

V. CARACTERISTIQUES MECANIQUES DU COMPOSITE

V.1. TAUX DE FIBRES :

V.1.1. Opération de calcination :

Dans le but de déterminer le pourcentage en poids de fibres de verre dans les matériaux composites étudiés, moulés par contact, plusieurs échantillons de section (1×1) cm² sont découpés des éprouvettes après les essais de caractérisation mécanique (traction). Ils ont été soumis à l'opération de calcination.

V.1.2. Appareillages utilisés :

- four.
- balance électronique de précision (0.001 g).
- creuset.
- Dissicateur et célicagel.

V.1.3. Calcination :

L'échantillon est pesé avec une précision de 0.001g et placé ensuite dans un creuset préalablement pesé. L'ensemble est placé dans un four à une température de 625°C jusqu'à ce que la résine soit entièrement calcinée (2 heures). Le creuset est mis ensuite dans un dissicateur jusqu'à refroidissement complet. Finalement, l'ensemble creuset et cendres sont pesés.

V.1.4. Mesure du taux de verre : [7]

Le taux de fibres de verre calculé en poids est déduit de celui de la résine. Ce dernier est donné par la formule suivante :

$$M_f = \frac{B}{A} \times 100 \% \quad \text{avec } M_m = 100 - M_f \quad \text{V.1}$$

Ou :

$$V_f = \frac{M_f \cdot \rho_m}{\rho_f - M_f \cdot (\rho_f - \rho_m)} \times 100 \% \quad \text{avec } V_m = 100 - V_f \quad \text{V.2}$$

A : poids de l'échantillon en (g) avant calcination.

B : poids de l'échantillon en (g) après calcination (poids de fibre de verre).

C : poids de la résine calciné (g).

M_f et M_m : fraction massique de la fibre et de la matrice en (%).

V_f et V_m : fraction volumique de la fibre et de la matrice en (%).

ρ_m , ρ_f : la masse volumique de la matrice et de la fibre (g/cm³)

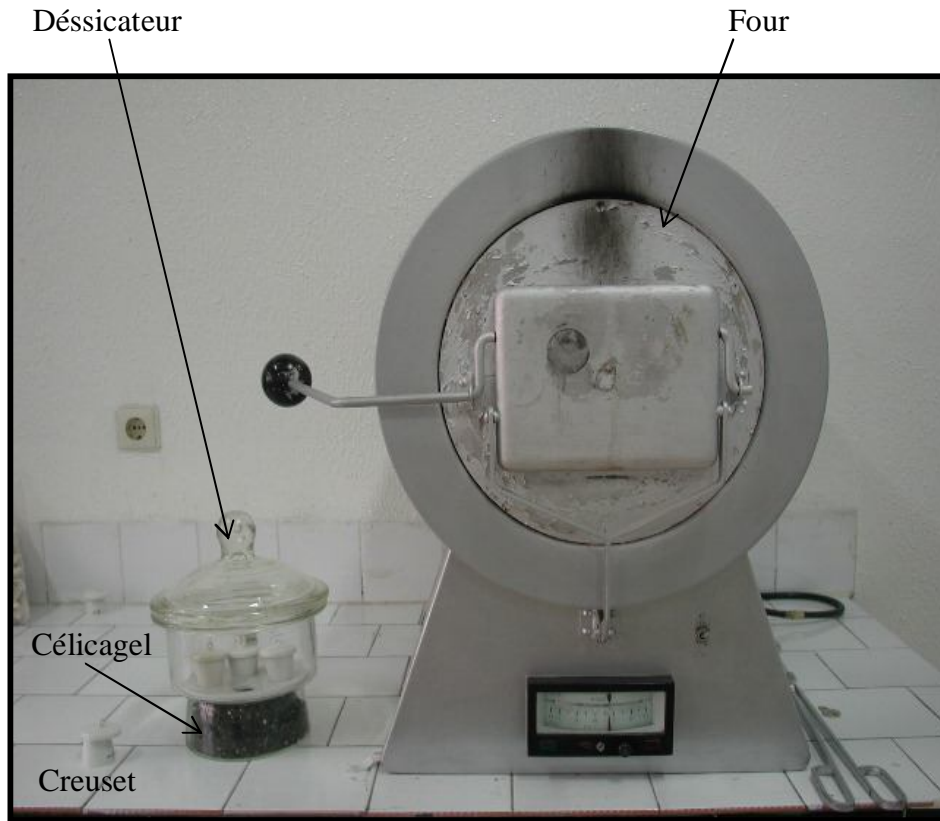


Fig. (V.1) : Appareillages utilisé pour la calcination

V.1.5. Résultats de mesure du taux de verre :

