

# Essai de cisaillement – Flexion 3 points appuis rapprochés

## VI.1 Protocole d'essai

L'essai de flexion 3 point avec appuis rapprochés est défini par la norme NF EN ISO 14130 et permet de mesurer les modules et contraintes de cisaillement hors-plan dans le sens longitudinal avec des essais sur éprouvettes à 0°, et dans le sens transversal avec des essais sur éprouvettes à 90°. Le fait de réduire la distance entre les deux appuis permet de conserver les efforts tranchants qui génèrent les contraintes de cisaillement et de réduire les contraintes normales de flexion. Cependant, il est difficile d'éliminer totalement les contraintes normales de flexion et c'est pour cela que l'essai de flexion 3 points avec appuis rapprochés ne permet pas d'avoir une mesure très précise de ces modules de cisaillement hors plan. Le schéma de l'essai est visible sur la figure 109 et les dimensions des éprouvettes sont énumérées sur le tableau 71. Les dimensions de l'éprouvette sont définies en fonction de l'épaisseur de l'éprouvette. L'essai se fait à une vitesse de flèche de 0,5 mm/min.

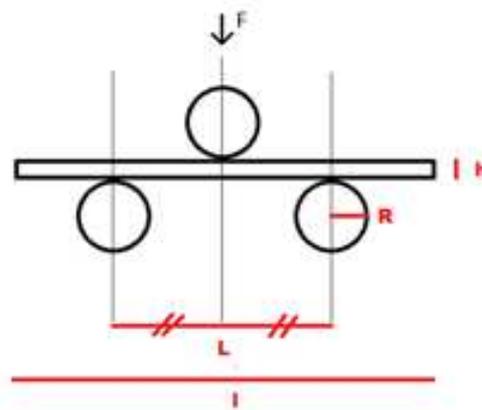


Figure 109 : Schéma du montage de flexion 3 points – appuis rapprochés

Dimensions	Valeurs en mm
L longueur de l'éprouvette	$10h = 20$
B largeur de l'éprouvette	$5h = 10$
H épaisseur de l'éprouvette	2 (sain) et 2,8 (porosité)
L distances entre les appuis	$5h = 10$
R rayon des appuis	2

Tableau 71 : Dimensions des éprouvettes de flexion 3 points appuis rapprochés

La contrainte de cisaillement interlaminaire est définie par l'épaisseur  $h$  et la largeur  $B$  de l'éprouvette, ainsi que l'effort appliqué  $F$  tels que :

$$\tau_{nl} \text{ ou } \tau_{nt} = \frac{3F}{4Bh} \quad (66)$$

Les modules de cisaillement  $G_{13}$  et  $G_{23}$  sont déterminés à l'aide d'une formule corrigée [3] [4] [5] qui est fonction de l'effort appliqué  $F$ , la flèche  $f$ , les dimensions  $B$  et  $h$  de l'éprouvette, la distance  $D$  entre appuis et le module de rigidité  $E_{11}$  et  $E_{22}$  tels que :

$$f = \frac{FD^3}{4E_{11}Bh^3} + \frac{3FD}{10G_{13}Bh} \quad \text{et} \quad f = \frac{FD^3}{4E_{22}Bh^3} + \frac{3FD}{10G_{23}Bh} \quad (67)$$

## VI.2 Résultats

### VI.2.1 Essai à 0°

Les essais de flexion 3 point en appuis rapprochés sur des éprouvettes à 0° permettent de déterminer les propriétés mécaniques en cisaillement hors plan dans le sens longitudinal, soit le module de cisaillement interlaminaire  $G_{13}$  et  $\tau_{nl}$  la contrainte à la rupture en cisaillement hors plan. Le module est déterminé avec la flèche mesurée par le capteur de la traverse mobile et un capteur LVDT placé sur le montage. La mesure de la flèche avec le capteur LVDT est bien plus précise que celle avec le capteur traverse car elle prend en compte les changements de comportement mécanique en cours d'essai.

Les résultats des essais à 0° sont présentés dans le tableau 72 ainsi que la valeur moyenne, l'écart-type et le coefficient de variation pour les deux paramètres caractérisés.

	x	$G_{13}$ (GPa)	$G_{13}$ (GPa)	$\tau_{nl}$ (MPa)		x	$G_{13}$ (GPa)	$G_{13}$ (GPa)	$\tau_{nl}$ (MPa)		x	$G_{13}$ (GPa)	$G_{13}$ (GPa)	$\tau_{nl}$ (MPa)
		Traverse	LVDT				Traverse	LVDT				Traverse	LVDT	
Matériau sain	1	1,073	2,421	64,6	Matériau avec 1,2 % de porosité	1	0,998	2,084	61,4	Matériau avec 3,0 % de porosité	1	0,700	1,100	63,7
	2	1,214	2,364	65,8		2	0,899	1,973	62,8		2	0,731	2,258	72,3
	3	1,106	3,063	64,8		3	0,828	1,754	61,7		3	0,666	1,433	69,1
	4	1,059	2,959	64,3		4	0,866	2,108	65,2		4	0,675	1,781	67,4
	5	1,048	2,658	64,5		5	0,815	1,790	65,1		5	0,714	1,813	70,1
	$\mu$	<b>1,100</b>	<b>2,688</b>	<b>64,8</b>		$\mu$	<b>0,881</b>	<b>1,942</b>	<b>63,2</b>		$\mu$	<b>0,697</b>	<b>1,677</b>	<b>68,5</b>
	$\sigma$	0,067	0,311	0,587		$\sigma$	0,073	0,164	1,82		$\sigma$	0,027	0,436	3,22
	C o v	0,061	0,116	0,009		C o v	0,083	0,084	0,029		C o v	0,039	0,260	0,047

**Tableau 72 : Résultats des essais de flexion 3 points appuis rapprochés à 0° pour le matériau sain, avec 1,2% de porosité et 3,0 % de porosité**

Le taux de porosité semble avoir une influence sur le module de cisaillement interlaminaire  $G_{13}$  que ce soit avec la valeur mesurée par le capteur traverse et le capteur LVDT. Le module de cisaillement diminue de 27,8% avec 1,2% de porosité et 37,8% avec 3,0% de porosité. Par contre le taux de porosité ne semble pas avoir d'influence sur la contrainte à la rupture en cisaillement hors plan  $\tau_{nl}$  avec une contrainte à la rupture qui diminue entre 0 et 1,2% de porosité et augmente entre 1,2% et 3,0% de porosité.

### VI.2.1.1 Analyse de la variance pour le module de cisaillement $G_{13}$

L'analyse de la variance des valeurs du module de cisaillement interlaminaire, dont les résultats sont visibles sur le tableau 73, confirme le fait que le taux de porosité a une influence statistiquement significative sur le module de cisaillement.

