où :

- w est déterminée sur le tissu ;
- h est déterminée par la hauteur de la pièce divisée par le nombre de plis ;

- S' est fonction de la distance le long de la mèche x, donnée par :

$$S' = S_{moy} A \cos\left(\frac{4\pi x}{T'}\right)\left(\frac{1}{2}\cos\left(\frac{2\pi x}{T'}\right) - 1\right) + S_{moy} \qquad (3-20)$$

Où :

- $a = \frac{1}{k}\sqrt{\frac{S_{moy}(A_A(P))}{\pi}}$ $(3-21)$
- $b = k\sqrt{\frac{S_{moy}(A_A(P))}{\pi}}$ $(3-22)$
- $k^2 = \frac{b(A_A(P))}{a(A_A(P))}$ $(3-23)$

Par constatation expérimentale de différentes longueurs verticale et horizontale dans l'analyse des micro et macro-vides près ou loin des fils de trame, la loi linéaire explicitant k est généralisée quelle que soit la distance par rapport au fil de trame :

$$k^2 = -5.1336 A_A(P) + 6.3407 \qquad (3-24)$$

- $A_A(P) = 1 - V_f$ $(3-25)$
- $S_{moy} = \frac{S_{max}}{1+A}$ $(3-26)$

Où :

- A^* est lié à l'amplitude de la variation de la surface de la mèche

$$A^* = 2\frac{\eta - 1}{2 + 3\eta} \qquad (3-27)$$

- $\eta = \frac{S_{min}}{S_{max}}$ $(3-28)$
- S_{min} se situe souvent près des fils de trame,

$$S_{min} = \frac{n_f\, \pi\, \overline{r^2}}{0.9957 - 0.6808 A_A(P)} \qquad (3-29)$$

- S_{max} se situe souvent loin des fils de trame,

$$S_{max} = \frac{n_f\, \pi\, \overline{r^2}}{0.7105 - 0.2338 A_A(P)} \qquad (3-30)$$

- $\overline{r}$, dans notre cas nous travaillons avec le même rayon de fibres, alors $\overline{r} = R_f$;

- La perméabilité micro est donnée par :

$$K_{mic} = \frac{C_0 \overline{L(P_{mic})^2}\, A_A(P_{mic})}{16} \qquad (3-31)$$

- $\overline{L(P_{mic})} = \frac{\pi r A_A(P_{mic})}{2(1-A_A(P_{mic}))}$ $(3-32)$
- $A_A(P_{mic}) = \frac{S-n_f \pi r^2}{S}$ $(3-33)$

Le passage de la loi de Kozeny-Carman à l'expression (Eq.3-16) a été établi par le biais d'une démarche *d'analyse d'images*, de *calcul géométrique* et de *l'application d'une loi stéréologique* [57] :

- Afin d'exprimer les fractions surfaciques des micro/macro-vides, l'auteur a considéré la configuration suivante (Fig.3-9) :

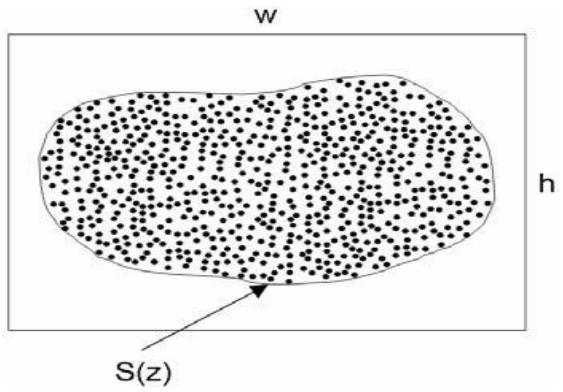


Figure 3-9 : Surface de la mèche [57]

- Puis en réalisant des expérimentations tout en adoptant la notion 'loin des fils de trame' et 'près des fils de trame', les expressions des surfaces ont été déduites.
- La formulation des libres parcours moyens a été établie à partir des analyses d'images par Microscopie Electronique à Balayage et Microscopie Optique. De différents essais de coupes simples et séries, à différents V_f, loin des fils de trame et près d'eux.
- Finalement l'auteur a utilisé la loi stéréologique proposée par Hoff [58], assurant le lien entre la loi de Kozeny-Carman et la microstructure de la préforme, par le biais du libre parcours moyen : $\overline{L(P)} = 4V_V(P)/S_V$. Notamment l'écriture de l'équation de Kozeny-Carman en fonction de ce paramètre prend la forme suivante :

$$K = \frac{C_0}{16} V_V(P) \overline{L(P)}^2 \qquad (3-34)$$

b. Résultats de la simulation

Dans le cas d'une préforme unidirectionnelle, dont les fibres sont parallèles entre elles (Fig.3-10.a), la perméabilité géométrique peut être considérée constante. Or, dans cette partie, nous allons nous intéresser à une préforme dont la géométrie des mèches est sinusoïdale (Fig.3-10.b) et telle que la perméabilité varie spatialement.

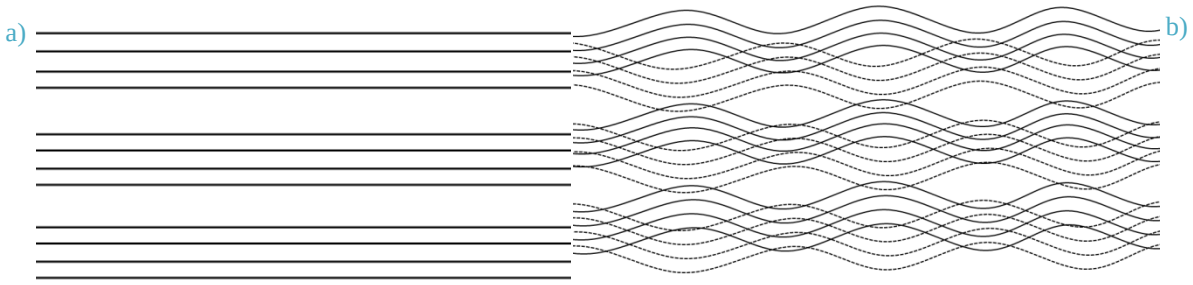


Figure 3-10 : Microstructure des renforts, a) Linéaire et b) Sinusoïdale

Les tracés de la surface de la mèche et de la perméabilité en fonction de la position présentent des allures sinusoïdales et périodiques (Fig.3-11) et (Fig.3-12). En effet, l'aspect sinusoïdal est conservé dans l'expression de la perméabilité (Eq.3-20).

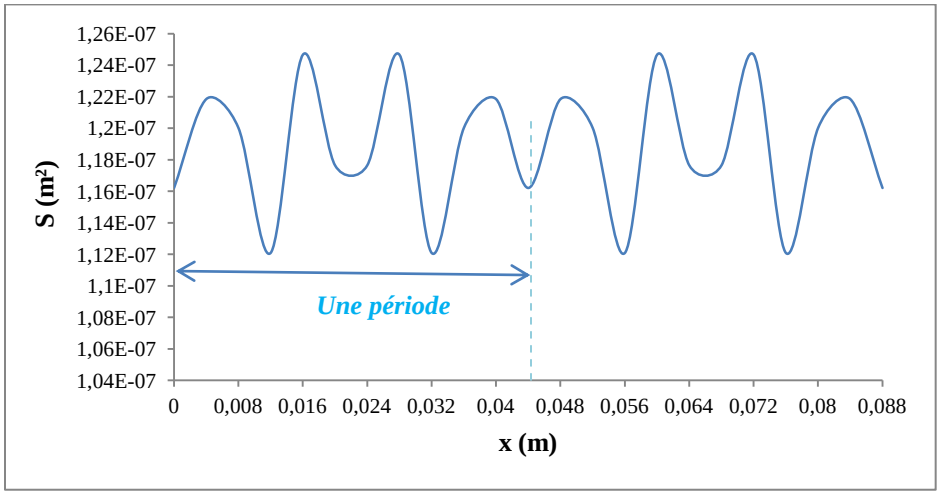


Figure 3-11 : Evolution de la surface de la mèche en fonction de la position, sur deux périodes

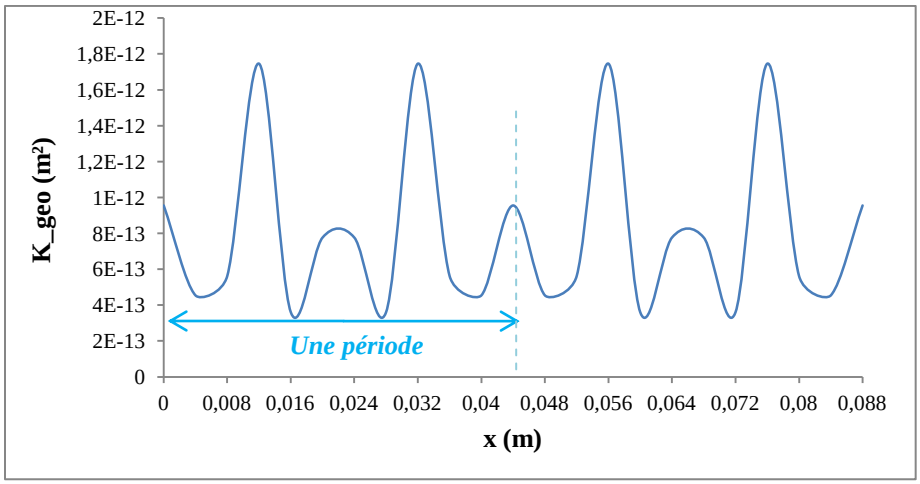


Figure 3-12 : Evolution de la perméabilité géométrique en fonction de la position, sur deux périodes

Les courbes (Fig.3-11) et (Fig.3-12) ci-dessus représentent la distribution spatiale de la surface de la mèche et de la perméabilité variable, respectivement. Nous constatons que ces deux grandeurs sont inversement proportionnelles. Une surface importante veut dire qu'il y a assez d'espace entre les fibres, et par conséquent sa perméabilité est faible. Par contre, si cette première est peu importante, l'espace entre les fibres sera réduit et donc il y a plus de fibres à imprégner, par conséquent la perméabilité devienne plus grande.

Le modèle de perméabilité proposé (Eq.3-16) tient compte de la double échelle de pores, les représentations des courbes de perméabilités variables macro (Eq.3-17) et micro (Eq.3-31), ont les allures suivantes (Fig.3-13) et (Fig.3-14) :

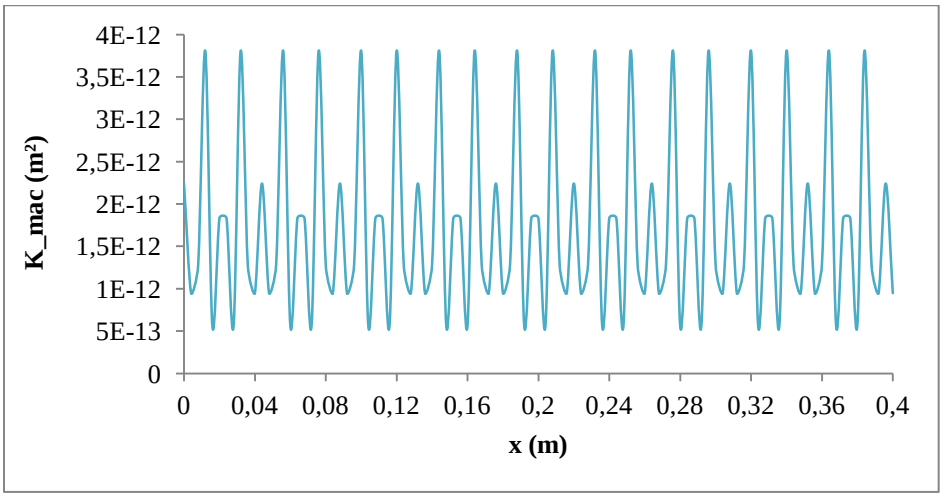


Figure 3-13 : Evolution de la perméabilité géométrique macro, en fonction de la position

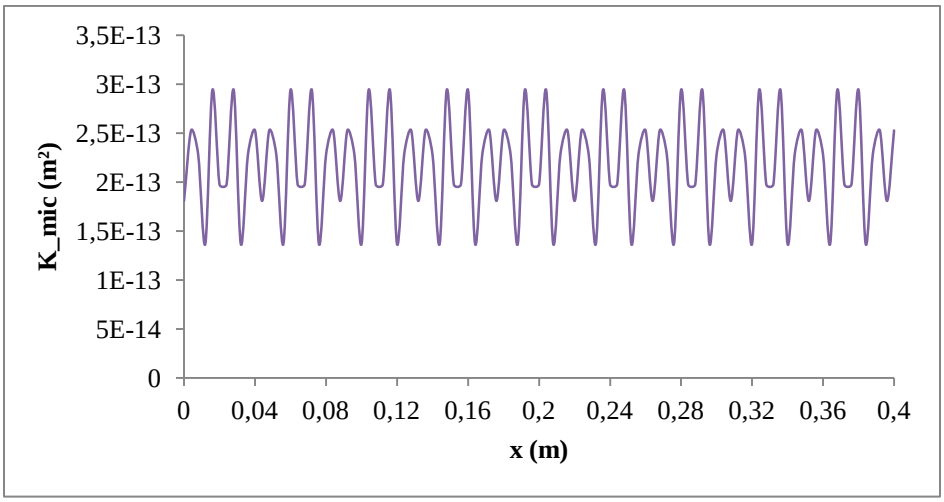


Figure 3-14 : Evolution de la perméabilité géométrique micro, en fonction de la position

Nous remarquons que la perméabilité micro est plus faible que celle macro, ce qui s'explique par la difficulté de passage du liquide à l'intra-mèche.

La figure suivante (Fig.3-15) décrit la variation de la courbe de perméabilité géométrique tout au long de la préforme :

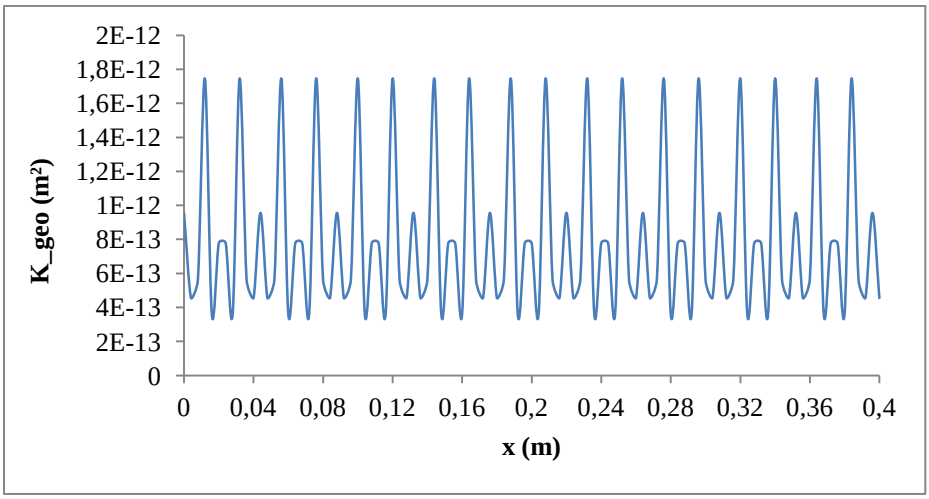


Figure 3-15 : Evolution de la perméabilité géométrique en fonction de la position

Une validation expérimental-analytique a été établie et qui montre un bon accord entre les deux aspects (Fig.3-16). Ce sont des expériences réalisées sur une préforme UD nommée 8134 (nom commercial), au sein de notre laboratoire dans le cadre de la thèse de Cazaux [59] :

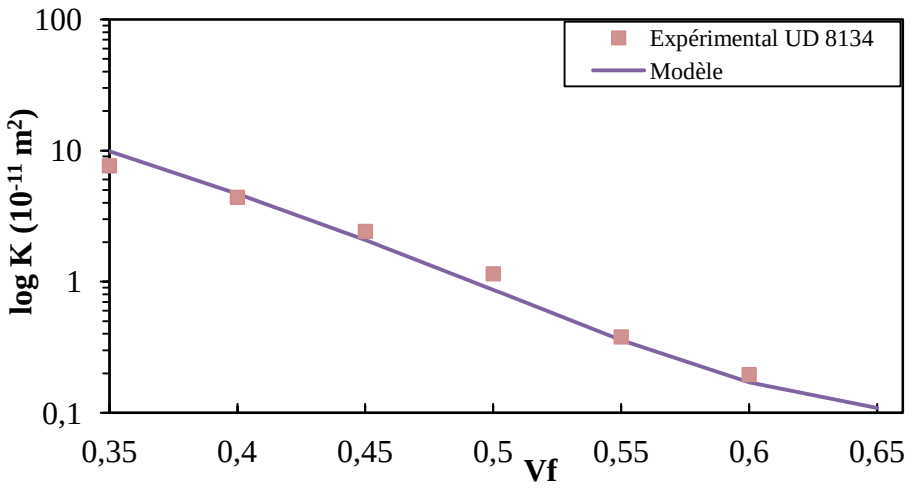


Figure 3-16 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et analytiques de la perméabilité géométrique

Nous constatons que le modèle analytique décrivant la perméabilité géométrique (Eq.3-16) est en parfaite concordance avec les mesures de la perméabilité effectuées par Cazaux sur l'UD 8134.

Maintenant que toutes les composantes nécessaires à notre modélisation sont définies, alors nous allons passer à la quantification de la vitesse du liquide, en l'occurrence les temps de remplissage des capillaires micro et macro.

3.1.3.3. Temps de remplissage

a. Cas de la perméabilité constante

La vitesse du liquide est estimée à l'aide de l'équation de Darcy (Eq.3-5).

Dans la direction longitudinale x, cette grandeur est définie par :

$$u_{mac,x} = \frac{-K_{mac,x}}{\mu} \nabla P_{/x} \qquad (3-35)$$

En outre, dans la direction transversale nous avons :

$$u_{mac,y} = \frac{-K_{mac,y}}{\mu} \nabla P_{/y} \qquad (3-36)$$

Nous considérons que $K_{mac,x} = K_{unsat,x}$ ($K_{mac,y} = K_{unsat,y}$) [33].

Tandis que dans les micro-capillaires, nous avons :

$$u_{mic,x} = \frac{-K_{\parallel}}{\mu} \nabla(P - P_{cap,\parallel})_{/x} \qquad (3-37)$$

Et :

$$u_{mic,y} = \frac{-K_{\perp}}{\mu} \nabla(P - P_{cap,\perp})_{/y} \qquad (3-38)$$

Où $u_{mic,x}$ et $u_{mic,y}$ sont les vitesses de la résine dans les micro-capillaires de la chaîne selon la direction longitudinale et transversale respectivement ;

De plus, $K_{||}$ est calculée en utilisant le modèle de Gebart [55] :

$$K_{||} = \frac{8R_f^2}{53} \frac{(1 - V_{f,ch})^3}{V_{f,ch}^2} \qquad (3-39)$$

Et :

$$P_{cap,\parallel} = \frac{4}{d_f} \frac{V_{f,ch}}{1 - V_{f,ch}} \gamma \cos\theta \qquad (3-40)$$

En remplaçant $V_{f,ch}$ par $V_{f,tr}$ dans les équations (Eq.3-39) et (Eq.3-40), nous obtenons l'expression de $K_{\perp}$ donnée par :

$$K_{\perp} = \frac{8R_f^2}{53} \frac{(1 - V_{f,tr})^3}{V_{f,tr}^2} \qquad (3-41)$$

Et celle de $P_{cap,\perp}$ donnée par :

$$P_{cap,\perp} = \frac{2}{d_f} \frac{V_{f,ch}}{1 - V_{f,ch}} \gamma \cos\theta \qquad (3-42)$$

Dans ce cas unidirectionnel et après simplification, les temps de passage du liquide dans la direction longitudinale s'écrivent sous la forme :

$$\Delta t_{mac,x} = \frac{-\mu l_{T,x}}{K_{unsat,x} \frac{\partial P}{\partial x}} \qquad (3-43)$$

$$\Delta t_{mic,x} = \frac{-\mu l_{T,x}\left(1 - V_{f,t}\right)}{K_{||}\frac{\partial P}{\partial x}}\left[1 + \frac{P_{cap,\|}}{\frac{\partial P}{\partial x} l_{T,x}} \ln\left(1 - \frac{\frac{\partial p}{\partial x} l_{T,x}}{P_{cap,\|}}\right)\right] \qquad (3-44)$$

En procédant de la même manière que dans la direction longitudinale, nous obtenons les temps de parcours dans la direction transversale :

$$\Delta t_{mac,y} = \frac{-\mu l_{T,y}}{K_{unsat,y}\frac{\partial P}{\partial y}} \qquad (3-45)$$

$$\Delta t_{mic,y} = \frac{-\mu l_{T,y}\left(1 - V_{f,t}\right)}{K_{\perp}\frac{\partial P}{\partial y}}\left[1 + \frac{P_{cap,\perp}}{\frac{\partial P}{\partial y} l_{T,y}} \ln\left(1 - \frac{\frac{\partial p}{\partial y} l_{T,y}}{P_{cap,\perp}}\right)\right] \qquad (3-46)$$

b. Cas de la perméabilité variable

La perméabilité géométrique variable n'est définie que dans la direction longitudinale. De ce fait, nos calculs seront conduits uniquement selon cette direction.

Nous obtenons des expressions similaires au cas précédent, indépendamment du caractère variable ou pas de la perméabilité :

$$u_{mac,x} = \frac{-K_{mac}}{\mu}\ \nabla P_{/x} \qquad (3-47)$$

$$u_{mic,x} = \frac{-K_{mic}}{\mu}\ \nabla(P - P_{cap,\|})_{/x} \qquad (3-48)$$

$$\Delta t_{mac,x} = \frac{-\mu l_{T,x}}{K_{mac}\frac{\partial P}{\partial x}} \qquad (3-49)$$

$$\Delta t_{mic,x} = \frac{-\mu l_{T,x}\left(1 - V_{f,t}\right)}{K_{mic}\frac{\partial P}{\partial x}}\left[1 + \frac{P_{cap,\|}}{\frac{\partial P}{\partial x} l_{T,x}} \ln\left(1 - \frac{\frac{\partial p}{\partial x} l_{T,x}}{P_{cap,\|}}\right)\right] \qquad (3-50)$$

Avec K_{mac} et K_{mic} sont les perméabilités géométriques variables macro et micro respectivement.

3.1.3.4. Type de bulles d'air

a. Cas de la perméabilité constante

Une comparaison entre les flux dans les deux directions révèle la nature des bulles d'air piégées. En effet, si le flux dans le macro-capillaire est en avance par rapport à celui dans le micro-capillaire, alors une micro-bulle d'air sera formée. Dans le cas contraire, nous aurons une macro-bulle d'air créée. Pour cela nous posons [33] :

$$\Delta t_{mac} = \min(\Delta t_{mac,x}, \Delta t_{mac,y}) \qquad (3-51)$$

$$\Delta t_{mic} = \min(\Delta t_{mic,x}, \Delta t_{mic,y}) \qquad (3-52)$$

Ce sont les temps les plus courts entre les directions longitudinale et transversale. Ainsi, la comparaison sera par rapport à ces deux temps :

- $\Delta t_{mac} > \Delta t_{mic}$:
  C'est le cas où le flux micro est prépondérant. Notamment, le micro-capillaire se remplit en premier, ce qui favorise la formation d'une macro-bulle d'air (Fig.3-17).

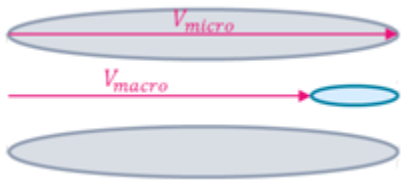


Figure 3-17 : Création d'une macro-bulle d'air

- $\Delta t_{mac} < \Delta t_{mic}$:
  C'est le cas où le flux macro est prépondérant. Notamment, le macro-capillaire se remplit en premier, ce qui favorise la formation d'une micro-bulle d'air (Fig.3-18).

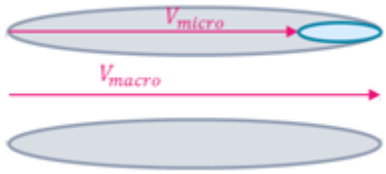


Figure 3-18 : Création d'une micro-bulle d'air

- $\Delta t_{mac} = \Delta t_{mic}$:

  C'est le cas où les flux macro et micro parcourent le macro et micro capillaire, respectivement, pendant la même durée. Par conséquent, aucune bulle d'air n'est formée.

L'étape suivante sera de déterminer le taux de création pour chaque configuration.

b. Cas de la perméabilité variable

Dans ce cas de figure, nous comparons seulement Δt_{mac} et Δt_{mic} qui sont suivant la direction longitudinale. Le capillaire micro ou macro qui se remplira en dernier, comportera des bulles d'air.

3.1.3.5. Taux de création des bulles d'air

L'estimation des taux de bulles d'air créées se fait de la même manière à perméabilité constante et variable.

En outre, nous différencions entre le taux volumique de bulles d'air et le taux volumique d'air. En effet, la première grandeur est définie par rapport au volume total de bulles d'air (Eq.3-53) et (Eq.3-55), en revanche la seconde est par rapport au volume total de la pièce (Eq.3-54) et (Eq.3-56).

A l'échelle macro nous avons [33] :

$$\phi_{mac} = \frac{Volume\ de\ macro - Volume\ des\ bulles\ d'air}{Volume\ total\ de\ macropores} \qquad (3-53)$$

$$V_{air,mac} = \frac{Volume\ de\ macro - Volume\ des\ bulles\ d'air}{Volume\ total} \qquad (3-54)$$

Egalement à l'échelle micro nous avons [33] :

$$\phi_{mic} = \frac{Volume\ de\ mèche\ non\ remplie}{Volume\ de\ la\ mèche} \qquad (3-55)$$

$$V_{air,mic} = \frac{Volume\ de\ micro - Volume\ des\ bulles\ d'air}{Volume\ total} \qquad (3-56)$$

Les taux volumiques des bulles d'air peuvent s'exprimer en fonction des temps de remplissage. En effet, la longueur de la zone remplie par la résine est proportionnelle à ces derniers [24] et [13].

Ainsi, dans le sens chaîne et trame et à l'échelle macro [33], nous avons :

$$\phi_{air,mac}^{F} = \left(1 - \frac{\Delta t_{mic}}{\Delta t_{mac}}\right) h_{v,mac} \qquad (3-57)$$

$$V_{air,mac}^{F} = \phi_{air,mac}^{F}(1 - V_T) \qquad (3-58)$$

En adoptant la même démarche à l'échelle micro [33], nous avons :

$$\phi_{air,mic}^{F} = \left(1 - \frac{\Delta t_{mac}}{\Delta t_{mic}}\right) h_{v,mic} \qquad (3-59)$$

$$V_{air,mic}^{F} = \phi_{air,mic}^{F}(1 - V_{f,t})V_T \qquad (3-60)$$

Tels que $h_{v,mac}$ et $h_{v,mic}$ sont basés sur la microarchitecture du renfort déterminé expérimentalement, macro/micro [23] ;

3.1.4. Résultats de la simulation numérique

La simulation numérique a été réalisée dans le cadre d'une injection rectiligne sur une préforme rectangulaire unidirectionnelle (Fig.3-19). L'injection a été faite à pression constante, dont la pression d'injection est de $P_{inj} = 2.1\ bar$ et la pression à l'évent est de $P_{vent} = 1.1\ bar$.

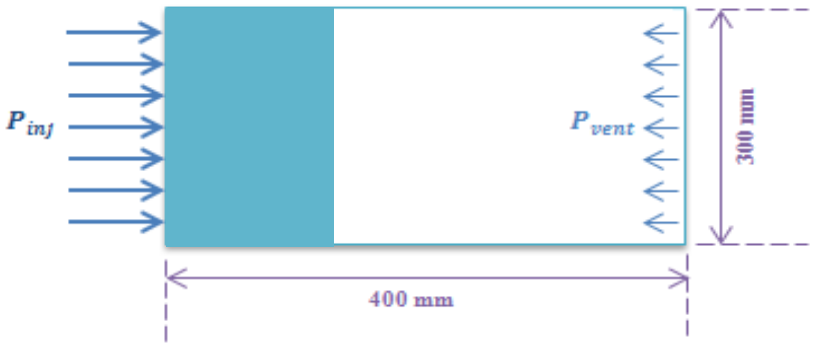


Figure -19 : Dimensions de la préforme simulée

Dans ce cadre, nous avons travaillé avec deux architectures de renforts différentes. Une première dont les mèches sont considérées linéaires et posées parallèlement les unes par rapport aux autres (Fig.3-20.a). Tandis que les mèches de la seconde sont considérées sinusoïdales et périodiques (Fig.3-20.b), c'est une configuration plus proche de l'architecture réelle des renforts au cours de la mise en œuvre par le procédé RTM.

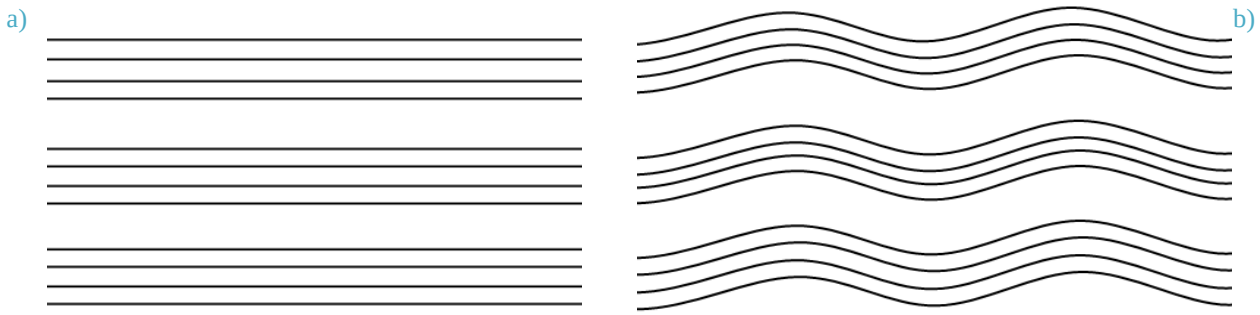


Figure 3-20 : Architecture des renforts de la préforme UD, a) Linéaires parallèles, b) Sinusoïdales périodiques

Les caractéristiques des renforts et de la résine utilisés sont résumées dans les deux tableaux suivants, respectivement (Tab.3-1) et (Tab.3-2) :

Tableau 3-1 : Caractéristiques des renforts utilisés

Fibres de carbone AS7		
Densité	d	1.79 g/cc
Diamètre de la fibre	D_f	6.9 µm
Taux volumique de fibres dans le sens chaîne	$V_{f,ch}$	0.53
Taux volumique de fibres dans le sens trame	$V_{f,tr}$	0.63
Longueur de la chaîne dans la direction longitudinale	$l_{T,x}$	0.011 m
Longueur de la chaîne dans la direction transversale	$l_{T,y}$	0.0045 m
Perméabilité saturée dans la direction longitudinale	$K_{unsat,x}$	0.17 10^{-10} m²
Perméabilité saturée dans la direction transversale	$K_{unsat,y}$	0.05 10^{-10} m²
Facteur de forme micro de la chaîne	$h_{v,mic}$	0.53
Facteur de forme macro de la chaîne	$h_{v,mac}$	0.53
Hauteur de la mèche	$2\ H$	2.36 10^{-4} m

Nous signalons que les valeurs de la perméabilité insaturée dans les directions longitudinale et transversale ont été déduites à partir de celles saturées mesurées expérimentalement. En effet, dans la littérature, le rapport entre K_{unsat} et K_{sat} est égal à 0.4.

Tableau 3-2 : Caractéristiques de la résine utilisée

Résine RTM6		
Densité	d	1.11 g/cc
Viscosité	μ	0.2 Pa.s
Tension de surface	γ	34 10^{-3} N.m
Angle de contact à l'équilibre	θ_e	0°

Ces conditions d'injection seront conservées tout au long de ce chapitre.

Les résultats de la simulation numérique que nous allons présenter concernent à la fois : une perméabilité constante dont la valeur est donnée dans le tableau (Tab.3-1) et une perméabilité variable dont les valeurs en fonction de la position sont présentées sur la figure (Fig.3-15).

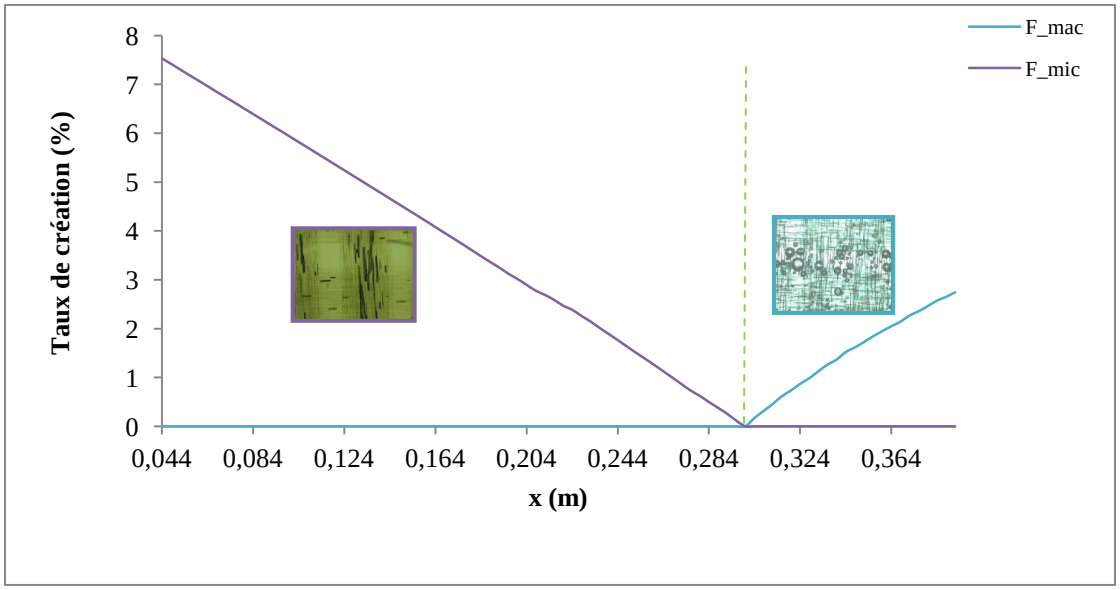


Figure 3-21 : Taux de création des bulles d'air à double échelle de pores, en fonction de la position à perméabilité constante

Le profil de la courbe décrivant la distribution des taux de bulles d'air créées représentée sur la figure (Fig.3-21) rejoint les courbes obtenues dans la littérature [24], [33], [13], [37], [11], [25]. C'est l'allure obtenue pour la configuration où la perméabilité est constante.

Le phénomène de création des bulles d'air commence par l'apparition des micro-bulles et se termine par la formation des macros, en fonction de la position.

Ces mêmes quantités peuvent être tracées en fonction du nombre capillaire modifié (Eq.3-2). La même allure est également observée.

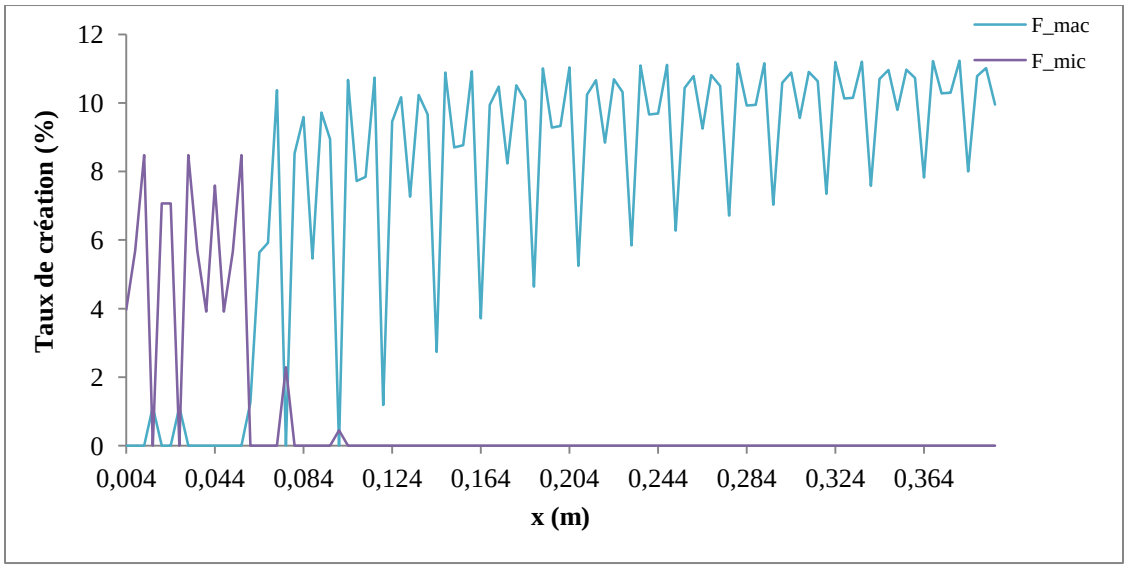


Figure 3-22 : Taux de création des bulles d'air à double échelle de pores, en fonction de la position à perméabilité variable

La répartition du taux de création des bulles d'air dans la préforme change radicalement, lorsque nous réalisons la simulation avec la perméabilité variable.

Le fait que la perméabilité variable prenne une valeur différente en chaque position, conduit à des effets d'avance et de retard du liquide, qui sont non négligeables. Cette variation influence les temps de remplissage. Par conséquent, la compétition entre les écoulements dans les capillaires est assez importante, notamment l'alternance entre les deux capillaires (vis-à-vis de celui qui se remplira en premier) est bien prononcée dans cette configuration.

Cette observation peut également être expliquée par les deux courbes suivantes (Fig.3-23) et (Fig.3-24) :

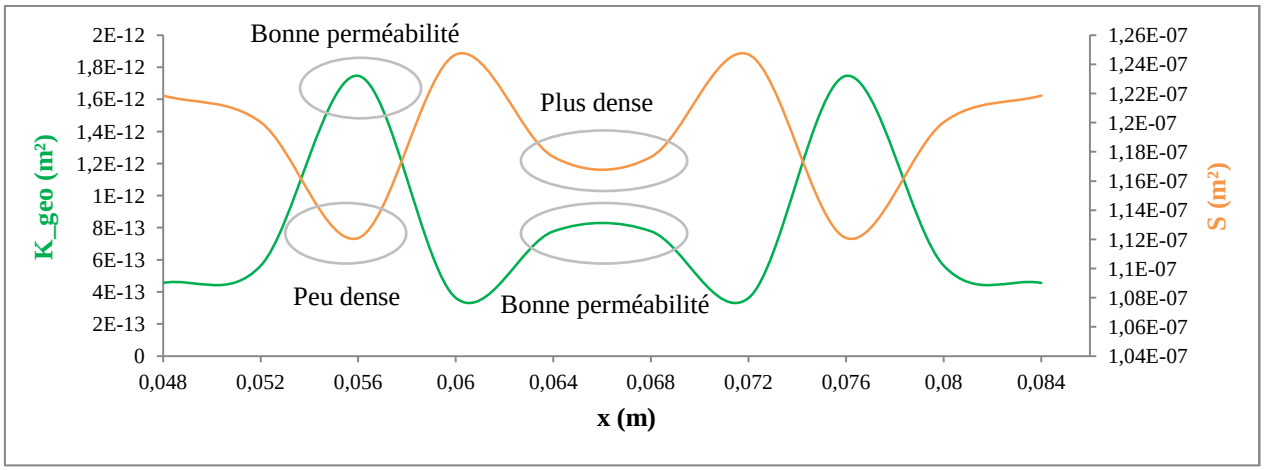


Figure 3-23 : Distribution spatiale de la Perméabilité géométrique et de la surface de la mèche sur une période

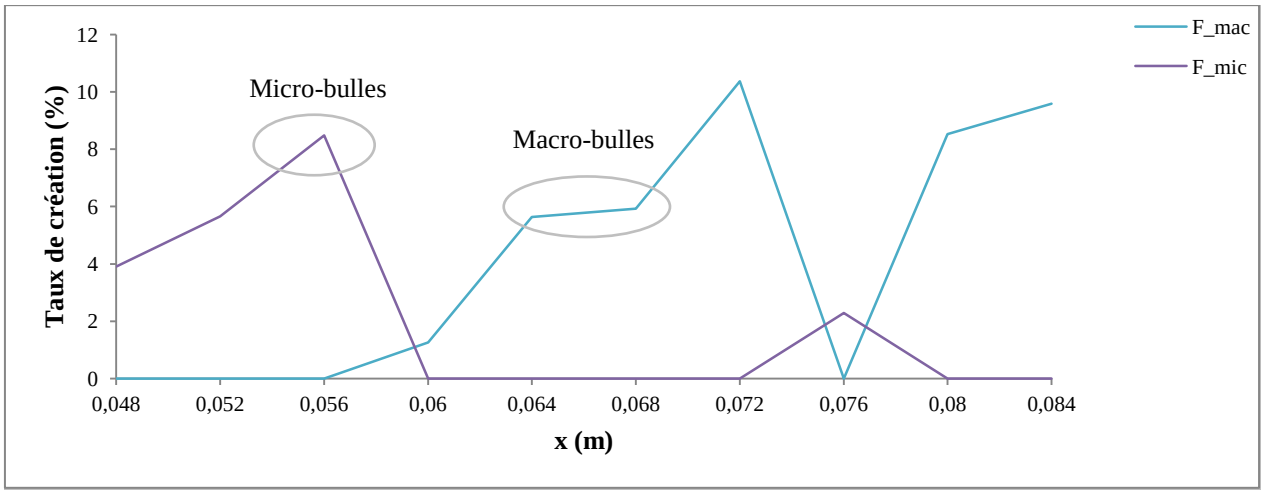


Figure 3-24 : Taux de création des bulles d'air sur une période

Sur la courbe de la figure (Fig.3-23) où la surface de la mèche est minimale et la perméabilité est importante, nous déduisons que nous nous plaçons dans les canaux qui sont un milieu peu dense (surface minimale) et dans lesquels le liquide passent facilement (perméabilité importante). Par conséquent, des micro-bulles d'air sont piégées comme nous pouvons le remarquer sur la courbe de la figure (Fig.3-24). Avec le même raisonnement, si nous nous plaçons dans une partie plus dense (mèche) et dont la perméabilité est élevée (le liquide passe facilement) (Fig.3-23), alors des macro-bulles d'air seront piégées (Fig.3-24). Ainsi, entre ces deux cas ($x \in]0.056,0.06[$), nous observons la coexistence des deux types de bulles d'air micro et macro à la même position.

La chronologie de création est globalement conservée ; les micro-bulles d'air sont majoritairement présentes au début de la préforme, tandis que les macro-bulles sont plutôt prépondérantes vers la fin de celle-ci.

Par ailleurs, le taux de bulles d'air minimal n'égale pas à zéro et n'est pas unique, contrairement à la simulation à perméabilité constante, où nous relevons un seul point minimal à taux de bulles nul. En effet, zéro bulle n'est pas possible physiquement, et expérimentalement, [30] - [35] - [36], une fenêtre de processabilité est observée et non pas un unique point.

En revanche les moyennes des taux de création dans le cas de perméabilité constante et variable sont différentes. En effet, pour la perméabilité constante, le taux moyen de création macro est de 0.41% et celui micro est de 3.42% ; par contre, dans le cas de la perméabilité variable, le taux macro est de 7.67% et micro est de 0.78%. Cette différence peut être expliquée par l'effet de la microstructure de la préforme. Au fait, dans le cas où la perméabilité est constante, la géométrie du renfort n'est pas prise en compte, contrairement au cas de la perméabilité variable où celle-ci est considérée et sa variation est prise en compte.

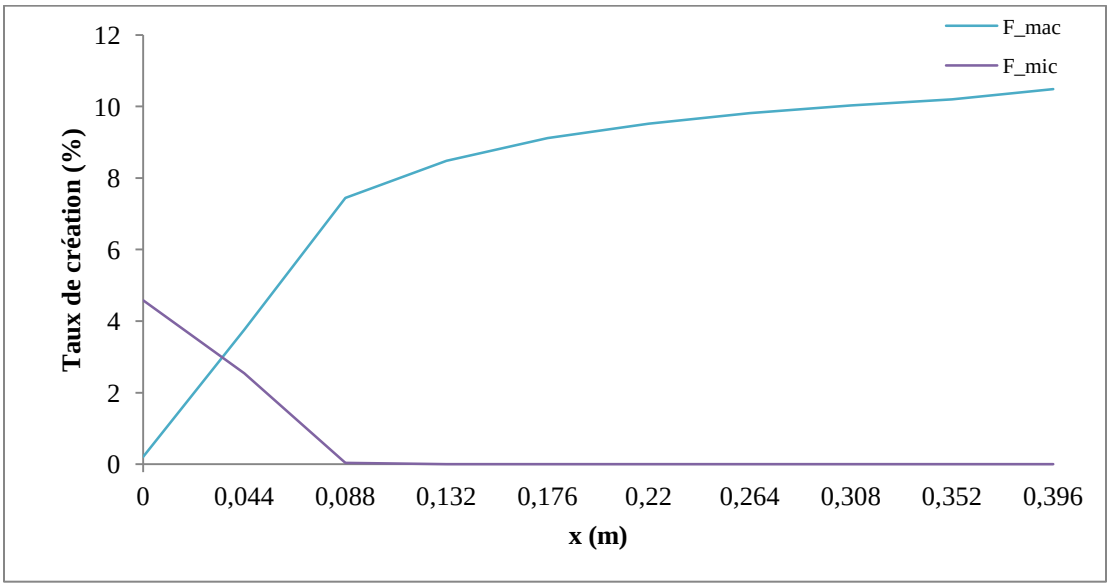


Figure 3-25 : Taux de création des bulles d'air à double échelle de pores, en fonction de la position à perméabilité variable et à valeurs moyennées

La courbe (Fig.3-25) décrit les taux de création des micro et macro-bulles d'air en fonction de la position, dans le cas de la perméabilité variable, mais à des valeurs de création moyennées. En effet, d'un côté, nous avons constaté que c'est à cause de la perméabilité que nous obtenons des

profils de courbes linéaires continus (Fig.3-21) ou discontinus (Fig.3-22). Egalement, d'un autre côté, nous avons montré la coexistence des deux types de bulles d'air, à la même position, dans le cas de la perméabilité variable (Fig.3-22). Alors, à partir de ces constats, nous nous sommes résolus à calculer la moyenne des taux créés sur chaque période de la mèche (Fig.3-11) et présenté leur évolution sur la courbe (Fig.3-25) ci-dessus. En conséquence, parce que la perméabilité est variable, alors nous avons la coexistence des deux types de bulles d'air, et puisque nous traçons des valeurs moyennées, alors les courbes sont linéaires continues.

Si nous négligeons la coexistence, alors nous allons retrouver 'la courbe en V', communément approuvée comme présentation du phénomène de création.

3.2. Phénomène de compression des bulles d'air

3.2.1. Principe de compression

Le mouvement du liquide autour des bulles d'air réduit la taille de ces dernières. En effet, au fur et à mesure que le liquide avance, il applique une pression sur les bulles d'air de manière qui peut réduire leur taille. La modélisation de ce phénomène peut être conduite à l'aide de la loi des gaz parfaits [37]. En revanche, le traitement de ce phénomène change de l'échelle macro à l'échelle micro. Dans le premier cas, nous parlons de la compression, tandis que dans le second, nous parlons de la saturation de la mèche.

La loi des gaz parfaits traduit que :

$$P_g = \rho_g RT \qquad (3-61)$$

Dans les conditions isothermes où c'est le cas ici, cette relation peut être ramenée à :

$$P_a V_a = constante \qquad (3-62)$$

Ainsi, en connaissant la pression exercée sur les bulles d'air, nous pouvons déduire le volume de celles-ci après compression, d'où leur taux volumique quantifiant ce dit phénomène.

3.2.2. Compression dans les macro-capillaires

Dans les canaux, la pression de la résine est prépondérante. En conséquence, la taille des bulles d'air est réduite sous l'action de cette dernière.

En appliquant la loi des gaz parfaits sur une macro-bulle d'air (Fig.3-26) et (Fig.3-27), nous aurons :

$$V(t) = V_0 \frac{P_0}{P(t)} \qquad (3-63)$$

Avec $V(t)$ est le volume de la bulle après compression et $P(t)$ est la nouvelle pression de la résine après compression.

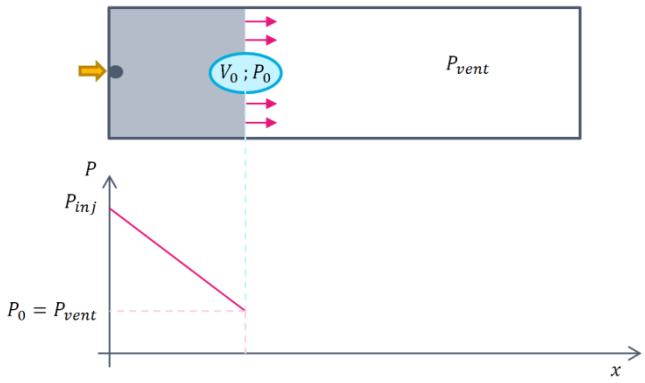


Figure 3-26 : Pression de la résine et volume de la bulle d'air avant compression [33]

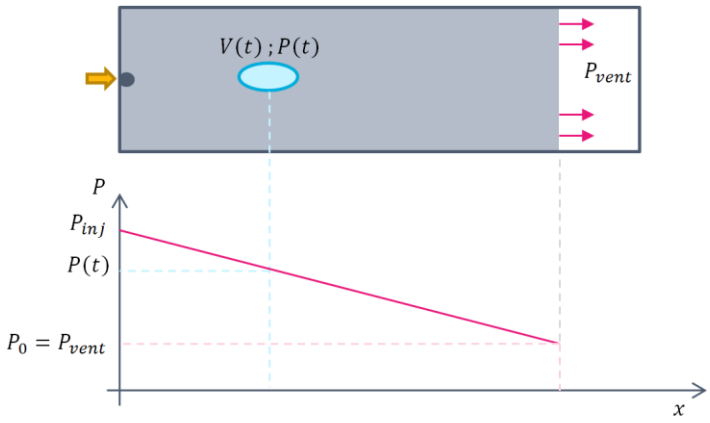


Figure 3-27 : Pression de la résine et volume de la bulle d'air après compression [33]

L'expression (Eq.3-64) peut être appliquée au volume d'air entre deux instants t et $t + \mathrm{d}t$:

$$\phi_{air,mac}^{C}(t + \mathrm{d}t, x) = \frac{P(t,x)}{P(t + \mathrm{d}t, x)} \phi_{air,mac}^{C}(t,x) \qquad (3-64)$$

$$V_{air,mac}^{C} = \phi_{air,mac}^{C}(1 - V_T) \qquad (3-65)$$

C'est cette dernière relation (Eq.3-65) qui sera exploitée pour quantifier le taux de macro-bulles d'air comprimées.

