

Juin 2019

Projet Recherche

Délaminage de Stratifiés Composites

Aurore SOUBEYRAN – Flavien GHIGLIONE – Gérald FEUGUEUR
EPF SCEAUX

Sommaire

1	INTRODUCTION	1
2	DEMARCHE	2
2.1	Démarche générale.....	2
2.2	Calcul de $G(a)$ pour les modèles numériques et les résultats expérimentaux	3
2.3	Calcul de $G_c(a)$ pour les modèles numériques et les résultats expérimentaux.....	3
3	ESSAI DCB	5
3.1	Présentation de l'essai	5
3.2	Approche théorique.....	6
3.2.1	Insuffisance du critère en contrainte	6
3.2.2	Calcul du déplacement	7
3.2.3	Calcul de l'énergie élastique.....	9
3.2.4	Calcul du taux de restitution de l'énergie sur l'éprouvette DCB.....	9
3.3	Approche numérique	11
3.3.1	Paramètres matériau utilisés pour les simulations numériques.....	11
3.3.2	Présentation du modèle	11
3.3.3	Conditions aux limites	12
3.3.4	Maillage	13
3.3.5	Résultats de la simulation.....	14
3.4	Confrontation des résultats	17
3.4.1	En termes de rigidité	17
3.4.2	En termes de taux d'énergie critique	18
4	ESSAI MMF.....	20
4.1	Présentation de l'essai	20
4.2	Approche numérique	20
4.2.1	Présentation du modèle.....	20
4.2.2	Conditions aux limites.....	21
4.2.3	Maillage	22
4.2.4	Résultats de la simulation	23
4.2.5	Confrontation des résultats.....	24
5	ESSAI MMB	27
5.1	Présentation de l'essai	27
5.2	Présentation et confrontation des résultats expérimentaux.....	27
6	CONFRONTATION ENTRE LES DIFFERENTS ESSAIS	31
6.1	Confrontation des approches numériques	31
6.2	Confrontation des approches expérimentales	34
7	CONCLUSION	35

8	BIBLIOGRAPHIE.....	36
---	--------------------	----

Liste des figures

Figure 1 Les modes de rupture	2
Figure 2 Démarche appliquée pour calculer $G(a)$ et G_c	4
Figure 3 Modèle de double poutres consoles sollicitées en flexion (à gauche) - photographie d'un essai DCB (à droite)	5
Figure 4 Fissure dans un milieu plan	6
Figure 5 Schéma de l'essai DCB	7
Figure 6 Modèle théorique utilisé pour l'essai DCB	7
Figure 7 Schéma théorique de l'essai DCB avec réactions d'appui	8
Figure 8 Taux de restitution de l'énergie en fonction de la longueur de fissure pour un déplacement imposé	10
Figure 9 Propriétés matériau	11
Figure 10 Propriétés matériau utilisées dans Abaqus	11
Figure 11 Plans de symétries vus de face (à gauche) et de dessus (à droite)	11
Figure 12 Dimensions de l'éprouvette modélisée en tenant compte des conditions de symétries	11
Figure 13 Visualisation de l'éprouvette DCB sur ABAQUS	12
Figure 14 Visualisation des conditions de symétrie dans le plan longitudinal	12
Figure 15 Conditions de symétrie dans le plan transversal	12
Figure 16 Conditions aux limites en déplacement	12
Figure 17 Energie de déformation en fonction du nombre d'éléments dans l'épaisseur	13
Figure 18 Visualisation du maillage utilisé	14
Figure 19 Visualisation de la contrainte σ_{33}	14
Figure 20 Energie élastique en fonction de la longueur de fissure	15
Figure 21 Taux de restitution de l'énergie en fonction de la longueur de fissure	15
Figure 22 Ecart entre le modèle éléments finis et le modèle poutre en fonction de la longueur de fissure ...	16
Figure 23 Rigidité des modèles, éléments finis, poutre et expérimental en fonction de la longueur de fissure	17
Figure 24 Taux de restitution de l'énergie critique en fonction de la longueur de fissure pour le modèle éléments finis et les résultats expérimentaux	18
Figure 25 Partie stabilisée de G_c en fonction de a	18
Figure 26 photo d'un essai MMF	20
Figure 27 Modélisation d'une partie de l'éprouvette	21
Figure 28 Visualisation de l'éprouvette MMF sur ABAQUS	21
Figure 29 Conditions au limites de l'éprouvette	21
Figure 30 Energie de déformation en fonction du nombre d'éléments dans l'épaisseur	22
Figure 31 Visualisation du maillage utilisé	23
Figure 32 Visualisation de la contrainte sur le front de l'éprouvette	23
Figure 33 Visualisation de la contrainte de cisaillement sur l'éprouvette	23
Figure 34 ENERGIE ELASTIQUE EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE FISSURE	24
Figure 35 COMPARAISON DE L'EVOLUTION DE LA RIGIDITE OBTENU EXPERIMENTALEMENT ET PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS	25
Figure 36 TAUX DE RESTITUTION DE L'ENERGIE CRITIQUE EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE FISSURE POUR LE MODELE ELEMENTS FINIS ET LES RESULTATS EXPERIMENTAUX	25
Figure 37 Taux de restitution de l'énergie critique en fonction de la longueur de fissure pour une interpolation linéaire de la rigidité	26
Figure 38 Schéma de l'essai MMB (à gauche) et photographie de l'essai MMB (à droite)	27
Figure 39 COMPARAISON DES RIGIDITES EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE FISSURE POUR LES DIFFERENTS ESSAIS MMB (INTERPOLATION POLYNOMIALE)	27
Figure 40 Comparaison des rigidités en fonction de la longueur de fissure pour les différents essais MMB (interpolation puissance)	28

Figure 41 comparaison des taux de restitution de l'énergie critique en fonction de la longueur de fissure (interpolation puissance).....	29
Figure 42 comparaison des taux de restitution de l'énergie critique en fonction de la longueur de fissure (interpolation polynomiale)	30
Figure 43 comparaison de la rigidité obtenue par éléments finis pour DCB et MMF.....	31
Figure 44 comparaison des taux de restitution obtenus par éléments finis pour DCB et MMF.....	31
Figure 45 comparaison de l'évolution de l'Energie élastique entre les essais DCB et MMF par éléments finis	32
Figure 46 comparaison des taux de restitution d'énergie critiques obtenus par éléments finis pour DCB et MMF	33
Figure 47 G_c en fonction de a pour les différents essais (interpolation puissance pour DCB et MMB et linéaire pour MMF).....	34

Liste des tableaux

Tableau 1 Etude de convergence	13
Tableau 2 Etude de convergence	22

1 INTRODUCTION

Pour diminuer la masse de ses avions, l'industrie aéronautique a de plus en plus recours aux matériaux composites, qui allient de bonnes propriétés mécaniques à une relative légèreté. Ces matériaux sont l'assemblage de différents composants dont les propriétés se complètent. En aéronautique, les composants utilisés sont de différentes sortes et varient en fonction de leur utilisation. Cependant, nous n'en étudierons qu'une sorte : les stratifiés à plis unidirectionnels, composés de fibres de carbone et d'une matrice d'époxy. Les fibres de carbone sont à l'origine de la rigidité du matériau et présente l'avantage d'être extrêmement léger par rapport à d'autres matériaux de même rigidité. Les résines d'époxy sont la matrice du composite assurant la cohésion de toutes les couches qui composent le matériau.

Au cours de leur utilisation dans l'avion, ces matériaux peuvent être sollicités de différentes manières et ainsi se dégrader plus ou moins rapidement, pouvant nuire à la sécurité des passagers. Un des plus dangereux mode de dégradation est le délaminage, le décollement de deux plis du matériau composite exploité. Ce mode de rupture est de type fragile et survient en particulier à basse température, à grande vitesse de chargement et si des défauts préexistaient au sein du matériau. Le matériau perd ainsi les propriétés mécaniques pour lesquelles il avait été installé et nuit donc à l'ensemble de la structure.

Pour prévenir ce danger, il est nécessaire d'étudier le comportement de ce matériau sous les impacts et les contraintes pouvant engendrer le délaminage afin de s'assurer que ces charges nominales restent bien confinées dans le domaine élastique du matériau. Ainsi, en étudiant la phase de propagation de la fissure, il est possible de prévoir la durée de vie du matériau à l'amorçage de la fissure. Pour des raisons économiques, ces essais se font en grande partie par simulation numérique avant les tests expérimentaux réalisés en temps réels, une fois les tests numériques validés. La réussite des simulations numériques est donc une étape primordiale dans la conception du matériau.

Au cours de ce projet nous devons :

- Modéliser l'essai DCB par un modèle poutre pour estimer le taux de restitution de l'énergie.
- Réaliser des modèles éléments finis de stratifiés testés en DCB et MMF en vue d'obtenir leur taux de restitution de l'énergie critique.

Nous décomposerons ce document en 6 parties. La première se concentrera sur les démarches appliquées au cours du projet, puis en 3 parties distinctes seront présentés les différents types d'essais, à savoir DCB, MMF et MMB, où uniquement pour le premier essai nous ferons une approche théorique et pour tous ces essais nous ferons une comparaison entre l'expérimental et une approche numérique réalisée par calcul éléments finis (sauf pour MMB). L'avant-dernière partie servira à confronter les trois types d'essais qui reposent sur des modes de rupture différents. Enfin, une synthèse du travail effectué clôturera ce document.

2 DEMARCHE

Dans cette partie nous verrons dans un premier lieu comment nous allons procéder de manière générale puis quelles ont été les démarches pour obtenir les taux d'énergie de restitution et taux d'énergie critique.

2.1 Démarche générale

Pour réaliser ces simulations numériques, il faut nécessairement comprendre les concepts physiques en jeu. Le délaminage peut être modélisé dans un cadre théorique par la mécanique élastique linéaire de la rupture, développé par Alan Arnold Griffith. Ce modèle permet ainsi de définir une propriété du matériau qui est sa résistance à la rupture fragile, ainsi que trois modes de propagation d'une fissure : un mode I de traction normale au plan de fissure et un mode II et III de cisaillement agissant respectivement perpendiculaire et parallèle au front de la fissure, comme présenté ci-dessous :

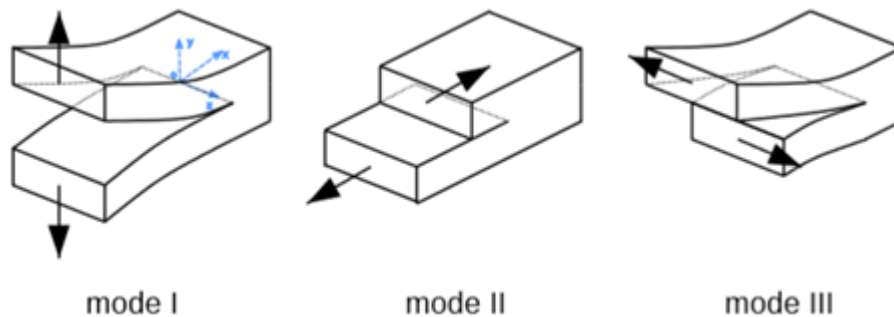


FIGURE 1 LES MODES DE RUPTURE

De manière générale, une fissure se propage dans le matériau sous une combinaison de ces contraintes. Cependant, nous nous limiterons à l'étude de ces trois modes séparément.

L'analyse du critère de Griffith ainsi que l'étude théorique des trois modes de rupture nous permettront ensuite d'établir des modèles numériques pour chacun des modes DCB, MMF, MMB et de pouvoir analyser et confronter leur résistance à la rupture fragile. Les modèles numériques seront réalisés sur Abaqus pour analyser les comportements du matériau par calculs d'éléments finis. En somme, cette étude nous permettra de comparer nos conclusions issues de l'analyse théorique et numérique avec celles de l'étude expérimentale décrites dans un extrait de thèse sur le comportement du délaminage dans un essai DCB.

2.2 Calcul de $G(a)$ pour les modèles numériques et les résultats expérimentaux

La formule de la rigidité de l'éprouvette est donnée par :

$$k = \frac{P}{\delta}$$

Elle permet de déterminer l'énergie élastique associée :

$$W_{\text{élastique}} = \frac{1}{2}k\delta^2$$

En effet, puisque nous travaillons à déplacement imposé nous avons :

$$G(a) = -\frac{\partial W_{\text{élastique}}}{\partial A} = -\frac{\partial W_{\text{élastique}}}{b\partial a}$$

Par une méthode de différences finies nous pouvons donc obtenir $G(a)$:

$$G(a) = -\frac{W_{\text{élastique}}(a) - W_{\text{élastique}}(a + h)}{b(a + h - a)}$$

où a est la longueur de fissure en mm, b la largeur de l'éprouvette en mm et h le pas en mm entre deux variations de longueur de fissure.

2.3 Calcul de $G_c(a)$ pour les modèles numériques et les résultats expérimentaux

La formule de la rigidité de l'éprouvette est donnée par :

$$k = \frac{P}{\delta}$$

Nous pouvons ainsi tracer k en fonction de a et connaître son expression mathématique en faisant une interpolation de manière graphique.

Par ailleurs, l'énergie élastique associée est défini par :

$$W_{\text{élastique}} = \frac{1}{2}k\delta^2$$

En effet, puisque nous travaillons à déplacement imposé nous avons :

$$G_c(a) = -\frac{\partial W_{\text{élastique}}}{\partial A} = -\frac{\partial W_{\text{élastique}}}{b\partial a} = -\frac{\delta^2}{2} \frac{\partial k(a)}{b\partial a}$$

où a est la longueur de fissure en mm, b la largeur de l'éprouvette en mm.

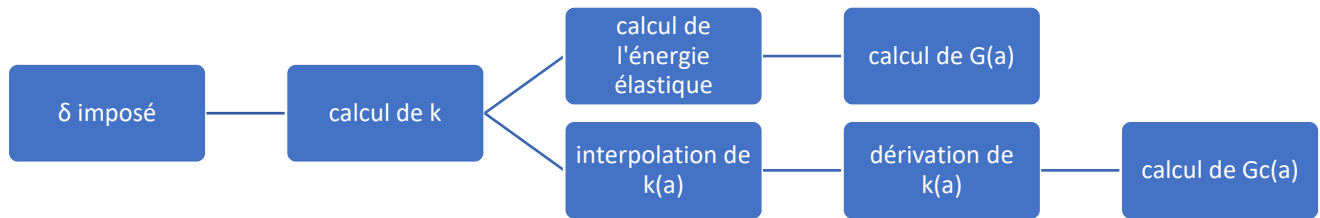


FIGURE 2 DEMARCHE APPLIQUEE POUR CALCULER $G(a)$ ET G_c

3 ESSAI DCB

Pour cet essai une présentation sera faite suivi d'une approche théorique et d'une approche numérique, enfin nous confronterons tous les résultats obtenus.

3.1 Présentation de l'essai

Ce type d'essai permet d'étudier la résistance à la rupture d'un composite sollicité en traction, présentant un défaut initial de deux plaques in-homogènement collées l'une à l'autre.

Pour réaliser cet essai, une éprouvette symétrique, supposée élastique et isotrope, est sollicitée en traction sur une de ses extrémités et l'autre extrémité est maintenue fixe. Nous pouvons ainsi modéliser l'éprouvette par un modèle de doubles poutres encastrées sollicitées en flexion comme présenté ci-dessous :

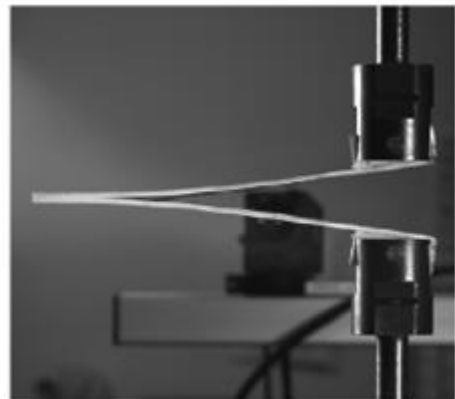
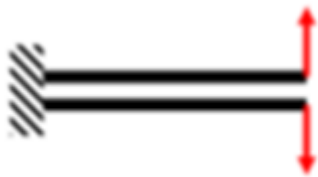


FIGURE 3 MODELE DE DOUBLE POUTRES CONSOLES SOLLICITEES EN FLEXION (A GAUCHE) - PHOTOGRAPHIE D'UN ESSAI DCB (A DROITE)

L'extrémité sollicitée en traction a été préalablement muni d'un défaut artificiel permettant d'amorcer le délaminage pour être en mesure de n'étudier que le phénomène de propagation de la fissure. Ce défaut est lié à l'insertion d'un non-adhésif en téflon d'une épaisseur faible entre des plis médians du stratifié et est à l'origine de la pré-fissure l'éprouvette. Ainsi, lorsque la charge de traction augmente, la fissure se propage dans le matériau à partir d'une taille initiale fixée, supérieure à l'épaisseur de l'éprouvette. La résistance à la propagation de la fissure peut ensuite être mesurée par le taux d'énergie restituée aux interfaces du composite.

