



**HAL**  
open science

# Irréversibilités lors de la mise en forme des renforts fibreux

Tarek Abdul Ghafour, Julien Colmars, Philippe Boisse

► **To cite this version:**

Tarek Abdul Ghafour, Julien Colmars, Philippe Boisse. Irréversibilités lors de la mise en forme des renforts fibreux. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01623669

**HAL Id: hal-01623669**

**<https://hal.science/hal-01623669>**

Submitted on 25 Oct 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **Irréversibilités lors de la mise en forme des renforts fibreux**

### *Irreversibility during forming process of woven reinforcements*

**Tarek Abdul Ghafour<sup>1</sup>, Julien Colmars<sup>1</sup>, Philippe Boisse<sup>2</sup>**

1 : Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Solides  
INSA de Lyon  
Bâtiment J. Jacquard, Rue Jean Capelle  
F-69621 Villeurbanne cedex  
e-mail : tarek.abdul-ghafour@insa-lyon.fr

#### **Résumé**

Aujourd'hui, les simulations numériques de la mise en forme des renforts fibreux sont basées sur des modèles de matériaux continus dont on suppose que le comportement est non linéaire élastique (hypo-élastique [1], [2] ou hyper-élastique [3]). Néanmoins, on suppose que lors de la mise en forme il existe d'éventuelles irréversibilités de comportement qui jouent un rôle significatif. Dans ce travail, on s'intéresse à quantifier l'importance de ces phénomènes en faisant un ensemble d'essai (flexion, cisaillement, compression) pour ensuite proposer des modèles compatibles avec la simulation des pièces industrielles lorsque l'irréversibilité s'avère importante.

#### **Abstract**

Today, numerical simulations of shaping fibrous reinforcements are based on the continuous material models that have been assumed to be nonlinear elastic (hypoelastic [1], [2] or hyperelastic [3]). Nevertheless, it is also believed that during the shaping process, there is a possible non reversibility of behavior that plays a significant role. In this work, we are interested in quantifying the importance of these phenomena by doing a group of tests (flexion, shear, compression) and then afterwards by proposing models compatible with the simulation of industrial parts when irreversibility is significant.

**Mots Clés :** mise en forme, renforts fibreux, irréversibilité

**Keywords :** forming, woven fabric, non-reversibility

### **1. Introduction**

Dans le contexte industriel de la mise en forme des matériaux composites à renforts fibreux, l'outil de simulation est devenu partie intégrante de l'amélioration des procédés : améliorer la drapabilité des renforts, leur perméabilité lors de l'injection de matrice, optimiser les directions principales du matériau en fin de procédé, etc. sont des objectifs d'amélioration à fort impact économique pour des secteurs tels que l'automobile.

Aujourd'hui, les simulations numériques de la mise en forme des renforts fibreux sont pour la plupart basées sur une approche macroscopique et des modèles de matériaux continus dont on suppose que le comportement est non linéaire élastique (hypo-élastique [1], [2] ou hyper-élastique [3]), donc réversible. Or on sait que sous chargement cyclique, les renforts fibreux montrent d'importantes irréversibilités, liées notamment aux glissements entre mèches et entre fibres. Il existe des travaux qui tentent de prendre en compte ces interactions aux échelles inférieures, mésoscopique [4] (au niveau des mèches) et microscopique (fibres) [5] ; cependant il est encore très difficile aujourd'hui d'utiliser de telles outils pour simuler des cas de mise en forme industriels (pièces de plusieurs cm), ce à cause de la capacité de calcul qui est mise en jeu (nombre trop important de degré de liberté).

Plusieurs questions se posent alors : peut-on prendre en compte les phénomènes d'irréversibilité à l'échelle macroscopique en adaptant les lois de comportement ? Quelle est leur importance (et donc

est-il utile de les prendre en compte) dans des cas de mise en forme qui (en apparence) produisent plutôt des trajets de chargement monotones (mouvement de poinçon sur une matrice) ?

Ce travail s'attache à répondre à ces deux questions. Dans un premier temps on cherche à caractériser l'importance des irréversibilités par des tests cycliques (flexion, cisaillement, compression) réalisés sur des renforts tissés 2D et 3D (interlocks).

