

Etude des plissements

Pour étudier l'influence d'un plissement sur le comportement mécanique d'un composite stratifié, un protocole de mise en œuvre et de caractérisation a été mis en place.

III.1 Plaques étudiées

III.1.1 Matériau utilisé

Le matériau étudié est le même que pour l'étude des porosités afin de se baser sur le même matériau sain. Le matériau utilisé est donc un stratifié pré-preg verre/epoxy GUBD 2306 de Krempel Group©. Le pré-preg est un tissu pré-imprégné de résine qui se met en forme en température. Le tissu a une épaisseur de 0,2 mm.

III.1.2 Objectif de plissement à étudier

Afin d'observer l'influence des plissements sur le comportement mécanique, deux types de plissements ont été mis en œuvre avec des dimensions différentes. Le plissement étant défini par 3 paramètres à savoir :

- la longueur du plissement λ ;
- la hauteur δ ;
- l'angle de désalignement maximum θ_{max} ,

Sachant que l'angle de désalignement dépend des deux premiers paramètres, seulement deux plissements avec deux longueurs différentes et deux hauteurs différentes sont sélectionnés en fonction des données fournies par Adwen. L'entreprise a fourni des données sur les pièces finales de 80 mm d'épaisseur. Les paramètres des plissements à l'échelle de l'éprouvette sont donc obtenus par une conversion d'échelle présentée sur le tableau 42 :

Paramètres	Pièce finale	Eprouvette
Longueur de plissement λ	$10 \text{ mm} < \lambda < 150 \text{ mm}$	$\lambda_1 = 5,2 \text{ mm}$ $\lambda_2 = 7,8 \text{ mm}$
Hauteur de plissement δ	$2 \text{ mm} < \delta < 20 \text{ mm}$	$\delta_1 = 0,26 \text{ mm}$ $\delta_2 = 0,52 \text{ mm}$

Tableau 42 : Détermination des valeurs des paramètres caractéristiques des plissements

La valeur des paramètres est choisie en fonction des données Adwen mais aussi des possibilités de mise en œuvre. En effet il est très difficile de reproduire un plissement expérimentalement, de façon reproductible d'une plaque à une autre.

III.1.3 Procédé de mise en forme

Il existe plusieurs techniques pour créer expérimentalement un plissement mais il n'en existe qu'une seule qui permet de reproduire le même type de défaut sur plusieurs plaques pour un stratifié prépreg avec une bonne répétabilité.

La mise en œuvre des plaques stratifiées avec un plissement se fait à l'aide d'une bande transversale placée au niveau souhaité de l'empilement. La bande transversale se fait avec le tissu prépreg lui-même et son placement est illustré sur la figure 76.

