

# Caractérisation de comportement mécanique en quasi-statique et influence des défauts

## Introduction

Pour déterminer l'influence des deux défauts étudiés, à savoir la porosité et le plissement, une étude du comportement mécanique est mise en place. Cette partie a permis d'identifier les propriétés mécaniques des différents matériaux à la fois pour quantifier l'influence des défauts mais aussi pour pouvoir alimenter des modèles numériques incluant la variabilité et qui font l'objet d'une autre thèse menée dans le projet SIMSCEF.

## Modèle mécanique du matériau

Dans cette étude, le modèle mécanique sera établi pour le matériau sain et avec porosité afin de pouvoir les modéliser numériquement. Pour le cas avec porosité il s'agira finalement d'une homogénéisation. Pour le plissement c'est différent car il est préférable de considérer le matériau comme sain, avec de la porosité autour du plissement, mais le plissement sera considéré en le modélisant réellement dans un modèle éléments finis pour définir son influence.

Le matériau sain, et avec porosité, sont identifiés par un modèle élastique orthotrope linéaire qui est défini selon la loi de Hooke par sa matrice de rigidité :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{13}}{E_{11}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{22}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_{33}} & -\frac{\nu_{32}}{E_{33}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} \quad (43)$$

L'étude mécanique se base sur une série d'essais statiques qui permettent de déterminer chacun des paramètres mécaniques caractéristiques du matériau avec ou sans défauts. Ces paramètres sont les modules élastiques  $E_{11}$  et  $E_{22}$ , les modules de cisaillement  $G_{23}$ ,  $G_{13}$  et  $G_{12}$ , et les coefficients de poisson  $\nu_{12}$ . Ces paramètres sont définis dans le repère suivant :

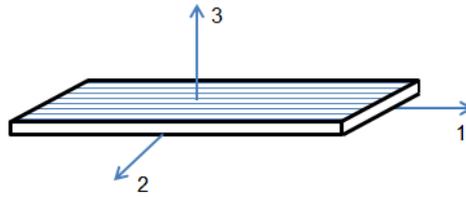


Figure 83 : Schéma du repère du modèle orthotrope

Réellement, la série d'essais statiques ne permet de définir que les paramètres suivants :

- Essai de traction à  $0^\circ$ , norme NF EN ISO 527  $\rightarrow E_{11}$  et  $\nu_{12}$
- Essai de traction à  $90^\circ$ , norme NF EN ISO 527  $\rightarrow E_{22}$  et  $\nu_{21}$
- Essai de traction à  $\pm 45^\circ$ , norme NF EN ISO 14129  $\rightarrow G_{12}$
- Essai de cisaillement – Flexion appuis rapprochés, norme NF EN ISO 14130  $\rightarrow G_{13}$  et  $G_{23}$

L'étude étant sur un stratifié unidirectionnel, des égalités se retrouvent comme  $\nu_{12} = \nu_{13}$ ,  $\nu_{21} = \nu_{31}$  et  $E_{22} = E_{33}$ . Les moyens techniques ne permettent pas de caractériser le coefficient de Poisson  $\nu_{23}$ , donc la valeur du paramètre pour la modélisation numérique du projet sera prise dans la bibliographie. Des essais de compression sur des éprouvettes à  $0^\circ$  sont mises en place afin d'observer l'influence de la porosité en compression.

Des essais statiques de flexion 3 points sont ajoutés afin de déterminer l'influence du plissement en quasi-statique et de valider le modèle numérique du projet. Chaque essai est effectué sur un minimum de 5 éprouvettes afin d'observer la variabilité des résultats et de valider la robustesse des données.

## Critère de rupture

Les essais statiques permettent aussi de déterminer les paramètres mécaniques à la rupture du matériau sain et avec défauts. Ces paramètres permettent d'alimenter le critère de rupture choisi qui validera le modèle numérique dans le projet.

Le choix du critère de rupture s'est fait entre 3 critères utilisés par Adwen et Daher : le critère de Yamada-Sun, le critère de Tsai-Hill et le critère de Puck. Finalement, le critère de rupture choisi est le critère de Puck selon les résultats de l'étude de M. J. Hinton et al. [1] qui ont comparé plusieurs critères sur 150 cas de chargement et ont classé les critères en fonction de la qualité des prédictions. Le tableau 47 énumère les résultats des travaux de M. J. Hinton et al. en classant les critères en fonction du nombre de résultats A, B et C telles que :

- A : Prédiction avec  $\pm 10\%$  par rapport à la valeur expérimentale ;
- B : Prédiction entre  $\pm 10\%$  et  $\pm 50\%$  par rapport à la valeur expérimentale ;
- C : Prédiction supérieure à  $\pm 50\%$  par rapport à la valeur expérimentale ;
- NA : Pas de valeurs.

Le critère de Puck est le critère qui a obtenu le plus de A. On retrouve derrière le critère de Tsai qui est en fait un critère de Hill modifié, et le critère de Yamada-sun, désigné ici par Sun. Ceci s'explique par le fait que le critère de Puck prend en compte non seulement la rupture de la matrice mais aussi l'apparition du délaminage. De plus, il ajoute une composante transverse.

Grade type	A	B	C	NA	A+B
Zinoviev	53	43	29	0	96
Bogetti	51	44	30	0	95
Puck	64	30	31	0	94
Cuntze	62	32	31	0	94
Tsai	50	35	40	0	85
Sun(L)	52	31	42	0	83
Edge	50	32	43	0	82
Huang	42	38	45	0	80
Mayes	52	27	46	0	79
Wolfe	39	31	55	0	70
Hart-Smith3	39	30	41	15	69
Chamis2	44	24	53	4	68
Rotem	37	30	58	0	67
Hart-Smith1	41	16	23	45	57
Hart-Smith2	36	19	25	45	55
Sun(NL)	21	17	21	66	38
Eckold	20	14	48	43	34
McCartney	10	4	4	107	14
Cuntze-B	59	38	28	0	97
Tsai-B	57	36	32	0	93
Mayes-B	58	33	34	0	91
Wolfe-B	53	32	40	0	85
Edge-B	51	34	40	0	85
Huang-B	43	37	45	0	80
McCartney-B	26	13	19	67	39

**Tableau 47 : Comparaison des différents critères de rupture pour 125 cas de chargement différents [1]**

Le critère de Puck différencie donc la rupture des fibres et la rupture de la matrice, et est défini tel que :

- Rupture des fibres :

$$f_{E(F)} = \begin{cases} \frac{\sigma_1}{R_{\parallel}^t} = 1 & \text{pour } \sigma_1 \geq 0 \\ \frac{\sigma_1}{R_{\parallel}^c} = 1 & \text{pour } \sigma_1 \leq 0 \end{cases} \quad (44)$$

Où  $R_{\parallel}^t$  est la contrainte à la rupture en traction longitudinale et  $R_{\parallel}^c$  est la contrainte à la rupture en compression longitudinale.

- Rupture de la matrice :

$$f_{E(F)} = \begin{cases} \sqrt{\left[ \left( \frac{1}{R_{\perp}^t} - \frac{P_{\perp\psi}^t}{R_{\perp\psi}^A} \right) - \sigma_n(\theta) \right]^2 + \left( \frac{\tau_{nt}(\theta)}{R_{\perp\perp}^A} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{nl}(\theta)}{R_{\perp\parallel}} \right)^2} + \frac{P_{\perp\psi}^t}{R_{\perp\psi}^A} \sigma_n(\theta) = 1 & \text{pour } \sigma_n \geq 0 \\ \sqrt{\left( \frac{\tau_{nt}(\theta)}{R_{\perp\perp}^A} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{nl}(\theta)}{R_{\perp\parallel}} \right)^2 + \left( \frac{P_{\perp\psi}^c}{R_{\perp\psi}^A} \sigma_n(\theta) \right)^2} + \frac{P_{\perp\psi}^c}{R_{\perp\psi}^A} \sigma_n(\theta) = 1 & \text{pour } \sigma_n < 0 \end{cases} \quad (45)$$

Où  $R_{\perp}^t$  est la contrainte à la rupture en traction transversale,  $R_{\perp\parallel}$  est la contrainte à la rupture en traction à  $\pm 45^\circ$ ,  $R_{\perp\perp}^A$  est la résistance en compression transversale et  $R_{\perp\psi}^A$  la résistance en cisaillement définies telles que :

$$\frac{P_{\perp\psi}^{t,c}}{R_{\perp\psi}^A} = \frac{P_{\perp\perp}^c}{R_{\perp\perp}^A} \cos^2\psi + \frac{P_{\perp\psi}^{t,c}}{R_{\perp\psi}^A} \sin^2\psi \quad \text{avec} \quad \cos^2\psi = \frac{\tau_{nt}^2}{\tau_{nt}^2 + \tau_{nl}^2} \quad \text{et} \quad \sin^2\psi = \frac{\tau_{nl}^2}{\tau_{nt}^2 + \tau_{nl}^2} \quad (46)$$

Où  $R_{\perp}^c$  est la contrainte à la rupture en compression transversale,  $\tau_{nt}$  et  $\tau_{nl}$  sont les contraintes de cisaillement dans le plan de rupture, parallèle et perpendiculaire à la direction des fibres.  $P_{\perp\psi}^{t,c}$ ,  $P_{\perp\psi}^c$ ,  $P_{\perp\perp}^c$  et  $P_{\perp\psi}^{t,c}$  sont des paramètres déterminés expérimentalement à l'aide de l'équation 5.

### III. Analyse de la variance

Ce travail ayant pour objectif d'étudier la variabilité des données, les résultats des essais sont traités avec une analyse de la variance (ANOVA) afin de déterminer au mieux l'influence du défaut sur le comportement mécanique. L'analyse de la variance est un test qui détermine si la moyenne de deux ou plusieurs échantillons de données est équivalente ou non, en d'autres termes s'il y a une variation statistiquement significative entre deux ou plusieurs échantillons de données.

L'étude statistique des résultats est définie pour chaque essai telle que :

- Analyse de la variance pour chaque paramètre à un niveau de risque de 0,05 ;
- Si l'ANOVA valide l'hypothèse d'une influence statistiquement significative :
  - Détermination d'un modèle polynômial d'ordre 2 afin de mesurer l'influence du défaut ;
- Si L'ANOVA invalide l'hypothèse d'une influence statistiquement significative :
  - Recherche de possibles points aberrants dus à des erreurs de manipulation ou des erreurs de mesure ;
  - Points aberrants par rapport à un agrégat de résultat à l'aide du test de Dixon ;
  - Nouvelle analyse de la variance ;
  - Conclusion.