La seconde partie de l'étude consiste à simuler différentes mise en forme industrielles (ou inspirées de pièces industrielles) pour identifier les cas de chargement susceptibles de produire des trajets de chargement non monotones, et donc de solliciter les mécanismes d'irréversibilité. Cette partie est réalisée sur le logiciel PlasFib développé par l'INSA de Lyon, un code éléments-finis explicite en grande transformation proposant une approche macroscopique semi-discrete des renforts fibreux [6]. A l'aide de PlasFib, on montrera que dans des cas de mise en forme classiques on peut obtenir des chargements alternés en flexion ou cisaillement dans plusieurs parties d'un renfort. On mettra ces résultats de simulations en perspective des caractérisations expérimentales pour proposer une classification de mise en forme pour lesquelles il est important de considérer un comportement anélastique.

Enfin nous proposerons des pistes pour la modélisation du comportement anélastique et l'intégration de telles lois de comportement dans notre code de calcul.

## 2. Essais expérimentaux – matériel, méthode et résultats

Dans cette partie, nous cherchons à caractériser l'importance des irréversibilités par des tests cycliques sur 3 modes de déformation (la compression, le cisaillement et la flexion). Nous travaillons dans l'hypothèse du découplage des modes de déformation (hypothèse utilisée dans les modèles éléments-finis présentés dans la suite), donc nous cherchons des modèles irréversibles correspondants à chaque mode de déformation. Les essais présentés sont réalisés sur des interlocks 'renfort interlock couche à couche Sergé 3x3' et des interlocks 'G1151' (Hexcel).

### 2.1 Essais de compression

#### 2.1.1 Matériel

Le matériel nécessaire pour réaliser ces essais est :

- Machine de traction MTS 25 kN,
- deux plateaux de diamètre 100 mm,
- un capteur d'effort,
- un capteur de déplacement externe (course 10 mm),
- échantillons de 'renfort angle interlock couche à couche Sergé 3x3' de dimensions 70 mm x 70 mm x 10 mm.

#### 2.1.2 Méthode et Résultats :

L'essai de compression transverse est réalisé entre deux plateaux de 100 mm de diamètre. Le capteur de force utilisé a une capacité de 10 kN. L'essai est réalisé à déplacement imposé ; un capteur de déplacement LVDT externe (course 10 mm) permet de vérifier le déplacement machine (figure 1).

Le premier essai correspond à un déplacement imposé de 1 mm à la vitesse de 1 mm.min<sup>-1</sup>. On effectue ensuite un déchargement à effort  $F$  imposé avec la consigne  $F = 0$ .

Les résultats de la figure 2 montrent un déplacement résiduel de presque 40% du déplacement total pour un cas de charge/décharge.



Fig. 1. Dispositif d'essai de compression.

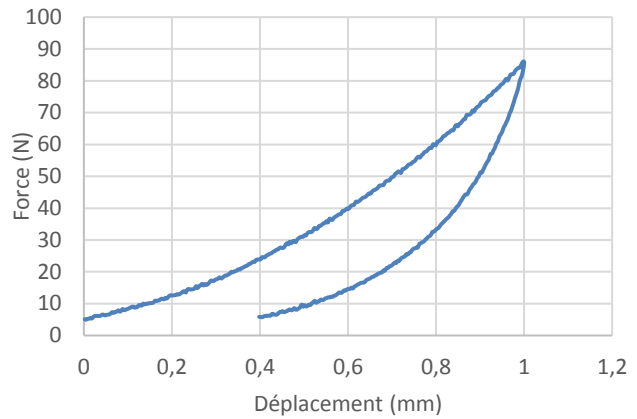


Fig. 2. Courbe force-déplacement de l'essai 1 de compression

Un deuxième essai est réalisé avec la même méthodologie que le précédent, mais pour 8 cycles, chaque cycle correspondant à un déplacement différent (0.5 mm ; 1 mm ; 1.5 mm ; 2 mm ; 2.5 mm ; 3 mm ; 3.5 mm ; 4 mm).

A partir des figure 3.a, on peut remarquer que la force nécessaire pour effectuer la compression augmente rapidement avec le déplacement (donc avec la densité en fibres). En effet, lorsque la densité en fibre du matériau augmente, le nombre de contacts entre les fibres augmente et ainsi le matériau se raidit.