La compression des macro-bulles d'air est modélisée de la même manière, dans les deux cas de perméabilité constante et variable.

3.2.3. Saturation de la mèche dans les micro-capillaires

a. Cas de la perméabilité constante

A l'échelle des micro-pores, la perméabilité à l'intérieur de la mèche est inférieure à celle dans le canal. Par conséquent, aucune pression n'est négligée, notamment la pression capillaire et la pression de l'air à l'intérieur de la bulle.

Le flux transverse dans la mèche est estimé par la loi de Darcy (Eq.3-5) en utilisant une différence entre la pression de la résine à l'extérieur de la mèche et la pression de l'air emprisonné à l'intérieur de la mèche [13].

Ce flux transverse est estimé par :

$$q_{\perp} = \frac{K_{\perp}}{\mu} \frac{P_{résine} - P_{air} + P_{cap,\perp}}{\mathrm{H} - h_{air}} \qquad (3-66)$$

La demi-hauteur moyenne de la bulle h_{air} peut être exprimée en fonction de la portion de mèche non remplie $\phi_{air,mic}^{C}$ (Eq.3-67) :

$$h_{air} = \mathrm{H}\, \phi_{air,mic}^{C} \qquad (3-67)$$

En conséquent, la portion non remplie (Fig.3-28) est mise à jour en utilisant l'équation (Eq.3-68) :

$$\phi_{air,mic}^{C}(t+\mathrm{d}t) = \phi_{air,mic}^{C}(t) - \frac{2q_{\perp}A_e\mathrm{d}t}{(1-V_f)(l_{T,x}l_{T,y}H)} \qquad (3-68)$$

$$V_{air,mic}^{C} = \phi_{air,mic}^{C}(1-V_f)V_T \qquad (3-69)$$

L'expression (Eq.3-69) donne le taux de micro-bulles d'air comprimées.

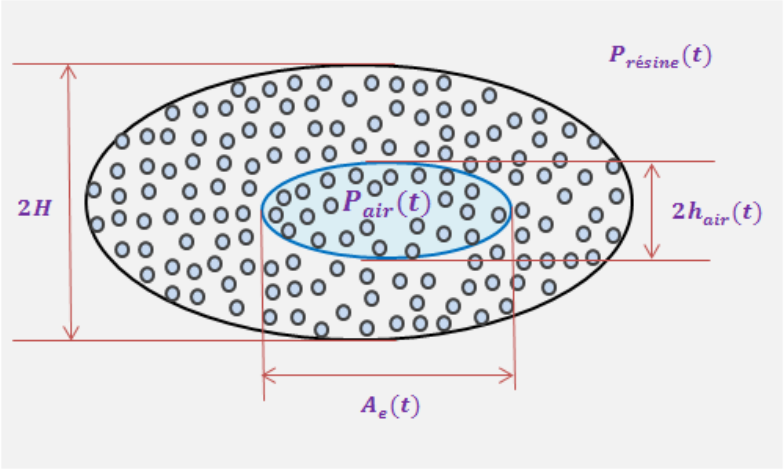


Figure 3-28 : Saturation de la mèche

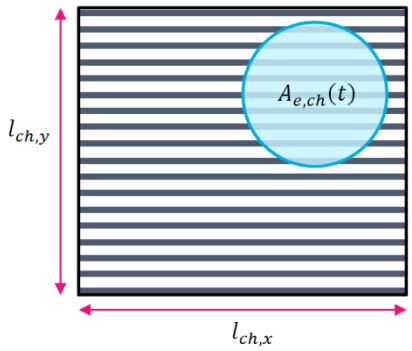


Figure 3-29 : Aire effective de la zone d'imprégnation

La pression de l'air à l'intérieur de la bulle est mise à jour par le biais de la loi des gaz parfaits :

$$P_{air}(t+\mathrm{d}t) = \frac{\phi_{air,mic}^{C}(t)}{\phi_{air,mic}^{C}(t+\mathrm{d}t)}P_{air}(t) \qquad (3-70)$$

La schématisation de ce phénomène est représentée sur la figure suivante (Fig.3-30) :

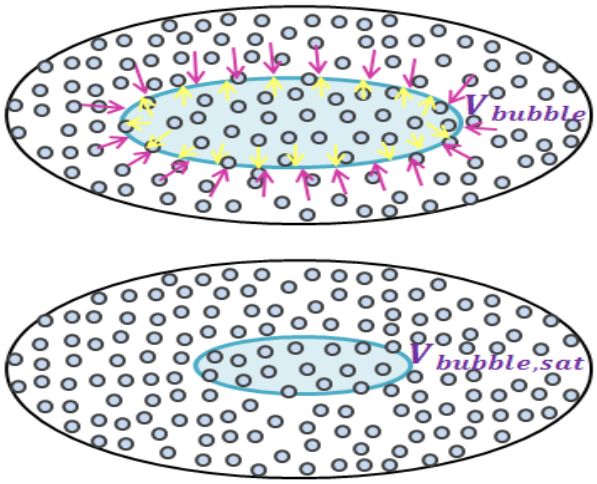


Figure 3-30 : Réduction de la taille de la micro-bulle d'air

De cette manière, nous estimons le taux de micro-bulles d'air saturées et la pression de l'air à l'intérieur de celles-ci.

b. Cas de la perméabilité variable

Dans le cas où la perméabilité de la préforme évolue en fonction de la position, nous allons calculer le flux longitudinal (Eq.3-71) au lieu de celui transversal (Eq.3-66). En effet, dans cette configuration nous supposons que la réduction de la taille se passe dans la direction parallèle aux fibres.

$$q_{\parallel} = \frac{K_{\mathrm{mic}}}{\mu} \frac{P_{résine} - P_{air} + P_{cap,\parallel}}{\mathrm{H} - h_{air}} \qquad (3-71)$$

La même démarche présentée au paragraphe précédent est appliquée ici. Elle nous conduit à une estimation du taux de micro-bulles d'air saturées par la relation (Eq.3-73) et à celle de la pression de l'air dans les micro-bulles donnée par l'expression (Eq.3-74).

$$\phi^{C}_{air,mic}(t+\mathrm{d}t) = \phi^{C}_{air,mic}(t) - \frac{2q_{\parallel}A_e\mathrm{d}t}{(1-V_f)(l_{ch,x}l_{ch,y}H)} \qquad (3-72)$$

$$V^{C}_{air,mic} = \phi^{C}_{air,mic}(1-V_f)V_T \qquad (3-73)$$

$$P_{air}(t+\mathrm{d}t) = \frac{\phi^{C}_{air,mic}(t)}{\phi^{C}_{air,mic}(t+\mathrm{d}t)} P_{air}(t) \qquad (3-74)$$

3.2.4. Résultats de la simulation numérique

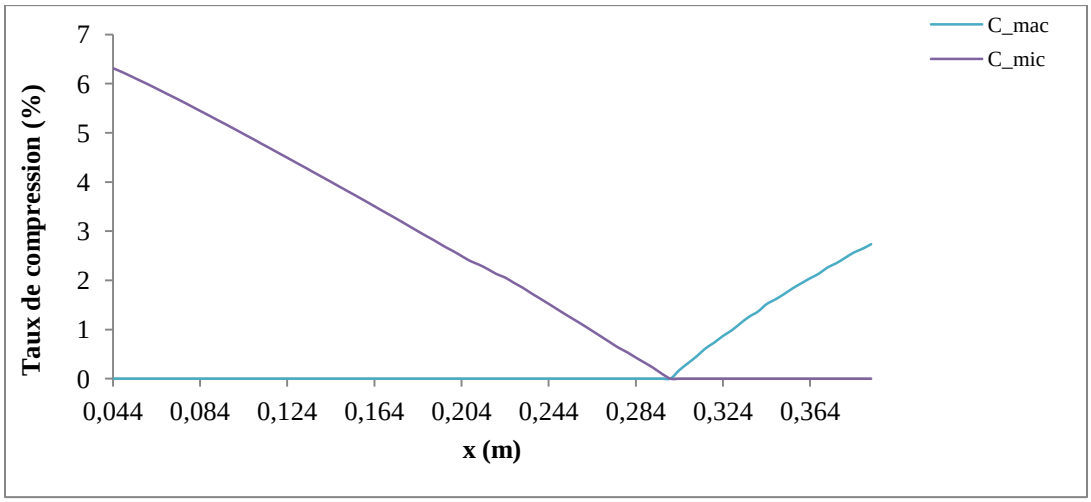


Figure 3-31 : Taux de compression des bulles d'air à double échelle de pores, en fonction de la position à perméabilité constante

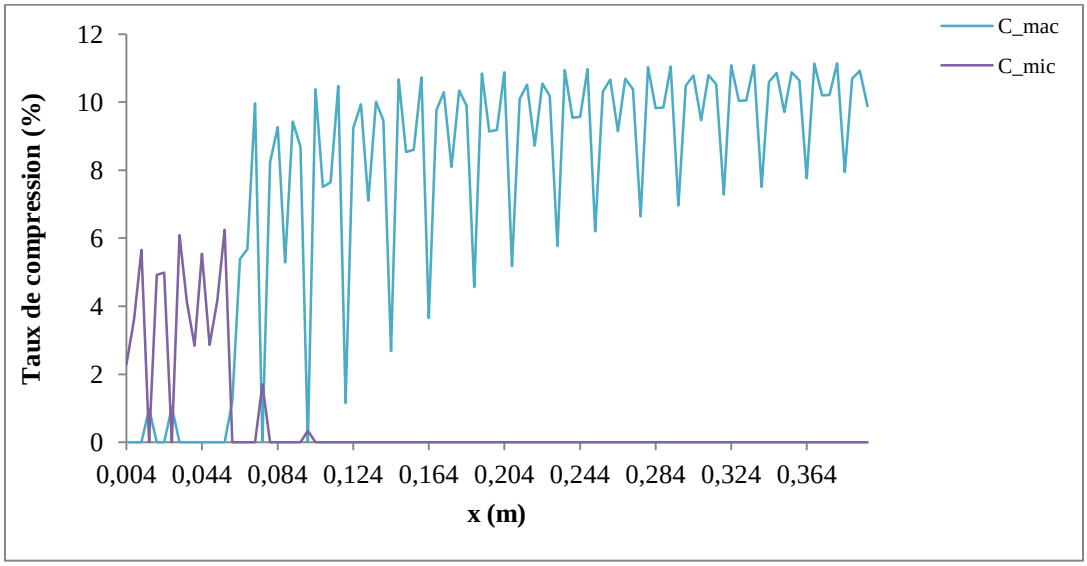


Figure 3-32 : Taux de compression des bulles d'air à double échelle de pores, en fonction de la position à perméabilité variable

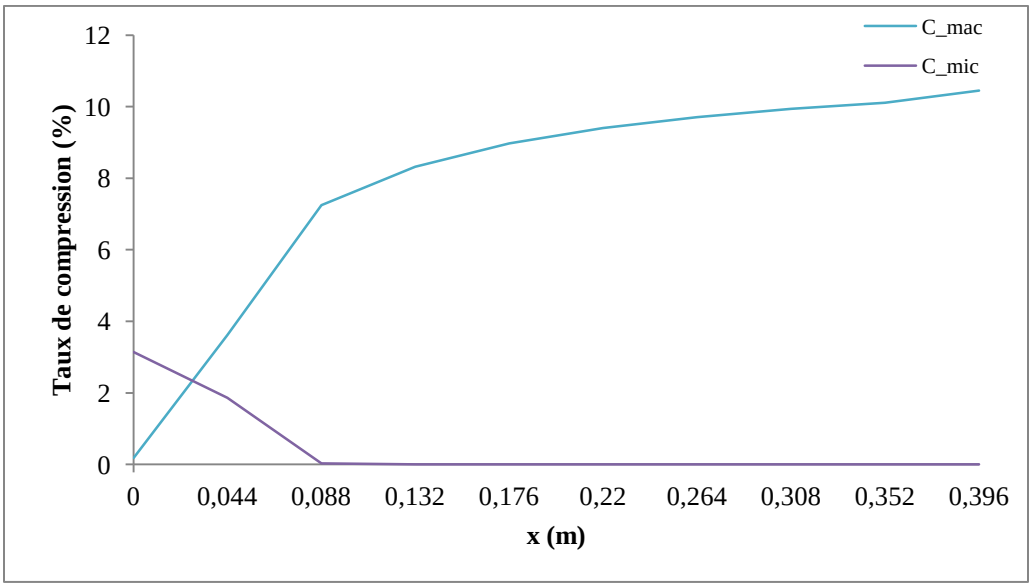


Figure 3-33 : Taux de compression des bulles d'air à double échelle de pores, en fonction de la position à perméabilité variable et à valeurs moyennées

Les mêmes constats ainsi que les explications donnés au paragraphe 3.1.4. sont valables ici. Notamment l'effet de la variation spatiale de la perméabilité sur la répartition des taux de bulles d'air comprimées (Fig.3-23).

Nous notons que le phénomène de compression a un comportement identique que celui de la création.

La figure (Fig.3-31) décrit dans le cas de la perméabilité constante, la distribution spatiale du taux de bulles d'air obtenue en fin de l'injection, avec prise en compte de la modélisation des deux phénomènes : création et compression. Tandis que les figures (Fig.3-32) et (Fig.3-33) présentent le profil de cette répartition dans le cas de la perméabilité variable, sans et avec les valeurs moyennées, respectivement.

Par comparaison entre les courbes des figures (Fig.3-21) et (Fig.3-31), nous pouvons noter que la prise en compte du phénomène de compression conduit à un taux de bulles d'air plus réduit que dans le cas de sa non-prise en compte.

Par ailleurs, nous notons que l'effet de la saturation des micro-bulles d'air est plus important que celui de la compression des macro-bulles d'air. En effet, cette dernière est pilotée uniquement par

la valeur de la pression de la résine ; par contre, la première dépend de la pression de la résine, de l'air et capillaire.

3.3. Phénomène de transport des bulles d'air

La modélisation du phénomène de transport des bulles d'air se fait indépendamment que la perméabilité utilisée soit constante ou variable. La même démarche sera adoptée pour les deux cas.

3.3.1. Modèle existant

L'approche la plus utilisée pour modéliser le phénomène de transport à l'inter-mèches, est celle proposée par Eun [25]. En effet, cet auteur a établi, grâce à des essais expérimentaux, une relation entre la vitesse de la résine et celle de l'air (Eq.3-75).

$$u_{air,mac} = F_u u_{résine} \qquad (3-75)$$

Avec :

$$F_u = \begin{cases} \Upsilon(1 - \frac{1}{2} e^{\delta(u_{crit} - u_{résine})} \; ; pour\ u_{crit} \geq u_{résine} \\ \frac{\Upsilon}{2} e^{\delta(u_{résine} - u_{crit})} \; ; pour\ u_{crit} < u_{résine} \end{cases} \qquad (3-76)$$

Où u_{crit} est la vitesse critique de la résine à partir de laquelle les bulles d'air se déplacent plus rapidement que la résine (Fig.3-34).

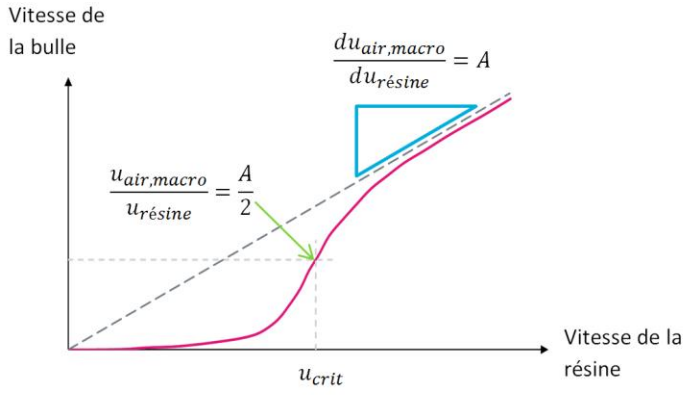


Figure 3-34 : Vitesse de la bulle en fonction de la vitesse de la résine [33]

Lee [11] a intégré ce modèle dans ses travaux numériques, et a réussi à quantifier le taux de macro-bulles d'air transportées.

Au niveau de l'intra-mèche, une vitesse relative des micro-bulles d'air a été définie [33] :

$$u_{air,mic,rel} = u_{air,mic} - u_{résine} \qquad (3-77)$$

L'étude sur sa valeur révèle qu'elle est quasi-nulle [33]. Cela s'explique par le fait que la taille des pores à l'intérieur des mèches est très petite, ce qui implique que l'effet de la tension de surface est grand. La bulle d'air se déplace donc à la même vitesse que la résine, dans les micro-capillaires.

Sous l'hypothèse que le gradient de pression dans le micro-pore est égal à celui dans le macro-pore, et à l'aide de l'équation de Darcy (Eq.3-5), nous exprimons la vitesse des bulles d'air en fonction de celle de la résine :

$$u_{air,mic} = \frac{K_{\parallel}}{K_{unsat}} u_{résine} \qquad (3-78)$$

A partir de la relation (Eq.3-79), la quantité des micro-bulles d'air transportées peut être estimée.

3.3.2. Equation de transport

La modélisation du transport des bulles d'air par l'écoulement du liquide est décrite par l'équation de transport suivante :

$$\frac{\partial V_{air}^{T}}{\partial t} + \nabla(V_{air}^{T}.u_b) = \dot{S} \qquad (3-79)$$

Où le terme source $\dot{S}$ sera associé soit aux macro-bulles d'air ($\dot{S} = \dot{S}_{mac}$) soit aux micro-bulles d'air ($\dot{S} = \dot{S}_{mic}$).

Pour quantifier le taux de bulles d'air V_{air}^{T} à l'aide de cette équation, il faut d'abord estimer la vitesse u_b et le terme source $\dot{S}$.

Dans le paragraphe précédent, nous avons exposé les approches empiriques employées pour l'estimation de la vitesse des bulles d'air à double échelle de pores.

Dans le cadre de ce travail, nous allons adopter un modèle qui permet le calcul de cette vitesse en fonction de paramètres quantifiables, évitant ainsi le recours à des mesures expérimentales pour leur identification.

Quant au terme source proposé, son développement tient compte de la physique du transport des bulles d'air et comportera toutes les composantes susceptibles d'alimenter la quantité transportée.

3.3.2.1. Vitesse des bulles d'air

La vitesse du liquide estimée par l'équation de Darcy (Eq.3-35) est utilisée pour déterminer celle des bulles d'air. En effet, Ben Abdelwahed [31] a donné un modèle reliant ces deux grandeurs permettant ainsi d'évaluer la vitesse de l'air sans passer par l'expérimental (Eq.3-80).

$$\frac{u_b - u_l}{u_b} = \frac{2.2\,(Ca^{**})^{2/3}}{1 + 3.4\,(Ca^{**})^{2/3}} \qquad (3-80)$$

L'établissement de la relation (Eq.3-80) a été basé sur le calcul du volume du liquide résiduel après passage de la bulle d'air.

Un capillaire de rayon R_c est initialement rempli de liquide, une fois la bulle créée passe à travers celui-ci, il reste une portion du liquide sur les parois du capillaire d'épaisseur e, dont le volume est fonction du volume du liquide et de la bulle (Fig.3-35).

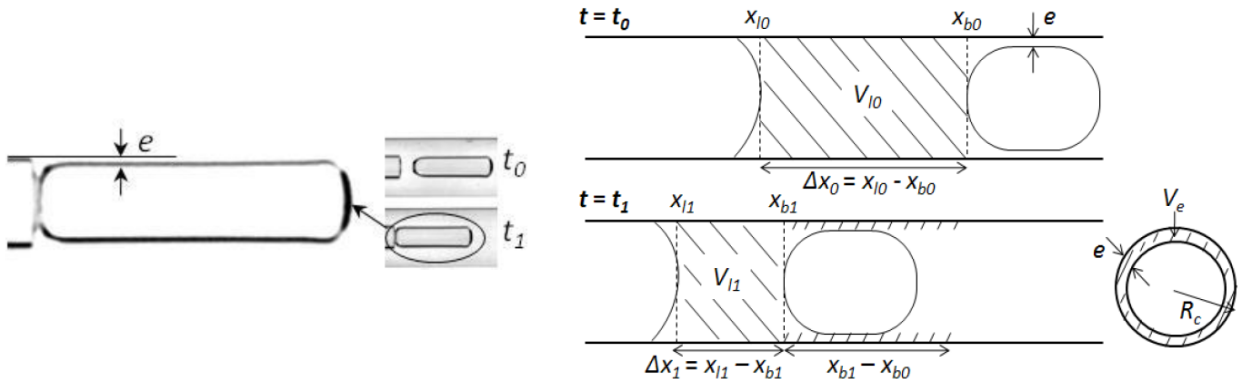


Figure 3-35 : Lubrification de la paroi du capillaire [31]

Le modèle analytique (Eq.3-81) permet de calculer l'épaisseur du liquide en fonction des vitesses :

$$\frac{e}{R_c} = 1 - \left(\frac{u_l}{u_b}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (3-81)$$

Afin de s'en passer des grandeurs expérimentales, l'auteur a fait appel à plusieurs bibliographies [60], [61] et [62] qui lui ont permis d'exprimer les vitesses en fonction du nombre capillaire.

Après simplifications, la vitesse des bulles d'air a été déduite à partir de celle du liquide et en fonction du nombre capillaire (Eq.3-80).

Sur le plan numérique, la résolution de cette équation a été conduite par la méthode de Newton.

3.3.2.2. Terme source

Ce terme source est défini pour tenir compte des phénomènes de conservation et de migration ((Eq.3-82) à l'échelle macro et (Eq.3-83) à l'échelle micro). En effet, il englobe les quantités de bulles d'air qui conservent leur nature macro/micro jusqu'à la fin de l'injection ; et celles qui migrent de macro-capillaires vers les micros et inversement.

$$\dot{S}_{mac} = V^{C}_{air,mac} + M_{mic} - M_{mac} \qquad (3-82)$$

$$\dot{S}_{mic} = V^{C}_{air,mic} + M_{mac} - M_{mic} \qquad (3-83)$$

Avec :

La première catégorie, notéeV^{C}_{air}, regroupe les bulles d'air créées et comprimées macros et micros qui demeurent macros et micros jusqu'à la fin de l'injection et respectivement (Fig.3-36). Ce sont les quantités estimées via les démarches expliquées précédemment dans les deux premiers paragraphes (phénomènes de création et de compression).

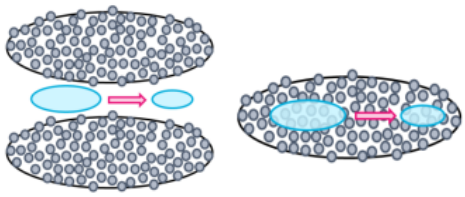


Figure 3-36 : Phénomène de conservation

Concernant la seconde catégorie notée M, elle représente les micro-bulles d'air qui passent dans les macro-capillaires et les macro-bulles d'air qui passent dans les micro-capillaires (Fig.3-37).

Ce sont les quantités de bulles d'air qui ont emprunté, lors de leur déplacement, un autre capillaire autre que celui dans lequel elles ont été formées et comprimées.

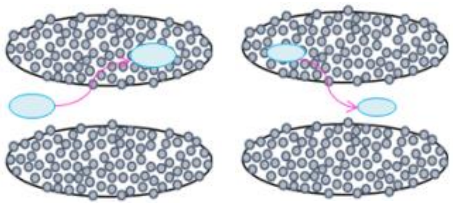


Figure 3-37 : Phénomène de migration

La soustraction des quantités changeant de cheminement (intra-mèches vers inter-mèches et vice versa), a été établie pour assurer la conservation de volume des bulles d'air tout au long de la préforme et durant toute la phase d'injection.

Dans ce travail, la quantification du phénomène de migration est basée sur l'utilisation des notions de fréquences de migration macro et micro. L'approche expérimentale pour leur détermination est une voie possible qui peut être envisagée, mais sa mise en place n'est pas aussi évidente. Nous avons donc opté dans un premier temps à l'utilisation des valeurs de fréquences proposées f_{mic} et f_{mac}.

Ainsi, les quantités migrantes peuvent être évaluées par :

$$M_{mac} = f_{mac} V_{air,mac}^{C} \qquad (3-84)$$

Et

$$M_{mic} = f_{mic} V_{air,mac}^{C} \qquad (3-85)$$

Le choix des valeurs de ces fréquences n'est limité que par leur somme. En effet, $(f_{mic} + f_{mac})$ ne doit pas dépasser 1 (100% de migration), par définition.

Pour modéliser ce phénomène de migration, nous avons imposé ces deux conditions, que nous appelons **les conditions de migration** :

- Une micro-bulle d'air ne peut se déplacer que si sa pression intérieure dépasse la somme de la pression de la résine et la pression capillaire. Dans le cas contraire, la micro-bulle d'air reste stationnaire ;

- La probabilité qu'une macro-bulle d'air devienne micro est faible. Physiquement, il est difficile d'entrer dans l'intra-mèche que d'en sortir. En plus, notre travail est conduit dans le cadre d'un flux laminaire, donc il est difficile de diviser une macro-bulle en plusieurs micros. Par conséquent, la valeur de f_{mac} va être considérée petite.

3.3.2.3. Porosité finale et saturation totale

La résolution de l'équation de transport (Eq.3-79) nous permet d'estimer la quantité de bulles d'air expulsée à l'extérieur de la pièce V_{air}^{T}.

A partir de cette dernière nous déduisons la quantité V_{air}^{R} de bulles d'air restante en fin d'injection, c'est la porosité finale de la pièce produite (Eq.3-86).

$$V_{air}^{R} = V_{air}^{C}(1 - V_{air}^{T}) \qquad (3-86)$$

En effet, nous avons soustrait la quantité transportée V_{air}^{T} de ce qui a été créé et comprimé V_{air}^{C}, afin d'en déduire le taux final de bulles d'air V_{air}^{R}.

Par ailleurs, nous pouvons passer de l'échelle méso à l'échelle macro par le biais de la saturation. Notamment, la porosité finale de la préforme sert de pont pour remonter à l'échelle de la pièce et vérifier son imprégnation. La saturation globale de la préforme, est donnée par [13] :

$$s = \frac{1 - V_f - V_{air}^{R}}{1 - V_f} \qquad (3-87)$$

3.3.3. Résultats de la simulation numérique

3.3.3.1. Vitesses du liquide et des bulles d'air

La vitesse du liquide est définie en fonction de la perméabilité, du gradient de pression et de la viscosité (Eq.3-35). Cette dernière est supposée constante durant toute l'injection, le gradient de pression l'est également. En effet, la courbe de pression en fonction de la position est linéaire avec une pente constante (Fig.3-27). Par conséquent, c'est la perméabilité qui décide de la nature de la vitesse, si elle est constante ou variable.

Dans le cas où la perméabilité est constante, cette vitesse du liquide le sera aussi. En revanche, avec une perméabilité variable nous obtiendrons une vitesse sinusoïdale et périodique.

Le même constat est valable pour la vitesse des bulles d'air et le nombre capillaire ; car, ces deux grandeurs sont déduites à partir de la vitesse du liquide.

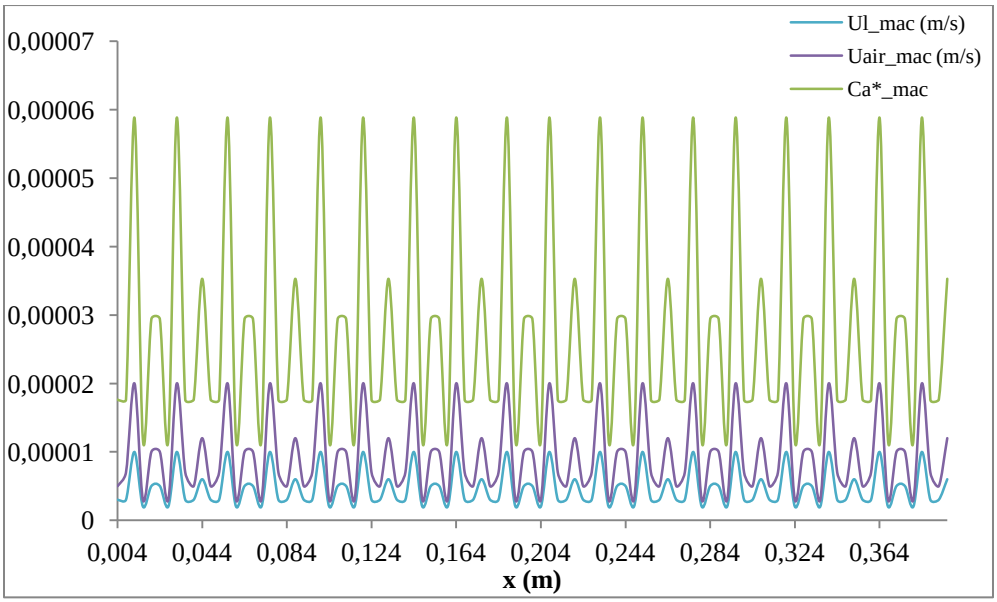


Figure 3-38 : Vitesse du liquide, vitesse des bulles d'air et le nombre capillaire modifié à l'échelle macro, en fonction de la position

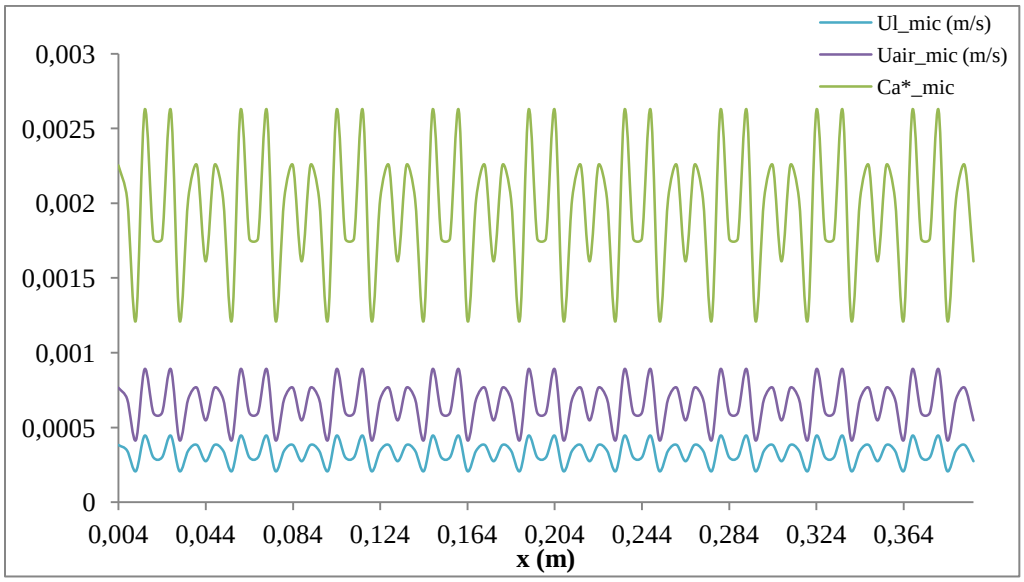


Figure 3-39 : Vitesse du liquide, vitesse des bulles d'air et le nombre capillaire modifié à l'échelle micro, en fonction de la position

Les figures (Fig.3-38) et (Fig.3-39) ci-dessus nous confirment la conservation de l'aspect sinusoïdal par le biais de la perméabilité.

Nous constatons également que la vitesse des macro-bulles d'air est supérieure ou égale à celle du liquide dans les macro-capillaires. Par ailleurs, les micro-bulles d'air se déplacent toujours plus vite que le liquide dans les micro-capillaires.

En se référant au modèle de Eun [25], alors nous concluons que le transport des bulles d'air sera fluide. Ainsi, nous pouvons conclure que cette architecture (Fig.3-8) de la préforme favorise l'évacuation des bulles d'air à l'extérieur de la pièce.

3.3.3.2. Migration des bulles d'air macro-micro

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'étude de la distribution spatiale des quantités des bulles d'air transportées et restées en fin d'injection, dans les macros et micros pores et également à la saturation totale de la préforme en fin de l'injection. Tous ces résultats seront présentés à différentes fréquences de migration macro et micro, dans le cas d'une perméabilité constante, variable et valeurs moyennées.

Le but de cette étude est de voir l'influence de l'effet du phénomène de la migration sur le transport des bulles d'air, la porosité finale et la saturation de la préforme. Dans ce cadre, nous allons considérer cinq cas de figures possibles de fréquences de migration, tel que donné sur le tableau ci-dessous (Tab.3-3) :

Tableau 3-3 : Fréquences de migration proposées

f_{mic}	f_{mac}
0	0
0.5	0.5
0.01	0.5
0.5	0.01
0.25	0.1

Cas : $f_{mic} = 0$ et $f_{mac} = 0$

Nous commençons tout d'abord par présenter les résultats de simulation du phénomène de transport, obtenus sans considérer la migration. Dans ce cas $f_{mic} = f_{mac} = 0$.

Les résultats de ces simulations sont présentés sur les courbes des figures (Fig.3-40) à (Fig.3-44).

Transport et porosité dans le cas de la perméabilité constante :

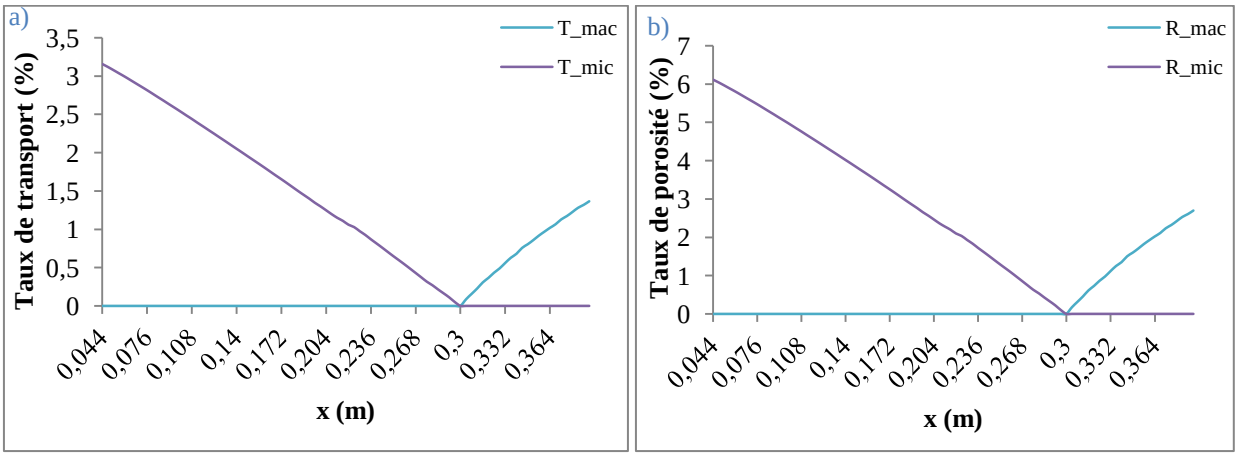


Figure 3-40 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité constante, avec $f_{mic} = 0$ et $f_{mac} = 0$

- La figure (Fig.3-40.a) décrit dans le cas d'une perméabilité constante, la quantité de bulles d'air transportées au sein des micros et macro-pores. Nous retrouvons le profil d'une courbe en V comme c'est le cas des courbes de création (Fig.3-21) et de compression (Fig.3-31). Les micro-bulles d'air sont les plus à être évacuées vue leur vitesse qui dépasse largement celle du liquide dans les micro-capillaires (Fig.3-39). Contrairement aux macro-bulles d'air qui sont peu évacuées, car leur vitesse demeure voisine de celle du liquide dans les macro-capillaires (Fig.3-38).
- Le taux de porosité finale obtenu est illustré sur la figure (Fig.3-40.b). Il garde la même allure que les courbes précédentes (Fig.3-21), (Fig.3-31) et (Fig.3-40.a), par ailleurs ses valeurs maximales micro et macro ont diminué par rapport au cas de la simulation où nous considérons uniquement le phénomène de création (Fig.3-21). Cela est dû, à l'échelle micro, à la prise en compte du phénomène de transport (Fig.3-40.a) et principalement à la saturation de la mèche (Fig.3-31). En revanche, à l'échelle macro,

c'est la contribution de la compression (Fig.3-31) et le transport (Fig.3-40.a) qui a réduit le taux de porosité macro.

En conséquence, la pièce produite comportera plus de micro-bulles d'air que de macros. En effet, d'une manière générale, le type de la porosité finale majoritaire, est le même que celui prépondérant lors du phénomène de création.

Transport et porosité dans le cas de la perméabilité variable

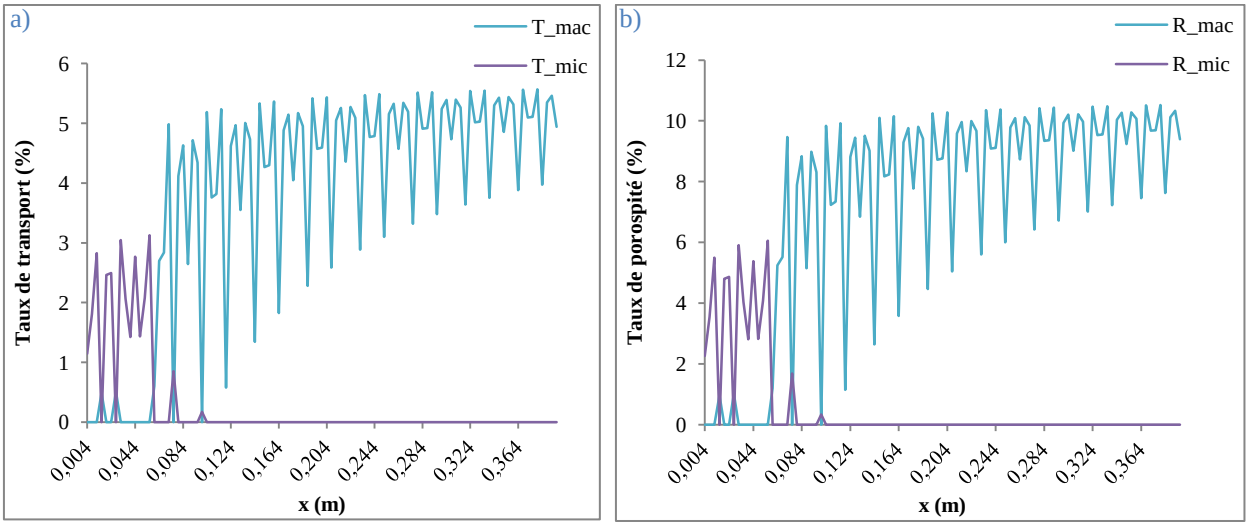


Figure 3-41 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité variable, avec $f_{mic} = 0$ et $f_{mac} = 0$

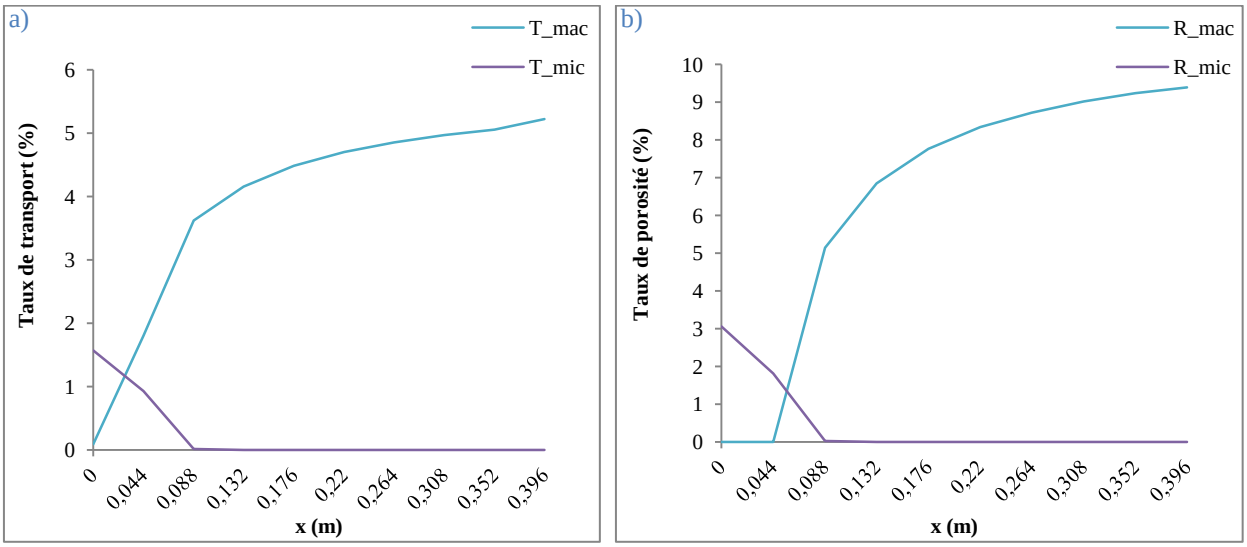


Figure 3-42 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité variable et à valeurs moyennées, avec $f_{mic} = 0$ et $f_{mac} = 0$

- La discontinuité périodique observée sur la courbe de la Fig.3-41.a décrivant la répartition spatiale du taux de transport s'explique de la même manière que celle de la création et la compression, sur la base de l'interprétation donnée par la Fig.3-23. Ce constat reste valide quel que soit le phénomène simulé tant que la perméabilité est considérée variable.

  Sur cette figure (Fig.3-41.a), nous pouvons facilement noter la coexistence des deux types de bulles d'air à la même position. Dans cette configuration, les macro-bulles d'air sont expulsées à l'extérieur de la pièce plus que les micros. En effet, le taux de création de ces premières est plus important que celui de ces dernières (Fig.3-21). Par conséquent, même si la vitesse des macro-bulles d'air ne dépasse pas largement celle du liquide (Fig.3-38), mais leur abondance en nombre, fait que leur taux de transport est plus élevé que celui des micro-bulles d'air.
- Quant à la porosité finale illustrée sur la figure (Fig.3-41.b), elle est majoritairement de type macro, car nous avons créé plus de macros que de micro-bulles d'air (Fig.3-21). En revanche, la quantité restante de micro-bulles d'air a significativement diminué par rapport au taux initial de création. Cela est grâce à la saturation de la mèche. Par contre, l'effet de la compression est faible, donc le taux de macro-bulles restées en fin d'injection n'a pas beaucoup diminué. De la même manière que précédemment, le transport des bulles d'air dans ce cas, n'a pas une grande influence sur la porosité finale.
- La figure (Fig.3-42.a) décrit la répartition spatiale des quantités des micros et macro-bulles d'air transportées. Dans ce cas, nous avons moyenné les taux transportés sur chaque période de la mèche (Fig.3-11), et nous avons tracé ces valeurs moyennes en fonction de la position. Le fait de moyenner a éliminé la discontinuité de la courbe décrivant la perméabilité variable (Fig.3-41.a), tandis que l'utilisation de cette dernière est également intéressante car elle permet de détecter la coexistence des macros et micro-bulles d'air au même endroit.
- La distribution spatiale de la porosité finale est représentée par la courbe (Fig.3-42.b). Comme nous sommes dans le cas de la perméabilité variable, alors la porosité finale est, plutôt, majoritairement de type macro. Le palier de la quantité de macro-bulles d'air restantes sur la première période n'égale pas à zéro, sa valeur est faible et représente les deux petits piques créés, comprimés et transportés aux deux positions 0.016 m et 0.028 m.

Egalement dans cette configuration, l'effet de la compression et le transport à double échelle de pores, explique les taux de porosités macro et micro finales obtenus.

Transport et porosité dans les cas de la perméabilité constante et variable

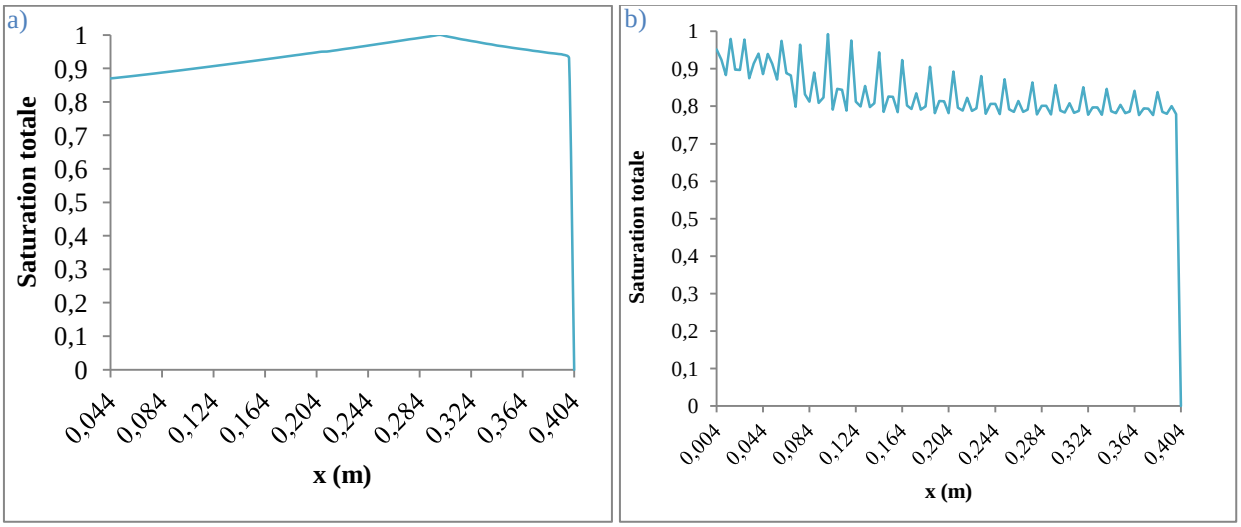


Figure 3-43 : Saturation totale en fonction de la position a) A perméabilité constante, b) A perméabilité variable, avec $f_{mic} = 0$ et $f_{mac} = 0$

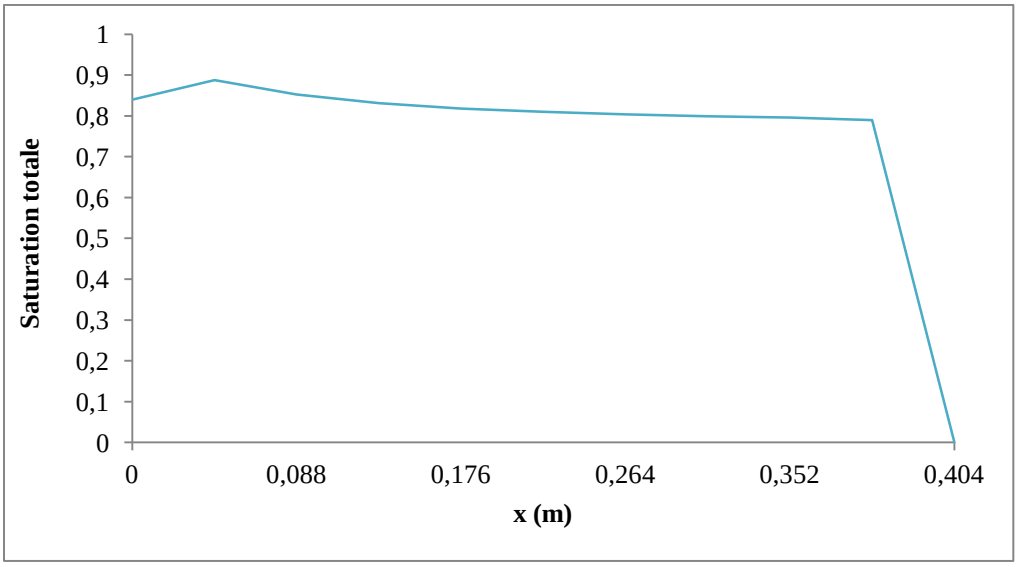


Figure 3-44 : Saturation totale en fonction de la position à perméabilité variable et à valeurs moyennées, avec $f_{mic} = 0$ et $f_{mac} = 0$

- En ce qui concerne la saturation de la préforme, elle est non linéaire dans le cas de la perméabilité variable (Fig.3-43.b) et linéaire dans les deux autres configurations (Fig.3-43.a) et (Fig.3-44). Dans tous les cas, sa valeur nous renseigne sur la qualité

d'imprégnation du produit. Une valeur maximale sur ces courbes coïncide avec une valeur minimale sur les courbes de porosité. Par ailleurs, en tenant compte de la microstructure de la préforme via la variabilité de la perméabilité, la porosité finale de celle-ci augmente et sa saturation diminue. Notamment, la préforme simulée avec la perméabilité constante (Fig.3-43.a) est mieux imprégnée que celle à perméabilité variable (Fig.3-43.b). Il est à noter que le fait de moyenner (Fig.3-44) n'affecte pas les valeurs, seulement il rend la courbe continue. Aussi, la valeur maximale de la saturation totale diffère selon la configuration considérée. En effet, cette valeur correspond à la position 0.3 m dans le cas de la perméabilité constante, et à la deuxième période (l'abscisse 0.044 m) dans le cas des valeurs de la saturation moyennées.