Les résultats enregistrés ont été obtenus sur les éprouvettes testées en traction des stratifiés fabriqués par le procédé de moulage par contact sont :

- **Tableau V.1 :** Résultats de calcination sur des éprouvettes testées en traction avec les caractéristiques suivantes:

Nombre de couche : trois (3)

Mode de stratification : 300 – 300 – 300

N°	A (g)	B (g)	C (g)	M_f (%)	V_f (%)
1	0.534	0.092	0.442	17.22	9.08
2	0.485	0.104	0.381	21.44	11.58
3	0.492	0.085	0.407	17.27	9.11
4	0.477	0.092	0.385	19.28	10.28
5	0.441	0.097	0.344	21.99	11.92
Moyenne				19.44	10.39
Ecart type				2.24	1.33
Coef _ varia %				11.54	12.83

- **Tableau V.2 :** Résultats de calcination sur des éprouvettes testées en traction avec les caractéristiques suivantes:

Nombre de couche : trois (3)

Mode de stratification : 300 – 450 – 300

N°	A (g)	B (g)	C (g)	M_f (%)	V_f (%)
1	0.337	0.127	0.210	37.68	22.49
2	0.299	0.113	0.186	37.79	22.57
3	0.323	0.120	0.203	37.15	22.10
4	0.283	0.108	0.175	38.16	22.85
5	0.326	0.123	0.203	37.73	22.53
Moyenne				37.70	22.51
Ecart type				0.36	0.26
Coef _ varia %				0.95	1.19

- **Tableau V.3** : Résultats de calcination sur des éprouvettes testées en traction avec les caractéristiques suivantes:

Nombre de couche : trois (3)

Mode de stratification : 450 – 450 – 450

N°	A (g)	B (g)	C (g)	M_f (%)	V_f (%)
1	0.470	0.134	0.336	28.51	16.06
2	0.537	0.162	0.375	30.16	17.17
3	0.493	0.140	0.353	28.39	15.99
4	0.498	0.155	0.343	31.12	17.82
5	0.440	0.133	0.307	30.22	17.21
Moyenne				29.68	16.85
Ecart type				1.18	0.79
Coef _ varia %				3.99	4.72

- **Tableau V.4** : Résultats de calcination sur des éprouvettes testées en traction avec les caractéristiques suivantes:

Nombre de couche : cinq (5)

Mode de stratification : 300 – 450 – 600 – 450 – 300

N°	A (g)	B (g)	C (g)	M_f (%)	V_f (%)
1	0.570	0.231	0.339	40.52	24.64
2	0.573	0.225	0.348	39.26	23.68
3	0.624	0.233	0.391	37.33	22.24
4	0.631	0.243	0.388	38.51	23.11
5	0.621	0.241	0.380	38.80	23.33
Moyenne				38.88	23.40
Ecart type				1.15	0.87
Coef _ varia %				2.98	3.73

- **Tableau V.5** : Résultats de calcination sur des éprouvettes testées en traction avec les caractéristiques suivantes:

Nombre de couche : trois (3)

Mode de stratification : 450 – 450 – 450

N°	A (g)	B (g)	C (g)	M_f (%)	V_f (%)
1	0.536	0.137	0.399	25.55	14.14
2	0.678	0.149	0.529	21.97	11.90
3	0.587	0.145	0.442	24.70	13.60
4	0.553	0.132	0.421	23.86	13.08
5	0.602	0.128	0.474	21.26	11.47
Moyenne				23.46	12.84
Ecart type				1.81	1.12
Coef _ varia %				7.71	8.77