Sur la figure 3.b on trace le déplacement résiduel en fonction du déplacement maxi pour la charge de chaque cycle.

A partir de la figure 3.b, on remarque que pour chaque déplacement (correspondant à un cycle), on obtient un déplacement résiduel. La relation entre le déplacement résiduel et le déplacement effectué pour chaque cycle est une relation linéaire. On verra que ce type de relation simple pourra être utilisé pour la modélisation des phénomènes irréversibles.

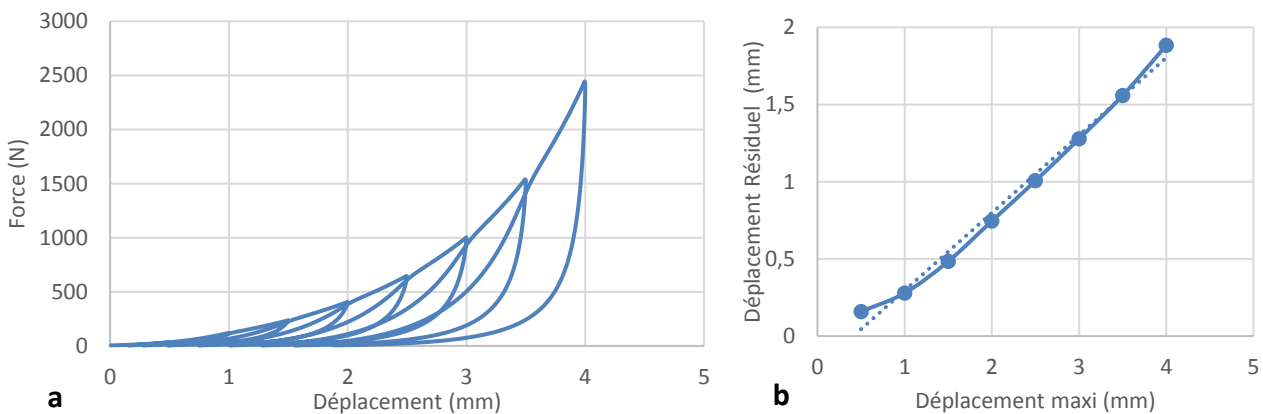


Fig. 3. a) Courbe force-déplacement de l'essai 2 de compression b) Courbe déplacement résiduel - déplacement maxi

## 2.2 Essais de bias-extension-test

### 2.2.1 Matériel

Le matériel nécessaire pour réaliser ces essais est :

- Machine de traction MTS 25 kN,
- mors à control pneumatique,
- un capteur d'effort,
- échantillons de 'renfort interlock couche à couche Sergé 3x3' de dimensions 150 mm x 60 mm x 10 mm.

### 2.2.2 Méthode et Résultats :

L'essai de bias-extension-test est un essai standard pour caractériser le cisaillement dans le renfort ; le cisaillement dans les renforts fibreux est un mécanisme qui mélange plusieurs types d'interactions entre mèches (frottement).



Fig. 4. Dispositif d'essai de bias-extension-test.

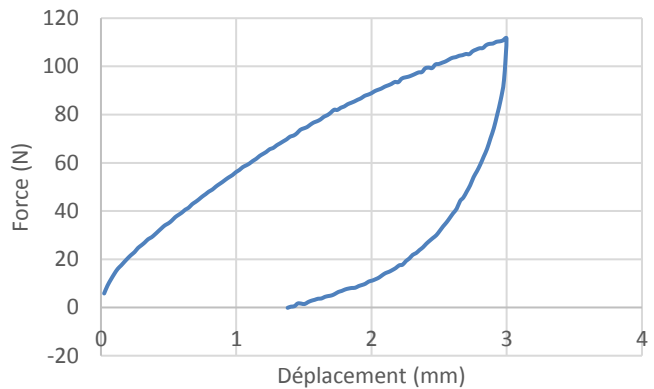


Fig. 5. Courbe force-déplacement de l'essai de bias-extension-test

L'essai (figure 4) correspond à un déplacement imposé de 3 mm à la vitesse de 3 mm.min<sup>-1</sup>. On effectue ensuite un déchargement à effort  $F$  imposé avec la consigne  $F = 0$ .