Source	DF	Somme des carrés	Variance	F	p-value
Inter-facteurs	2	2,7447E6	1,3724E6	13,14678	9,4693E-4
Intra-facteur	12	1,2527E6	104390,2		
Total	14	3,9974E6			

Tableau 73 : Tableau ANOVA pour le module de cisaillement interlaminaire  $G_{13}$

L'influence du taux de porosité sur le module de cisaillement interlaminaire est définie à l'aide d'un modèle polynomiale d'ordre 2, dont l'équation est indiquée ci-dessous, et est visible sur la figure 110.

$$G_{13} = 2,69 - 0,811P\% + 0,158P\%^2 \quad (68)$$

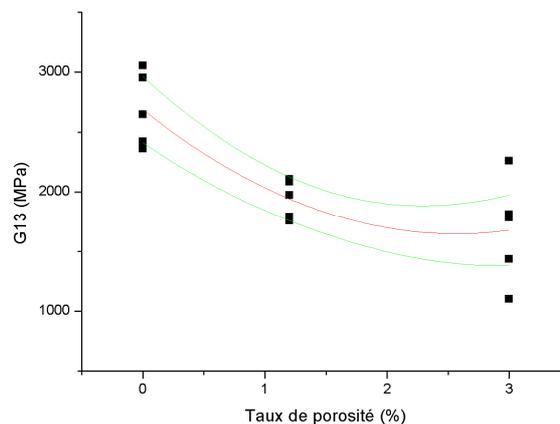


Figure 110 : Modèle polynomiale d'ordre 2 (en rouge) et les courbes de confiance à 95% (en vert), pour le module de cisaillement interlaminaire  $G_{13}$  en fonction du taux de porosité

### VI.2.2 Essai à 90°

Les essais de flexion 3 point en appuis rapprochés sur des éprouvettes à 90° permettent de déterminer les propriétés mécaniques en cisaillement hors plan dans le sens transverse, soit le module de cisaillement interlaminaire  $G_{23}$  et  $\tau_{nt}$  la contrainte à la rupture en cisaillement hors plan.

Les résultats des essais à 90° sont énumérés dans le tableau 74 ainsi que la valeur moyenne, l'écart-type et le coefficient de variation pour les deux paramètres caractérisés.

De même que pour le sens longitudinal, le taux de porosité semble avoir une influence sur le module de cisaillement interlaminaire  $G_{23}$  mais pas sur la contrainte à la rupture en cisaillement interlaminaire  $\tau_{nt}$ . Le module de cisaillement diminue de 17,2% avec 1,2% de porosité et 34,5% avec 3,0% de porosité alors que la contrainte à la rupture n'évolue pas avec le taux de porosité. Une analyse de la variance est faite pour valider ou non l'influence du taux de porosité sur  $G_{23}$ .

Matériau sain	x	$G_{23}$ (GPa) Traverse	$G_{23}$ (GPa) LVDT	$\tau_{nt}$ (MPa)	Matériau avec 1,2 % de porosité	x	$G_{23}$ (GPa) Traverse	$G_{23}$ (GPa) LVDT	$\tau_{nt}$ (MPa)	Matériau avec 3,0 % de porosité	x	$G_{23}$ (GPa) Traverse	$G_{23}$ (GPa) LVDT	$\tau_{nt}$ (MPa)
	1	0,824	0,978	11,7		1	0,741	1,010	12,5		1	0,736	0,943	12,8
	2	x	x	14,3		2	0,644	1,175	12,6		2	0,595	0,793	13,5
	3	x	x	12,8		3	0,721	1,057	12,7		3	0,653	1,000	12,9
	4	x	x	11,9		4	0,765	1,357	15,2		4	0,633	0,787	13,1
	5	1,038	1,686	14,3		5	0,577	0,915	12,9		5	0,621	0,840	12,8
	$\mu$	<b>0,931</b>	<b>1,332</b>	<b>13,0</b>		$\mu$	<b>0,690</b>	<b>1,103</b>	<b>13,2</b>		$\mu$	<b>0,648</b>	<b>0,873</b>	<b>13,0</b>
	$\sigma$	0,151	0,501	1,25		$\sigma$	0,078	0,170	1,14		$\sigma$	0,054	0,095	0,295
	c o v	0,163	0,376	0,097		c o v	0,527	0,154	0,086		c o v	0,083	0,109	0,023

Tableau 74 : Résultats des essais de flexion 3 points appuis rapprochés à 90° pour le matériau sain, avec 1,2% de porosité et 3,0 % de porosité

### VI.2.2.1 Analyse de la variance du module de cisaillement interlaminaire $G_{23}$

L'analyse de la variance des valeurs du module de cisaillement interlaminaire  $G_{23}$ , dont les résultats sont visibles sur le tableau 75, confirme le fait que le taux de porosité a une influence statistiquement significative sur le module de cisaillement avec une valeur p-value inférieur au niveau de confiance de l'étude.

Source	F	Somme des carrés	Variance	F	p-value
Inter-facteurs	2	119367,1	59688,1	9,2120	<b>0,00665</b>
Intra-facteur	9	58314,2	6479,3		
Total	11	177690,3			

Tableau 75 : Tableau ANOVA pour le module de cisaillement interlaminaire  $G_{23}$

Cette influence du taux de porosité est donc modélisée avec une fonction polynôme d'ordre 2 qui est très proche d'un modèle linéaire, qui est illustré sur la figure 111 et dont l'équation est définie telle que :

$$G_{23} = 1,30 - 0,144P\% \quad (69)$$

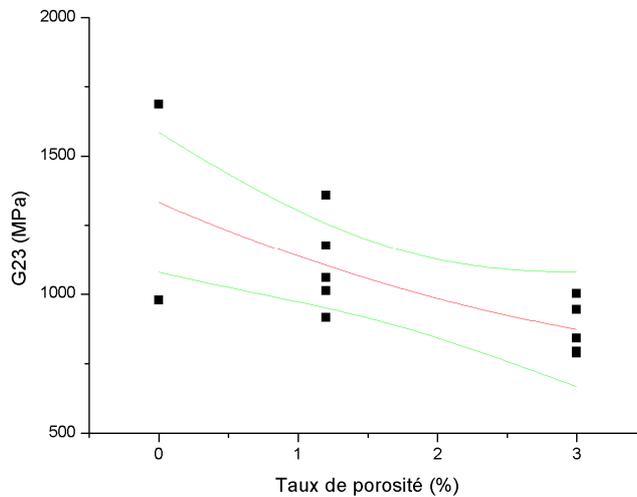


Figure 111 : Modèle polynomiale d'ordre 2 (en rouge) et les courbes de confiance à 95% (en vert), pour le module de cisaillement interlaminaire G<sub>23</sub> en fonction du taux de porosité

## VII. Essai de flexion 3 points

Des essais statiques de flexion 3 points sont mis en place afin de déterminer l'influence du plissement en statique et de valider le modèle numérique du projet. Ces essais de flexion 3 points permettent aussi de caractériser la contrainte à la rupture en flexion 3 points qui sera utilisé pour définir les paramètres des essais de fatigue également en flexion 3 points.