- **Tableau V.6** : Résultats de calcination sur des éprouvettes testées en traction avec les caractéristiques suivantes:

Nombre de couche : trois (3)

Mode de stratification : 450 – tissu – 450

N°	A (g)	B (g)	C (g)	M_f (%)	V_f (%)
1	0.389	0.117	0.272	30.07	17.11
2	0.363	0.115	0.248	31.68	18.20
3	0.382	0.114	0.268	29.84	16.95
4	0.382	0.117	0.265	30.62	17.48
5	0.378	0.110	0.268	29.10	16.45
Moyenne				30.26	17.24
Ecart type				0.96	0.65
Coef _ varia %				3.17	3.78

- **Tableau V.7 : Récapitulatif des résultats**

Plaque	Taux de fibre Théori- %	Taux de fibre Expéri- %	Ecart type	Coef-varia %	Erreur %
300 300 300	20	19.44	0.39	2.00	2.80
300 450 300	50	37.70	8.69	19.83	24.60
450 450 450	30	29.68	0.22	0.75	1.06
300 450 600 450 300	40	38.88	0.79	2.00	2.80
450 450 450	20	23.46	2.44	11.26	17.30
450 tissu 450	30	30.26	0.18	0.61	0.86

Après l'opération de calcination, on trouve une faible différence entre le taux de fibres de verre dans les stratifiés moulés par contact au taux propose avant le moulage. Cela peut être du à l'hétérogénéité de la plaque et à la mise en œuvre manuelle du matériau.

Enfin, on peut dire qu'on a obtenu l'objectif voulu (la variation de taux de fibre de verre dans les différentes plaques).

V.2. CARACTERISTIQUES STATIQUES EN TRACTION :

Dans cette partie, nous allons décrire la procédure expérimentale utilisée pour la réalisation des éprouvettes de traction correspondante aux matériaux composites étudiés. Une analyse des résultats de mesures de caractérisation mécanique (contrainte à la rupture, module élastique) par traction directe sera présentée.

V.2.1. Essai de traction :

Les essais ont été effectués au niveau du laboratoire d'essai mécanique de l'Entreprise des Réalisations industrielles de SERIANA (ERIS, Batna) sur une machine universelle à système hydraulique, la figure (V.2) montre une vue générale de la machine d'essai.

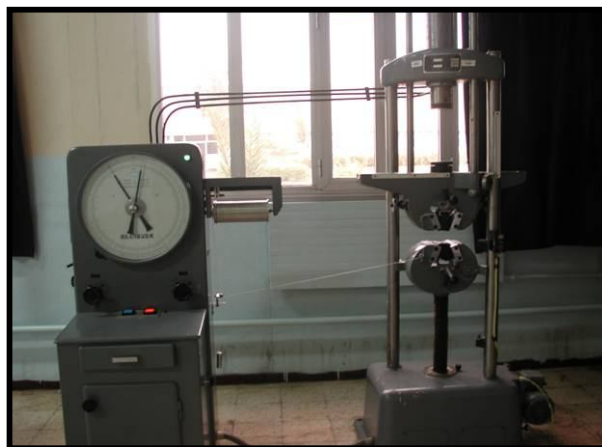


Fig. (V.2) : Vue générale de la machine d'essai de traction.

Les éprouvettes à tester sont maintenues entre deux mors ou deux mâchoires figure (V.3). Les essais de traction sont faits entre la traverse supérieure fixe sur laquelle est monté le capteur de force et la traverse mobile à laquelle on rend solidaire la mâchoire inférieure.

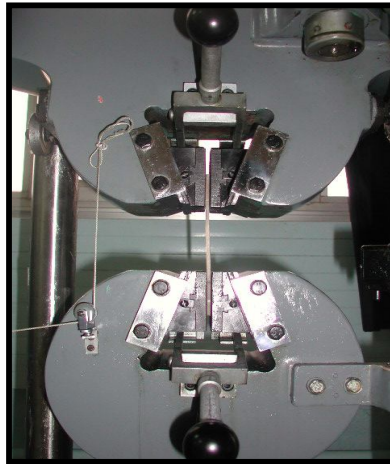


Fig. (V.3) : Eprouvettes a testé placé entre les deux mors

Les résultats du test s'inscrivent sur un enregistreur graphique dont le modèle de base permet l'enregistrement de la charge (mouvement de plume) en fonction de la position de la traverse ou en fonction de défilement du papier millimètre.