Cas : $f_{mic} = 0.5$ et $f_{mac} = 0.5$

Nous allons analyser ici le cas de la totale migration (100%), où 50% de macro-bulles d'air deviennent micros et 50% de micro-bulles d'air deviennent macros.

Les courbes ci-dessus (Fig.3-45) à (Fig.3-49) illustrent l'effet de migration sur le phénomène de transport dans le cas considéré : $f_{mic} = f_{mac} = 0.5$.

Transport et porosité dans le cas de la perméabilité constante

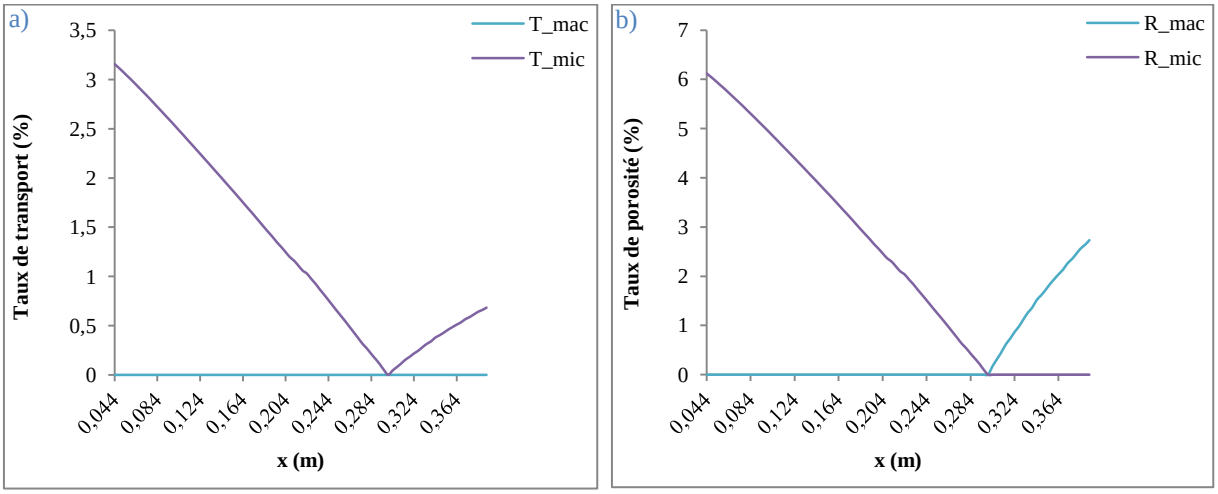


Figure 3-45 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité constante, avec $f_{mic} = 0.5$ et $f_{mac} = 0.5$

- La distribution spatiale des quantités de bulles d'air transportées obtenue, à double échelle de pores et avec la perméabilité constante, est donnée sur la figure (Fig.3-45.a). Nous

remarquons une absence du transport des macro-bulles d'air et qu'il y a uniquement transport des micros, le long de la pièce ; c'est l'effet de la migration. En effet, les micro-bulles d'air sont d'abord créées en premier dans la préforme avant le point minima ($x = 0.3\ m$) (Fig.3-21), et leur présence après de ce dit point est incitée par la migration des macro-bulles d'air qui deviennent micros. Quant à la courbe T_mac, décrivant la distribution des quantités de bulles d'air transportées le long de la préforme, elle est asymptotique à l'axe des abscisses. Cela peut être expliqué par les deux remarques suivantes : D'un côté et dans la zone gauche avant le point minima, les micro-bulles d'air n'ont pas changé de capillaires, elles sont restées micros à cause de la condition de migration citée dans le paragraphe 3.3.2.2. (une micro-bulle n'est susceptible de bouger que si la pression de l'air à l'intérieur de celle-ci est supérieure à la somme de la pression de la résine et la pression capillaire). Dans le cas où cette condition n'est pas vérifiée, la valeur de fréquence de migration micro associée est égale à zéro, d'où la valeur nulle des quantités de macro-bulles d'air transportées à gauche du minima. Ensuite, du côté droit de la courbe après le point minima, la quantité de macro-bulles d'air initialement présente est compensée par celle migrante vers les micro-capillaires.

En termes de comparaison entre les courbes de transport à perméabilité constante, à 0% et 100% de migration (Fig.3-40.a) et (Fig.3-45.a), nous constatons que la valeur maximale des micro-bulles d'air transportées n'a pas changé (3.15%), tandis que celle des macros est devenue nulle par effet de migration.

- La courbe de la figure (Fig.3-45.b) décrit la répartition du taux de bulles d'air restées en fin d'injection dans la préforme, en fonction de la position. Sur cette figure nous retrouvons des taux non nuls de chaque type. En effet, le taux de porosité est estimé à partir de l'expression (Eq.3-86). Celle-ci contient les quantités créées et comprimées macros et micros qui annulent et/ou alimentent les quantités transportées. En d'autres termes, la valeur de $V_{air,mic}^{C}$ dans la zone droite du point minima est nulle, et celle de $V_{air,mic}^{T}$ qui correspond au taux transporté micro est non-nulle ; en outre, lorsque nous appliquons l'équation (Eq.3-86), nous multiplions par zéro une quantité différente de zéro, ce qui donne un résultat nul. Par conséquent, la courbe (Fig.3-45.b) ne contient pas de micro-bulles d'air dans la partie droite du minima.

En comparant les valeurs maximales de porosité à 0% et 100% de migration, nous remarquons une légère diminution de la quantité de micro-bulles d'air restée dans la préforme (de 6.11%, dans le cas sans migration, à 6.04% dans le cas de 100% de migration), grâce au transport micro. Par ailleurs, une fine augmentation du taux de porosité macro (de 2.69%, dans le cas sans migration, à 2.73% dans le cas de 100% de migration) a été relevée, c'est parce que les macro-bulles d'air n'ont pas été transportées.

Transport et porosité dans le cas de la perméabilité variable

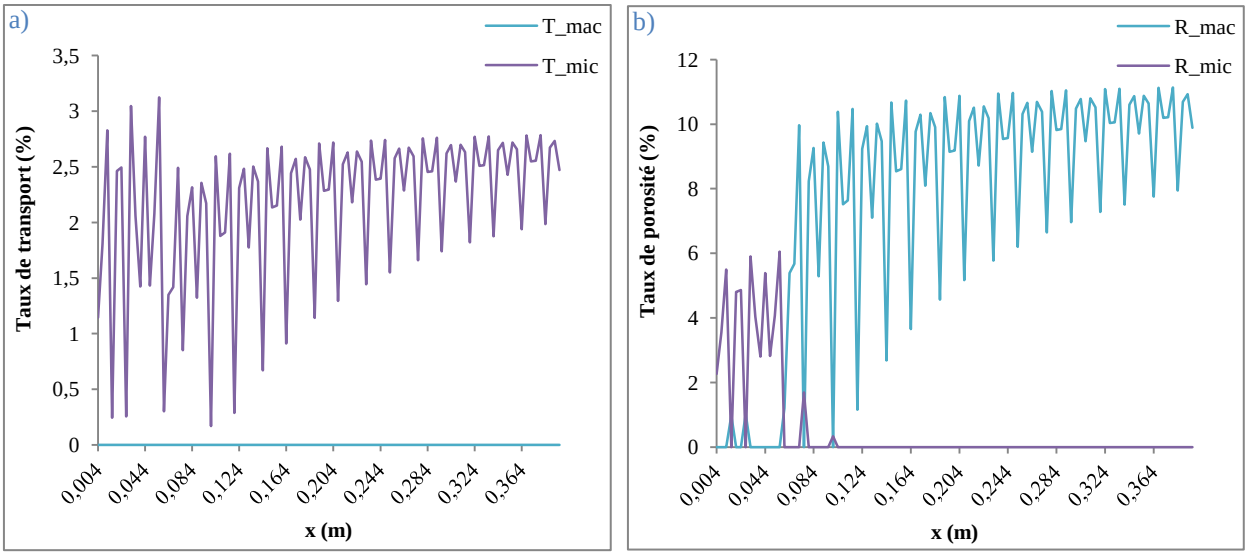


Figure 3-46 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité variable, avec f_{mic}=0.5 et f_{mac}=0.5

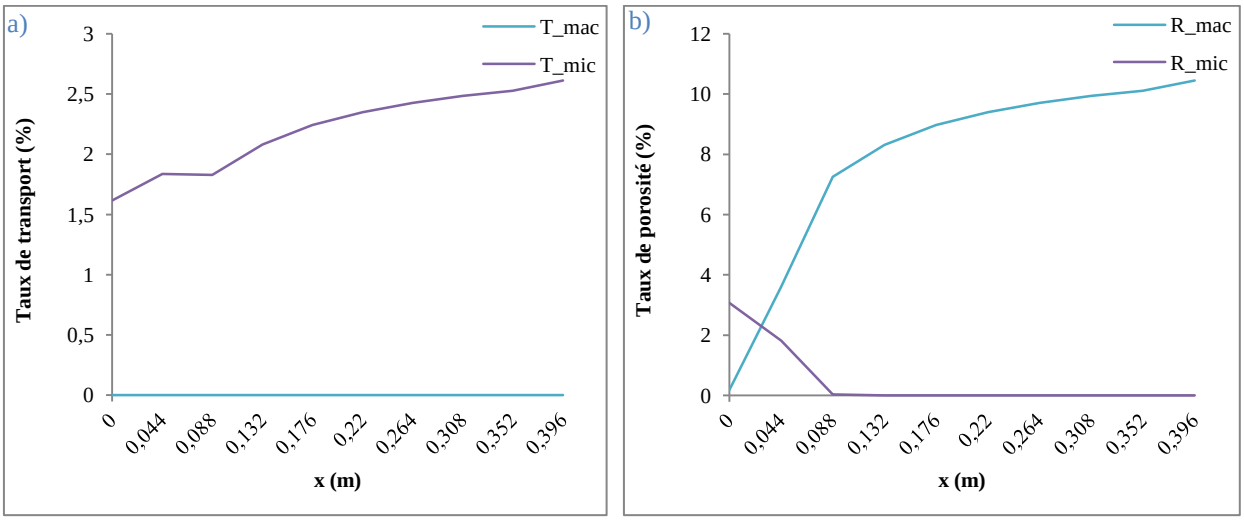


Figure 3-47 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité variable et à valeurs moyennées, avecf_{mic}=0.5 et f_{mac}=0.5

- La répartition en fin d'injection des quantités transportées macros et micros des bulles d'air en fonction de la position et avec une perméabilité variable est représentée sur la courbe (Fig.3-46.a). Dans ce cas de figure également, il n'y a que des micro-bulles d'air qui se sont transportées par l'écoulement du fluide. Un raisonnement identique à celui développé précédemment pour la figure (Fig.3-41.a) est valable pour expliquer ce fait.
- L'évolution de la porosité dans ce cas de figure est illustrée par la courbe de la figure (Fig.3-46.b). La coexistence des deux types de bulles d'air est également soulignée ici en raison de la variation spatiale de la perméabilité. Cette coexistence est constatée au cours de la formation (Fig.3-22), la compression (Fig.3-32) et non pas au cours du transport (Fig.3-46.a), mais nous la retrouvons dans l'évolution de la porosité (Fig.3-46.b) par application de l'équation (Eq.3-86).

  La valeur maximale du taux de bulles d'air micro restées en fin d'injection n'a pas changé, en comparaison avec la courbe sans migration (Fig.3-41.b). Tandis que celle des macros a augmenté à cause du phénomène de migration.
- Tous les aspects relevés à perméabilité variable sont également conservés lorsque nous moyennons les valeurs transportées (Fig.3-47.a) et restées (Fig.3-47.b). Notamment, en termes de coexistence et de valeurs.

Saturation dans les cas de la perméabilité constante et variable

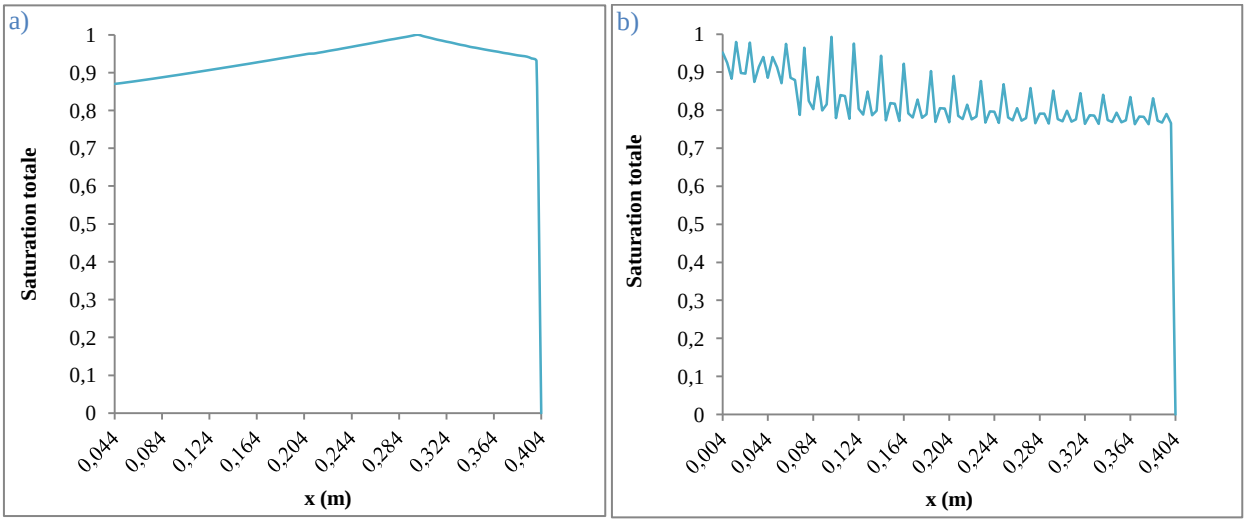


Figure 3-48 : Saturation totale en fonction de la position, a) A perméabilité constante, b) A perméabilité variable, avec f_{mic}=0.5 et f_{mac}=0.5

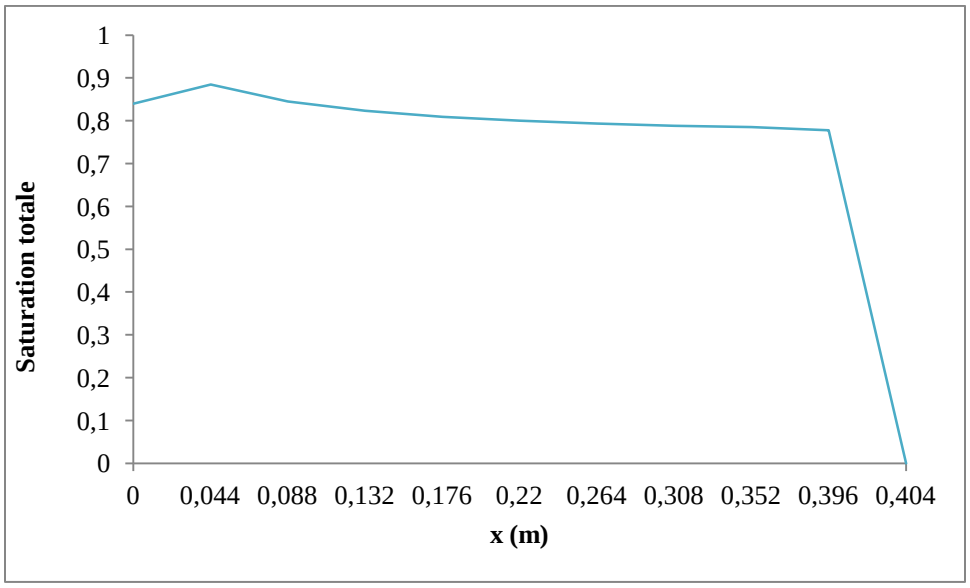


Figure 3-49 : Saturation totale en fonction de la position à perméabilité variable et à valeurs moyennées, avec f_{mic}=0.5 et f_{mac}=0.5

- La description de la saturation est donnée sur les figures (Fig.3-48.a), (Fig.3-48.b) et (Fig.3-49) dans le cas de la perméabilité constante, variable et à des valeurs moyennées, respectivement. Cette grandeur étant inversement proportionnelle à la porosité (Eq.3-87), alors le profil de sa courbe garde la même allure que celle-ci.

En comparaison avec le cas sans migration, la saturation n'a pas significativement changé. En conséquence, 50% de migration permet le transport d'un seul type de bulles d'air. Afin d'explorer cette remarque encore plus, nous allons simuler le cas : $f_{mic} = 0.01$ et $f_{mac} = 0.5$. La première valeur favorisera le transport d'un type de bulles d'air au détriment de l'autre. Tandis que la seconde défavorisera l'autre sens de migration.

Cas : $f_{mic} = 0.01$ et $f_{mac} = 0.5$

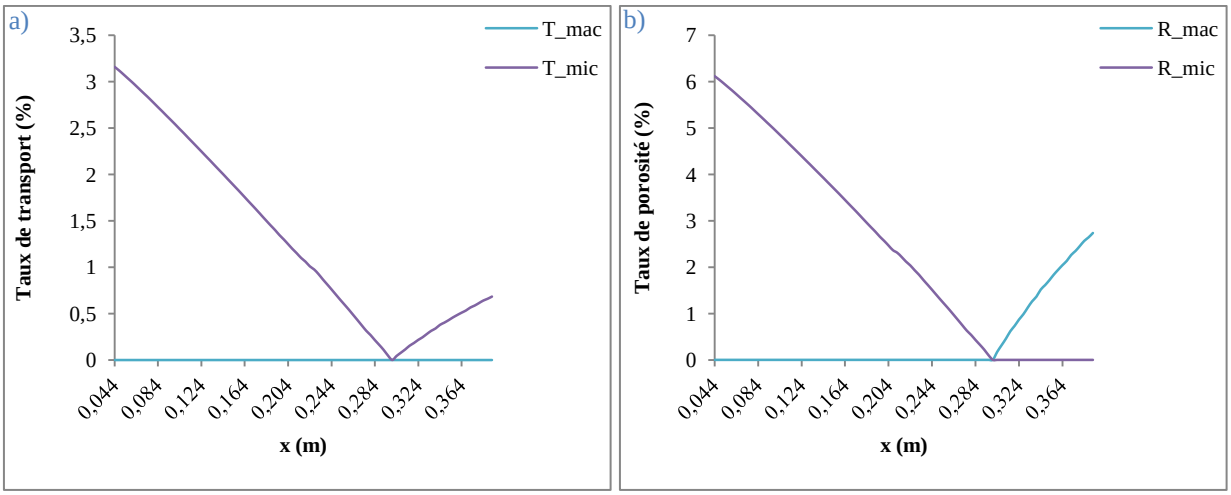


Figure 3-50 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité constante, avec $f_{mic} = 0.01$ et $f_{mac} = 0.5$

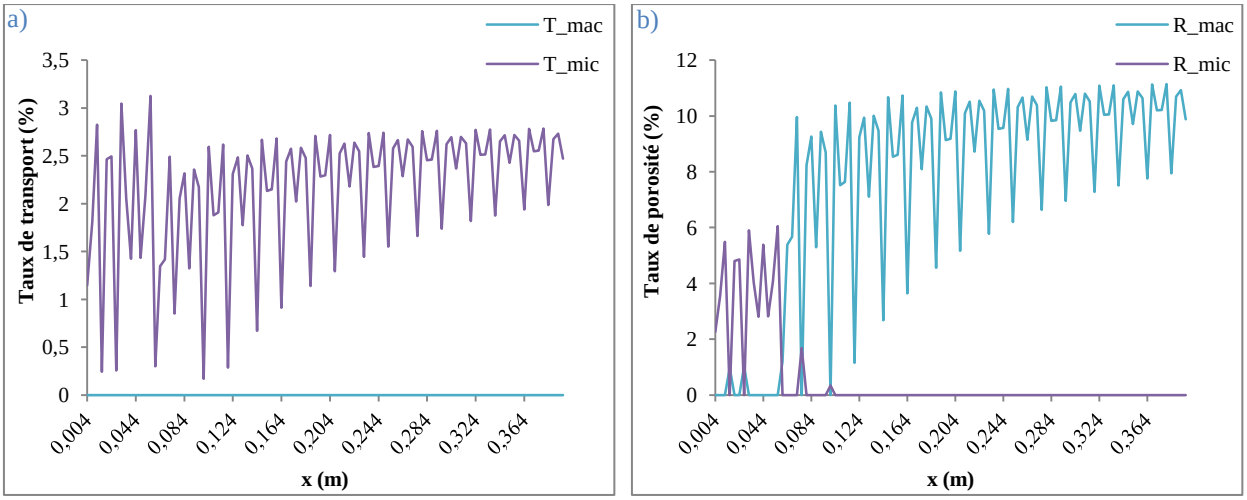


Figure 3-51 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité variable, avec $f_{mic} = 0.01$ et $f_{mac} = 0.5$

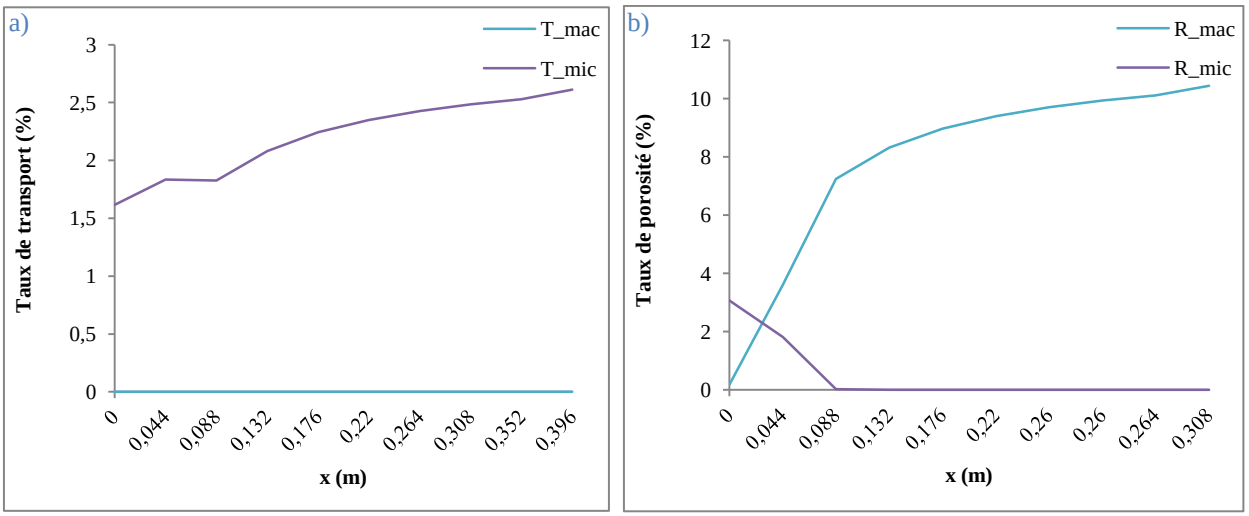


Figure 3-52 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité variable et à des valeurs moyennées, avec $f_{mic} = 0.01$ et $f_{mac} = 0.5$

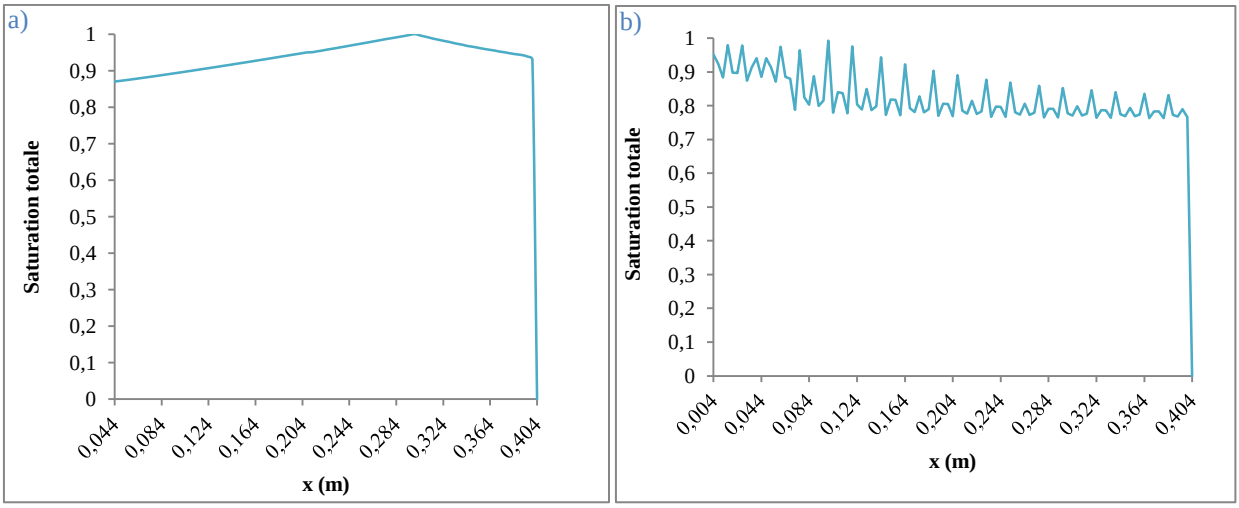


Figure 3-53 : Saturation totale en fonction de la position, a) A perméabilité constante, b) A perméabilité variable, avec $f_{mic} = 0.01$ et $f_{mac} = 0.5$

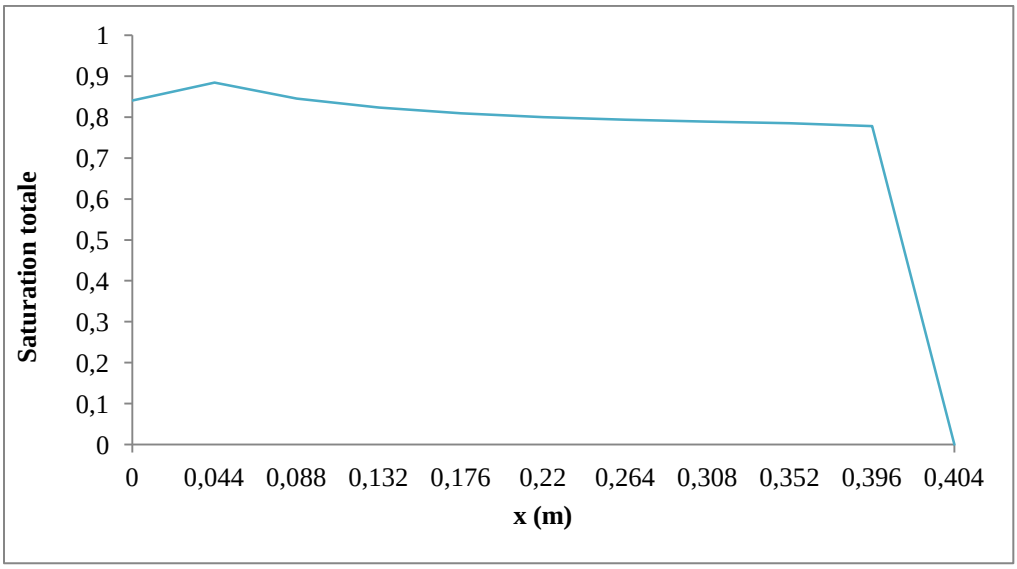


Figure 3-54 : Saturation totale en fonction de la position à perméabilité variable et à valeurs moyennées, avec $f_{mic} = 0.01$ et $f_{mac} = 0.5$

- La comparaison des courbes présentées sur les figures (Fig.3-50) à (Fig.3-54) avec celles des figures (Fig.3-45) à (Fig.3-49), montre que les allures obtenues sont assez similaires. En effet, le fait de réduire f_{mic} n'a agi que sur la quantité de micro-bulles d'air migrantes vers les macro-capillaires.
- A partir des courbes de transport (Fig.3-50.a), (Fig.3-51.a) et (Fig.3-52.a), nous pouvons constater que ce sont uniquement les micro-bulles d'air qui ont été transportées. De la même manière que précédemment, nous expliquons ce résultat. En revanche et parce que la fréquence de migration micro est faible, alors le taux maximal de transport des micro-bulles d'air a diminué par rapport à celui où $f_{mic} = 0.5$.
- Les courbes de porosité et de saturation sont quasiment identiques à celles de la migration à 50/50.

<u>Cas : $f_{mic} = 0.5$ et $f_{mac} = 0.01$</u>

Dans le cas contraire où nous inversons les fréquences telles que $f_{mic} = 0.5$ et $f_{mac} = 0.01$, nous obtenons les résultats suivants :

Transport et porosité dans le cas de la perméabilité constante

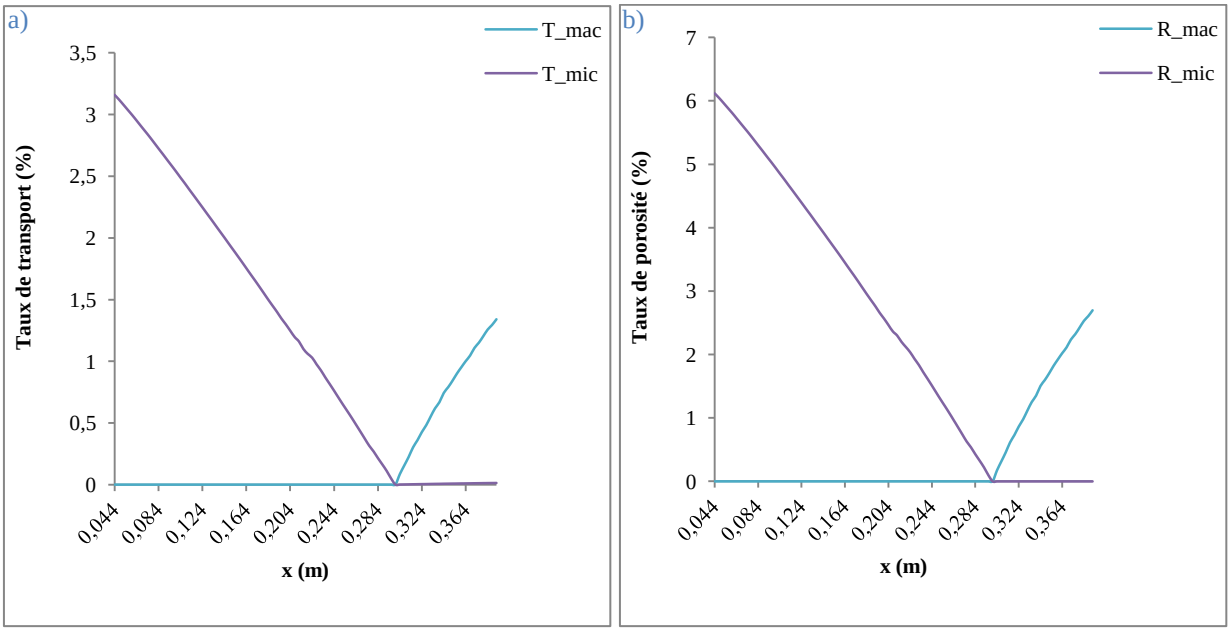


Figure 3-55 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité constante, avec $f_{mic} = 0.5$ et $f_{mac} = 0.01$

- La courbe de la figure (Fig.3-55.a) représente le taux de micro et macro-bulles d'air transportées. A gauche du point minima ($x = 0.3\ m$) nous notons la création des micro-bulles d'air et l'absence des macro-bulles. Cette absence se justifie de la même manière que précédemment (condition de migration du paragraphe 3.3.2.2.). En revanche, la partie située à droite de ce point minima, diffère de celle de la courbe (Fig.3-50.a). Nous notons notamment que les deux types de bulles d'air sont transportés. En effet, un pourcentage non nul de micro-bulles d'air est relevé, sa faible valeur est due au petit taux de migration macro ($f_{mac} = 0.01$). Egalement, le taux de macro-bulles d'air transportées est assez significatif. En appliquant le même raisonnement que dans le cas des courbes (Fig.3-45.a) et (Fig.3-50.a), le terme source cette fois n'est pas nul, car nous déduisons une faible quantité ($M_{mac} = f_{mac}C_{mac}$) de ce qui a été créé et comprimé macro (une quantité assez importante).
- La courbe décrivant la porosité est illustrée sur la figure (Fig.55.b) en fonction de la position. Sa valeur maximale micro n'a pas beaucoup changé par rapport au cas précédent ($f_{mic} = 0.01$ et $f_{mac} = 0.5$), du moment que sur la zone à gauche du minima est restée

identique. Quant à celle de droite, le taux de porosité macro a diminué vu que le pourcentage des macro-bulles d'air transportées n'est pas nul.

Transport et porosité dans le cas de la perméabilité variable

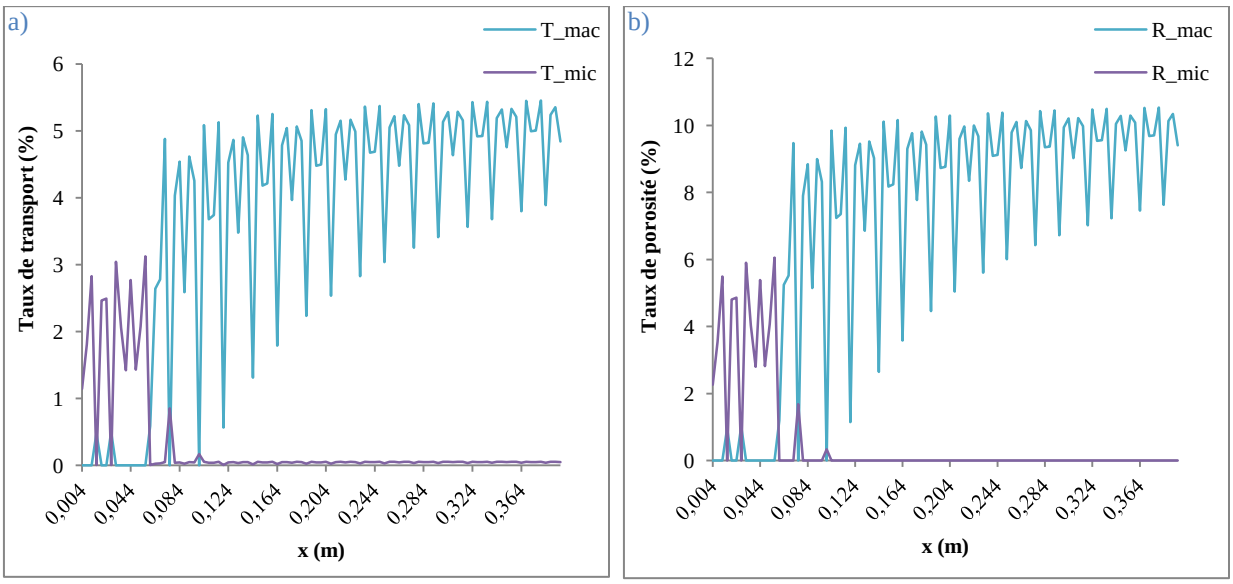


Figure 3-56 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité variable, avec $f_{mic} = 0.5$ et $f_{mac} = 0.01$

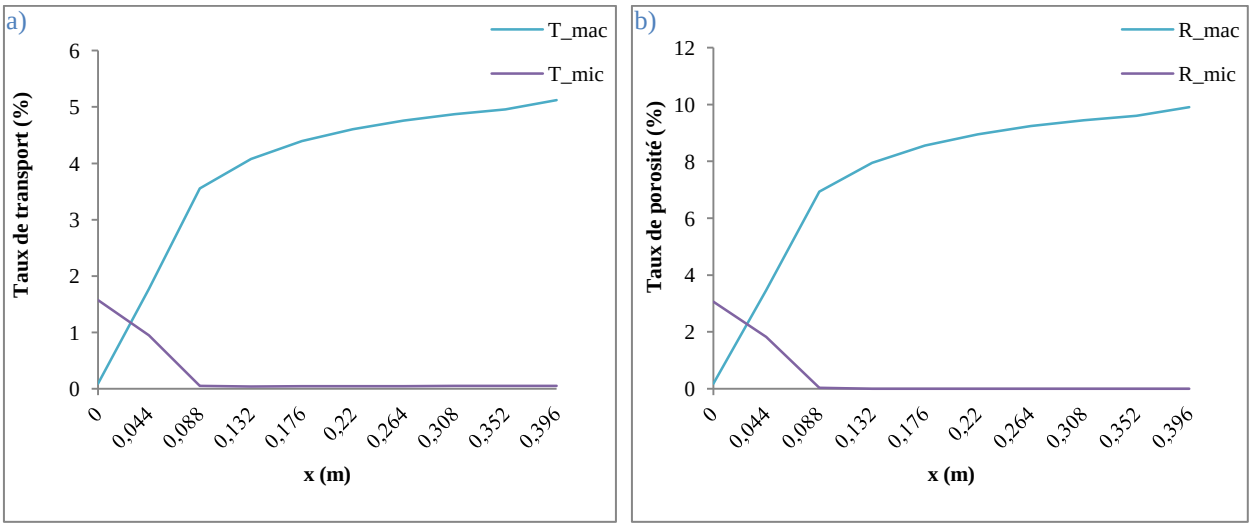


Figure 3-57 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité variable et à valeurs moyennées, avec $f_{mic} = 0.5$ et $f_{mac} = 0.01$

- Egalement les courbes de bulles d'air transportées dans le cas de la perméabilité variable, présentent la même allure que dans le cas de la perméabilité constante, mais avec une évolution non linéaire (Fig.3-56.a). Notamment nous retrouvons la coexistence des deux

types de bulles d'air, quasiment, sur toute la longueur de la préforme. En effet, celle des macros présentent au tout début de la pièce, est due au phénomène de création ; tandis que celle des micros présentent dans la zone de création des macros, est due au phénomène de migration. La faible valeur de cette dernière quantité se réfère à la petite valeur de f_{mac}.

- L'application de l'équation (Eq.3-86) pour le calcul des quantités de bulles d'air restantes en fin d'injection conduit à une réduction de la coexistence prononcée par le phénomène de transport et conserve celle exprimée par la création. La figure (Fig.3-56.b) garde la même allure que les courbes précédentes de porosité à perméabilité variable, avec une mince diminution de la porosité macro grâce au phénomène de transport.
- Les courbes des figures (Fig.3-57.a) et (Fig.3-57.b) décrivent le transport et la porosité à des valeurs moyennées, respectivement. Ces courbes confirment les mêmes remarques relevées à perméabilité constante ainsi que variable. En outre, ils combinent entre la coexistence soulignée par la perméabilité variable et la linéarité articulée par la perméabilité constante.

Saturation dans les cas de la perméabilité constante et variable

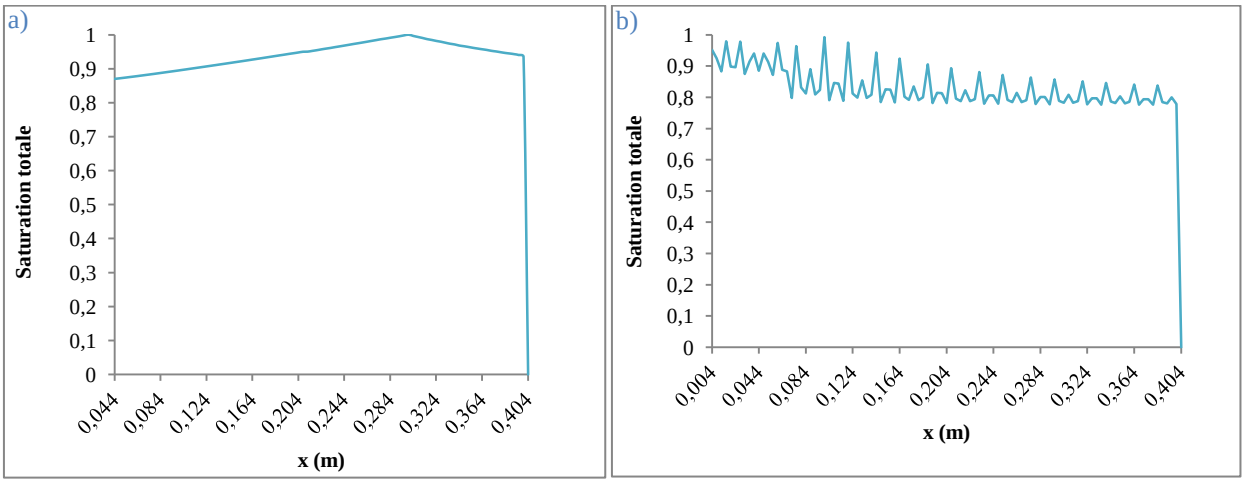


Figure 3-58 : Saturation totale en fonction de la position, a) A perméabilité constante, b) A perméabilité variable, avec $f_{mic} = 0.5$ et $f_{mac} = 0.01$

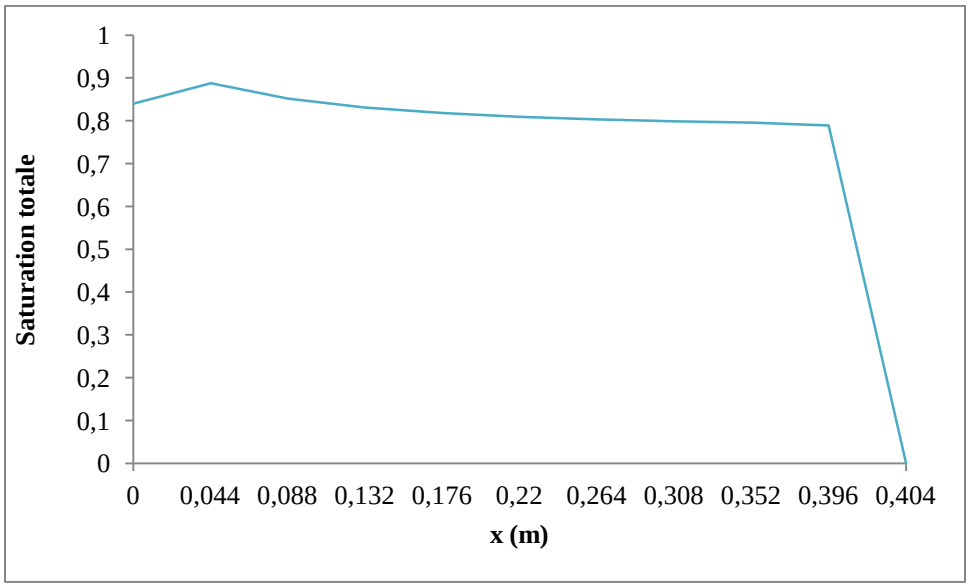


Figure 3-59 : Saturation totale en fonction de la position à perméabilité variable et à valeurs moyennées, avec $f_{mic} = 0.5$ et $f_{mac} = 0.01$

- Concernant les courbes de saturation, comme les valeurs de la porosité n'ont pas significativement varié, alors son évolution n'a pas beaucoup changé du cas précédent ($f_{mic} = 0.01$ et $f_{mac} = 0.5$). Ses valeurs maximales ont demeuré identiques dans tous les cas de figure, à savoir à perméabilité constante (Fig.3-58.a), à perméabilité variable (Fig.3-58.b) et à perméabilité variable avec des valeurs moyennées (Fig.3-59).

Après avoir compris le mécanisme de migration et comment le choix des fréquences peut favoriser un type de bulles d'air par rapport à l'autre ; nous allons choisir des fréquences de migration macro et micro de manière à obtenir la coexistence des deux types de bulles sans sur-estimer ni sous-estimer une typologie par rapport à l'autre.

Cas : $f_{mic} = 0.25$ et $f_{mac} = 0.1$

Comme il a été précisé dans le paragraphe 3.3.2.2., les macro-bulles d'air migrent plus difficilement que les micros. Notamment, le fait qu'une macro bulle d'air se divise en des micro-bulles qui partent dans les micro-capillaires est plus difficile à concevoir que deux micro-bulles d'air qui se regroupent et passent dans les macro-capillaires. A partir de ce constat, nous allons supposer que seulement 10% de macro-bulles d'air qui vont devenir micros, et 25% de micros qui vont devenir macros. Cette combinaison de fréquences macro-micro, va également conduire à

la coexistence des deux types de bulles d'air, aussi bien avec la perméabilité variable que constante.

Transport et porosité dans le cas de la perméabilité constante

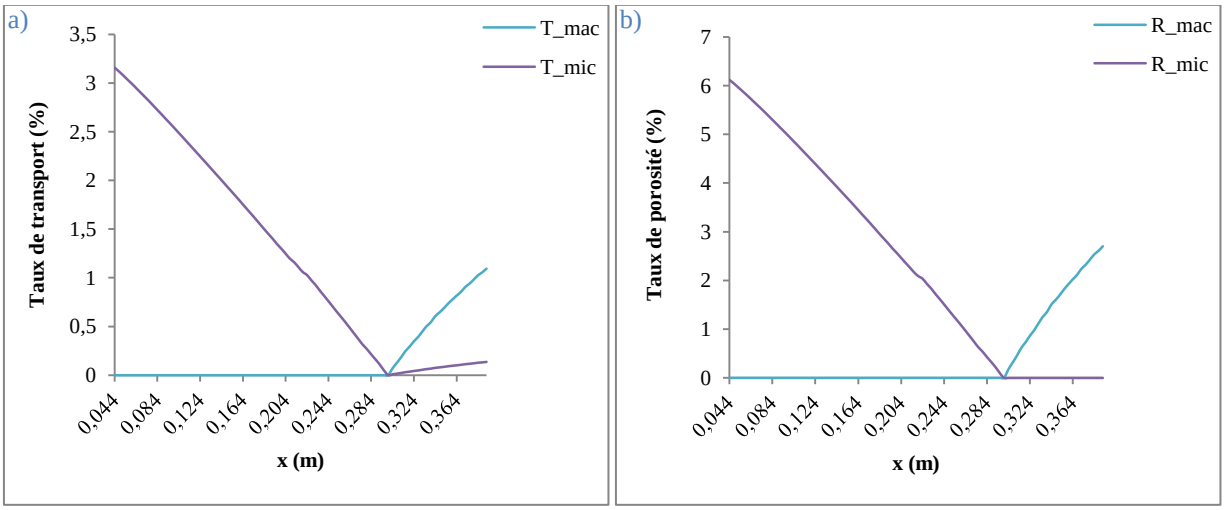


Figure 3-60 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité constante, avec $f_{mic} = 0.25$ et $f_{mac} = 0.1$

- Dans ce cas, la courbe de transport (Fig.3-60.a) démontre la coexistence sur une même position des deux types de bulles d'air. Les quantités micros transportées obtenues sont inférieures à celles macros, à cause des valeurs des fréquences de migration choisies.
- Par ailleurs, la courbe de la porosité représentée sur la figure (Fig.3-60.b) ne montre qu'un seul type de bulles d'air à la fois. En revanche, grâce à la migration, la valeur maximale de la porosité macro a diminué par rapport au cas précédent. Par contre, celle micro, elle est restée inchangée, car il n'y a pas de migration dans la partie gauche du point minima (condition de migration n'est pas vérifiée).