### VII.1 Protocole d'essais

Le schéma du montage de flexion 3 points est présenté sur la figure 112 avec les dimensions de l'éprouvette en rouge qui sont aussi énumérées dans le tableau 76. Seuls des essais avec des éprouvettes à 0° sont effectués pour cette campagne.

Pour effectuer cet essai, la norme NF EN ISO 14125 a été utilisée°. Les essais sont effectués à une vitesse de flèche de 0,5 mm/min afin d'avoir une vitesse de déformation proche de 1 %/min, et une précharge de 10N est effectuée.

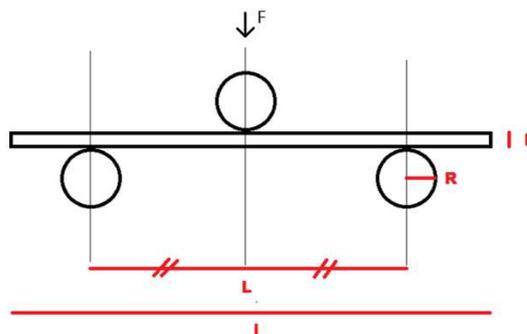


Figure 112 : Schéma du montage de flexion 3 points

Dimensions	Valeurs en mm
L longueur de l'éprouvette	60
B largeur de l'éprouvette	15
H épaisseur de l'éprouvette	2 (sain) et 2,8 (porosité)
L distances entre les appuis	40
R rayon des appuis	5

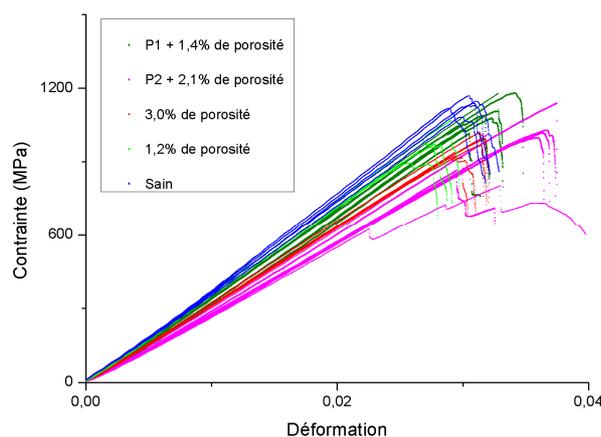
**Tableau 76 : Dimensions des éprouvettes de flexion 3 points**

## VII.2 Résultats

L'étude statique en flexion 3 points se fait sur les 5 matériaux du projet, à savoir :

1. le matériau sain ;
2. les matériaux avec 1,2% de porosité ;
3. les matériaux avec 3,0% de porosité ;
4. les matériaux avec un grand plissement P2, de longueur 10mm, avec 2,1% de porosité autour du plissement ;
5. les matériaux avec un petit plissement P1, de longueur 6 mm, avec 1,4% de porosité autour du plissement.

Elle sera complétée avec des plaques, saines et avec plissement, mises en œuvre sous infusion afin de caractériser l'influence du plissement seul. A partir de cet essai, la contrainte à la rupture en flexion et le module de flexion sont calculés. Le module de flexion se mesure comme le module de rigidité pour les essais de traction, à savoir en calculant la pente de la courbe de la contrainte en fonction de la déformation entre 0,0005 et 0,0025 de déformation.



**Figure 113 : Courbes contrainte=f(déformation) pour les essais de flexion 3 points des 5 matériaux du projet, les 2 plissements P1 et P2, les 2 matériaux avec un taux de porosité de 1,2% et 3,0%, et le matériau sain**

La figure 113 présente les résultats des essais de flexion 3 points pour les 5 matériaux du projet. Le comportement des courbes des 5 matériaux ont une même tendance avec une différence de pente et de contrainte à la rupture.

### VII.2.1 Influence du taux de porosité

Les résultats des essais de flexion 3 points sur le matériau sain et sur les matériaux avec 1,2 % de taux de porosité et 3,0%, sont présentés dans le tableau 77 et les courbes des essais sont illustrées sur la figure 114. Tout comme dans les autres cas de chargement, le taux de porosité semble avoir une influence sur le comportement mécanique du matériau en flexion 3 points. Le module de flexion diminue de 2,2% entre 0% et 1,2% de porosité, et de 11,6% entre 1,2% et 3,0% de porosité. La contrainte à la rupture semble aussi être influencée par la présence de pores avec une diminution de 12,4% entre 0% et 1,2% de porosité, et de 3,7% entre 1,2% et 3,0% de porosité. Les essais présentent une certaine variabilité mais les coefficients de variation restent faibles en dessous de 7%.

Matériau sain	x	$E_{flexion}$ (GPa)	$R_{flexion}$ (MPa)	Matériau avec 1,2 % de porosité	x	$E_{flexion}$ (GPa)	$R_{flexion}$ (MPa)	Matériau avec 3,0 % de porosité	x	$E_{flexion}$ (GPa)	$R_{flexion}$ (MPa)
	1	33,42	1168,4		1	32,61	1034,8		1	28,22	917,2
	2	33,92	1119,9		2	33,31	990,9		2	29,00	996,8
	3	32,65	1146,3		3	32,32	974,2		3	29,24	991,6
	4	33,96	1093,8		4	32,91	1067,8		4	28,53	905,3
	5	32,46	1131,1		5	31,75	894,5		5	29,07	969,1
	$\mu$	<b>33,28</b>	<b>1131,9</b>		$\mu$	<b>32,58</b>	<b>992,4</b>		$\mu$	<b>28,81</b>	<b>956,0</b>
	$\sigma$	0,70	28,0		$\sigma$	0,59	65,9		$\sigma$	0,42	42,4
	COV	0,021	0,0247		COV	0,018	0,0664		COV	0,014	0,0443

Tableau 77 : Résultats des essais de flexion 3 point pour le matériau sain, avec 1,2% de porosité et 3,0% de porosité

