

## V.1 Description des éprouvettes utilisées

Cette étude est la simulation numérique de l'étude expérimentale de délaminage mode I faite par HECINI [18 ] et qui consiste en l'étude des éprouvettes de type DPE : Double Poutre Encastrée ou (DCB :Bouble Cantilever Beam) de 6,6 mm d'épaisseur, 20 mm de largeur et de 170 mm de longueur en carbone-epoxy de différentes longueurs de fissure (Figure.IV.1). Le programme expérimental comporte 5 éprouvettes différentes.

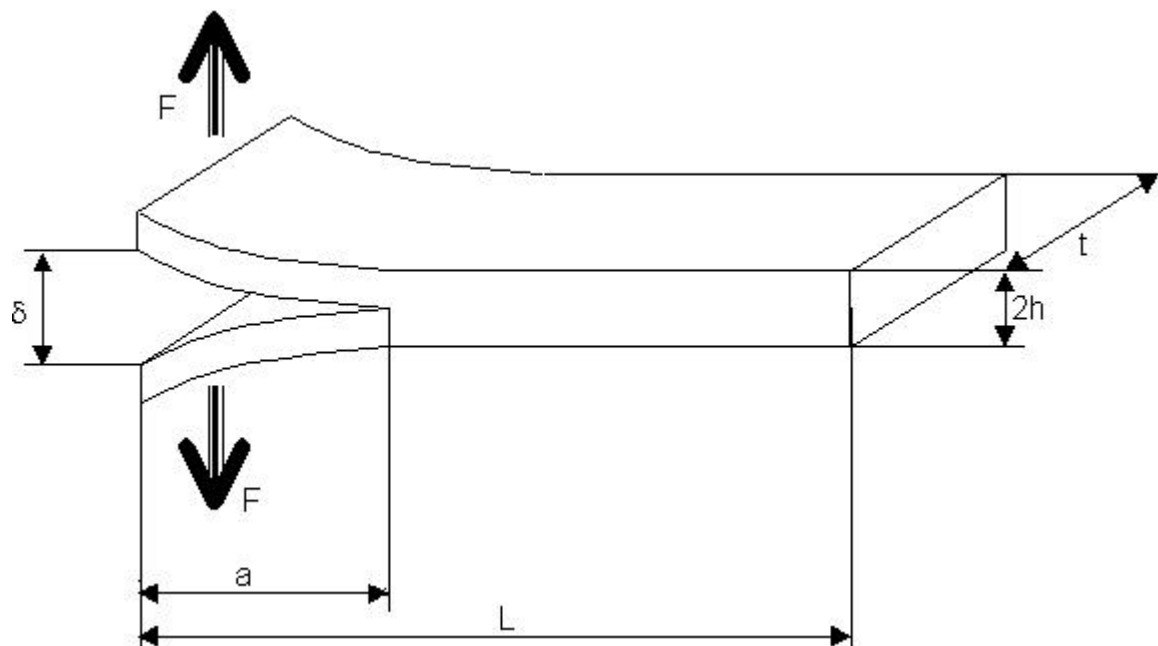


Figure.V.1 :Eprouvette de type DPE(ou DCB).

Chaque éprouvette représente l'une des configurations suivantes qui sont [18]:

- Configuration  $[0^\circ/0^\circ] : [0^\circ]_{48}$ ,
- Configuration  $[0^\circ/90^\circ] : [90^\circ/0^\circ/0^\circ]_{42s}$ ,
- Configuration  $[90^\circ/90^\circ] : [90^\circ/90^\circ/9(0^\circ)]_{2s}$ ,
- Configuration  $[45^\circ/-45^\circ] : [45^\circ/-45^\circ]$ ,

le matériau composite proposé pour cette étude est composé de :

- Matrice : résine en en poxy de type M10.
- Renfort : fibre unidirectionnelle en carbone T300.

Tableau N<sup>o</sup> V.1 : les caractéristiques mécaniques des matériaux composite d'une couche sont :

	couche	Couche d'interface
$E_{11}$	$1.2368 \cdot 10^7 \text{ N/cm}^2$	$3.8 \cdot 10^2 \text{ N/cm}^2$
$E_{12}$	$8.99 \cdot 10^5 \text{ N/cm}^2$	$3.8 \cdot 10^2 \text{ N/cm}^2$
$G_c$	$377000 \text{ N/cm}^2$	
$\nu_{12}=\nu_{21}$	0.22	0.38
$\sigma$		$12100 \text{ N/cm}^2$

TABLEAU N<sup>o</sup> V.1 caractéristiques mécaniques des matériaux composite[18].

## V.2 Discrétisation

Les éprouvettes sont discrétisées par éléments finis rectangulaires bidimensionnels en contraintes planes. Le matériau est considéré comme orthotrope ou isotrope transverse et possède un comportement linéaire élastique. Le maillage est plus raffiné autour de la tête de fissure (Figure :IV.4.2). La fissure est représentée par la zone libre du maillage. Dans ce cas et pour raison de symétrie on ne considère qu'une moitié de l'éprouvette. La pointe de la fissure est représentée par le premier nœud bloqué (C). Les nœuds du prolongement CD de la fissure sont bloqués dans la direction 3 (condition de symétrie). Chaque pli est subdivisé en éléments ayant pour hauteur son épaisseur et possédant ses caractéristiques.

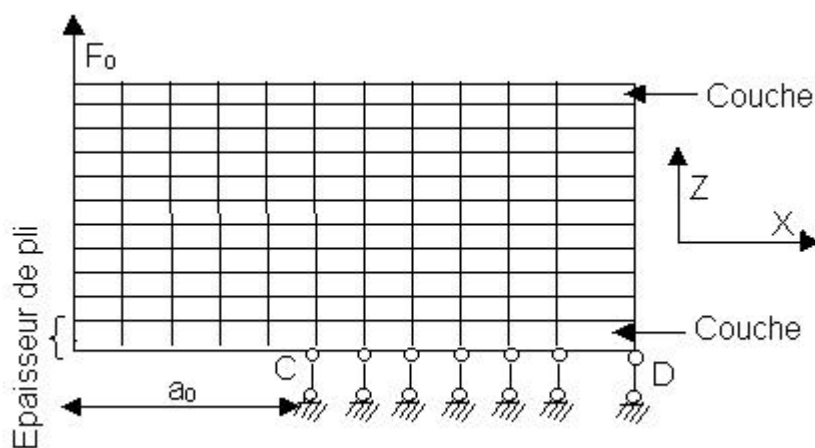


Figure.V.2 :Maillage de la moitié de l'éprouvette.