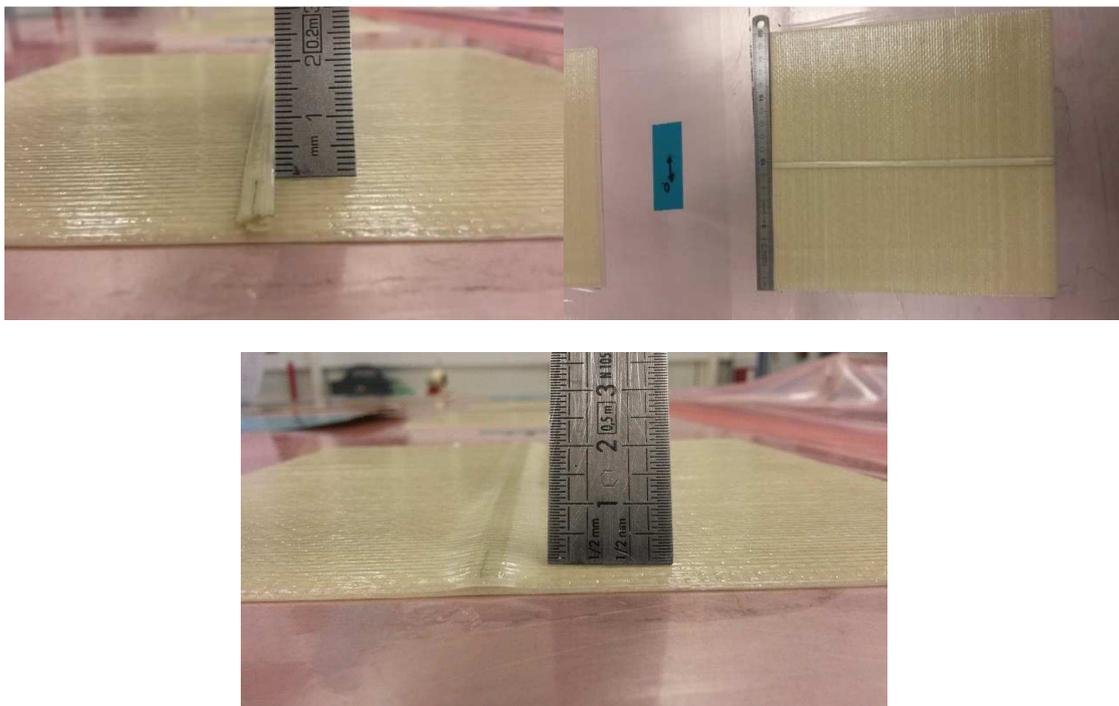


Figure 76 : Placement de la bande transversale pour créer un plissement

III.1.4 Plaques finales

Les plaques avec plissement réalisées en étuve présentent des défauts conformes aux attentes avec un plissement qui forme une courbe en sinus. Un exemple de plissement est illustré sur la figure 77. Le plissement est facilement visible car les fibres qui composent la bande sont dans le sens transversal et ressortent sous forme de cercle. Comme illustré sur la figure 77, les plissements présentent des macro-pores sur les côtés de la face supérieure des plissements. Ces macro-pores se forment car le procédé de mise en forme est le procédé sous étuve. Le taux de porosité sur le pourtour du plissement est caractérisé lors de l'analyse d'image afin de quantifier la porosité qui pourrait interférer dans les essais mécaniques.