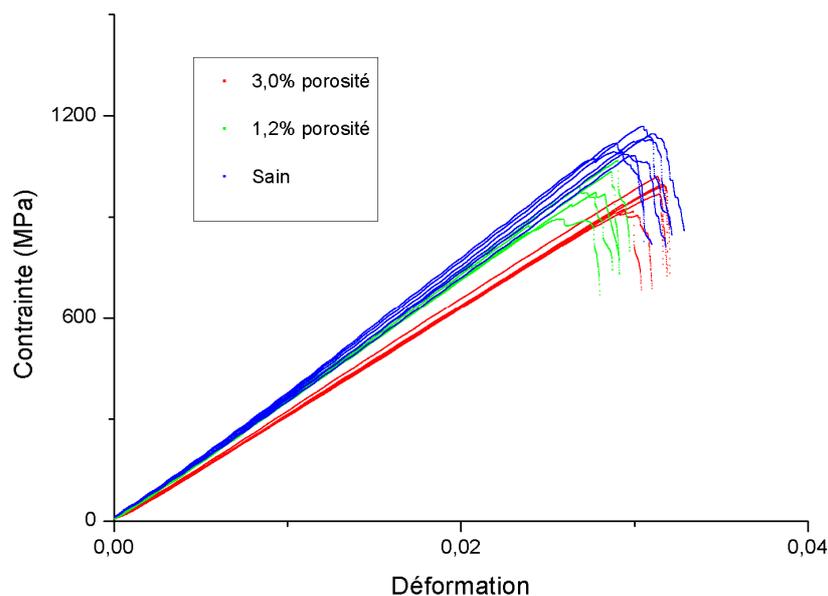


Figure 114 : Courbes contrainte=f(déformation) pour les essais de flexion 3 points pour les 2 matériaux avec un taux de porosité de 1,2% et 3,0%, et le matériau sain

### VII.2.1.1 Analyse de la variance de la contrainte à la rupture en flexion 3 points

Le taux de porosité a bien une influence statistiquement significative sur la contrainte à la rupture en flexion 3 points comme le confirme l'analyse de la variance, dont les résultats sont visibles dans le tableau 78, avec une valeur de p-value bien inférieure au niveau de confiance (de 0,05). La figure 115 présente les valeurs des contraintes à la rupture en flexion 3 points pour le matériau sain et les deux matériaux avec de la porosité.

Source	DF	Somme des carrés	Variance	F	p-value
Inter-facteurs	2	86196,29	43098,15	18,660	2,0748E-4
Intra-facteur	12	27716,21	2309,68		
Total	14	113912,50			

Tableau 78 : Tableau ANOVA pour la contrainte de rupture en flexion 3 points en fonction du taux de porosité

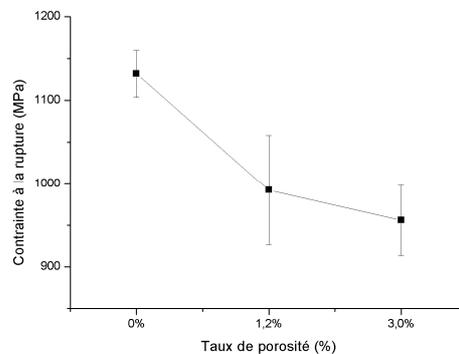


Figure 115 : Graphique, avec barres d'erreurs, des contraintes à la rupture en flexion 3 points pour le matériau sain, avec 1,2 % de porosité et 3% de porosité

L'influence du taux de porosité est identifiée à travers un modèle linéaire présenté sur la figure 116 et dont l'équation 70 est définie ci-dessous. Un modèle polynomial donne des tendances qui ne sont pas en accord avec la physique avec une contrainte à la rupture qui augmenterait pour les taux de porosité proche de 3,0%.

$$\sigma_{flexion}^{rupture} = 1104,6237 - 55,603P\% \quad (70)$$

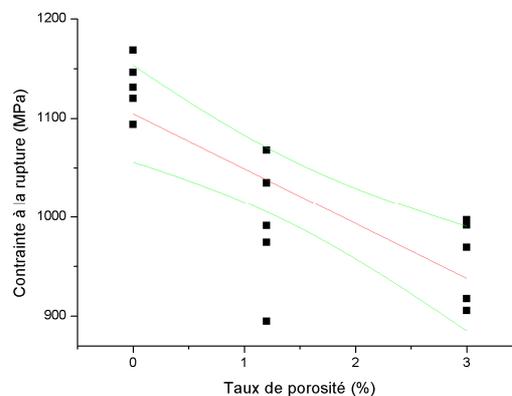


Figure 116 : Modèle linéaire (en rouge) et les courbes de confiance à 95% (en vert), pour la contrainte à la rupture en flexion 3 points en fonction du taux de porosité

### VII.2.1.2 Analyse de la variance pour le module de flexion

Le module de flexion est influencé par le taux de porosité comme illustré sur la figure 117 avec le graphique avec barres d'erreurs du module de flexion en fonction du taux de porosité.

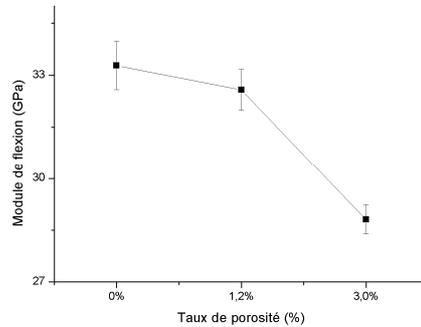


Figure 117 : Graphique, avec barres d'erreurs, des modules de flexion pour le matériau sain, avec 1,2 % de porosité et 3% de porosité

L'analyse de la variance des valeurs des modules de flexion, dont les résultats sont visibles dans le tableau 79 montre que le taux de porosité a bien une influence statistiquement significative sur le module de flexion avec une valeur p-value bien inférieure au niveau de confiance.

Source	DF	Somme des carrés	Variance	F	p-value
Inter-facteurs	2	57,785	285,8929	85,080	8,1726E-8
Intra-facteur	12	4,0751	0,3396		
Total	14	61,8610			

Tableau 79 : Tableau ANOVA pour le module de flexion en fonction du taux de porosité

Pour caractériser l'influence du taux de porosité sur le module de flexion, un modèle polynomial d'ordre 2 est appliqué, dont l'équation 71 est visible ci-dessous, et est visible sur la figure 118 avec les deux courbes à 95% de confiance.

$$E_f = 33,282 + 0,0183P\% - 0,5028P\%^2 \quad (71)$$

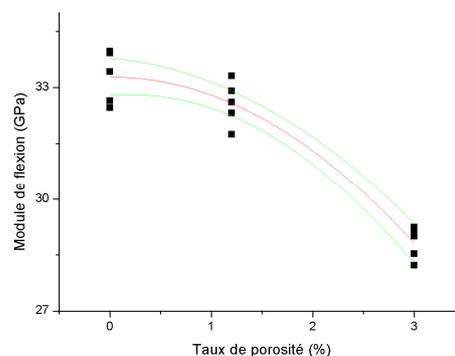


Figure 118 : Modèle polynomiale d'ordre 2 (en rouge) et les courbes de confiance à 95% (en vert), pour le module de flexion en fonction du taux de porosité

### VII.2.2 Influence du plissement avec porosité

Les résultats des essais de flexion 3 points pour le matériau sain, ainsi que pour les deux matériaux avec un plissement, sont présentés dans le tableau 80 et sur la figure 119. Pour rappel, le petit plissement a une longueur de 6 mm avec une hauteur de 0,28 mm avec un taux de porosité autour du plissement de 1,4 % dû au procédé de mise en œuvre où l'air reste bloqué au niveau de ce défaut. Le grand plissement a une longueur de 10 mm pour une hauteur de 0,5 mm et un taux de porosité autour de lui de 2,4%.