3.2 Approche théorique

3.2.1 Insuffisance du critère en contrainte

Hypothèse :

La rupture du matériau est fragile (les non-linéarités matériau sont confinées dans une petite zone au voisinage du front de fissure et que les énergies de dissipation mises en jeu sont négligeables devant l'énergie dissipée par le processus de création de la fissure)

Critère de contrainte :

Quand la fissure est très petite ($a \ll h$ et $a \ll w$), Muskhelishvili a donné la solution analytique de ce problème élastique :

$$\text{Pour } x \geq a : \sigma_{yy}(y = 0) = \frac{\sigma_{\infty}}{\sqrt{1 - \left(\frac{a}{x}\right)^2}}$$

$$\text{Pour } 0 < x < a : u_y(y = 0) = \frac{4\sigma_{\infty}a}{E} \sqrt{1 - \left(\frac{a}{x}\right)^2}$$

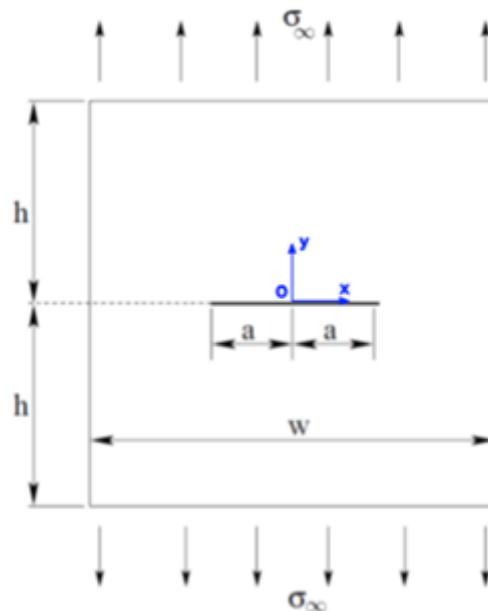


FIGURE 4 FISSURE DANS UN MILIEU PLAN

On en déduit que dans un milieu élastique contenant une fissure, il y a une contrainte infinie de part et d'autre de cette fissure.

Pour déterminer la contrainte maximale à partir de laquelle la fissure commence à se propager, il faut donc utiliser un autre critère.

Dans un premier temps, les essais seront modélisés analytiquement par deux méthodes de calcul, puis, dans un deuxième temps, cette propriété sera retrouvée par identification.

Le modèle de poutre adopté est la poutre DCB (Double Cantilever Beam), qui permet de modéliser la propagation d'une fissure plane dans une poutre bidimensionnelle élastoplastique avec les éléments finis d'interface.

Dans cet essai, la pré-fissure est causée par l'insertion d'une plaque de téflon entre deux plaques de fibre de carbone, pour empêcher qu'elles puissent se coller.

Lorsque la poutre est soumise à une contrainte faible, la fissure ne se propage pas. Cependant, lorsque la contrainte est assez forte, la fissure peut se propager et libérer ainsi de l'énergie.

La dissipation de cette énergie entraîne une variation d'énergie potentielle élastique :

$$E_{potentielle} = (1/2) k \delta^2$$

On suppose que pour que la fissure se propage, la structure doit retourner une énergie : $E = 2\gamma A$, avec γ la propriété du matériau et A sa surface. $A = ba$ avec la notation utilisée.

3.2.2 Calcul du déplacement

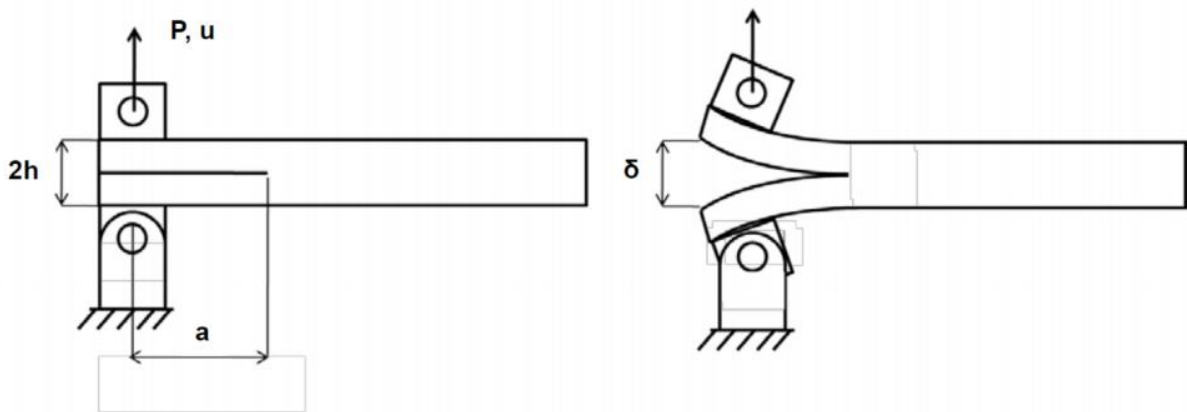


FIGURE 5 SCHEMA DE L'ESSAI DCB

Pour des raisons de symétrie, il est possible de modéliser cet essai avec un modèle poutre de la manière suivante :

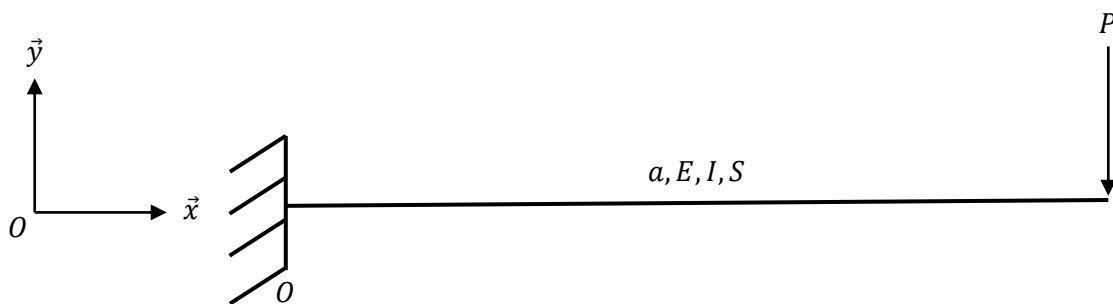


FIGURE 6 MODELE THEORIQUE UTILISE POUR L'ESSAI DCB

Avec :

a la longueur de la poutre qui représente la longueur de la fissure

E le module d'Young

S la section de la poutre

I le moment quadratique de la section S

P une force ponctuelle appliquée à l'extrémité

Bilan des actions mécaniques :

- Moment d'encastrement M_O
- Réaction d'appui lié à l'encastrement R_O
- Force ponctuelle à l'extrémité

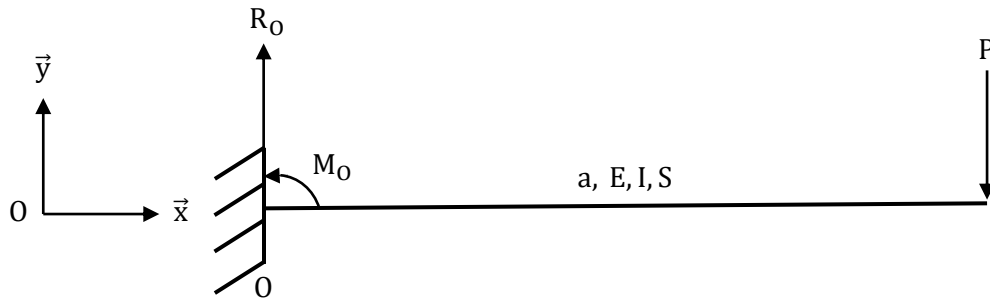


FIGURE 7 SCHEMA THEORIQUE DE L'ESSAI DCB AVEC REACTIONS D'APPUI

Le Principe Fondamental de la Statique appliqué en O nous donne directement les réactions d'appuis à l'encastrement :

$$R_O = P \text{ et } M_O = -aP$$

Calcul des efforts intérieurs :

Soit $x \in [0; a[$:

$$T(x) = R_O = P$$

$$M(x) = M_O + R_O x = P(x - a)$$

Calcul de la rotation ω en tout point de la poutre :

$$\omega(x) = \int \frac{M(x)}{EI} dx$$

Soit :

$$\omega(x) = \frac{1}{2} \frac{P(x - a)^2}{EI} + \omega_1$$

Or en O , la rotation est nulle, c'est-à-dire $\omega(0) = 0$

Ainsi :

$$\omega(x) = \frac{1}{2} \frac{P(x - a)^2}{EI} - \frac{1}{2} \frac{Pa^2}{EI} = \frac{1}{2} \frac{P(x - 2a)x}{EI}$$

Calcul de la flèche y en tout point de la poutre :

$$y(x) = \int \omega(x) dx$$

Soit :

$$y(x) = \frac{1}{2} \frac{P \left(\frac{1}{3} x^3 - a x^2 \right)}{EI} + y_1$$

Or en O , la flèche est nulle, c'est-à-dire $y(0) = 0$

Ainsi :

$$y(x) = \frac{1}{2} \frac{P \left(\frac{1}{3}x - a \right) x^2}{EI}$$

Calcul de la flèche y_a à l'extrémité en $x = a$:

$$y_a = -\frac{Pa^3}{3EI}$$

Or le déplacement δ , correspond au double de la longueur de la flèche à l'extrémité.

Ainsi :

$$\delta = 2|y_a| = \frac{2Pa^3}{3EI}$$

3.2.3 Calcul de l'énergie élastique

L'énergie potentielle élastique dissipée pour déplacer la section de ∂A dépend de la rigidité du matériau. Pour déterminer cette énergie, il faut d'abord calculer le coefficient de raideur k .

La raideur apparente k de l'éprouvette est définie de la manière suivante :

$$k(a) = \frac{P}{\delta} = \frac{3EI}{2a^3}$$

L'énergie potentielle élastique $W_{elas}(a)$ s'exprime ainsi :

$$W_{elas}(a) = \frac{1}{2} k(a) \delta^2 = \frac{3EI}{4a^3} \delta^2$$

3.2.4 Calcul du taux de restitution de l'énergie sur l'éprouvette DCB

Avec $k(a) = \frac{3EI}{2a^3} = \frac{3EI}{2} a^{-3}$ on trouve $\frac{\partial k}{\partial a} = -3 \times \frac{3EI}{2} \times a^{-4} = -\frac{3}{a} \times \frac{3EI}{2a^3} = -\frac{3}{a} k$

L'évolution se fait à déplacement imposé.

Le taux de restitution d'énergie de fissuration s'écrit :

$$G = \frac{\partial W_{ext}}{\partial A} - \frac{\partial W_{elas}}{\partial A}$$

Avec :

$$\frac{\partial}{\partial A} = \frac{\partial}{\partial(ab)} = \frac{1}{b} \left(\frac{\partial}{\partial a} \right)$$

De plus l'évolution se faisant à déplacement imposé on a $\frac{\partial W_{ext}}{\partial A} = 0$

Ainsi on trouve :

$$G = -\frac{\partial W_{elas}}{\partial A} = -\frac{1}{b} \frac{\partial}{\partial a} \left(\frac{1}{2} k \delta^2 \right)$$

Avec $\frac{\partial k}{\partial a} = -\frac{3}{a}k$ on trouve $G = \frac{1}{b} \times \frac{3}{a}k\delta^2$ et avec $k = \frac{P}{\delta}$ on obtient $G = \frac{3P\delta}{2ba}$

Enfin, à partir de $P\delta = k\delta^2 = \frac{3EI}{2a^3}\delta^2$ on trouve $G = \frac{3}{2ba} \left(\frac{3EI}{2a^3} \right) \delta^2$ d'où $G = \frac{9EI}{4ba^4}\delta^2$

On peut donc tracer G en fonction de a :

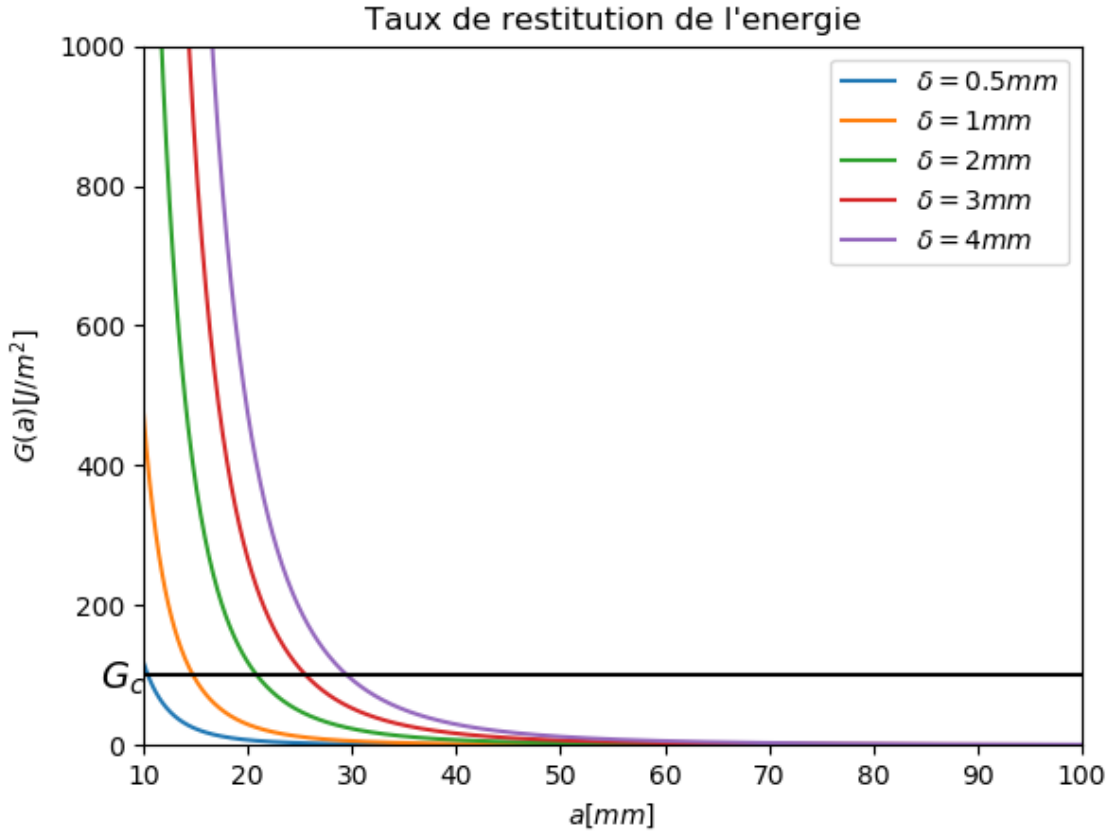


FIGURE 8 TAUX DE RESTITUTION DE L'ENERGIE EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE FISSURE POUR UN DEPLACEMENT IMPOSE

Pour un a fixé relativement faible, il faut imposer un déplacement assez élevé pour que la propagation de la fissure se fasse, c'est-à-dire que le taux de restitution de l'énergie soit supérieur ou égal à G_c .

Relation force propagation pendant le déplacement :

De $G_c = \frac{3P_c\delta_c}{2ba}$ et $G_c = \frac{9EI}{4ba^4}\delta_c^2$ on déduit les expressions suivantes : $a = \frac{3P_c\delta_c}{2bG_c}$ et $a = \left(\frac{9EI\delta_c^2}{4G_cb} \right)^{\frac{1}{4}}$

Par égalité on trouve donc $\frac{3P_c\delta_c}{2bG_c} = \left(\frac{9EI\delta_c^2}{4G_cb} \right)^{\frac{1}{4}}$

On a donc $P_c = \frac{2G_cb}{3\delta_c} \left(\frac{9EI\delta_c^2}{4G_cb} \right)^{\frac{1}{4}} = \frac{2}{3} \frac{G_cb}{\delta_c} \left(\frac{3}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{EI}{G_cb} \right)^{\frac{1}{4}} (\delta_c)^{\frac{1}{2}}$

D'où $P_c = \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{1}{2}} (G_cb)^{\frac{1}{3}} (EI)^{\frac{1}{4}} (\delta_c)^{-\frac{1}{2}}$

Finalement $P_c = \left(\left(\frac{2}{3} \right)^{1/2} b^{3/4} (EI)^{1/4} G_c^{3/4} \right) \delta_c^{-1/2}$

3.3 Approche numérique

3.3.1 Paramètres matériau utilisés pour les simulations numériques

Le matériau utilisé est un pli unidirectionnel composé de fibres de carbone entourées d'une matrice époxy. Les données fournies sont les suivantes :

E_f	E_m	ν_{fm}	ν_{mm}	G_{fm}	G_{mm}
130.0 GPa	7.7 GPa	0.33	0.4	4750 MPa	2750 MPa

FIGURE 9 PROPRIETES MATERIAU

Les indices f et m désignent respectivement les directions fibres et matrice.