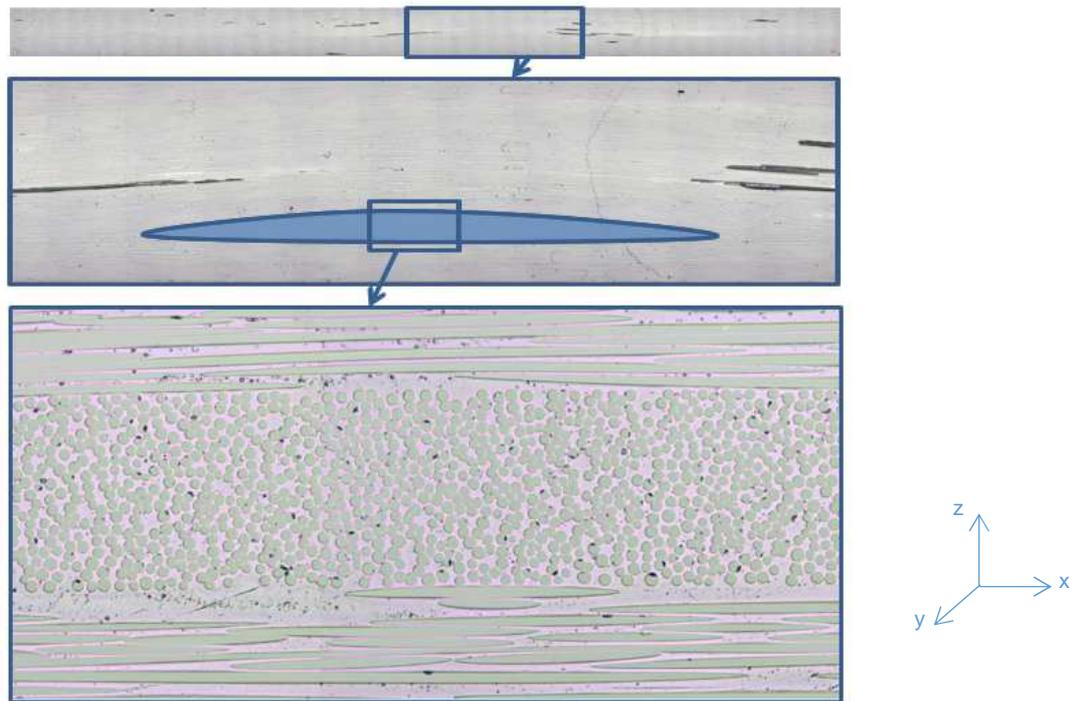


Figure 77 : Coupe micrographique longitudinale d'un plissement

Pour savoir si l'influence de la porosité sera supérieure à celle du plissement, des plaques sous infusion avec fibres sèches sont mises en œuvre car ce procédé élimine la possibilité d'avoir des macro-pores. Ce sera plus difficile dans le cas où La figure 78 présente la coupe micrographique longitudinale d'un plissement mis en forme sous étuve. Il est bien dépourvu de macro-pores comme le montre la photographie micrographie ci-dessous. Il est possible de faire cette étude car celle-ci ne sera pas prise en compte dans l'étude numérique du projet.



Figure 78 : Coupe micrographique longitudinale d'un plissement sous infusion

III.2 Analyses d'image par microscopie optique

Pour chaque échantillon, les paramètres caractéristiques du plissement, à savoir sa longueur λ et sa hauteur δ , la hauteur des plis déformés h et le taux de porosité P % sur le pourtour du plissement sont analysés par images micrographiques.

Le plissement appliqué étant un défaut artificiel avec l'ajout d'une bande transversale, l'analyse se fait sur 10 échantillons car les variations des paramètres sont faibles sauf pour le taux de porosité qui est caractérisé sur 4 échantillons du fait de la largeur des plaques.

III.2.1 Plissement 1

Le plissement numéroté 1 est le plus petit plissement avec une longueur théorique de 5,2 mm et une hauteur théorique de 0,26 mm. Les résultats sont énumérés dans les tableaux 43 et 44 et deux coupes micrographiques longitudinale et transversale d'un échantillon de ce plissement sont visibles sur les figures 79 et 80. La figure 80 de la coupe transversale montre bien les macro-pores le long du plissement, qui sont nombreux et de tailles plus ou moins variables.



Figure 79 : Coupe micrographique longitudinale d'un échantillon du plissement 1



Figure 80 : Coupe micrographique transversale d'un échantillon du plissement 1 au niveau du bord du plissement

Les valeurs des paramètres caractéristiques, à savoir la longueur et la hauteur de plissement, sont proches des valeurs théoriques souhaitées à l'échelle de l'éprouvette, énumérées dans le tableau 38 avec 6,09 μm de longueur moyenne et 2,8 μm de hauteur moyenne. Les variations pour ces paramètres sont assez faibles avec seulement 4% de coefficient de variation pour les 2 paramètres. Le 3^{ème} paramètre caractéristique est la hauteur des plis déformés avec une moyenne de 2,1 μm soit une diminution de 27% par rapport à la hauteur du plissement ce qui signifie que l'angle de désalignement maximum des fibres diminue plus les plis sont proches de la surface. Le taux de porosité observé sur les bords du plissement est de 1,4% en moyenne.