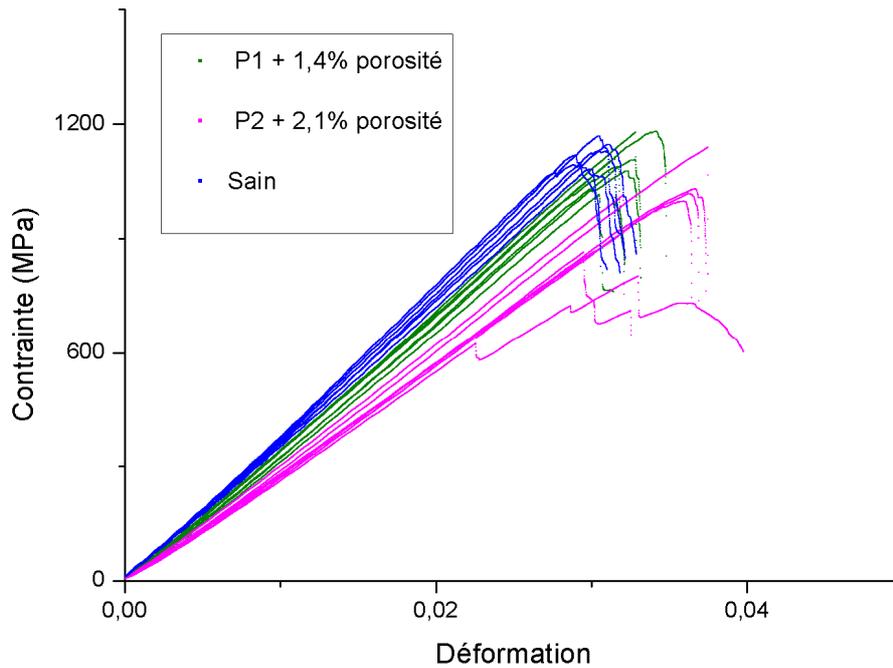


Figure 119 : Courbes contrainte=f(déformation) pour les essais de flexion 3 points pour les 2 matériaux avec un plissement P1 et un plissement P2, et le matériau sain

Matériau sain	x	$E_{flexion}$ (GPa)	$R_{flexion}$ (MPa)	Matériau P1 + 1,4% porosité	x	$E_{flexion}$ (GPa)	$R_{flexion}$ (MPa)	Matériau P2 + 2,1% porosité	x	$E_{flexion}$ (GPa)	$R_{flexion}$ (MPa)
	1	33,42	1168,4		1	30,73	1111,8		1	27,60	1013,8
	2	33,92	1119,9		2	28,84	1016,1		2	22,75	802,6
	3	32,65	1146,3		3	27,21	1089,4		3	25,30	865,7
	4	33,96	1093,8		4	29,46	1106,8		4	25,76	997,5
	5	32,46	1131,1		5	30,73	1071,6		5	25,44	1018,4
	$\mu$	33,28	1131,9		$\mu$	29,53	1079,1		$\mu$	25,37	939,6
	$\sigma$	0,70	28,0		$\sigma$	1,66	38,6		$\sigma$	1,73	99,1
	COV	0,0210	0,0247		COV	0,0562	0,0358		COV	0,0682	0,105

Tableau 80 : Résultats des essais de flexion 3 points pour le matériau sain, avec un petit plissement P1+1,4% de porosité et avec un grand plissement P2+2,1% de porosité

Les valeurs calculées des paramètres caractéristiques semblent indiquer que le plissement, et les dimensions de celui-ci, ont une influence sur le comportement mécaniques en flexion 3 points. Le module en flexion diminue de 11,3% pour le plissement P1 et 23,8% pour le plissement P2, et la contrainte à la rupture diminue de 4,7% pour le plissement P1 et 17% pour le plissement P2. Cette influence est bien sûr modulée quantitativement en fonction du volume occupé par le plissement par rapport au volume global de l'éprouvette (ou de la pièce).

### VII.2.2.1 Analyse de la variance de la contrainte à la rupture

La figure 120 présentent le graphique avec les barres d'erreurs des valeurs de la contrainte à la rupture en flexion 3 points en fonction de la présence ou non d'un plissement ainsi que la longueur du plissement. Il semble évident que le plissement influe sur la contrainte à la rupture. Cela est confirmé par l'analyse de la variance dont les résultats sont visibles sur la tableau 81 avec une valeur p-value inférieure au niveau de confiance.

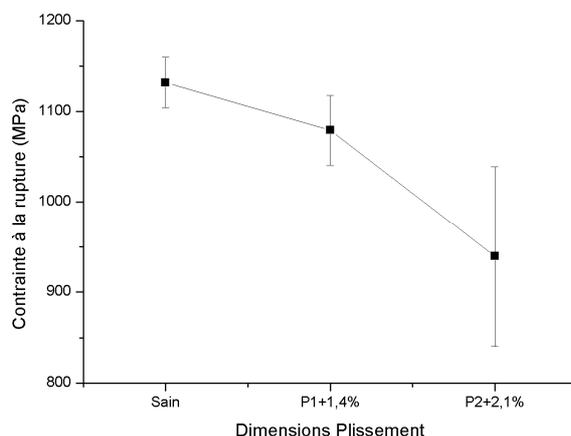


Figure 120 : Graphique, avec barres d'erreurs, des contraintes à la rupture en flexion 3 points pour le matériau sain, avec un plissement P1 et un plissement P2

Source	DF	Somme des carrés	Variance	F	p-value
Inter-facteurs	2	98723,86	49361,93	12,248	0,00127
Intra-facteur	12	48401,47	4033,46		
Total	14	147125,34			

Tableau 81 : Tableau ANOVA pour la contrainte de rupture en flexion 3 points en fonction du plissement

Afin de définir l'influence de la présence du plissement et de sa taille sur la contrainte à la rupture en flexion 3 points, un modèle polynomiale d'ordre 2, dont l'équation 72 est présentée ci-dessous, est appliqué aux données expérimentales. Ce modèle est représenté sur la figure 121.

$$\sigma_{flexion}^{rupture} = 1131,9 + 16,35L_{plissement} - 4,191L_{plissement}^2 \quad (72)$$