Transport et porosité dans le cas de la perméabilité variable

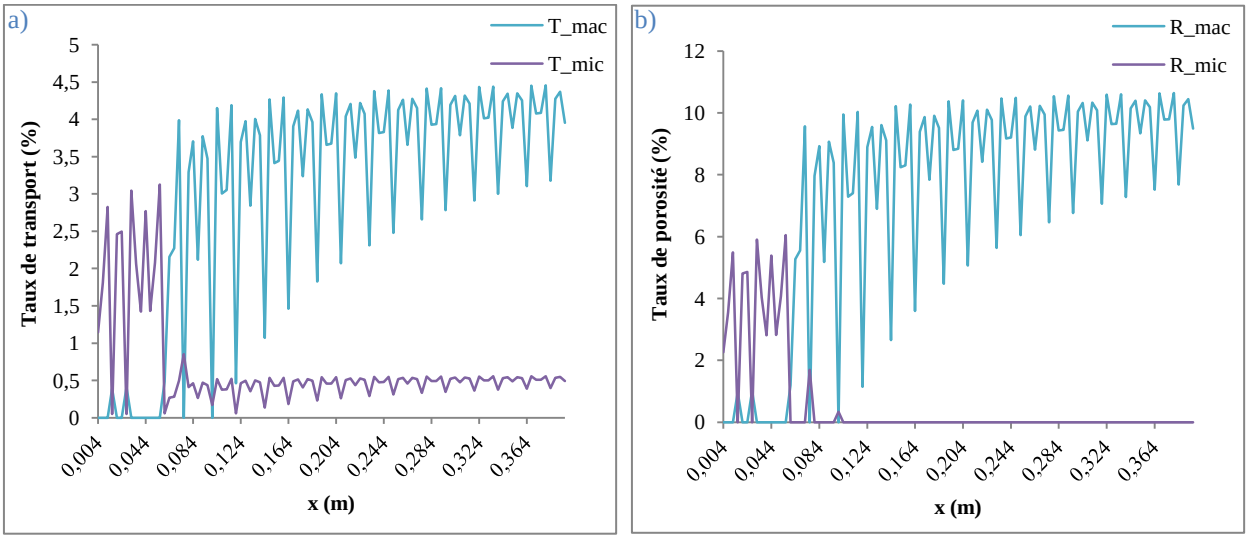


Figure 3-61 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité variable, avec $f_{mic} = 0.25$ et $f_{mac} = 0.1$

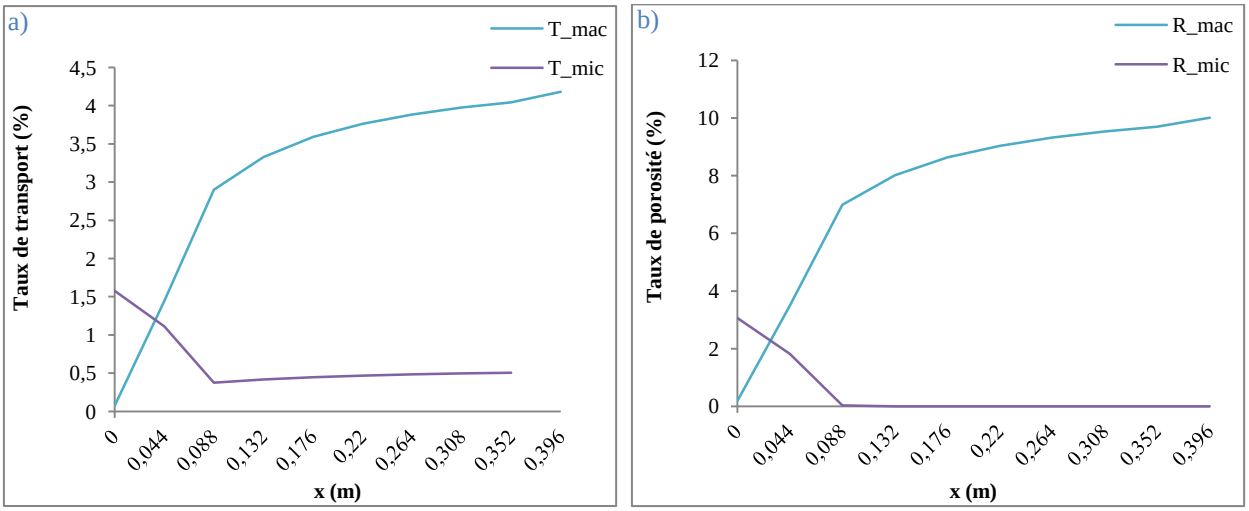


Figure 3-62 : a) Taux de transport des bulles d'air, b) Taux de porosité, à double échelle de pores et en fonction de la position à perméabilité variable et à valeurs moyennées, avec $f_{mic} = 0.25$ et $f_{mac} = 0.1$

- Le résultat de la modélisation à perméabilité variable du phénomène de transport (Fig.3-61.a), confirme ce qui a déjà été observé sur la figure (Fig.3-56.a) ; à savoir : la coexistence tout au long de la préforme des micros et macro-bulles d'air.
- De la même manière sur la courbe de la porosité, nous notons l'apparition des deux types de bulles d'air au même endroit (Fig.3-61.b). De plus, la porosité macro a diminué par

rapport au cas précédent (Fig.3-56.b) parce qu'il y a suffisamment de bulles d'air (micros et macros) qui ont été expulsées à l'extérieur de la pièce.

- Le fait de moyenner les quantités transportées (Fig.3-62.a) et restées (Fig.3-62.b) des micros et macro-bulles d'air ne modifie pas le constat relatif à la coexistence et la réduction de porosité.

Saturation dans les cas de la perméabilité constante et variable

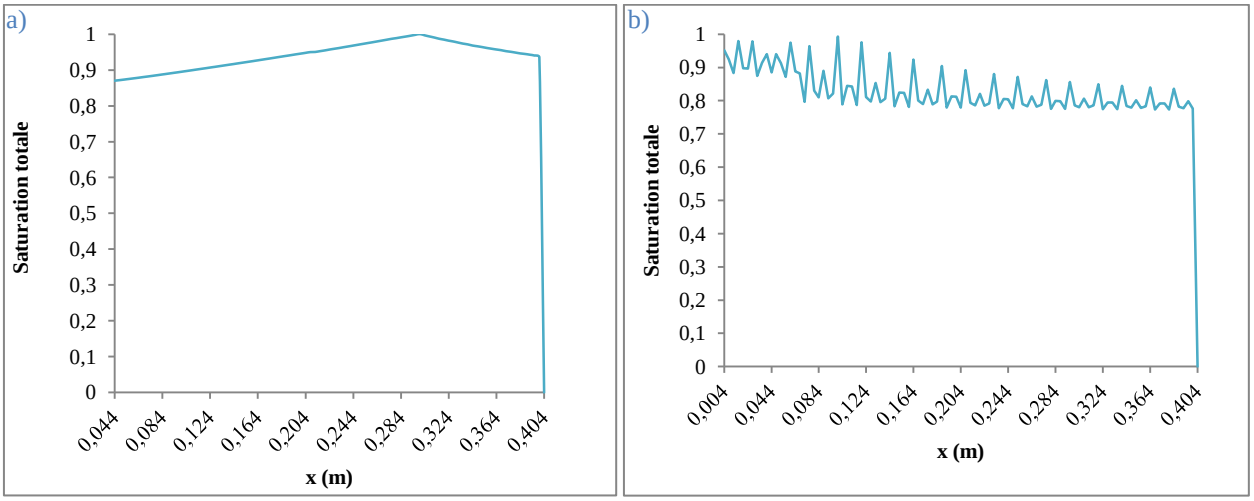


Figure 3-63 : Saturation totale en fonction de la position, a) A perméabilité constante, b) A perméabilité variable, avec $f_{mic} = 0.25$ et $f_{mac} = 0.1$

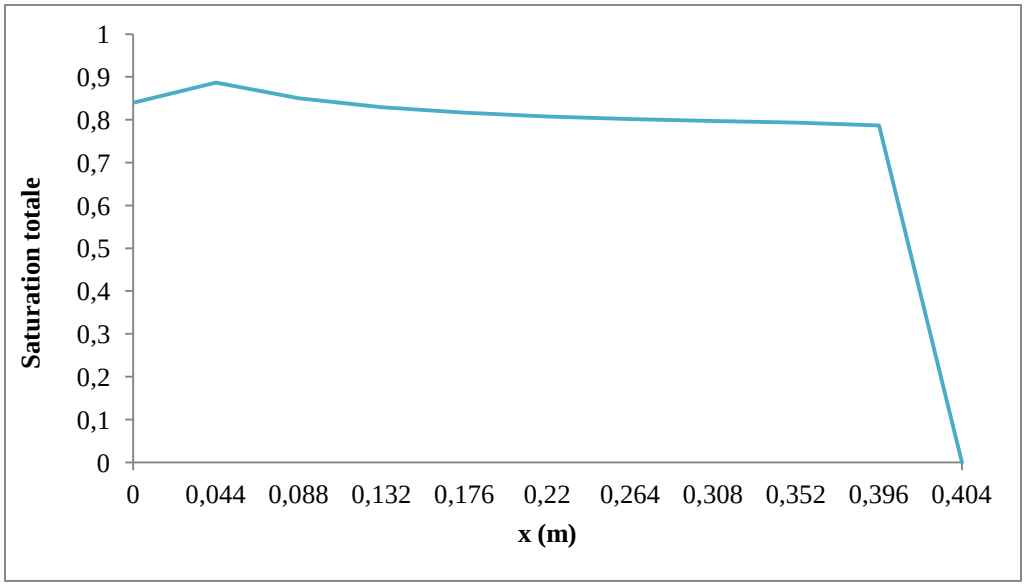


Figure 3-64 : Saturation totale en fonction de la position à perméabilité variable et à valeurs moyennées, avec $f_{mic} = 0.25$ et $f_{mac} = 0.1$

- Concernant les résultats de la saturation (Fig.3-63.a), sa valeur maximale n'a pas changé par rapport au cas précédent (Fig.3-58.a), où la perméabilité est considérée constante. En revanche, avec la perméabilité variable, sa valeur maximale a diminué. Dans ce cas, le maximum se situe dans la zone de la deuxième période ($x = 0.044\ m$) où la coexistence est le plus prononcée. Donc, même si cette position correspond au creux de la porosité, mais sa valeur est plus importante que celle obtenue dans le cas précédent ($f_{mic} = 0.5$ et $f_{mac} = 0.01$). Par conséquent, la valeur de la saturation de cette position est inférieure à celle du cas précédent, à cause de la coexistence et des fréquences de migration. Cette remarque est valable pour la perméabilité variable que ça soit pour les valeurs moyennées (Fig.3-64) ou pas (Fig.3-63.b).

3.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'étude des phénomènes de création, compression et transport des bulles d'air, avec prise en compte de la double échelle de pores des milieux fibreux et à différents niveaux. En effet, nous avons rappelé le principe de chaque phénomène, défini toutes les grandeurs considérées dans la modélisation proposée, et présenté et discuté les résultats obtenus de la simulation.

L'explication des phénomènes traités ainsi que le développement de l'approche de modélisation proposée, reposent principalement sur la loi de Darcy. Les différentes grandeurs physiques régissant les protocoles de cette modélisation ; dont notamment : la perméabilité, les temps de remplissage des capillaires micros et macros, les vitesses du liquide et de l'air et les fréquences de migration ont été explicitées. La première grandeur représente la microstructure de la préforme considérée. La deuxième fait référence à la nature de la bulle qui sera piégée. La troisième concerne le calcul des vitesses de déplacement de la résine et des bulles d'air durant l'injection. Puis la dernière correspond à la quantification de la migration des macro-bulles d'air vers les micro-capillaires et vice versa. Il est important de souligner que le modèle utilisé pour estimer la vitesse des bulles d'air n'est pas empirique. En effet, cette grandeur est calculée en fonction de la vitesse du liquide et du nombre capillaire que la simulation dans notre cas peut fournir.

Nous avons ainsi estimé les quantités créées par le calcul des temps de remplissage des capillaires macros et micros ; nous avons également quantifié les taux de compression par application de la loi des gaz parfaits ; et nous avons aussi modélisé le phénomène de transport des bulles d'air par la résolution de son équation. C'est sur ce dernier phénomène que nous avons notamment mis plus l'accent.

Dans cette partie, nous avons analysé en détails l'effet de la migration et de la variation spatiale de la perméabilité sur les résultats de la simulation numérique de la modélisation des bulles d'air. En tenant compte de la double échelle de pores, nous avons simulé la distribution spatiale des quantités de bulles d'air créées, comprimées, transportées et restées en fin de l'injection. Puis enfin, nous avons présenté l'évolution de la saturation de la préforme en fonction de la position.

A partir de ces résultats de l'approche de modélisation proposée, nous constatons que la perméabilité variable favorise la coexistence des deux types de bulles d'air à la même position, tandis que la perméabilité constante ne montre qu'un seul type de bulle à la fois. Cette coexistence peut être favorisée ou défavorisée selon les fréquences de migration considérées. En effet, cette coexistence des deux types de bulles d'air est bien notée, d'une part, dans le cas d'une simulation avec une perméabilité variable et sans prise en compte de la migration, et d'autre part dans le cas d'une simulation avec perméabilité constante et prise en compte du phénomène de migration.

Par ailleurs, tous les résultats présentés dans ce chapitre, ont été conduits dans le cas d'une injection à pression imposée. La simulation à débit imposé par l'approche de modélisation proposée, ne permet de capter que la création d'un seul type de bulles d'air à la fois (soit macro ou micro). Cette restriction est, en effet, imposée par le protocole de création adopté. Dans le chapitre suivant, nous allons expliquer davantage cette problématique et présenter un nouveau modèle pour décrire la création des bulles d'air qui permet de modéliser les micros et macro-bulles d'air à pression ou à débit imposés.

Sommaire du Chapitre 4

4.1. Problématique 157
4.2. Le Pore Doublet Model (PDM) 158
4.2.1. Principe 158
4.2.1.1. Connectivité parallèle 158
4.2.1.2. Connectivité au nœud 159
4.2.1.3. Combinaison des deux connectivités 161
4.2.2. Développement analytique 163
4.2.2.1. Régime inertiel 164
4.2.2.2. Régime visqueux 166
4.2.2.3. Régime visco-capillaire 166
4.3. Equations gouvernantes 171
4.3.1. Modèle de création des bulles d'air 171
4.3.2. Modèle de compression des bulles d'air 171
4.3.2.1. Compression dans les macro-capillaires 171
4.3.2.2. Saturation de la mèche 172
4.3.3. Modèle de transport des bulles d'air 173
4.4. Simulation numérique 178
4.4.1. Etude paramétrique 178
4.4.2. Résultats de simulation avec le PDM 182
4.4.2.1. Simulation à pression imposée 182
4.4.2.2. Simulation à débit imposé 192
4.5. Comparaison expérimental-numérique 201
4.5.1. Injection à pression imposée 201
4.5.2. Injection à débit imposé 205

4.6. Conclusion 208

Chapitre 4 : Pore Doublet Model

Ce chapitre est dédié principalement à la présentation d'un nouveau protocole de modélisation de la création des bulles d'air, nommé PDM (Pore Doublet Model). Ce modèle permet la simulation de la formation des micros et macro-bulles d'air en RTM indépendamment des conditions d'injection utilisées : à pression et à débit imposés.

Le principe de ce modèle sera rappelé et les développements mathématiques permettant sa mise en place seront explicités.

La formulation du modèle de transport sera également améliorée en explicitant davantage, les définitions des fréquences de migration, par l'introduction de la fréquence de coalescence de micro-bulles et la fréquence de fragmentation de macro-bulles.

Divers résultats numériques, avec cette approche de modélisation, seront présentés. Notamment, une étude paramétrique du PDM ; une analyse de la distribution spatiotemporelle et à double échelle de pores des quantités de bulles d'air créées, comprimées, transportées et restées ; ainsi que l'évolution spatiotemporelle de la saturation totale de la préforme.

Et enfin, la question de la validation de cette nouvelle modélisation proposée sera discutée.

4.1.Problématique

Dans le but de simuler le phénomène de création des bulles d'air, une structure de renforts linéique (UD) a été considérée dans le chapitre 3 (Fig.3-19). Cette dernière procure à l'approche de modélisation proposée une simplicité d'interprétation, mais elle conduit à l'inconvénient majeur de n'estimer qu'un seul type de bulles d'air (soit micro ou macro) lors d'une injection à débit constant.

Au cours d'une injection à débit imposé, la vitesse du liquide le long d'un capillaire (soit macro ou micro) demeure constante. En effet, le débit est égal au produit de la section et la vitesse ($Q = S \times u$). Or dans notre cas, tous les macro-capillaires ont le même diamètre Φ_{mac} et tous les micro-capillaires ont le même diamètre Φ_{mic} ; ainsi, les sections macro et micro seront

constantes, d'une part. D'autre part, le débit d'injection est également constant. Par conséquent, la vitesse du liquide dans un capillaire (macro ou micro) sera constante tout au long de la préforme.

D'après ce qui précède et sachant que tous les capillaires ont la même longueur indépendamment de la double échelle de pores, alors les micro-canaux se rempliront toujours en premier et nous n'aurons que la création de macro-bulles d'air et aucune micro-bulle ne sera piégée.

C'est pour remédier à cette problématique que nous allons présenter une nouvelle approche de modélisation permettant la simulation de la création des bulles d'air à double échelle de pores à pression et à débit imposés : il s'agit du Pore Doublet Model, que nous allons détailler dans ce qui suit.

4.2.Le Pore Doublet Model (PDM)

4.2.1. Principe

Le modèle PDM est composé de deux parties qui, à l'origine, ont été étudiées séparément. La première était considérée dans la thèse de Bico [40], pour l'étude de l'imprégnation de poreux et plus spécifiquement pour les tubes interconnectés. La deuxième faisait l'objet d'un travail en génie civil développé dans la thèse de Panfilova [39] pour l'étude de piégeage de la phase fluide déplacée par une modélisation avec un double réseau périodique. Ensuite, il y avait le travail de Benabdelwahed [41] qui a combiné les deux approches pour en faire un seul système, c'est le PDM.

La suite de ce paragraphe 4.2.1. porte sur une présentation de ces deux composantes et les hypothèses à considérer pour l'application du PDM, le modèle qui nous permettra la modélisation de la formation des micros et des macro-bulles d'air à débit et à pression imposés.

4.2.1.1. Connectivité parallèle

La première partie est composée de deux capillaires interconnectés [40], c'est une configuration que nous allons nommer : connectivité parallèle (Fig.4-1).

Le ratio des rayons des capillaires macro et micro $\alpha = \frac{R_{mic}}{R_{mac}}$ est supposé être inférieur à l'unité. De manière à ce que le grand tube (de rayon R_{mac}) puisse jouer le rôle du réservoir pour le plus petit (de rayon R_{mic}) ; c'est le principe d'alimentation.

En effet, dans le but de garantir une avance du liquide dans le micro-canal par rapport à celui dans le macro-canal, l'auteur a fait les hypothèses suivantes :

- Existence d'une multitude de pores latéraux qui permettent au liquide de passer d'un tube à l'autre ;
- Principe d'alimentation dont le grand tube est considéré comme un réservoir du petit ;
- Ratio des rayons est très inférieur à un.

De cette façon, le petit tube sera soumis à une aspiration plus forte et donc le liquide va progresser plus loin et plus vite. Notamment, nous aurons la formation de macro-bulles d'air (Fig.4-1).

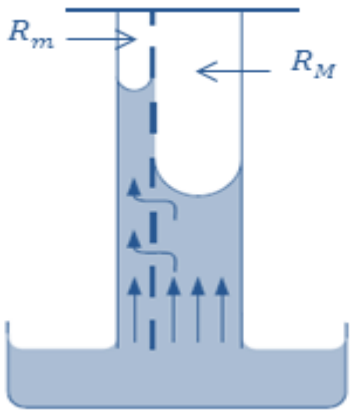


Figure 4-1 : Connectivité parallèle [40]

4.2.1.2. Connectivité au nœud

La seconde partie est nommée connectivité au nœud [39]. Elle est issue de la conception d'un modèle de doubles réseaux périodiques (Fig.4-2) pour l'étude d'un piégeage de la phase fluide déplacée dans le domaine de génie civil.

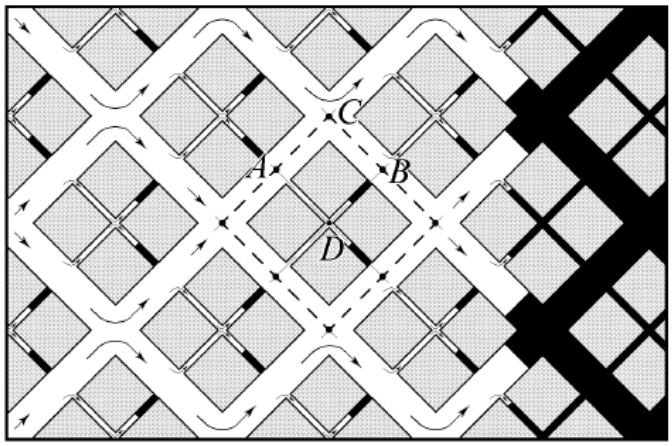


Figure 4-2 : Réseaux périodiques de tubes [39]

C'est un enchaînement périodique entre des tubes étroits et d'autres larges.

Si les réseaux sont placés parallèlement à l'axe de l'écoulement, alors le liquide ne passera que par les grands canaux, d'où l'inclinaison de 45° pour laisser passer le liquide dans les petits tubes.

Vu que la structure est périodique, alors il suffit de travailler sur une seule cellule. D'une manière générale, lorsque le front du liquide rencontre une zone faiblement perméable, la phase en mouvement s'ouvre un passage à travers les voies les plus perméables, en contournant la phase non déplacée. Lors d'un collapse (effondrement) consécutif, cette dernière devient séparée de la sortie du milieu. Ainsi, le piège est formé (Fig.4-3).

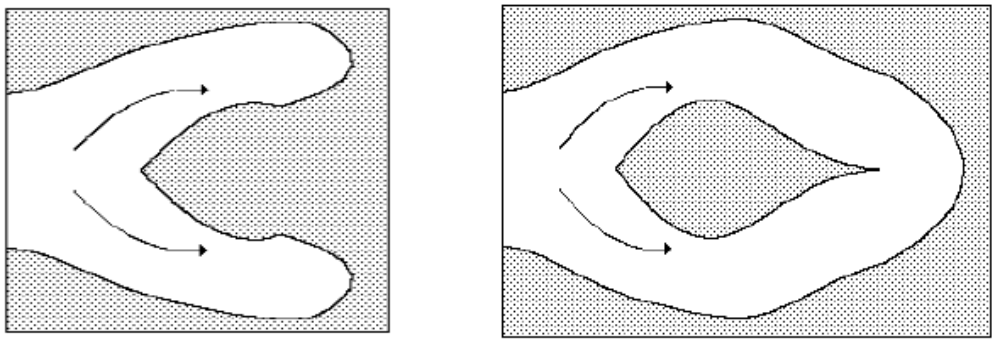


Figure 4-3 : Piégeage d'air par le liquide [39]

En pratique, nous allons examiner un élément composé de la moitié du canal large et de la moitié du canal étroit (Fig.4-4).

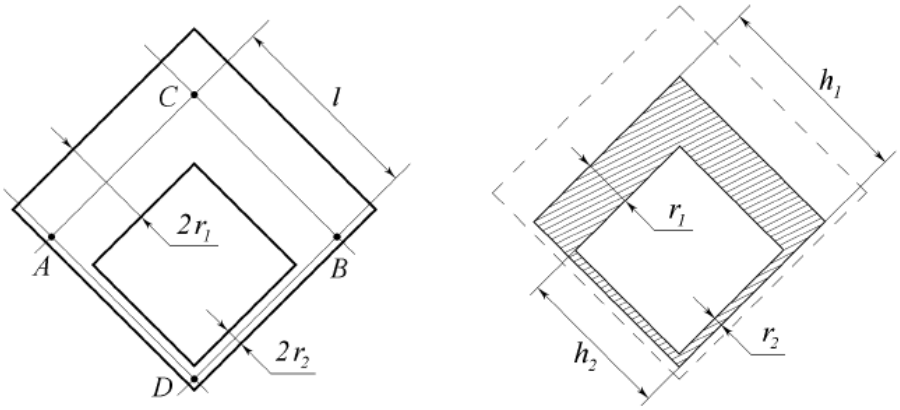


Figure 4-4 : Schématisation du réseau périodique [39]

En faisant référence à notre cas et en considérant la schématisation proposée par l'auteur [39] ; alors le liquide passera plus vite dans le macro-canal (de rayon R_{mac}) que dans le micro (de rayon R_{mic}), et quand il arrivera au nœud, il bloquera l'avancée de l'écoulement dans le micro-canal, d'où la formation de micro-bulles d'air (Fig.4-5).

Figure 4-5 : Connectivité au nœud [39]

Par ailleurs, nous admettons que le volume de chaque nœud est beaucoup plus petit que le volume du moindre pore, alors le temps de passage d'un ménisque à travers un nœud sera négligeable. Par conséquent ; la vitesse d'écoulement ne sera pas affectée par le passage du liquide à travers les nœuds.

4.2.1.3. Combinaison des deux connectivités

D'après ce qui précède, nous sommes donc en mesure de modéliser en même temps la création des macro-bulles et des micro-bulles d'air. Notamment, la mise en place du Pore Doublet Model (PDM) à partir de la combinaison des deux configurations [41] (Fig.4-6).

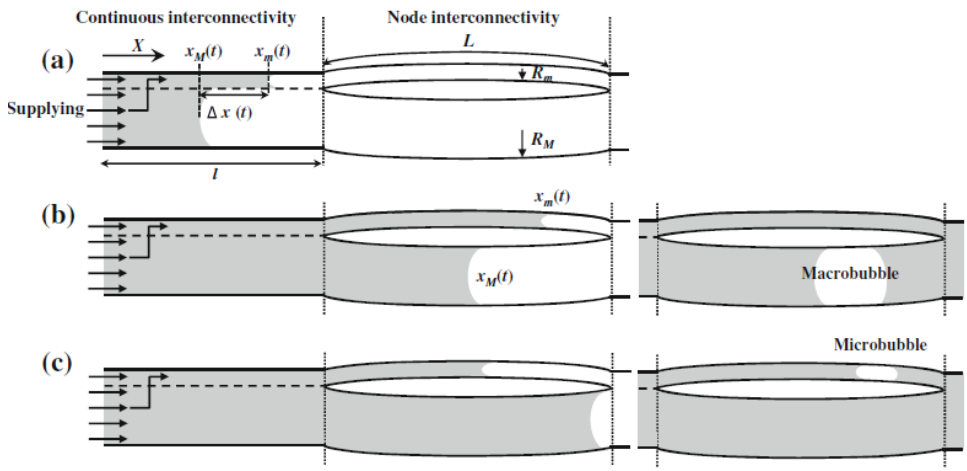


Figure 4-6 : a) Combinaison des connectivités, b) Emprisonnement d'une macro-bulle d'air, c) Emprisonnement d'une micro-bulle d'air [41]

Une telle conception suppose que :

- Tout au long de la première partie de longueur l,
  - La paroi entre les deux capillaires est non étanche, elle laisse passer le liquide ;
  - Le rayon du grand capillaire est très supérieur à celui du plus étroit ;
  - Le large capillaire est considéré comme un réservoir du petit (principe d'alimentation).
- Sur la seconde partie de longueur L,
  - Il y a un espacement entre les deux capillaires ;
  - Le volume des nœuds est très inférieur au volume des pores.

Quant à l'aspect physique de l'écoulement, nous allons travailler avec :

- Un fluide Newtonien ;
- Une structure poreuse, un liquide et un gaz non compressibles.

Le fait que l'écoulement dans le micro-canal sera en avance sur la première partie, alors sur la deuxième il y aura une compétition entre les écoulements des deux capillaires. Soit le micro qui gardera son avance ou le macro qui l'emportera, par conséquent ; nous aurons soit des macros ou des micro-bulles d'air. C'est dans cette optique que le PDM a été conçu.

4.2.2. Développement analytique

Nous adoptons le schéma suivant (Fig.4-7) pour représenter le Pore Doublet Model.

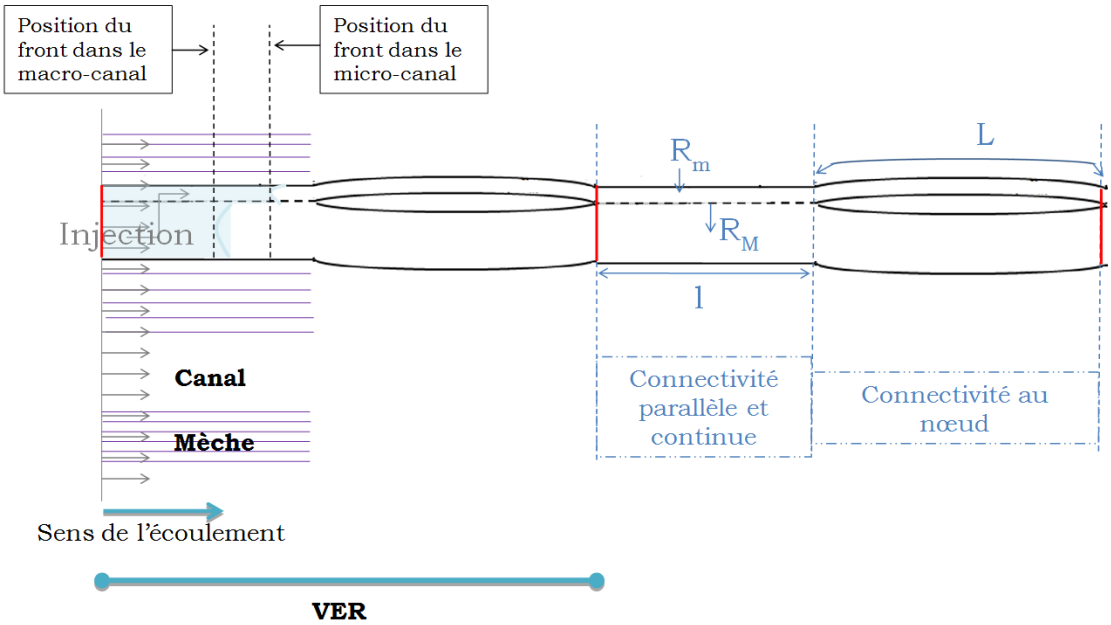


Figure 4-7 : Schématisation du Pore Doublet Model

Le Volume Elémentaire Représentatif (VER) de cette configuration se compose des deux connectivités mises côte à côte. Sur l'architecture de la préforme, le VER est situé entre deux fils de couture (les traits en rouge sur le schéma de la figure (Fig.4-7)).

Egalement dans cette représentation, les micro-capillaires correspondent à l'espace entre deux fibres successives de la même mèche. Tandis que les macro-capillaires correspondent à l'espace entre deux fibres de deux mèches successives.

La description mathématique de l'écoulement du front dans cette configuration est gérée par l'équation de Washburn [63]. Elle prend en compte les effets capillaires et visqueux (Eq.4-1) :

$$\frac{8\mu}{R_i^2} x_i \frac{dx_i}{dt} = P_i + 2\rho g R_i + \frac{2\gamma}{R_i} cos\theta_{d,i} \qquad (4-1)$$

Où :

- i correspond soit au mic ou mac ;
- x est la position du front de liquide (m) ;

Sur le plan physique, nous avons à gérer trois régimes d'écoulements (Fig.4-8) : un régime inertiel qui sera régi par la loi de Newton, un régime visqueux et un régime visco-capillaire gouvernés par la loi de Washburn. Le deuxième cas ne prend pas en compte l'effet capillaire, tandis que le troisième le considère.

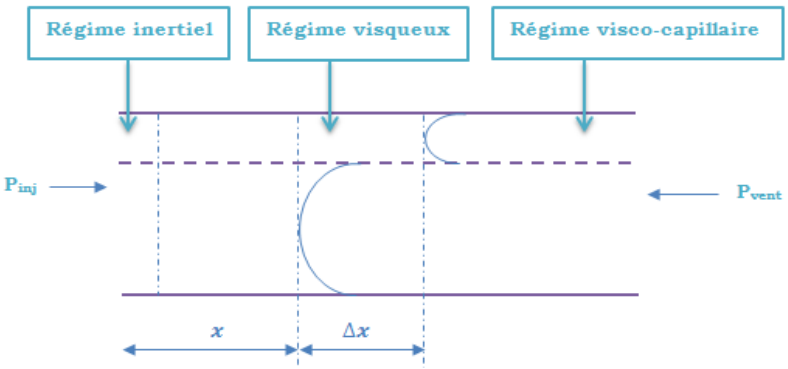


Figure 4-8 : Régimes d'écoulement

Sur cette figure, x est la position du front de liquide dans le macro-capillaire et $(x + \Delta x)$ est sa position dans le micro-capillaire.

4.2.2.1. Régime inertiel

L'équation de mouvement du front décrivant ce régime est donnée par Washburn (Eq.4-2) :

$$\frac{4\tau}{R_i^2} x_i \frac{dx_i}{dt} = 1 - \frac{x_i}{h_J} \qquad (4-2)$$

Avec $\tau = \frac{\mu R_i}{\gamma \cos\theta}$.

Washburn suppose que l'écoulement de type visqueux s'établit instantanément.

A la position $x_i = 0$ l'équation (Eq.4-2) conduit à $0 \times u_i = 1$ ($\frac{dx_i}{dt} = u_i$), ce qui donne une valeur infinie de la vitesse du liquide. Or un liquide au repos a une vitesse nulle, ce qui mène à une contradiction.

Pour résoudre cette contradiction, Quéré [64] a établi une vitesse finie, pour un liquide de faible viscosité. Pour cela, il a fait appel à la loi de Newton (Eq.4-3) et dont le développement est comme suit :

- Loi de Newton, équation de mouvement :

$$\frac{d(mu_i)}{dt} = 2\pi R_i \gamma cos\theta_{d,i} - mg - 8\pi\mu x_i u_i \qquad (4-3)$$

  - Où : $m = \pi R_i^2 x_i \rho$;
  - u_i est la vitesse du liquide (m/s) ;
  - La colonne du liquide est faible (les diamètres des capillaires macro et micro sont petits), alors nous pouvons négliger le poids et la dissipation visqueuse.
- Dans un premier temps, il a cherché l'expression de la vitesse du liquide sans prise en compte de l'angle de contact dynamique, alors :
  - Nous avons : $\frac{d(mu_i)}{dt} = 2\pi R_i \gamma$
  - Après résolution, nous obtenons la vitesse initiale (u_{init}) :

$$u_{init} = \frac{dx_i}{dt} = \sqrt{\frac{2\gamma}{R_i \rho}} \qquad (4-4)$$

  - Ainsi, nous commençons à une vitesse u_{init}, jusqu'à un certain temps $\tau_i = \frac{\rho R_i^2}{4\mu}$ qui est estimé expérimentalement [40]. Puis, nous enchaînons avec la vitesse issue de l'équation de Washburn du régime visco-capillaire (qui sera développée dans le paragraphe 4.2.2.3.).
  - Par conséquent l'extension de $(x_i)_i$ sur cette partie est donnée par : $(x_i)_i = u_{init}\tau_i$

    ➔ $(x_i)_i = \frac{R_i}{2\mu}\sqrt{\frac{\gamma\rho R_i}{2}}$
- Maintenant, si nous considérons l'angle de contact dynamique, nous avons :
  - Angle de contact de Tanner De Gennes [65] :

$$\theta_{d,i} = (\frac{6\mu\Gamma}{\gamma} u_i)^{1/3} \qquad (4-5)$$

  - L'expression (Eq.4-5) pour $\theta_{d,i} = \frac{\pi}{2}$, donne la vitesse limite :

$$u_{lim} = \frac{\gamma}{6\mu\Gamma}(\frac{\pi}{2})^3 \qquad (4-6)$$

  - Substitution dans l'équation de mouvement (Eq.4-3) :

$$\frac{d(mu_i)}{dt} = 2\pi R_i \gamma cos\theta_{d,i} \qquad (4-7)$$

    Avec :

$$m = \pi R_i^2 x_i \rho \qquad (4-8)$$

Et

$$\theta_{d,i} = (\frac{6\eta\Gamma}{\gamma} u_i)^{1/3} \qquad (4-9)$$

Nous obtenons :

$$\left(\frac{u_i}{u_{init}}\right)^2 = \cos\left(\frac{\pi}{2}\left(\frac{u_i}{u_{lim}}\right)^{\frac{1}{3}}\right) \qquad (4-10)$$

Donc la résolution de l'équation (Eq.4-10) donne la vitesse du liquide u_i durant le régime inertiel.

4.2.2.2. Régime visqueux

Le régime visqueux est modélisé par la loi de Washburn, sans tenir compte de la pression capillaire, ce qui le rend similaire à l'équation de Darcy (Eq.3-5) et dont la perméabilité sera approchée par $\frac{8}{R_i^2}$.

L'équation gouvernante de ce régime permettant de décrire l'écoulement est donnée par (Eq.4-11):

$$\frac{8\mu}{R_i^2} x_i \frac{dx_i}{dt} = P_i + 2\rho g R_i \qquad (4-11)$$

C'est un modèle qui décrit l'écoulement de résine en aval du front de flux.

4.2.2.3. Régime visco-capillaire

Le régime visco-capillaire regroupe l'effet visqueux en amont du front de liquide et l'effet capillaire en aval de celui-ci ; il décrit le comportement de l'écoulement au niveau du front de flux. Or, dans le code de simulation, nous nous intéressons au suivi de la cinétique de ce dernier, ce qui rend ce régime visco-capillaire le mieux adapté pour arriver à notre fin. Par conséquent ; les écoulements modélisés seront au mode inertiel au démarrage de l'injection puis visco-capillaire dans la suite.

L'équation de Washburn (Eq.4-1), également, prend en compte les effets visqueux et capillaire dans sa formulation. Ainsi, elle sera l'équation gouvernante pour notre simulation.

Notre VER se compose de deux parties : une connectivité parallèle et une connectivité au nœud. La logique de modélisation dans chaque partie est décrite dans ce qui suit :

- Tout au long de la connectivité parallèle :
    - L'écoulement macro est régi par la loi de Washburn ;
    - L'écoulement micro est régi par la loi de Washburn avec prise en compte du principe d'alimentation.
- Tout au long de la connectivité au nœud :
    - Les deux écoulements sont régis par la loi de Washburn avec considération de la continuité spatiotemporelle du modèle (la position dans la connectivité au nœud représente la continuité de celle dans la connectivité parallèle).

La résolution de l'équation de Washburn nécessite d'abord l'identification des valeurs de l'angle de contact dynamique θ_d macro et micro. La formule utilisée est celle proposée par De Gennes [65], sous la forme :

$$\theta_d(\theta_d^2 - \theta_e^2) = 6Ca\Gamma \qquad (4-12)$$

Avec $\Gamma = \ln\left(\frac{X_{mac}}{X_{mic}}\right)$, où X_{mac} correspond au rayon du capillaire et X_{mic} représente la taille caractéristique d'une molécule du liquide.

La différence entre cette formulation (Eq.4-12) et l'équation (Eq.4-5) est que l'angle de contact à l'équilibre dans cette dernière a été négligé devant l'angle de contact dynamique. Dans notre cas, cette hypothèse est vérifiée parce que l'angle de contact à l'équilibre est $\theta_e = 0°$ (Tab.3-2).

Afin d'estimer les valeurs de l'angle de contact dynamique θ_d, nous avons utilisé la méthode exacte de résolution d'une équation du troisième degré sous la forme : $X^3 + pX + q = 0$ [66].

Dans notre cas, les variations entre les solutions obtenues sont minimes, ce qui nous a incité à travailler avec leur valeur moyenne. Par conséquent, tout le développement qui suivra sera abordé en adoptant les valeurs moyennes des angles de contact dynamiques macro (θ_{mac}) et micro (θ_{mic}).

Egalement dans ce régime, l'effet de la gravité ne sera pas considéré. En effet, la pression hydrostatique peut être négligée devant les pressions : visqueuse, capillaire et de la résine. Dans ces conditions, l'équation de Washburn peut s'écrire sous la forme simplifiée suivante :

$$\frac{8\mu}{R_i^2} x_i \frac{x_i}{dt} = P_i + \frac{2\gamma}{R_i} cos\theta_{d,i} \qquad (4-13)$$

Nous introduisons également les deux temps t_L et t_l:

- t_L est le temps nécessaire pour que la connectivité au nœud soit remplie, par le liquide du capillaire qui est en avance.
- t_l est le temps nécessaire pour que la connectivité parallèle soit remplie, par le liquide du capillaire qui est en avance.

Selon cette configuration et à partir de l'équation de Washburn (Eq.4-13), nous déterminons ces temps à partir des expressions suivantes :

- Dans la connectivité parallèle :

$$t_{fl} = \left\{ \frac{l}{\sqrt{\frac{1}{16\mu}\left(P_{mac}R_{mac}^2 + 2\gamma R_{mac} cos\theta_{d,mac}\right) + \frac{\gamma R_{mic}^2}{2\mu} cos\theta_{d,mic}\left(\frac{1}{R_{mic}} - \frac{1}{R_{mac}}\right)} + \sqrt{\frac{1}{16\mu}\left(P_{mac}R_{mac}^2 + 2\gamma R_{mac} cos\theta_{d,mac}\right)}} \right\}^2 \qquad (4-14)$$

- Dans la connectivité au nœud :
  - Si l'écoulement dans le micro-canal garde son avance par rapport à celui dans le macro-canal :

$$t_{fL} = \frac{4\mu\left(l + L - x_{mic}(t_{fl})\right)^2}{P_{mic}R_{mic}^2 + 2\gamma R_{mic} cos\theta_{d,mic}} + t_{fl} \qquad (4-15)$$

  - Si l'écoulement dans le micro-canal est dépassé par celui dans le macro-canal :

$$t_{fL} = \frac{4\mu(l+L)^2}{P_{mac}R_{mac}^2 + 2\gamma R_{mac} cos\theta_{d,mac}} \qquad (4-16)$$

Les calculs des positions du front de liquide seront menés dans la connectivité où celui-ci est positionné :

- La position du front de l'écoulement tout au long du macro-canal x_{mac} est déduite de l'équation (Eq.4-17). En effet :

  Comme

$$\frac{8\mu}{R_{mac}^2} x_{mac} \frac{dx_{mac}}{dt} = P_{mac} + \frac{2\gamma}{R_{mac}} cos\theta_{mac} \qquad (4-17)$$

  Nous aurons :

$$x_{mac} dx_{mac} = \frac{R_{mac}^2}{8\mu}\left(P_{mac} + \frac{2\gamma}{R_{mac}} cos\theta_{mac}\right) dt \qquad (4-18)$$

  Donc, l'expression donnant la position du liquide dans le macro-canal sur tout le VER est déduite après intégration :

$$x_{mac} = \left((P_{mac}R_{mac}^2 + 2\gamma R_{mac} cos\theta_{mac})\frac{t}{4\mu}\right)^{\frac{1}{2}} \ , 0 \leq t \leq t_{fL} \qquad (4-19)$$

- Dans le but de déterminer la position du front du liquide dans le micro-canal x_{mic}, nous allons, dans un premier temps, déterminer l'expression de Δx (Fig.4-8) qui représente l'avance réalisée par le liquide dans le micro-capillaire par rapport au macro au niveau de la connectivité parallèle. Pour ce faire, nous allons introduire la relation traduisant l'équilibre des pertes des charges visqueuses $\Delta P_{visq} = \frac{8\mu}{R_{mic}^2} \Delta x \frac{d(x_{mac}+\Delta x)}{dt}$ et capillaires $\Delta P_{cap} = 2\gamma cos\theta_{mic}\left(\frac{1}{R_{mic}} - \frac{1}{R_{mac}}\right)$, ce qui donne :

$$\Delta x\left(\frac{1}{2}\left((P_{mac}R_{mac}^2 + 2\gamma R_{mac} cos\theta_{mac})\frac{1}{4\mu t}\right)^{\frac{1}{2}}\right) dt + \Delta x \, d(\Delta x)$$

$$= \frac{\gamma R_{mic}^2}{4\mu} cos\theta_{mic}\left(\frac{1}{R_{mic}} - \frac{1}{R_{mac}}\right) dt \qquad (4-20)$$

  Après résolution, nous obtenons :

$$\Delta x = \left\{\left[\frac{1}{16\mu}(P_{mac}R_{mac}^2 + 2\gamma R_{mac} cos\theta_{mac}) + \frac{\gamma R_{mic}^2}{2\mu} cos\theta_{mic}\left(\frac{1}{R_{mic}} - \frac{1}{R_{mac}}\right)\right]^{\frac{1}{2}} - \right.$$

$$\left.\left[\frac{1}{16\mu}(P_{mac}R_{mac}^2 + 2\gamma R_{mac} cos\theta_{mac})\right]^{\frac{1}{2}}\right\} t^{\frac{1}{2}} \ , 0 \leq t \leq t_{fl} \qquad (4-21)$$

- La position du front du liquide dans le micro-capillaire est pilotée par le principe d'alimentation dans la connectivité parallèle et par la continuité de l'écoulement dans la connectivité au nœud :
    - Sur la première partie, l'écoulement dans le micro-capillaire est en avance par rapport à celui dans le macro, ce qui est traduit par $x_{mic} = x_{mac} + \Delta x$ et par conséquent :

$$x_{mic} = \left\{ \left[\frac{1}{16\mu} (P_{mac} R_{mac}^2 + 2\gamma R_{mac} cos\theta_{mac}) + \frac{\gamma R_{mic}^2}{2\mu} cos\theta_{mic} \left(\frac{1}{R_{mic}} - \frac{1}{R_{mac}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} + \left[\frac{1}{16\mu} (P_{mac} R_{mac}^2 + 2\gamma R_{mac} cos\theta_{mac}) \right]^{\frac{1}{2}} \right\} t^{\frac{1}{2}} \ , 0 \leq t \leq t_{fl} \qquad (4-22)$$

    - Sur la deuxième partie, il y a une compétition entre les écoulements dans les deux capillaires, donc la position x_{mic} sera déterminée par le principe de continuité (ajout de la position et soustraction du temps antérieurs dans la connectivité parallèle) et en appliquant l'équation de Washburn (Eq.4-13) au micro-canal :

$$x_{mic} = \left((P_{mic} R_{mic}^2 + 2\gamma R_{mic} cos\theta_{mic}) \frac{t - t_{fl}}{4\mu} \right)^{\frac{1}{2}} + x_{mic}(t_{fl}) \ , t_{fl} \leq t \leq t_{fL} \qquad (4-23)$$

- Les taux de bulles d'air créées peuvent donc être déduits à partir des positions ci-dessus :
    - Si le micro-capillaire est rempli avant le macro, alors les macro-bulles d'air seront créées, dont leur taux $\phi_{air,mac}^F$ est calculé donc par :

$$\phi_{air,mac}^F = \frac{V_{bulle}}{V_{total}} = \frac{R_{mac}^2 \left(x_{mic}(t_{fL}) - x_{mac}(t_{fL}) \right)}{(R_{mac}^2 + R_{mic}^2)(l + L)} \qquad (4-24)$$

Ainsi, le taux de création des macro-bulles d'air $V_{air,mac}^F$ est déduit à partir de :

$$V_{air,mac}^F = \phi_{air,mac}^F (1 - V_T) \qquad (4-25)$$

    - Si le macro-capillaire est rempli avant le micro, alors des micro-bulles d'air seront créées, dont le taux $\phi_{air,mic}^F$ est déterminé par :

$$\phi_{air,mic}^F = \frac{V_{bulle}}{V_{total}} = \frac{R_{mic}^2 \left(x_{mac}(t_{fL}) - x_{mic}(t_{fL}) \right)}{(R_{mac}^2 + R_{mic}^2)(l + L)} \qquad (4-26)$$

Ainsi, le taux de création des micro-bulles d'air $V_{air,mic}^F$ est estimé par :

$$V_{air,mic}^{F} = \phi_{air,mic}^{F}(1 - V_{f,t})V_T \qquad (4-27)$$

4.3. Equations gouvernantes

4.3.1. Modèle de création des bulles d'air

Le mécanisme de création des bulles d'air adopté pour la simulation numérique de ce chapitre, est celui défini précédemment via le PDM. Avec ce dernier, le principe de création des bulles d'air est également basé sur la comparaison des temps de remplissage des capillaires à double échelle de pores. En effet, les expressions analytiques décrivant les positions du front de liquide dans le micro (Eq.4-22) et (Eq.4-23) et le macro-capillaire (Eq.4-19) en plus des temps de remplissage des capillaires (Eq.4-14), (Eq.4-15) et (Eq.4-16), sont intégrés dans le code de calcul afin d'estimer les taux de bulles d'air piégées macros et micros. Dans ce cadre, le champ de pression est déterminé numériquement à partir de l'intégration de l'équation de Washburn (Eq.4-13). Quant à l'estimation des vitesses du front du liquide, elle est faite en respectant le régime d'écoulement et qui est décrit par : l'équation de Quéré (Eq.4-10) dans le régime inertiel et par celle de Washburn (Eq.4-13) dans le régime visco-capillaire.

4.3.2. Modèle de compression des bulles d'air

Le phénomène de compression des bulles d'air est régi par la loi des gaz parfaits. Sa modélisation est menée de la même façon que celle du chapitre 3.

4.3.2.1. Compression dans les macro-capillaires

La description employée ici pour la compression des macro-bulles d'air est identique à celle utilisée au chapitre 3. Lors de ce phénomène, la variation du volume d'une macro-bulle d'air entre deux instants t et $t + \mathrm{d}t$ est donnée par la relation :

$$\phi_{air,mac}^{C}(t + \mathrm{d}t, x) = \frac{P(t,x)}{P(t + \mathrm{d}t, x)}\phi_{air,mac}^{C}(t,x) \qquad (4-28)$$

Le taux de compression des macro-bulles d'air $V_{air,mac}^{C}$ est donné par :

$$V_{air,mac}^{C} = \phi_{air,mac}^{C}(1 - V_T) \qquad (4-29)$$

4.3.2.2. Saturation de la mèche

La formulation de la compression dans les micro-capillaires diffère de celle présentée dans le chapitre 3. Cette différence réside dans le fait que dans le cadre du PDM, la loi de Darcy n'est plus utilisée et c'est l'équation de Washburn qui est adoptée. En effet, cette dernière est considérée pour tenir compte de l'effet capillaire ; car à l'échelle micro, cet effet sur la compression ne peut être négligé.

Le taux de vide ϕ peut être calculé par :

$$\phi = \frac{Volume\ de\ l'air}{Volume\ de\ la\ résine + Volume\ de\ l'air} = \frac{Volume\ de\ l'air}{1 - Volume\ des\ fibres} \qquad (4-30)$$

$$\phi = \frac{V_{air}}{1 - V_f V_{total}} \qquad (4-31)$$

Avec V_{total} est le volume total effectif de la zone d'imprégnation de la mèche, en analogie avec l'aire effective d'imprégnation pour la saturation de la mèche du chapitre 3, estimé par :

$$V_{total} = l_{ch,x} l_{ch,y} 2Hh_v \qquad (4-32)$$

Ainsi, l'expression actualisant le taux de compression à chaque instant est donnée par :

$$\phi(t + \mathrm{d}t) = \phi(t) - \frac{V_{air}\ mouillé}{1 - V_f V_{total}} \qquad (4-33)$$

En effet, à chaque itération, nous prélevons le taux de vide qui a été atteint par le liquide, c'est le volume d'air mouillé :

$$V_{air}\ mouillé = V_{résine}\ arrivée = flux\ de\ résine\ (Q) \times\ pas\ de\ temps(dt) \qquad (4-34)$$

Donc $V_{air} = Q\ dt$ $\qquad (4-35)$

Avec $Q = u_{l,mic}(1 - V_{f,ch}) l_{ch,x} l_{ch,y} h_v$ $\qquad (4-36)$

Au final, la saturation de la mèche est estimée par :

$$\phi^C_{air,mic}(t + \mathrm{d}t) = \phi^C_{air,mic}(t) - \frac{u_{l,mic}(1 - V_{f,ch}) l_{ch,x} l_{ch,y} h_v \mathrm{d}t}{1 - V_f l_{T,x} l_{T,y} 2Hh_v} \qquad (4-37)$$

Et dont le taux de compression des micro-bulles d'air $V_{air,mic}^{C}$ est déduit à partir de l'expression suivante :

$$V_{air,mic}^{C} = \phi_{air,mic}^{C}(1 - V_{f,t})V_T \qquad (4-38)$$

4.3.3. Modèle de transport des bulles d'air

La modélisation du phénomène de transport repose sur la détermination de la vitesse des deux phases liquide et air.