La contrainte à rupture est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_{rup} = \frac{P}{S} \quad \text{V.3}$$

P : la force appliquée à l'éprouvette au moment de la rupture.

S : la section de l'éprouvette.

La déformation à rupture est donnée par la formule suivante :

$$\varepsilon_{rup} = \frac{L_x}{R \times L_0} \quad \text{V.4}$$

L_x : est le déplacement enregistré par le plume de l'enregistreur.

R : est le rapport entre la vitesse du papier et celle de la machine ($R = V_p / V_m$).

L_0 : est la longueur de la partie calibrée de l'éprouvette.

Le module longitudinal élastique est déterminé à partir de la partie linéaire de la courbe charge déplacement suivant loi de Hooke.

$$E = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad \text{V.5}$$

V.3. PRESENTATION ET DISCUSSIONS DES RESULTATS :

V.3.1. Les courbes :

Les figures (V.4 et V.5) montrent des exemples de courbe charge- déplacement obtenue par traction sur des éprouvettes prélevées d'un stratifié moulé par contact avec un taux de fibre de verre.

L'allure de ces courbes est presque la même pour les autres taux de fibres.

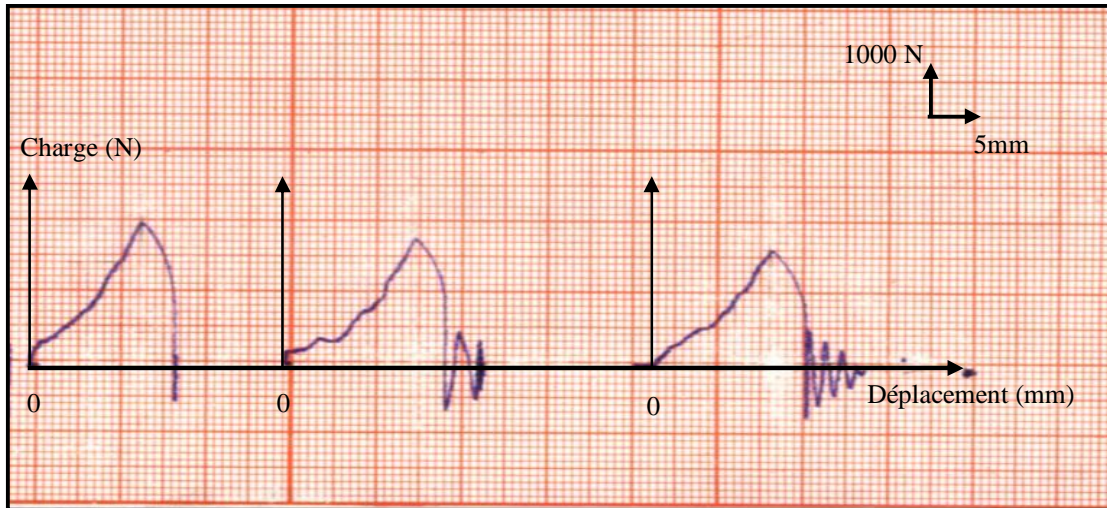


Fig. (V.4) : Courbe charge déplacement en traction.
Résine non renforcé

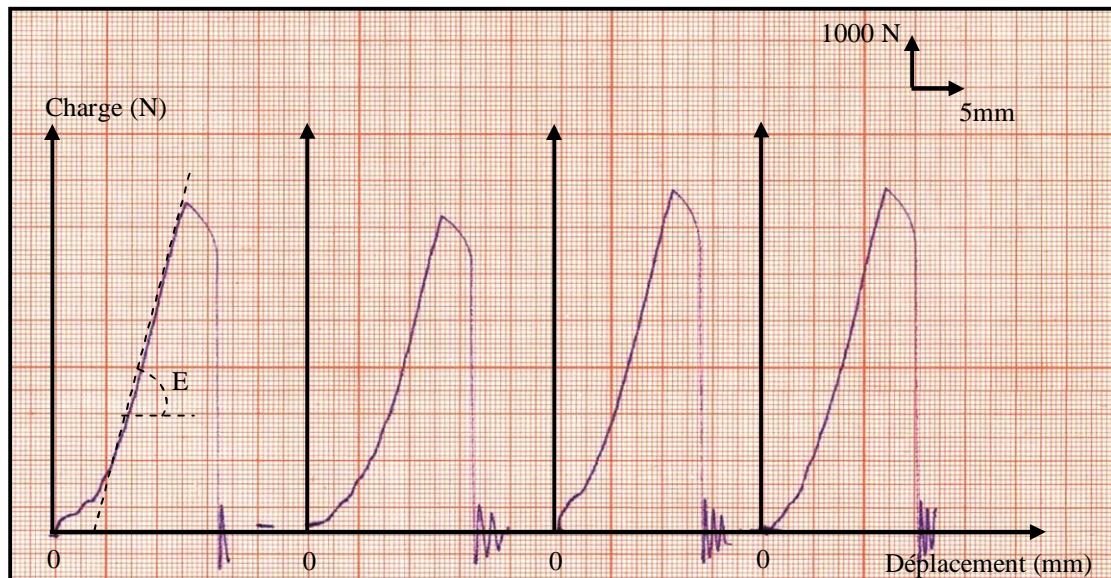


Fig. (V.5) : Courbe charge déplacement obtenue sur éprouvette
avec un taux de fibres $M_f = (38.88 \pm 1.15) \%$.