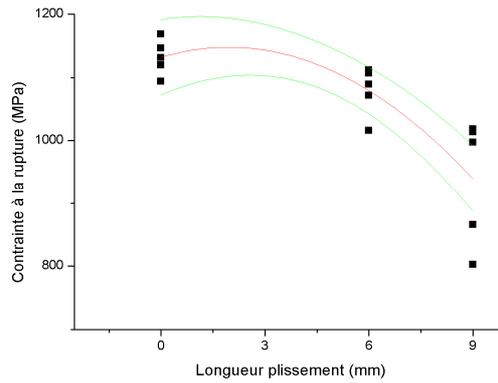


Figure 121 : Modèle polynomiale d'ordre 2 (en rouge) et les courbes de confiance à 95% (en vert), pour la contrainte à la rupture en flexion 3 points en fonction de la longueur du plissement

### VII.2.2.2 Analyse de la variance du module de flexion

Les résultats du module de flexion en fonction du plissement sont présentés sur le graphique avec barres d'erreurs à la figure 122. Le plissement a une influence certaine sur le module de flexion avec une diminution de celui-ci avec l'augmentation de la taille du plissement. Cette hypothèse est confirmée de manière significative par l'analyse de la variance dont les résultats sont visibles dans le tableau 82.

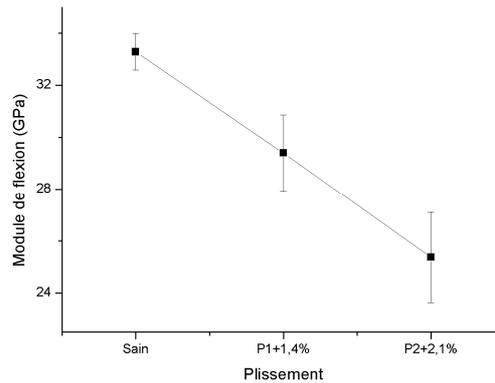


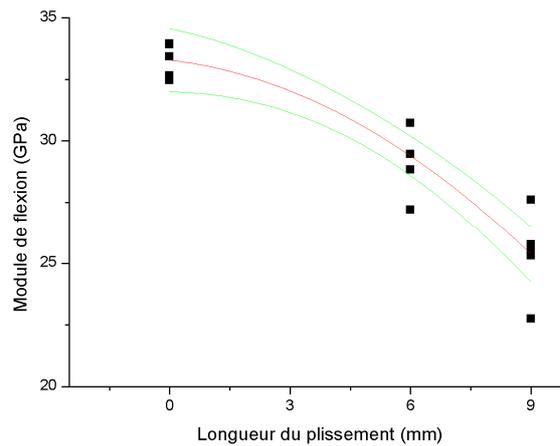
Figure 122 : Graphique, avec barres d'erreurs, des modules de flexion pour le matériau sain, avec un plissement P1 et un plissement P2

Source	DF	Somme des carrés	Variance	F	p-value
Inter-facteurs	2	156,5147	78,257	41,532	4,0454E-6
Intra-facteur	12	22,611	1,884		
Total	14	179,1257			

Tableau 82 : Tableau ANOVA pour le module de flexion en fonction du plissement

L'effet du plissement, et de ses dimensions, sur le module de flexion est caractérisé à l'aide d'un modèle polynomial d'ordre 2 qui est présenté sur la figure 123 et dont l'équation est :

$$E_f = 33,282 - 0,18578L_{\text{plissement}} - 0,077L_{\text{plissement}}^2 \quad (73)$$



**Figure 123 : Modèle polynomiale d'ordre 2 (en rouge) et les courbes de confiance à 95% (en vert), pour le module de flexion en fonction de la longueur du plissement**

### **VII.2.3 Influence du plissement sans porosité (sous infusion)**

Afin de caractériser l'influence du plissement sans porosité, 3 plaques sont mises en œuvre sous infusion, 1 plaque saine et 2 plaques avec plissement. En effet l'infusion permet d'obtenir des plaques quasiment sans porosité. Le plissement P1 a une longueur de 5,34 mm en moyenne et une hauteur de 0,36 mm en moyenne, et le plissement P2 a une longueur de 8,84 mm en moyenne et une hauteur de 0,70 mm en moyenne. Les dimensions des plissements sous infusion sont légèrement inférieures à celles des plissements sous étuve ce qui doit être pris en compte pour comparer les résultats.

Les résultats des essais de flexion 3 points sont illustrés sur la figure 124 avec les courbes de la contrainte en fonction de la déformation de chaque essai pour le matériau sain et les deux avec plissements P1 et P2. Les essais semblent avoir une bonne répétabilité avec peu de variation entre les différents essais de chaque matériau. La différence entre les courbes des trois matériaux montre bien l'influence du plissement et de sa taille sur le comportement mécanique.

Les valeurs des paramètres caractéristiques du comportement du matériau en flexion 3 points, à savoir le module de flexion et la contrainte à la rupture en flexion, sont présentées dans le tableau 83.

Les résultats ont peu de variabilité avec un coefficient de variation maximum de 10,1% pour la contrainte à la rupture et de 6,4% pour le module de flexion. Les valeurs montrent l'influence du plissement sous infusion sur le module de flexion, avec une diminution de 27% pour le plissement P1 et de 40,9% pour le plissement P2, et la contrainte à la rupture avec une diminution de 13,2% pour le plissement P1 et de 26,4% pour le plissement P2. Il faut toujours considérer que ces résultats ne sont valables quantitativement que pour le ratio volume plissement par rapport au volume éprouvette.

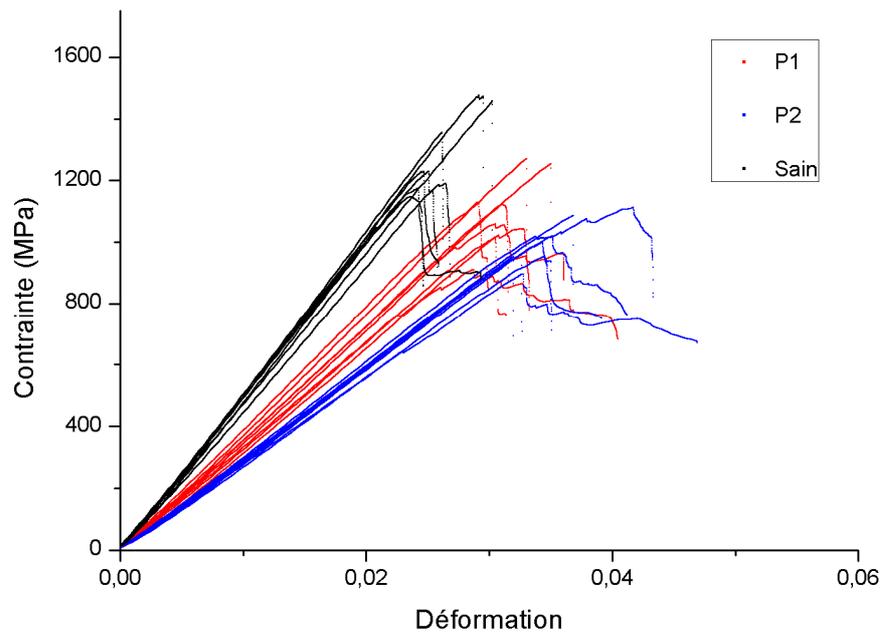


Figure 124 : Courbes contrainte=f(déformation) pour les essais de flexion 3 points pour les 2 matériaux avec un plissement P1 et un plissement P2, et le matériau sain, mises en œuvre sous infusion