### **V.3 Procédure de calcul**

On donne une valeur initiale de la force appliquée au niveau des lèvres. Le programme procède à un calcul itératif. Pour chaque itération, la force sera calculée à l'aide de la formule  $F_0 = \epsilon F_0$  où  $\epsilon$  est un coefficient multiplicateur qui fait augmenter la force. Pour chaque itération, la contrainte  $\sigma_y$  au niveau du fond de la fissure sera comparée à la contrainte de la rupture imposée qui est dans notre cas la contrainte de rupture de la matrice.

Le calcul sera arrêté lorsque la contrainte calculée atteint la valeur de la contrainte de rupture imposée.

Les résultats relevés sont alors les déplacements  $u$  et  $v$  de tous les nœuds, les réactions des nœuds bloquées, les contraintes au niveau des éléments et la force finale supposée être la force critique d'ouverture de la fissure.

Ces résultats nous permettent de calculer le taux de restitution d'énergie  $G$  par la formule II.26.

Ce calcul se fait pour chaque valeur de prédefaut  $a$  et pour chaque configuration.

Ces résultats seront exploités pour tracer les différentes courbes de comparaison.

### **V.4 Première approche de modélisation**

Dans la première approche le maillage a été fait en considérant que les couches sont similaires figure. V.2 sans prendre en compte l'influence de la couche d'interface dans laquelle se produit la rupture ; dans ce cas seule la configuration  $(0^0/0^0)$  a été étudiée.

**a) Configuration 0°/0°**

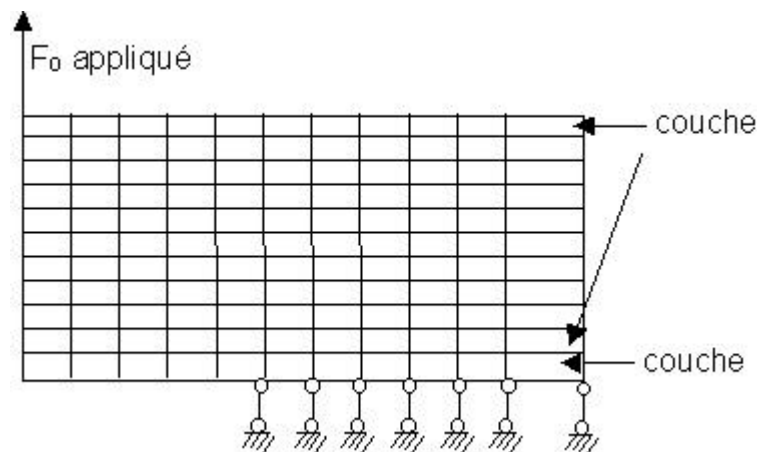


Figure.V.3 :Maillage de la moitié de l'éprouvette 1<sup>ière</sup> approche.

Tableau.V.2Résultats obtenus 1<sup>er</sup> approche configuration (0°/0°).

	$A_0$ (mm)	F(N)	V(mm)	C(mm/N)	G(J/m <sup>2</sup> )
Numérique	28.5	185.001	0.514	0.002778	84.9075
Expérimentale		207.0	0.92	0.0044	413.96
Numérique	36.5	159.8275	0.863	0.00534	66.308
Expérimentale		141.0	1.92	0.0139	469.06
Numérique	38.0	159.0	0.953	0.006	58.113
Expérimentale		142.0	1.76	0.0123	407.44
Numérique	53.5	147.0	1.527	0.0103	33.516
Expérimentale		125.0	2.60	0.0208	376.0
Numérique	68.0	111.5134	2.0903	0.0187	27.0
Expérimentale		96.7	4.86	0.0502	428.15

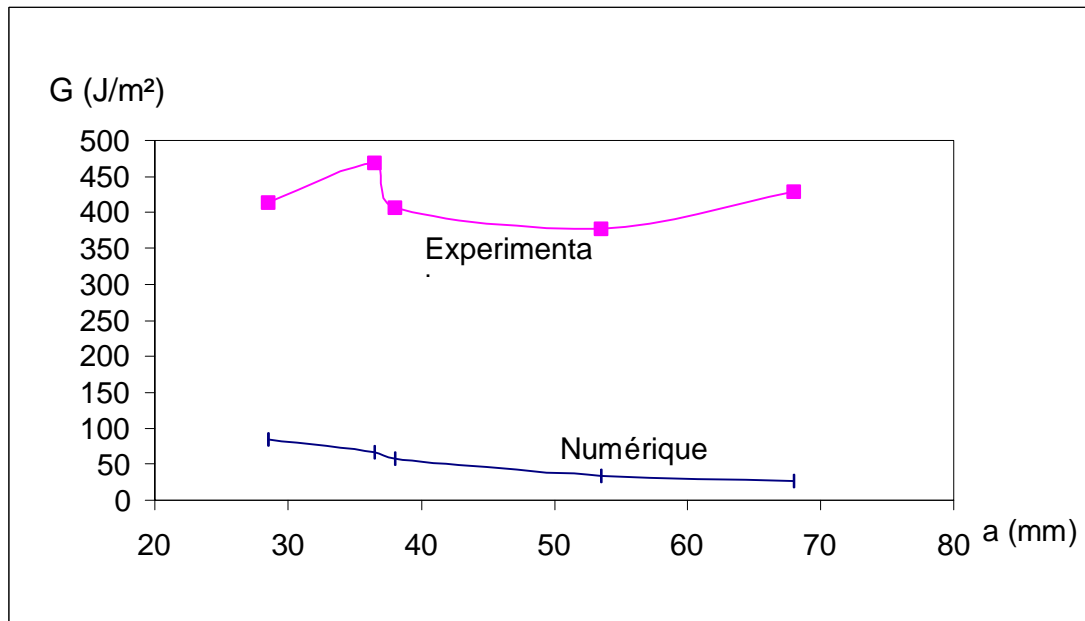
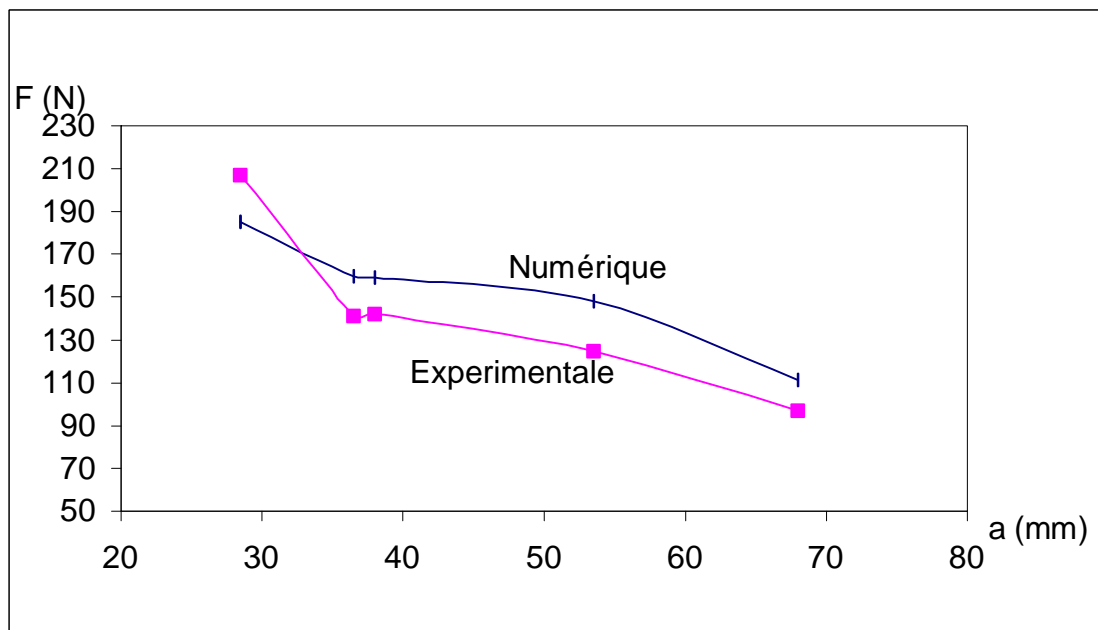