Par exemple, soit des données mesurées en  $k$  nombre d'échantillons, où  $y_{ij}$  représente la valeur de l'observation  $i^{\text{ème}}$  ( $i=1, 2, \dots, n_j$ ) pour le  $j^{\text{ème}}$  niveau de gamme, alors l'analyse de la variance peut s'écrire :

$$y_{ij} = u + t_j + \varepsilon_{ij}, j = 1, 2, \dots, k; i = 1, 2, \dots, n_j \quad (47)$$

Où  $u$  est une constante,  $t_j$  l'effet de l'échantillon  $j$  et  $\varepsilon_{ij}$  l'erreur qui suit une loi Normal.

L'hypothèse nulle  $H_0$  est que les moyennes des échantillons de données sont équivalentes et l'hypothèse alternative  $H_1$  est qu'une moyenne est différente des autres, ce qui s'exprime par :

$$H_0 : \mu = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k \quad (48)$$

$$H_1 : \mu_p \neq \mu_q \text{ pour } p \geq 1, q \leq k \quad (49)$$

Où  $\mu_j$  est la moyenne du  $j^{\text{ème}}$  échantillon.

Pour tester l'hypothèse, la variation totale d'un échantillon doit être divisée entre les groupes d'échantillon et à l'intérieur des groupes. L'utilisation du F-test permet de déterminer si les deux variations sont différentes. L'analyse de la variance s'appuie alors sur le carré de la moyenne respective de chaque partie pour estimer la variation :

$$\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2 = \sum_{j=1}^k n_j (\bar{y}_j - \bar{y})^2 + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_j)^2 \quad (50)$$

Où le terme de gauche est appelé « Somme des carrés total » qui représente la variance totale, le second terme « sommes de carrés due au facteur » qui représente la variabilité inter-facteur, et le troisième terme « somme des carrés de l'erreur ». L'équation 9 se simplifie telle que :

$$SS_{Total} = SS_{facteur} + SS_{erreur} \quad (51)$$

Lorsque l'hypothèse  $H_0$  est vraie, les  $k$  niveaux des données sont distribués normalement et indépendamment, avec une moyenne  $\mu$  et une variance  $\sigma^2$ . Soit la statistique F telle que :

$$F = \frac{MS_{facteur}}{MS_{erreur}} = \frac{\frac{SS_{facteur}}{(k-1)}}{\frac{SS_{erreur}}{(n-k)}} \quad (52)$$

F suit une distribution  $F_{(k-1, n-k)}$  où  $MS_{facteur}$  est la moyenne des carrés des facteurs et  $MS_{erreur}$  la moyenne des carrés des erreurs, et qui sont définis par le rapport de la somme des carrés par le nombre de degrés de liberté associé. Pour un certain niveau de confiance  $\alpha$ , si F dépasse la valeur critique  $F_{(k-1, n-k, \alpha)}$ , qui se trouve dans le tableau des valeurs de la distribution F, la probabilité *p-value*, qui est calculé à partir de la table de distribution du Khi-deux, est inférieure au niveau de confiance  $\alpha$  et donc l'hypothèse nulle est rejeté. Par exemple, si la P value vaut 0,04 comparée à 0,05 (5 % de risque).

Typiquement, les résultats de l'analyse de la variance sont présentés dans un tableau appelé ANOVA comme ci-dessous :

Source de la variance	Somme des carrés des écarts	Degrés de liberté	Variance	F	p-value
Inter-facteurs ou modèle	$SS_{facteur}$	$k-1$	$MS_{facteur}$	$\frac{MS_{facteur}}{MS_{erreur}}$	$P\{F \geq F_{(k-1, n-k, \alpha)}\}$
Intra-facteur ou erreur	$SS_{erreur}$	$n-k$	$MS_{erreur}$		
Total	$SS_{totale}$	$n-1$			

Tableau 48: Tableau des résultats de l'analyse de la variance

Si l'analyse de la variance valide l'hypothèse que le paramètre varie significativement, un modèle polynomial d'ordre 2 est déterminé par la méthode des moindres carrés qui minimise la somme des carrés des écarts entre la courbe théorique et les points expérimentaux et qui se base sur le maximum de vraisemblance, présenté en Chapitre 2. Par exemple pour un jeu de données  $(x_i, y_i)$  avec  $i = 1, 2, \dots, n$ , où  $X$  est la variable indépendante et  $Y$  est la variable dépendante, une régression polynomiale ajuste les données à un modèle du type :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \dots + \beta_k x^k + \varepsilon \quad (53)$$

Où  $\varepsilon$  est le terme d'erreur qui est présumé indépendant et distribué normalement, et  $k$  le degré de régression. Pour ajuster le modèle, les résidus, définis avec l'équation 13, sont présumés distribués normalement avec une moyenne égale à 0 et une variance  $\sigma_i^2$ .

$$res_i = y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2 + \dots + \beta_k x_i^k) \quad (54)$$

Alors le maximum de vraisemblance estimé pour le paramètre  $\beta_k$  peut être obtenu en minimisant le Khi-carré qui est défini par :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad \text{et} \quad w_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (55)$$

Où  $\sigma_i$  est l'erreur de mesure qui, si elle est inconnue, est mise à 1.

Le calcul d'estimation des coefficients est une procédure de calcul matricielle. D'abord, la régression du modèle est réécrite sous la forme :

$$Y = XB + E \quad (56)$$

Soit :

$$Y = \begin{bmatrix} y_1/\sigma_1 \\ y_2/\sigma_2 \\ \vdots \\ y_n/\sigma_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1/\sigma_1 & x_1^2/\sigma_1 & x_1^3/\sigma_1 & \dots & x_1^k/\sigma_1 \\ 1/\sigma_2 & x_2^2/\sigma_2 & x_2^3/\sigma_2 & \dots & x_2^k/\sigma_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/\sigma_n & x_n^2/\sigma_n & x_n^3/\sigma_n & \dots & x_n^k/\sigma_n \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (57)$$

L'estimation du vecteur B est la solution des équations linéaires et peut être exprimée telle que :

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} = (X'X)^{-1}X'Y \quad (58)$$

Où  $X'$  est la transposée de  $X$ .

L'identification des points aberrants se fait par le test de Dixon provenant des travaux de Dean et Dixon [2]. Le test consiste à comparer la distance entre les points les plus éloignés de la moyenne et les points immédiatement voisins à l'étendue totale des résidus. Dans le cas d'une moyenne, les résidus correspondent aux mesures. Les résidus, ou mesures dans ce cas-là sont classés tels que :



Figure 84 : Principe du test de Dixon

Des rapports  $Q_1$  et  $Q_2$  sont déterminés à partir des mesures, à l'aide d'équations qui dépendent du nombre de mesure. Dans cette étude quasi-statique, chaque essai est reproduit 5 fois avec 5 éprouvettes différentes ce qui amène  $n=5$  mesures. Les rapports  $Q_1$  et  $Q_2$  sont alors définis par les équations suivantes.

$$Q_1 = \frac{R_2 - R_1}{R_n - R_1} \quad \text{et} \quad Q_2 = \frac{R_n - R_{n-1}}{R_n - R_1} \quad (59)$$

Les deux rapports sont alors comparés à une valeur critique  $Q_c$  qui est défini dans le tableau de Dixon en fonction du nombre de mesures et le niveau de confiance choisi, dans le cas de cette étude, le niveau de confiance est fixé à 5%. Si  $Q_1$  est supérieur à  $Q_c$ , alors la mesure 1 est aberrante et  $Q_2$  est supérieur à  $Q_c$ , alors la mesure  $n$  est aberrante. Pour une gamme de 5 mesures et un niveau de confiance de 5%,  $Q_c$  a une valeur de 0,642.

## IV. Essais de traction

### IV.1 Protocole d'essais

L'essai de traction permet à travers la mesure de certaines propriétés mécaniques d'établir la loi de comportement contrainte-déformation du matériau dans un repère donné dans une certaine direction.

Ainsi, il faut caractériser le module d'Young  $E$  et le coefficient de Poisson  $\nu$  à  $0^\circ$  et  $90^\circ$  grâce à des essais de traction dans les mêmes directions, le module de cisaillement  $G_{12}$  par l'essai sur un matériau avec des fibres orientées à  $\pm 45^\circ$ , ainsi que des grandeurs significatives comme l'allongement, la déformation et la contrainte à la rupture.

Pour effectuer ces essais, la norme NF EN ISO 527 pour les essais à  $0^\circ$  et  $90^\circ$  a été utilisée ainsi que la norme NF EN ISO 14129 pour les essais à  $\pm 45^\circ$ , qui préconisent toutes les deux, des éprouvettes rectangulaires avec les dimensions indiquées ci-dessous sur la figure 85 :

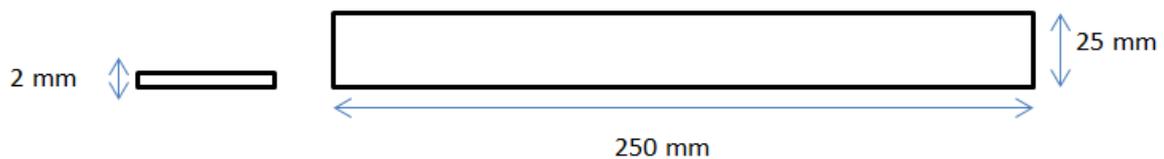


Figure 85 : Dimensions des éprouvettes de traction

Des talons biseautés en aluminium de 50 mm de longueur et 2 mm d'épaisseur sont collés aux extrémités des éprouvettes afin de concentrer les efforts dans la zone utile, d'éviter les glissements et les possibles effets de cisaillement. Les schémas des chargements des trois essais de traction à  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  et  $\pm 45^\circ$  sont présentés sur la figure 86.

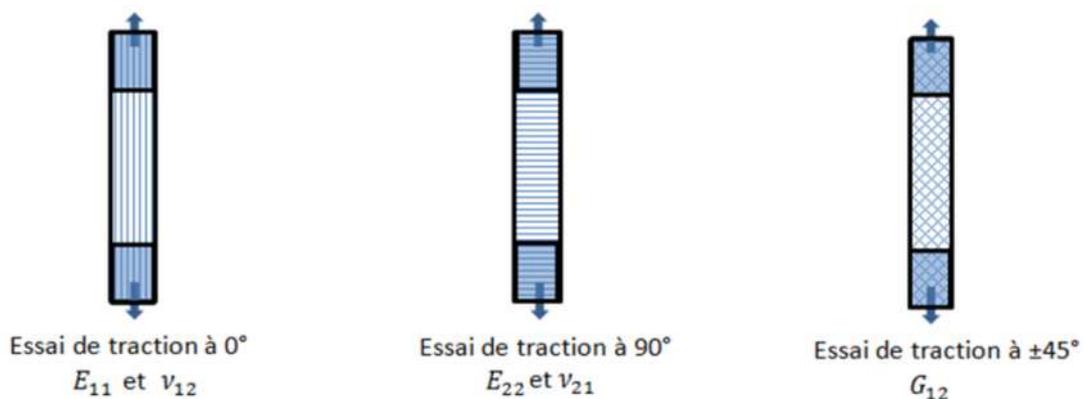


Figure 86 : Schéma de chargement des 3 essais de traction

Les essais de traction se font à une vitesse de chargement de 1 %/min soit pour nos dimensions une vitesse de déformation de 1 mm/min.