La vitesse du liquide ici est déduite à partir des équations (Eq.4-10) et (Eq.4-13). Tandis que celle des bulles d'air est estimée (comme au chapitre 3) par la relation (Eq.4-39) développée dans le travail de thèse de Ben Abdelwahed [31] :

$$\frac{u_b - u_l}{u_b} = \frac{2.2\,(Ca^{**})^{2/3}}{1 + 3.4\,(Ca^{**})^{2/3}} \qquad (4-39)$$

Cette équation, dont l'inconnue est u_b sera résolue numériquement par la méthode de Newton. Les deux figures suivantes présentent les résultats de ce type de traitement numérique à l'échelle micro et macro :

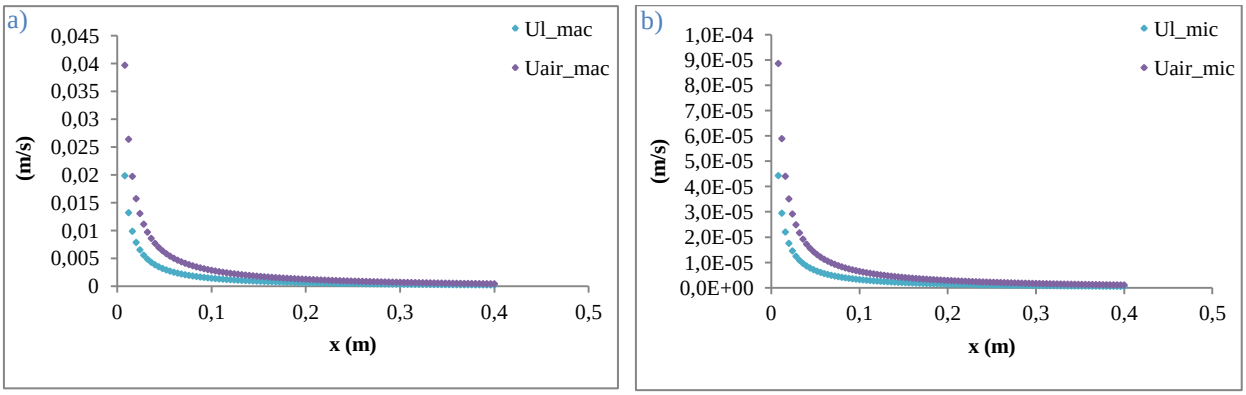


Figure 4-9 : Vitesses du liquide et de l'air, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro

Les courbes obtenues (Fig.4-9.a) et (Fig.4-9.b) montrent que la vitesse des bulles d'air est supérieure à celle du liquide. L'écart entre les deux courbes diminue au fur et à mesure que nous avançons au long de la préforme. Vers l'extrémité finale de cette dernière, les deux vitesses deviennent quasiment identiques.

Par conséquent, l'application du modèle de Eun [25] et Lee [11] qui fait appel à la notion de vitesse critique du liquide ne peut être possible. Car, par définition, cette vitesse correspond à celle de la résine à partir de laquelle les bulles d'air se déplacent plus rapidement que la résine. Ainsi, à la place de ce modèle phénoménologique, nous optons pour la résolution de l'équation de transport (Eq.3-79) où la vitesse des bulles d'air sera donnée par la relation (Eq.4-39) de Benabdelwahed [32] afin de décrire le phénomène de migration des bulles d'air.

Les fréquences de migration f_{mic} et f_{mac} qui interviennent dans le terme source de cette équation de transport seront définies dans cette partie. Nous allons travailler précisément avec des fréquences de coalescence et de fragmentation, telle que cette dernière peut survenir des phénomènes d'accélération ou de turbulence.

Dans le cadre du PDM, la fréquence micro correspond aux micro-bulles d'air qui se sont agglomérées et coalescées afin de devenir des macro-bulles d'air et ont passé dans le macro-capillaire ; dans ce cas nous parlons de la fréquence de coalescence f_{coal}. Tandis que, la fréquence de migration macro sera associée aux macro-bulles d'air qui deviennent micros sous l'effet de la fragmentation et passent dans les micro-capillaires. Cette fragmentation peut être engendrée par la turbulence ou par l'accélération, d'où l'introduction des fréquences de fragmentation par accélération f_{acc} et par turbulence f_{tur}.

Quant aux conditions de migration, la condition précisant que « la pression de l'air à l'intérieur de la micro-bulles d'air doit dépasser la somme de la pression capillaire et la pression de la résine l'entourant, afin que cette bulle se mette en mouvement » introduite au chapitre 3 sera maintenue. Elle sera complétée par d'autres, afin de valider ou non le processus de migration d'un macropore vers un micropore et inversement.

En effet, nous calculons les rayons des bulles d'air après coalescence et fragmentation et nous les comparons avec ceux des capillaires, afin de tester si les bulles coalescées peuvent intégrer le macro-capillaire et celles fragmentées peuvent passer dans le micro-capillaire.

Ce calcul a été conduit en se basant sur le travail de Kolev [67] réalisé pour des écoulements multiphasiques dans les milieux poreux. Son développement repose sur ce qui suit :

- Fragmentation des macro-bulles d'air :

  Dans ce cadre, nous avons calculé le diamètre stable de la macro bulle après fragmentation et nous l'avons comparé avec le diamètre du micro-capillaire. Si c'est inférieur, alors nous avons une migration macro vers micro.

  Cette fragmentation peut être régie soit par accélération, soit par turbulence :

  - Accélération : dans ce cas, le diamètre de la bulle après fragmentation est estimé par :

    $$D_{d\infty} = We_{d\infty} \frac{\sigma}{\rho_c (u_c - u_{d\infty})^2} \qquad (4-40)$$

    Avec :

    - $D_{d\infty}$ désigne le diamètre de la bulle après fragmentation (m) ;
    - $We_{d\infty}$ est le nombre de Weber ;
    - u est la vitesse (m/s) ;
    - Les indices c et d correspondent à la phase continue (liquide) et dispersée (bulle), respectivement. Et l'indice ∞ est pour un temps infini.

  - Turbulence : dans ce cas, le diamètre après fragmentation est estimé par :

    $$D_{d\infty} = \left(\frac{We'_{d\infty}\sigma}{\rho_c} \left(\frac{c_1}{\varepsilon_c} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{3}{5}} \qquad (4-41)$$

    Où :

    - $We'_{d\infty}$ est le nombre de Weber pour le liquide saturé, il vaut 2.48 pour des bulles d'air turbulentes dans un liquide ;
    - c_1 est une constante qui vaut 0.3536 ;
    - ε_c est le taux de dissipation par turbulence, c'est l'énergie mécanique dissipée par turbulence par unité de temps et de masse (J/(s.Kg)) qui peut être déduit de la relation :

      $$\alpha_c \rho_c \varepsilon_c = \beta_c \alpha_d \rho_c \left(\frac{3}{4}\right)\left(\frac{1}{D_d}\right)\left(c_{cd,r}^d |u_c - u_d|^3 + c_{cd,\theta}^d |v_c - v_d|^3 + c_{cd,z}^d |w_c - w_d|^3\right) + u\overline{R}_u + v\overline{R}_v + w\overline{R}_w \qquad (4-42)$$

      Avec :

- α_c est le taux volumique du liquide, alors $\alpha_c = 1 - V_f$;
- ρ_c, α_d sont les densités de la phase continue et dispersée, respectivement ;
- β_c est une partie de l'énergie cinétique dissipée par la résine et qui causera la fragmentation ;
- D_d est le diamètre de la macro-bulle ;
- $c_{cd,r}^d$, $c_{cd,\theta}^d$, $c_{cd,z}^d$ sont les coefficients de traînée exercée par la bulle dispersée et submergée dans la résine, suivant la direction r, θ et z, respectivement ;
- u_c, v_c, w_c, u_d, v_d, w_d sont les composantes des vitesses da la phase continue et dispersée, respectivement, et selon les trois directions r, θ et z ;
- $\overline{R}_u$, $\overline{R}_v$, $\overline{R}_w$ sont les chutes de pression par unité de longueur, dues à la friction, suivant les directions r, θ et z, respectivement.

Dans le but de trouver la valeur de ε_c, il faut d'abord déterminer celle de β_c. Pour le faire, il est nécessaire de calculer le nombre de Reynolds afin de préciser le régime dans lequel nous nous plaçons :

$$Re_{cd} = \frac{\rho_c u_c D_d}{\mu_c} \qquad (4-43)$$

$$Re_{cd}^* = 3.73\left(\frac{\sigma_c^3 \rho_c}{g\mu_c^4}\right)^{0.209} \qquad (4-44)$$

$$Re_{cd}^{**} = 3.1\left(\frac{\sigma_c^3 \rho_c}{g\mu_c^4}\right)^{0.25} \qquad (4-45)$$

Où :

- σ_c est la tension de surface de la phase continue ;
- μ_c est la viscosité dynamique de la phase continue.

Avec les données de notre cas, nous trouvons que $0 < Re_{cd} < Re_{cd}^*$, alors nous sommes en régime laminaire.

Par conséquent $\beta_c = 0$

Nous travaillons en unidirectionnel, alors la vitesse est portée par une seule direction, $v = w = 0$.

Donc après développement, nous obtenons : $\varepsilon_c = \frac{u\overline{R}_u}{\alpha_c \rho_c}$.

- Coalescence des micro-bulles d'air :

  Dans ce cas, une fois le diamètre limite (final) de la micro bulle après coalescence est calculé, s'il est supérieur au diamètre du macro-capillaire, alors nous avons une migration du micro-canal vers le macro-canal.

  - Le diamètre de la bulle après coalescence est estimé par :

    $$D_{d,lim} = \left(\frac{32\pi}{3}\left(\frac{(\sigma\delta)^2}{\mu_c \rho_c}\right)\right)^{\frac{1}{3}} \frac{1}{u'_{d,lim}} \qquad (4-46)$$

    Où :

    - δ est l'épaisseur du film radial entre deux bulles, dans notre cas, elle vaut $10^{-11} m$;
    - $u'_{d,lim}$ est la vitesse limite des bulles, elle sera déterminée par :

      $$u'_{d,lim} = \frac{\rho_c \left(u_c - u_{d,\infty}\right)^2}{We_{d,\infty}\sigma} \left(\frac{32\pi}{3} \frac{(\sigma\delta)^2}{\mu_c \rho_c}\right)^{\frac{1}{3}} \qquad (4-47)$$

  - Temps de collision-coalescence :

    $$\frac{\Delta\tau_{col}}{\Delta\tau_{coal}} = \frac{32\pi}{3} \frac{(\sigma\delta)^2}{\mu_c \rho_c (u_d D_d)^3} \qquad (4-48)$$

    Qui correspond au rapport entre le temps de collision et celui de coalescence.

    La coalescence n'est possible que si ce rapport est supérieur à 1. En effet, il faut que le temps de collision soit supérieur à celui de coalescence, pour que les bulles puissent évacuer le liquide qui les sépare et puis s'agglomérer.

Par la suite, afin d'identifier le mode de migration à considérer, ces différentes informations ont été intégrées au sein de notre code de simulation en se basant notamment sur l'étude de cas suivante :

- Cas d'une fragmentation uniquement par accélération : la seule condition à vérifier est que le diamètre après fragmentation de la macro bulle soit inférieur à celui du micro-capillaire.
- Cas d'une fragmentation uniquement par turbulence : de la même manière, la vérification de la même condition sur le diamètre suffira.

- Cas où la fragmentation résulte des deux phénomènes : la condition à considérer est de vérifier si les diamètres après fragmentation par accélération et turbulence sont inférieurs au diamètre du micro-capillaire.
- Cas où nous n'avons que la coalescence : il faut que le micro diamètre après coalescence soit supérieur au diamètre de la macro-bulle, et le rapport des temps de collision et coalescence soit supérieur à l'unité.
- Cas d'une fragmentation par accélération et coalescence : les conditions des deux phénomènes doivent être vérifiées.
- Cas d'une fragmentation par turbulence et coalescence : les conditions relatives aux deux phénomènes doivent être vérifiées.
- Cas où nous avons les trois modes de migration (la fragmentation par accélération et turbulence en plus de la coalescence) : toutes les conditions relatives aux trois phénomènes doivent êtres vraies.
- Cas où nous n'avons pas de migration : aucune condition n'est donc vérifiée.

4.4. Simulation numérique

La simulation numérique a été réalisée pour les mêmes conditions considérées au chapitre 3. Par rapport à ce dernier, nous changeons le modèle de création, nous gardons celui de compression, tandis que dans celui du transport nous modifions les fréquences et les conditions de migration.

4.4.1. Etude paramétrique

Dans le but d'identifier les paramètres géométriques du PDM, nous avons procédé à une étude paramétrique en fonction des deux paramètres $\alpha = \frac{R_{mic}}{R_{mac}}$ et $\beta = \frac{L}{l}$. Le premier correspond au rapport des rayons du micro et macro capillaires, tandis que le second correspond au ratio des longueurs de la connectivité au nœud et celle parallèle.

Par sa définition, nous déduisons que α est un paramètre qui sera imposé par la géométrie de la préforme. Dans cette étude, nous allons modifier sa valeur pour voir quel effet aura-t-il sur la création des bulles d'air. Par contre, sur le paramètre β la seule contrainte à prendre en compte est : $l + L = 11\ mm$. En effet, cette distance de 11 mm correspond à la valeur de l'espacement entre deux fils de couture de notre UD, c'est la taille du VER considéré.

Nous nous sommes intéressés donc à la simulation d'une injection à pression imposée, où la pression d'injection $P_{inj} = 2.1\ bar$ et la pression à l'évent $P_{inj} = 1.1\ bar$.

Sur les figures (Fig.4-10) et (Fig.4-11), nous présentons les résultats obtenus relatifs à la répartition spatiale du taux de macro-bulles d'air créées le long de la préforme, en fin de l'injection pour une valeur constante de β et à différentes valeurs de α.

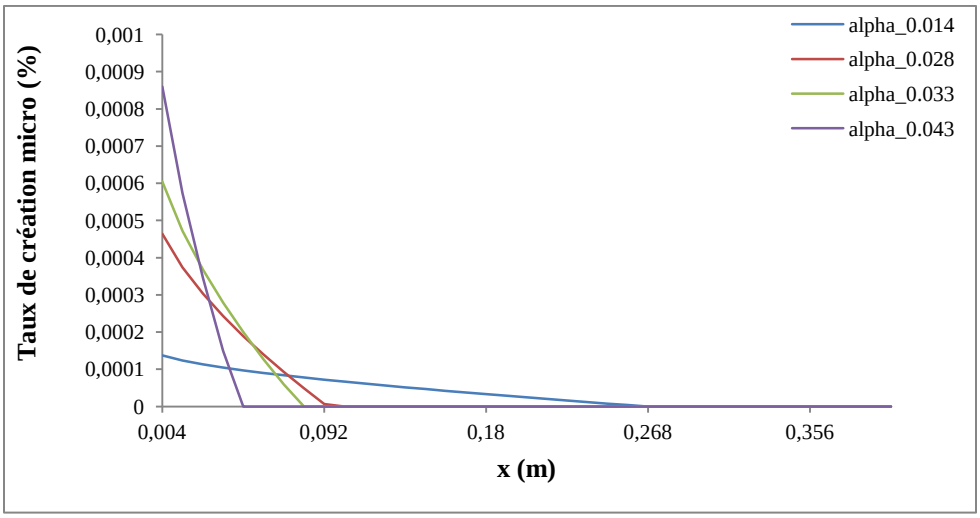


Figure 4-10 : Taux de création des micro-bulles d'air en fonction de la position, à $\beta = 0.028$ et α variable

Nous constatons que pour un β constant et à des valeurs de α croissantes, le taux des micro-bulles d'air créées est croissant.

Dans ce cas micro, une augmentation de α est associée à une croissance de R_{mic} (ou une décroissance de R_{mac}), ce qui veut dire que le micro-canal est assez large pour que le liquide se déplace librement en créant plus de micro-bulles d'air à l'entrée. Par contre l'étendu de la zone de création des micro-bulles est inversement proportionnel à α, cela s'explique par le fait que le liquide se stabilise d'autant plus vite que le capillaire est plus large.

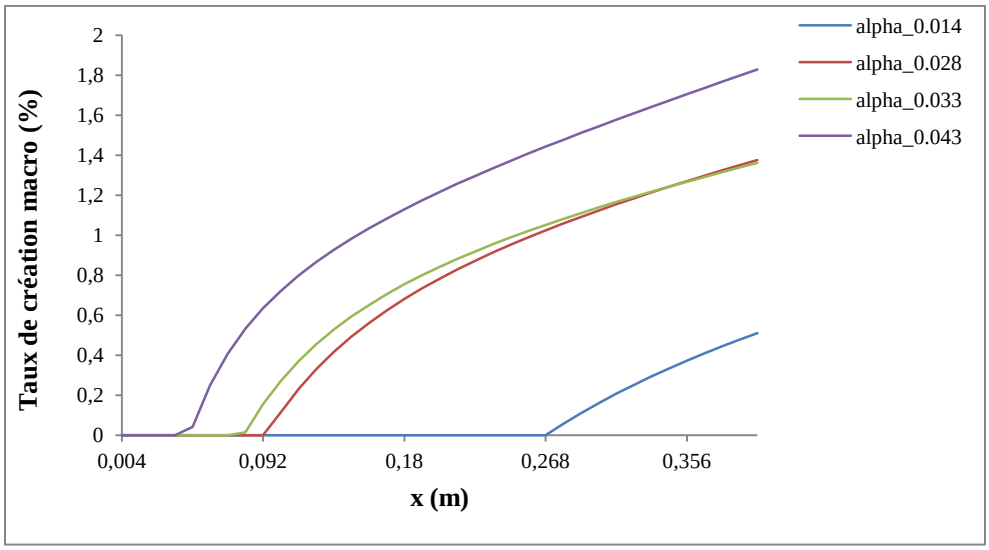


Figure 4-11 : Taux de création des macro-bulles d'air en fonction de la position, à $\beta = 0.028$ et α variable

Sur la figure (Fig.4-11), nous notons une augmentation croissante du taux de macro-bulles d'air en fonction de α. En effet ; quand α augmente, R_{mac} diminue (ou R_{mic} augmente), d'où un champ restreint qui favorise l'avancée du liquide dans le micro-canal et donc la création des macro-bulles d'air.

Pour les figures (Fig.4-12) et (Fig.4-13) qui suivent, nous avons choisi la valeur $\alpha = 0.043$ qui fait référence aux rayons issus de la géométrie de notre préforme. Puis nous avons changé les valeurs de l et L de façon à ce que nous aurons plusieurs valeurs tests pour β.

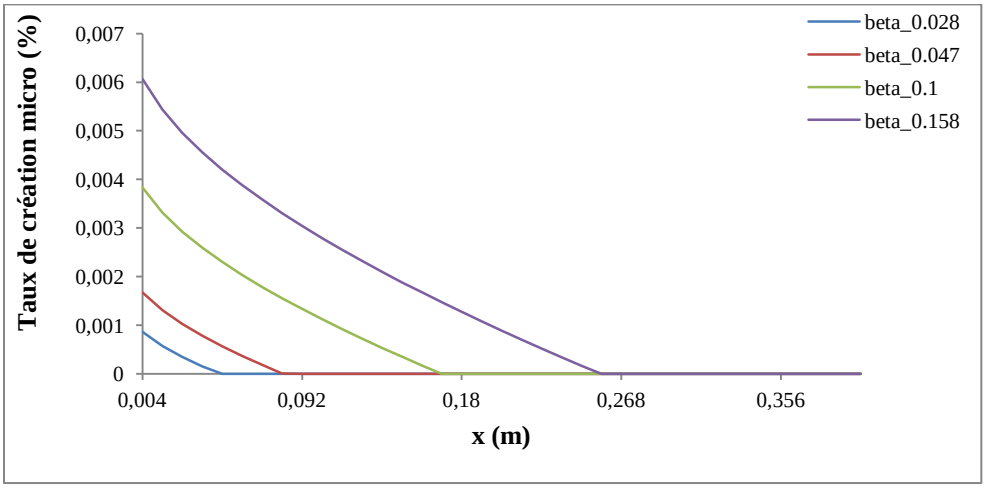


Figure 4-12 : Taux de création des micro-bulles d'air en fonction de la position, à $\alpha = 0.043$ et β variable

Sur la figure (Fig.4-12), une directe proportionnalité est relevée entre β et le taux de micro-bulles d'air créées. En effet, lorsque β augmente, l décroit et la connectivité au nœud devienne plus importante, par conséquent cela conduit à un piégeage de micro-bulles d'air plus élevé.

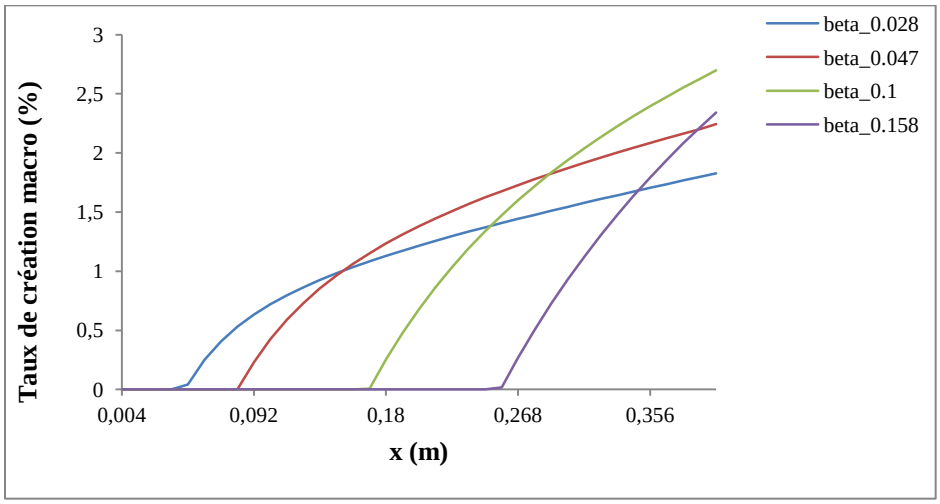


Figure 4-13 : Taux de création des macro-bulles d'air en fonction de la position, à $\alpha = 0.043$ et β variable

La figure (Fig.4-13) montre une augmentation croissante du taux des macro-bulles au fur et à mesure que β augmente. Cependant, lorsque cette dernière atteint la valeur de 0.1, cette tendance s'inverse. En effet, une valeur importante de β est associée à une petite valeur de l ou une grande valeur de L. Or, une petite distance l ne permet pas d'avoir une grande avance de l'écoulement dans le micro-canal par rapport au macro. Puis une grande distance L donne la possibilité à l'écoulement dans le macro-canal de prendre l'avance par rapport au micro. Donc d'après le graphe ci-dessus, la valeur $\beta = 0.1$ est le point de transition de la compétition entre les écoulements dans les capillaires micro et macro.

D'une manière générale, à une valeur fixe de β, l'augmentation de α favorise la création des bulles d'air à double échelle de pores. Puis à une valeur fixe de α, le taux de création des micro-bulles d'air augmente en fonction des valeurs croissantes de β, tandis que celui des macro-bulles change de tendance selon la valeur de β. Une conclusion analogique a tété présentée dans le travail de Ben Abdelwahed [41].

Ainsi par la suite, nous allons travailler avec $\alpha = 0.043$ et $\beta = 0.028$. La valeur de α est imposée par la géométrie de la préforme, tandis que celle de β elle est choisie de manière à ne

pas avoir plus de 2% de bulles d'air en fin d'injection. C'est un critère de santé matière dans l'industrie aéronautique sur les pièces de structures.

4.4.2. Résultats de simulation avec le PDM

Nous proposons des fréquences de migration dont les valeurs sont :

$f_{coal} = 0.4$: fréquence de coalescence ;

$f_{acc} = 0.1$: fréquence de fragmentation par accélération ;

$f_{tur} = 0.01$: fréquence de fragmentation par turbulence.

Le choix de celles-ci repose sur le raisonnement qu'il est plus facile de faire migrer des micro-bulles d'air dans les macro-canaux que l'inverse. Donc la fréquence de coalescence est plus importante que celle de fragmentation. En addition à cela, les conditions d'injection de notre cas d'étude, confèrent au régime d'écoulement l'aspect laminaire et stationnaire. Par conséquent, la fréquence de fragmentation par turbulence est choisie très faible. Celle-ci conduit aux mêmes résultats d'une fréquence de turbulence nulle.

4.4.2.1. Simulation à pression imposée

a. Angle de contact dynamique

Dans cette application, les mêmes valeurs des pressions d'injection et à l'évent proposées au chapitre 3 sont conservées.

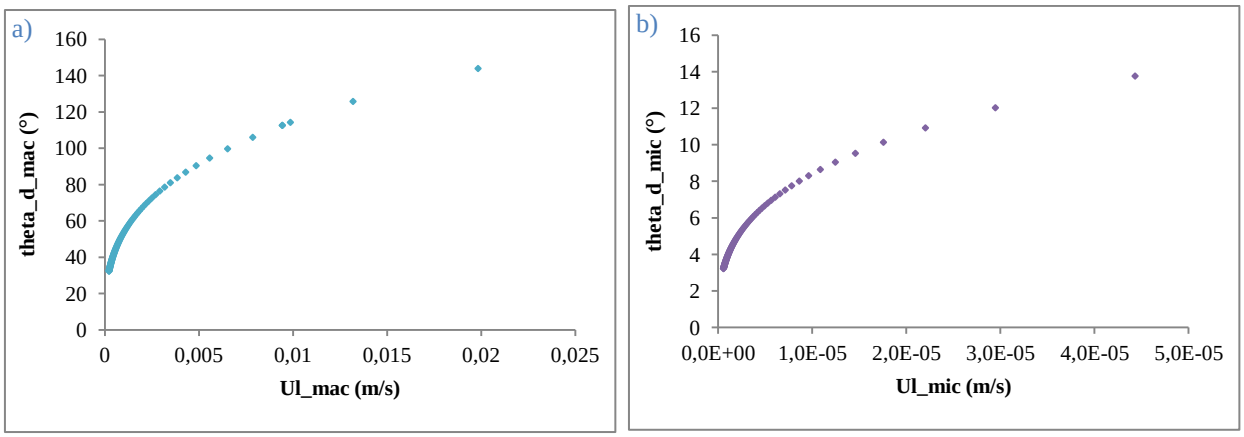


Figure 4-14 : Angle de contact dynamique en fonction de la vitesse du liquide, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro

Les courbes des figures (Fig.4-14.a) et (Fig.4-14.b) représentent la tendance des angles de contact dynamiques (issue de l'équation de De Gennes (Eq.4-12)) en fonction de la vitesse du liquide, à double échelle de pores. Ces deux courbes correspondent bien au résultat présenté dans le travail de Gueroult [35], où les angles θ_d croient en fonction de la vitesse du liquide.

b. Phénomène de création des bulles d'air

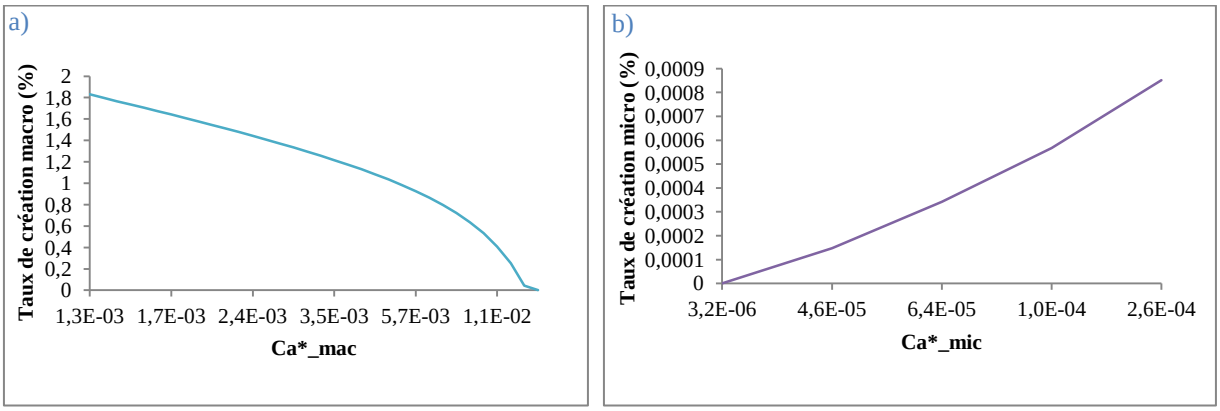


Figure 4-15 : Taux de création des bulles d'air en fonction du nombre capillaire modifié, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro

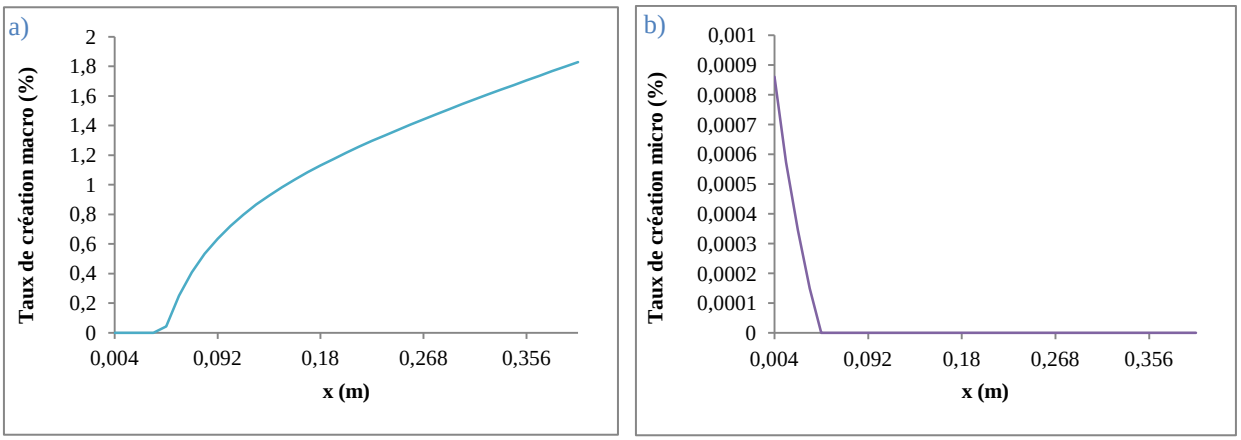


Figure 4-16 : Taux de création des bulles d'air en fonction de la position, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro

Les courbes (Fig.4-15.a) et (Fig.4-15.b) représentent les quantités de bulles d'air créées en fonction du nombre capillaire, tandis que les figures (Fig.4-16.a) et (Fig.4-16.b) montrent l'évolution de cette grandeur en fonction de la position. Nous remarquons que le taux de micro-bulles est faible par rapport à celui des macro-bulles, cela est dû à la faible valeur de β et la valeur imposée de α, comme il a été énoncé précédemment. Ben Abdelwahed [41] dans son travail a précisé que si $\alpha \ll 1$, alors le taux de micro-bulles d'air créé sera négligeable ; c'est le constat que les courbes (Fig.4-15.b) et (Fig.4-16.b) confirment.

Nous constatons également que le pourcentage des micro-bulles créées est croissant en fonction du nombre capillaire (Fig.4-15.b) et décroissant en fonction de la position (Fig.4-16.b). Quant au taux de macro-bulles créées, nous notons l'inverse de ces remarques.

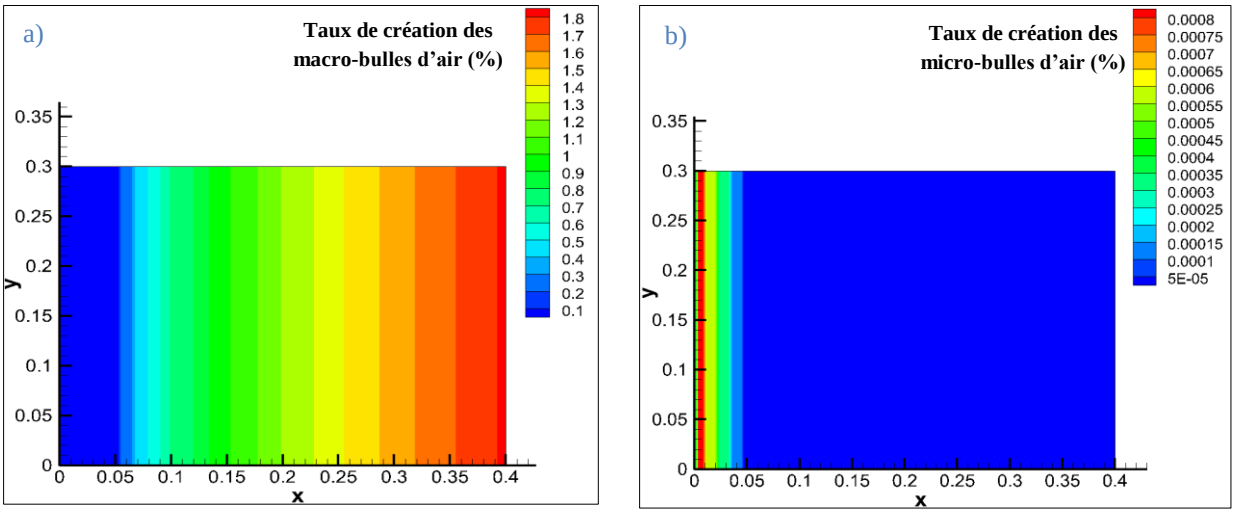


Figure 4-17 : Distribution spatiale des taux de création des bulles d'air, a) Echelle macro, b) Echelle micro

Sur la figure ci-dessus (Fig.4-17), nous donnons la représentation du taux de création des macro (Fig.4-17.a) et micro (Fig.4-17.b) bulles d'air sur l'ensemble des points de la plaque en fin de l'injection.

De la même manière que sur les courbes de la figure 4-16, nous constatons que le phénomène de création des bulles d'air commence d'abord avec l'échelle micro (Fig.4-17.b) et s'enchaîne avec celle macro (Fig.4-17.a). Bien évidemment, le point minima, où les micro-bulles d'air disparaissent et les macro-bulles d'air apparaissent, est le même que celui des figures 4-16.

c. Phénomènes de création et compression des bulles d'air

Les figures (Fig.4-18.a) et (Fig.4-18.b) représentent les résultats obtenus sur la répartition spatiale des taux de bulles macro et micro en fin d'injection, respectivement. Nous notons que ce dit phénomène n'a qu'une faible influence ; dans ce cas, les taux de bulles créées et comprimées ont resté quasiment inchangés, à double échelle de pores. Néanmoins, nous signalons que la saturation de la mèche (compression des micro-bulles d'air) est plus prononcée que la compression des macro-bulles d'air.

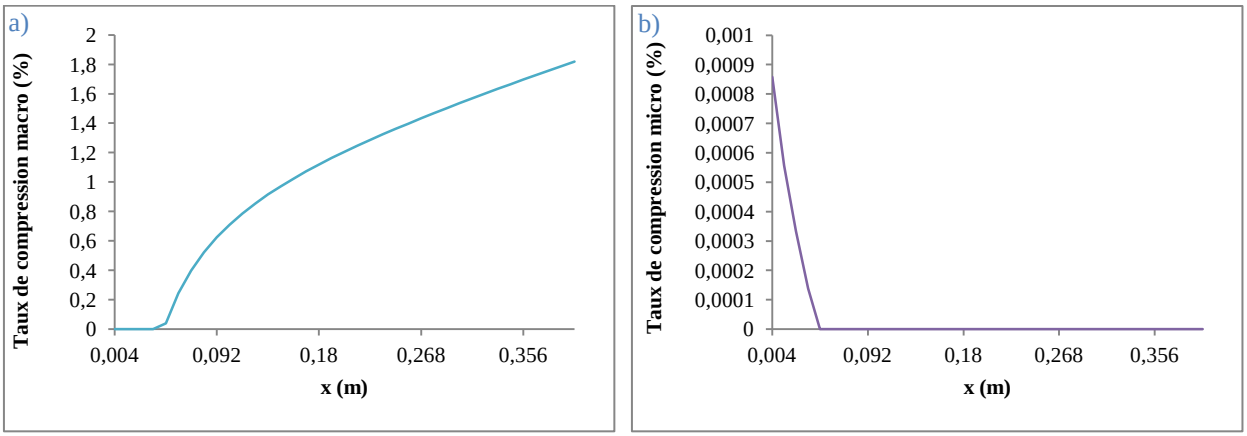


Figure 4-18 : Taux de compression des bulles d'air en fonction de la position, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro

d. Phénomènes de création, compression et transport des bulles d'air

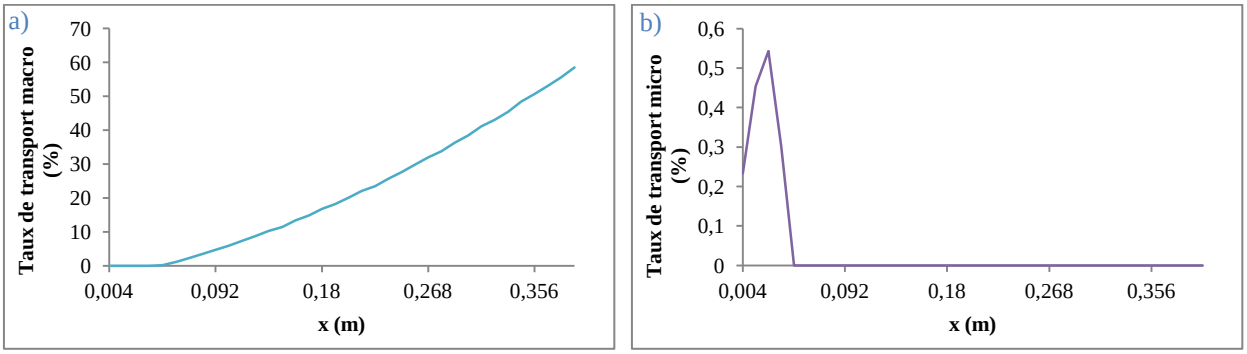


Figure 4-19 : Taux de transport des bulles d'air en fonction de la position, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro

Les courbes (Fig.4-19.a) et (Fig.4-19.b) présentent l'évolution des quantités de bulles d'air micro et macro expulsées à l'extérieur de la préforme, à double échelle de pores.

Comme nous n'avons qu'un faible pourcentage de micro-bulles d'air qui ont été formées, alors la quantité de bulles d'air transportées est faible. Par contre les macro-bulles sont créées en masse, d'où le grand pourcentage transporté.

Nous signalons aussi que le phénomène de transport révèle une coexistence simultanée des deux types de bulles d'air. Nous transportons bien et des micros et des macros bulles d'air au même temps et à la même position.

e. Porosité de la préforme

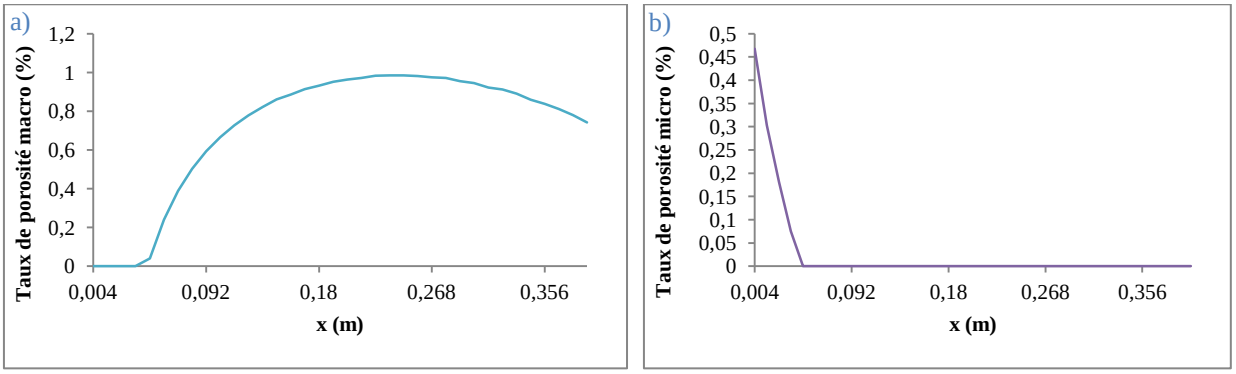


Figure 4-20 : Taux de porosité en fonction de la position, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro

Les quantités de bulles d'air restantes dans le produit final sont représentées sur les figures (Fig.4-20.a) et (Fig.4-20.b), respectivement. Nous retrouvons un profil de courbe « en marche »

qui a été mentionné dans le travail de Guroult [35] et traité dans le travail de Arnaud [36]. En effet, le passage de la zone micro à celle macro constitue la différence entre ce résultat et celui des références [35] et [36].

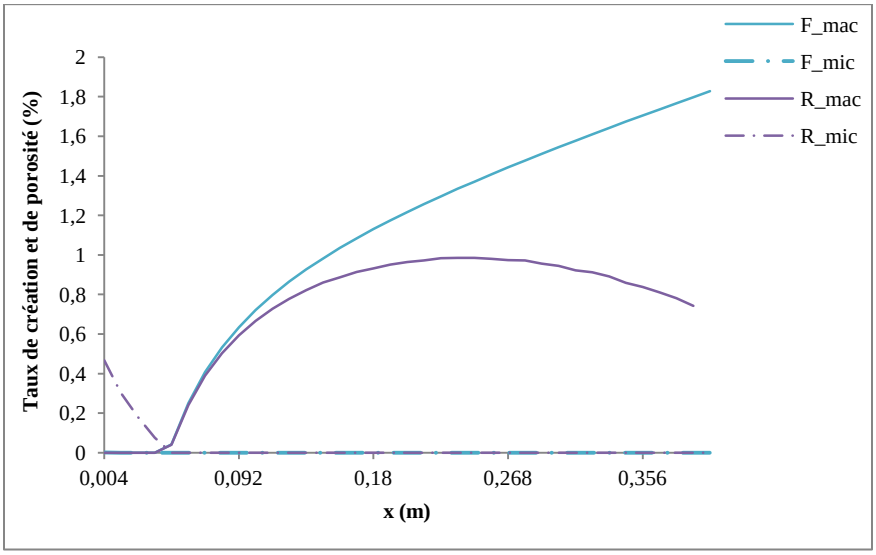


Figure 4-21 : Taux de création des bulles d'air et de porosité en fonction de la position, à double échelle de pores

La courbe de la figure (Fig.4-21) présente le cycle de vie des bulles d'air durant la phase d'injection : combien nous en avons créé et combien il nous en reste en fin d'injection.

Nous notons que le taux de macro-bulles d'air a diminué entre le créé et le resté. C'est une conséquence du phénomène de transport. Nous notons également, une porosité micro plus importante que le taux de création micro. Le surplus de ce pourcentage provient du terme source micro ($\dot{S_{mic}}$) qui est alimenté par la migration des macro-bulles d'air en plus des quantités conservées micros (les micro-bulles d'air qui restent micros tout au long de l'injection).

Sur les cartographies de la figure 4-22 ci-dessous, nous relevons les valeurs de la porosité finale en fonction de la position. Egalement, nous constatons que l'ajout d'un évent à la partie supérieure du côté droit de la préforme est nécessaire pour diminuer le taux de bulles d'air restantes dans la préforme en fin d'injection.

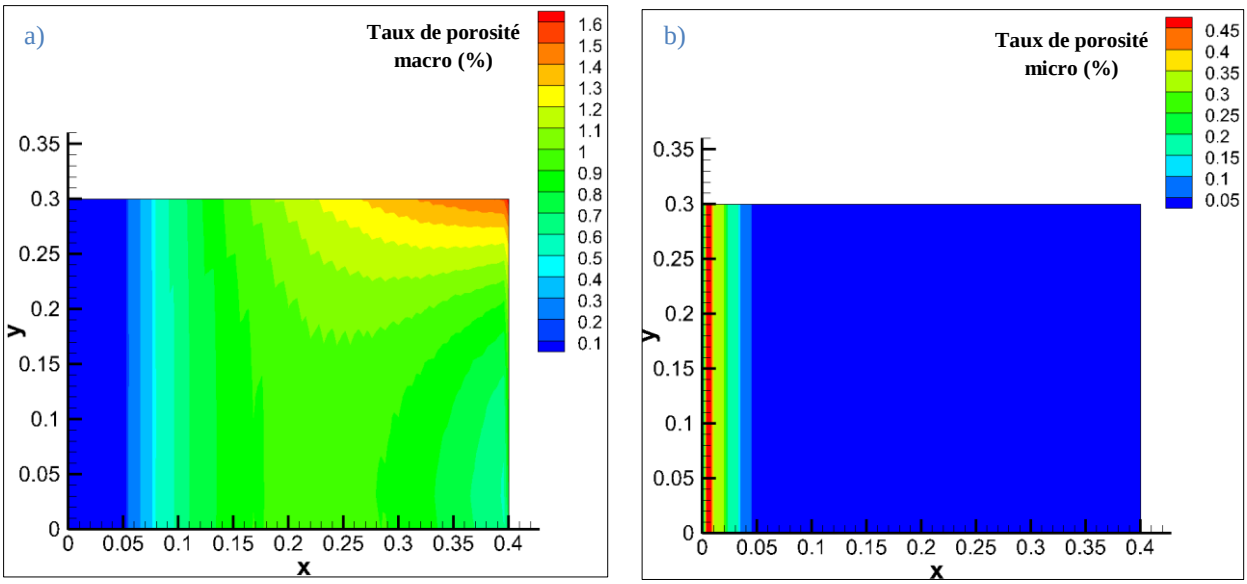


Figure 4-22 : Distribution spatiale de la porosité, a) Echelle macro, b) Echelle micro

f. Saturation de la préforme

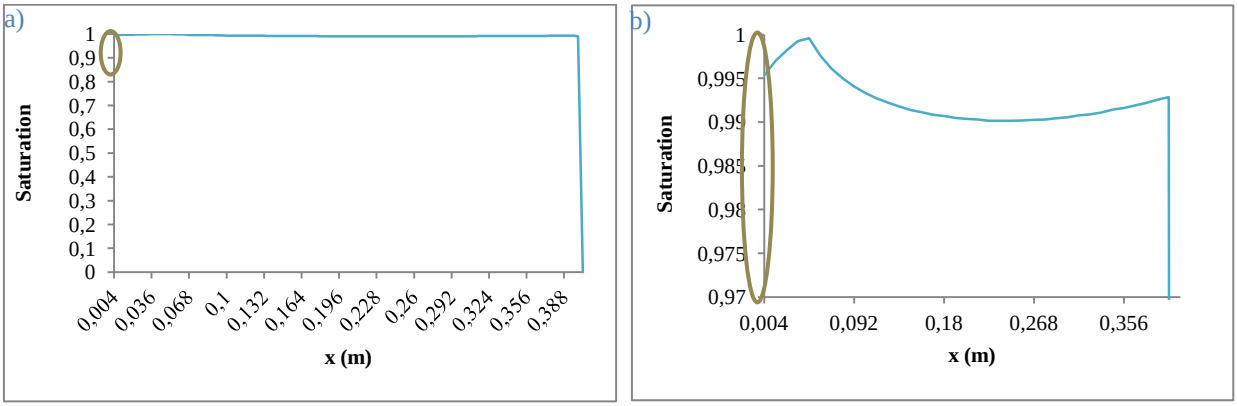


Figure 4-23 : a) Saturation totale en fonction de la position, b) Agrandissement de a)

Le résultat numérique donnant le taux de saturation du milieu fibreux est présenté sur la figure (Fig.4-23.a). Ce résultat montre que la préforme a été bien imprégnée.

La seconde figure (Fig.4-23.b) est proposée pour analyser cette grandeur au voisinage du point minima ($x = 0.056\,m$). Sur cet agrandissement ($saturation \in [0.97,1]$), nous remarquons que le pic de cette courbe correspond au creux de la porosité (Fig.4-21).

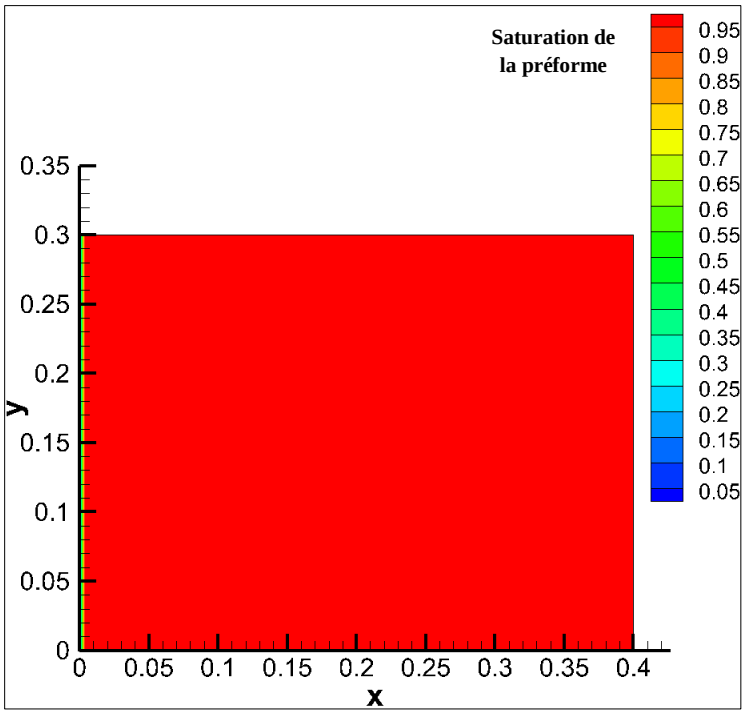


Figure 4-24 : Saturation de la préforme

La cartographie de la figure 4-24 nous indique que la préforme a été bien imprégnée. En effet, les valeurs de la saturation à l'instant final de l'injection, sont tangentes à l'unité.

Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser à l'évolution temporelle des différentes quantités de bulles d'air et à la saturation de la préforme, en trois positions choisies dans celle-ci. Les positions considérées sont les suivantes : Pos.1($x = 0.04\ m,\ \ y = 0.15\ m$), Pos.2($x = 0.16\ m,\ \ y = 0.15\ m$) et Pos.3($x = 0.36\ m, y = 0.15\ m$) (Fig.4-25).

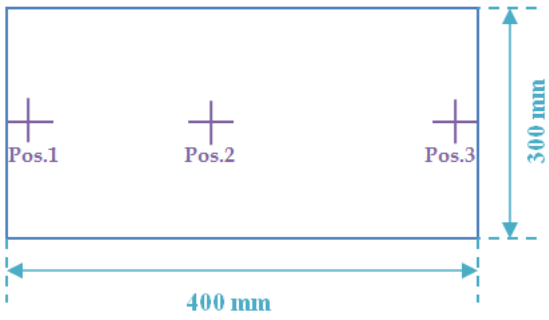


Figure 4-25 : Emplacement des trois positions choisies

Le but est d'analyser le comportement des grandeurs physiques en question ; au début de la préforme, au milieu et vers la fin de celle-ci.

Ainsi, après avoir réalisé l'étude spatiale tout au long de la préforme à l'instant final de l'injection, nous allons nous intéresser à l'étude temporelle de l'injection en trois différentes positions de la préforme.

i. Phénomène de création des bulles d'air et porosité de la préforme

Sur la figure ci-dessous (Fig.4-26) nous remarquons que :

- A la Pos.1, il nous reste plus de bulles que ce que nous avons créé. Cela s'explique par le fait que le transport des bulles a été effectué à faible taux et que l'effet de migration est non négligeable (alimentation du terme source).
- Aussi à la Pos.1, nous piégeons moins de bulles d'air qu'aux deux autres positions. C'est la raison pour laquelle la courbe F_Pos.1 est adjacente à l'axe des abscisses, mais elle n'est pas nulle.
- Aux positions 2 et 3, le pourcentage de bulles d'air restées est inférieur à celui de la création (Fig.4-26). A ces positions éloignées des bords de la pièce, le processus de création et de transport sont assez matures pour former puis expulser assez de bulles au fil du temps.

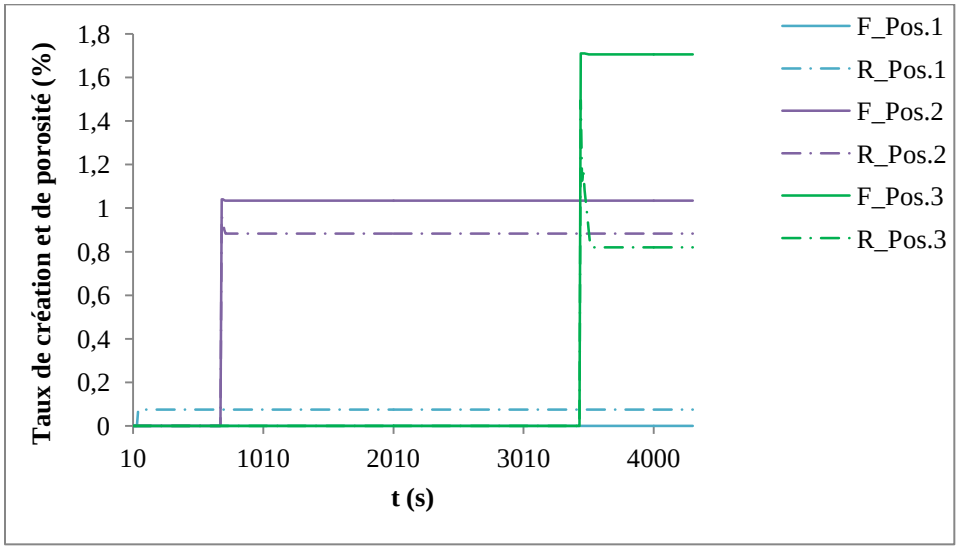


Figure 4-26 : Taux total de création des bulles d'air et de porosité en fonction du temps

ii. Phénomènes de création et compression des bulles d'air

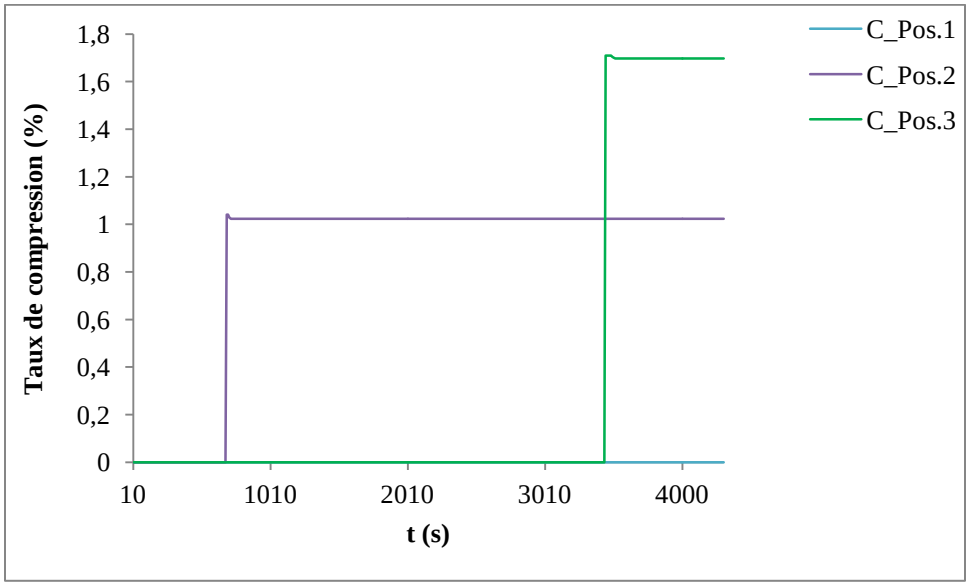


Figure 4-27 : Taux total de compression des bulles d'air en fonction du temps

Le comportement des taux de bulles d'air comprimées (Fig.4-27) est le même que celui des taux créés représentés sur la figure (Fig.4-26).

iii. Phénomènes de création, compression et transport des bulles d'air

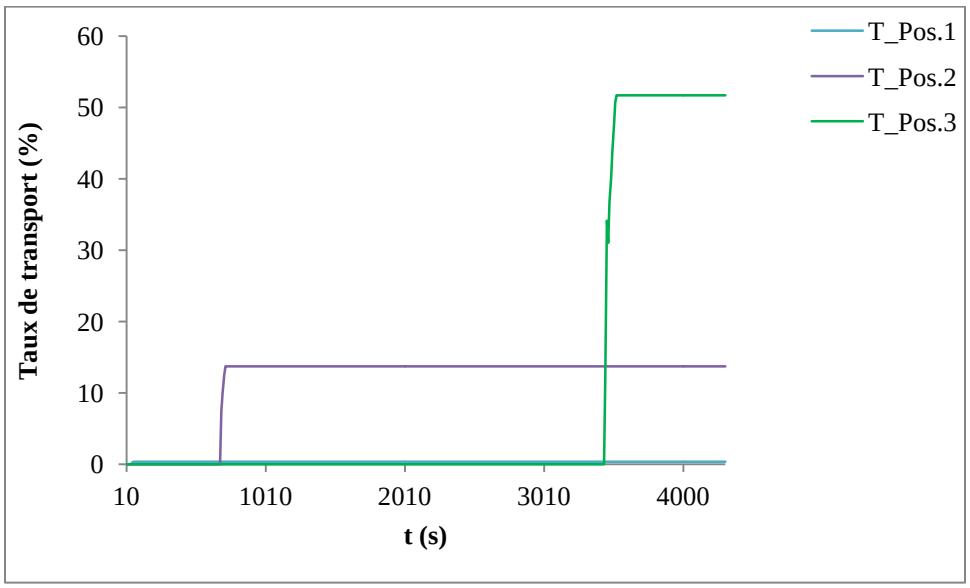


Figure 4-28 : Taux total de transport des bulles d'air en fonction du temps

Les courbes de la figure (Fig.4-28) montre qu'au fur et à mesure que nous avançons dans le temps et dans l'espace, nous transportons plus de bulles d'air.

iv. Saturation de la préforme

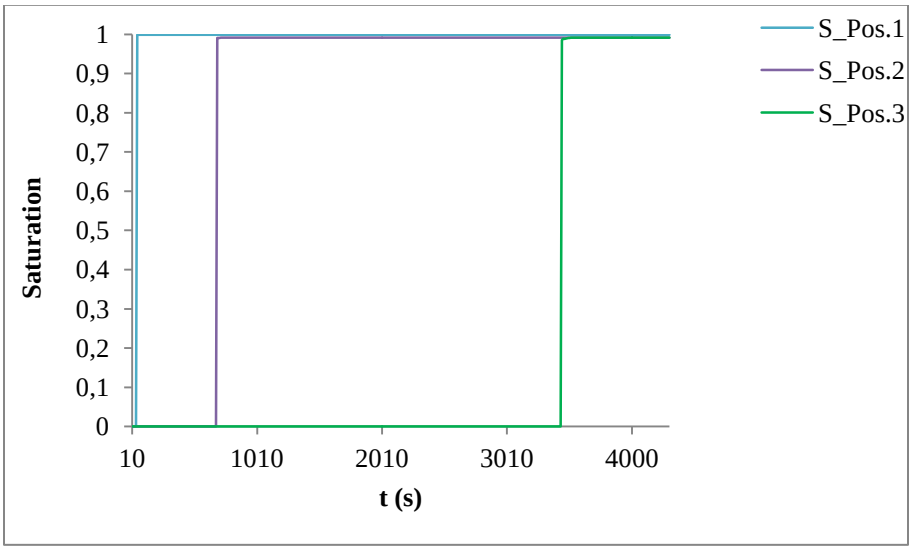


Figure 4-29 : Saturation totale en fonction du temps

Ces courbes (Fig.4-29) révèlent une bonne imprégnation de la préforme. Nous avons une valeur de saturation tangente à l'unité.

4.4.2.2. Simulation à débit imposé

Nous nous intéressons ici à une injection rectiligne à débit imposé, sur la même géométrie et la préforme UD que précédemment, avec $Q_{inj} = 0.85\ 10^{-7}\ m^3/\mathrm{s}$ et $P_{vent} = 1.1\ bar$.

a. Vitesses des bulles d'air et du liquide

De la même manière que le cas d'une injection à pression imposée (Fig.4-9.a) et (Fig.4-9.b), nous obtenons une vitesse des bulles plus élevée que celle du liquide (Fig.4-30.a) et (Fig.4-30.b) ci-dessous. D'un autre côté, les valeurs des vitesses à débit imposé sont plus importantes que celles à pression imposée. En effet, les conditions d'injection font que la vitesse à débit imposé ($u = Q/A$) soit plus importante que celle à pression imposée déterminée par (Eq.4-13).

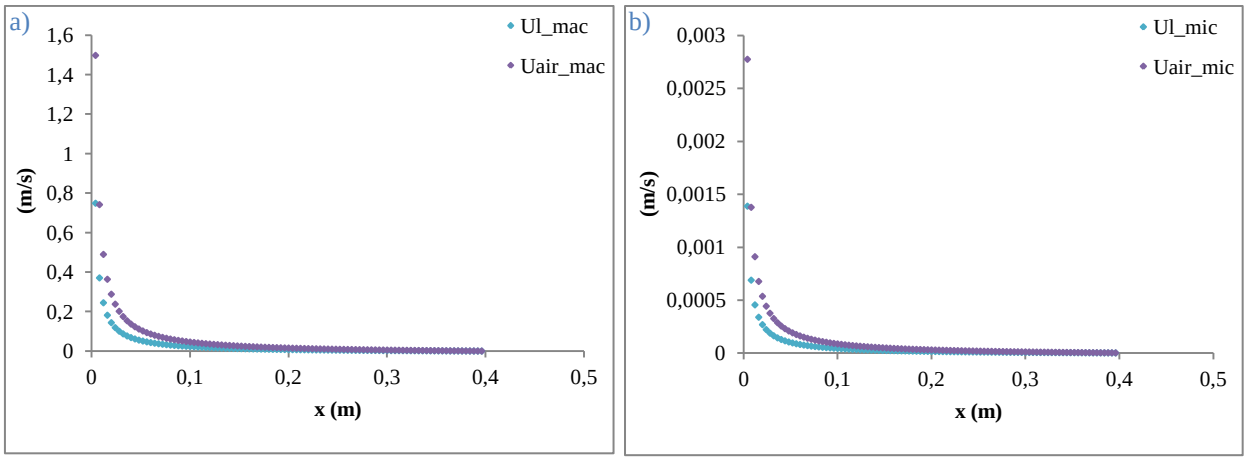


Figure 4-30 : Vitesses du liquide et de l'air, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro

b. Angle de contact dynamique

En se référant à l'expression de De Gennes donnant l'angle de contact dynamique en fonction du nombre capillaire (en l'occurrence la vitesse) (Eq.4-12), nous constatons que ces deux grandeurs sont proportionnelles. Or, dans ce cas de débit imposé, nous avons des valeurs de Ca plus importantes qu'à pression imposée (car la vitesse est plus élevée). D'où des valeurs de θ_d sur les courbes (Fig.4-31.a) et (Fig.4-31.b), qui sont plus importantes que celle des courbes (Fig.4-14.a) et (Fig.4-14.b).

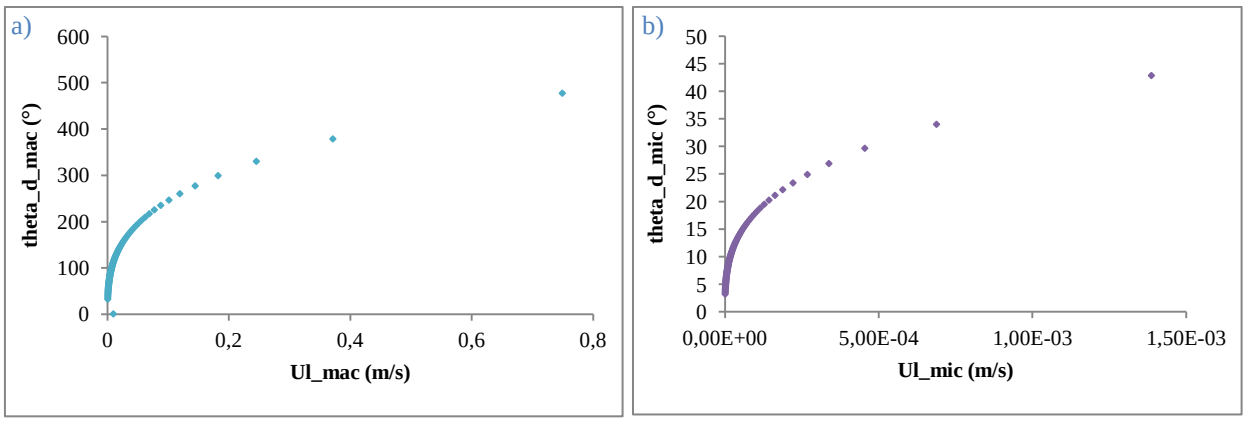


Figure 4-31 : Angle de contact dynamique en fonction de la vitesse du liquide, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro

c. Phénomène de création des bulles d'air

Sur la figure (Fig.4-32.a), nous notons un profil décroissant de la courbe décrivant les macro-bulles d'air créées en fonction du nombre capillaire macro. Tandis que la courbe (Fig.4-32.b)

décrivant les micro-bulles d'air formées en fonction du nombre capillaire micro, présente un profil croissant.

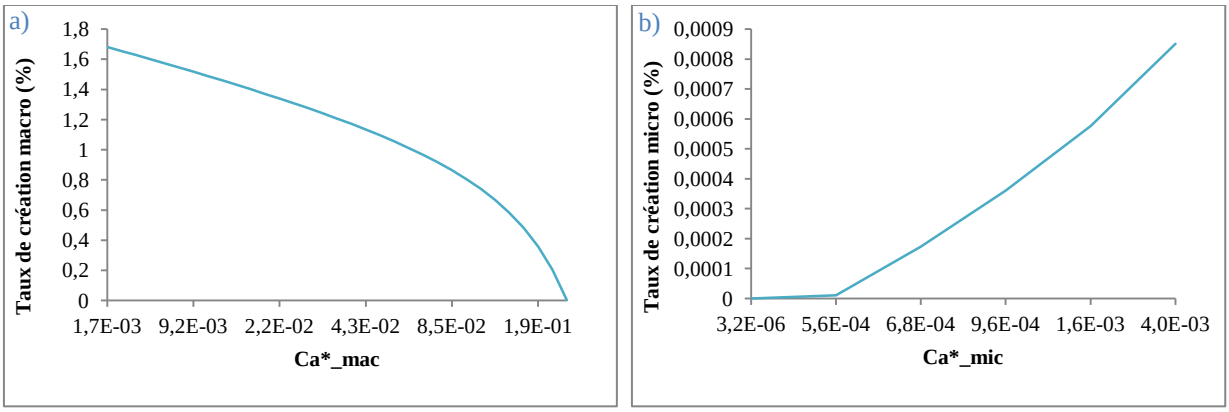


Figure 4-32 : Taux de création des bulles d'air en fonction du nombre capillaire modifié, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro

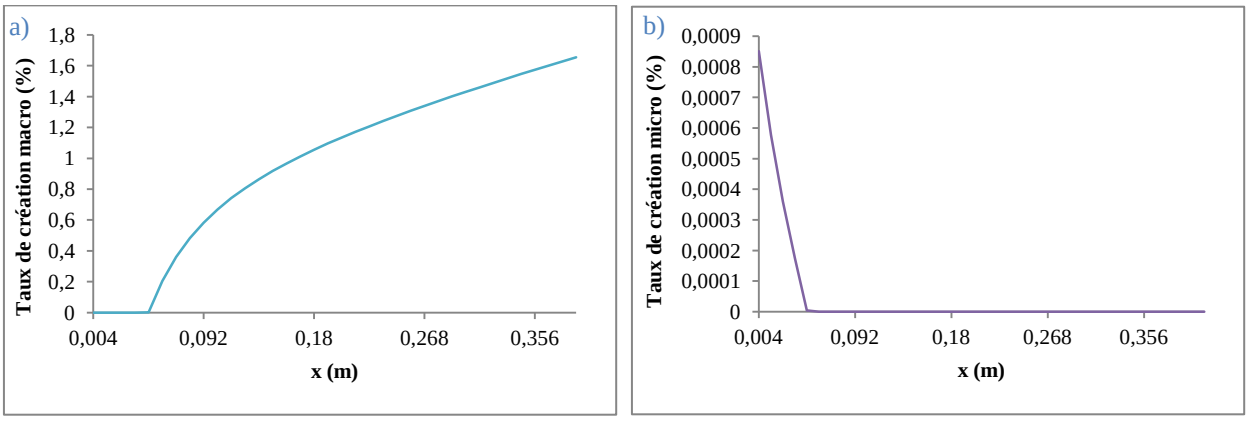


Figure 4-33 : Taux de création des bulles d'air en fonction de la position, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro

Sur les figures (Fig.4-33.a) et (Fig.4-33.b) donnant les taux de création en fonction de la position, nous remarquons une allure inversée de ce qui a été constaté sur les figures (Fig.4-32.a) et (Fig.4-32.b) en fonction du nombre capillaire.

En revanche, les figures 4-34.a) et 4-34.b), ci-dessous, sont cohérentes avec les figures 4-33.a) et 4-33.b), ci-dessus. En effet, le taux de création des macro-bulles d'air croit en fonction de la position, et celui des micro-bulles d'air décroit en fonction de celle-ci.

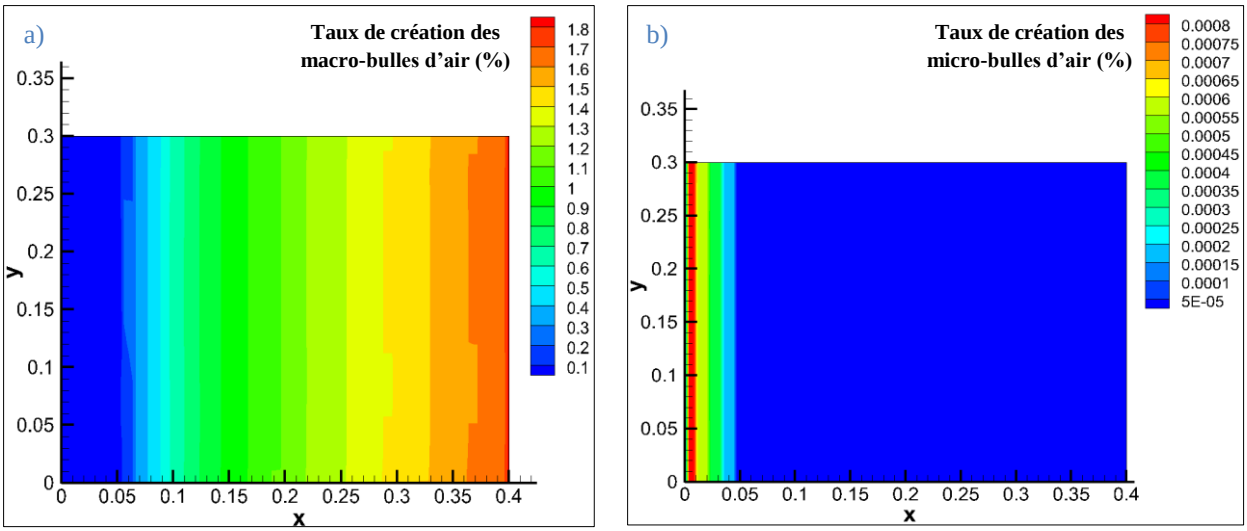


Figure 4-34 : Distribution spatiale des taux de création des bulles d'air, a) Echelle macro, b) Echelle micro

d. Phénomènes de création, compression et transport des bulles d'air et porosité de la préforme

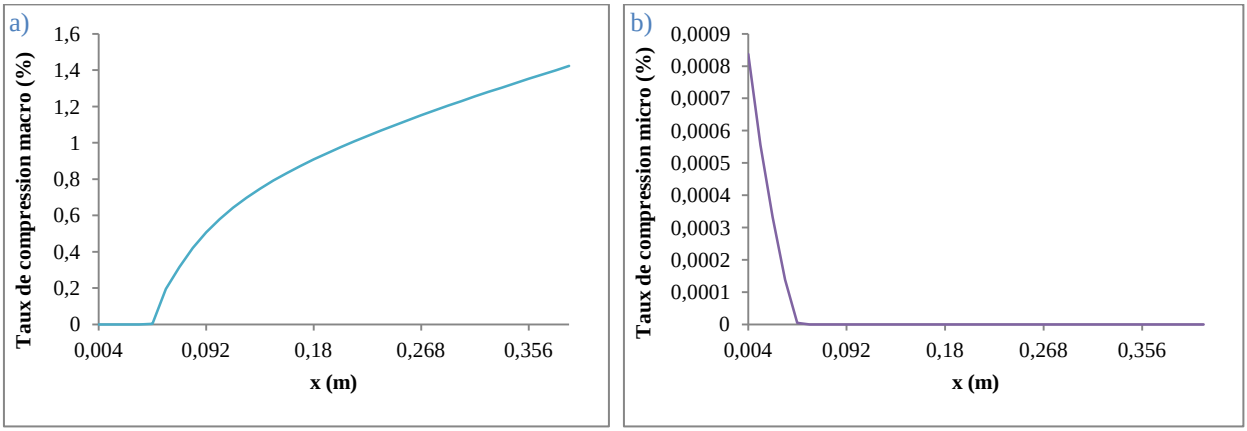


Figure 4-35 : Taux de compression des bulles d'air en fonction de la position, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro

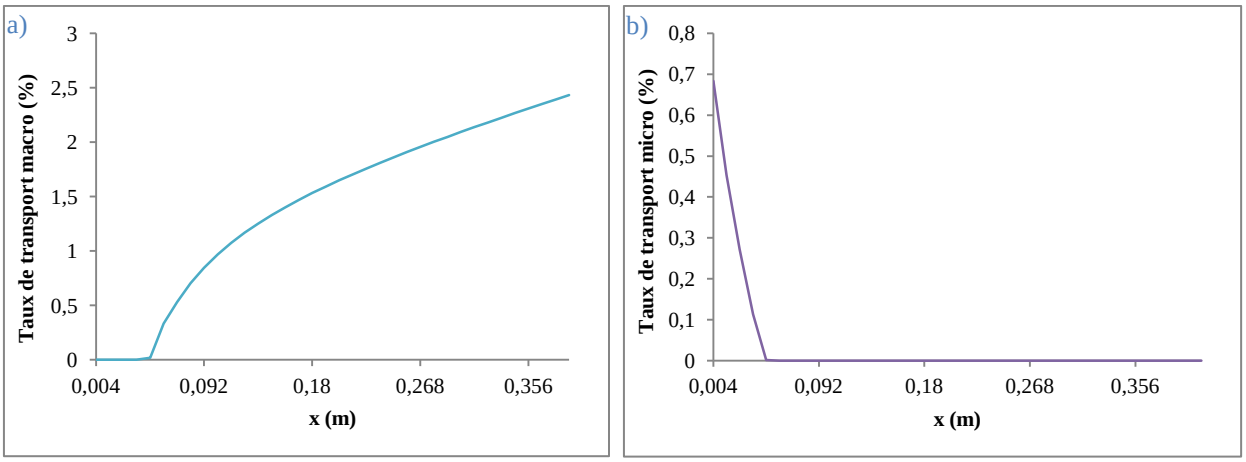


Figure 4-36 : Taux de transport des bulles d'air en fonction de la position, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro

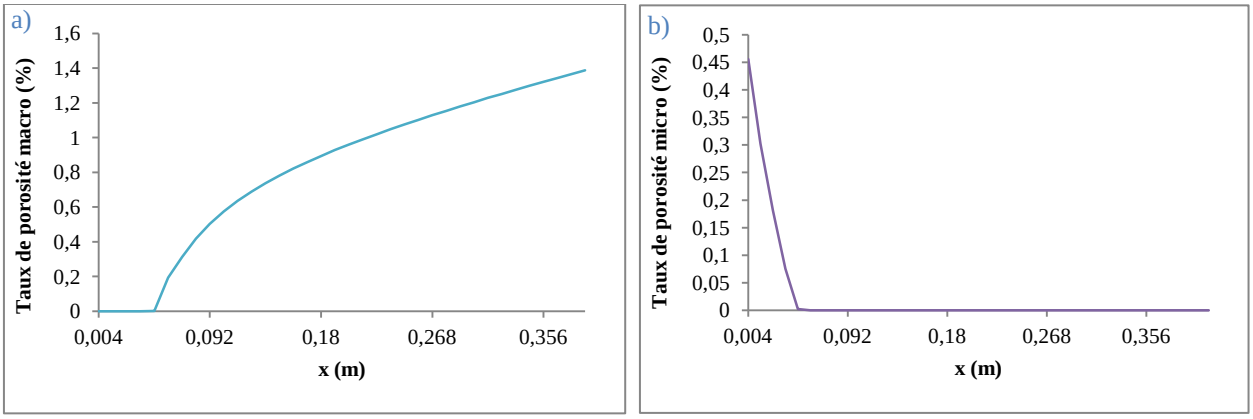


Figure 4-37 : Taux de porosité en fonction de la position, a) A l'échelle macro, b) A l'échelle micro

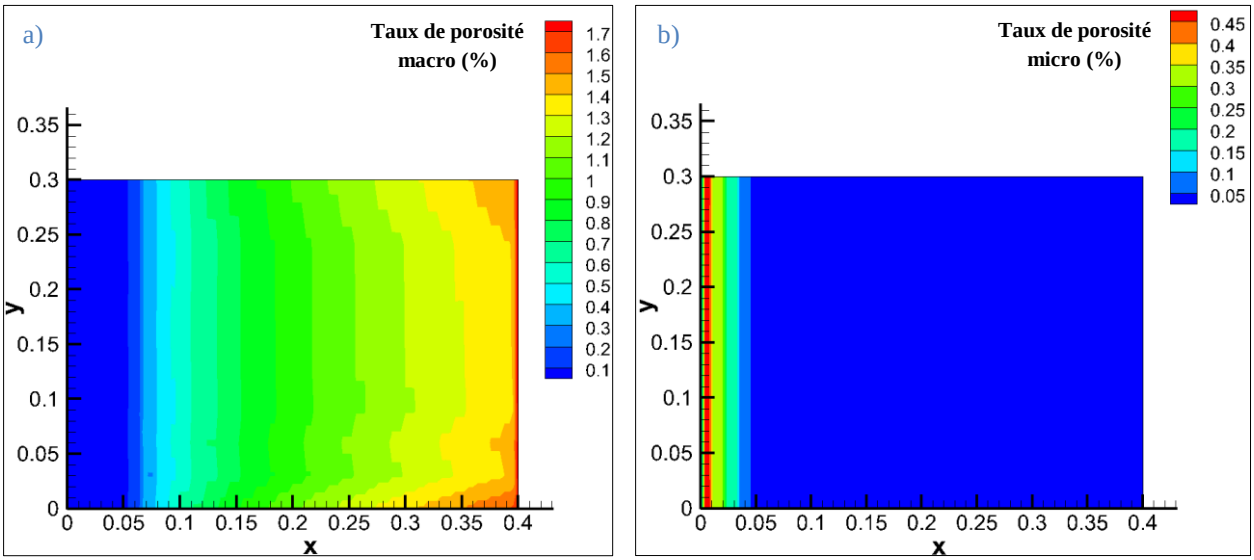


Figure 4-38 : Distribution spatiale de la porosité, a) Echelle macro, b) Echelle micro

Les courbes dans les figures (Fig.4-35.a) et (Fig.4-35.b) représentent le taux de micro et macro-bulles d'air créées et comprimées, le long de la préforme et en fin d'injection. En outre, les courbes (Fig.4-36.a) à (Fig.4-38.b) représentent le taux des quantités de bulles d'air expulsées de la pièce et celles qui ont resté en fin d'injection, à la double échelle de pores.

Les courbes (Fig.4-32.a) à (Fig.4-38.b) ont gardé les mêmes tendances que les courbes représentées sur (Fig.4-15.a) à (Fig.4-22.b). Le profil de la distribution spatiale des quantités créées, comprimées, transportées et restées des micros et macro-bulles d'air à débit imposé est similaire à celui à pression imposée.

La seule différence est notée au niveau des valeurs obtenues. En effet, le phénomène de compression est plus important dans cette injection à débit imposé qu'à pression imposée. Notamment, la vitesse est plus importante et en l'occurrence le gradient de pression de la résine, alors la taille des bulles d'air est réduite davantage. Puisque tous les phénomènes sont dépendants (Eq.3-79), (Eq.3-86) et (Eq.3-87), alors les taux de transport et de porosité ainsi que les valeurs de la saturation sont affectés.

Nous notons également que les quantités de bulles d'air restantes dans la préforme sont plus importantes à débit imposé qu'à pression imposée. Notamment dans notre premier cas, la vitesse du liquide est plus importante que dans le second. Par conséquent, la création des bulles d'air est plus favorisée lors de notre injection à débit constant que celle à pression constante.

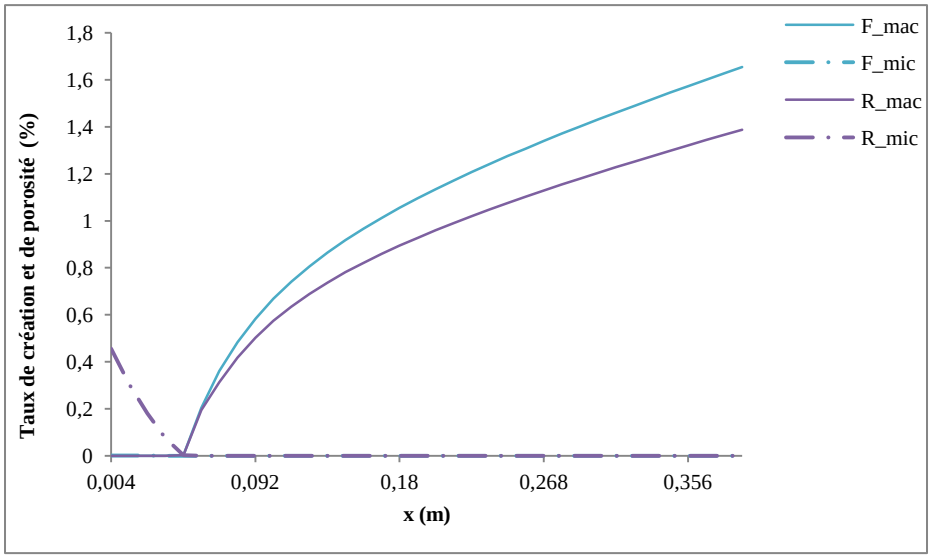


Figure 4-39 : Taux de création des bulles d'air et de porosité en fonction de la position

Cette courbe (Fig.4-39) regroupe les phénomènes par lesquels ont passé les bulles d'air. C'est une représentation de la distribution spatiale des quantités totales de bulles d'air créées et restées en fin d'injection.

En effet, la quantité de bulles d'air qui demeurera dans la préforme en fin d'injection est inférieure à celle que nous avons créée au départ.

Les porosités micros sont plus importantes que celles macros. Cela est dû à l'effet de la migration des macro-bulles d'air.

e. Saturation de la préforme

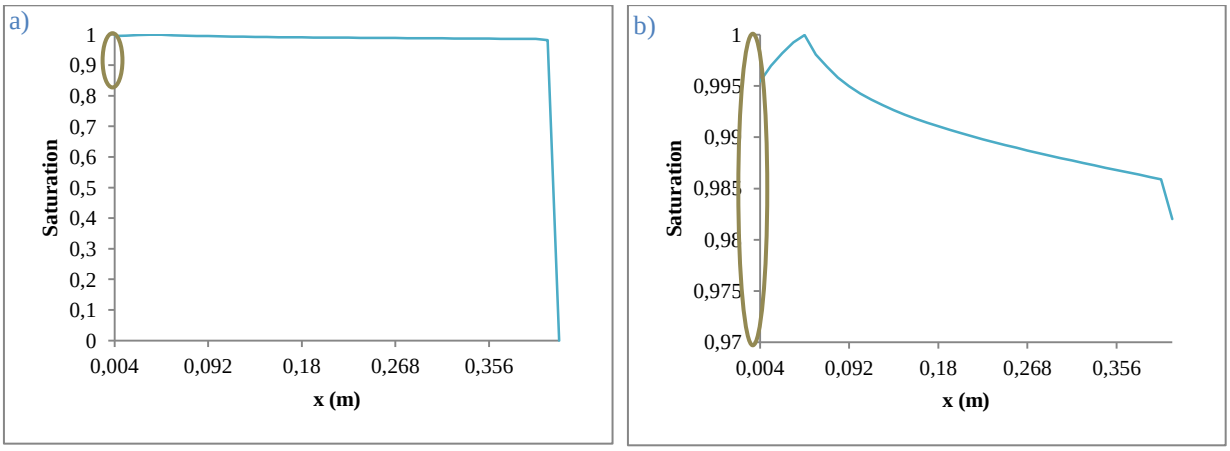


Figure 4-40 : a) Saturation totale en fonction de la position, b) Agrandissement de a)

La courbe (Fig.4-40.b) est un agrandissement ($saturation \in [0.97,1]$) de la distribution temporelle de la saturation tout au long de la préforme (Fig.4-40.a).

La saturation est inversement proportionnelle aux taux de bulles d'air. Et parce que nous avons piégé plus de bulles d'air à débit imposé (Fig.4-39), alors la valeur de la saturation de ce cas de figure est inférieure à celle constatée à pression imposée (Fig.4-23.b).

Quant au point où la saturation maximale est atteinte (Fig.4-40.b), il est quasiment identique à celui obtenu à pression imposée (Fig.4-23.b). Sa valeur est proche de $x = 0.056\ m$, il correspond donc à la position où nous avons le minimum de bulles d'air.

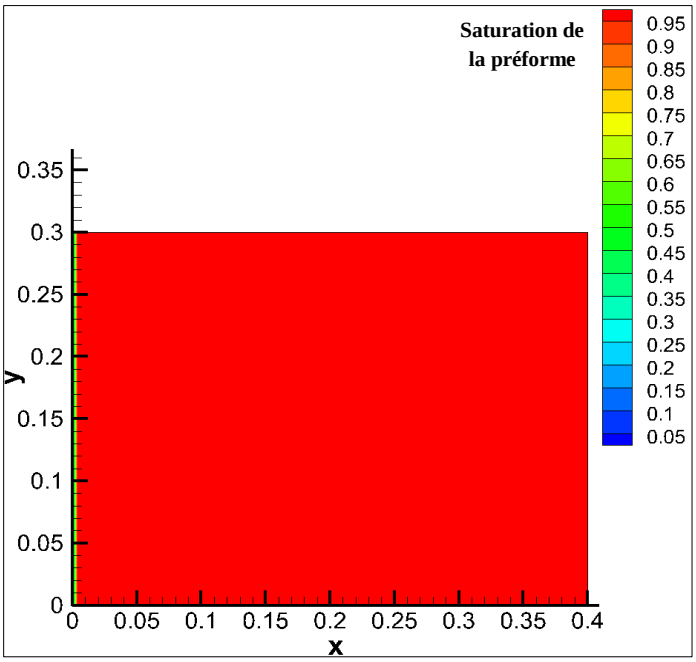


Figure 4-41 : Saturation de la préforme

Aussi bien dans cette configuration, où l'injection est réalisée à débit imposé (Fig.4-41), que celle conduite à pression imposée (Fig.4-24), nous avons obtenu une bonne imprégnation de la préforme.

De la même manière que dans le cas d'une injection à pression imposée, nous nous sommes intéressés à l'évolution temporelle des quantités de bulles d'air créées, comprimées, transportées et restées en plus de la saturation, sur les trois positions précédentes $Pos.1$, $Pos.2$ et $Pos.3$.

i. Phénomène de création des bulles d'air et porosité de la préforme

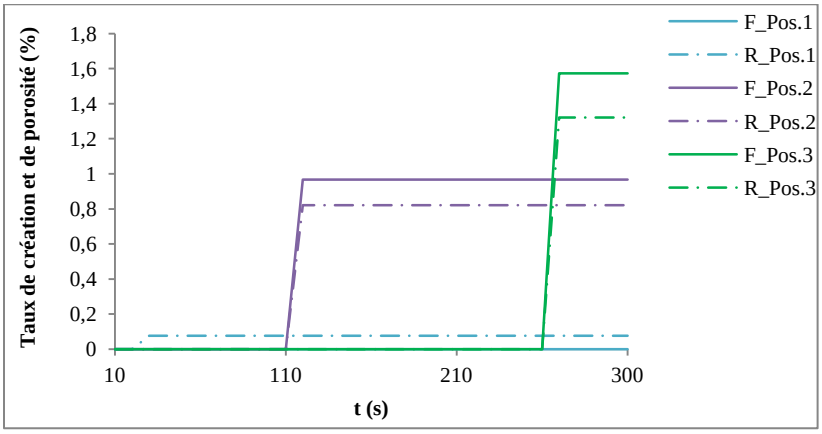


Figure 4-42 : Taux total de création des bulles d'air et de porosité en fonction du temps

L'évolution temporelle des taux de création et de porosité et la logique d'interprétation mentionnées dans le cas à pression imposée pour la courbe (Fig.4-26), sont également valables pour la figure ci-dessus (Fig.4-42).

Le taux de bulles d'air à la première position est très faible par rapport à celui des deux autres positions (Fig.4-42), c'est la raison pour laquelle il est tangent à l'axe des abscisses, mais il n'est pas nul. Cette remarque est valable aussi pour les courbes (Fig.4-43) et (Fig.4-44) ci-dessous.

ii. Phénomènes de création et compression des bulles d'air

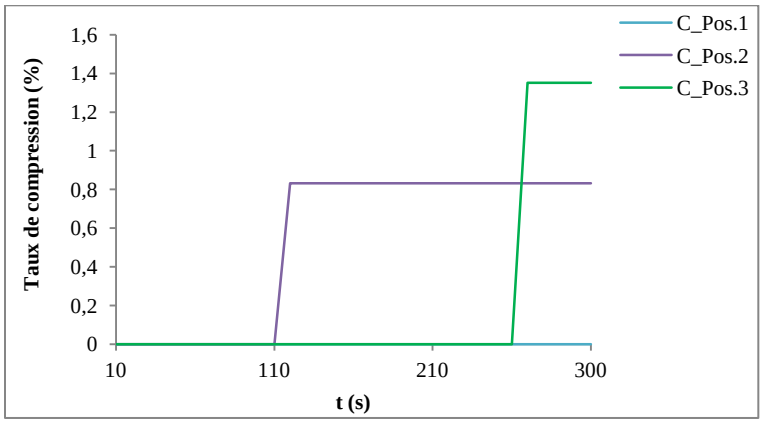


Figure 4-43 : Taux total de compression des bulles d'air en fonction du temps

Le profil des courbes des quantités comprimées (Fig.4-43) est le même que celui des quantités créées (Fig.4-42).

iii. Phénomènes de création, compression et transport des bulles d'air

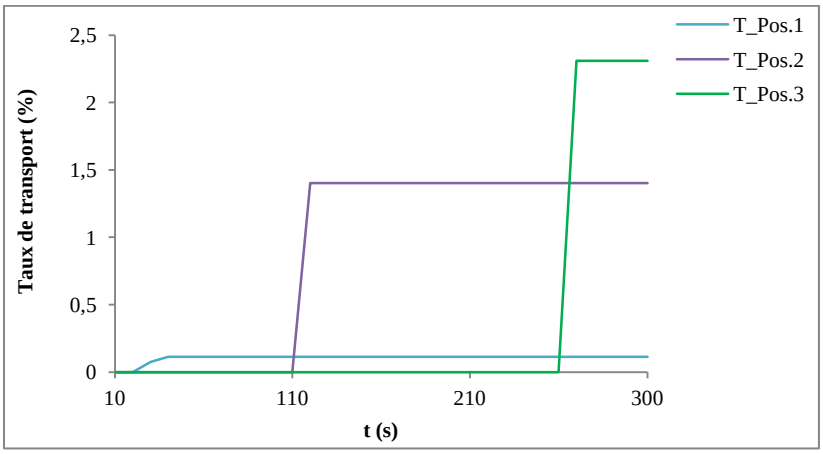


Figure 4-44 : Taux total de transport des bulles d'air en fonction du temps

Vu que nous ne créons qu'un faible pourcentage de bulles d'air (Fig.4-42), alors la quantité transportée (Fig.4-44) sera également faible. Au fur et à mesure que nous avançons plus dans le temps et dans l'espace, nous expulsons plus de bulles d'air.

iv. Saturation de la préforme

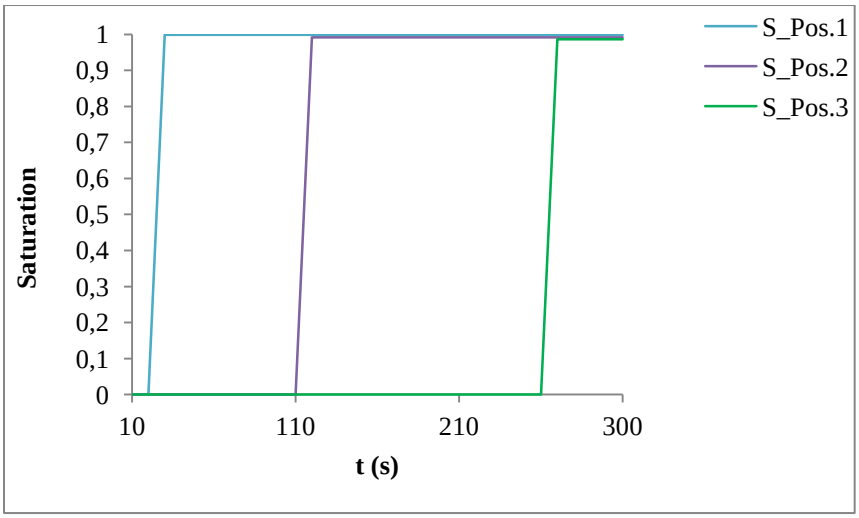


Figure 4-45 : Saturation totale en fonction du temps

La figure (Fig.4-45) présente l'évolution temporelle de la saturation sur les trois positions. Elle renseigne sur la santé matière en terme d'imprégnation de la préforme.

4.5. Comparaison expérimental-numérique

Dans cette partie, nous allons comparer nos résultats numériques avec certains résultats obtenus expérimentalement.

4.5.1. Injection à pression imposée

Dans un premier temps, nous avons comparé nos résultats avec le travail de Leber [68]. Il a réalisé des plaques en RTM, en injectant à pression imposée égale à 2.1 bar et à une différence de pression de 1 bar, de la résine RTM6 sur un tissu UD en carbone.

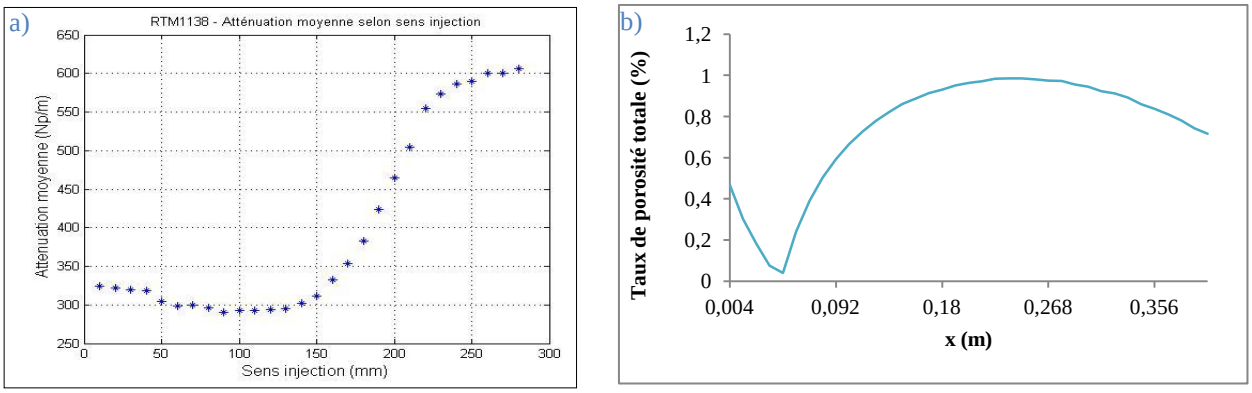


Figure 4-46 : a) Atténuation moyenne en fonction de la position [68], b) Porosité finale numérique en fonction de la position

La courbe de la figure (Fig.4-46.a) correspond au résultat expérimental et celle de la figure (Fig.4-46.b) au résultat numérique.

La courbe expérimentale de gauche décrit l'atténuation du signal électrique émis en fonction de la position sur la plaque. En effet, ce résultat est issu d'un Contrôle Non Destructif (CND) appliqué à une pièce composite en fibres de carbone et la résine RTM6 qui a les mêmes propriétés physico-chimiques et géométriques que la plaque simulée. D'une façon plus générale, quand un signal électrique est envoyé sur un média fibreux, lorsqu'il rencontre un vide, alors le signal s'amortit et l'atténuation devient plus importante, ce qui fait que l'atténuation et la porosité sont proportionnelles.

La difficulté de comparaison avec la courbe de droite, qui présente la porosité finale tout au long de la préforme, est que le passage de l'atténuation à la porosité n'a pas été effectué dans le travail de Leber.

Par ailleurs, nous remarquons que les deux courbes ont la même tendance : elles commencent avec un taux de bulles d'air relativement important, qui diminue au voisinage de $56\ mm$ (point minima), et il commence à augmenter jusqu'à atteindre son maximum entre $200\ et\ 300\ mm$. La courbe (Fig.4-46.b) présente, également, une chute de porosité vers la fin de la plaque ($400\ mm$), c'est l'endroit où les évents sont positionnés.

Un autre travail moins récent que celui de Leber a aussi estimé la porosité finale de la préforme expérimentalement, en utilisant des capteurs diélectriques [35].

Le gradient de pression entre celle d'injection et à l'évent est égal à 1 bar, c'est la seule donnée commune entre notre travail et celui de Gueroult [35]. Par contre, les propriétés de la préforme fibreuse ne sont pas identiques. En effet, cette dernière est un UD de verre et imprégnée par une résine Eau/glycérol et silicone.

Malgré ces conditions, nous allons procéder à une comparaison entre la distribution spatiale numérique et expérimentale, des quantités de bulles d'air restées en fin de l'injection.