Figure V.4 : Variation de l'énergie de restitution en fonction de l'ouverture de la fissure(0/0).



Figur.V.5 :Variation de la force en fonction de l'ouverture de la fissure (0.0).

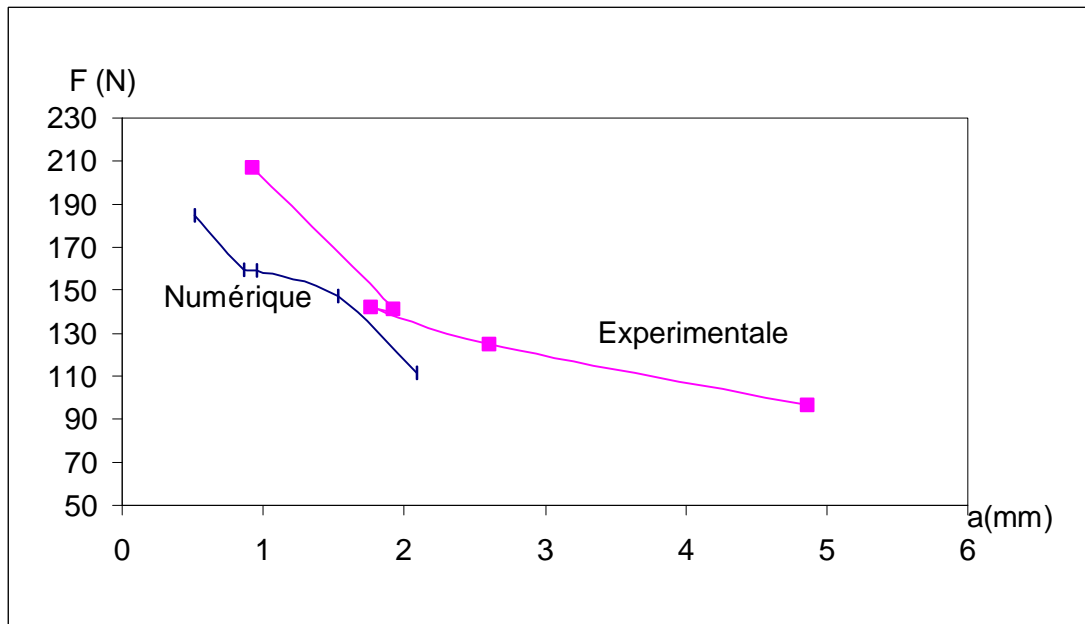


Figure.V.6 : Variation de la force en fonction des déplacements des lèvres (0/0).

Pour cette approche un seul cas à été étudié (il s'agit la configuration  $(0^\circ / 0^\circ)$ ). Le tableau.V.2 présente les résultats obtenus, On constate que ces résultats sont très faibles par rapport a ceux obtenus expérimentalement.

La courbe de la variation du taux de restitution d'énergie en fonction de l'ouverture de la fissure est très différente du point de vue qualitative et quantitative ainsi que les courbes concernant la variation de la force en fonction des déplacements. Par contre l'allure des courbes Figure V.6 concernant la variation de la force en fonction d'ouverture de la fissure sont pratiquement proches.

Le but essentiel de ce travail est la détermination de taux de restitution d'énergie. Bien que les valeurs obtenues des énergies soient quasi-constantes, elles sont très loignes des valeurs obtenues expérimentalement.

### V.5 2<sup>eme</sup> Approche

La deuxième approche adopte la procédure utilisée par[14] ; ainsi que par Laurent Dauveille [11],et qui prend en compte une couche d'interface (Figure.V.7) quiconstitue de la matrice seule et dont l'épaisseur très faible par rapport à celle de la couche qui est de l'ordre de :  $e_i = e_c/5$ .

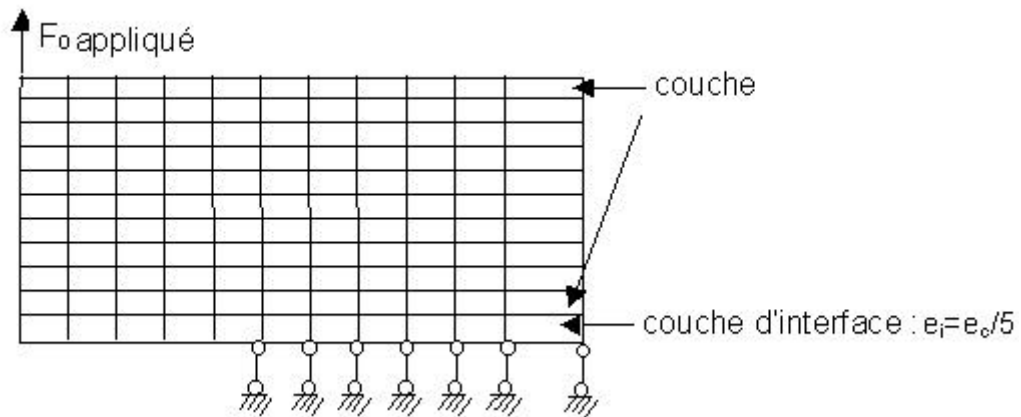


Figure.V.7 Maillage de la moitié de l'éprouvette 2<sup>ème</sup> approche.

**a) configuration 0<sup>0</sup>/0<sup>0</sup>**

Tableaux V.3 : configuration 0<sup>0</sup>/0<sup>0</sup>.