## IV.2 Eprouvettes à $0^\circ$

### IV.2.1 Résultats

L'essai de traction sur des éprouvettes à  $0^\circ$  permet de déterminer les paramètres suivants : le module de rigidité longitudinal  $E_{11}$ , le coefficient de Poisson longitudinal  $\nu_{12}$  et la contrainte à la rupture en traction longitudinale  $R_{||}^t$ .

Le module de rigidité  $E_{11}$  se calcule avec la pente de la courbe de la contrainte en fonction de la déformation longitudinale, visible sur la figure 87, pour une déformation comprise entre 0,05% et 0,25%.

Le coefficient de Poisson se calcule par le rapport entre la déformation transversale et la déformation longitudinale sur la même plage de déformation que pour le calcul de  $E_{11}$ . La figure 5 illustre la contrainte en fonction de la déformation pour les 5 essais à  $0^\circ$ , pour le matériau sain, avec 1,2% de porosité et 3,0% de porosité. Au vu des courbes, les essais sont bien répétables. Les coefficients de variation sont globalement inférieurs à 7%.

Les résultats des essais de traction à  $0^\circ$  pour le matériau sain, avec 1,2 % de porosité et 3,0 % de porosité sont visibles sur le tableau 49. Les résultats présentent une certaine variabilité avec des coefficients de variation allant de 3,4% à 14,1 %. Ces variations dans les résultats sont dues à la variabilité microstructurale et à la variabilité liée à l'essai lui-même : l'utilisateur qui ne reproduit pas parfaitement le même essai ainsi que les incertitudes de mesures. L'augmentation du taux de porosité semble affecter les 3 paramètres avec une légère diminution même si une courbe du matériau porosité + et deux courbes du matériau porosité - ont des tendances supérieures aux autres.

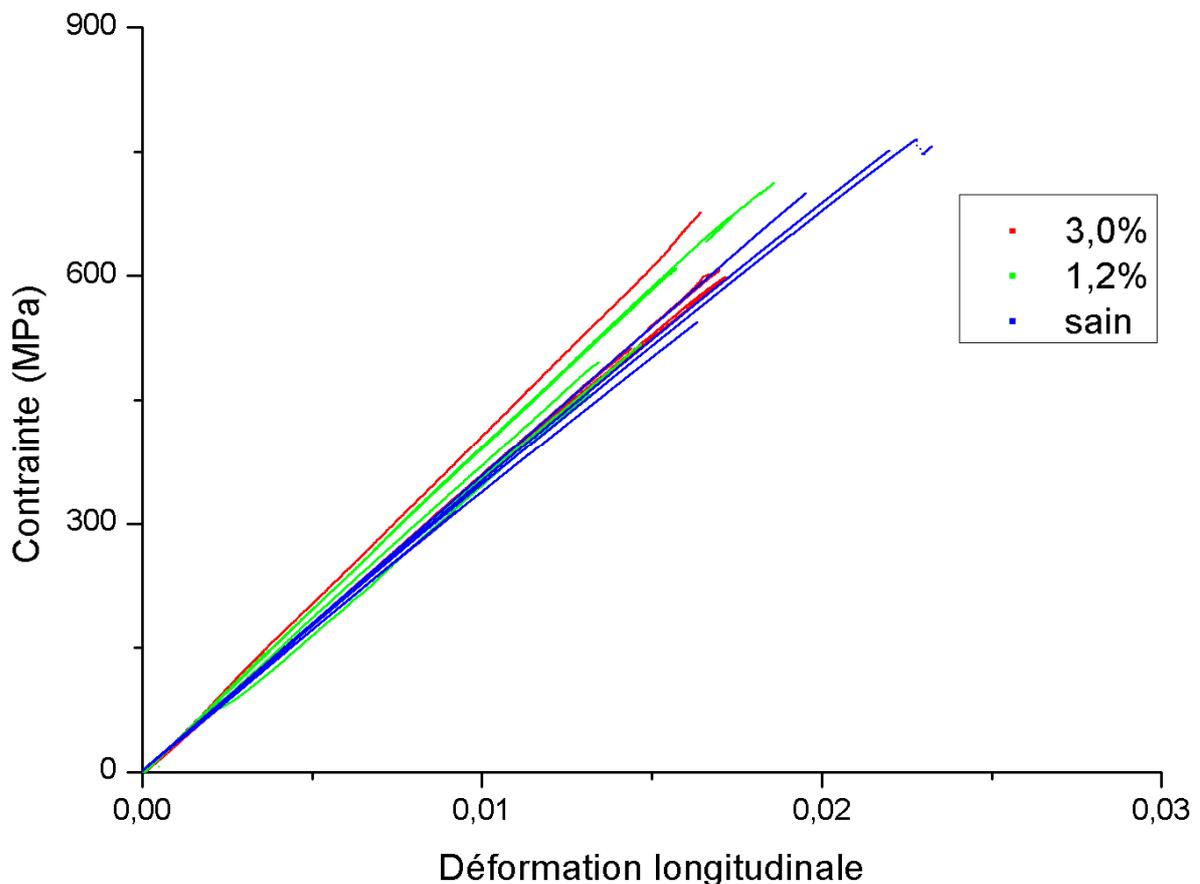


Figure 87 : Courbe contrainte=f(déformation) pour les essais de traction à  $0^\circ$

Matériau sain	x	$E_{11}$ (GPa)	$\nu_{12}$	$R_{ij}^t$ (MPa)	Matériau avec 1,2 % de porosité	x	$E_{11}$ (GPa)	$\nu_{12}$	$R_{ij}^t$ (MPa)	Matériau avec 3,0 % de porosité	x	$E_{11}$ (GPa)	$\nu_{12}$	$R_{ij}^t$ (MPa)
	1	37,440	0,341	655,8		1	39,82	0,333	741,2		1	36,142	0,311	512,2
	2	37,799	0,374	700,2		2	40,351	0,326	646,7		2	41,939	0,375	676,2
	3	36,379	0,345	707,2		3	36,327	0,324	680,1		3	36,243	0,303	688,6
	4	40,259	0,389	771,2		4	35,631	0,305	667,2		4	36,103	0,309	520,2
	5	33,482	0,322	720,1		5	37,114	0,332	659,4		5	35,635	0,318	646,5
	$\mu$	<b>37,07</b>	<b>0,354</b>	<b>710,9</b>		$\mu$	<b>37,85</b>	<b>0,324</b>	<b>678,9</b>		$\mu$	<b>37,21</b>	<b>0,323</b>	<b>608,7</b>
	$\sigma$	2,459	0,026	41,5		$\sigma$	2,117	0,011	36,9		$\sigma$	2,653	0,029	85,95
	C					C					C			
O	0,0663	0,075	0,058	O	0,0559	0,034	0,054	O	0,0710	0,091	0,141			
V				V				V						

Tableau 49 : Résultats des essais de traction à 0° pour le matériau sain, avec 1,2% de porosité et 3,0 % de porosité

## IV.2.2 Analyse de la variance

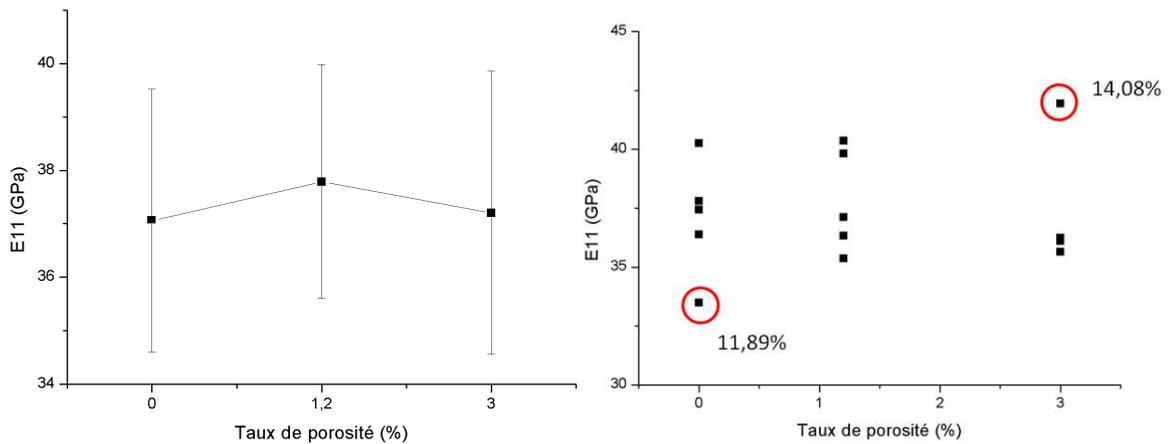
### IV.2.2.1 Module d'Young $E_{11}$

La figure 88 représente les valeurs des modules d'Young pour les échantillons sains, avec 1,2 % de porosité et 3,0 % de porosité. Graphiquement, le module semble varier avec la porosité mais l'analyse de la variance exclut cette hypothèse. Comme indiquée sur le tableau 50, la valeur de p-value est supérieure au niveau de confiance à 5 % (valeur de la colonne F) et donc, les variations du module d'Young  $E_{11}$  en fonction du taux de porosité ne sont pas statistiquement significative compte tenu de la variabilité des résultats.

Des résultats aberrants peuvent être à l'origine de l'invalidation de l'hypothèse que le module  $E_{11}$  varie avec le taux de porosité. Les résultats de chaque échantillon sont alors analysés pour voir s'il n'y a pas de points aberrants dus à des erreurs de mesures ou de mise en place de l'essai. Ces points aberrants sont les points mesures extrêmes. La figure 88 présente les valeurs des modules pour chaque échantillon, deux points cerclés en rouge semblent incorrects avec des écarts proches de 15% par rapport à la moyenne.

Source	DF	Somme des carrés	Variance	F	p-value
Inter-facteurs	2	1,46861	0,7343	0,12322	<b>0,88517</b>
Intra-facteur	12	71,51137	5,95928		
Total	14	72,97998			

Tableau 50 : Tableau ANOVA pour le module d'young  $E_{11}$



**Figure 88 : Graphique des modules d'Young  $E_{11}$  pour le matériau sain, avec 1,2 % de porosité et 3% de porosité, avec barres d'erreurs à gauche et avec valeurs individuelles à droite**

X	1	2	3	4	5	$\mu$	$\sigma$	COV
$E_{11}$ (GPa) Sain	37,799	37,799	36,379	40,259	33,482	37,07	2,653	0,0710
$E_{11}$ (GPa) porosité -	39,82	40,351	36,327	35,631	37,114	37,85	2,117	0,0559
$E_{11}$ (GPa) porosité +	36,142	41,939	36,243	36,103	35,635	37,21	2,653	0,0710

**Tableau 51 : Valeur des modules d'Young mesurés avec en rouge les valeurs qui semblent aberrants**

Pour le matériau sain, le point en rouge amène après calcul à un rapport Q égale à 0,427 inférieur à  $Q_c$  donc il n'est pas aberrant. Pour le matériau porosité +, le point en rouge donne un rapport Q de 0,903 et donc le point est considéré comme aberrant. Une deuxième analyse de la variance est effectuée en enlevant le point aberrant mais le résultat est le même, le taux de porosité n'a pas d'influence statistiquement significative compte tenu de la valeur p-value, visible dans le tableau 52.