Les fibres sont orientées selon l'axe Ox et le pli étant isotrope transverse, on a les paramètres suivants :

	E1	E2	E3	Nu12	Nu13	Nu23	G12	G13	G23
1	130000	7700	7700	0.33	0.33	0.4	4750	4750	2750

FIGURE 10 PROPRIETES MATERIAU UTILISEES DANS ABAQUS

3.3.2 Présentation du modèle

Du fait des conditions de symétries dues à la géométrie de l'éprouvette, on peut n'en représenter qu'un quart. Les plans de symétries sont situés entre les deux bras transversalement et au milieu de l'éprouvette longitudinalement, ils sont représentés en pointillés rouges sur les images ci-dessous :

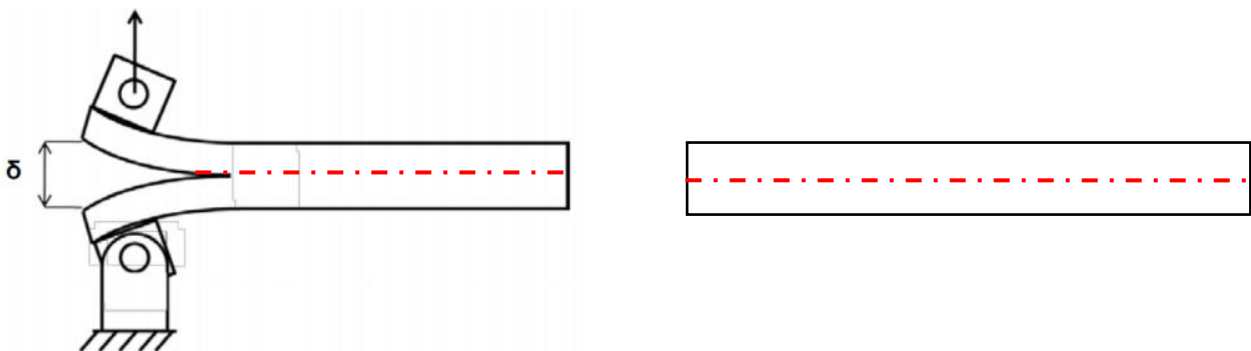


FIGURE 11 PLANS DE SYMETRIES VUS DE FACE (A GAUCHE) ET DE DESSUS (A DROITE)

L'épaisseur de l'éprouvette modélisée est de 1.56mm (6plis de 0.26mm d'épaisseur). Ci-dessous est visible une représentation du modèle numérique.

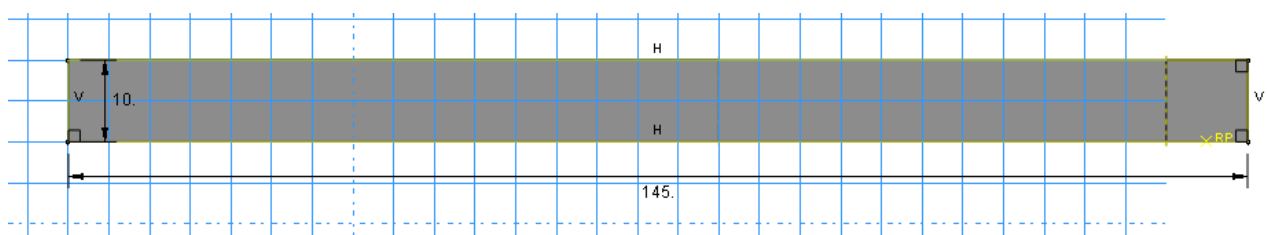


FIGURE 12 DIMENSIONS DE L'ÉPROUVETTE MODELISEE EN TENANT COMPTE DES CONDITIONS DE SYMETRIES

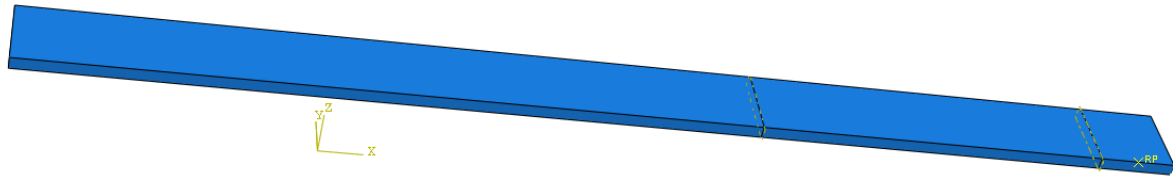


FIGURE 13 VISUALISATION DE L'EPROUVETTE DCB SUR ABAQUS

3.3.3 Conditions aux limites

Les conditions aux limites à appliquées sont les conditions sur les déplacements découlant des conditions de symétries. On a donc les conditions aux limites suivantes :

$$U_y = U_x = U_{Rz} = 0 \text{ dans le plan longitudinal}$$

Cette condition traduit la relation de symétrie appliquée sur le plan longitudinal.

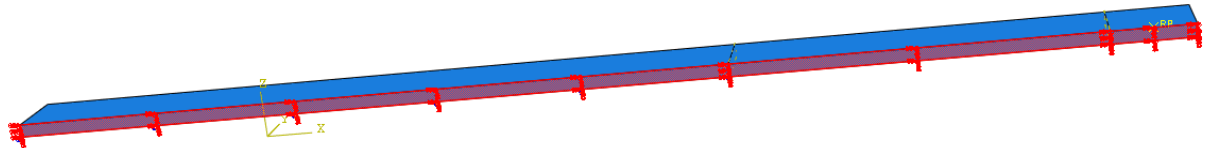


FIGURE 14 VISUALISATION DES CONDITIONS DE SYMETRIE DANS LE PLAN LONGITUDINAL

$$U_z = U_{Rx} = U_{Ry} = 0 \text{ dans le plan transversal.}$$

Cette condition traduit la relation de symétrie au niveau du plan entre les bras.

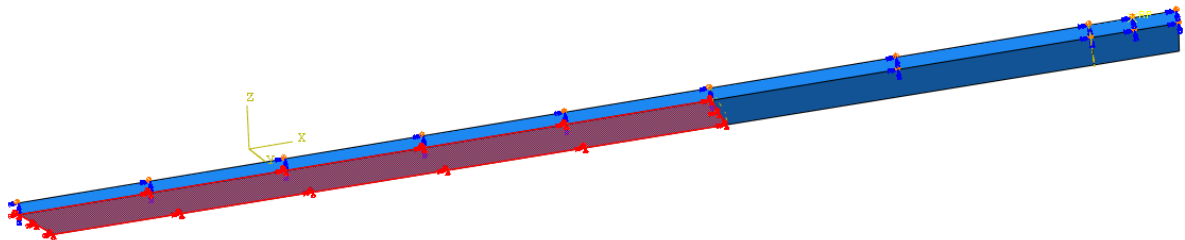


FIGURE 15 CONDITIONS DE SYMETRIE DANS LE PLAN TRANSVERSAL

Enfin, nous travaillons à déplacement imposé et avons choisi d'appliquer un déplacement vertical de 5mm au point situé au milieu du mors, il se situe sur un des plans de symétrie.

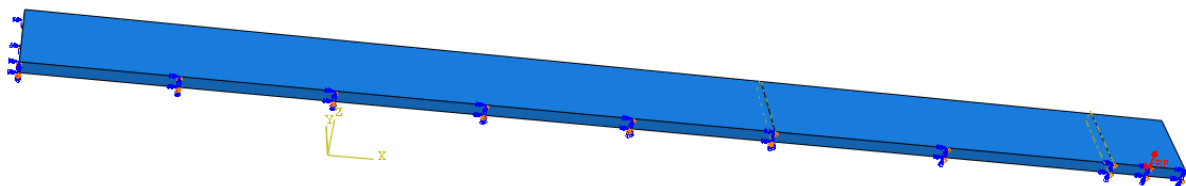


FIGURE 16 CONDITIONS AUX LIMITES EN DEPLACEMENT

$$U_z = 5mm \text{ au point d'application.}$$

3.3.4 Maillage

Pour déterminer le maillage adéquat à utiliser, nous avons réalisé une étude de convergence sur l'énergie de déformation du modèle en fonction du nombre d'éléments dans l'épaisseur. Nous obtenons les résultats ci-dessous :

Nombre d'éléments dans l'épaisseur	1	3	5	7	10
Energie de déformation en mJ (éléments à champ de déplacement quadratique)	104,711	103,901	103,904	103,91	103,9170
Energie de déformation en mJ (éléments à champ de déplacement linéaire)	26,1346	99,2373	102,72	103,621	104,096

TABLEAU 1 ETUDE DE CONVERGENCE

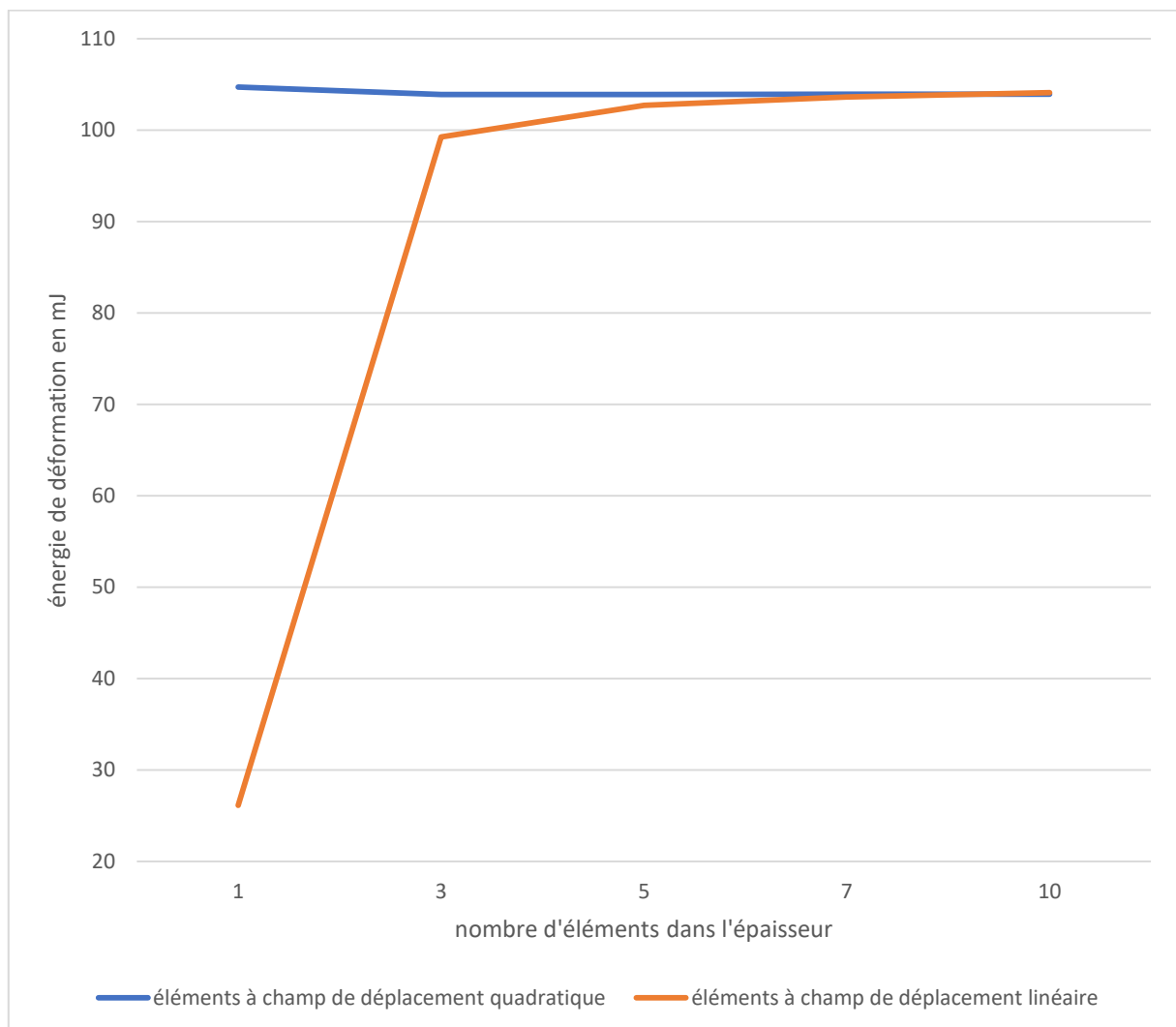


FIGURE 17 ENERGIE DE DEFORMATION EN FONCTION DU NOMBRE D'ELEMENTS DANS L'EPAISSEUR

On s’aperçoit que les éléments à champ de déplacement quadratique convergent plus rapidement que ceux à champ de déplacement linéaire. Nous avons donc choisi d’utiliser des éléments hexaédriques à champ de déplacement quadratique avec 5 éléments dans l’épaisseur. En effet, à partir de cette valeur augmenter le nombre d’éléments ne modifie que très faiblement les résultats obtenus tout en augmentant le temps de calcul.

Nous avons également raffiné le maillage autour du front de fissure pour mieux capter les fortes variations de contraintes dans cette zone. Nous obtenons donc le maillage suivant :

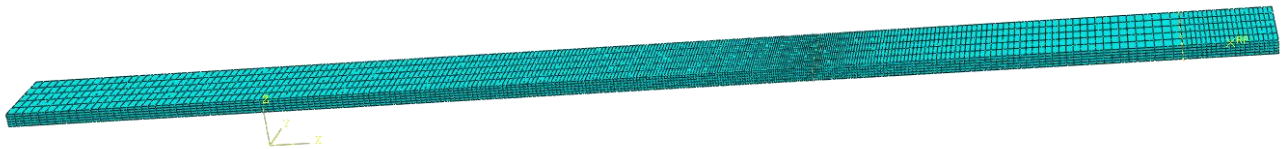


FIGURE 18 VISUALISATION DU MAILLAGE UTILISE

3.3.5 Résultats de la simulation

Nous pouvons observer que la contrainte σ_{33} est particulièrement élevée au niveau du front de fissure, il y a bien une concentration de contrainte dans cette zone, comme prévu par le modèle théorique.

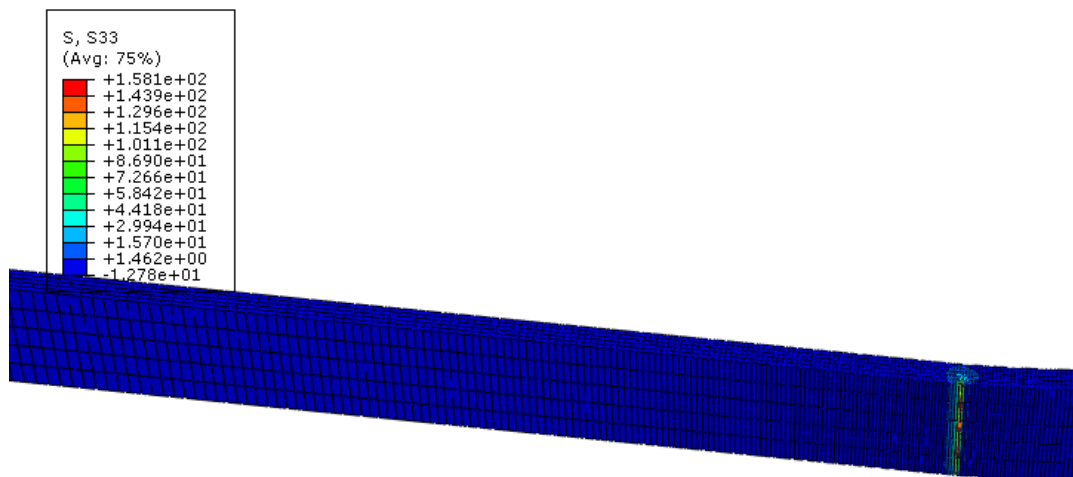


FIGURE 19 VISUALISATION DE LA CONTRAINTE σ_{33}

Dans le but de déterminer $G(a)$, nous avons relevé les valeurs des efforts de réaction F_z au point d’application du déplacement pour a variant de 40mm à 105mm par pas $h=5mm$ et pour une épaisseur d’éprouvette $b = 20mm$. La méthode appliquée pour déterminer $G(a)$ est celle décrite dans la partie [2.2](#).

Nous avons tracé l’énergie élastique en fonction de a pour le maillage que nous avons présenté précédemment.