	A <sub>0</sub> (mm)	F(N)	V(mm)	C(mm/N)	G(J/m <sup>2</sup> )
Numérique	28.5	269.286	0.9192	0.00341	406.353
Expérimentale		207.0	0.92	0.0044	413.96
Numérique	36.5	181.215	1.171	0.00647	404.267
Expérimentale		141.0	1.92	0.0139	469.06
Numérique	38.0	178.751	1.541	0.00831	405.255
Expérimentale		142.0	1.76	0.0123	407.44
Numérique	53.5	156.293	2.597	0.0166	406.062
Expérimentale		125.0	2.60	0.0208	376.34
Numérique	68.0	127.787	3.92	0.00307	408.634
Expérimentale		96.7	4.86	0.0502	428.15

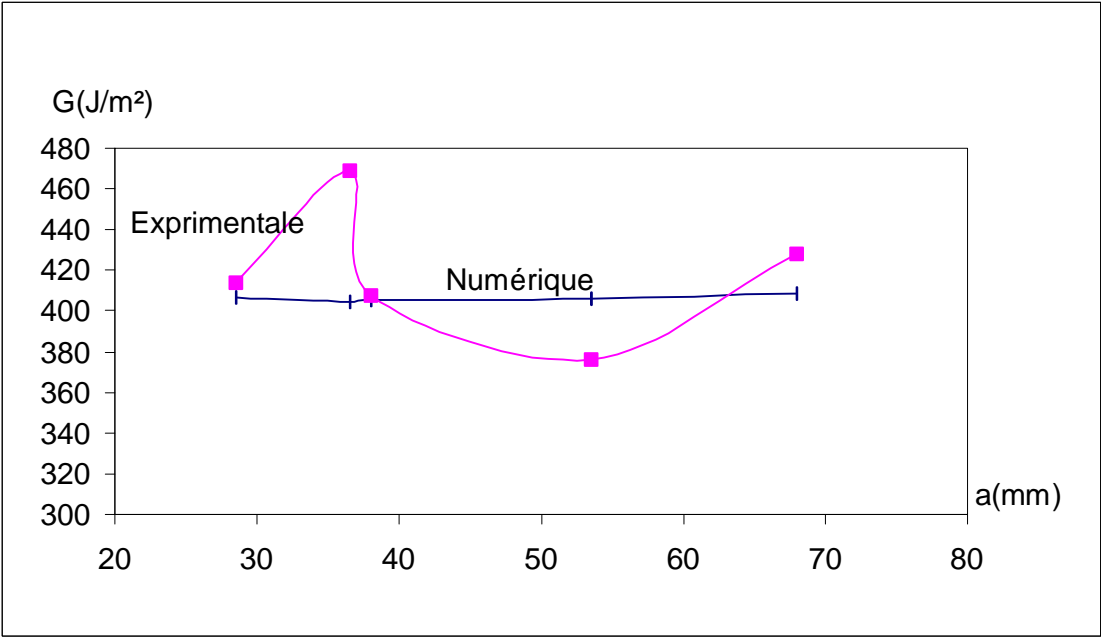


Figure V 8 : Variation de l'énergie de restitution en fonction de l'ouverture de la fissure(0/0).

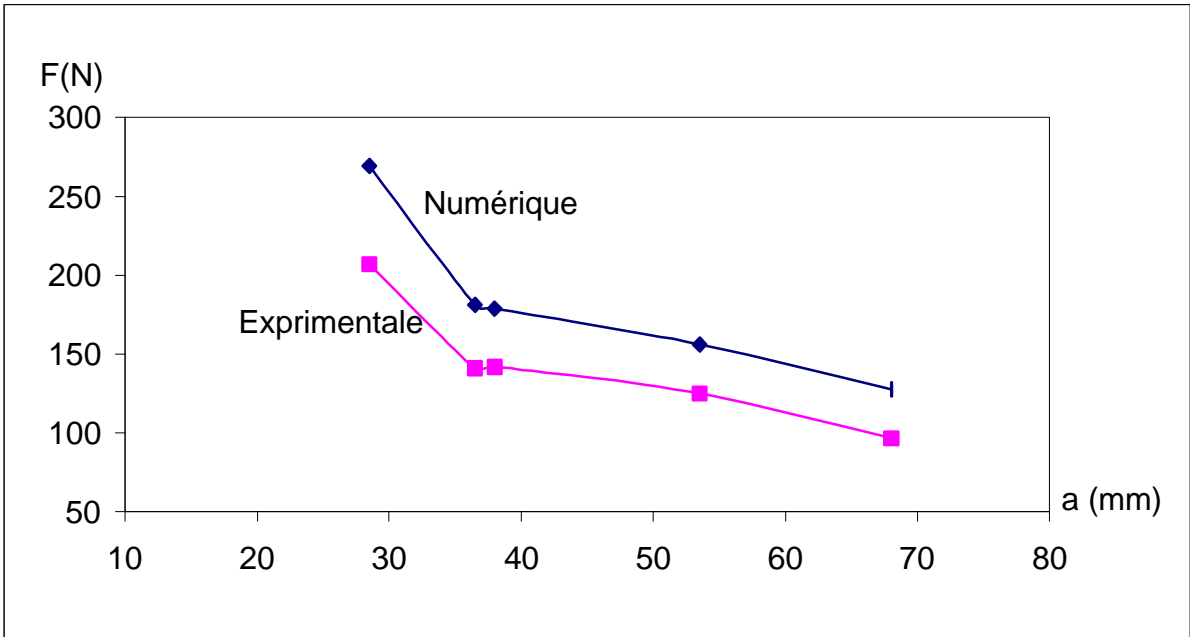


Figure.V. 9: Variation de la force en fonction de l'ouverture de la fissure(0/0).