Source	DF	Somme des carrés	Variance	F	p-value
Inter-facteurs	2	6,92576	3,46286	0,87395	0,44437
Intra-facteur	12	43,58547	3,96231		
Total	14	50,51115			

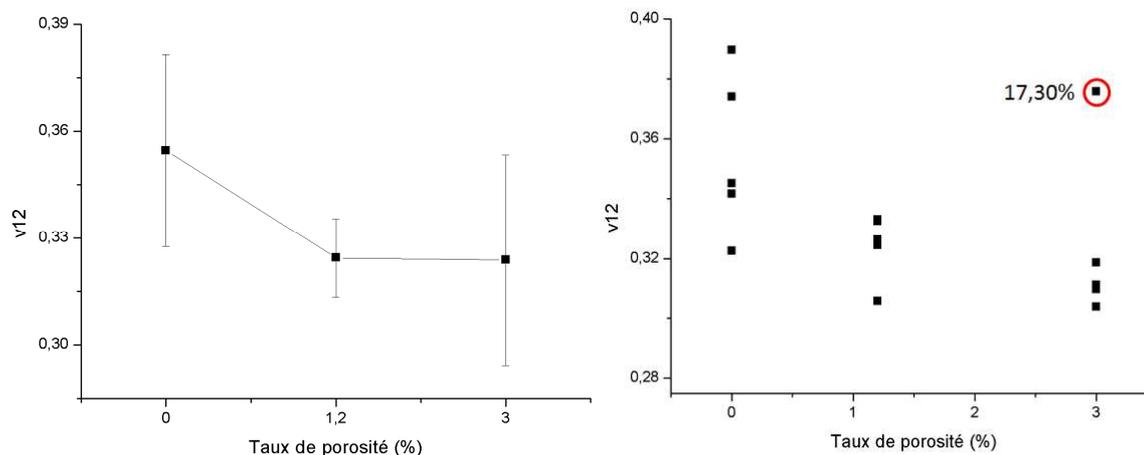
**Tableau 52 : Tableau ANOVA pour le module d'young  $E_{11}$**

#### IV.2.2.2 Coefficient de Poisson $\nu_{12}$

Les coefficients de Poisson  $\nu_{12}$  des matériaux sain, avec 1,2% de porosité et 3,0% de porosité sont présentés sur la figure 89 avec le graphique des valeurs individuelles et le graphique avec barres d'erreur. Le coefficient de Poisson longitudinal semble décroître avec l'augmentation du taux de porosité.

L'analyse de la variance des données, dont les résultats sont visibles dans le tableau 53, réfute cette hypothèse avec une valeur p-value de 0,10757 supérieure à notre niveau de confiance. Le graphique de droite sur la figure 89 montre un point éloigné sur les valeurs de  $v_{12}$  pour le taux de porosité à 3,0%, avec un écart de 17,3% par rapport aux autres valeurs.

Le test de Dixon confirme que ce point est aberrant avec un rapport Q de 0,792. Ce point est donc considéré comme aberrant et est supprimé des données, et le coefficient de Poisson moyen est recalculé avec une valeur de 0,311 au lieu de 0,323.



**Figure 89 : Graphique des coefficients de poisson  $v_{12}$  pour le matériau sain, avec 1,2 % de porosité et 3% de porosité, avec barres d'erreurs à gauche et avec valeurs individuelles à droite**

x	1	2	3	4	5	$\mu$	$\sigma$	COV
$v_{12}$ Sain	0,341	0,374	0,345	0,389	0,322	<b>0,354</b>	0,026	0,075
$v_{12}$ porosité -	0,333	0,326	0,324	0,305	0,332	<b>0,324</b>	0,011	0,034
$v_{12}$ porosité +	0,311	<b>0,375</b>	0,303	0,309	0,318	<b>0,323</b>	0,029	0,091

**Tableau 53 : Valeur des coefficients de Poisson mesurés avec en rouge la valeur qui semble aberrant**

Source	DF	Somme des carrés	Variance	F	p-value
Inter-facteurs	2	0,0031	0,00155	2,70036	<b>0,10757</b>
Intra-facteur	12	0,00688	5,733E-4		
Total	14	0,00998			

**Tableau 54 : Tableau ANOVA avant réajustement pour le coefficient de poisson  $v_{12}$**

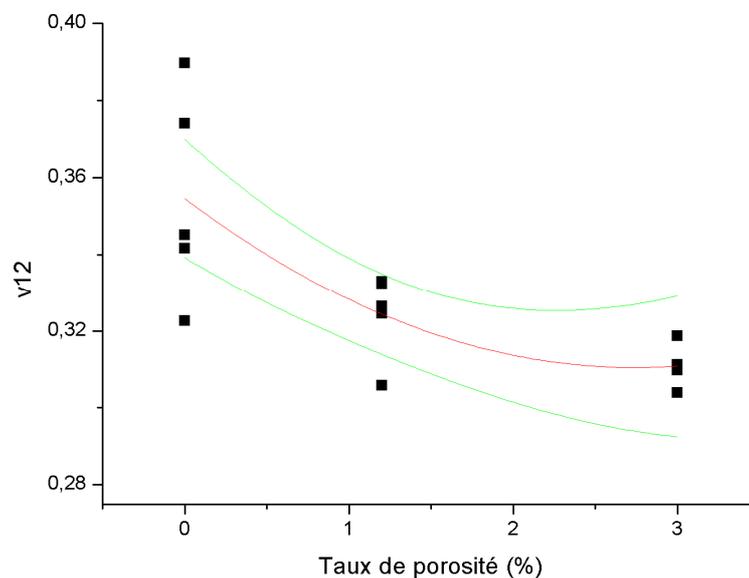
Une nouvelle analyse de la variance est effectuée après avoir supprimé le point aberrant et les résultats de cette analyse sont énumérés dans le tableau 54. La valeur p-value obtenue par cette nouvelle analyse est inférieure au niveau de confiance et donc, l'analyse de la variance valide le fait que le taux de porosité a une influence statistiquement significative sur le coefficient de poisson  $v_{12}$ .

Source	DF	Somme des carrés	Variance	F	p-value
Inter-facteurs	2	0,00463	0,00231	7,271	<b>0,00972</b>
Intra-facteur	12	0,0035	3,181E-4		
Total	14	0,00812			

**Tableau 55 : Tableau ANOVA après réajustement pour le coefficient de poisson  $\nu_{12}$**

L'influence du taux de porosité sur le coefficient de poisson  $\nu_{12}$  est modélisée par régression polynomiale d'ordre 2 dont la courbe est visible sur la figure 90. L'équation du modèle et les valeurs des coefficients sont définies dans l'équation 60 :

$$\nu_{12} = 0,3546 - 0,0322P\% + 0,0059P\%^2 \quad (60)$$



**Figure 90 : Modèle polynomiale d'ordre 2 (en rouge) et les courbes de confiance à 95% (en vert), pour le coefficient de poisson  $\nu_{12}$  en fonction du taux de porosité**

#### IV.2.2.3 Contrainte à la rupture $R_{\parallel}^t$

La figure 91 montre le graphique, avec barres d'erreurs, de la contrainte à la rupture  $R_{\parallel}^t$  en fonction du taux de porosité. Cette contrainte semble diminuer avec l'augmentation du taux de porosité ce qui indique l'influence des pores sur la contrainte. Une expertise plus fine permettrait d'identifier l'interaction entre la porosité et la répartition des contraintes. La mécanique de la rupture indique clairement que la contrainte d'activation des défauts diminue avec l'augmentation de leur taille. L'analyse de la variance, dont les résultats sont visibles dans le tableau 57, confirme cette hypothèse avec une valeur p-value inférieur au niveau de confiance de l'étude.

Pour caractériser l'influence du taux de porosité sur la contrainte à la rupture, un modèle polynomial d'ordre 2 est défini. Il est représenté sur la figure 92 et son équation est telle que :

$$R_{\parallel}^t = 710,9 - 21,7P\% + 4,11P\%^2 \quad (61)$$

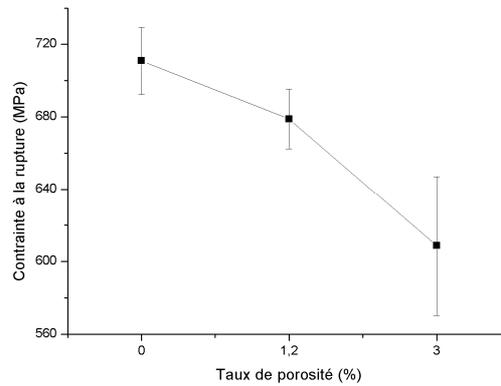


Figure 91 : Graphique des contraintes à la rupture  $R_{\parallel}^t$  pour le matériau sain, avec 1,2 % de porosité et 3% de porosité, avec barres d'erreurs

x	1	2	3	4	5	$\mu$	$\sigma$	COV
$R_{\parallel}^t$ (MPa) Sain	655,8	700,2	707,2	771,2	720,1	<b>710,9</b>	41,5	0,058
$R_{\parallel}^t$ (MPa) porosité -	741,2	646,7	680,1	667,2	659,4	<b>678,9</b>	36,9	0,054
$R_{\parallel}^t$ (MPa) porosité +	512,2	676,2	688,6	520,2	646,5	<b>608,7</b>	85,95	0,141

Tableau 56 : Valeur des contraintes à la rupture à 0° mesurées

Source	DF	Somme des carrés	Variance	F	p-value
Inter-facteurs	2	27307,7	13653,8	3,91647	<b>0,04906</b>
Intra-facteur	12	41835,2	3486,3		
Total	14	69142,9			

Tableau 57 : Tableau ANOVA pour la contrainte à la rupture  $R_{\parallel}^t$

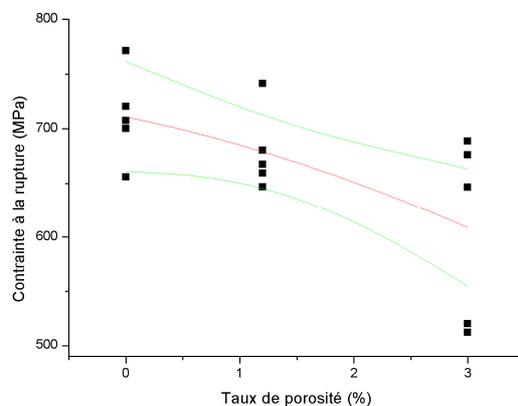


Figure 92 : Modèle polynomiale d'ordre 2 (en rouge) et les courbes de confiance à 95% (en vert), pour la contrainte à la rupture  $R_{\parallel}^t$  en fonction du taux de porosité

## IV.3 Eprouvettes à 90°

### IV.3.1 Résultats

L'essai de traction avec des éprouvettes à 90° permet l'identification du module de rigidité transversal  $E_{22}$ , le coefficient de poisson longitudinal  $\nu_{21}$  et la contrainte à la rupture en traction transversale  $R_{\perp}^t$ .