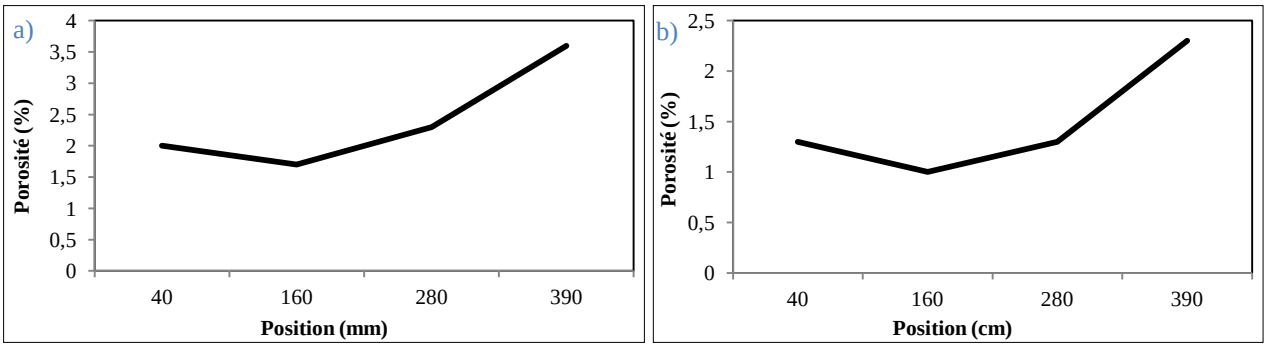


Figure 4-47 : Porosité finale expérimentale en fonction de la position, a) Eau/Glycérol, b) Silicone [35]

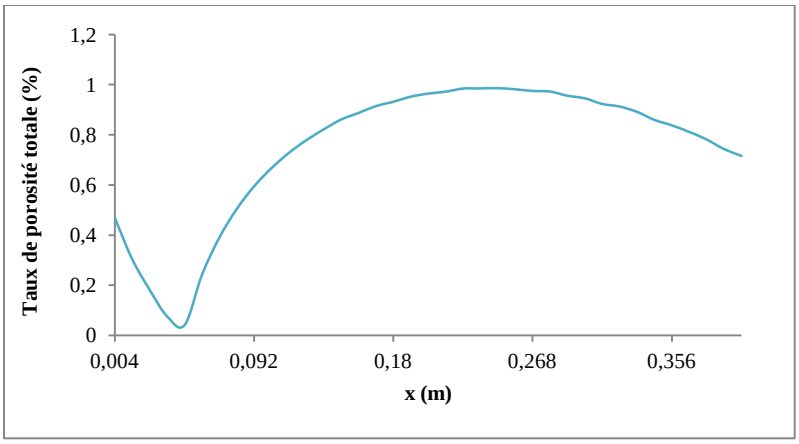


Figure 4-48 : Porosité finale numérique en fonction de la position

Les courbes sur les figures (Fig.4-47.a) et (Fig.4-47.b) sont issues des mesures relevées par quatre capteurs positionnés sur la longueur de la plaque. Ces deux courbes présentent trois paliers : le premier est décroissant, puis les deux autres sont croissants avec différentes pentes.

Sur la courbe de la figure (Fig.4-48), nous retrouvons cette tendance mais avec des pentes distinctes : nous notons une baisse puis une augmentation selon deux différentes pentes. Vers l'extrémité de la pièce, nous remarquons une chute du taux de bulles d'air.

Dans ce même travail expérimental, Gueroult a présenté des résultats relatifs à la distribution spatiotemporelle de la saturation totale de la préforme. En effet, à une injection à pression imposée ($P_{inj} - P_{vent} = 1\ bar$), il a constaté que la saturation commence avec une valeur faible puis augmente au fur et à mesure que le liquide avance, jusqu'à la fin de la préforme où elle baisse de nouveau (Fig.4-49.a).

C'est la remarque relevée aussi dans le cadre de notre simulation, où à la première position nous avons une valeur de la saturation de 0.9953, puis elle augmente jusqu'à atteindre 0.9961 et ensuite elle baisse à 0.990 (Fig.4-49.b).

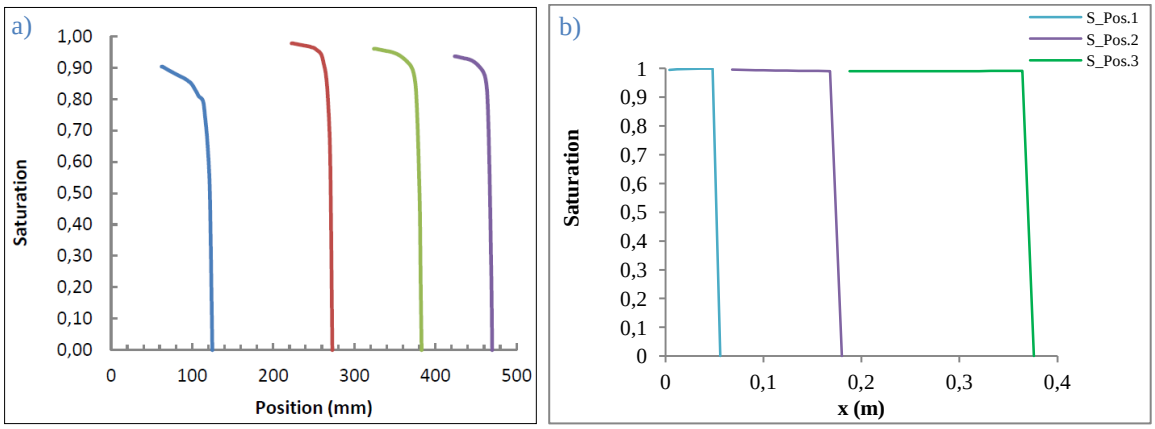


Figure 4-49 : Saturation totale en fonction de la position, a) Expérimentale [35], b) Numérique

Au niveau de l'évolution temporelle de cette grandeur, plus que nous avançons dans le temps, plus que la préforme est mieux saturée (Fig.4-50.a) et (Fig.4-50.b).

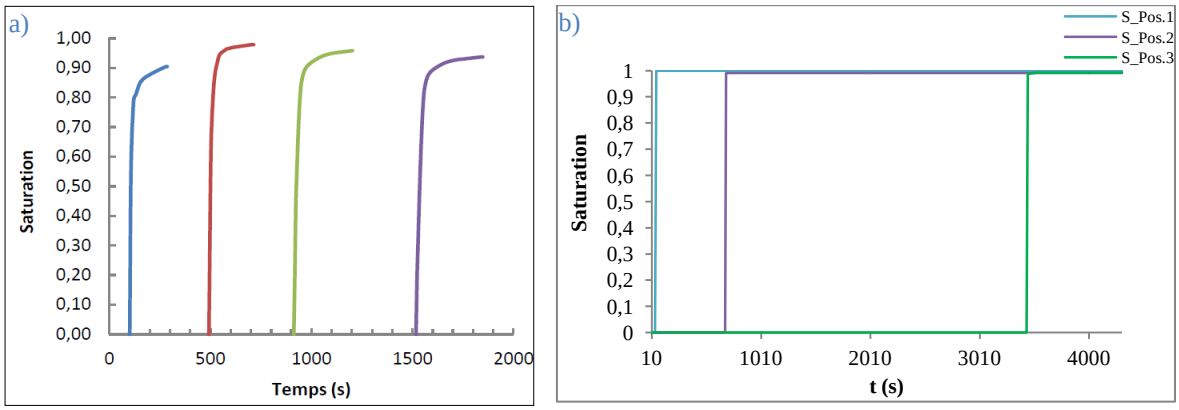


Figure 4-50 : Saturation totale en fonction du temps, a) Expérimentale [35], b) Numérique

4.5.2. Injection à débit imposé

Pour le cas d'injection à débit imposé, nous avons comparé nos résultats numériques sur la porosité finale avec les résultats expérimentaux de Arnauld [36]. Dans ce cas notamment, les expériences réalisées et la simulation effectuée n'étaient pas conduites avec les mêmes matériaux ni avec la même architecture de la préforme. En effet, l'auteur a travaillé sur un stratifié carbone/époxy. Par contre, le nombre capillaire est pratiquement le même dans les deux cas : $Ca = 1.43\ 10^{-3}$ pour l'expérimental et $Ca = 1.1\ 10^{-3}$ pour le numérique.

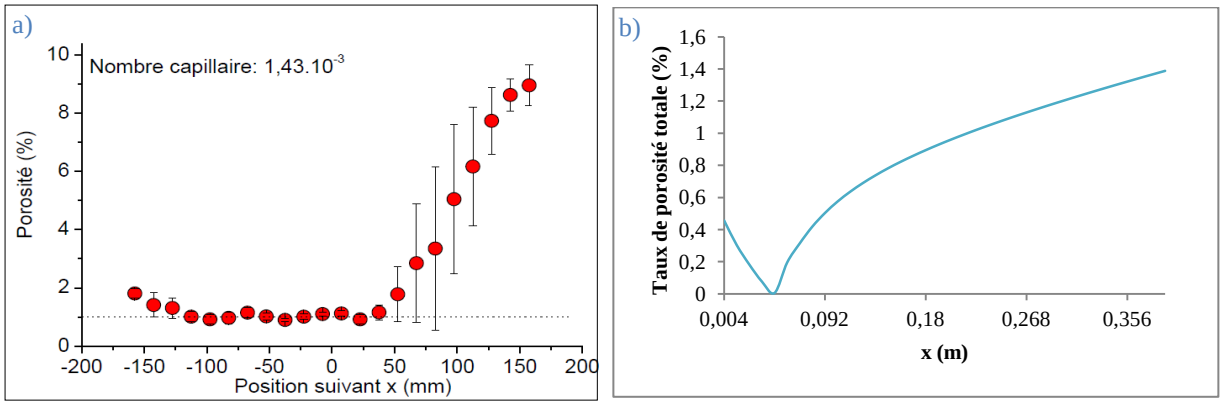


Figure 4-51 : Porosité finale en fonction de la position, a) Expérimentale [36], b) Numérique

La première figure correspond aux résultats expérimentaux de la mesure de la porosité tout au long de la plaque, tandis que la seconde est issue de notre simulation. Sur les deux courbes, nous remarquons une croissance rapide des taux de bulles d'air. Les deux paliers ne sont pas identiques, mais au début il y a une baisse de porosité qui est moins importante en (Fig.4-51.a) qu'en (Fig.4-51.b). Aussi, le taux de porosité vers la fin de la préforme est moins important sur (Fig.4-51.b) que sur (Fig.4-51.a).

Concernant la mesure de la saturation, encore, Gueroult [35] a réalisé des expérimentations à débit imposé de $Q_{inj} = 0.95\ 10^{-7}\ m^3/s$. Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure (Fig.4-52.a).

De même, il y a le travail de Gascon et al [69] qui a représenté cette même grandeur en fonction de la position (Fig.4-52.b), dans le cas d'une injection à débit imposé $Q_{inj} = 0.25\ 10^{-7}\ m^3/s$, et sur une préforme fibreuse unidirectionnelle et rectangulaire.

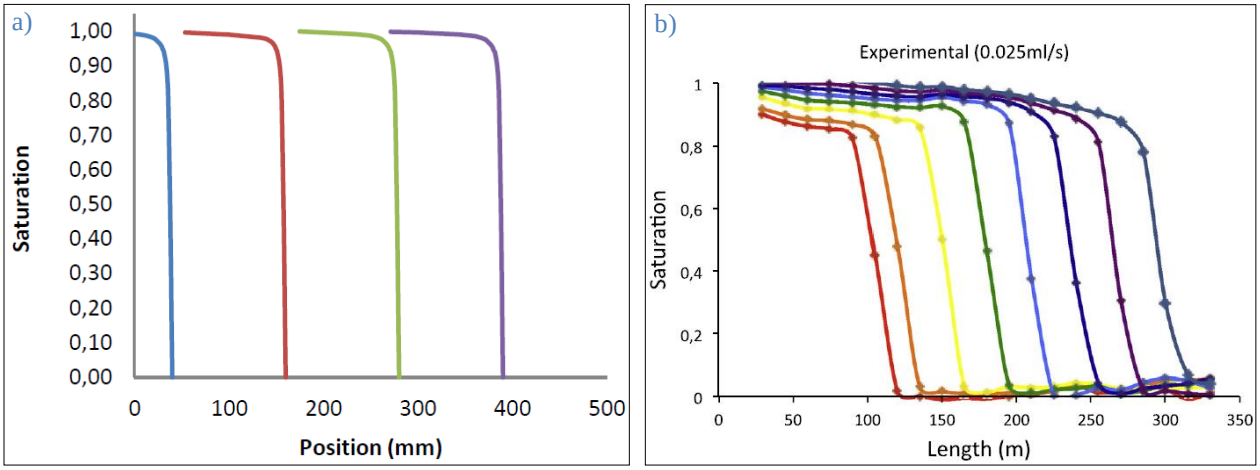


Figure 4-52 : Saturation totale expérimentale en fonction de la position, a) Gueroult [35], b) Gascon [69]

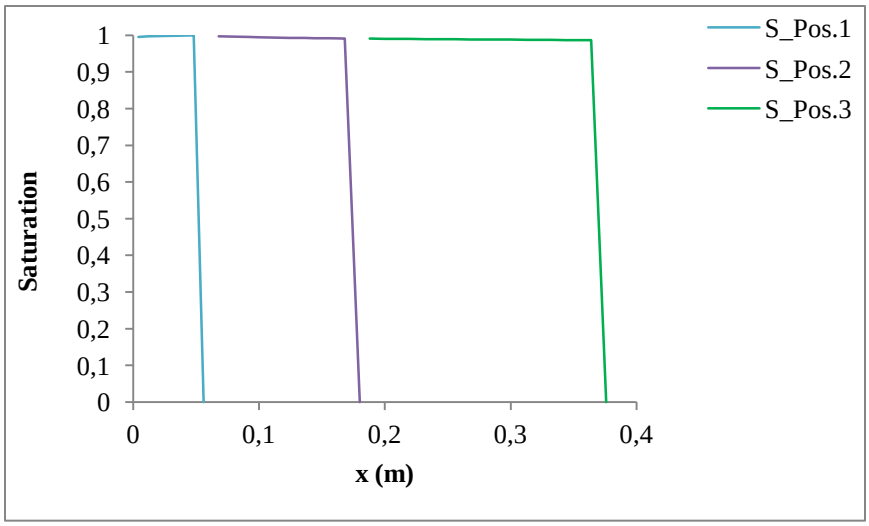


Figure 4-53 : Saturation totale numérique en fonction de la position

Les trois courbes (Fig.4-52.a) à (Fig.4-53) démontrent l'aspect croissant de la valeur du palier de la saturation en fonction de la position.

Ensuite, la saturation adopte un comportement croissant selon [35] et décroissant selon [69], en fonction du temps (Fig.4-54.a) et (Fig.4-54.b). Mais, nos résultats numériques confirment plutôt la tendance décroissante de la saturation en fonction du temps (Fig.4-55). Notamment, à la première position, nous avons une saturation de 0.999, puis à la deuxième position nous baissons à la valeur 0.991 et à la dernière nous atteignons une saturation de 0.986.

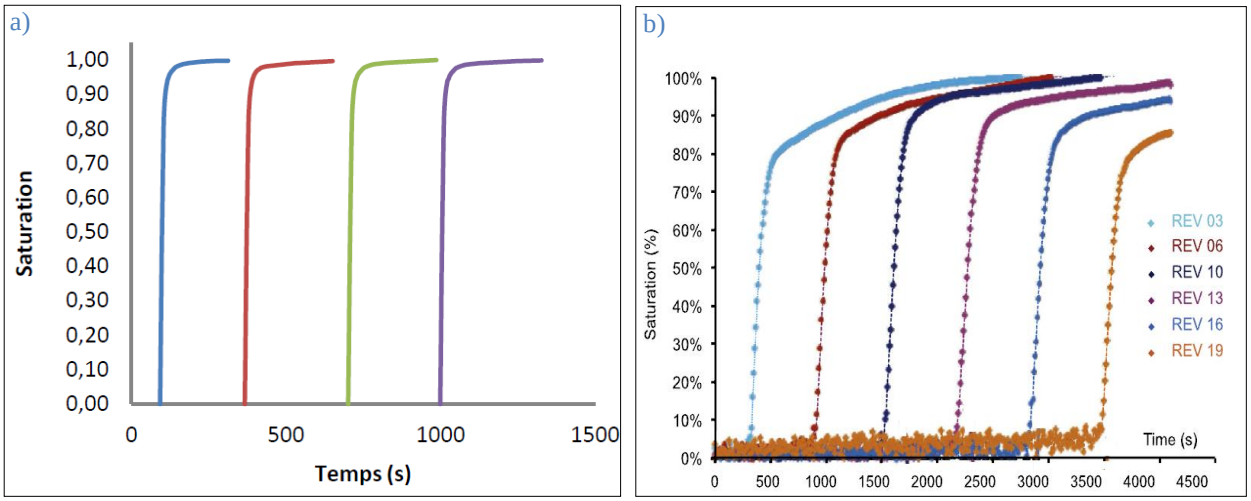


Figure 4-54 : Saturation totale expérimentale en fonction du temps, a) Gueroult [35], b) Gascon [69]

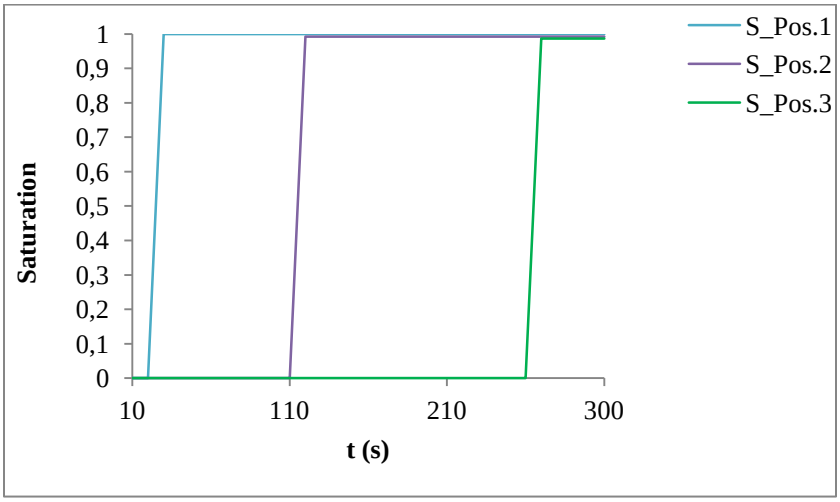


Figure 4-55 : Saturation totale numérique en fonction du temps

D'une manière globale, la comparaison expérimental-numérique présentée ci-dessus est qualitative plus que quantitative. En effet, nous avons travaillé en parallèle avec l'ingénieur d'études afin de valider les résultats de simulation, cependant le rendu des expérimentations n'a pas pu être mené jusqu'au bout. Alors, nous nous sommes contentés de se comparer avec d'autres travaux où les données expérimentales ne sont pas toutes connues. Par conséquent, nous avons réalisé les simulations avec les données fournies dans les travaux publiés tout en maintenant au moins un paramètre en commun.

La confirmation expérimental/numérique ainsi conduite dans cette partie, révèle une première validation qualitative de notre approche. Les tendances des profils numériques des distributions

spatiales de la porosité finale et spatiotemporelles de la saturation totale de la préforme sont assez similaires aux profils des résultats expérimentaux.

4.6. Conclusion

Ce chapitre était consacré à la présentation d'un nouveau protocole de modélisation de la création des bulles d'air, nommé PDM (Pore Doublet Model). Le principe de ce modèle est rappelé et les développements mathématiques permettant sa mise en place sont explicités en détail.

Ce modèle permet, la simulation de la formation des micros et macro-bulles d'air en RTM indépendamment des conditions d'injection utilisées : à pression et à débit imposés.

Egalement l'équation gouvernante a été changée pour mieux traduire les effets produits au sein du VER (Volume Elémentaire Représentatif) par les phénomènes physiques mis en jeu, telles que la viscosité et la capillarité. Par conséquent, le mode d'estimation des pressions et des vitesses a été modifié.

De ce fait, la modélisation du phénomène de compression des bulles d'air a été reformulée. Notamment, la saturation de la mèche et donc la réduction de la taille des micro-bulles d'air.

Par ailleurs, le modèle décrivant le phénomène de transport des bulles d'air a été conservé tel qu'il était présenté dans le chapitre précédent. Néanmoins, les fréquences de migration ont été explicitées davantage. Nous avons introduit la fréquence de coalescence qui quantifie les micro-bulles d'air qui se sont agglomérées et devenues macros. Aussi, nous avons présenté la fréquence de fragmentation des macro-bulles d'air qui se divisent et deviennent micros, soit par effet d'accélération ou de turbulence.

Les résultats de la simulation numérique abordée dans ce chapitre portaient sur l'étude paramétrique du modèle proposé ; sur l'analyse de la distribution spatiotemporelle et à double échelle de pores des quantités de bulles d'air créées, comprimées, transportées et restées ; et aussi sur l'évolution en temps et en espace de la saturation totale de la préforme simulée.

Une validation qualitative de notre approche de modélisation qui repose sur une confrontation numérique/expérimental a été également présentée. Les profils numériques et expérimentaux des

distributions spatiales de la porosité finale et spatiotemporelles de la saturation totale de la préforme comparés sont assez similaires.

Par la suite dans le cinquième chapitre, nous allons exploiter la modélisation développée afin de déterminer les paramètres optimaux d'injection, vis à vis de la problématique des bulles d'air, et également pour identifier la perméabilité relative.

Sommaire du Chapitre 5

5.1. Comparaison des modèles présentés 213

5.2. Effets des paramètres d'injection 217

5.2.1. Injection à pression imposée 217

5.2.2. Injection à débit imposé 220

5.3. Perméabilité relative 222

5.3.1. Introduction 222

5.3.2. Simulation numérique 228

5.3.2.1. Modélisation 228

5.3.2.2. Résultats 228

5.4. Conclusion 231

Chapitre 5 : Comparaison des modèles et applications

Dans ce chapitre, nous considérons une comparaison entre les deux approches de modélisation présentées dans les chapitres 3 et 4. Une confrontation entre divers résultats de simulation avec ces deux modèles sera conduite, discutée et analysée. Notamment, concernant la modélisation des phénomènes de création, compression et transport des bulles d'air.

Par la suite, une étude sur l'effet des paramètres procédé (pression ou débit d'injection et pression à l'évent) et leur optimisation, sur la porosité finale de la préforme considérée, sera menée.

Puis également, nous exposons comment l'approche de modélisation proposée, pourra être exploitée pour l'identification de la perméabilité relative.

Pour rappel : les simulations que nous considérons dans ce chapitre, ont été réalisées avec les mêmes données que celles des chapitres précédents : injection rectiligne à débit ou pression imposée, avec la résine RTM6, sur une préforme unidirectionnelle à géométrie rectangulaire en fibres de carbone AS7. L'ensemble des données d'entrée de la simulation est celui des tableaux (Tab.3-1) et (Tab.3-2). Seules les conditions d'injection vont être modifiées.

5.1. Comparaison des modèles présentés

Nous désignons par *M.1* le modèle proposé dans le chapitre 3 et par *M.2* celui du chapitre 4. L'objectif ici est de comparer et interpréter les résultats fournis par ces deux modèles lors de la description des trois phénomènes : création, compression et transport des bulles d'air.

a. Phénomène de création des bulles d'air

Concernant la simulation de la création des bulles d'air, le modèle *M.1* conduit à un taux de bulles d'air plus important que le modèle *M.2* (Fig.5-1). Cela est dû à l'architecture de la préforme utilisée et à la manière dont nous avons quantifié les taux de création micro et macro.

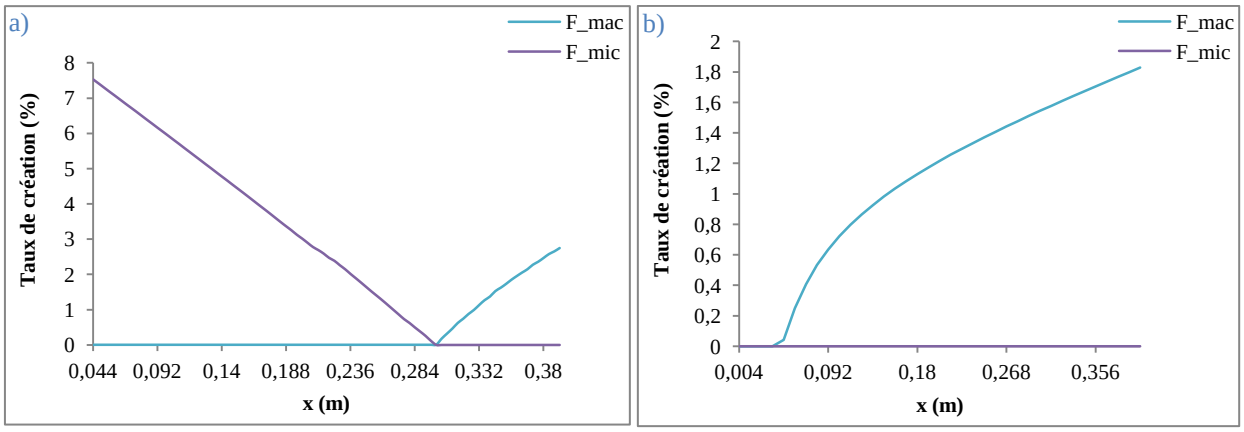


Figure 5-1 : Taux de création des bulles d'air à double échelle de pores en fonction de la position, a) M.1 à perméabilité constante, b) M.2

En effet, les taux de création du modèle *M.2* sont conditionnés par le choix des paramètres α et β (géométrie du PDM), notamment ce dernier est choisi de manière à obtenir un taux de bulles d'air inférieur à 2%. Par contre, avec le modèle *M.1* aucune contrainte n'est imposée à la géométrie de la préforme fibreuse considérée. Par conséquent, nous obtenons plus de bulles d'air avec le modèle *M.1* qu'avec le *M.2*.

Au niveau du point minima, il se situe différemment dans la première et la seconde configuration. Avec le modèle *M.1*, ce point est positionné vers la fin de la préforme ($x = 0.3\ m$), tandis qu'avec le modèle *M.2*, il est placé au début de celle-ci ($x = 0.056\ m$). Ce fait est directement lié au principe de la modélisation du phénomène de création des bulles d'air. En effet, l'écoulement du liquide est plus aisé dans le PDM que dans la première configuration (vitesse du liquide avec *M.2* $u_l^{max} = 0.019\ m/s$ est plus importante qu'avec le *M.1* $u_l^{max} = 1\ 10^{-5}\ m/s$). En conséquence, les bulles d'air se déplacent facilement dans le deuxième cas que dans le premier (vitesse de l'air est croissante en fonction de celle du liquide). Ainsi, le maximum des bulles d'air se positionne vers la fin de la préforme pour *M.2* et plutôt vers le début pour *M.1*. Si nous voulons rapprocher le modèle *M.2* de la configuration du modèle *M.1*, nous pouvons agir sur la valeur du paramètre β. Comme mentionné dans le paragraphe 4.4.1. et sur les figure (Fig.4-12) et (Fig.4-13), nous pouvons déplacer le point minima en changeant la valeur de β, tout en maintenant la contrainte d'avoir un taux de bulles d'air inférieur à 2%.

La formation des deux types de bulles d'air à la même position, n'est constatée que dans le cas d'une simulation à perméabilité variable. C'est la géométrie de la préforme qui est responsable de la coexistence des micros et macro-bulles d'air au même point de celle-ci. Or avec le modèle

M.2, le VER du PDM ne peut pas être approché à une microstructure sinusoïdale ; nous ne pouvons donc pas simuler cette configuration. Par conséquent, la coexistence ne peut être relevée qu'avec le modèle *M.1*.

b. Phénomènes de création et compression des bulles d'air

Concernant le phénomène de compression des bulles d'air, nous constatons qu'il est quasiment équivalent pour les deux modèles *M.1* et *M.2* (Fig.5-2), avec un effet de la saturation de la mèche plus important que la compression des macro-bulles d'air.

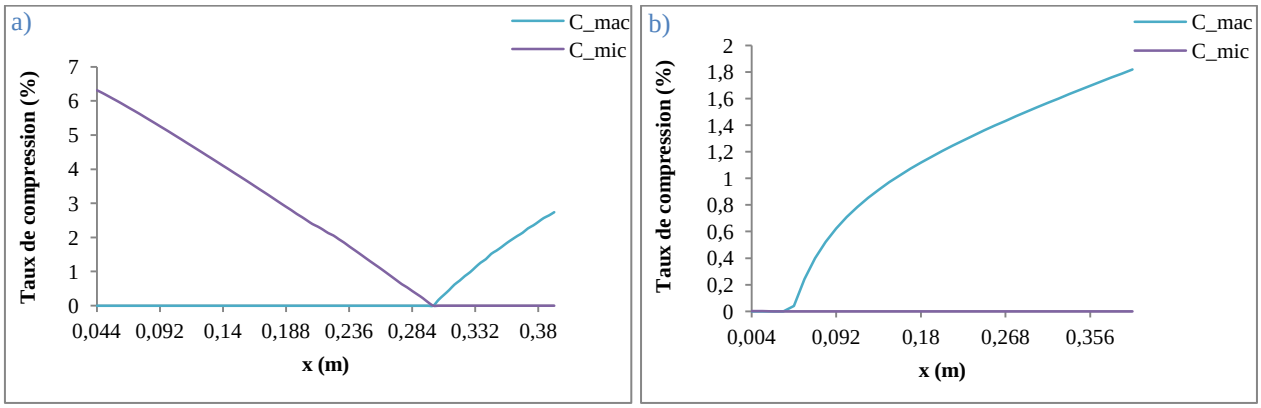


Figure 5-2 : Taux de compression des bulles d'air à double échelle de pores en fonction de la position, a) M.1 à perméabilité constante, b) M.2

En effet, la quantité de micro-bulles d'air créées avec le modèle *M.2* est très faible devant celle obtenue avec le modèle *M.1*. Par conséquent, le taux de compression par saturation de mèches dans la configuration du modèle *M.1* est nettement plus important.

c. Phénomènes de création, compression et transport des bulles d'air

Le phénomène de transport des bulles d'air a été modélisé de la même manière dans les deux modèles *M.1* et *M.2*. La seule différence réside dans la description de la migration des macro-bulles d'air dans les micro-capillaires et vice versa, en termes de fréquences et de conditions de celle-ci.

En revanche, la modélisation du transport dans *M.1* fait expulser moins de bulles d'air que celle dans *M.2* (Fig.5-3).

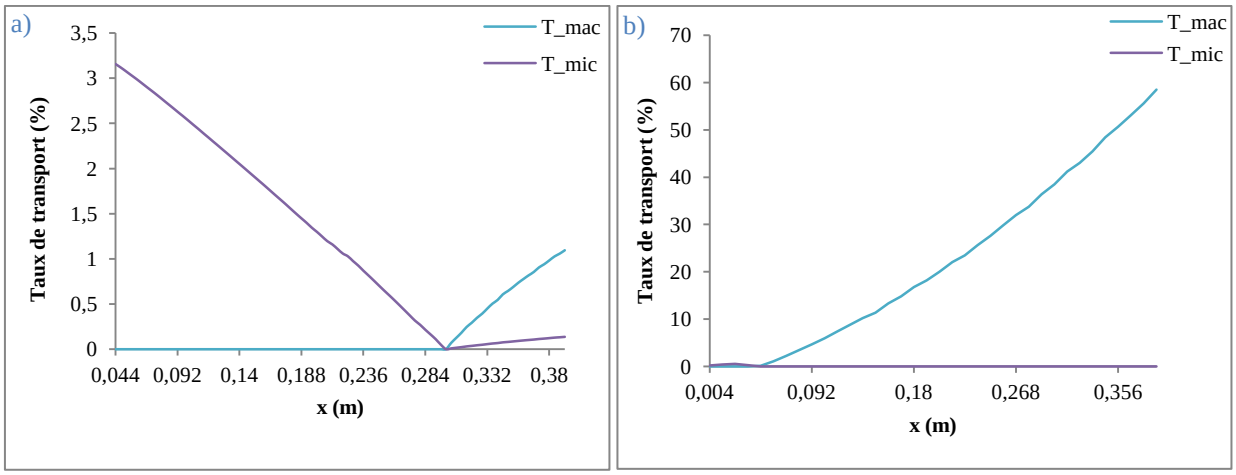


Figure 5-3 : Taux de création des bulles d'air à double échelle de pores en fonction de la position, a) M.1 à perméabilité constante avec $f_{mic} = 0.25$ et $f_{mac} = 0.1$, b) M.2 avec $f_{coal} = 0.4$, $f_{acc} = 0.1$ et $f_{tur} = 0.01$

En effet, ce dernier cas de figure traite la problématique du déplacement des bulles d'air avec plus de précision que le premier. Car les conditions et les fréquences de migration sont mieux définies en *M.2*. Egalement, nous remarquons que les deux modèles permettent de souligner la coexistence des deux types de bulles d'air à la même position.

Par conséquent, la simulation avec *M.2* conduit à un taux moins important de bulles d'air et une bonne imprégnation de la préforme, tandis que la simulation avec le modèle *M.1* conduit à un taux de porosité élevée et une saturation moins importante du milieu fibreux considéré. (Fig.5-4) et (Fig.5-5).

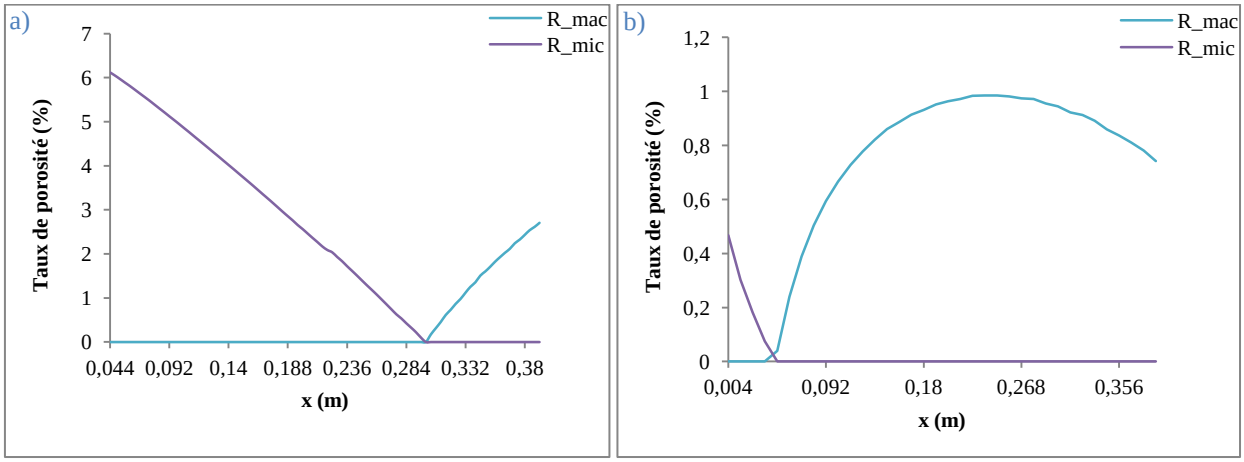


Figure 5-4 : Taux de porosité à double échelle de pores en fonction de la position, a) M.1 à perméabilité constante, b) M.2

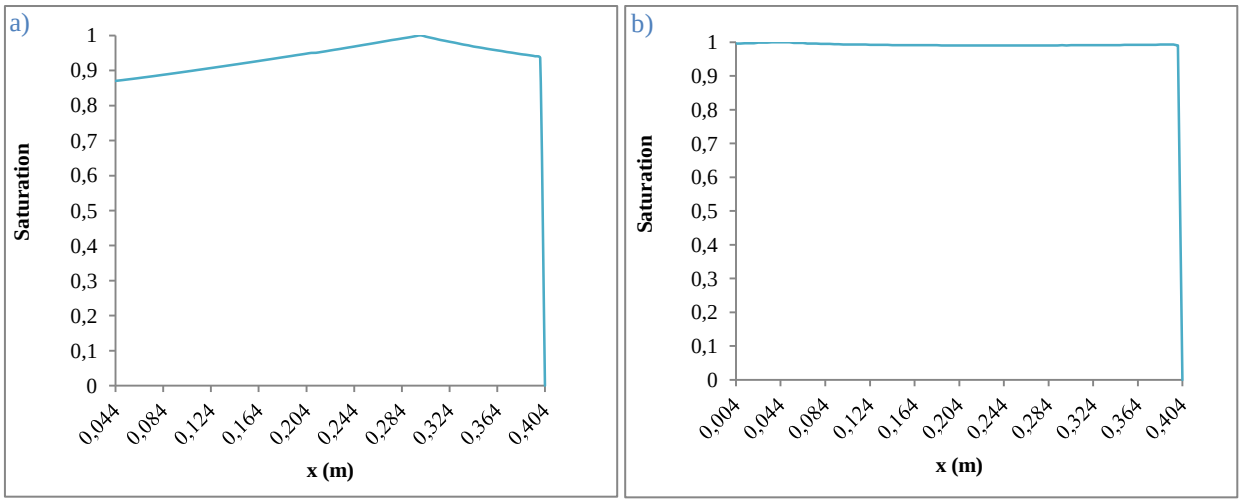


Figure 5-5 : Saturation de la préforme en fonction de la position, a) M.1 à perméabilité constante, b) M.2

En plus, le point le plus important dans cette comparaison est celui de la simulation de la création des bulles d'air à double échelle de pores pour une injection à débit imposé. En effet ; celle-ci est concevable avec le modèle *M.2* mais elle ne l'est pas avec le modèle *M.1*.

En conclusion, le modèle *M.2*, grâce au protocole du PDM, fournit plus d'avantages que le modèle *M.1*. Par conséquent, c'est ce modèle *M.2* que nous allons adopter par la suite, notamment pour notre étude d'optimisation qui va suivre.

5.2. Effets des paramètres d'injection

Dans ce paragraphe nous allons nous intéresser à l'effet de la pression et débit d'injection et de la pression à l'évent sur la porosité finale de la préforme. Le but recherché est d'identifier les valeurs optimales de ces paramètres qui conduisent en fin d'injection à un taux minimal de bulles d'air.

5.2.1. Injection à pression imposée

Sur la figure (Fig.5-6), nous présentons les résultats obtenus lors de quatre simulations où nous maintenons la pression à l'évent à $P_{vent} = 1.1\ bar$, et nous changeons celle d'injection : $1.6\ bar$, $2.1\ bar$, $2.6\ bar$ et $3.1\ bar$.

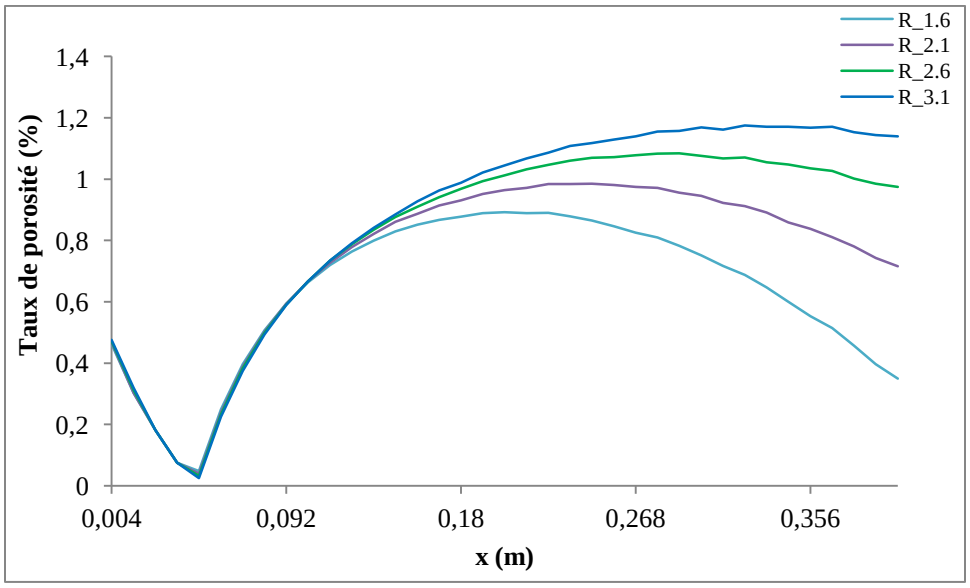


Figure 5-6 : Taux de porosité en fonction de la position à différentes pressions d'injection

Les taux de bulles d'air obtenus sont proportionnels à la pression d'injection, lorsque cette dernière augmente alors la porosité augmente aussi. En effet, tout en augmentant la valeur de la pression d'injection, celle de la vitesse augmente également. Ainsi, nous assurons assez d'accélération de manière à ce qu'un taux considérable de bulles d'air soit piégé.

Nous notons également que l'amplification de la pression d'injection n'affecte pas le taux de création des bulles d'air, au début de la préforme. En effet, quelle que soit la valeur initiale de la pression de la résine, son effet ne commence qu'au moment où la pression capillaire entre en compétition avec celle-ci. Notamment, plus que la valeur de la pression de résine est importante plus qu'elle domine celle capillaire et donc favorise la création de plus de bulles d'air.

La courbe ci-dessous (Fig.5-7) illustre l'effet de la pression à l'évent tout en conservant la même pression d'injection de $1.6\ bar$. Les valeurs de la pression à l'évent considérées sont : $0.6\ bar$, $0.8\ bar$ et $1.1\ bar$.

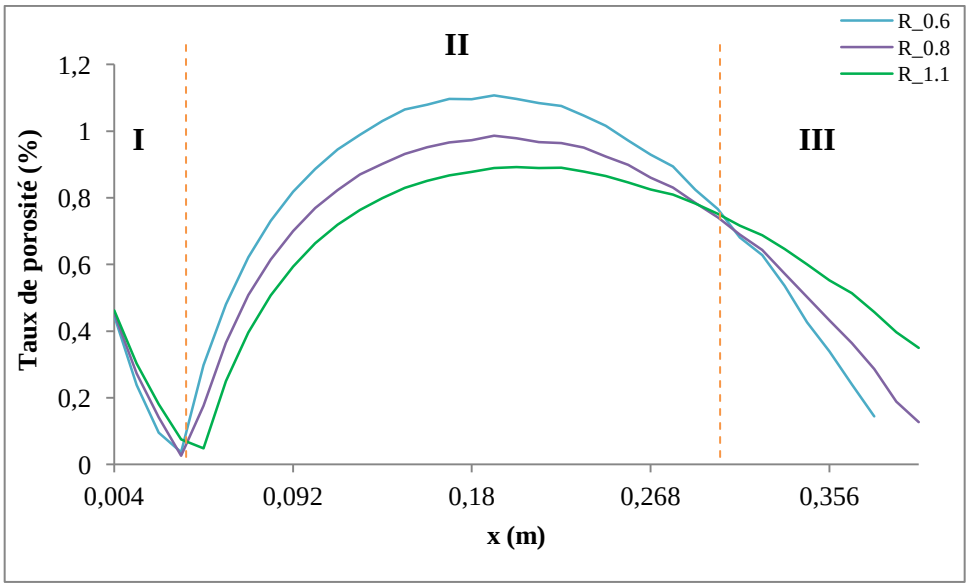


Figure 5-7 : Taux de porosité en fonction de la position à différentes pressions à l'évent

Nous constatons que les profils des courbes obtenues présentent trois modes de comportement. Au tout début de la préforme où la porosité est micro, l'augmentation de la pression à l'évent fait croitre le taux de micro-bulles d'air. Par contre, dans la zone de macro-bulles d'air, le taux de la macro-porosité diminue avec l'élévation de la pression à l'évent. Puis à partir de la position $x = 0.3\ m$, le sens d'évolution de la porosité s'inverse et redevient proportionnel aux valeurs de la pression à l'évent.

Dans la première partie, nous avons un champ de pression de résine proche de la valeur de la pression maximale (c'est à dire la pression d'injection), ce qui fait avancer le liquide avec une vitesse élevée. Notamment, le fait d'augmenter la pression à l'évent, freine l'écoulement de la résine. Par conséquent, plus que la pression à l'évent est importante plus que le taux de formation des micro-bulles d'air est important.

Sur la seconde partie, la porosité devient inversement proportionnelle à la pression à l'évent, nous avons donc un effet capillaire dominant. En effet, la pression de la résine est décroissante le long de la préforme, donc l'augmentation de la pression à l'évent tend à équilibrer l'écoulement. Par conséquent, le taux de création des bulles d'air diminue avec l'augmentation de la pression à l'évent.

Sur la dernière partie, nous retrouvons l'aspect croissant de la porosité en fonction de la pression à l'évent. En effet, c'est la zone d'expulsion des bulles d'air, l'augmentation de la pression à

l'évent tend à empêcher leur sortie de la préforme. D'où l'augmentation du taux de porosité avec l'accroissement de la pression à l'évent.

En moyennant les valeurs de la porosité le long de la préforme, nous trouvons que la pression à l'évent $P_{vent} = 1.1\ bar$ est celle qui donne le minimum de bulles d'air.

Par conséquent et pour la préforme simulée, la pression d'injection de $1.6\ bar$ et la pression à l'évent de $1.1\ bar$, constituent la combinaison optimale vis-à-vis un taux final minimal de bulles d'air.

5.2.2. Injection à débit imposé

Dans cette application (Fig.5-8), la pression à l'évent est maintenue à $1.1\ bar$ et le débit d'injection est considéré égale aux valeurs suivantes : $5.5\ 10^{-8}\ m^3/s$, $7.0\ 10^{-8}\ m^3/s$, $8.5\ 10^{-8}\ m^3/s$ et $9.5\ 10^{-8}\ m^3/s$.

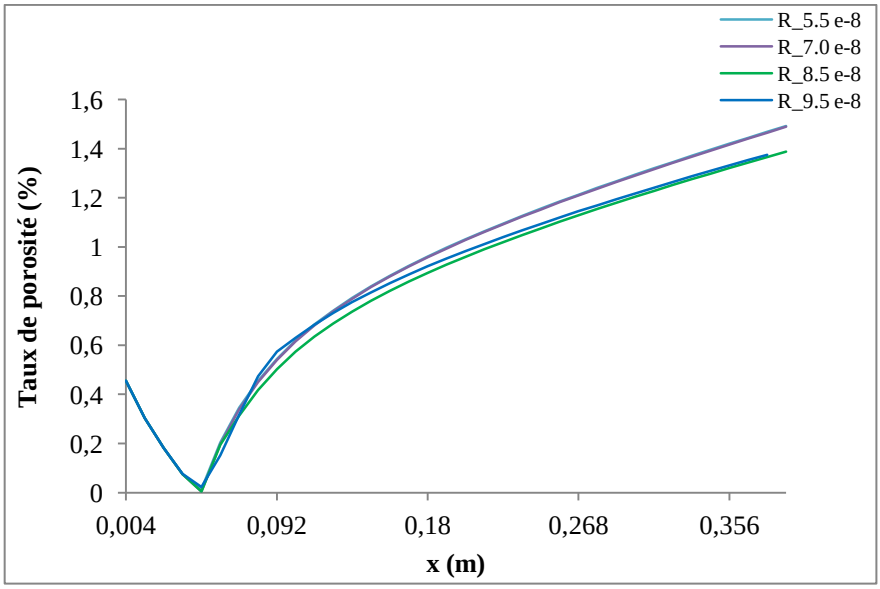


Figure 5-8 : Taux de porosité en fonction de la position à différents débits d'injection

Sur la figure (Fig.5-8), nous remarquons que lorsque le débit d'injection augmente, le taux de bulles d'air obtenu diminue, à l'exception de la dernière valeur : $9.5\ 10^{-8}\ m^3/s$. En effet, une élévation de ce débit implique une augmentation de la vitesse. Puis, comme les bulles d'air ont une vitesse supérieure à celle du liquide (Fig.4-27) et à l'aide de l'équation de transport (Eq.3-

76), alors les quantités de bulles expulsées de la pièce seront importantes. Par conséquent, la porosité obtenue est inversement proportionnelle au débit d'injection employé.

Néanmoins, lorsque ce débit augmente suffisamment $9.5\ 10^{-8}\ m^3/s$, il contribue également au piégeage de plus de bulles d'air.

Les taux de micro-porosité au début de la préforme sont quasiment identiques qu'elle que soit la valeur du débit d'injection.

Ainsi, la valeur $Q_{inj} = 8.5\ 10^{-8}\ m^3/s$ est celle qui produit le moins de bulles d'air dans la préforme.

Sur la figure (Fig.5-9) ci-après, nous représentons l'évolution de la porosité en fonction de la position, où le débit d'injection est pris égal à $8.5\ 10^{-8}\ m^3/s$ et la pression à l'évent varie entre $0.5\ bar$, $0.8\ bar$, $1.1\ bar$ et $1.4\ bar$.

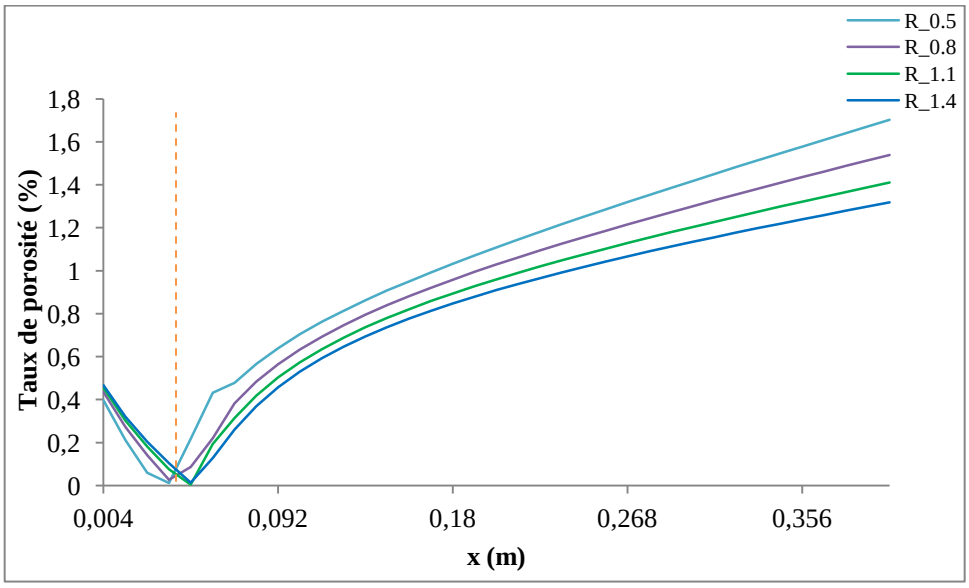


Figure 5-9 : Taux de porosité en fonction de la position à différentes pressions à l'évent

Dans les deux configurations d'injection : à débit imposé et à pression imposée, nous avons une proportionnalité directe puis inverse entre la pression à l'évent et la porosité. Notamment, l'augmentation de la pression à l'évent freine l'avancée du liquide en produisant plus de micro-bulles d'air, puis tend à équilibrer l'écoulement dans la partie de macro-bulles d'air.