L'allure des courbes charge – déplacement montre une partie linéaire qui représente le comportement élastique du matériau, dans cette partie la charge augmente considérablement pour de faibles déplacements. Contrairement à la seconde partie où les déformations sont importantes de faibles charges.

Les résultats de mesure de la contrainte à la rupture, de la déformation à la rupture et du module de Young sont rassemblés dans les tableaux suivants :

- **Tableau V.8** : Caractérisation mécaniques de la résine non renforcé en traction.

N°	B (mm)	H (mm)	Fr (N)	ΔL_r (mm)	σ_r (N/mm ²)	ϵ_r (%)	E (N/mm ²)
I S1	12.73	3.35	1100	1.5	37.53	2.1	1279.09
I S2	12.57	3.67	1400	1.75	30.34	2.5	1083.75
I S3	12.72	3.71	900	1.5	40.26	2.1	1514.28
I S4	12.80	3.73	1800	1.375	37.70	1.9	1221.66
I S5	12.24	3.50	1700	1.75	39.68	2.5	1245.33
Moyenne					37.10	2.22	1268.82
Ecart type					3.96	0.26	156.03
Coef _ varia %					10.68	12.08	12.29

- **Tableau V.9** : Résultats de traction - taux de fibres $M_f = (19.44 \pm 2.24) \%$.

N°	B (mm)	H (mm)	Fr (N)	ΔL_r (mm)	σ_r (N/mm ²)	ϵ_r (%)	E (N/mm ²)
I T1	12.26	2.84	3000	3.00	86.15	4.28	1608.27
I T2	12.17	2.40	2800	3.50	-	-	-
I T3	12.31	3.43	2900	3.25	68.68	4.64	1657.98
I T4	11.00	3.56	3100	3.25	79.16	4.64	1608.78
I T5	12.50	3.25	3000	3.00	81.22	4.28	1550.57
Moyenne					78.80	4.46	1606.40
Ecart type					7.35	0.18	43.91
Coef _ varia %					9.33	4.03	2.73

- **Tableau V.10** : Résultats de traction - taux de fibres $M_f = (37.70 \pm 0.36) \%$.