Le module de rigidité  $E_{22}$  se calcule comme précédemment avec la pente de la courbe de la contrainte en fonction de la déformation longitudinale de l'éprouvette, visible sur la figure 8, pour une déformation comprise entre 0,05% et 0,25%.

Le coefficient de Poisson se calcule par le rapport entre la déformation transversale et la déformation longitudinale sur la même plage de déformation que pour le calcul de  $E_{22}$ . La figure 93 illustre la contrainte en fonction de la déformation pour les 5 essais à 90° pour le matériau sain, avec 1,2% de porosité et 3,0% de porosité. Les courbes ont les mêmes tendances ce qui montre que les essais sont bien répétables. Cela est confirmé par la valeur du coefficient de variation qui est inférieure à 9 %.

Le tableau 58 énumère les résultats des essais de traction à 90° pour le matériau sain, le matériau à 1,2% de porosité et 3,0% de porosité. Les résultats des essais à 90° présentent une variabilité du même ordre de grandeur que celle des essais à 0°, avec un coefficient de variation qui varie entre 2,6% et 9,6%. Au vu des résultats, la porosité semble n'influer que sur la contrainte à la rupture avec une diminution de 27,5%.

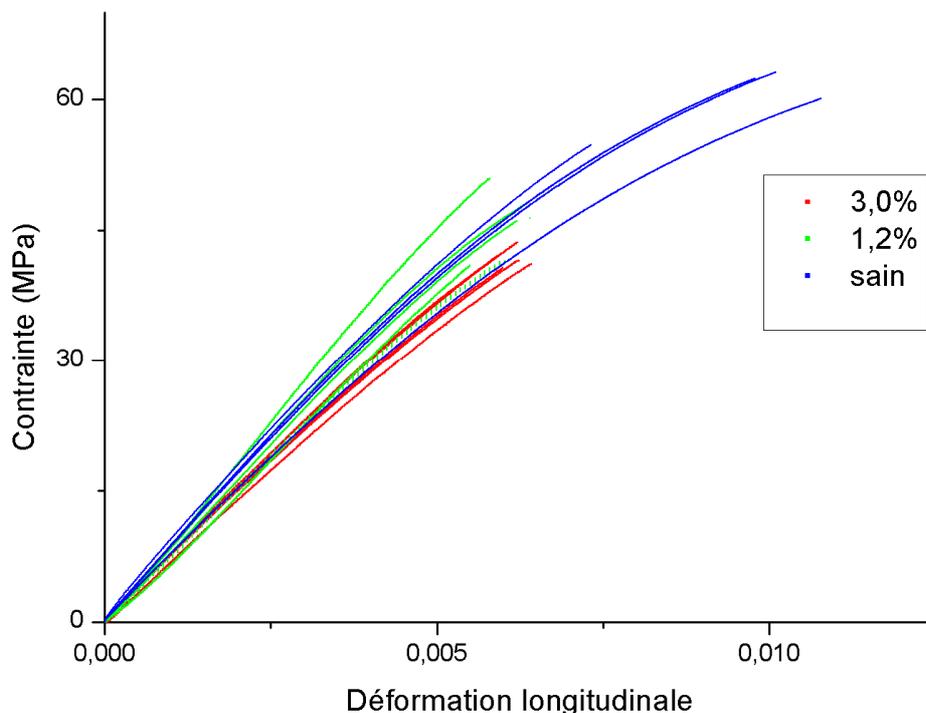


Figure 93 : Courbe contrainte=f(déformation) pour les essais de traction à 90°

Matériau sain	x	$E_{22}$ (GPa)	$\nu_{21}$	$R_1^t$ (MPa)	Matériau avec 1,2 % de porosité	x	$E_{22}$ (GPa)	$\nu_{21}$	$R_1^t$ (MPa)	Matériau avec 3,0 % de porosité	x	$E_{22}$ (GPa)	$\nu_{21}$	$R_1^t$ (MPa)
	1	6,955	0,0715	57,0		1	8,268	0,0854	45,57		1	7,040	0,0823	39,90
	2	8,168	0,0778	57,4		2	7,811	0,0777	39,61		2	7,703	0,0684	41,25
	3	8,452	0,0797	54,3		3	8,647	0,0899	46,75		3	7,199	0,0759	39,43
	4	8,476	0,0776	53,5		4	9,43	0,0879	49,72		4	7,301	0,0694	39,32
	5	8,013	0,0751	55,9		5	7,632	0,0882	40,6		5	7,738	0,0732	41,51
	$\mu$	<b>8,01</b>	<b>0,0763</b>	<b>55,62</b>		$\mu$	<b>8,37</b>	<b>0,0858</b>	<b>44,5</b>		$\mu$	<b>7,40</b>	<b>0,0739</b>	<b>40,28</b>
	$\sigma$	0,622	0,0032	1,69		$\sigma$	0,719	0,0048	4,26		$\sigma$	0,311	0,0056	1,03
	C					C					COV			
O	0,0777	0,0414	0,0303	O	0,0860	0,0560	0,0958		0,0420	0,0761	0,0256			
V				V										

Tableau 58: Résultats des essais de traction à 90° pour le matériau sain, avec 1,2% de porosité et 3,0 % de porosité

### IV.3.2 Analyse de la variance

#### IV.3.2.1 Module de rigidité $E_{22}$

Les valeurs du module de rigidité  $E_{22}$ , calculées à partir des essais de traction, en fonction du taux de porosité sont visibles sur la figure 94. La tendance observée ne semble pas concorder avec la physique avec une augmentation du module de 0% à 1,2% de porosité puis une diminution de 1,2% à 3,0% de porosité. L'analyse de la variance, dont les résultats sont visibles dans le tableau 60, invalide l'hypothèse que la porosité a une influence statistiquement significative sur le module de rigidité avec une valeur p-value légèrement supérieure au niveau de confiance.

Sur la figure 94, deux points semblent être incohérents, un à 0% de porosité et un autre à 1,2% de porosité. Ces deux points ayant, selon le test de Dixon, ont des rapports Q supérieur au rapport critique  $Q_c$ , et sont donc considérés comme des points aberrants.

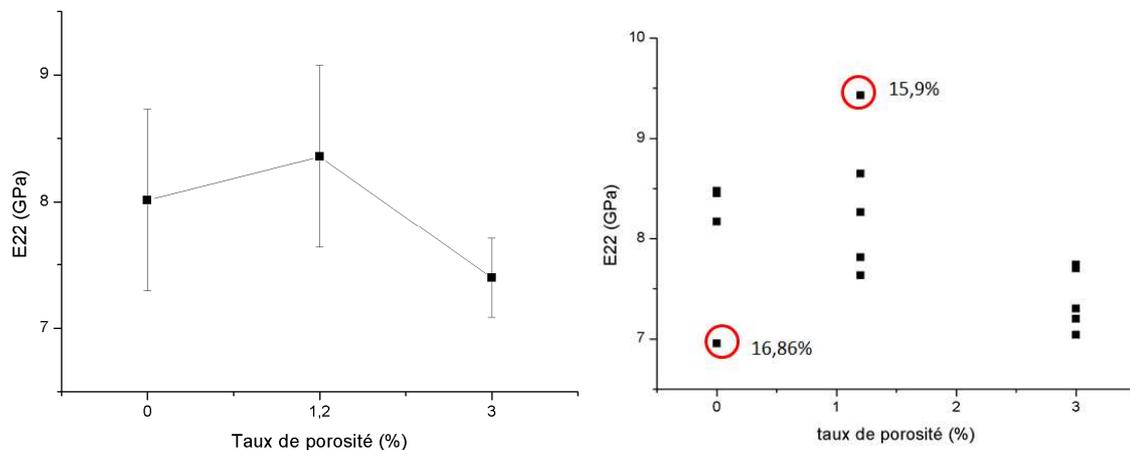


Figure 94 : Graphique des modules de rigidité  $E_{22}$  pour le matériau sain, avec 1,2 % de porosité et 3% de porosité, avec barres d'erreurs à gauche et avec valeurs individuelles à droite

x	1	2	3	4	5	$\mu$	$\sigma$	COV
$E_{22}$ (GPa) Sain	6,955	8,168	8,452	8,476	8,013	8,01	0,622	0,0777
$E_{22}$ (GPa) porosité -	8,268	7,811	8,647	9,43	7,632	8,37	0,719	0,086
$E_{22}$ (GPa) porosité +	7,040	7,703	7,199	7,301	7,738	7,40	0,311	0,042

Tableau 59 : Valeur des modules de rigidité mesurés avec en rouge les valeurs qui semblent aberrants

Source	DF	Somme des carrés	Variance	F	p-value
Inter-facteurs	2	2,35908	1,17954	3,24022	0,07827
Intra-facteur	12	4,00433	0,36403		
Total	14	6,36341			

Tableau 60 : Tableau ANOVA avant réajustement pour le module de rigidité  $E_{22}$

Une fois les points aberrants éliminés, les modules de rigidité  $E_{22}$  moyen sont recalculés, avec une valeur de 8,37 pour le matériau sain et 8,09 pour le matériau avec 1,2% de porosité, et une nouvelle analyse de la variance est effectuée dont les résultats sont énumérés dans le tableau 61. L'analyse valide alors le fait que le taux de porosité a une influence statistiquement significative sur le module de rigidité  $E_{22}$  avec une valeur p-value bien en dessous du niveau de confiance (0,05). Les données sont alors traitées afin d'appliquer un modèle polynomiale d'ordre 2 illustré sur la figure 95 et défini par l'équation 62.