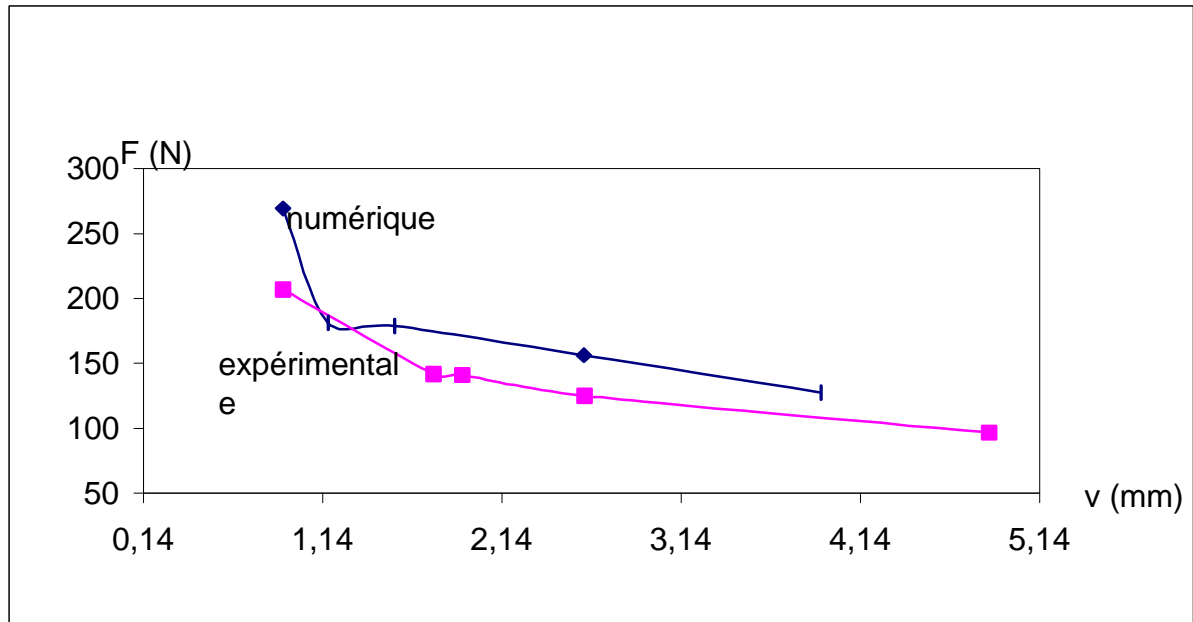


Figure.V.10: Variation de la force en fonction des déplacements des lèvres(0/0).

Pour cette configuration ( $0^\circ / 0^\circ$ ) on trace les courbes de la variation de l'énergie de restitution et de La force en fonction de l'ouverture de la fissure.

Le tableaux V.3 montre les résultats numériques obtenus et les résultats expérimentaux. On constate que les valeurs d'énergie sont très proches. le pourcentage d'erreur de la moyenne d'énergie de restitution pour différentes ouvertures est de l'ordre de 3 % ce qui est très acceptable. Il est de même pour les forces appliquées au niveau des lèvres et des déplacements correspondants.

On représente sur la figure V.8 les courbes expérimentales et numériques de la variation de l'énergie restitution en fonction d'ouverture de la fissure. On observe que la courbe numérique présente une allure quasi-linéaire à pente nulle et par comparaison les deux courbes présentent des allures proches.

La figure V.9 représente la courbe de la variation de la force en fonction des déplacements on constate que les allures des courbes sont similaires de point de vue qualitatifs et présentent toutes les deux des tançons linéaires et sont pratiquement parallèles. Ce qui montre que les rigidités sont pratiquement égales.

Quant à la figure V.10 elle représente la courbe de la variation de la force en fonction d'ouverture de la fissure, les deux courbes présentent la même allure. Ce qui montre l'égalité des rigidités flexionnelles

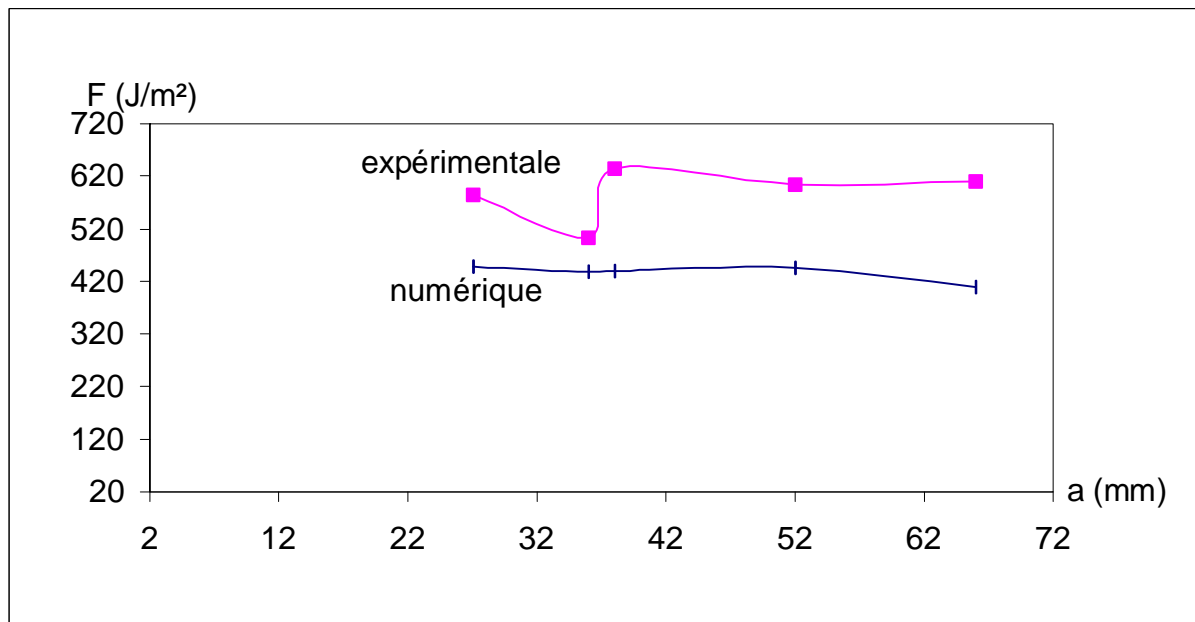
D'après ces courbes on constate que ces rigidités flexionnelles chutent après que la longueur de la fissure dépasse 36.5 mm.

Des résultats similaires ont été trouvés pour les différentes configurations ( $0^{\circ}/90^{\circ}$ ,  $90^{\circ}/90^{\circ}$ ,  $45^{\circ}/-45^{\circ}$ ).les résultats sont présentés sur les tableaux V.4, V.5, V.6 et les figures figure.V.11, ..... figure. V.19.

**b) Configuration  $0^{\circ}/90^{\circ}$**

Tableaux V.4 : configuration  $0^{\circ}/90^{\circ}$ .

	$A_0$ (mm)	F(N)	V(mm)	C(mm/N)	G(J/m <sup>2</sup> )
Numérique	27.0	249.488	1.085	0.00435	448.175
Expérimentale		198.7	1.31	0.0065	583.18
Numérique	36.0	179.269	1.546	0.00862	437.411
Expérimentale		146.5	2.04	0.1392	502.19
Numérique	38.0	171.689	1.978	0.108	439.162
Expérimentale		139.0	2.72	0.1957	635.30
Numérique	52.0	145.152	2.574	0.0177	445.437
Expérimentale		122.0	4.26	0.0349	604.60
Numérique	66.0	127.787	4.68	0.0089	408.634
Expérimentale		103.0	6.46	0.0075	609.89



FigV.11 :Variation de l'énergie de restitution en fonction de l'ouverture de la fissure( $0/90$ ).