Les résultats montrés sur la figure 5 montrent un déplacement résiduel pour un cas de charge/décharge.

## 2.3 Essais de flexion 3 points

### 2.3.1 Matériel

Le matériel nécessaire pour réaliser ces essais est :

- Machine de traction Lloyd LF Plus 1 kN,
- un capteur d'effort,
- des appuis,
- échantillons de 'renfort interlock couche à couche Sergé 3x3' de dimensions 200 mm x 55 mm x 10 mm.

### 2.3.2 Méthode et Résultats

On pose l'éprouvette sur deux appuis et ensuite on fait descendre un poinçon pour imposer le déplacement désiré au milieu de l'éprouvette (figure 6).

Le premier essai correspond à un déplacement imposé de 5 mm. On effectue ensuite un déchargement à effort  $F$  imposé avec la consigne  $F = 0$ .

Les résultats de la figure 7 montrent un déplacement résiduel de presque 40% du déplacement total pour un cas de charge/décharge.

Un deuxième essai est réalisé avec la même méthodologie que le précédent, mais pour 7 cycles, chaque cycle correspondant à un déplacement différent (5 mm ; 8 mm ; 11 mm ; 14 mm ; 17 mm ; 20 mm ; 23 mm).

A partir de la figure 8.a, on remarque que pour chaque déplacement imposé (correspondant à un cycle), on obtient un déplacement résiduel.



Fig. 6. Dispositif d'essai de flexion 3 points

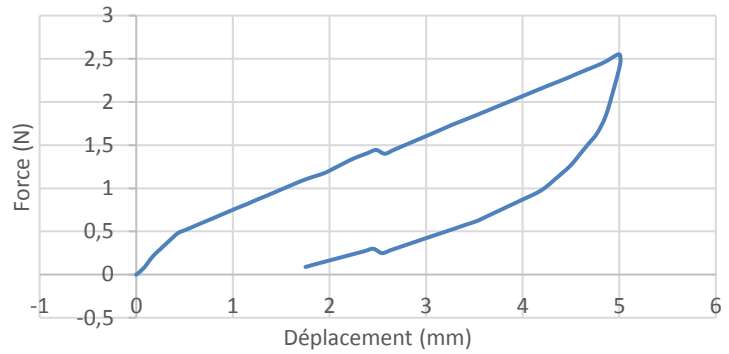


Fig. 7. Courbe force-déplacement de l'essai 1 de flexion 3 points

Sur la Figure 8.b on trace le déplacement résiduel en fonction du déplacement maxi pour la charge de chaque cycle. La relation entre le déplacement imposé et le déplacement résiduel est quasi-linéaire.