La baisse des propriétés mécaniques en flexion 3 points pour les plissements sous infusion est légèrement supérieure à ceux des plissements avec porosité. Seulement le matériau sain sous infusion a des valeurs de module et de contrainte à la rupture supérieures ce qui explique que les valeurs de diminution soient supérieures. Du fait que les tendances soient les mêmes pour le plissement avec porosité et le plissement sans porosité, l'influence du plissement seul est confirmée dans le cas où il y a des porosités autour du plissement.

Matériau sain infusion	x	$E_{flexion}$ (GPa)	$R_{flexion}$ (MPa)	Matériau P1 infusion	x	$E_{flexion}$ (GPa)	$R_{flexion}$ (MPa)	Matériau P2 infusion	x	$E_{flexion}$ (GPa)	$R_{flexion}$ (MPa)
	1	42,15	1229,8		1	31,05	1042,8		1	27,69	909,8
	2	44,54	1190,4		2	33,87	1269,9		2	26,39	1017,3
	3	46,73	1228,9		3	29,29	1016,1		3	26,22	962,4
	4	43,74	1147,5		4	32,36	1058,1		4	24,06	951,9
	5	46,87	1457,5		5	35,60	1128,0		5	25,73	952,0
	6	44,32	1475,8		6	32,64	1121,5		6	26,47	895,4
	7	40,76	1356,8		7	30,96	1254,3		7	26,14	1001,1
	$\mu$	<b>44,16</b>	<b>1298,1</b>		$\mu$	<b>32,25</b>	<b>1127,2</b>		$\mu$	<b>26,10</b>	<b>955,7</b>
	$\sigma$	2,23	131,8		$\sigma$	2,08	100,7		$\sigma$	1,08	44,1
COV	0,0505	0,1015	COV	0,0644	0,0892	COV	0,0416	0,0461			

Tableau 83 : Résultats des essais de flexion 3 points avec les plaques mises en œuvre sous infusion

### VII.2.3.1 Analyse de la variance de la contrainte à la rupture

Les valeurs de la contrainte à la rupture en fonction du plissement sont illustrées sur la figure 125 avec le graphique avec barres d'erreur. Ce graphique confirme l'hypothèse que le plissement sous infusion a une influence sur la contrainte à la rupture. Cette hypothèse est validée par l'analyse de la variance, dont les résultats sont visibles dans le tableau 84, avec une valeur p-value bien inférieure au niveau de confiance.

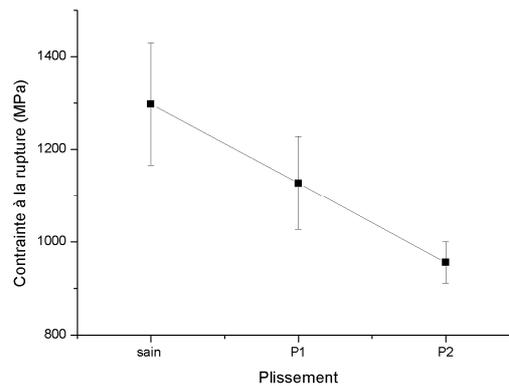


Figure 125 : Graphique, avec barres d'erreurs, des contrainte à la rupture en flexion 3 points pour le matériau sous infusion sain, avec un plissement P1 et un plissement P2

Source	DF	Somme des carrés	Variance	F	p-value
Inter-facteurs	2	410332,7	205166,4	20,908	2,0233E-5
Intra-facteur	12	176628,3	9812,7		
Total	14	586961,1			

Tableau 84 : Tableau ANOVA pour la contrainte à la rupture en fonction du plissement sous infusion

L'influence du plissement et de ses dimensions est définie avec un modèle polynomial d'ordre 2, qui est illustré sur la figure 126 et dont l'équation est :

$$\sigma_{flexion}^{rupture} = 1298,1 - 29,33L_{plissement} - 0,968L_{plissement}^2 \quad (74)$$

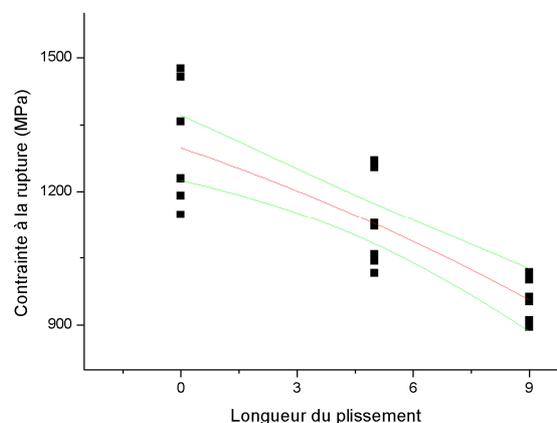


Figure 126 : Modèle polynôme d'ordre 2 (en rouge) et les courbes de confiance à 95% (en vert), pour la contrainte à la rupture en fonction de la longueur du plissement

### VII.2.3.2 Analyse de la variance du module de flexion

Les résultats du module de flexion pour les 3 matériaux sont présentés sur le graphique avec barres d'erreur de la figure 127. Le graphique montre que le plissement sous infusion a surement une influence sur le module de flexion. L'analyse de la variance, dont les résultats sont illustrés sur le tableau 85, confirme cette hypothèse.