N°	B (mm)	H (mm)	Fr (N)	ΔL_r (mm)	σ_r (N/mm ²)	ϵ_r (%)	E (N/mm ²)
II T1	12.28	1.87	3900	3.50	169.86	5.00	3048.78
II T2	12.45	1.83	3900	4.00	171.20	5.71	2827.04
II T3	12.40	1.93	3400	3.50	142.08	5.00	2632.67
II T4	12.35	1.82	3050	3.25	135.73	4.64	2803.73
II T5	12.36	1.80	3300	3.25	148.38	4.64	2675.35
Moyenne					153.45	4.99	2797.51
Ecart type					16.22	0.43	162.89
Coef _ varia %					10.57	8.74	5.82

- **Tableau V.11** : Résultats de traction - taux de fibres $M_f = (29.68 \pm 1.18) \%$.

N°	B (mm)	H (mm)	Fr (N)	ΔL_r (mm)	σ_r (N/mm ²)	ϵ_r (%)	E (N/mm ²)
III T1	12.36	3.22	4100	3.375	103.04	4.82	2069.68
III T2	12.32	3.15	5000	4.00	128.86	5.71	2164.94
III T3	12.35	2.89	4800	3.75	134.49	5.35	2196.69
III T4	12.27	2.94	3800	3.75	105.35	5.35	2134.73
III T5	12.34	2.86	4300	4.75	121.84	6.78	2115.80
Moyenne					118.71	5.60	2136.36
Ecart type					14.01	0.73	48.29
Coef _ varia %					11.80	13.05	2.26

- **Tableau V.12** : Résultats de traction - taux de fibres $M_f = (38.88 \pm 1.15) \%$.

N°	B (mm)	H (mm)	Fr (N)	ΔL_r (mm)	σ_r (N/mm ²)	ϵ_r (%)	E (N/mm ²)
IV T1	12.26	3.30	7700	4.75	-	-	-
IV T2	12.17	3.37	7200	4.75	-	-	-
IV T3	12.04	3.56	6800	4.50	158.65	6.42	2830.92
IV T4	12.29	3.31	7300	4.50	179.49	6.42	2891.56
IV T5	12.25	3.53	7300	4.50	168.82	6.42	2806.04
Moyenne					168.98	6.42	2842.84
Ecart type					10.42	0	43.98
Coef _ varia %					6.16	0	1.54

- **Tableau V.13** : Résultats de traction - taux de fibres $M_f = (23.46 \pm 1.81) \%$

N°	B (mm)	H (mm)	Fr (N)	ΔL_r (mm)	σ_r (N/mm ²)	ϵ_r (%)	E (N/mm ²)
V T1	12.42	3.61	3700	3.25	-	-	-
V T2	12.49	4.67	4600	3.25	78.87	4.64	1632.37
V T3	12.40	4.05	4400	3.25	87.61	4.64	1672.64
V T4	12.35	3.76	4000	3.25	86.15	4.64	1608.15
V T5	12.31	4.17	4200	3.50	81.82	5.00	1636.46
Moyenne					83.61	4.73	1637.40
Ecart type					4.00	0.15	26.60
Coef _ varia %					4.79	3.29	1.62

- **Tableau V.14** : Résultats de traction - taux de fibres $M_f = (30.26 \pm 0.96) \%$

N°	B (mm)	H (mm)	Fr (N)	ΔL_r (mm)	σ_r (N/mm ²)	ϵ_r (%)	E (N/mm ²)
VI T1	12.01	2.69	3700	3.50	111.11	5.00	2806.04
VI T2	12.37	2.56	4400	3.75	138.97	5.35	2476.31
VI T3	11.07	2.30	3600	3.25	-	-	-
VI T4	12.28	2.45	3500	3.00	119.68	4.28	2559.84
VI T5	12.46	2.51	4500	3.75	143.90	5.35	2462.42
Moyenne					128.41	4.99	2576.15
Ecart type					15.56	0.43	159.18
Coef _ varia %					12.12	8.74	6.17

V.3.3. Discussions des résultats :

D'après les résultats des tableaux précédant nous allons étudier l'influence du taux de fibres de verre sur les caractéristiques mécaniques obtenues par traction pour les stratifiés moulés.