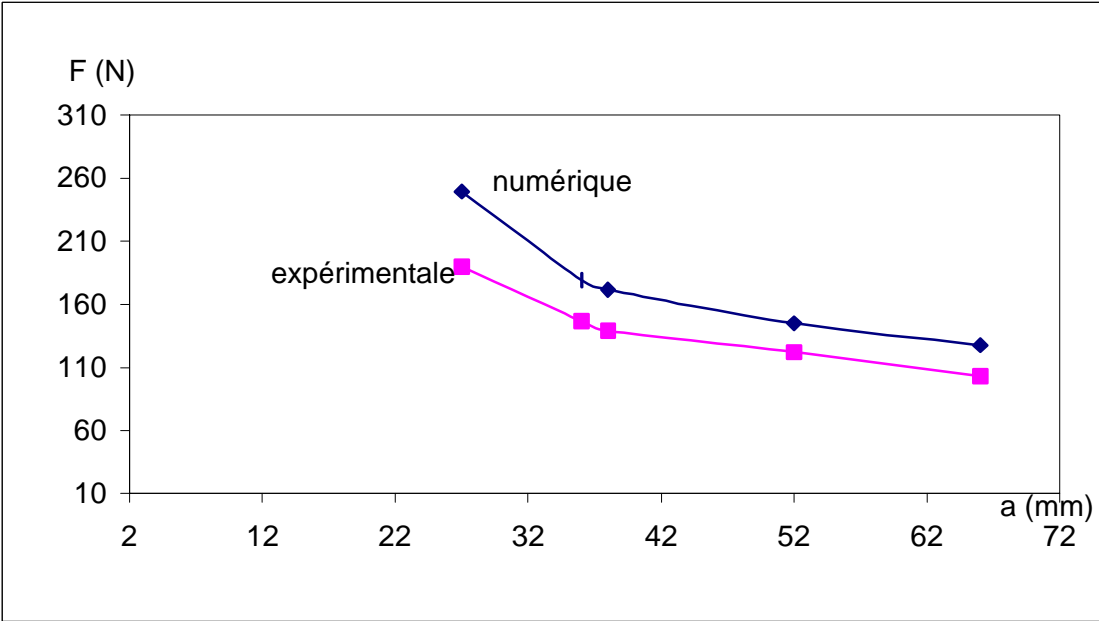


Figure V.12 : Variation de la force en fonction de l'ouverture de la fissure(0/90).

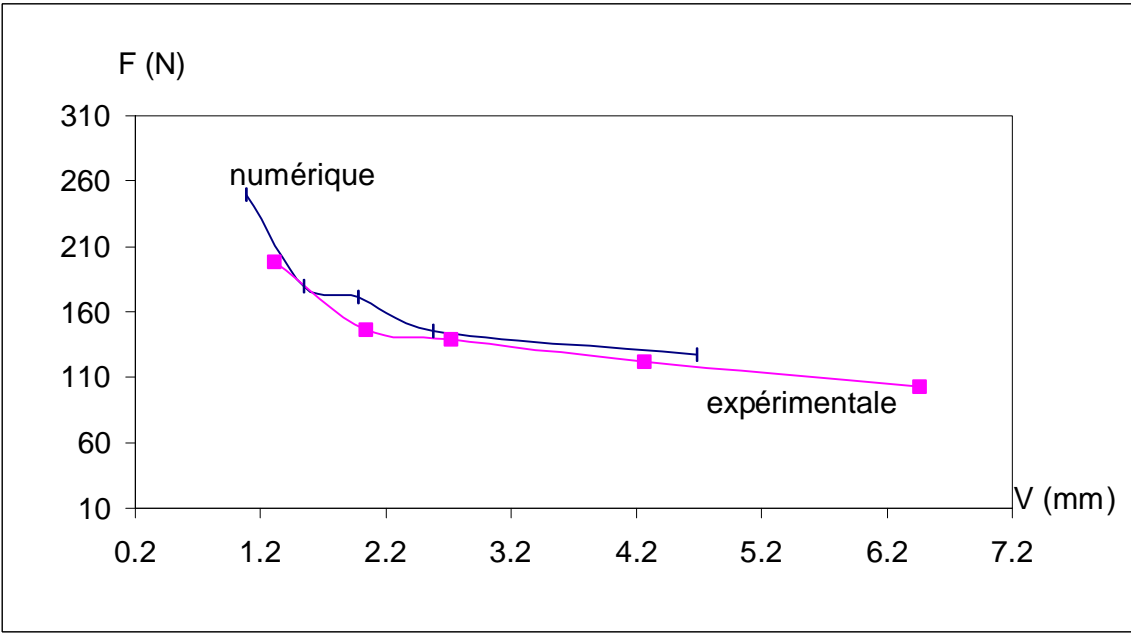


Figure.V.13 :Variation de la force en fonction des déplacements des lèvres(0/90).

**c) Configuration 90°/90°**

Tableaux V.5 : configuration 90°/90°.

	A <sub>0</sub> (mm)	F(N)	V(mm)	C(mm/N)	G(J/m <sup>2</sup> )
Numérique	29.0	165.559	1.474	0.0089	379.482
Expérimentale		168.5	1.27	0.0075	446.92
Numérique	37.5	146.782	2.197	0.0146	380.795
Expérimentale		150.0	2.44	0.0163	591.12
Numérique	40.0	136.881	2.495	0.01822	379.905
Expérimentale		133.0	2.67	0.0200	537.69
Numérique	52.5	120.0975	2.846	0.02369	381.359
Expérimentale		115.0	3.84	0.0334	509.45
Numérique	64.0	95.174	4.421	0.04545	381.888
Expérimentale		105.0	5.72	0.0545	569.38