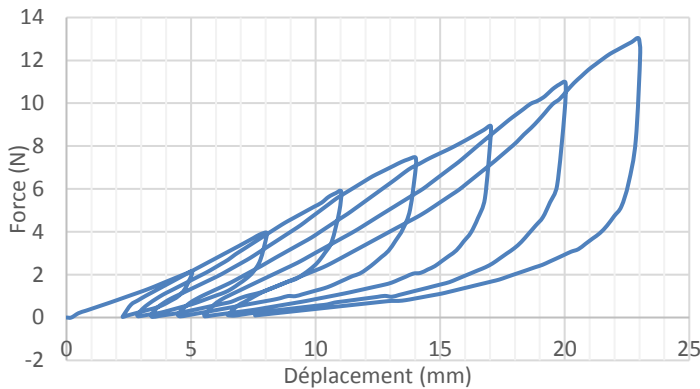


Fig. 8. a) Courbe force-déplacement de l'essai 2 de flexion 3 points

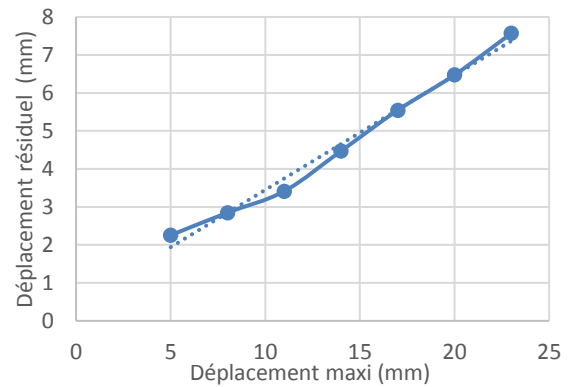


Fig. 8. b) Courbe déplacement résiduel - déplacement maxi

On remarque qu'en compression (écrasement), en cisaillement et en flexion on obtient des retours non élastiques. Donc, les questions qui se posent est-ce qu'il y a des zones du renfort qui subissent des chargements cycliques (un aller-retour ou plusieurs) non élastiques lors d'une mise en forme ? Quelle est l'influence d'une prise en compte de cette inélasticité des renforts dans les simulations numériques de mise en forme ? Dans la suite, on va essayer de répondre à ces questions.

### 3. Simulations numériques – modèle élastique

Dans cette partie on cherche à modéliser des cas de mise en forme simple et distinguer des cas spécifiques dans lesquels certains modes de déformation des renforts fibreux serait solliciter de manière cyclique (ou au moins dans le cas d'une charge-décharge). Ces cas de chargement seraient donc susceptibles de mettre en œuvre les effets irréversibles mis en évidence dans les essais.

Les simulations sont réalisées sur le logiciel PlasFib développé par l'INSA de Lyon, un code éléments-finis explicite en grandes transformations proposant une approche macroscopique continue des renforts fibreux. Dans les simulations suivantes, nous allons utiliser une approche par éléments de coque (structure mince) [7] ; dans ce cas les modes de déformation sont la traction des mèches ; le cisaillement plan ; et la flexion hors plan.

Nous proposons dans un premier temps de recentrer l'étude sur la partie flexion. Nous cherchons alors un test susceptible de provoquer une charge/décharge locale dans le tissé. Le premier test retenu est décrit sur la figure 9. Il s'agit de plier le tissé dans le sens chaîne.

En suivant l'évolution d'un point particulier au cours de l'emboutissage, on montre que ce dernier subit une charge/décharge sur le moment de flexion dans le sens chaîne.

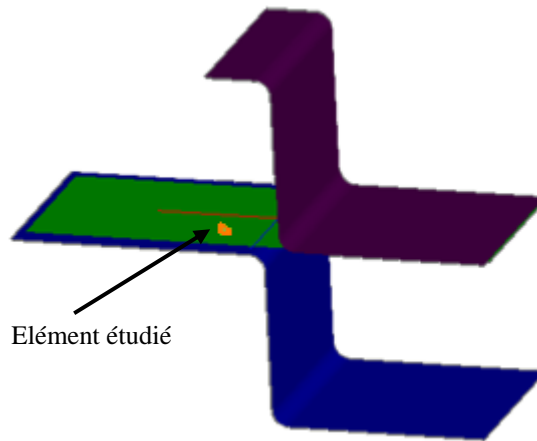


Fig. 9. Emboutissage droit (Logiciel Pré-PlasFib)

Ainsi, l'évolution en fonction du temps du moment de flexion (sens chaîne) pour un élément de tissu est représentée sur la figure 10.

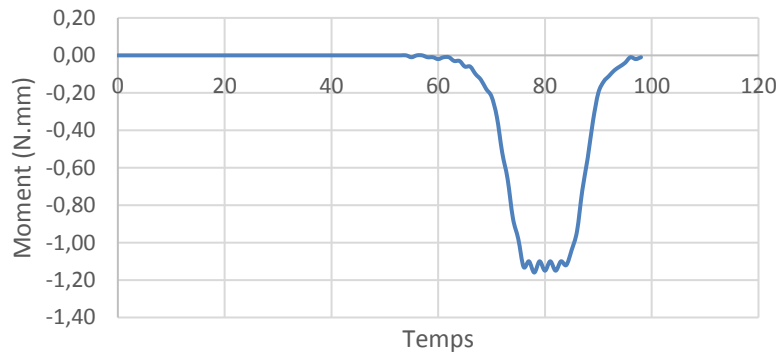


Fig. 10. – Moment de flexion (sens chaîne) en fonction du temps pour un élément de tissu

Dans la suite on cherche un modèle qui décrit l'anélasticité observée expérimentalement pour l'implémenter ensuite dans PlasFib et prendre en compte l'irréversibilité dans le cas de cet emboutissage.