Source	DF	Somme des carrés	Variance	F	p-value
Inter-facteurs	2	2,04922	1,02461	8,60075	0,00816
Intra-facteur	12	1,07217	0,11913		
Total	14	3,12139			

Tableau 61 : Tableau ANOVA après réajustement pour le module de rigidité  $E_{22}$

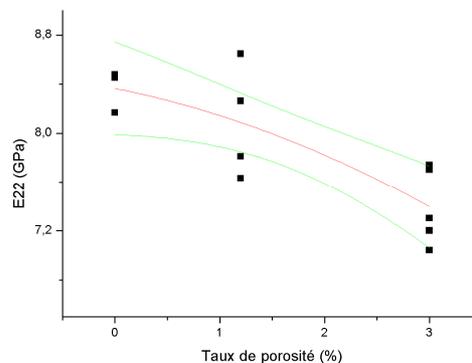


Figure 95 : Modèle polynomiale d'ordre 2 (en rouge) et les courbes de confiance à 95% (en vert), pour le module de rigidité  $E_{22}$  en fonction du taux de porosité

$$E_{22} = 8,3654 - 0,16955P\% + 0,05117P\%^2 \quad (62)$$

Le taux de porosité agit donc sur le module de rigidité  $E_{22}$  avec une diminution de celui-ci quand le taux de porosité augmente ce qui paraît cohérent.

#### IV.3.2.2 Coefficient de poisson $\nu_{12}$

Les résultats des coefficients de Poisson  $\nu_{21}$  en fonction du taux de porosité, illustrés sur la figure 96, présente une tendance qui, tout comme pour le module de rigidité, ne concorde pas avec la physique. Le coefficient augmente lorsque la porosité passe de 0% à 1,2%, alors qu'il diminue de 1,2% à 3,0% de porosité. Cette tendance s'explique par le fait que les données mesurées sont très faibles et l'erreur de mesure entraîne donc de grandes variations.

L'analyse de la variance, dont les résultats sont visibles dans le tableau 62, valide le fait que la porosité a une influence sur le coefficient de Poisson mais vu que la tendance est erronée, cette hypothèse est invalidée et il est considéré que le taux de porosité n'a pas d'influence sur le coefficient de poisson  $\nu_{21}$ .

L'analyse de la variance est bien valide car le coefficient de Poisson varie significativement de 0% à 1,2% de taux de porosité de même qu'entre 1,2% et 3,0% comme le montre la courbe visible sur la figure 96.

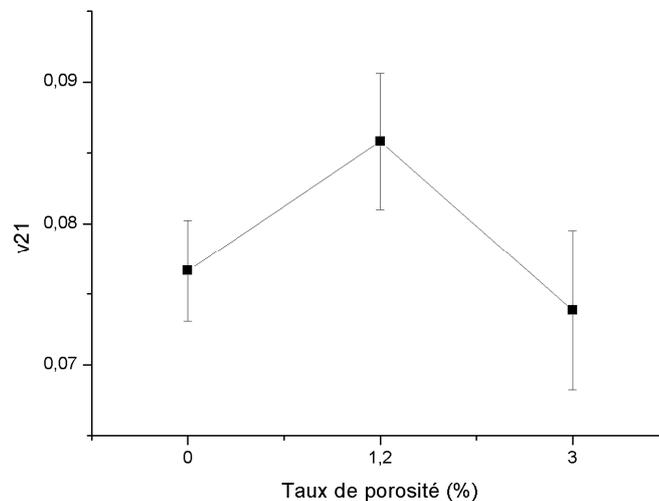


Figure 96 : Graphique, avec barres d'erreurs, des coefficients de Poisson  $\nu_{21}$  pour le matériau sain, avec 1,2 % de porosité et 3% de porosité

Source	DF	Somme des carrés	Variance	F	p-value
Inter-facteurs	2	3,8623E-4	1,9311E-4	8,2627	0,00644
Intra-facteur	12	2,5709E-4	2,3372E-4		
Total	14	6,4333E-4			

Tableau 62 : Tableau ANOVA pour le coefficient de Poisson  $\nu_{21}$

### IV.3.2.3 Contrainte à la rupture $R_{\perp}^t$

La figure 97 illustre les résultats des contraintes à la rupture en traction transversale en fonction du taux de porosité. Graphiquement, le taux de porosité a une influence certaine sur la contrainte à la rupture avec une diminution de 19,1% en passant de 0% à 1,2% de taux de porosité, et une diminution de 9,5% en passant de 1,2% à 3,0% de porosité.

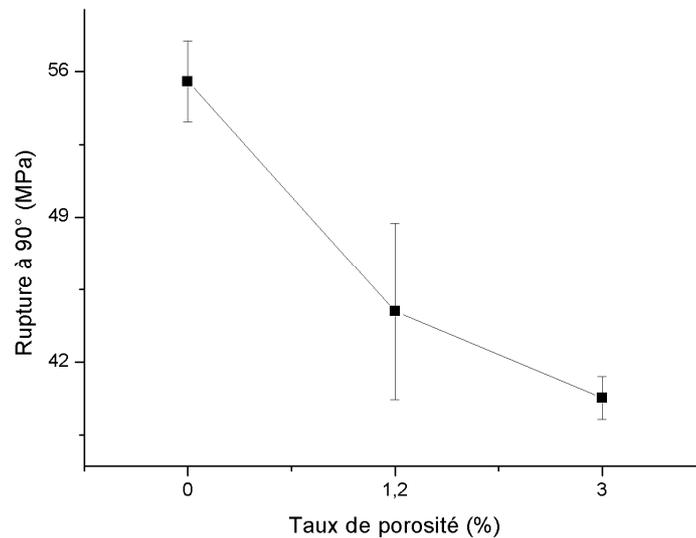


Figure 97 : Graphique, avec barres d'erreurs, des contraintes à la rupture  $R_{\perp}^t$  pour le matériau sain, avec 1,2 % de porosité et 3% de porosité

L'analyse de la variance confirme l'influence du taux de porosité sur la contrainte à la rupture en traction transversale, comme le montre les résultats de l'analyse dans le tableau 64, avec une valeur p-value bien inférieure au niveau de confiance.

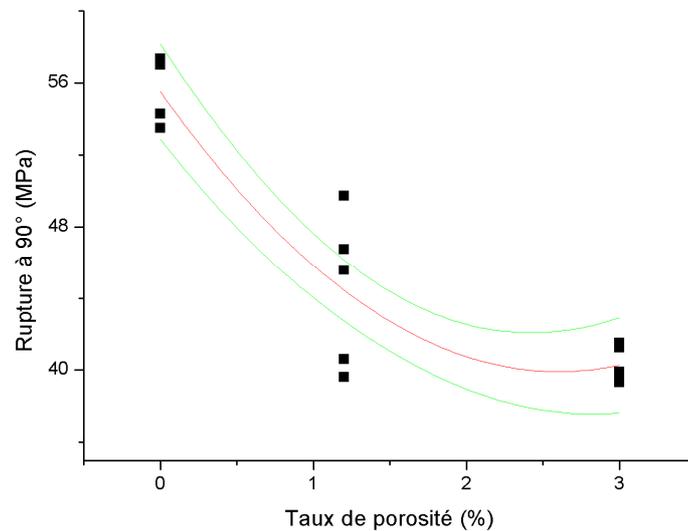
x	1	2	3	4	5	$\mu$	$\sigma$	COV
$R_{\perp}^t$ (MPa) Sain	57,0	57,4	54,3	53,5	55,9	<b>55,6</b>	1,69	0,0303
$R_{\perp}^t$ (MPa) porosité -	45,6	39,6	46,7	49,7	40,6	<b>44,5</b>	4,26	0,0958
$R_{\perp}^t$ (MPa) porosité +	39,9	41,2	39,4	39,3	41,5	<b>40,2</b>	1,03	0,0256

Tableau 63 : Valeur des contraintes à la rupture à 90° mesurées

Source	DF	Somme des carrés	Variance	F	p-value
Inter-facteurs	2	538,92359	269,4618	33,68243	<b>2,0417E-5</b>
Intra-facteur	11	88,00078	8,00007		
Total	13	629,92437			

Tableau 64 : Tableau ANOVA pour la contrainte de rupture en traction transversale  $R_{\perp}^t$

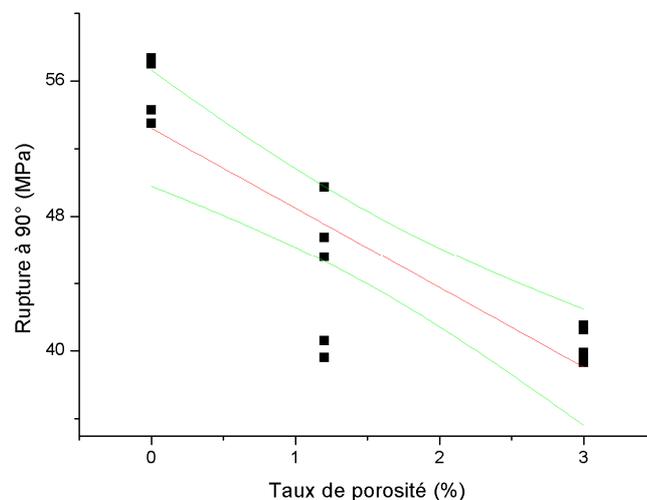
Pour caractériser cette influence, un modèle polynomial d'ordre 2 est appliqué aux données et ce modèle est visible sur la figure 98. Cependant, le modèle appliqué n'est pas correct car il a tendance à augmenter la contrainte à la rupture pour les taux de porosité supérieur à 2,5% ce qui n'est pas représentatif des données et de la physique. Il aurait fallu des données à des taux de porosité supérieurs à 3,0% pour pouvoir appliquer un modèle polynomial d'ordre 2 correct ou utiliser un ordre différent.



**Figure 98 : Modèle polynomiale d'ordre 2 (en rouge) et les courbes de confiance à 95% (en vert), pour la contrainte à la rupture en traction transversale  $R_{\perp}^t$  en fonction du taux de porosité**

Du fait que le modèle polynomial d'ordre 2 n'est pas efficace pour caractériser l'influence du taux de porosité sur la contrainte à la rupture en traction transversale, un modèle linéaire est choisi pour modéliser l'influence. Ce modèle est illustré sur la figure 99 et est défini par l'équation 63.

$$R_{\perp}^t = 52,21335 - 4,72319P\% \quad (63)$$



**Figure 99 : Modèle linéaire (en rouge) et les courbes de confiance à 95% (en vert), pour la contrainte à la rupture en traction transversale  $R_{\perp}^t$  en fonction du taux de porosité**

Bien que le polynôme d'ordre 1 représente bien l'évolution des données sur la plage de porosité explorée, toute extrapolation peut s'avérer dangereuse. Il faudra reconsidérer l'ensemble des valeurs pour établir un nouveau polynôme.