Paramètre	Longueur de plissement λ	Hauteur du plissement δ	Hauteur des plis déformés h
1	5932,9	290,3	201,1
2	5800,5	271,4	178,4
3	6134,7	268,0	196,1
4	6292,2	277,2	217,3
5	6165,5	285,4	206,8
6	6464,2	285,2	231,4
7	5633,1	287,6	242,1
8	6179,6	308,0	192,7
9	6030,4	279,4	212,1
10	622,7	291,9	221,0
Moyenne	6085,6	284,4	209,9
<i>Ecart-type</i>	243,8	11,4	19,0
COV	0,0401	0,042	0,091

Tableau 43 : Valeurs des paramètres caractéristiques du plissement 1

Echantillon	1	2	3	4	Moyenne	Ecart-type	COV
Taux de porosité P%	1,367	1,268	1,487	1,398	1,380	0,090	0,090

Tableau 44 : Taux de porosité sur les bords du plissement 1

III.2.2 Plissement 2

Le plissement 2 est le plus grand des 2 plissements avec une longueur de plissement souhaité de 7,8 mm et une hauteur de 0,52 mm. Ces deux paramètres sont caractérisés sur 10 échantillons afin d'observer leur variation. Les résultats sont visibles dans le tableau 46 ainsi que la hauteur des plis déformés par rapport à la surface. Deux exemples de coupes micrographiques, une longitudinale et l'autre transversale, sont présentés en figure 81 et 82. La porosité autour du plissement est illustrée sur la figure 40.



Figure 81 : Coupe micrographique longitudinale du plissement 2



Figure 82 : Coupe micrographique transversale d'un des bords du plissement

La longueur du plissement observé, à savoir 9,07 mm est légèrement supérieure à la valeur souhaitée de 7,8 mm alors que la hauteur observée, à savoir 5,1 mm, est légèrement inférieure à la valeur souhaitée de 0,52 mm. Le plissement 2 a la même tendance que le plissement 1 à avoir des plis de moins en moins déformés en remontant vers la surface de l'échantillon avec une hauteur de plis déformés par rapport à la surface de 3,96 μm soit une diminution de 23%. La porosité observée sur le pourtour du plissement a un taux de porosité moyenne de 2,1%.

Le travail d'analyse et de modélisation statistique avancé sur les porosités pourrait être, de même, appliqué sur les paramètres mesurés sur les plissements. Ces analyses ne sont pas ici présentées pour limiter la taille de ce manuscrit.

Echantillon	1	2	3	4	Moyenne	Ecart-type	COV
Taux de porosité P%	1,948	1,645	2,072	2,682	2,087	0,435	0,209

Tableau 45 : Taux de porosité sur les bords du plissement 2

Paramètre	Longueur de plissement λ	Hauteur du plissement δ	Hauteur des plis déformés h
1	8949,0	484,9	388,1
2	9621,3	506,4	389,1
3	9268,9	523,3	397,1
4	8979,3	533,6	397,5
5	8834,3	522,1	464,2
6	9041,4	516,1	364,3
7	9563,3	505,2	422,3
8	8592,7	504,6	380,5
9	9111,9	507,6	378,2
10	8795,9	493,6	376,4
Moyenne	9075,8	509,9	395,7
<i>Ecart-type</i>	<i>328,4</i>	<i>14,7</i>	<i>28,7</i>
COV	0,0366	0,0288	0,0724

Tableau 46 : Valeurs des paramètres caractéristiques du plissement 2

IV. Conclusion

Dans le but d'étudier l'influence du taux de porosité et d'un plissement, différentes plaques en composite stratifié sont mises en œuvre avec différents procédés et paramètres de fabrication. Il résulte de cette campagne 5 types de composite stratifié avec et sans défauts :

- Composite stratifié sain,
- Composite stratifié avec 1,2% de porosité → Plaque porosité « - »,
- Composite stratifié avec 3,0% de porosité → Plaque porosité « + »,
- Composite stratifié avec un petit plissement → Plaque plissement 1,
- Composite stratifié avec un grand plissement → Plaque plissement 2.

A travers une campagne expérimentale de caractérisation par analyse d'images par microscopie optique, le défaut de porosité est analysé afin de connaître sa variabilité.

Pour cela, les paramètres de la porosité, à savoir, le diamètre des pores, le rapport des diamètres des pores, la longueur des pores, la distance entre les pores, le nombre de pores par échantillon et le taux de porosité, sont caractérisés et analysés de manière probabiliste en les modélisant avec des lois de distribution.