Nous obtenons le graphique suivant :

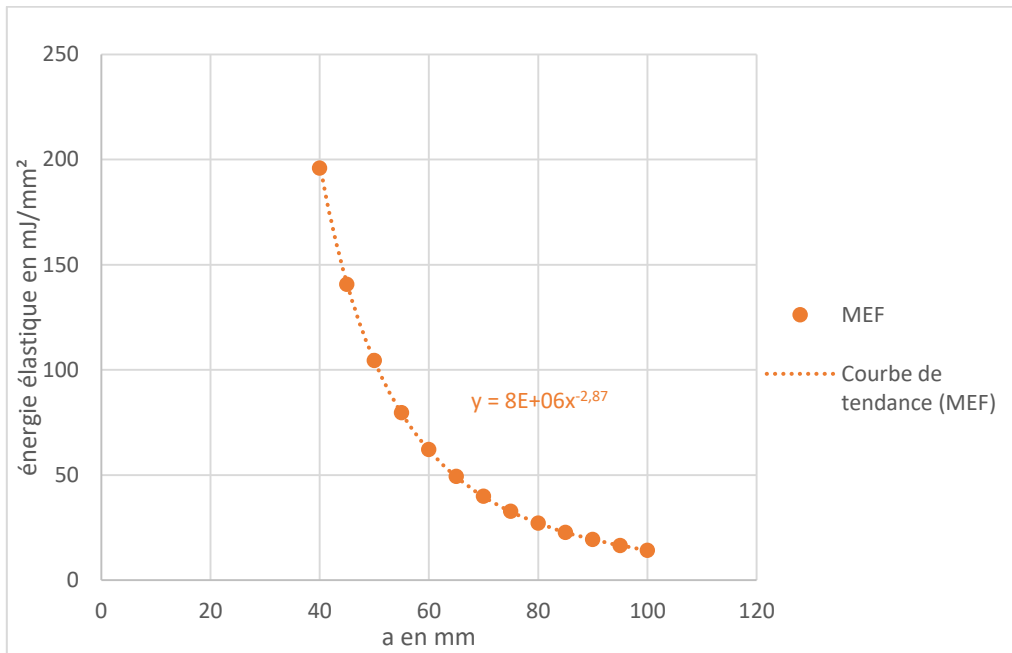


FIGURE 20 ENERGIE ELASTIQUE EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE FISSURE

La courbe obtenue peut être approximée par une courbe de tendance d'équation $y = 8E+06 a^{-2,87}$ qui est proche de celle du modèle poutre théorique qui est $y = \frac{3EI\delta^2}{4} a^{-3}$.

Nous avons également tracé G en fonction de a pour le maillage susmentionné et le modèle poutre :

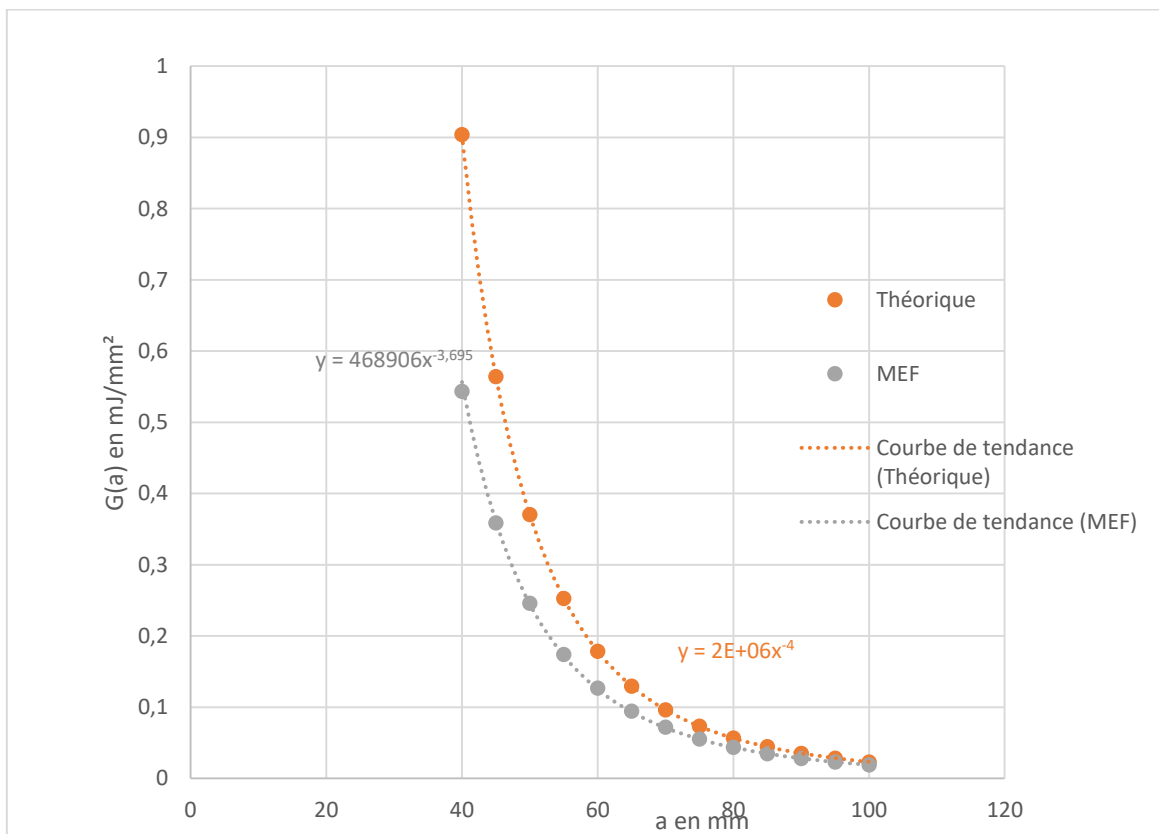


FIGURE 21 TAUX DE RESTITUTION DE L'ENERGIE EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE FISSURE

Afin de mieux évaluer la différence entre le modèle éléments finis avec le maillage 2 et le modèle poutre nous avons tracé l'écart en fonction de a .

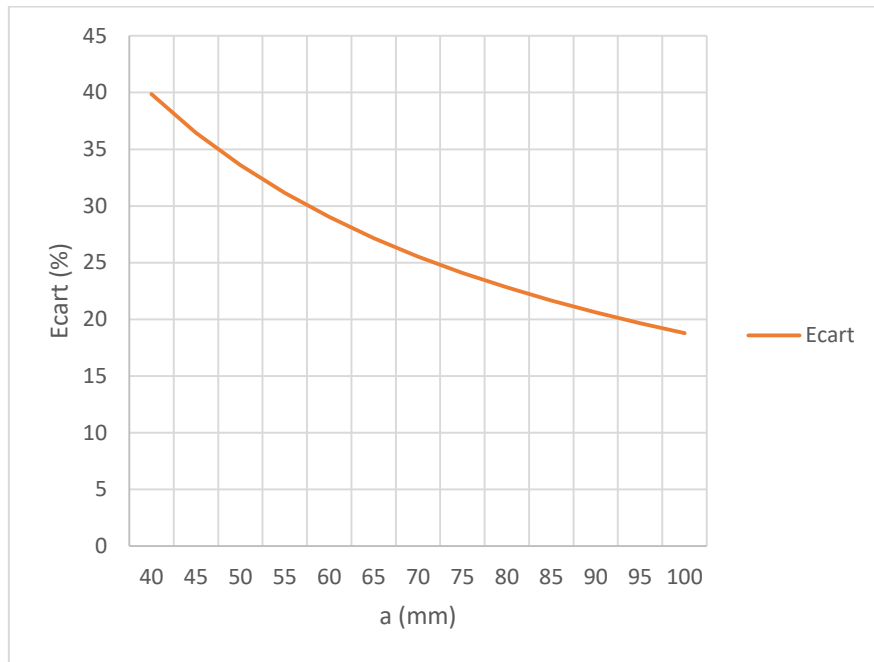


FIGURE 22 ECART ENTRE LE MODELE ELEMENTS FINIS ET LE MODELE POUTRE EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE FISSURE

On constate que l'écart est d'autant plus important que la longueur de fissure est petite, il vaut en effet 39.86% pour la pré-fissure et 18.79% pour une fissure de 100mm. Nous pensons que cela est dû au fait que plus la longueur de fissure est grande, plus le cadre de la théorie des poutres est valide et donc proche du modèle EF.

3.4 Confrontation des résultats

3.4.1 En termes de rigidité

Nous avons tracé la rigidité obtenue pour les modèles éléments finis, expérimental et théorique poutre en fonction de la longueur de fissure.

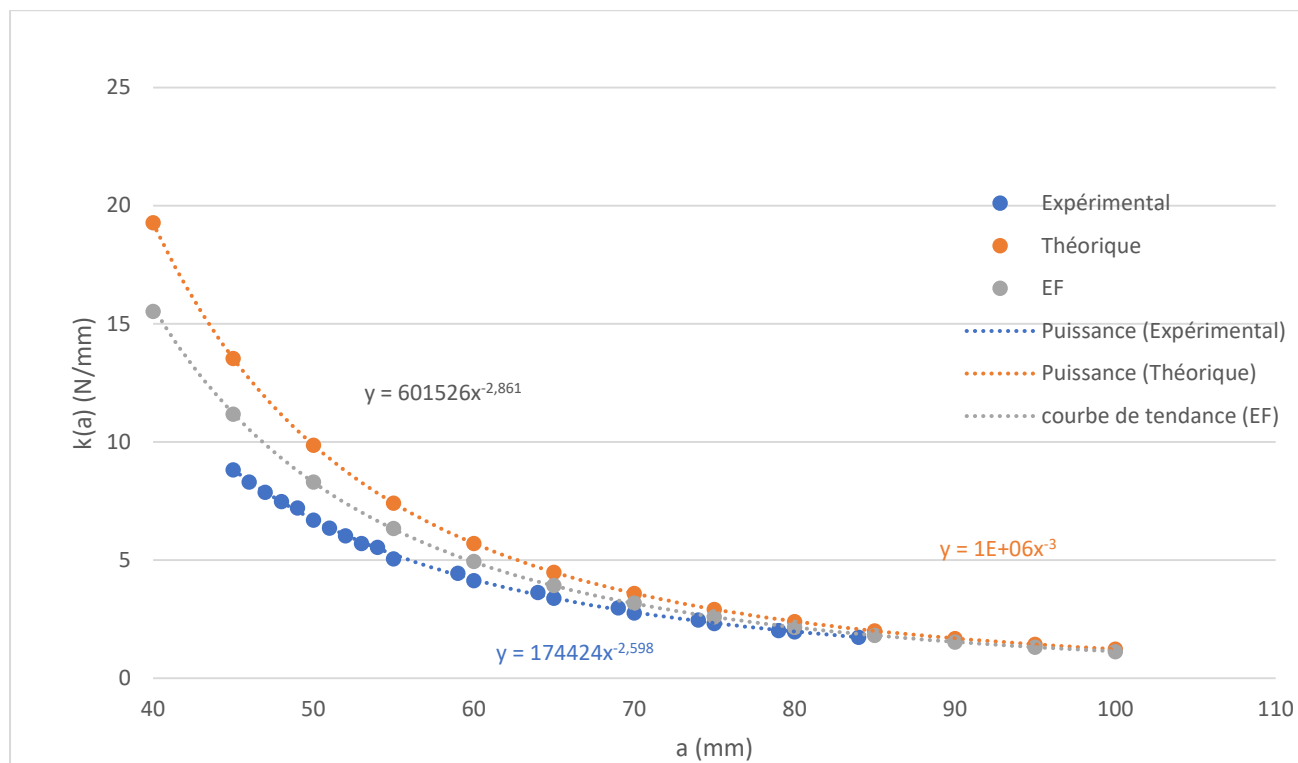


FIGURE 23 RIGIDITE DES MODELES, ELEMENTS FINIS, POUTRE ET EXPERIMENTAL EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE FISSURE

Les modèles éléments finis et poutre ont tendance à surestimer la rigidité par rapport aux relevés expérimentaux, cette différence est surtout marquée pour des longueurs de fissure faibles.

3.4.2 En termes de taux d'énergie critique

Enfin, nous avons tracé G_c en fonction de a .

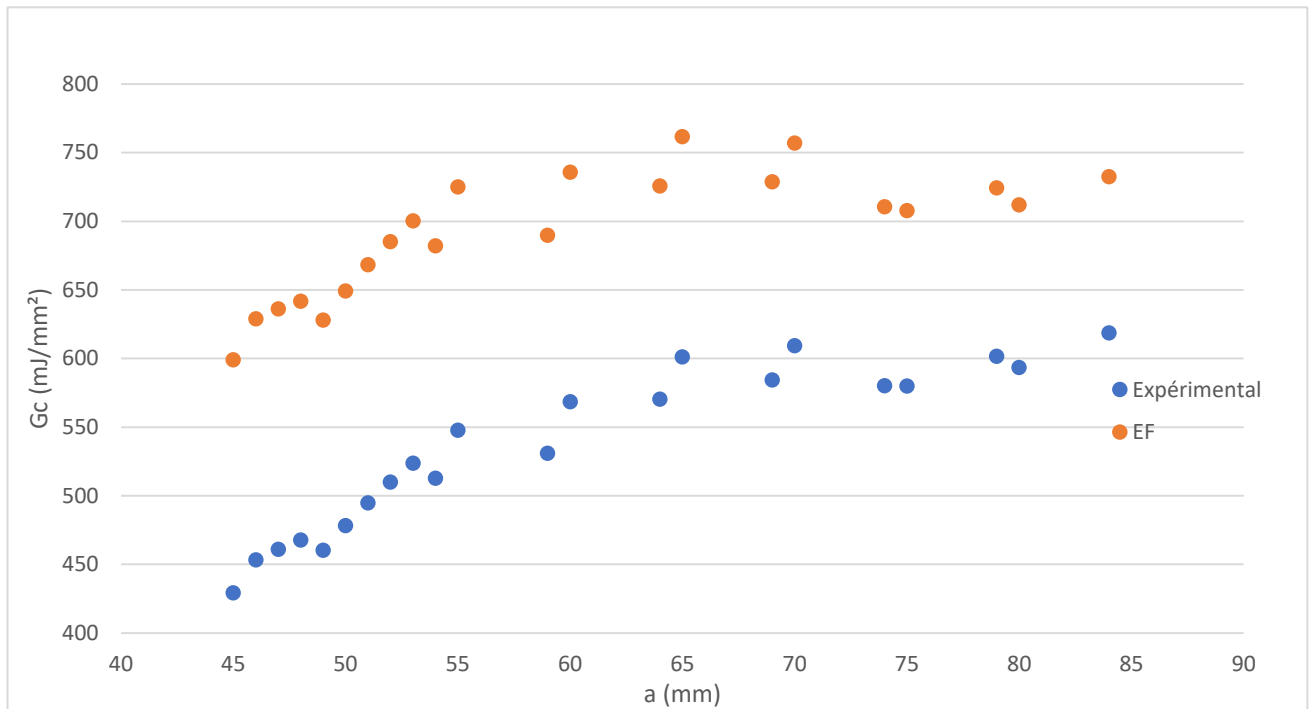


FIGURE 24 TAUX DE RESTITUTION DE L'ENERGIE CRITIQUE EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE FISSURE POUR LE MODELE ELEMENTS FINIS ET LES RESULTATS EXPERIMENTAUX

Nous pouvons voir que les courbes issues des résultats expérimentaux et numériques ne sont pas constantes. Elles ont la même allure mais sont décalées d'environ 200 J/m^2 , le modèle éléments finis ayant tendance à surestimer G_c . On observe une croissance puis une stabilisation pour $a=55 \text{ mm}$. L'écart entre les résultats expérimentaux et le modèle numérique peut être dû à des imperfections au niveau des éprouvettes, notamment sur l'épaisseur qui intervient au cube dans l'expression, mais aussi à des phénomènes non pris en compte dans notre modèle éléments finis comme les ponts de fibres ou la courbure du front de fissure.

Nous avons voulu nous concentrer sur la partie stabilisée de G_c , nous avons donc pris les points pour lesquels G_c est à peu près constant. Nous obtenons le graphique suivant :

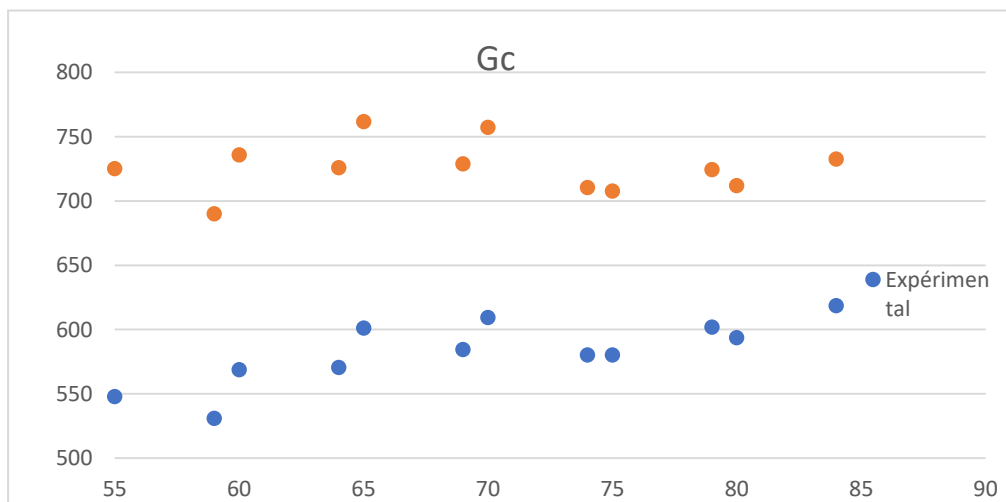


FIGURE 25 PARTIE STABILISEE DE G_c EN FONCTION DE a

On obtient, pour le modèle expérimental, une moyenne de 582.28 J/m^2 avec un écart-type de 25.39. Pour le modèle éléments finis, la valeur moyenne de G_c vaut 725.95 J/m^2 avec un écart-type de 20.96. La valeur moyenne de G_c est plus élevée pour le modèle numérique mais son écart-type est plus faible : les valeurs sont moins dispersées.