#### IV.4 Eprouvettes à $\pm 45^\circ$

L'essai de traction avec des échantillons dont les fibres sont orientées à  $\pm 45^\circ$  permet de déterminer les paramètres suivants : le module de cisaillement  $G_{12}$  et la contrainte à la rupture en cisaillement  $R_{\perp\parallel}$ . Les courbes des différents essais de traction à  $45^\circ$  sont présentées sur la figure 100. Deux comportements différents sont observés entre les matériaux avec porosité et le matériau sain qui semble être plus rigide mais moins déformable. Cela peut s'expliquer par le fait qu'à  $45^\circ$  la matrice joue un rôle prépondérant et donc la porosité ou le procédé peuvent influencer plus fortement les résultats. En effet, les plaques saines sont mises en œuvre sous presse alors que les plaques avec porosité sont fabriquées sous étuve.

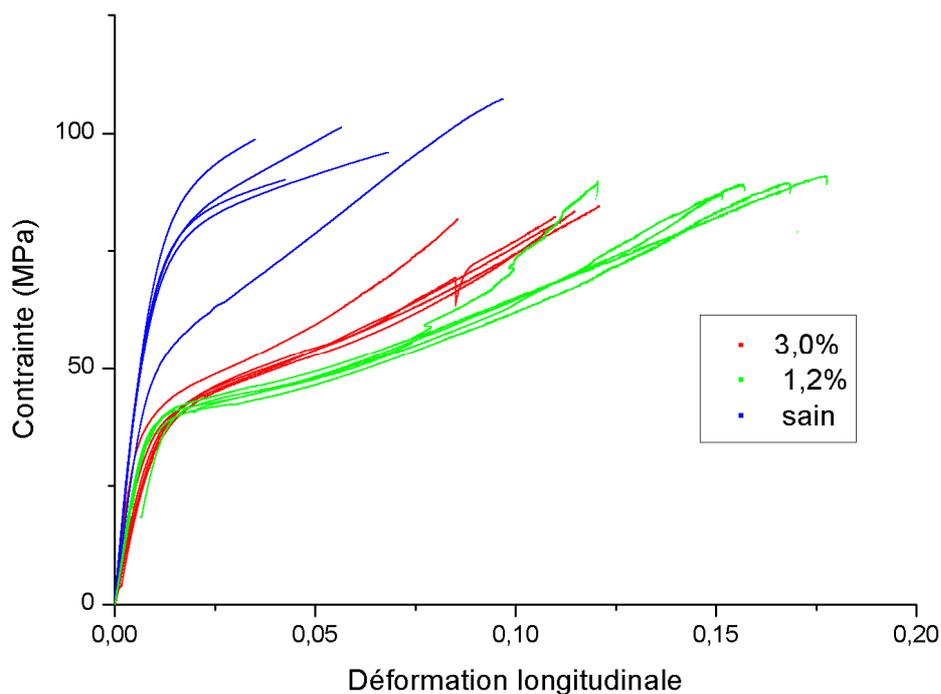


Figure 100 : Courbe contrainte=f(déformation) pour les essais de traction à  $\pm 45^\circ$

##### IV.4.1 Résultats

Le tableau 65 présente les résultats des essais de traction à  $45^\circ$  pour le matériau sain, le matériau à 1,2% et 3,0% de porosité. Les résultats des essais présentent une certaine variabilité avec un coefficient de variation qui varie entre 1,4% et 14,6%. Au vu des résultats, la porosité semble fortement influencer sur le module de cisaillement avec une diminution de 38,4% et sur la contrainte à la rupture en cisaillement avec une diminution de 16,0%.

Matériau sain	x	$G_{12}$ (GPa)	$R_{\perp\parallel}$ (MPa)	Matériau avec 1,2 % de porosité	x	$G_{12}$ (GPa)	$R_{\perp\parallel}$ (MPa)	Matériau avec 3,0 % de porosité	x	$G_{12}$ (GPa)	$R_{\perp\parallel}$ (MPa)
	1	4,416	98,22		1	3,890	90,9		1	3,603	84,5
	2	7,253	101,1		2	4,767	89,0		2	4,201	81,9
	3	6,086	107,5		3	3,770	89,8		3	2,982	82,1
	4	4,415	90,9		4	4,622	87,1		4	3,366	83,4
	5	6,582	95,9		5	4,420	89,4		5	3,011	81,84
	$\mu$	<b>5,570</b>	<b>98,7</b>		$\mu$	<b>4,294</b>	<b>89,2</b>		$\mu$	<b>3,433</b>	<b>82,97</b>
	$\sigma$	1,287	6,17		$\sigma$	0,443	1,37		$\sigma$	0,501	1,21
	COV	0,224	0,0624		COV	0,103	0,0154		COV	0,146	0,0146

Tableau 65 : Résultats des essais de traction à 45° pour le matériau sain, avec 1,2% de porosité et 3,0 % de porosité

#### IV.4.2 Analyse de la variance

##### IV.4.2.1 Module de cisaillement $G_{12}$

La figure 101 montre les résultats du module de cisaillement  $G_{12}$  en fonction du taux de porosité. Graphiquement, le taux de porosité a une influence certaine sur ce module avec une diminution de 23,1% en passant de 0% à 1,2% de taux de porosité, et une diminution de 10,1% en passant de 1,2% à 3,0% de porosité. La variabilité des essais diminue avec la présence de porosité ce qui peut s'expliquer par le fait que le comportement en cisaillement est dominé par les pores.

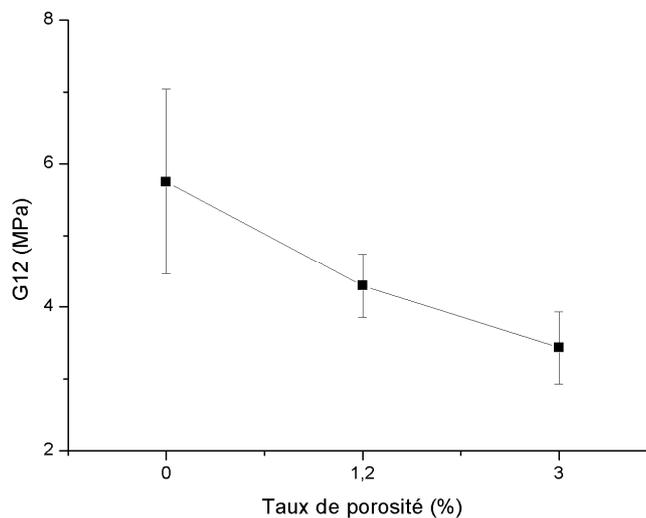


Figure 101 : Graphique, avec barres d'erreurs, des modules de cisaillement  $G_{12}$  pour le matériau sain, avec 1,2 % de porosité et 3,0 % de porosité

L'analyse de la variance des résultats confirme l'influence statistiquement significative du taux de porosité sur le module de cisaillement comme montré sur le tableau 67 avec une valeur de p-value inférieur au niveau de confiance.

x	1	2	3	4	5	$\mu$	$\sigma$	COV
$G_{12}$ (GPa) Sain	4,416	7,253	6,086	4,415	6,582	<b>5,57</b>	1,287	0,224
$G_{12}$ (GPa) porosité -	3,89	4,767	3,77	4,622	4,42	<b>4,29</b>	0,443	0,103
$G_{12}$ (GPa) porosité +	3,603	4,201	2,982	3,366	3,011	<b>3,43</b>	0,501	0,146

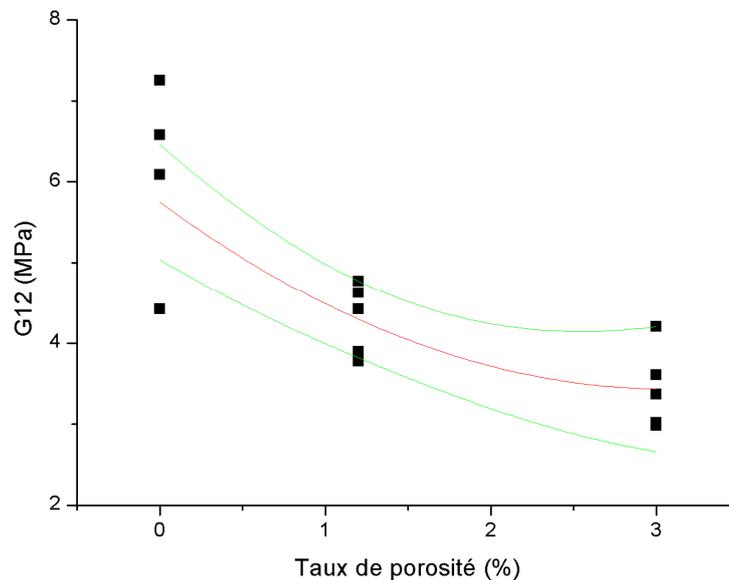
**Tableau 66 : Valeur des modules de cisaillement mesurés**

Source	DF	Somme des carrés	Variance	F	p-value
Inter-facteurs	2	13,72326	6,86163	9,78535	<b>0,00302</b>
Intra-facteur	12	8,41457	0,70121		
Total	14	22,13784			

**Tableau 67 : Tableau ANOVA pour le module de cisaillement  $G_{12}$**

Afin de caractériser cette influence, les données sur le module de cisaillement sont identifiées avec un modèle polynomial d'ordre 2 dont l'équation 64 est présentée ci-dessous ainsi que la courbe du modèle en figure 102.

$$G_{12} = 5,75027 - 1,50778P\% + 0,24508P\%^2 \quad (64)$$

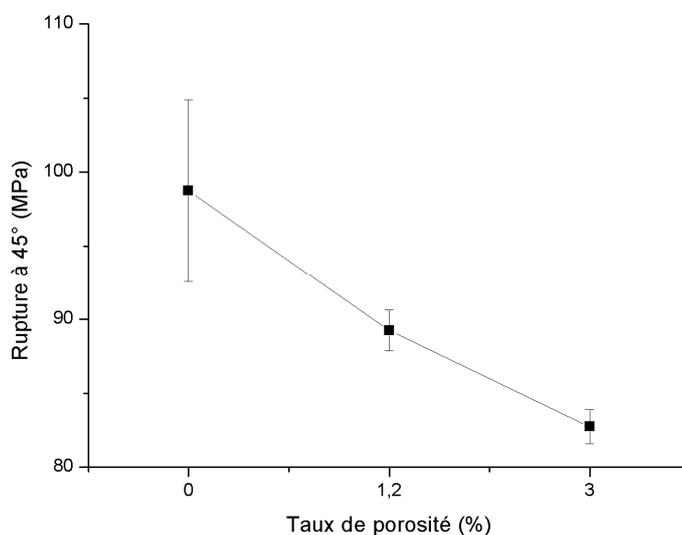


**Figure 102 : Modèle polynomiale d'ordre 2 (en rouge) et les courbes de confiance à 95% (en vert), pour le module de cisaillement  $G_{12}$  en fonction du taux de porosité**

#### IV.4.2.2 Contrainte à la rupture en cisaillement $R_{\perp\parallel}$

Les résultats des contraintes à la rupture en cisaillement  $R_{\perp\parallel}$  sont illustrés sur la figure 104 avec les résultats du matériau sain, avec 1,2% de porosité et 3,0% de porosité.