Le choix du modèle se fait selon un protocole qui identifie les modèles et les compare à l'aide de 3 tests statistiques : le test de Kolmogorov-Smirnov, le test d'Anderson-Darling et le test de Khi-deux.

Une fois les modèles choisis pour chaque paramètre et leurs paramètres identifiés, ils sont comparés aux données avec une analyse statistique de plusieurs paramètres qui caractérisent la variabilité d'un jeu de données, à savoir la moyenne, le 3^{ème} quantile et la valeur à $p=0,99$. Le défaut de porosité présente beaucoup de variabilité que ce soit dans la dimension des pores ou dans leur répartition spatiale.

Le défaut de plissement et ses paramètres caractéristiques, à savoir la longueur du plissement, la hauteur de plissement et la hauteur de plis déformés par rapport à la surface, sont caractérisés par analyse d'images par microscopie optique. Il présente beaucoup moins de variabilité que le défaut de porosité. Les plaques saines et avec défauts sont alors caractérisés mécaniquement afin d'observer l'influence de ces deux défauts.

Bibliographie

- [1] Airbus, «Test Method for Determining the Pore Content of Fiber Reinforced Plastics using Automatic Image Analysis».
- [2] D. Leguillon, D. Quesada, C. Putot et E. Martin, «Prediction of crack initiation at blunt notches and cavities - size effects,» *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 74, pp. 2420-2436, 2007.
- [3] G. Saporta, «Probabilités, Analyse des données et Statistique,» Editions Technip, 2006.
- [4] N. Smirnov, «Table for estimating the goodness of fit of empirical distributions,» *Annals of Mathematical Statistics*, vol. 19, pp. 279-281, 1948.
- [5] T. W. Anderson et D. A. Darling, «Asymptotic Theory of Certain "Goodness of Fit" Criteria Based on Stochastic,» *Annals of Mathematical Statistics*, vol. 23, n° 12, pp. 193-212, 1952.
- [6] J. Aldrich, «R. A. Fisher and the making of maximum likelihood 1912-1922,» *Statistical Science*, vol. 12, n° 13, pp. 162-176, 1997.
- [7] S. Stigler, «Karl Pearson's theoretical errors and the advances they inspired,» *Statistical Science*, n° 123, pp. 261-271, 2008.

Table des figures

Figure 43 : Ouverture de l'image.....	66
Figure 44 : Définition de l'échelle	66
Figure 45 : Seuillage.....	67
Figure 46 : Calcul du nombre de particules sélectionnées	67
Figure 47 : Calcul.....	68
Figure 48 : Diamètres D et d des pores (à gauche) et distance L entre les pores (à droite)	68
Figure 49 : Schéma des 3 paramètres d'un plissement.....	68
Figure 50 : Mesure de l'angle de désalignement.....	68
Figure 51 : Mesure de l'amplitude du plissement (représenté en rouge)	69
Figure 52 : Mesure de la période (ou longueur) du plissement.....	69