4 ESSAI MMF

4.1 Présentation de l'essai

L'essai Mixed Mode Flexure (MMF) a, tout comme l'essai DCB, pour but d'étudier la propagation d'une fissure dans un stratifié. Contrairement à l'essai DCB, le mode d'ouverture n'est pas unique : en effet, puisqu'une flexion est appliquée sur une seule lèvre de la partie délaminée de l'éprouvette, celle-ci subit un chargement d'ouverture (mode 1) mais aussi de cisaillement dans le plan (mode 2).

Une pré-fissure a également été appliquée à l'éprouvette pour amorcer le délaminage et étudier la propagation de la fissure. La quantité à laquelle nous nous intéressons est toujours le taux de restitution de l'énergie critique G_c .

Ci-dessous est visible une photographie de cet essai :



FIGURE 26 PHOTO D'UN ESSAI MMF

4.2 Approche numérique

Le matériau utilisé pour cet essai est le même que celui employé à l'essai précédent. C'est un matériau composite composé de fibres de carbone à plis unidirectionnels, entourées d'une matrice époxy, dont les caractéristiques ont été définies au premier essai.

4.2.1 Présentation du modèle

Pour modéliser cet essai, nous avons choisi de ne pas tenir compte du plan de symétrie (x,z) , afin de visualiser le comportement global de l'éprouvette sollicitée en traction sur une de ses extrémités.

L'éprouvette est composée d'une partie supérieure et inférieure identiques dont les dimensions sont les suivantes :

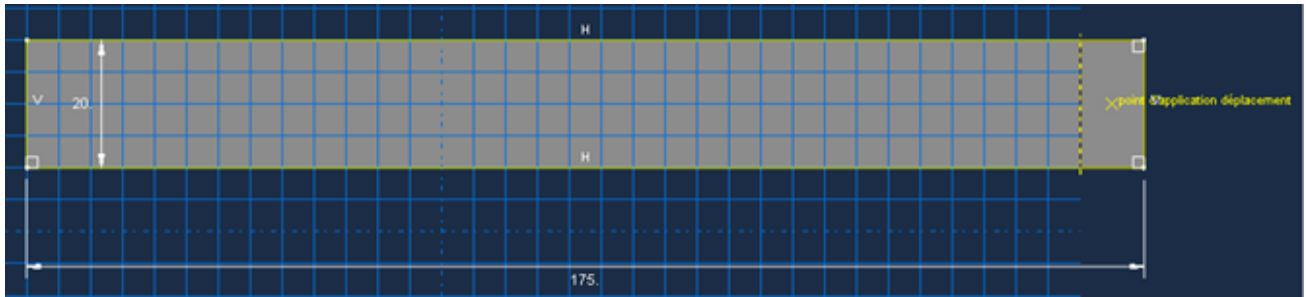


FIGURE 27 MODELISATION D'UNE PARTIE DE L'ÉPROUVETTE

Chacune des parties ayant 18 plis de 0,26mm d'épaisseur, soit 2,34 mm d'épaisseur, leur épaisseur totale est de 4,68mm.

En les assemblant, on obtient l'éprouvette suivante prête pour l'essai :

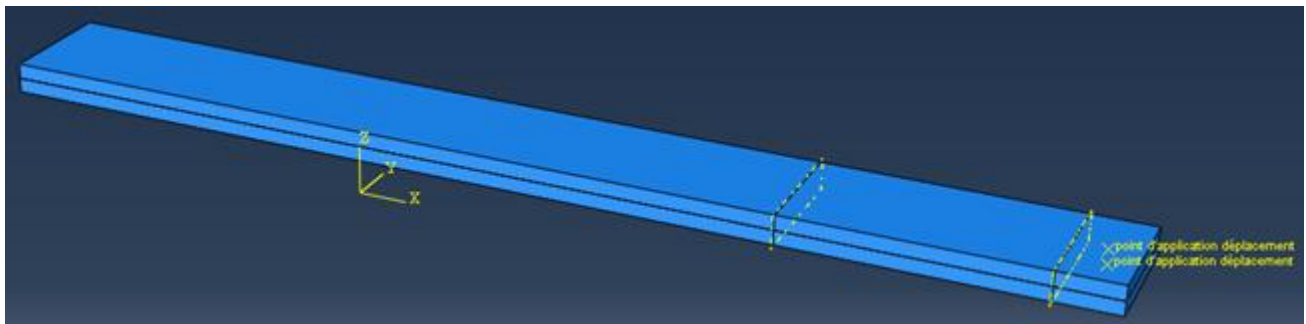


FIGURE 28 VISUALISATION DE L'ÉPROUVETTE MMF SUR ABAQUS

4.2.2 Conditions aux limites

Les conditions limites employées sont liées aux caractéristiques de l'essai que nous souhaitons réaliser. Les deux parties de l'éprouvette sont collées l'une à l'autre sauf à une extrémité qui constituera la pré-fissure et permettra l'amorçage de la fissure. La partie supérieure de cette même extrémité est déplacée par une force appliquée au point d'application déplacement. Ce déplacement vertical, selon l'axe z, doit engendrer l'ouverture de la pré-fissure, ce qui induit le cisaillement au front de la fissure et le déplacement vertical de la partie inférieure de l'éprouvette. Ce déplacement imposé induit aussi le déplacement selon l'axe x de l'autre extrémité de l'éprouvette. Cependant, comme le déplacement imposé est considéré comme petit, ce déplacement selon l'axe x sera négligé.

La condition limite adoptée pour l'extrémité collée de l'éprouvette est un encastrement qui ne permet aucunes translations selon les trois axes. Ainsi, l'éprouvette ne pourra pas translater selon y et z lors de l'essai.

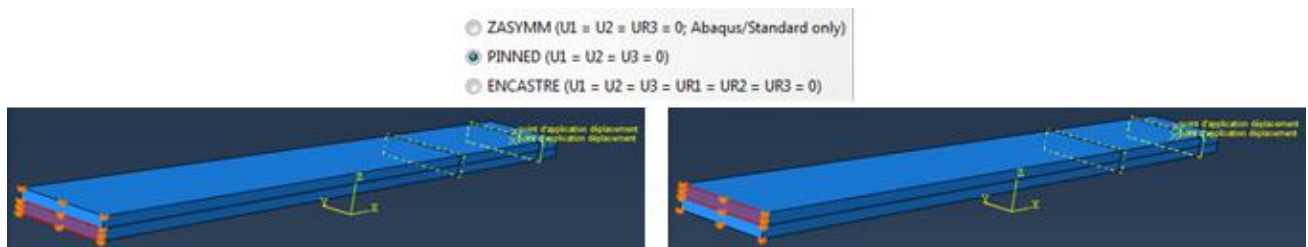


FIGURE 29 CONDITIONS AU LIMITES DE L'ÉPROUVETTE

4.2.3 Maillage

Une étude de convergence nous a permis de déterminer le maillage adéquate pour mener l'étude. Après plusieurs essais, nous avons établi les résultats suivants :

Nombre d'éléments dans l'épaisseur	1	3	5	7	10
Énergie déformation (éléments quadratiques) (a=50mm)	104.711	103.901	103.904	103.91	103.9170

TABLEAU 2 ETUDE DE CONVERGENCE

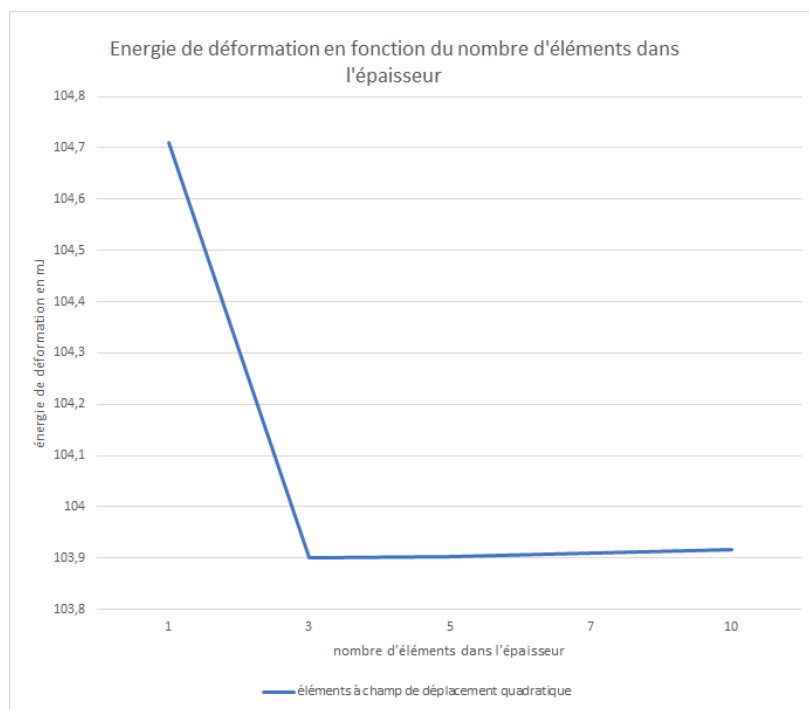


FIGURE 30 ENERGIE DE DEFORMATION EN FONCTION DU NOMBRE D'ELEMENTS DANS L'EPAISSEUR

Les éléments à champ de déplacement quadratique convergent à partir de 3 éléments dans l'épaisseur. Pour optimiser le temps de calcul par rapport à la qualité des résultats, nous avons donc choisi un maillage d'éléments à champ de déplacement quadratique de 5 éléments dans l'épaisseur comme présenté ci-dessous :

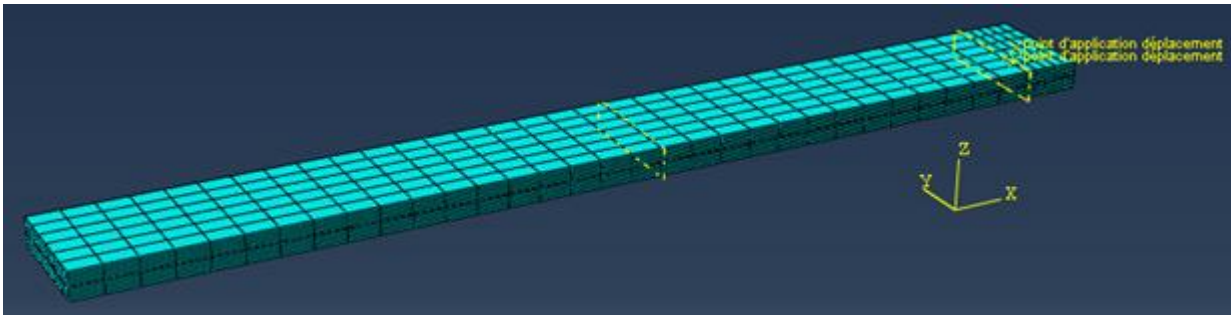


FIGURE 31 VISUALISATION DU MAILLAGE UTILISE

4.2.4 Résultats de la simulation

Les simulations réalisées sur cette éprouvette nous permettent d'en déduire un comportement global du matériau. Le déplacement imposé sur l'éprouvette est de 5 mm, et il engendre un effort normal et de cisaillement que l'on peut observer sur les simulations numériques. L'effort normal engendre une contrainte sur le front de fissure, comme on peut le voir sur la simulation ci-dessous :

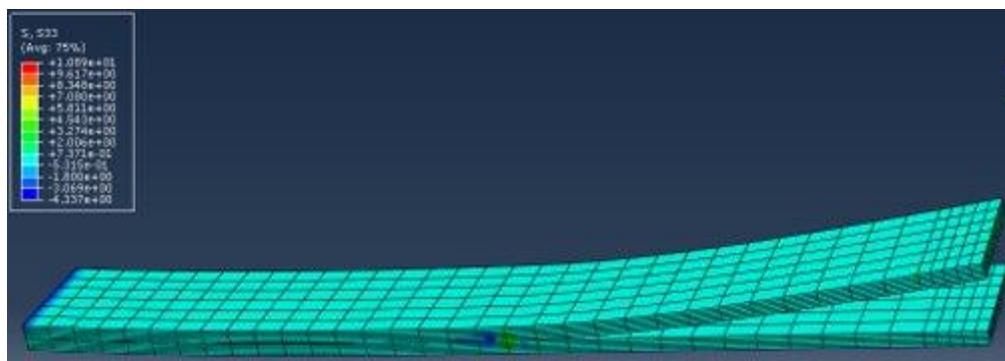


FIGURE 32 VISUALISATION DE LA CONTRAINTE SUR LE FRONT DE L'EPROUVETTE

Le cisaillement entraîne de légères déformations sur l'ensemble de l'éprouvette, notamment, la partie supérieure de l'éprouvette car c'est la plus exposée à cette déformation.

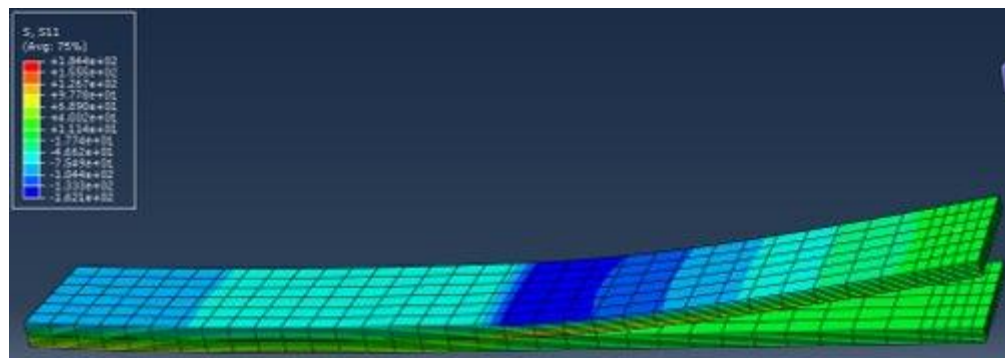


FIGURE 33 VISUALISATION DE LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT SUR L'EPROUVETTE

Ainsi, on peut en déduire que la contrainte observée en front de fissure et induite par le déplacement imposé, est liée à la traction qu'exerce l'extrémité encastree et au cisaillement qu'exerce la partie inférieure non encastree.