V3.3.1. Contrainte à la rupture :

On observe d'après la courbe contrainte - taux de fibre, que l'augmentation du taux de fibres de verre dans le stratifié, entraîne une augmentation de la résistance à la rupture. Ces résultats sont illustrés sur les deux figures (V.6), (V.7).

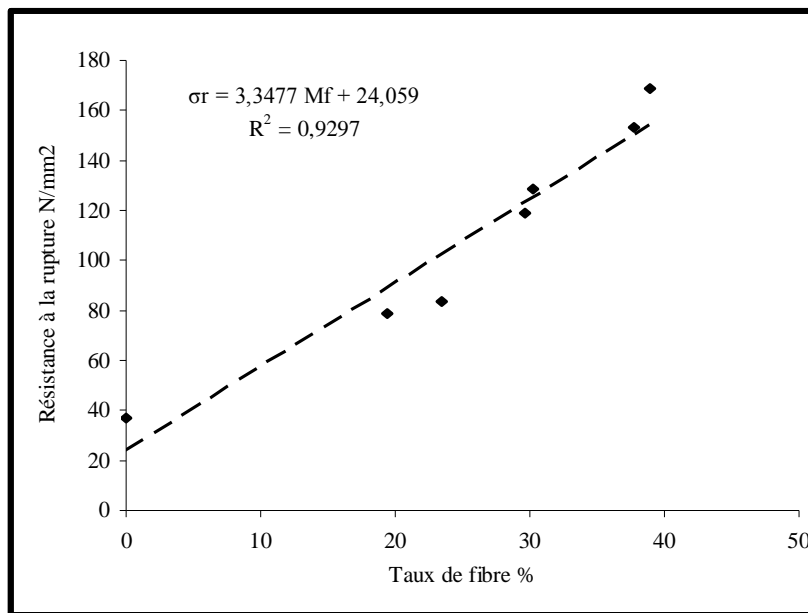


Fig. (V.6) : Variation de la résistance à la rupture en fonction du taux de fibre massique

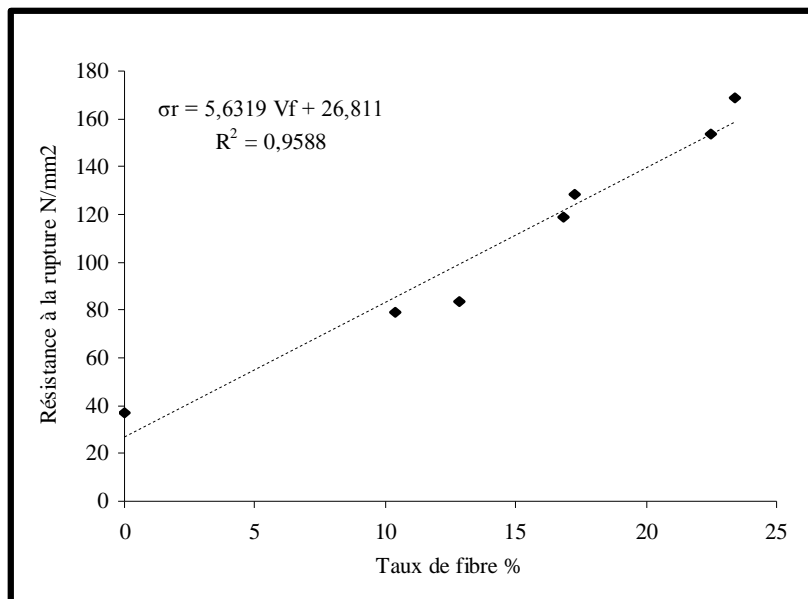


Fig. (V.7) : Variation de la résistance à la rupture en fonction du taux de fibre volumique

R : coefficient de corrélation.

La prévision de la résistance à la rupture en fonction de V_f peut être décrite par l'équation expérimentale suivante :

$$\sigma_r = 5.6319V_f + 26.811 \quad \text{V.6}$$

Afin de comparer les valeurs mesurées par l'équation expérimentale avec celles estimées par la loi théorique suivante : [7]

$$\sigma_r = \frac{3}{8} \sigma_{fr} V_f + (1 - V_f) \sigma_{mr} \quad \text{V.7}$$

La figure si dessous montre la prévision entre la loi théorique et l'équation expérimentale en fonction de taux de fibre V_f .