Par conséquent, la valeur optimale de la pression à l'évent dans cette configuration est $1.4\ bar$.

Au final nous concluons que l'injection à débit imposé de $8.5\ 10^{-8}\ m^3/s$ avec une pression à l'évent de $1.4\ bar$, est la plus favorable pour produire un taux de porosité final minimal.

5.3. Perméabilité relative

5.3.1. Introduction

Parmi les propriétés fondamentales de la préforme, qu'il faut considérer lors de la simulation de la mise en œuvre des pièces composites, il y a la perméabilité du média fibreux. C'est une grandeur qui chiffre la facilité avec laquelle tout milieu poreux se laisse s'imprégner avec un fluide et dont l'identification est nécessaire avant la simulation de ce type d'écoulement.

Kozeny [53] et Carman [54] ont exprimé la perméabilité d'un milieu fibreux en fonction de ses propriétés intrinsèques (Eq.5-1).

$$K = \frac{\varepsilon^3}{k_{ck}\, S_0^2\, (1-\varepsilon)^2} \qquad (5-1)$$

Plusieurs travaux, notamment dans le domaine de la mécanique des sols, ont révélé que cette perméabilité dépend également de la saturation du milieu poreux considéré, et que sa modélisation, peut être envisagée comme étant le produit de deux paramètres. Un évalue le parcours de l'écoulement (tortuosité) et l'autre correspond au rayon hydraulique du capillaire à travers lequel le liquide passe (Eq.5-2). En effet, c'est le produit de la perméabilité relative et géométrique (Eq.5-3).

$$K = \frac{R_h^2}{k_{ck}\tau}\varepsilon \qquad (5-2)$$

Avec $R_h = \frac{V}{S}\ (m)$ est le rayon hydraulique pour un capillaire cylindrique, introduit par Blake [70], tels que $V\ (m^3)$ est le volume occupé par le flux et $S\ (m^2)$ est la surface mouillée.

$$K = K_{geo} k_{rel} \qquad (5-3)$$

Historiquement, l'une des premières corrélations entre la saturation de la phase mouillée et la courbure interfaciale du fluide mouillant et non mouillant, était présentée par Leverett [71]. En effet, l'auteur a proposé une fonction, nommée Leverett J-function, combinant les propriétés

géométriques des capillaires et celles intrinsèques de la phase mouillante (Eq.5-4). Elle représente une fonction adimensionnelle de la pression capillaire et la saturation [72].

$$J(S_w) = \frac{P_{cap}}{\sigma\ cos\theta}\sqrt{K/\phi} \qquad (5-4)$$

Par ailleurs, Rose et Bruce [73] ont travaillé avec la formulation de Kozeny-Carman afin de caractériser la capillarité dans un réservoir pétrolier. Ils ont constaté que la tortuosité dépend de la saturation et ont suggéré de déterminer cette dernière par le biais des mesures électriques. En revanche, les auteurs n'ont pas présenté une formulation de la perméabilité relative. Cependant, ils ont démontré l'utilité de la fonction Leverett-J pour quantifier cette dernière.

Dans la même année, Purcell [74] a développé un modèle donnant la perméabilité relative en fonction de la pression capillaire et la saturation, pour la phase mouillante $k_{rel,w}$ (Eq.5-5) et non mouillante $k_{rel,nw}$ (Eq.5-6).

$$k_{rel,w} = \frac{\int_0^{S_w} dS_w/P_{cap}^2}{\int_0^1 dS_w/P_{cap}^2} \qquad (5-5)$$

$$k_{rel,nw} = \frac{\int_{S_w}^1 dS_w/P_{cap}^2}{\int_0^1 dS_w/P_{cap}^2} \qquad (5-6)$$

Dans sa formulation, l'auteur s'est reposé sur un réseau de capillaires de différents diamètres, sur lequel il a appliqué la loi de Poiseuille. Toutefois, il n'avait pas intégré la tortuosité dans ses calculs.

Gates et Lietz [75] ont repris ce modèle et lui ont introduit un coefficient de tortuosité empirique.

L'intégration du rayon hydraulique dans l'expression de la perméabilité relative a été établie par Wyllie et Spangler [76] puis Burdine [77].

A partir des mesures relevées de la perméabilité relative, Burdine a observé que la tortuosité peut être approximée par un rapport des saturations des fluides (phases mouillante $k_{rel,w}$ et non mouillante $k_{rel,nw}$).

$$k_{rel,w} = (\lambda_{rel,w})^2 \frac{\int_0^{S_w} dS_w/P_{cap}^2}{\int_0^1 dS_w/P_{cap}^2} \qquad (5-7)$$

Avec $\lambda_{rel,w} = \frac{\tau_w(1.0)}{\tau_w(S_w)} = \frac{S_w - S_m}{1 - S_m}$ $\qquad (5-8)$

Où : S_m est la valeur minimale de la saturation de la phase mouillante déterminée à partir de la courbe de la pression capillaire ; $\tau_w(1.0)$ et $\tau_w(S_w)$ sont les valeurs de la tortuosité de la phase mouillante lorsque la saturation de la phase mouillante est égale à 100% et S_w respectivement.

$$k_{rel,nw} = (\lambda_{rel,nw})^2 \frac{\int_{S_w}^1 dS_w/P_{cap}^2}{\int_0^1 dS_w/P_{cap}^2} \qquad (5-9)$$

Dont $\lambda_{rel,nw} = \frac{\tau_{nw}(1.0)}{\tau_{nw}(S_w)} = \frac{1 - S_w - S_e}{1 - S_m - S_e}$ $\qquad (5-10)$

Avec S_e est la valeur de la saturation d'équilibre de la phase non mouillante.

Ainsi, selon les modèles de Purcell et Burdine, une expression analytique de la perméabilité relative peut être donnée, pour la phase mouillante et non mouillante. Cette formulation n'est possible que si la pression capillaire est représentée par une simple fonction mathématique [78].

Corey [79] a développé une approximation de la pression capillaire par la saturation, dans le cas de l'huile et le gaz (Eq.5-11).

$$\frac{1}{P_{cap}^2} = \begin{cases} \bar{C}(S_w - S_{wr}) \; si \; S_w > S_{wr} \\ 0 \; si \; S_w < S_{wr} \end{cases} \qquad (5-11)$$

Avec $\bar{C}$ est une constante et S_{wr} est la saturation résiduelle de la phase mouillante.

Dans le cas où la saturation est fonction du volume effectif de pores (le volume des pores moins le volume résiduel du liquide), l'auteur a posé :

$$\frac{1}{P_{cap}^2} = CS_{we} \qquad (5-12)$$

Où : $C = \bar{C}(1 - S_{we})$ et S_{we} est la saturation effective de la phase mouillante définie par :

$$S_{we} = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr}} \qquad (5-13)$$

Ainsi, en combinant les équations (Eq.5-5, Eq.5-6, Eq.5-7, Eq.5-9 et Eq.5-12), l'auteur a obtenu :

$$k_{rel,w} = S_{we}^4 \qquad (5-14)$$

En plus, si S_m est supposée égale à l'unité, alors :

$$k_{rel,nw} = (1 - S_{we})^2 (1 - S_{we}^2) \qquad (5-15)$$

Cependant, l'application de ce modèle est limitée pour le cas d'une configuration spécifique.

Par conséquent, Brooks et Corey [80] ont élargi le domaine de validité de cette modélisation en développant une nouvelle approximation plus générale de la pression capillaire (Eq.5-16).

$$P_{cap} = P_{cap,e} (S_{we})^{-1/\Lambda} \qquad (5-16)$$

Avec $P_{cap,e}$ est la pression capillaire d'entrée et Λ est l'indice de distribution de la taille des pores.

Au final, les perméabilités relatives sont sous la forme :

$$k_{rel,w} = S_{we}^{\frac{2+3\Lambda}{\Lambda}} \qquad (5-17)$$

$$k_{rel,nw} = (1 - S_{we})^2 \left(1 - S_{we}^{\frac{2+\Lambda}{\Lambda}}\right) \qquad (5-18)$$

Pour $\Lambda = 2$, Ces équation (Eq.5-17) et (Eq.5-18) deviennent équivalentes à celles de Corey (Eq.5-14) et (Eq.5-15).

Ce modèle donne des prédictions proches des valeurs obtenues expérimentalement.

Toute la chronologie présentée ci-dessus est relative à l'industrie pétrolière. Ce sont ces travaux qui ont constitué la base de la modélisation de la perméabilité relative.

En revenant au domaine de notre étude qui est la mise en œuvre des pièces composites par les procédés LCM, nous citons le travail de Breard et al [81] et celui de Gascon et al [82].

Les deux parties ont suivi le même cheminement pour exprimer la perméabilité relative. Ces auteurs ont combiné l'équation de conservation de la masse et celle de Darcy, afin d'expliciter cette grandeur. En revanche, les premiers auteurs ont proposé un modèle exprimant la perméabilité relative de l'ensemble des fluides présents (gaz plus liquide) ; tandis que les seconds ont différencié entre les phases et ont présenté la perméabilité relative du gaz et du liquide séparément.

En effet, le développement de Breard et al repose sur les équations (Eq.5-19) et (Eq.5-20) :

$$q_i + \alpha_t \partial_{,t} q_i = -\frac{K_{ij}(S)}{\mu} \nabla P \qquad (5-19)$$

$$\nabla . q_i = -\frac{1}{1-\phi S} \frac{D_S(\phi S)}{Dt} \qquad (5-20)$$

Telle que la première expression représente l'équation de Darcy et la seconde correspond à l'équation de continuité, tout en incluant l'effet de la saturation.

Dont l'indice i correspond à la phase modélisée ; q est la vitesse de la résine (m/s) et $K_{ij}(S)$ est le tenseur de la perméabilité qui dépend de la saturation (m^2).

La combinaison de ces deux équations conduit à la corrélation entre la pression de la résine, la saturation et la perméabilité relative (Eq.5-21).

$$\nabla . (k_{rel}(S) \nabla P) = \frac{\phi \mu}{K_{geo}} \partial_{,t} S \qquad (5-21)$$

Expérimentalement, il a été prouvé que la perméabilité relative dépend de celle géométrique en termes de K_{sat} et K_{unsat}. Avec la notation $R_S = \frac{K_{unsat}}{K_{sat}}$, les auteurs ont exprimé la perméabilité relative (Eq.5-22).

$$k_{rel}(S) = \left((1 - R_S^*)S + R_S^*\right)^{\beta} \qquad (5-22)$$

Avec β est un facteur de lissage de la loi de puissance et $R_S^* = R_S^{1/\beta}$.

Par ailleurs, le travail de Gascon et al met en avant les équations suivantes :

$$q_i = -\frac{K_{ij}(S)}{\mu}\nabla P \qquad (5-23)$$

$$\nabla . q_{résine} = -\phi\frac{\partial S}{\partial t} \qquad (5-24)$$

$$\nabla . q_{air} = -\phi\frac{\partial(1-S)}{\partial t} \qquad (5-25)$$

La première formulation est la loi de Darcy telle que la perméabilité globale est fonction de la saturation ($K_{ij}(S) = K_{geo}k_{rel}(S)$). En revanche, la deuxième et la troisième représentent l'équation de conservation de la masse pour la résine (phase mouillante) et l'air (phase non mouillante), respectivement.

En additions à cela, les auteurs ont défini la relation entre la pression capillaire et celles de l'air et de la résine (Eq.5-26) :

$$P_{cap}(S) = P_{air} - P_{résine} \qquad (5-26)$$

Après un développement mathématique, les auteurs ont déduit les expressions empiriques de la perméabilité relative pour chaque phase :

$$k_{rel,résine}(S) = k_1 S^m \qquad (5-27)$$

$$k_{rel,air}(S) = k_2(1-S)^m \qquad (5-28)$$

Tels que m est un paramètre de lissage qui dépend de la taille des pores ($m = 1$ pour les courbes linéaires et $m = 2$ pour celles quadratiques), k_1 et k_2 sont les valeurs extrêmes de la perméabilité relative lorsque l'autre phase atteint sa valeur résiduelle ($S = 1$ pour la résine et $1 - S = 1$ pour l'air).

Les valeurs de k_1 et k_2 sont déduites expérimentalement, par ajustement des courbes numériques et expérimentales.

5.3.2. Simulation numérique

5.3.2.1. Modélisation

Dans cette application dédiée à l'estimation de la perméabilité relative, nous avons adopté le modèle empirique de Breard et al [81] (Eq.5-22). Son utilisation nécessite l'identification des deux paramètres β et R_S.

Le premier joue le même rôle que le paramètre m dans le travail de Gascon et al [82]. C'est un coefficient qui décide de l'allure de la courbe de perméabilité relative, soit linéaire ou quadratique.

Le second correspond au rapport des perméabilités saturée et insaturée évalué par Spaid et Phelan [83]. Ces auteurs ont réalisé des expériences sur un réseau de capillaires dans le but de modéliser la formation des vides. Notamment, le cheminement de la méthode de Boltzmann adoptée a nécessité la détermination de la perméabilité et donc évaluer le rapport R_S. Pour un taux volumique de fibres de 50%, ils ont trouvé que $R_S = 0.49$. Egalement, Henzel et al [84] ont proposé une valeur de R_S égale à 0.4 dans le cas d'un renfort unidirectionnel et à 0.8 pour un mat de fibres aléatoires.

Par conséquent, pour notre simulation, nous avons pris $R_S = 0.4$ et $\beta = 1$.

5.3.2.2. Résultats

Pour la simulation numérique, nous avons utilisé les résultats de la saturation obtenus en fin d'injection dans les deux cas réalisés (injection à pression et à débit imposés) (Fig.5-10), avec les conditions optimales d'injection, traitées dans le deuxième paragraphe de ce chapitre ; à savoir : $P_{inj} = 1.6\ bar$ et $P_{vent} = 1.1\ bar$, puis $Q_{inj} = 0.85\ 10^{-7}\ m^3/s$ et $P_{vent} = 1.4\ bar$.

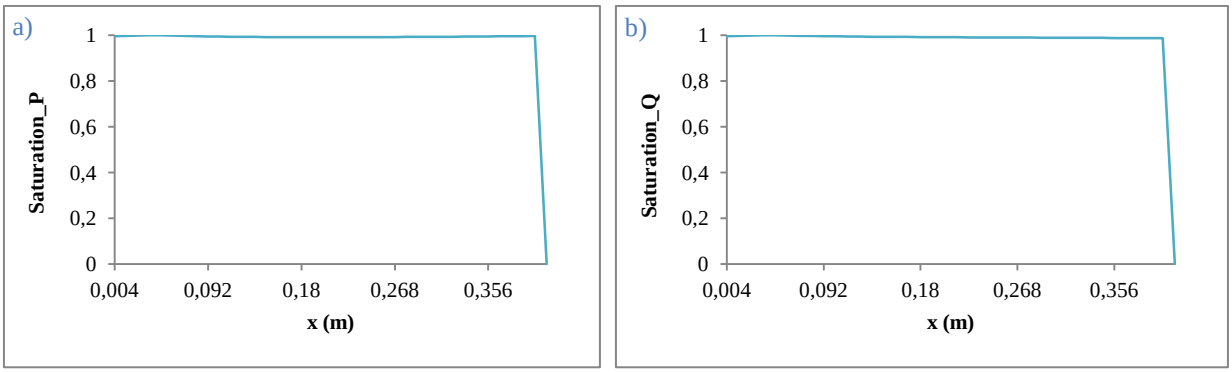


Figure 5-10 : Saturation de la préforme en fonction de la position, a) A pression imposée, b) A débit imposé

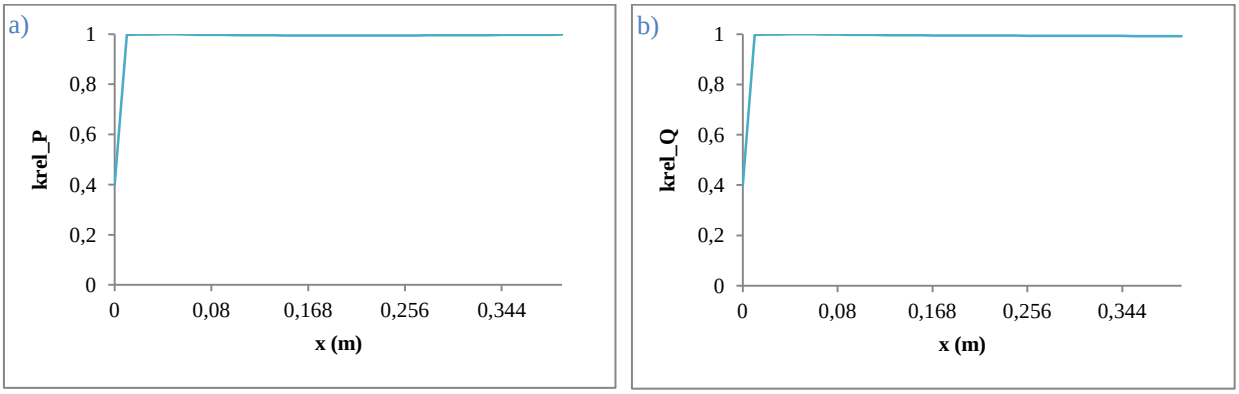


Figure 5-11 : Perméabilité relative numérique en fonction de la position, a) A pression imposée, b) A débit imposé

Les courbes sur la figure (Fig.5-11) ci-dessus représentent l'évolution de la perméabilité relative en fonction de la position, tout au long de la préforme et à l'instant final, à pression et à débit imposés. Nous remarquons que dans les deux cas de figure, il s'agit de la même courbe, la perméabilité relative a un profil croissant, qui commence par une valeur initiale de 0.4 au tout début de l'injection (où la saturation est nulle), puis il continue avec des valeurs proches de l'unité (où la saturation est quasiment égale à 1).

Cette tendance a été observée également dans le travail expérimental de Gueroult [35], où l'auteur s'est intéressé à la représentation de la perméabilité relative en fonction de la saturation d'une préforme UD en fibres de verre imprégnée par de l'eau/glycérol. En effet, Gueroult a présenté, en fin d'injection, l'évolution de la perméabilité relative en fonction de la saturation qui est, à son tour, fonction de la position $\left(k_{rel}\left(S\left(x, t_{final}\right)\right)\right)$ (Fig.5-12).

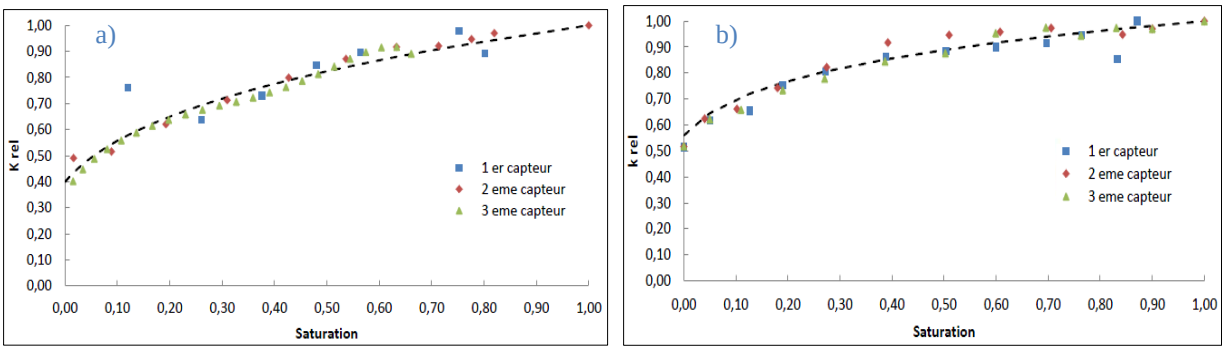


Figure 5-12 : Perméabilité relative expérimentale le long de la préforme, a) A Pression constante, b) A Débit constant [35]

Les figures ci-dessous (Fig.5-13) décrivent l'évolution temporelle de la perméabilité relative sur les trois positions Pos.1($x = 0.04\,m$, $y = 0.15\,m$), Pos.2($x = 0.16\,m$, $y = 0.15\,m$) et Pos.3($x = 0.36\,m$, $y = 0.15\,m$), précédemment définies, lors de l'injection à pression et à débit imposés.

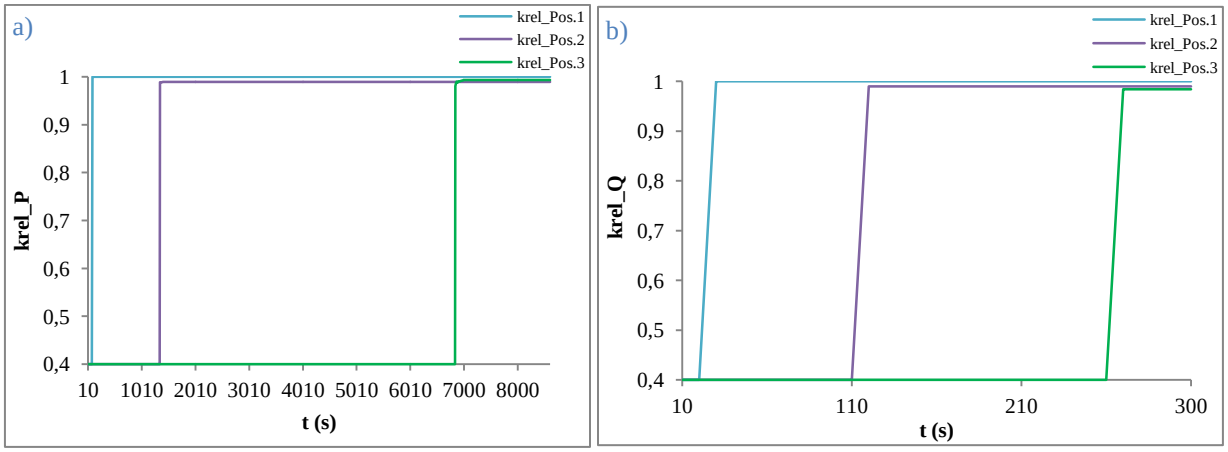


Figure 5-13 : Perméabilité relative numérique en fonction du temps, a) A pression imposée, b) A débit imposé

Nous remarquons que la perméabilité relative décroit au cours du temps durant une injection à débit imposé, et décroit puis croit lors d'une injection à pression imposée. Notamment, cette conclusion est reliée à la valeur de la saturation de la préforme, en l'occurrence la porosité, dans chaque cas de figure. En effet, sur la figure (Fig.5-13) nous constatons qu'à débit imposé et en fonction de la position, la porosité croit ; par contre à pression imposée, elle croit puis décroit vers l'extrémité finale de la préforme. Ce raisonnement est transposable à l'échelle temporelle, d'où l'aspect décroissant de la perméabilité relative à débit imposé, et décroissant puis croissant à pression imposée.

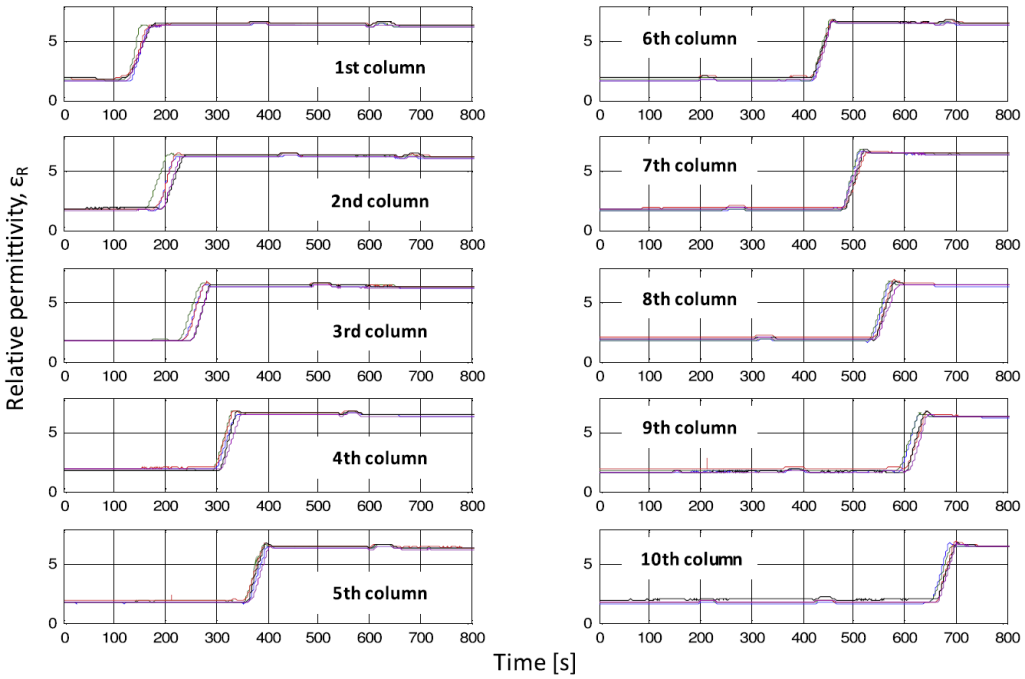


Figure 5-14 : Perméabilité relative expérimentale en fonction du temps [85]

Sur cette dernière figure (Fig.5-14) nous donnons les profils de la perméabilité relative en fonction du temps lors d'une injection à débit imposé, réalisés par Yenilmez et Sozer [85]. Leurs résultats sont issus des mesures de la saturation de la préforme fibreuse, par le biais de capteurs diélectriques. Dans ce travail, un comportement décroissant de la perméabilité relative est relevé, en fonction du temps. C'est la conclusion observée, également, dans notre simulation numérique au cours d'une injection à débit imposé (Fig.5-13.b).

5.4. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons mené une comparaison entre les deux approches de modélisation présentées dans les chapitres 3 et 4. Une confrontation entre les divers résultats de simulation avec ces deux modèles, concernant la modélisation des phénomènes de création, compression et transport, a été conduite, discutée et analysée. Il en ressort que l'approche qui fait appel au Pore Doublet Model est mieux adaptée à l'étude de cette problématique de bulles d'air, car elle bénéficie de plus d'avantages.

Ensuite, cette approche a été exploitée dans l'étude et l'analyse de l'effet des paramètres d'injection sur la porosité finale de la préforme produite. Ce qui a permis d'identifier les valeurs

optimales des paramètres procédé : pression d'injection, débit d'injection et pression à l'évent correspondante, dans les configurations traitées (injection à pression/débit imposés).

Et en dernier lieu, nous nous sommes intéressés à l'estimation de la perméabilité relative de la préforme fibreuse considérée. Une revue bibliographique a été brièvement présentée, afin de situer notre cas d'étude. Dans ce cadre, les résultats de la saturation issus de l'approche de modélisation proposée, ont été exploités pour identifier cette grandeur.

Conclusion générale et perspectives

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la maîtrise et le contrôle des procédés de mise en œuvre LCM. Il vise l'optimisation de la santé matière des pièces composites élaborées par RTM et se focalise sur l'étude des défauts de type bulles d'air.

Plus précisément, la problématique traitée dans ce travail concerne la modélisation et la simulation des phénomènes de création, compression et transport des bulles d'air à double échelle de pores, dans un milieu fibreux unidirectionnel, lors de la mise en œuvre par le procédé RTM.

Nous avons décomposé notre travail en cinq parties. Une première dédiée à un ensemble de généralités sur les matériaux composites, à une introduction aux procédés de mise en œuvre des matériaux composites, notamment la famille des procédés LCM dont le RTM fait partie et un rappel sur les défauts les plus répandus dans les pièces composites en se focalisant sur les bulles d'air.

La deuxième partie concerne l'étude bibliographique relative à notre sujet. Nous l'avons commencée par un état de l'art sur la problématique des bulles d'air, de par son identification, formulation et modélisation expérimentale puis numérique. Les travaux de recherche sur cette thématique ont passé de la modélisation du piégeage des bulles d'air à la notion de phénomènes par lesquels ces dernières passent, au cours de l'injection ; à savoir la création, la compression et le transport. Nous avons, également, alimenté cet état de l'art par la contribution de l'équipe composite de notre laboratoire LOMC. Un récapitulatif chronologique a été présenté, aussi bien sur le plan expérimental que numérique. A partir de ce développement, nous avons établi une comparaison entre les travaux cités et par rapport au nôtre, en termes de limitations et apports.

C'est à partir de la troisième partie que nous avons commencé le vif de notre sujet d'étude. Nous avons présenté les principes de modélisation des phénomènes de création, de compression et de transport des bulles d'air. En effet, la modélisation de la création des bulles d'air repose sur le principe de comparaison des temps de remplissage des capillaires micros et macros. Celle de la compression est basée sur la loi des gaz parfaits. Quant au transport, nous l'avons modélisé en

résolvant son équation et en introduisant le phénomène de migration des macro-bulles d'air vers les micro-capillaires et inversement. Ensuite, nous nous sommes intéressés à l'effet de la variation spatiale de la perméabilité géométrique sur les trois dits phénomènes. Les courbes de création obtenues démontrent de la coexistence des micros et macro-bulles d'air à la même position et au même instant, dans le cas d'une perméabilité variable. Cette coexistence est aussi révélée à travers les fréquences de migration des bulles d'air dans le phénomène de transport. Celui-ci a été abordé selon différentes fréquences de migration micros et macros. Au terme de ce chapitre, nous avons réussi à modéliser le cycle de vie des bulles d'air et en déduire la porosité et la qualité d'imprégnation de la préforme simulée, à double échelle de pores.

En revanche, le travail de ce chapitre a été mené uniquement lors d'une injection à pression imposée. En effet, le modèle considéré ne permet pas de capter les deux types de bulles d'air dans le cas d'une injection à débit imposé. C'est dans ce cadre que nous avons adopté un nouveau modèle nommé le Pore Doublet Model (PDM) et que nous avons étudié dans la quatrième partie. C'est un modèle qui permet l'estimation des micros et macro-bulles d'air créées, lors d'injection à pression imposée comme à débit imposé. Nous sommes restés sur le même objectif de modéliser les phénomènes de création, de compression et de transport des bulles d'air, à double échelle de pores. Dans un premier temps, nous avons rappelé le principe du PDM. Ensuite, nous avons présenté le développement analytique des paramètres essentiels à la quantification du taux de création des bulles d'air. Nous avons adapté, également, l'expression donnant les taux de compression, à cette nouvelle configuration. Quant au transport, de la même façon, nous avons résolu son équation et intégré la migration des bulles d'air. Cette dernière a été abordée avec plus de précision que précédemment, en introduisant les fréquences de coalescence, de fragmentation par accélération et par turbulence, en plus des conditions de migration qui testent si la migration aura lieu ou pas. Au cours de ce chapitre également, nous avons réalisé une étude paramétrique afin de déterminer les dimensions du VER, par rapport auquel nos simulations ont été effectuées. A la fin de cette partie, nous nous sommes intéressés à la validation de ce nouveau modèle. Notamment, une comparaison entre nos résultats de simulation et ceux expérimentaux de la littérature, a été conduite.

Ce travail a été clôturé par une cinquième partie qui porte sur la comparaison des modèles proposés et les applications que nous pouvons en tirer. Dans le cas d'une injection à pression

imposée, nous avons comparé les résultats des courbes de création, de compression, de transport, de porosité et de saturation obtenues avec le modèle du chapitre 3 et celui du chapitre 4. Nous en avons conclu que le PDM présente plus d'avantages que le premier modèle et il sera, par conséquent, le modèle que nous allons adopter pour la suite. Cette suite est scindée en deux composantes : une première qui cible l'identification des valeurs de la pression d'injection, du débit d'injection et la pression à l'évent correspondante, qui donnent un taux minimal de porosité. Puis une seconde qui s'intéresse à la modélisation de la perméabilité relative de la préforme fibreuse simulée. Par la suite, nous avons confronté les profils obtenus de cette grandeur avec ceux trouvés expérimentalement.

En somme, dans la totalité de ce travail, nous avons quantifié les taux de bulles d'air macros et micros créées, comprimées et transportées, tout au long de la préforme simulée et au cours du temps d'injection. Ainsi, nous avons identifié l'évolution spatiotemporelle de la porosité finale et de la saturation de la préforme considérée, lors d'une injection à pression et à débit imposés.

En termes de perspectives ; sur le volet expérimental, nous proposons de réaliser des expériences permettant la comparaison avec nos résultats numériques, afin de procéder à une validation numérique/expérimental plus complète. Cette validation, peut être au niveau de tous les phénomènes et surtout au niveau de la porosité et de la saturation, à différentes conditions d'injection. Egalement, il est intéressant d'aller plus loin dans les expériences modélisant le phénomène de transport, dans le sens de déterminer les fréquences de migration à double échelle de pores. Sur le volet numérique et maintenant que nous avons quantifié la perméabilité relative en temps et en espace, il est envisageable de s'orienter vers l'intégration de ce paramètre dans le modèle mathématique régissant le code de calcul. Par conséquent, nous serons en mesure de conduire nos simulations de manière plus complète et s'assurer de la bonne santé matière des pièces simulées d'une façon encore plus proche de la réalité physique.

Bibliographie

[1] «Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales,» [En ligne]. Available: www.cnrtl.fr.

[2] J. M. Berthelot, Composite Materials: Mechanical Behavior and Structural Analysis, Springer, 1999.

[3] A. Negrier et J. C. Rigal, Présentation des matériaux composites, Techniques de l'ingénieur, traité Généralités, AM 7790.

[4] A. Le Duigou et C. Baley, «Coupled micromechanical analysis and life cycle assessment as an integrated tool for natural fibre composites development,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 83, pp. 61-69, 2014.

[5] «Compositec,» [En ligne]. Available: http://www.compositec.com/.

[6] P. Hubert et A. Poursartip, «A review of flow and compaction modelling relevant to thermoset matrix laminate processing,» *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 17, pp. 286-318, 1998.

[7] L. Mouret, «Analyse des déformations résiduelles dans des pièces composites fortement courbées fabriquées par RTM,» Université de Montréal, Montréal, 2012.

[8] S. Csaba, H. Hiroyuki et K. Kiyohito, «Blister appearance in thermoplastic composites,» *Advanced Composite Materials*, vol. 10, n° %11, pp. 63-75, 2001.

[9] F. Horel, «Modélisation analytique de l'amortissement des poutres composites sandwich contenant des couches viscoélastiques,» Université de Montréal, Montréal, 2013.

[10] f. Marcio Ferraz da Costa, «Translaminar fracture of thin-ply composite laminates,» Université de Porto, Porto, 2014.

[11] D. H. Lee, W. I. Lee et M. K. Kang, «Analysis and minimization of void formation during resin transfer molding process,» *Composites Science and Technology,* vol. 66, pp. 3281-3289, 2006.

[12] K. J. Bowles et S. Frimpong, «Void effects on the interlaminar shear strength of unidirectional graphite-fiber-reinforced composites,» *Journal of Composite Materials,* vol. 26, n° %110, 1992.

[13] C. H. Park, A. Lebel, A. Saouab, J. Breard et W. I. Lee, «Modeling and simulation of voids and saturation in liquid composite molding processes,» *ScienceDirect, Composites : Part A,* vol. 42, pp. 658-668, 2011.

[14] S. G. Damani et L. J. Lee, «The resin-fiber interface in polyurethane and polyurethane-Unsaturated polyester hybrid,» *Polymer Composites,* vol. 11, n° %13, June 1990.

[15] R. S. Parnas et F. R. Phelan, «The Effect of Heterogeneous Porous Media on Mold Filling in Resin Transfer Molding,» *Sample Q,* vol. 22, pp. 53-60, 1991.

[16] R. C. Peterson et R. E. Robertson, chez *7th ASM/ESD Adv Composites Conf, 203,* 1991.

[17] R. C. Peterson et R. E. Robertson, chez *8th ASM/ESD Adv. Composites Conf, 63,* 1992.

[18] A. D. Mahale, R. K. Prud'Homme et L. Rebenfeld, «Quantitative measurement of voids formed during liquid impregnation of nonwoven multifilament glass networks using an optical visualization technique,» *Polym Eng Sci,* vol. 32, p. 319, 1992.

[19] N. Patel, V. Rohatgi et J. L. Lee, «Micro scale flow behavior and void formation mechanism during impregnation through a unidirectional stitched fiberglass mat,» *Polymer Composites,* vol. 35, pp. 837-851, 1995.

[20] Y. T. Chen, H. T. Davis et C. W. Macosko, «Wetting of fiber mats for composite manufacturing. I : Visualization experiments,» *AIChE Journal,* vol. 41, pp. 2261-2273, 1995.

[21] A. W. Chan et R. J. Morgan, *SPE ANTEC Tech Papers,* vol. 39, p. 844, 1993.

[22] N. Patel et L. J. Lee, «Model development and implementation,» *Polymer Composites,* vol. 17, n° %11, February 1996.

[23] M. K. Kang, *A numerical and experimental study on the mold filling and void formation during resin transfer molding,* Seoul National University, 1997.

[24] M. K. Kang, W. I. Lee et H. T. Hahn, «Formation of microvoids during resin-transfer molding process,» *Composites Science and Technology,* vol. 60, pp. 2427-2434, 2000.

[25] S. W. Eun et W. I. Lee, *Experimental study of the microvoids formation and transport in the vacuum assisted resin transfer molding process,* Seoul National University, 2002.

[26] E. Ruiz, V. Achim, S. Soukane, F. Trochu et J. Bréard, «Optimization of injection flow rate to minimize micro/macro-voids formation in resin transfer molded composites,» *Composites Science and Technology ,* vol. 66, pp. 475-486, 2006.

[27] B. Gourichon, C. Binetruy et P. Krawczak, «A new numerical procedure to predict dynamic void content in liquid composite molding,» *Composites Part A,* vol. 37, pp. 1961-1969, 2006.

[28] B. Gourichon, M. Deleglise, C. Binetruy et P. Krawczak, «Dynamic void content prediction during radial injection in liquid composite molding,» *Composites Part A,* vol. 39, pp. 46-55, 2008.

[29] L. Labat, M. Grisel, J. Breard et J. Bouquet, «Original use of electrical conductivity for void detection due to injection conditions of composite materials,» *C.R.Acad.Sci.Paris, t.329,* vol. Série II, pp. 529-534, 2001.

[30] L. Labat, *Etude des défauts de type vides pour la maîtrise du procédé RTM,* Le Havre: Université du Havre, 2001.

[31] M. A. Ben Abdelwahed, Y. Wielhorski, L. Bizet et J. Breard, «Characterisation of bubbles

formed in a cylindrical T-shaped junction device,» *Chemical Engineering Science,* vol. 76, pp. 206-215, 2012.

[32] M. A. Ben Abdelwahed, *Mécanismes d'imprégnation en milieux fibreux : Modélisation et application à la mise en oeuvre des matériaux composites à fibres longues,* Le Havre: Université du Havre, 2011.

[33] A. Lebel, *Modélisation et simulation de la saturation en milieux fibreux à double échelle de pores pour la mise en œuvre des matériaux composites par le procédé RTM,* Le Havre: Université du Havre, 2012.

[34] S. Gueroult, A. Lebel, C. H. Park, L. Bizet, A. Saouab et J. Breard, «Analytical modeling and in situ measurement of void formation in liquid composite molding processes,» *Advanced Composite Materials,* 2014.

[35] S. Gueroult, *Analyse expérimentale de la saturation des milieux fibreux à double échelle de pores : Application à la mise en œuvre des matériaux composites par le procédé RTM,* Le Havre: Université du Havre, 2012.

[36] S. Arnaud, *Contribution à la compréhension de la formation de défauts d'élaboration par RTM d'un composite stratifié Carbone/Epoxy – Influences sur le comportement hygrothermique et abattement des propriétés thermomécaniques,* Caen: Université de Caen Basse Normandie, 2013.

[37] T. S. Lundström, B. R. Gebart et C. Y. Lundemo, «Void formation in RTM,» *Journal of reinforced plastics and composites,* vol. 12, December 1993.

[38] B. B. Sauer et W. G. Kampert, «Influence of viscosity on forced and spontaneous spreading:Wilhelmy fiber studies including practical methods for rapid viscosity measurement,» *Journal of Colloid and Interface Science,* vol. 199, pp. 28-37, 1998.

[39] I. Panfilova, *Ecoulements diphasiques en milieux poreux : Modèle de ménisque,* Nancy: Institut Polytechnique de Lorraine, 2003.

[40] J. Bico, *Mécanismes d'imprégnation : Surfaces texturées, Bigouttes, Poreux,* Paris: Université de Paris 6, 2000.

[41] Y. Wielhorski, M. A. Ben Abdelwahed et J. Breard, «Theoretical Approach of Bubble Entrapment Through Interconnected Pores: Supplying Principle,» *Springer,* vol. 96, pp. 105-116, 2013.

[42] M. K. Kang et W. I. Lee, «A flow-front refinement technique for the numerical simulation of resin-transfer molding process,» *Composites Science and Technology,* vol. 59, pp. 1663-1674, 1999.

[43] S. Shin et W. I. Lee, «Finite element analysis of incompressible viscous flow with moving free surface by selective volume of fluid method,» *International Journal of Heat and Fluid Flow,* vol. 21, pp. 197-206, 2000.

[44] V. Rohatgi, N. Patel et L. J. Lee, «Experimental investigation of flow-induced microvoids during impregnation of unidirectional stitched fiberglass mat,» *Polymer Composites,* vol. 17, n° %12, April 1996.

[45] J. Bear, «Dynamics of fluids in porous media,» *Dover Publications, New York,* 1972.

[46] B. Z. Babu et K. M. Pillai, «Experimental investigation of the effect of fiber mat architecture on the unsaturated flow in liquid composite molding,» *Journal of Composite Materials,* vol. 38, pp. 57-79, 2004.

[47] K. M. Pillai, «Governing equations for unsaturated flow through woven fiber mats. Part 1 : Isothermal flows,» *Composites Part A,* vol. 33, pp. 1007-1019, 2002.

[48] K. M. Pillai, «Modeling the unsaturated flow in liquid composite molding processes : A review and some thoughts,» *Journal of Composite Materials,* vol. 38, pp. 2097-2118, 2004.

[49] R. S. Parnas, J. G. Howard, T. L. Luce et S. G. Advani, «Permeability characterization. I : A proposed standard reference fabric for permeability,» *Polymer Composites,* vol. 16, pp. 429-445, 1995.

[50] K. L. Adams et L. Rebenfeld, «Permeability characteristics of multilayer fiber reinforced ability measurement and flow simulation through fiber reinforcement,» *Polymer Composites,* vol. 17, pp. 34-42, 1996.

[51] J. Breard, *Matériaux composites à matrice polymère : Modélisation numérique de la phase de remplissage du procédé RTM et détermination expérimentale de la perméabilité d'un renfort fibreux,* Le Havre: Université du Havre, 1997.

[52] J. Breard, Y. Henzel, F. Trochu et R. Gauvin, «Analysis of dynamic flows through porous media. Part I : Comparison between saturated and unsaturated flows in fibrous reinforcements,» *Polymer Composites,* vol. 24, pp. 391-408, 2003.

[53] J. Kozeny, «Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden,» *Sitzungsber Akad. Wiss. Wien,* vol. 136, pp. 271-306, 1927.

[54] P. C. Carman, «Fluid flow through granular beds,» *Transaction of the American Institute of Chemical Engineers,* vol. 15, pp. 150-166, 1937.

[55] B. R. Gebart, «Permeability of uidirectional reinforcements for RTM,» *Journal of Composite Materials,* vol. 26, pp. 1100-1133, 1992.

[56] C. Y. Chen, «Filtration of aerosol by fibrous media,» *Chem. Rev.,* vol. 55, p. 595, 1955.

[57] L. Bizet, *Analyse d'un renfort à fibres pour matériau composite. Microstructure et perméabilité,* Le Havre: Université du Havre, 2004.

[58] R. T. De Hoff et F. N. Rhines, «Quantitative microscopy,» Mc Graw Hill, New York, 1968.

[59] G. Cazaux, *Faisabilité des procédés LCM dans l'élaboration de composites fibres longues à matrice polyamide,* Le Havre: Université du Havre, 2016.

[60] F. Fairbrother et A. E. Stubbs, «Studies in electro-endosmosis - VI. The "bubble tube" method of measurement,» *Journal of the Chemical Society,* vol. 18, pp. 237-261, 1935.

[61] F. P. Bretherton, «The motion of long bubbles in tubes,» *J. Fluid Mech,* vol. 10, pp. 166-188, 1961.

[62] P. Aussillous et D. Quéré, «Quick deposition of a fluid on the wall of a tube,» *Physics of Fluids,* vol. 12, n° %110, pp. 2367-2371, 2000.

[63] E. W. Washburn, «The dynamics of capillary flow,» *Physical review,* vol. XVII, n° %13, pp. 273-283, 1921.

[64] D. Quéré, «Inertial capillary,» *Europhys.,* vol. 39, pp. 533-538, 1997.

[65] P. G. De Gennes, X. Hua et P. Levinson, «Dynamics of wetting : local contact angles,» *Journal of fluid mechanics,* vol. 212, pp. 55-63, 1990.

[66] A. Saouab, *Génération de maillages adaptatifs par une méthode variationnelle,* Rouen: Université de Rouen, 1991.

[67] N. I. Kolev, «Fragmentation and coalescence dynamics in multiphase flows,» *Experimental Thermal and Fluid Science,* vol. 6, pp. 211-251, 1993.

[68] C. Leber, *Etude expérimentale des pièces composites mises en oeuvre par le procédé RTM,* Le Havre: Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, 2015.

[69] L. Gascon, J. A. Garcia, F. LeBel, E. Ruiz et F. Trochu, «Numerical prediction of saturation in dual scale fibrous reinforcements during Liquid Composite Molding,» *Composites : Part A,* vol. 77, pp. 275-284, 2015.

[70] F. C. Blake, «The resistance of packing to fluid flow,» *Transactions of the American Institute of Chemical Engineers,* vol. 14, pp. 415-421, 1992.

[71] M. C. Leverett, «Capillary Behavior in Porous Solids,» *Trans. AIME,* vol. 142, pp. 341-358, 1941.

[72] C. C. Huet, J. A. Rushing, K. E. Newsham et T. A. Blasingame, «A Modified Purcell/Burdine Model for Estimating Absolute Permeability from Mercury-Injection

Capillary Pressure Data,» chez *International Petroleum Technology Conference*, Doha, 2005.

[73] W. Rose et W. A. Bruce, «Evaluation of Capillary Character in Petroleum Reservoir Rock,» *Trans. AIME,* vol. 186, pp. 127-142, 1949.

[74] W. R. Purcell, «Capillary Pressures-Their Measurement Using Mercury and the Calculation of Permeability Therefrom,» *Trans. AIME,* vol. 186, pp. 39-48, 1949.

[75] J. I. Gates et T. Lietz, «Relative permeabilities of California Cores by the Capillary Pressure Method,» *DPP,* p. 285, 1950.

[76] M. R. Wyllie et M. B. Spangler, «Application of electrical resistivity measurements to problem of fluid flow in porous media,» *AAPG Bull.,* vol. 36, n° %12, p. 359, 1952.

[77] N. T. Burdine, «Relative permeability calculations from pore size distribution data,» *Trans. AIME,* vol. 198, pp. 71-78, 1953.

[78] K. Li et R. N. Horne, «Comparison of methods to calculate relative permeability from capillary pressure in consolidated water-wet porous media,» *Water Ressources Research,* vol. 42, 2006.

[79] A. T. Corey, «The interrelation between gas and oil relative permeabilities,» pp. 38-41, 11 1954.

[80] R. H. Brooks et A. T. Corey, «Properties of Porous Media Affecting Fluid Flow,» *J. Irrig. and Drain. Div. ASCE,* vol. 92, pp. 61-88, 1996.

[81] J. Breard, A. Saouab et G. Bouquet, «Numerical simulation of void formation in LCM,» *Composites Part : A,* vol. 34, pp. 517-523, 2003.

[82] L. Gascon, J. A. Garcia, F. LeBel, E. Ruiz et F. Trochu, «A tow-phase flow model to simulate mold filling and saturation in Resin Transfer Molding,» *Springer,* 2015.

[83] M. A. Spaid et F. R. Phelan, «Modeling void formation dynamics in fibrous porous media with the lattice Boltzmann method,» *Composites Part A*, vol. 29, pp. 749-755, 1998.

[84] Y. Henzel, J. Breard, D. Lang et F. Trochu, «A standard characterisation of saturated and unsaturated flow behaviours in porous media,» chez *Proc. ICCM-12 Conf.*, Paris, 1999.

[85] B. Yenilmez et E. M. Sozer, «A grid of dielectric sensors to monitor mold filling and resin cure in resin transfer molding,» *Composites : Part A*, vol. 40, pp. 476-489, 2009.

[86] K. Han et L. J. Lee, «Dry spot formation and changes in liquid composite molding : I-Experimental,» *Journal of Composite Materials*, vol. 30, n° %113, pp. 1458-1474, 1996.