L'énergie élastique a été tracée en fonction de la longueur de la fissure a et elle est présentée ci-dessous :

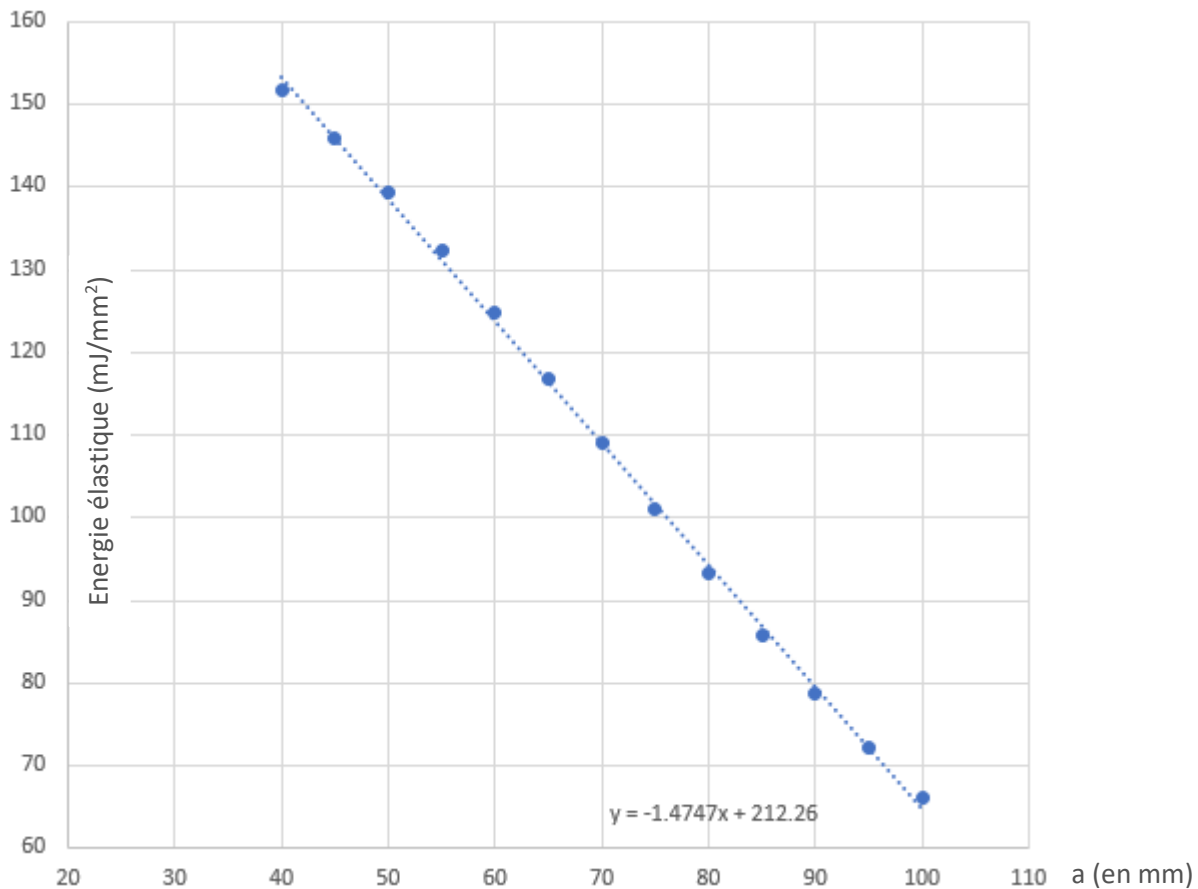


FIGURE 34 ENERGIE ELASTIQUE EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE FISSURE

D'après le graphe ci-dessus, on remarque que l'énergie élastique décroît linéairement avec la longueur de la fissure. On peut en déduire que plus le matériau se fissure, moins il est capable de se déformer élastiquement et donc de libérer de l'énergie élastique. L'élasticité du matériau décroît donc avec l'augmentation de la taille de la fissure.

4.2.5 Confrontation des résultats

Nous pouvons faire une première confrontation des résultats numériques avec les résultats obtenus expérimentalement en étudiant l'évolution de la rigidité en fonction de la propagation de la fissure. Une première interpolation polynomiale de degré 3 est utilisée, puis une seconde interpolation, linéaire cette fois-ci, est utilisée pour calculer G_c .

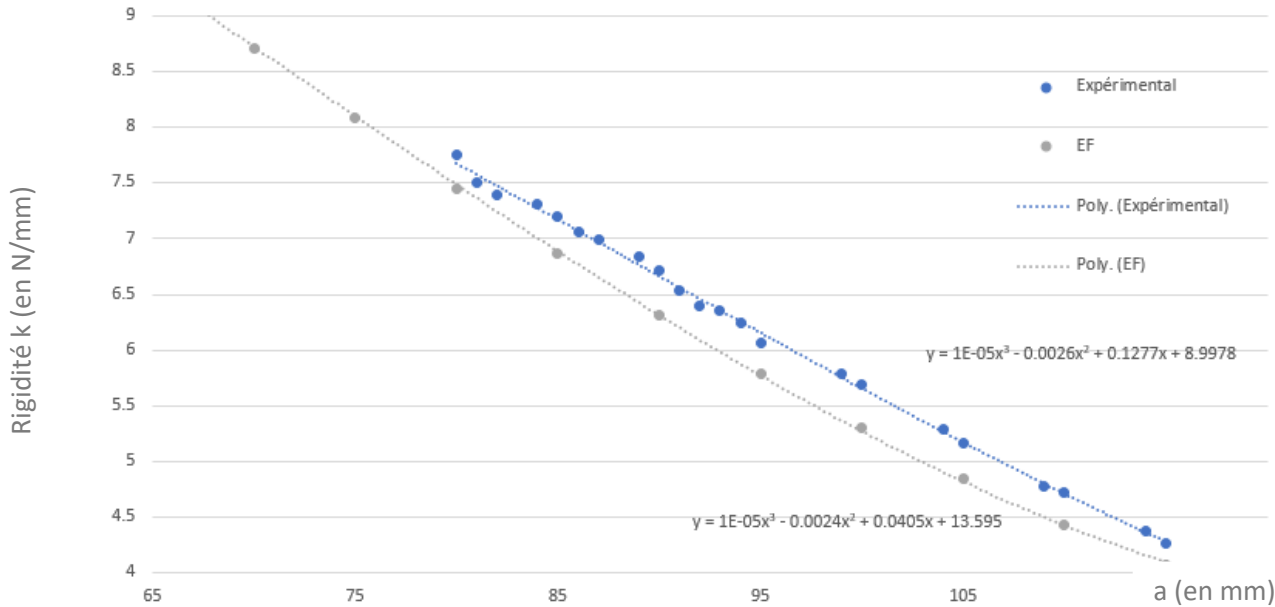


FIGURE 35 COMPARAISON DE L'ÉVOLUTION DE LA RIGIDITÉ OBTENU EXPÉRIMENTALEMENT ET PAR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS

Dans les deux résultats, on observe une décroissance quasi linéaire de la rigidité avec l'augmentation de la fissure. Ainsi, plus la fissure augmente, moins le matériau est rigide.

Cependant, l'évolution de la rigidité trouvée expérimentalement diffère de celle trouvée numériquement par la méthode des éléments finis. En effet, l'évolution de la rigidité trouvée expérimentalement décroît en conservant un décalage avec celle trouvée numériquement. Comme on considère l'évolution trouvée expérimentalement comme l'évolution réelle de la propriété du matériau, on peut en déduire que la rigidité obtenue par éléments finis est sous-estimée par rapport à la réalité.

Nous pouvons également faire une seconde observation, en lien avec la première, sur le taux de restitution d'énergie pendant la fissuration.

Nous avons comparé le taux d'énergie émis lors de la fissuration au cours des expériences, à celui émis dans les simulations numériques et nous avons obtenu les évolutions suivantes :

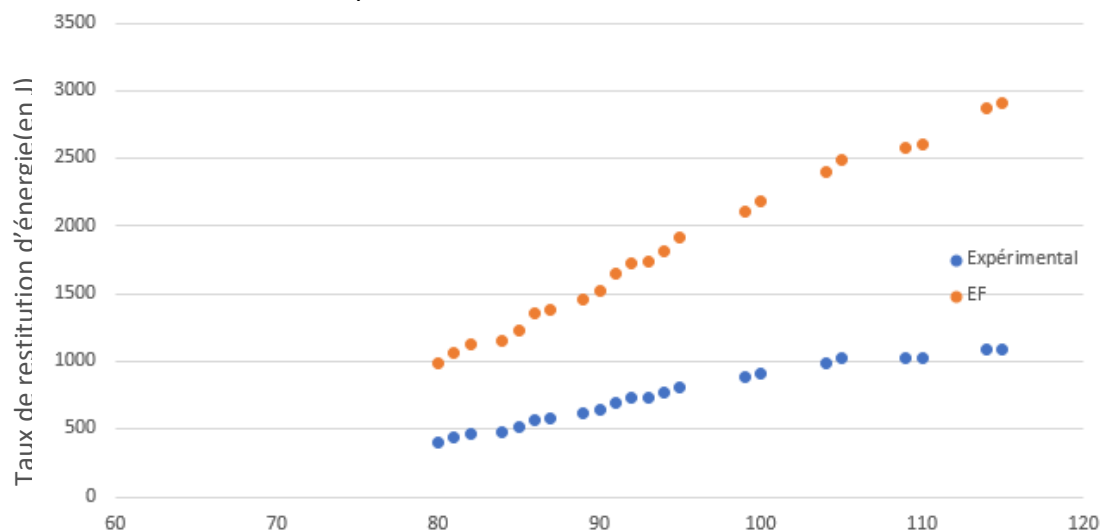


FIGURE 36 TAUX DE RESTITUTION DE L'ÉNERGIE CRITIQUE EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE FISSURE POUR LE MODÈLE ÉLÉMENTS FINIS ET LES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Comme pour l'essai DCB, on remarque que l'évolution obtenue expérimentalement est croissante comme celle obtenue par la méthode des éléments finis avec un décalage. Cependant, ces allures du taux de restitution diffèrent entre elles et aussi avec celle de l'essai DCB.

Contrairement à l'essai DCB, il semble que pour augmenter la longueur de la fissure par les éléments finis, il faille augmenter la contrainte qui lui est imposée. Elle restitue ainsi une énergie critique plus importante, comme observé sur le graphe ci-dessus en comparaison avec celui de l'essai DCB. Ceci est dû aux conditions limites de l'éprouvette, l'une des extrémités de l'éprouvette de cet essai est libre de se déplacer, tandis que cette même extrémité est fixe dans l'essai DCB. Donc plus la longueur de la fissure augmente dans les conditions de l'essai MMF, plus le taux de restitution d'énergie critique augmente avec la taille de la fissure.

Cependant, l'évolution obtenue expérimentalement ne présente pas la même allure que celle obtenue par éléments finis, elle croît légèrement avant de se stabiliser autour d'une valeur fixe alors que l'autre croît quasiment linéairement. Il semble donc, d'après ces mesures, qu'à partir d'une certaine longueur de la fissure, imposer la même contrainte suffise à la propager. On peut en conclure qu'à partir d'un certain déplacement de l'extrémité libre de l'éprouvette, la fissure est assez propagée pour fragiliser l'ensemble de l'éprouvette de manière que maintenir une contrainte constante suffise à continuer la propagation de la fissure. La simulation ne prend probablement pas en compte cet effet, donc elle croît quasiment linéairement au lieu de se stabiliser.

On peut aussi observer un décalage entre les deux évolutions. Il est probablement lié au calcul de la rigidité calculé précédemment. En effet, la rigidité du matériau trouvée par la méthode des éléments finis étant supérieure à la rigidité trouvée expérimentalement, l'énergie à fournir pour augmenter la taille de la fissure est plus grande par la méthode des éléments finis qu'expérimentalement. Le taux d'énergie critique restitué calculé par la méthode des éléments finis est donc supérieur à celui calculé expérimentalement.

Nous avons le tracé G_c correspondant à une interpolation linéaire de K .

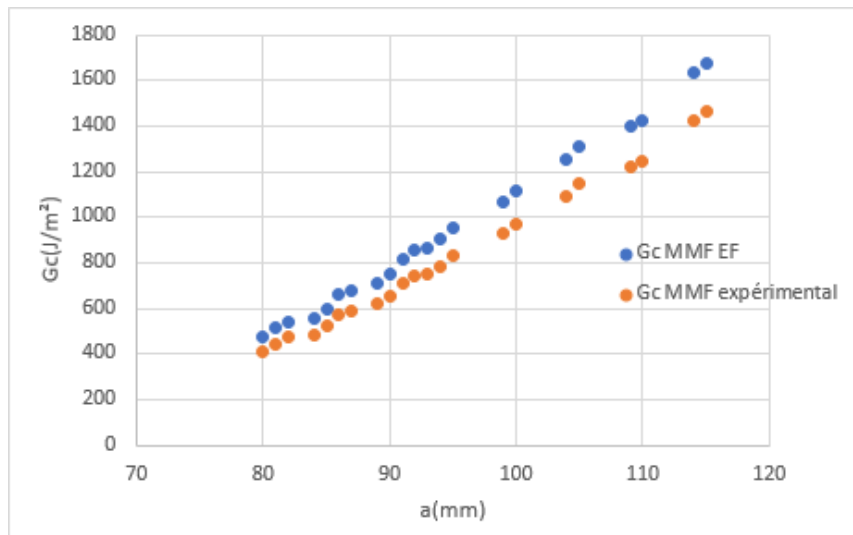


FIGURE 37 TAUX DE RESTITUTION DE L'ENERGIE CRITIQUE EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE FISSURE POUR UNE INTERPOLATION LINEAIRE DE LA RIGIDITE

On observe que la méthode par éléments finis surestime, comme dans l'essai DCB, le G_c en utilisant une interpolation linéaire. Cependant les deux courbes, expérimentale et par éléments finis sont relativement proches, bien plus que pour une interpolation polynomiale, ce qui montre que le modèle élément fini est pertinent. On remarque également que les valeurs obtenues sont beaucoup plus faibles que celles obtenues pour une interpolation polynomiale. Le fait que G_c augmente en fonction de a traduit le fait que l'apport énergétique à fournir pour agrandir la fissure est plus élevé à mesure que la fissure se propage.

5 ESSAI MMB

5.1 Présentation de l'essai

L'essai Mixed Mode Bending est, tout comme l'essai MMF, un essai de modes mixtes 1 et 2. La différence avec l'essai MMF se situe au niveau des conditions aux limites : dans l'essai MMB, la force est appliquée sur un levier de longueur $c+L$, ce qui permet d'obtenir une mixité de modes 1 et 2. c'est la valeur de la distance c qui va influencer sur le rapport modal.

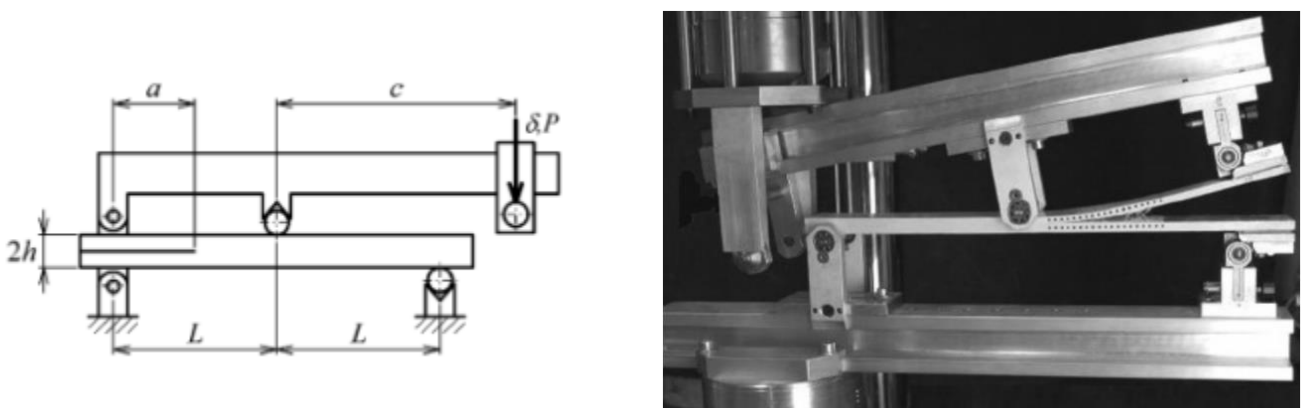


FIGURE 38 SCHEMA DE L'ESSAI MMB (A GAUCHE) ET PHOTOGRAPHIE DE L'ESSAI MMB (A DROITE)

5.2 Présentation et confrontation des résultats expérimentaux

Nous avons tracé la rigidité en fonction de la longueur de fissure pour les essais MMB 75, 50 et 25 que nous avons interpolé par une loi puissance et une loi polynomiale. En effet, sachant que le cas MMB est une combinaison des cas DCB et ENF, nous avons interpolé la rigidité par une fonction puissance (cas DCB). Cependant, nous avons remarqué qu'une fonction polynomiale de degré 3 était une meilleure interpolation, nous avons donc tracé k et G_c pour les deux interpolations utilisées.