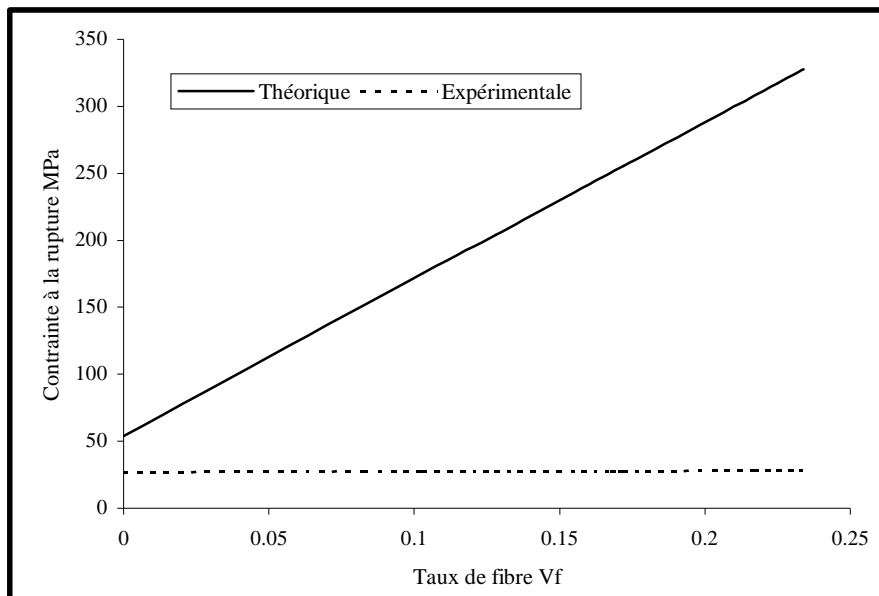


Fig. (V.8) : Prévion Théorique et Expérimentale

A partir de la figure (V.8), on observe les valeurs mesurées expérimentalement de la contrainte à la rupture sont nettement inférieures à celles déterminées par la formule théorique a cause des condition suivante :

- Défaut de fabrication
- Les procédures de découpe des éprouvettes.

V.3.3.2. Module élastique :

La figure (V.9) montre la variation entre le module élastique et le taux de fibres de verre.

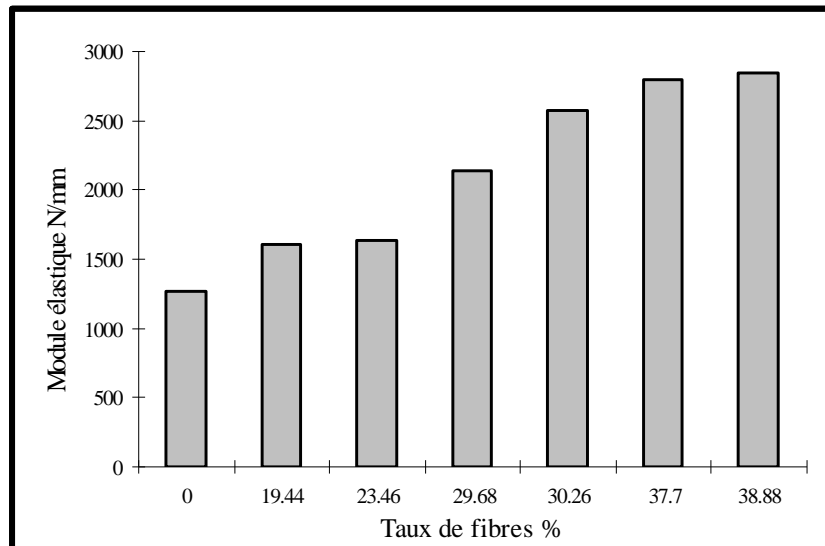


Fig. (V.9): Variation du module élastique en fonction du taux de fibre massique

L'augmentation du taux de fibres de verre dans les stratifiés moulés, entraîne une amélioration du module élastique.