De même que pour le module de cisaillement, le comportement à la rupture en cisaillement est influencé par la présence de pores avec une diminution de la variabilité sur les résultats des essais avec les matériaux à 1,2% et 3,0% de porosité.



**Figure 103 : Graphique, avec barres d'erreurs, des contraintes à la rupture en cisaillement  $R_{\perp\parallel}$  pour le matériau sain, avec 1,2 % de porosité et 3% de porosité**

Cette influence des pores sur le comportement en cisaillement est aussi identifiée sur la diminution de la contrainte à la rupture de 9,3% en passant de 0% à 1,2% de porosité, et de 7% en passant de 1,2% à 3,0% de porosité. Cette influence est confirmée comme statistiquement significative par l'analyse de la variance dont les résultats sont visibles dans le tableau 69.

x	1	2	3	4	5	$\mu$	$\sigma$	COV
$R_{\perp\parallel}$ (MPa) Sain	98,22	101,1	107,5	90,9	95,9	<b>98,7</b>	6,17	0,0624
$R_{\perp\parallel}$ (MPa) porosité -	90,9	89,0	89,8	87,1	89,4	<b>89,2</b>	1,37	0,0154
$R_{\perp\parallel}$ (MPa) porosité +	84,5	81,9	82,1	83,4	81,84	<b>82,9</b>	1,21	0,0146

**Tableau 68 : Valeur des contraintes à la rupture à  $\pm 45^\circ$  mesurées**

Source	DF	Somme des carrés	Variance	F	p-value
Inter-facteurs	2	645,54149	322,77075	23,43197	<b>7,1778E-5</b>
Intra-facteur	12	165,2976	13,778		
Total	14	810,83909			

**Tableau 69 : Tableau ANOVA pour la contrainte de rupture en cisaillement  $R_{\perp\parallel}$**

Pour pouvoir représenter cette influence, un modèle polynomial d'ordre 2, dont l'équation 65 est définie ci-dessous, est appliqué aux données sur la contrainte à la rupture en cisaillement et est illustré sur la figure 104.

$$R_{\perp\parallel} = 98,724 - 9,622P\% + 1,4322P\%^2 \quad (65)$$

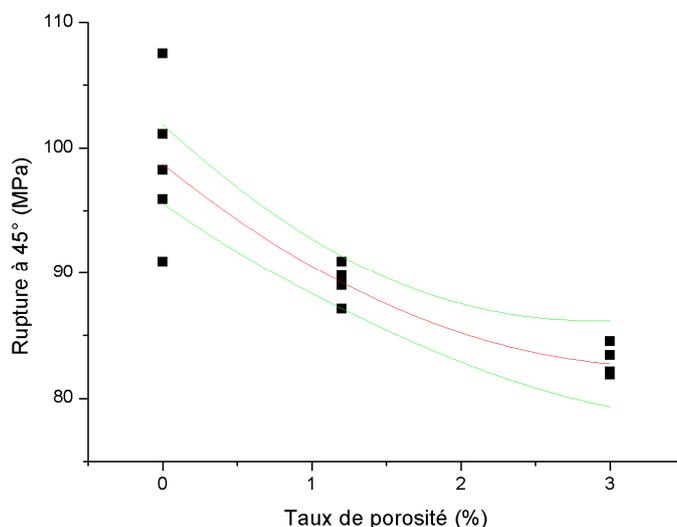


Figure 104 : Modèle polynomiale d'ordre 2 (en rouge) et les courbes de confiance à 95% (en vert), pour la contrainte à la rupture en cisaillement  $R_{\perp\parallel}$  en fonction du taux de porosité

## V. Essai de compression à 0°

### V.1 Protocole d'essai

L'essai de compression permet d'obtenir le module de compression  $E_{compression}$  avec un essai sur une éprouvette à 0°, ainsi que des grandeurs significatives comme la déformation et la contrainte à la rupture  $R_{\parallel}^C$ . Cet essai a été réalisé en respectant la norme EN ISO 14126 qui définit, notamment, les dimensions des éprouvettes rectangulaires qui sont illustrées ci-dessous sur la figure 105 :

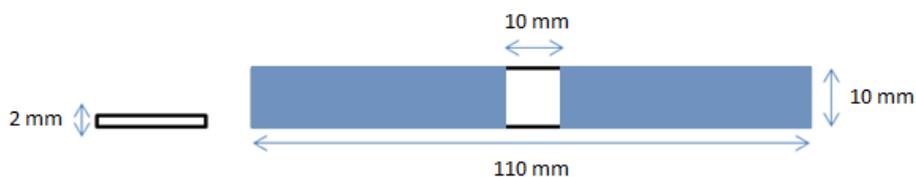


Figure 105 : Dimensions des éprouvettes de compression

Des talons biseautés en aluminium de 50 mm de longueur et 2 mm d'épaisseur sont collés aux extrémités des éprouvettes afin de délimiter la zone de l'éprouvette en chargement, d'éviter les glissements et les possibles effets de cisaillement. Les schémas de chargement de l'essai de compression à 0° est présenté sur la figure 106.



Figure 106 : Schéma de chargement d'un essai de compression

La difficulté de cet essai est d'appliquer un chargement longitudinal parfaitement uniforme sans inclure de flambement. Pour cela, plusieurs montages existent dont le montage IITRI qui est utilisé pour cette étude et dont le schéma est visible sur la figure 107. Des colonnes permettent d'aligner parfaitement les deux mors. De plus, les deux mors se séparent en deux parties, à savoir un bloc mors massif, afin d'éviter tout mouvement du mors, et un système d'auto-serrage. Ce système de montage a été prêté par l'ESTACA de Laval. Afin de vérifier que le chargement n'applique pas de flambement, des jauges d'extensométrie sont placées sur chaque face de l'éprouvette pour contrôler la déformation longitudinale appliquée sur chaque face. La vitesse de chargement est de 1 mm/min.

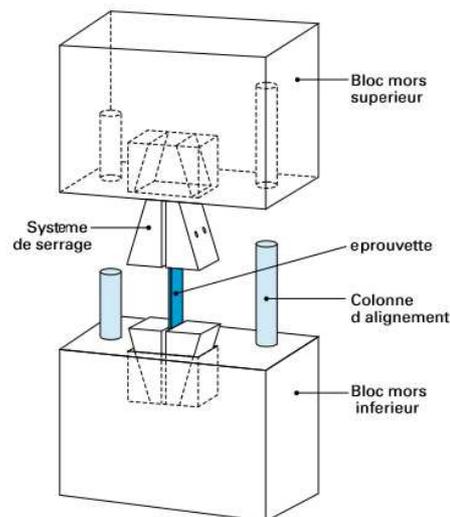


Figure 107 : Schéma du montage IITRI ASTM D 3410/B (selon EN ISO 14126, méthode 1) [2]

## V.2 Résultats

Seules 5 éprouvettes ont été équipées de jauges. Le module de compression a été déterminé pour seulement les deux premières éprouvettes saines et à 1,2% de porosité et la première éprouvette à 3,0%. De plus, du fait de la forte charge appliquée sur les talons, un grand nombre d'essais n'ont pas atteint la contrainte à la rupture avant le décollement des talons. Les valeurs des paramètres déterminées à partir des essais sont visibles dans le tableau 70.

Matériau sain	x	$E_{compression}$ (GPa)	$R_{\parallel}^C$ (MPa)	Matériau avec 1,2 % de porosité	x	$E_{compression}$ (GPa)	$R_{\parallel}^C$ (MPa)	Matériau avec 3,0 % de porosité	x	$E_{compression}$ (GPa)	$R_{\parallel}^C$ (MPa)
	1	35,96	X		1	35,50	693,0		1	X	X
	2	37,97	633,0		2	33,78	X		2	31,22	X
	3	X	696,9		3	X	X		3	X	X
	4	X	X		4	X	700,5		4	X	560,2
	5	X	769,9		5	X	X		5	X	623,1
	$\mu$	<b>36,97</b>	<b>700,0</b>		$\mu$	<b>34,64</b>	<b>696,8</b>		$\mu$	<b>31,22</b>	<b>591,6</b>
	$\sigma$	1,42	68,9		$\sigma$	1,21	5,3		$\sigma$	X	44,5
	COV	0,039	0,098		COV	0,0323	0,008		COV	X	0,075

Tableau 70 : Résultats des essais de compression à 0° pour le matériau sain, avec 1,2% de porosité et 3,0 % de porosité

Avec les essais qui ont été concluants et les résultats qui en découlent, l'hypothèse d'une influence du taux de porosité sur le module de compression est renforcée. Le module de compression diminue avec le taux de porosité, de 6,4% pour un taux de porosité de 1,2% et 15,6% pour un taux de porosité de 3,0%. Pour la contrainte à la rupture en compression, l'influence du taux de porosité est moins évidente avec aucune diminution de la contrainte pour la plaque porosité – et une diminution de 15,5% de la contrainte pour la plaque porosité +. Dans le sens longitudinal, la porosité n'a pas d'influence sur les chargements en traction mais va dégrader le comportement en compression ce qui peut s'expliquer par le fait que la résine a plus d'influence en compression plutôt qu'en traction. La figure 108 présente le module de compression en fonction du taux de porosité. Vu qu'il n'y a pas beaucoup de données, les courbes de confiance à 95% du modèle sont très espacées.

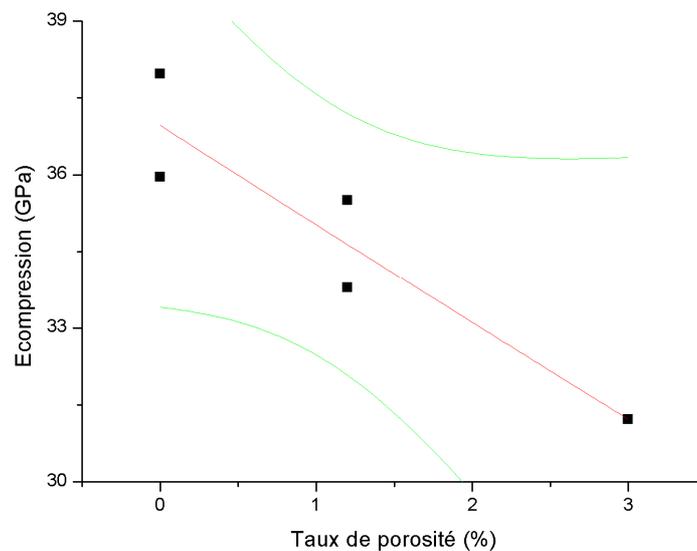


Figure 108 : Modèle polynomiale d'ordre 2 (en rouge) et les courbes de confiance à 95% (en vert), pour le module de compression en fonction du taux de porosité