Figure 53 : Contrainte à l'amorçage d'une rupture en fonction du diamètre d'un trou dans une plaque avec les valeurs calculées en ligne noire et les valeurs expérimentales [2].....	70
Figure 54 : Schéma du procédé pré-imprégné sous presse	71
Figure 55 : Schéma du procédé pré-imprégné sous étuve	72
Figure 56 : Coupe micrographique longitudinale de l'échantillon d'une plaque fabriquée sous presse.....	72
Figure 57 : Coupe micrographique transversale de l'échantillon d'une plaque fabriquée sous presse.....	73
Figure 58 : Coupe micrographique transversale de l'échantillon d'une plaque fabriquée sous étuve pendant 7h et à 90°C	73
Figure 59 : Coupe micrographique longitudinale de l'échantillon d'une plaque fabriquée sous étuve pendant 7h et à 90°C	74
Figure 60 : Coupe micrographique transversale de l'échantillon d'une plaque fabriquée sous étuve pendant 2h à 120°C	74
Figure 61 : Coupe micrographique longitudinale de l'échantillon d'une plaque fabriquée sous étuve pendant 2h à 120°C	75
Figure 62 : Histogramme des fréquences cumulées du taux de porosité pour la plaque porosité « - » à 1,2% de porosité.....	80
Figure 63 : Histogramme des fréquences cumulées du taux de porosité pour la plaque porosité « + », à 3,0% de porosité	83
Figure 64 : Histogramme des fréquences relatives du diamètre des pores pour la plaque porosité « - », à 1,2% de porosité superposé avec la loi lognormal et fatigue life.	85
Figure 65 : Histogramme des fréquences relatives du diamètre des pores pour la plaque porosité « + » à 3,0% de porosité	86
Figure 66: Histogramme des fréquences relatives de la longueur des pores pour la plaque porosité « - », à 1,2% de porosité.....	89
Figure 67 : Histogramme des fréquences relatives de la longueur des pores pour la plaque porosité « + », à 3,0% de porosité	90
Figure 68 : Histogramme des fréquences relatives du rapport des diamètres des pores pour la plaque porosité « - », à 1,2% de porosité.....	92
Figure 69 : Histogramme des fréquences du rapport des diamètres des pores pour la plaque porosité « + », à 3,0% de porosité	93
Figure 70 : Histogramme des fréquences du nombre de pores par échantillon pour la plaque porosité « - », à 1,2% de porosité	95
Figure 71 : Histogramme des fréquences du nombre de pores par échantillon pour la plaque porosité « + » à 3,0% de porosité	97

Figure 72 : Histogramme des fréquences relatives la distance entre deux pores pour la plaque porosité « - », à 1,2% de porosité	98
Figure 73 : Histogramme des fréquences relatives la distance entre deux pores pour la plaque porosité « + » à 3,0% de porosité	100
Figure 74 : 4 exemples de porosité modélisée avec le script un taux de porosité de 1,2%	113
Figure 75 : 4 exemples de porosité modélisée avec le script un taux de porosité de 3,0%	113
Figure 76 : Placement de la bande transverse pour créer un plissement	115
Figure 77 : Coupe micrographique longitudinal d'un plissement.....	116
Figure 78 : Coupe micrographique longitudinale d'un plissement sous infusion.....	116
Figure 79 : Coupe micrographique longitudinal d'un échantillon du plissement 1	117
Figure 80 : Coupe micrographique transversale d'un échantillon du plissement 1 au niveau du bord du plissement.....	117
Figure 81 : Coupe micrographique longitudinale du plissement 2	118
Figure 82 : Coupe micrographique transversale d'un des bords du plissement.....	118
Tableau 5 : Taux de porosité pour les échantillons de la plaque IN1250/porosité « + » et IN1242/porosité « - »	79
Tableau 6 : Tableau des résultats des tests statistiques pour le taux de porosité de la plaque porosité -.....	80
Tableau 7 : Valeurs des paramètres des lois de distribution pour le taux de porosité de la plaque porosité « - ».....	82
Tableau 8 : Tableau des résultats des tests statistiques pour le taux de porosité de la plaque porosité « + ».....	82
Tableau 9 : Valeurs des paramètres des lois de distribution pour le taux de porosité de la plaque porosité « + »	84
Tableau 10 : Tableau des résultats des tests statistiques pour le diamètre des pores de la plaque porosité « - ».....	84
Tableau 11 : Valeurs des paramètres des lois de distribution pour le diamètre des pores de la plaque porosité « - »	86
Tableau 12 : Tableau des résultats des tests statistiques pour le diamètre des pores de la plaque porosité « + »	87
Tableau 13 : Valeurs des paramètres des lois de distribution pour le diamètre des pores de la plaque porosité « + »	87