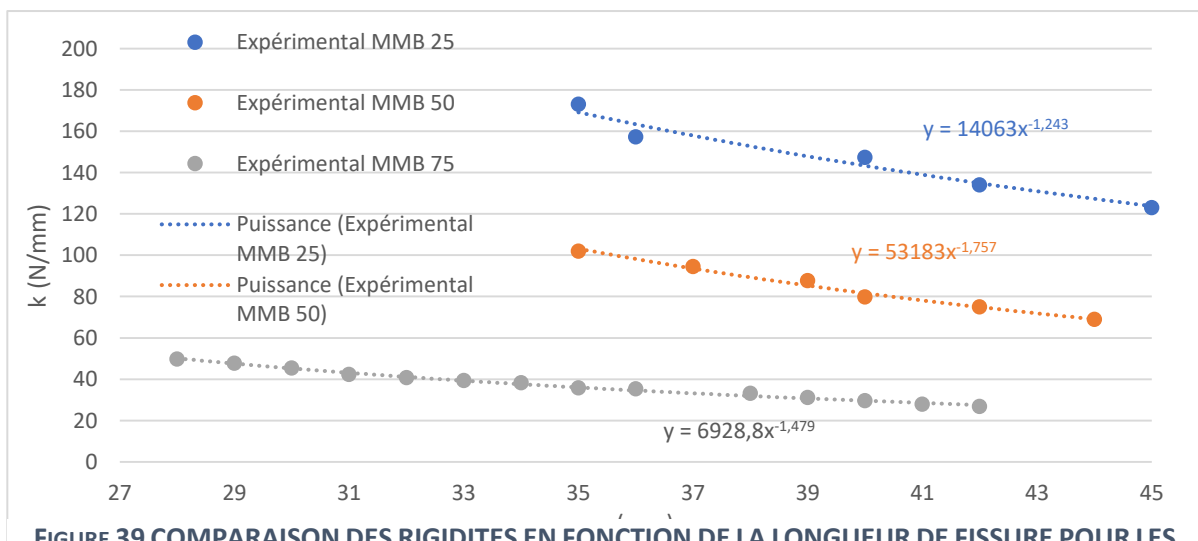


FIGURE 39 COMPARAISON DES RIGIDITES EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE FISSURE POUR LES DIFFERENTS ESSAIS MMB (INTERPOLATION POLYNOMIALE)

L'étendue des valeurs semble être plus importante si la longueur de bras de levier augmente. Elles sont cependant toutes décroissantes en fonction de l'augmentation de la longueur de fissure, comme c'était le cas pour les essais DCB et MMF, car la souplesse de l'éprouvette augmente lorsque la fissure se propage, en effet si la longueur de fissure est de plus en plus grande, il faut un effort moins important pour déplacer de la même manière car on est à déplacement imposé, ainsi la rigidité diminue d'où le fait que la souplesse augmente. La rigidité est plus élevée pour l'essai MMB 25 que pour les essais MMB75 et MMB50 : la rigidité augmente si la distance du bras de levier diminue, car le moment est plus faible.

Une interpolation polynomiale de la rigidité semble être plus précise qu'une interpolation de fonction puissance.

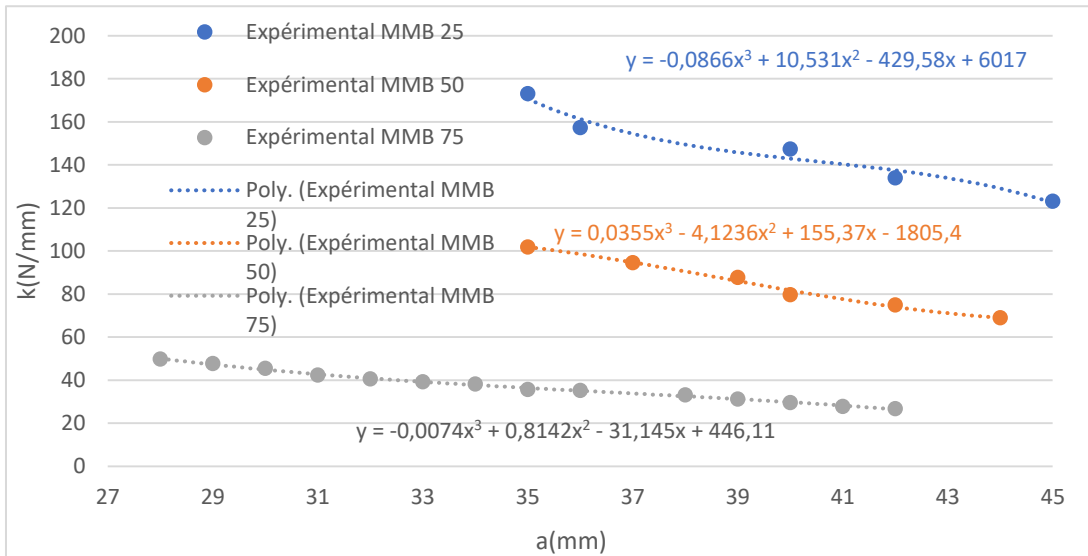


FIGURE 40 COMPARAISON DES RIGIDITES EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE FISSURE POUR LES DIFFERENTS ESSAIS MMB (INTERPOLATION PUISSANCE)

Nous avons tracé le taux de restitution de l'énergie critique en fonction de la longueur de fissure pour des interpolations polynomiale et puissance de la rigidité.

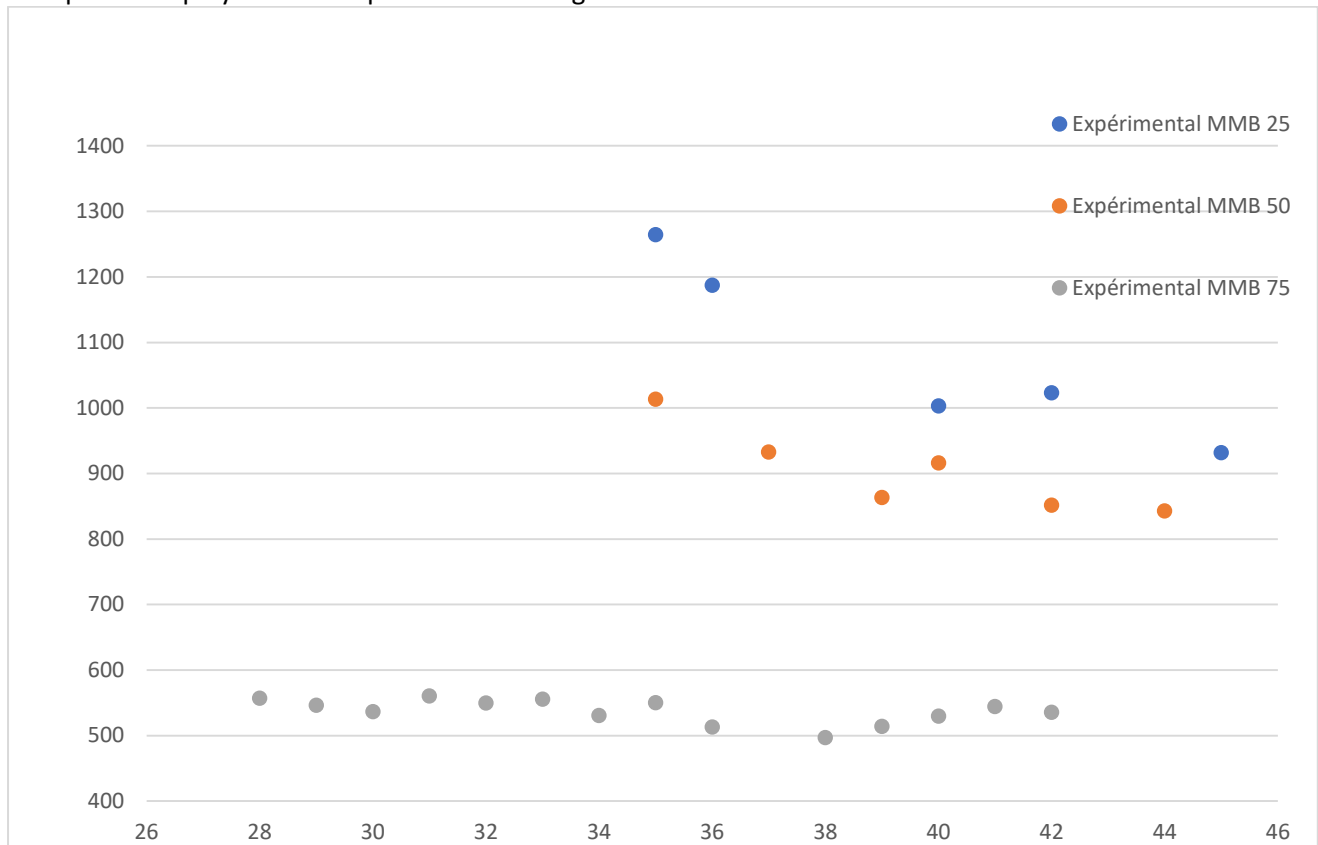


FIGURE 41 COMPARAISON DES TAUX DE RESTITUTION DE L'ENERGIE CRITIQUE EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE FISSURE (INTERPOLATION PUISSANCE)

Ici encore G_c n'est pas constant. On observe pour MMB 75 une variation autour d'une valeur moyenne d'environ 550 J/m^2 , G_c est à peu près stable.

Pour l'essai MMB50, G_c semble diminuer et se stabiliser vers 850 J/m^2 , même si nous manquons de valeurs pour pouvoir affirmer que G_c est réellement stabilisé.

Enfin, pour l'essai MMB 25 G_c semble diminuer mais on ne peut pas identifier de valeur pour laquelle il se stabilise. Il est globalement plus élevé que pour les autres essais MMB : diminuer la longueur du bras de levier augmente G_c , il est donc plus difficile de propager la fissure puisque la rigidité diminue. Globalement, il est de plus en plus facile, d'un point de vue énergétique, de propager la fissure à mesure que celle-ci avance.

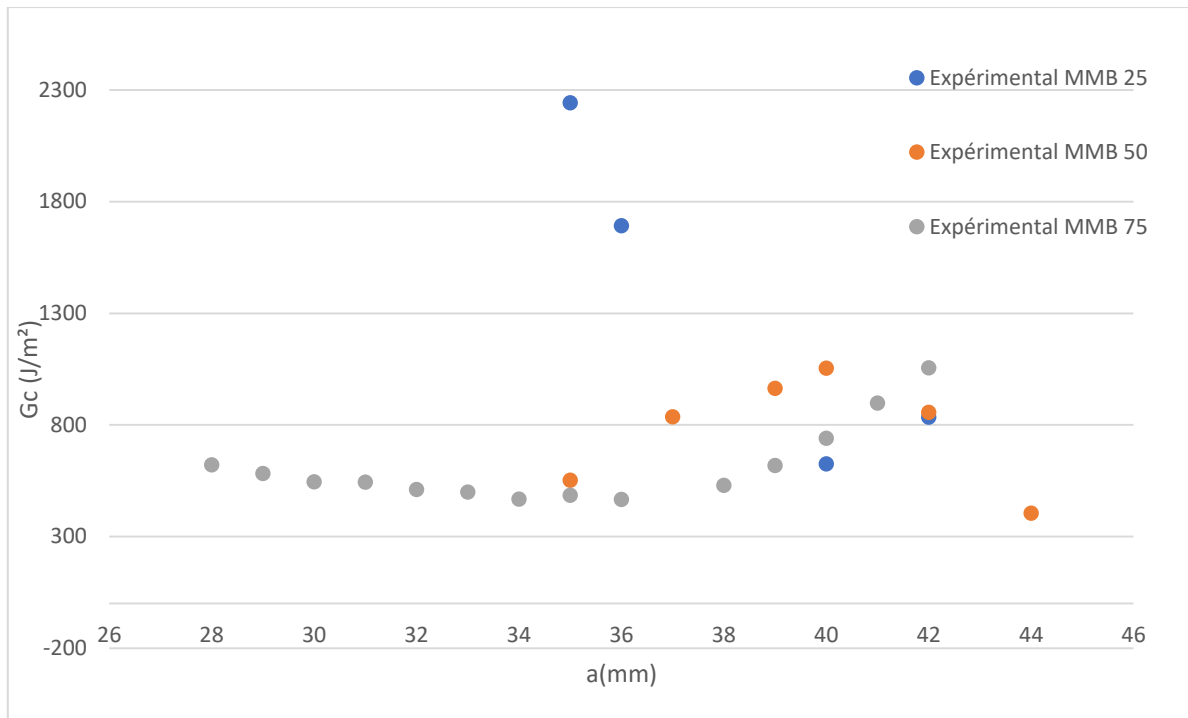


FIGURE 42 COMPARAISON DES TAUX DE RESTITUTION DE L'ÉNERGIE CRITIQUE EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE FISSURE (INTERPOLATION POLYNOMIALE)

Les G_c obtenus pour une interpolation polynomiale donne des valeurs beaucoup plus élevées et plus dispersées. Pour l'essai MMB 75 on observe une distribution parabolique de G_c qui présente un minimum et on ne voit pas de valeur vers laquelle il se stabilise. Pour l'essai MMB 50 on observe une parabole concave qui présente un maximum. Enfin, l'essai MMB 25 présente également une forme de parabole convexe avec un minimum. On remarque qu'on n'a plus augmentation de G_c en fonction de la diminution de la longueur de bras de levier pour des fissures de de plus de 40mm. Pour les paraboles convexes (MMB75 et 25), il est de plus en plus facile de propager les fissures jusqu'à un minimum, puis une fois ce minimum passé il est plus dur de propager la fissure, ce qui semble singulier. Pour l'essai MMB 50, il est de plus en plus dur de propager la fissure puis une fois le maximum atteint il faut fournir de moins en moins d'énergie pour continuer à propager la fissure.

Le type de fonction utilisée pour l'interpolation de la rigidité modifie de façon conséquente le G_c calculé. Sachant que le modèle polynomial est plus proche des points que le modèle de fonction puissance, il serait logique de considérer que le G_c obtenu pour le meilleur modèle d'interpolation (fonction polynôme) est le résultat le plus précis, cependant les G_c obtenus pour l'interpolation polynomiale semblent étranges d'un point de vue physique.

6 CONFRONTATION ENTRE LES DIFFERENTS ESSAIS

6.1 Confrontation des approches numériques

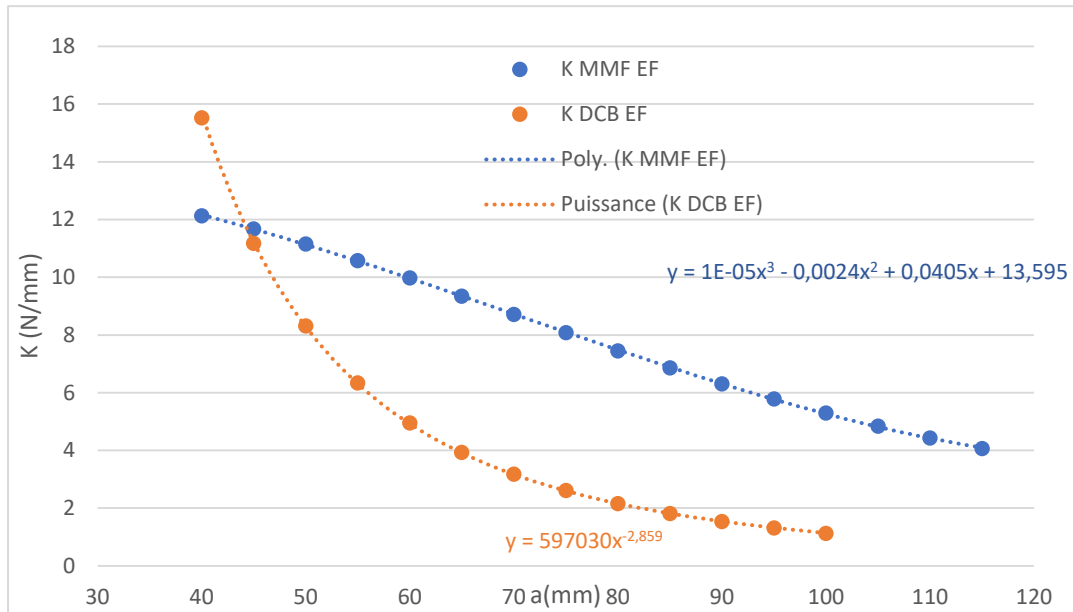


FIGURE 43 COMPARAISON DE LA RIGIDITE OBTENUE PAR ELEMENTS FINIS POUR DCB ET MMF

On constate que la rigidité de l'éprouvette DCB a tendance à diminuer plus fortement que celle de l'essai MMF. Pour une longueur de fissure fixée, la rigidité est plus élevée pour l'essai MMF que l'essai DCB, il est donc plus difficile de propager une fissure lors d'un essai MMF.