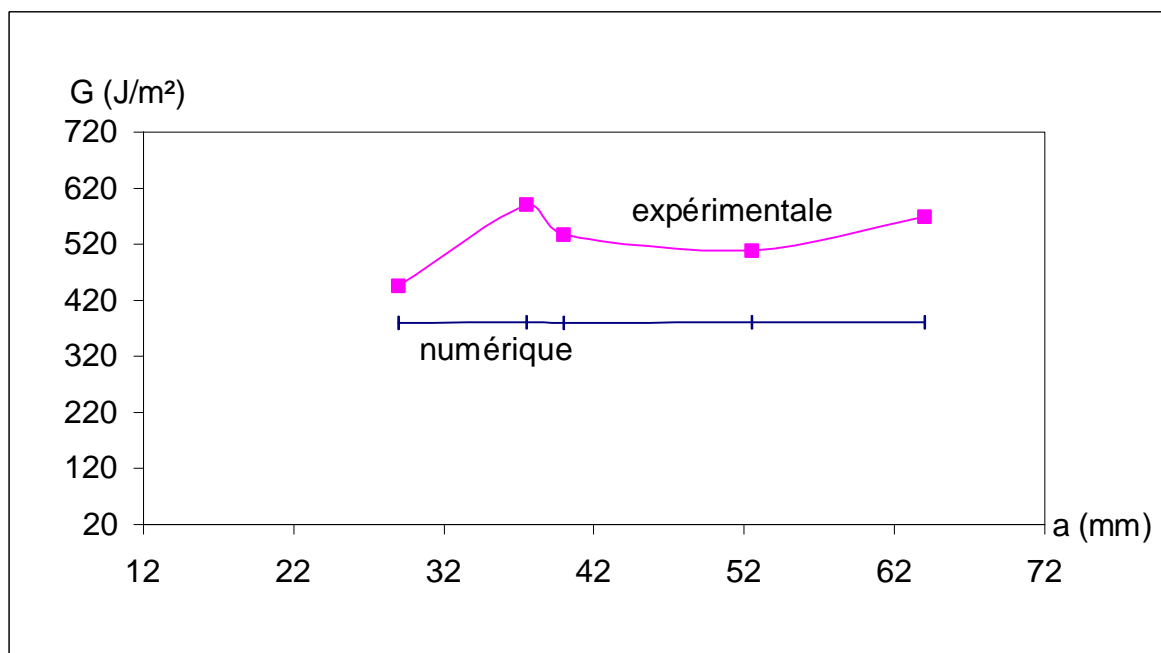


Figure.V.14 :Variation de l'énergie de restitution en fonction de l'ouverture de la fissure(90/90).

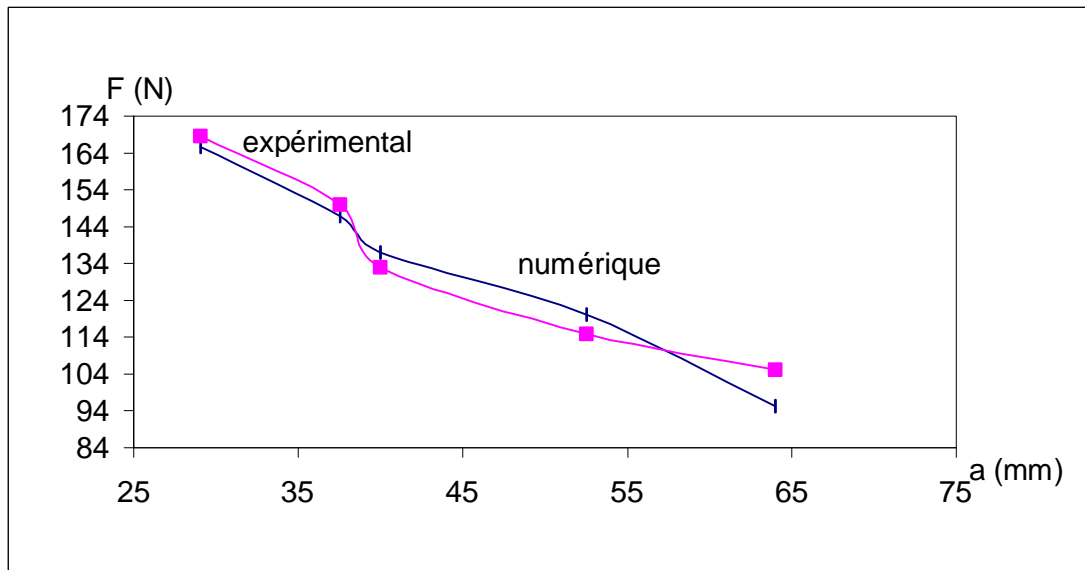


Figure.V.15 :Variation de la force en fonction de la l'ouverture de la fissure(90/90).

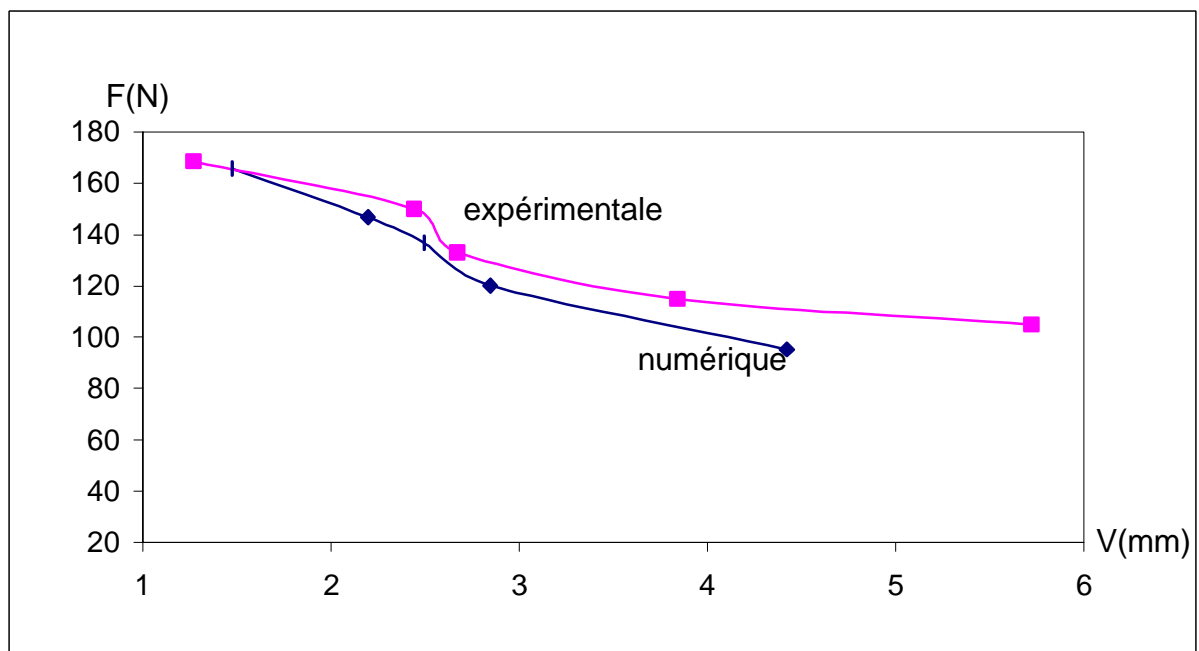


Fig V.16 : Variation de la force en fonction des déplacements des lèvres(90/90).