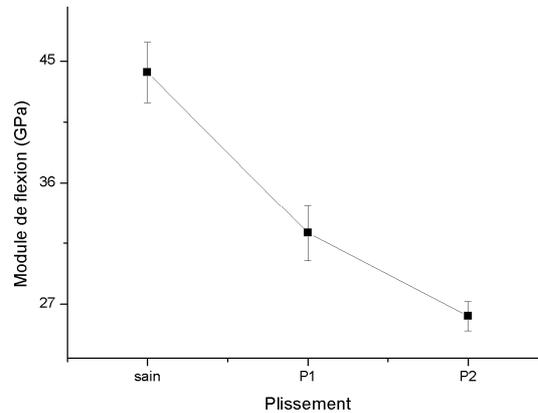


Figure 127 : Graphique, avec barres d'erreurs, des modules de flexion pour le matériau sous infusion sain, avec un plissement P1 et un plissement P2

Source	DF	Somme des carrés	Variance	F	p-value
Inter-facteurs	2	1180,0032	590,00	169,012	2,1583E-12
Intra-facteur	12	62,8353	3,4908		
Total	14	1242,839			

Tableau 85 : Tableau ANOVA pour le module de flexion en fonction du plissement sous infusion

L'influence du plissement et de ses dimensions est donc identifiée avec un modèle polynomial d'ordre 2, dont l'équation est présentée ci-dessous, qui est visible sur la figure 128.

$$E_f = 44,158 - 2,849L_{\text{plissement}} + 0,0937L_{\text{plissement}}^2 \quad (75)$$

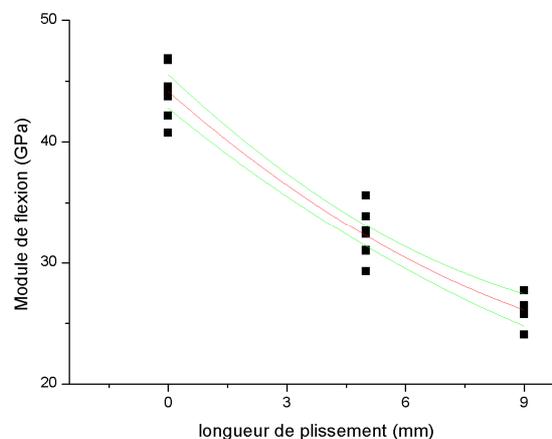


Figure 128 : Modèle polynomiale d'ordre 2 (en rouge) et les courbes de confiance à 95% (en vert), pour le module de flexion en fonction de la longueur du plissement

## VIII. Conclusion de la campagne d'essais quasi-statique

Afin d'identifier et d'analyser l'influence des défauts de porosité et de plissement sur le comportement mécanique d'un composite stratifié, une série d'essais quasi-statique a été réalisée afin de mesurer les paramètres mécaniques caractéristiques du matériau sain et avec défauts. Ces paramètres correspondent aux paramètres d'un modèle orthotrope élastique linéaire qui permettra de modéliser le stratifié par la suite, mais aussi aux paramètres mécaniques en flexion. Les essais quasi-statiques utilisés dans cette étude sont définis par des normes qui précisent le protocole à mettre en place pour chaque essai. Une fois les essais réalisés, les résultats sont analysés statistiquement à l'aide d'une analyse de la variance pour confirmer si l'influence du défaut observé sur un paramètre est statistiquement significative compte tenu de la variabilité induite par l'essai et le matériau. Si le défaut a une influence statistiquement significative sur le paramètre, un modèle linéaire ou polynomial d'ordre 2 est appliqué afin de définir cette influence. Le tableau 86 synthétise les résultats des analyses de l'influence du défaut de porosité, à travers des essais à 1,2% de porosité et 3,0% de porosité, et l'influence du défaut de plissement avec des essais avec un petit plissement P1 et un grand plissement P2. Pour chaque paramètre mécanique caractéristique, le tableau indique la baisse de la valeur du paramètre. Lorsque le défaut a une influence statistiquement significative, le tableau représente la valeur sur un fond vert. Le fond vert clair correspond à une influence moyenne qui implique une baisse de valeur inférieure à 20% et le fond vert foncé correspond à une influence forte du défaut qui implique une baisse de propriété supérieure à 20%.

Pour le défaut de porosité, l'influence des pores est significative dans toutes les directions de chargement, que ce soit dans le sens longitudinal, transversale, en cisaillement ou hors-plans. Les modules de rigidité, qui ont des baisses de valeurs allant jusqu'à 15% en compression, sont moins impactés par la présence de pores que les modules de cisaillement qui ont des baisses de valeurs allant jusqu'à 38% pour un taux de porosité de 3,0%. Cela est attendu car ce dernier paramètre est lié davantage à la résine. Cependant, les contraintes à la rupture en cisaillement interlaminaire ne sont pas impactées alors que les modules le sont. Le module d'Young n'est pas très sensible au taux de porosité mais les modules de rigidité transverse et en compression le sont un peu, tout comme les contraintes à la rupture en traction longitudinale, transversale et en compression. La porosité influence donc le comportement mécanique d'un composite stratifié, particulièrement en cisaillement, mais aussi le comportement à la rupture de manière générale ce qui est aussi attendu compte tenu de l'interaction forte entre des défauts et les contraintes qui vont probablement développer de la fissuration.

L'étude en flexion 3 points permet de confirmer l'influence de la porosité sur le comportement mécanique, mais elle permet aussi d'identifier l'influence du défaut de plissement sur le comportement mécanique d'un composite stratifié. Les essais mettent en évidence le fait que le défaut de plissement a une influence plus importante sur le comportement en flexion 3 point que le défaut de porosité.

L'influence des défauts de porosité et de plissement est donc déterminée en quasi-statique. Une étude en fatigue est ensuite mise en place afin de confirmer ou non l'influence de ces défauts sur le comportement en fatigue.

Les modèles polynomiaux construits à partir de cette campagne d'essais permettent d'estimer les effets du taux de porosité et des plissements sur les propriétés mécaniques en comportement élastique linéaire orthotrope ou à la rupture. A partir d'une mesure du taux de porosité par US, par exemple, il est ainsi possible d'estimer directement les propriétés mécaniques du matériau et de valider ou non si celles-ci sont acceptables.

	Diminution de la valeur moyenne		Diminution de la valeur moyenne	
	1,2%	3,0%	P1	P2
$E_{11}$ (GPa)	X	X	X	X
$E_{22}$ (GPa)	2,3%	10,7%	X	X
$E_{\text{compression}}$ (GPa)	6,4%	15,6%	X	X
$G_{12}$ (GPa)	23,1%	38,4%	X	X
$G_{13}$ (GPa)	27,8%	37,8%	X	X
$G_{23}$ (GPa)	17,2%	34,5%	X	X
$\nu_{12}$	8,5%	8,6%	X	X
$\nu_{21}$	X	X	X	X
$R_{\parallel}^t$ (MPa)	4,6%	14,4%	X	X
$R_{\perp}^t$ (MPa)	20,1%	27,6%	X	X
$R_{\perp\parallel}$ (MPa)	9,3%	16,0%	X	X
$R_{\parallel}^c$ (MPa)	0%	15,5%	X	X
$\tau_{nl}$ (MPa)	X	X	X	X
$\tau_{nt}$ (MPa)	X	X	X	X
$E_{\text{flexion}}$ (GPa)	2,2%	11,8%	11,3%	23,8%
$R_{\text{flexion}}$ (MPa)	12,4%	15,6%	4,7%	17%

**Tableau 86 : Récapitulatif de l'influence du défaut de porosité et de plissement sur les paramètres mécaniques pour divers cas de chargement**