Tableau 14 : Tableau des résultats des tests statistiques pour la longueur des pores de la plaque porosité « - »	88
Tableau 15 : Valeurs des paramètres des lois de distribution pour la longueur des pores de la plaque porosité « - »	88
Tableau 16 : Tableau des résultats des tests statistiques pour la longueur des pores de la plaque porosité « + »	90
Tableau 17 : Valeurs des paramètres des lois de distribution pour la longueur des pores de la plaque porosité « + »	90
Tableau 18 : Tableau des résultats des tests statistiques pour le rapport des diamètres des pores de la plaque porosité « - »	91
Tableau 19 : Valeurs des paramètres des lois de distribution pour le rapport des diamètres des pores de la plaque porosité « - »	92
Tableau 20 : Tableau des résultats des tests statistiques pour le rapport des diamètres des pores de la plaque porosité « + »	94
Tableau 21 : Valeurs des paramètres des lois de distribution pour le rapport des diamètres des pores de la plaque porosité « + »	94
Tableau 22 : Tableau des résultats des tests statistiques pour le nombre de pores par échantillon pour la plaque porosité « - »	95
Tableau 23 : Valeurs des paramètres des lois de distribution pour le nombre de pores pour la plaque porosité -	96
Tableau 24 : Tableau des résultats des tests statistiques pour le nombre de pores par échantillon pour la plaque porosité « + »	97
Tableau 25 : Valeurs des paramètres des lois de distribution pour le nombre de pores pour la plaque porosité « + »	97
Tableau 26 : Tableau des résultats des tests statistiques pour la distance L entre deux pores pour la plaque porosité « - »	98
Tableau 27 : Valeurs des paramètres des lois de distribution pour la distance entre deux pores pour la plaque porosité « - »	99
Tableau 28 : Tableau des résultats des tests statistiques pour la distance L entre deux pores pour la plaque porosité « + »	99
Tableau 29 : Valeurs des paramètres des lois de distribution pour la distance entre deux pores pour la plaque porosité « + »	100
Tableau 30 : Valeurs des quantités caractéristiques du taux de porosité de la plaque porosité « - » et porosité « + » pour les données & les modèles	101
Tableau 31 : Valeurs prédites de taux de porosité par les lois pour un tirage aléatoire de 5000 valeurs.....	102

Tableau 32 : Valeurs des quantités caractéristiques du diamètre des pores de la plaque porosité « - » et porosité « + » pour les données et les modèles	103
Tableau 33 : Valeurs prédites du diamètre des pores par les lois pour un tirage aléatoire de 5000 valeurs.....	104
Tableau 34 : Valeurs des quantités caractéristiques de la longueur des pores de la plaque porosité « - » et porosité « + » pour les données et les modèles	105
Tableau 35 : Valeurs prédites de la longueur des pores par les lois pour un tirage aléatoire de 5000 valeurs	106
Tableau 36 : Valeurs des quantités caractéristiques du rapport des diamètres des pores de la plaque porosité « - » et porosité « + » pour les données et les modèles	106
Tableau 37 : Valeurs prédites du rapport des diamètres des pores par les lois pour un tirage aléatoire de 5000 valeurs	107
Tableau 38 : Valeurs des quantités caractéristiques du rapport du nombre de pores par échantillon de la plaque porosité « - » et porosité « + » pour les données et les modèles ..	108
Tableau 39 : Valeurs prédites du nombre de pores par échantillon par les lois pour un tirage aléatoire de 5000 valeurs	109
Tableau 40 : Valeurs des quantités caractéristiques du rapport de la distance entre les pores de la plaque porosité « - » et porosité « + » pour les données et les modèles	109
Tableau 41 : Valeurs prédites de la distance entre les pores par les lois pour un tirage aléatoire de 5000 valeurs	110
Tableau 42 : Détermination des valeurs des paramètres caractéristiques des plissements	114
Tableau 43 : Valeurs des paramètres caractéristiques du plissement 1	117
Tableau 44 : Taux de porosité sur les bords du plissement 1.....	118
Tableau 45 : Taux de porosité sur les bords du plissement 2.....	118
Tableau 46 : Valeurs des paramètres caractéristiques du plissement 2.....	119