**d) Configuration 45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup>**

Tableaux V.6 : configuration 45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup>

	A <sub>0</sub> (mm)	F(N)	V(mm)	C(mm/N)	G(J/m <sup>2</sup> )
Numérique	26.5	184.903	0.986	0.00533	394.183
Expérimentale		167.0	1.31	0.0078	531.20
Numérique	37.0	118.944	1.996	0.011678	392069
Expérimentale		114.0	2.38	0.0209	471.85
Numérique	39.0	108.454	2.432	0.02242	393.645
Expérimentale		115.0	2.90	0.0252	550.24
Numérique	53.0	96.672	3.702	0.03829	394.239
Expérimentale		88.0	4.13	0.0469	441.24
Numérique	66.0	81.421	4.272	0.04419	392.263
Expérimentale		76.0	6.65	0.0875	492.73

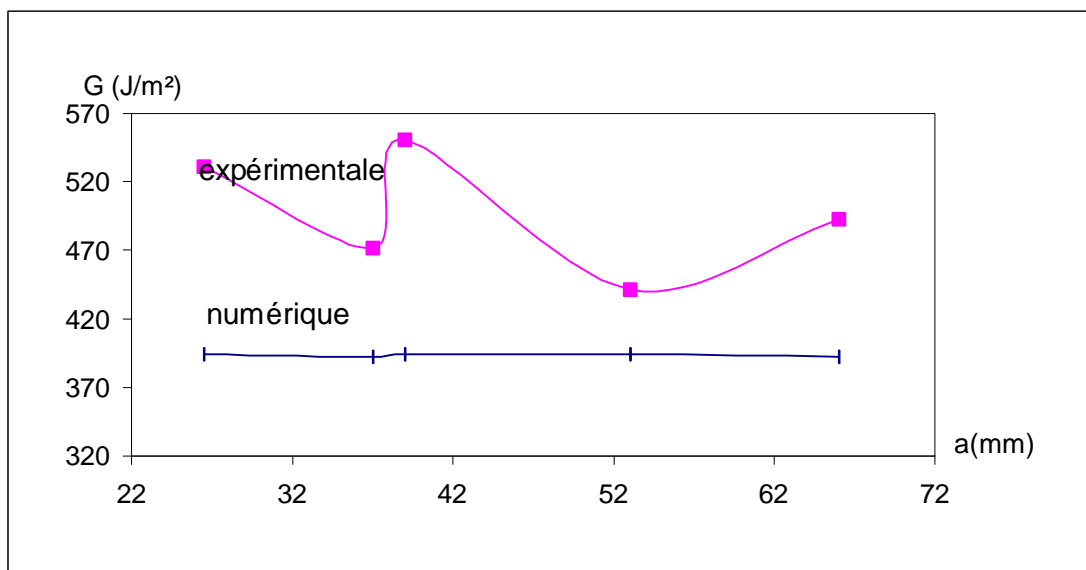


Figure V.17 : Variation de l'énergie de restitution en fonction de l'ouverture de la fissure(45/-45).

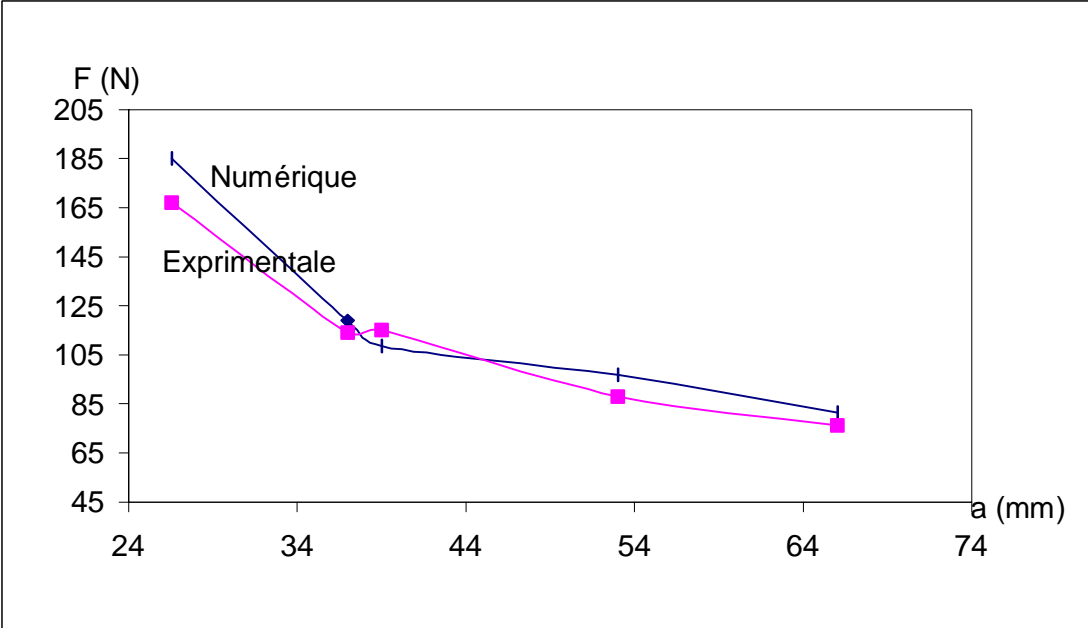


Figure V.18 : Variation de la force en fonction de l'ouverture de la fissure(45/-45).

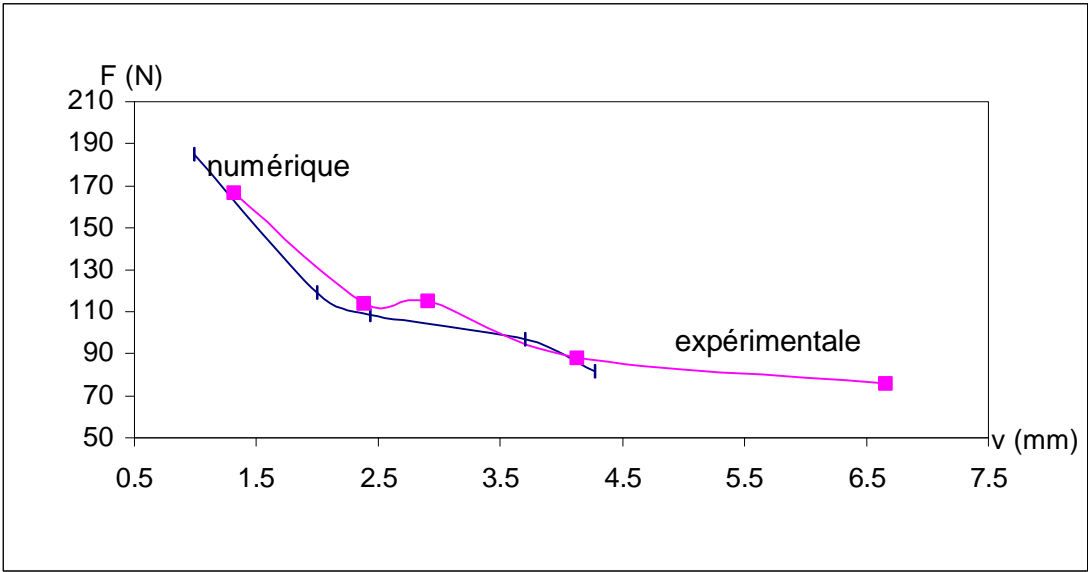


Figure.V.19 :Variation de la force en fonction des déplacements des lèvres(45/-45).