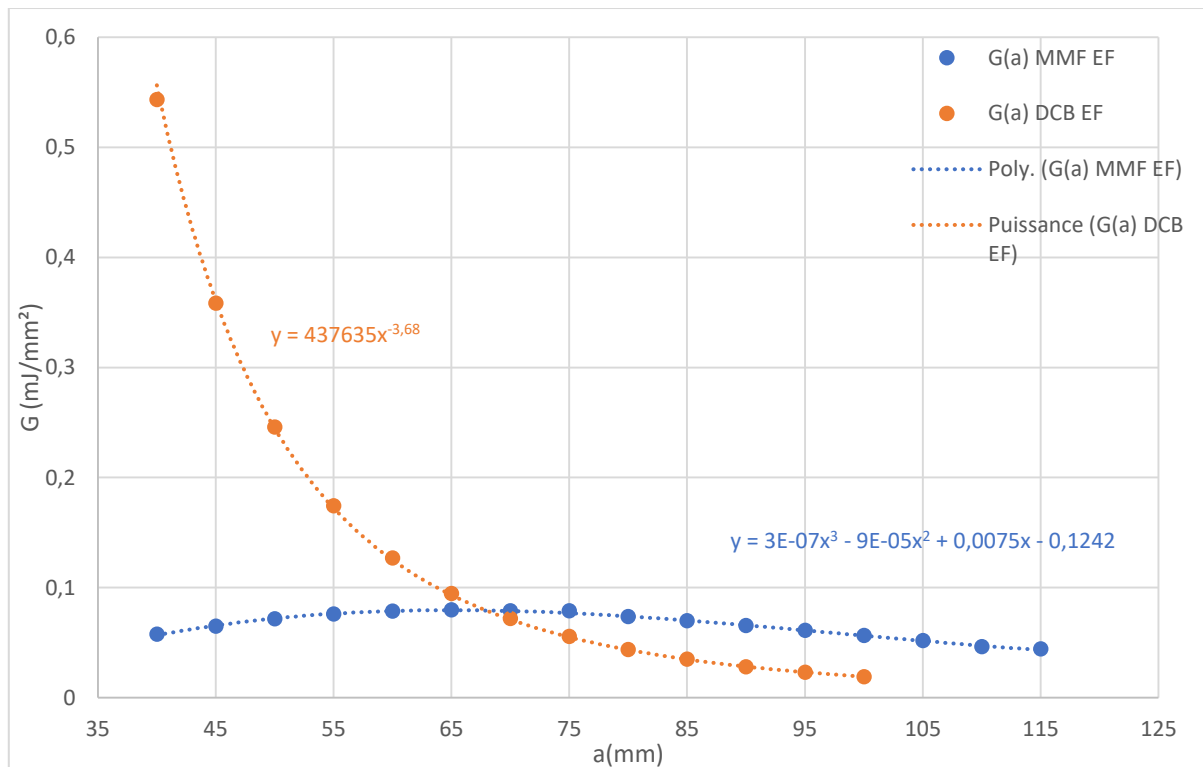


FIGURE 44 COMPARAISON DES TAUX DE RESTITUTION OBTENUS PAR ELEMENTS FINIS POUR DCB ET MMF

Pour de faibles longueurs de fissure, le taux de restitution de l'énergie est plus élevé pour l'essai DCB que pour l'essai MMF: l'éprouvette DCB peut fournir plus d'énergie au processus de fissuration. À partir d'une certaine longueur de fissure (environ 70mm) c'est l'inverse qui se produit.

On peut comparer l'énergie élastique obtenue dans l'essai MMF avec celui de l'essai DCB par le graphe suivant :

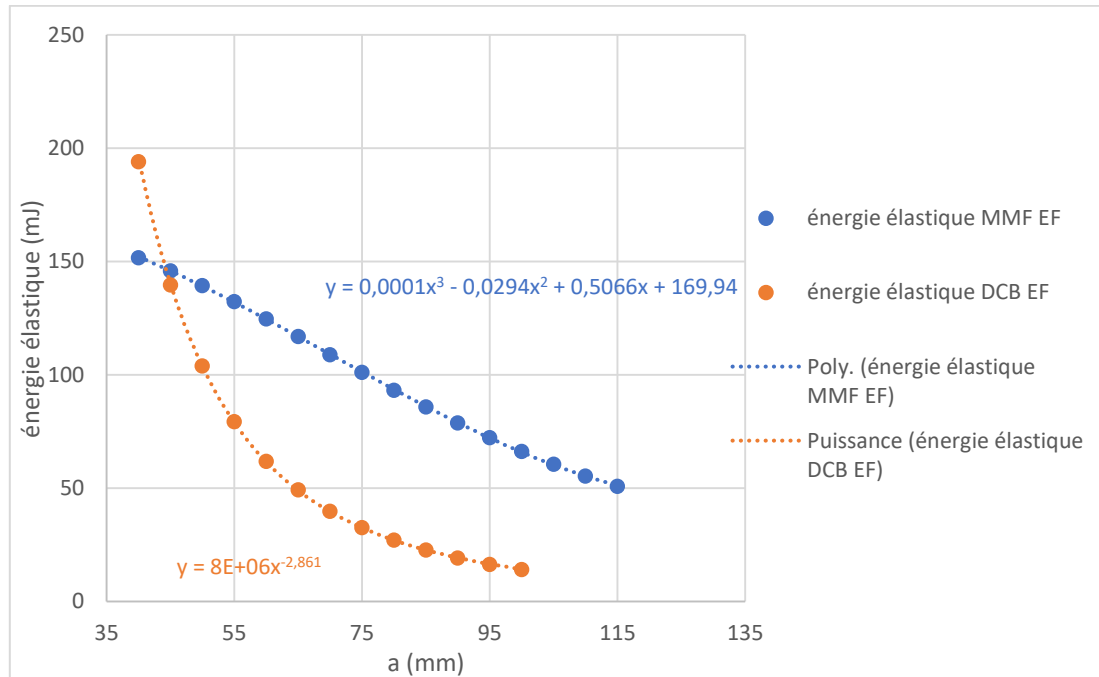


FIGURE 45 COMPARAISON DE L'EVOLUTION DE L'ÉNERGIE ELASTIQUE ENTRE LES ESSAIS DCB ET MMF PAR ELEMENTS FINIS

On remarque qu'à partir d'une longueur de fissure de 45mm, l'énergie élastique restituée de l'essai DCB est plus faible que celle de l'essai MMF et elle décroît plus fortement. Si l'énergie élastique restituée est faible, alors le matériau a une faible capacité à se déformer élastiquement. Une éprouvette utilisée dans les conditions d'essais DCB a donc moins de capacité à se déformer qu'une éprouvette en MMF. De ce fait, une éprouvette DCB peut être amenée à se rompre plus rapidement qu'une éprouvette MMF.

Pour mieux comprendre le comportement de la fissure dans le matériau, l'étude l'énergie émise était essentielle. Ainsi, établir l'évolution du taux de restitution de l'énergie, permet d'en déduire l'évolution de la fissure. Nous avons tracé ci-dessous l'évolution de ce taux pour les deux essais, DCB et MMF, afin de les comparer.

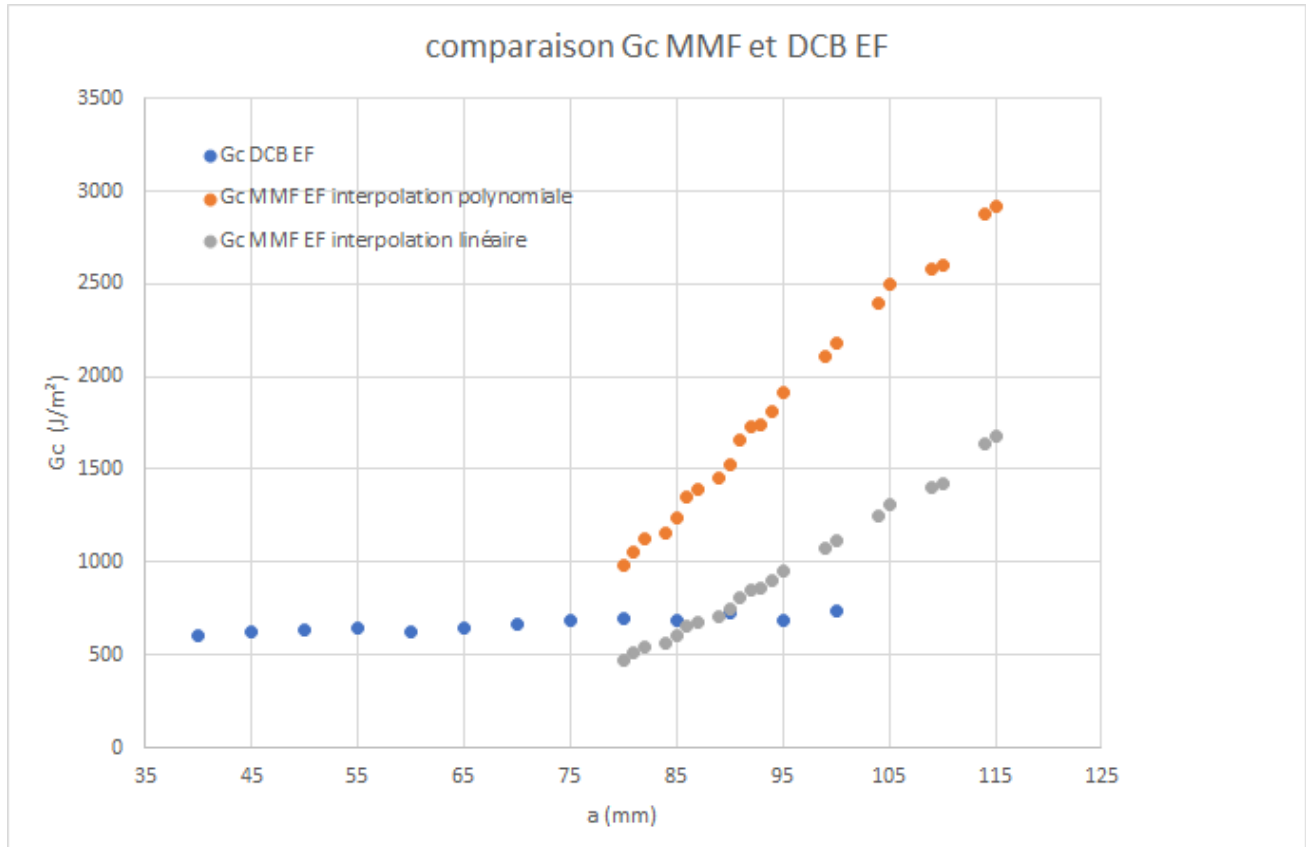


FIGURE 46 COMPARAISON DES TAUX DE RESTITUTION D'ÉNERGIE CRITIQUES OBTENUS PAR ELEMENTS FINIS POUR DCB ET MMF

On observe que le taux critique d'énergie restituée dans l'essai DCB est stabilisé (bien qu'il y ait une petite ré augmentation après) pour une longueur de fissure relativement faible (environ 65mm), alors que ce même taux accroît linéairement dans l'essai MMF. Il semble qu'il soit plus difficile de propager une fissure dans un essai MMF que dans un essai DCB. Ceci semble logique : il est plus simple de séparer deux surfaces collées en tirant sur chacune des extrémités (cas DCB) que sur une seule (MMF). En outre nous avons remarqué, dans les résultats expérimentaux, que pour l'essai MMF la force appliquée est de l'ordre de la centaine de N contre une cinquantaine pour l'essai DCB.

Ainsi, il semble que pour augmenter la longueur de la fissure d'une éprouvette dans les conditions d'essai d'un MMF, il faille augmenter la contrainte qui lui est imposée. Elle restitue ainsi une énergie critique plus importante en comparaison avec celui de l'essai DCB, comme observé sur le graphe ci-dessus. Alors que dans l'essai DCB, imposer une même contrainte suffit pour agrandir la fissure.

Ceci est dû aux conditions aux limites de l'éprouvette, l'une des extrémités de l'éprouvette de l'essai MMF est libre de se déplacer, tandis que cette même extrémité est fixe dans l'essai DCB. Donc, lorsque l'éprouvette est déformée, celle de l'essai MMF pourra se déplacer légèrement avec la partie supérieure sur laquelle est appliquée la déformation. Alors que celle de l'essai DCB sera déformée plus rapidement. Ces déformations fragilisent le matériau, ce qui le rend moins rigide et ce qui favorise donc aussi la propagation de la fissure. Ainsi, à partir d'une certaine valeur de la contrainte, la fissure se propage dans le matériau. Au contraire, dans l'essai MMF, la contrainte à appliquer doit toujours être plus grande pour augmenter la taille de la fissure.

6.2 Confrontation des approches expérimentales

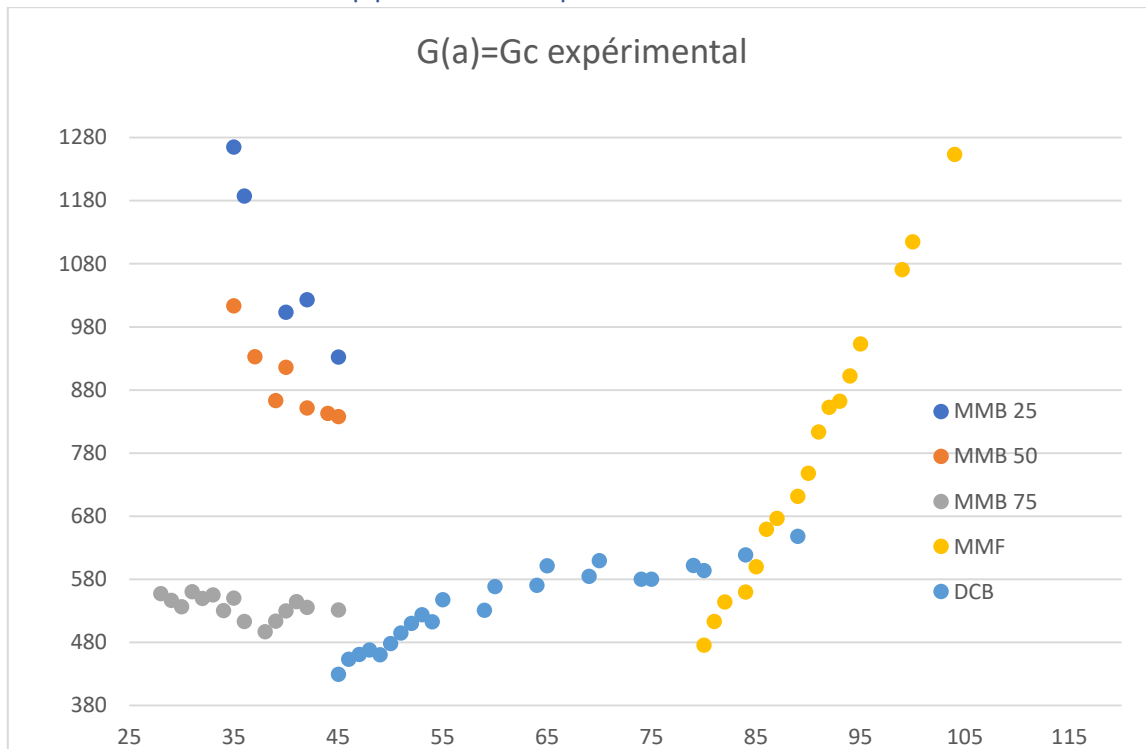


FIGURE 47 G_c EN FONCTION DE a POUR LES DIFFÉRENTS ESSAIS (INTERPOLATION PUISSANCE POUR DCB ET MMB ET LINEAIRE POUR MMF)

On remarque que les taux d'énergies évoluent différemment en fonction des essais. Les essais DCB et MMF ont des taux qui croissent, bien que celui du DCB fini par se stabiliser, tandis que les essais MMB ont des taux qui décroissent. Dans les essais MMB, lorsque la fissure est amorcée, l'éprouvette restitue un taux d'énergie décroissant, contrairement aux autres taux des essais MMF et DCB. L'éprouvette de l'essai MMB a donc besoin de moins d'énergie par rapport au début de l'essai, pour propager la fissure, contrairement aux autres essais où il faut autant voire plus d'énergie pour prolonger la fissure. On peut en déduire qu'une fois amorcée, la fissure de l'éprouvette MMB se propage dans le matériau.

De même, on a pu observer ultérieurement que les éprouvettes des essais DCB avaient besoin d'une même valeur d'énergie pour prolonger la fissure, et que les éprouvettes MMF en avaient besoin de plus. On peut donc en déduire que les éprouvettes MMB sont les moins résistantes à la fissuration, par rapport aux éprouvettes des essais DCB et MMF. De même, les éprouvettes DCB sont moins résistantes à la fissuration que les éprouvettes MMF.

7 CONCLUSION

Grâce à une approche théorique simplifiée et la théorie de Griffith nous avons vu des similarités entre les modèles poutre et éléments finis dans le cas d'un essai DCB. Nous avons également vu que G_c n'était pas constant puisqu'il variait en fonction de la longueur de fissure. Ainsi, l'hypothèse selon laquelle G_c est un paramètre matériau est remise en question. Pour l'essai DCB G_c augmente, se stabilise à partir d'une certaine longueur de fissure puis réaugmente légèrement. Pour l'essai MMF G_c croît de façon presque linéaire que ce soit par éléments finis ou expérimentalement, ce qui est conforté par les propos tenus par P. Prombut dans sa thèse, nous n'arrivons cependant à comprendre cette augmentation. Enfin, pour l'essai MMB G_c décroît globalement.

Nous avons vu que la fonction définissant la rigidité de l'éprouvette avait une conséquence importante sur la fonction $G_c(a)$ obtenue, tant au niveau de l'allure de la courbe que de l'amplitude des valeurs.

On peut proposer plusieurs axes de progression :

- Établir un modèle éléments finis pour l'essai MMB
- Établir des modèles de zone cohésive pour les trois essais
- Refaire les calculs éléments finis en prenant les mêmes valeurs de déplacement que pour les résultats expérimentaux
- Étudier le mode 3 de rupture

8 BIBLIOGRAPHIE

[1] P. Prombut Caractérisation de la propagation de délaminage des stratifiés composites multidirectionnels
Université Paul Sabatier, Toulouse, 2007