#### 4. Modèle Anélastique

On cherche un modèle anélastique capable de représenter la relation de comportement entre moment de flexion et courbure ; dans ce cadre l'échantillon est vu comme une structure mince de type coque avec un comportement de flexion.

Dans ce but, réalise un essai de flexion 3 points sur un interlock en verre (G1151) d'épaisseur 3 mm (figure 11). Une caméra 16 MP et un objectif sont utilisés pour suivre la ligne moyenne du tissu en fonction du temps. Les échantillons font 200mm x 55mm x 3 mm.

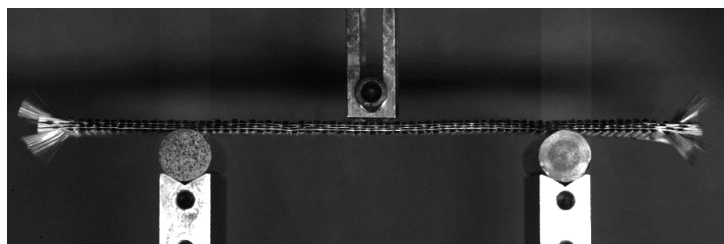


Fig. 11. Montage essai de flexion 3 points sur un interlock en verre (G1151)

Les images prises au cours de l'essai permettent de remonter à la ligne moyenne de l'échantillon, et d'en déduire la courbure. Le moment est également calculé à partir de la configuration déformée.

#### 4.1 Résultats expérimentaux

Le premier essai correspond à un déplacement imposé de 30 mm. On effectue ensuite un déchargement à effort  $F$  imposé avec la consigne  $F = 0$  (figure 12).

Un deuxième essai est réalisé avec la même méthodologie que le précédent, mais pour 8 cycles, chaque cycle correspondant à un déplacement différent {5 mm ; 10 mm ; 15 mm ; 20 mm ; 25 mm ; 30 mm ; 35 mm} (figure 13).

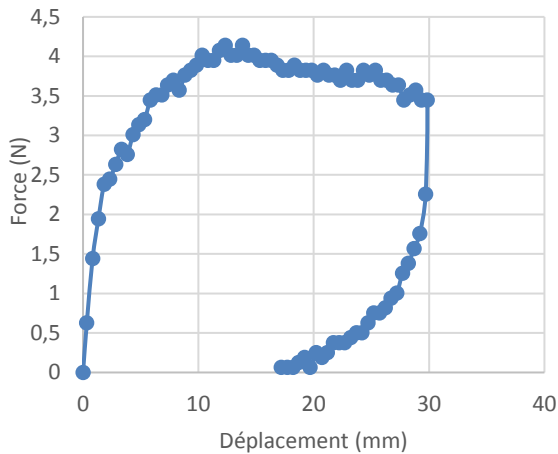


Fig. 12. Relation Force – Déplacement pour l'essai 1

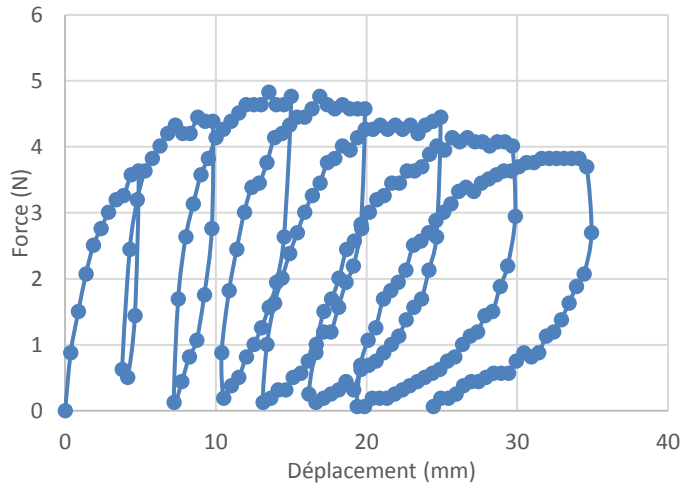


Fig. 13. Relation Force – Déplacement pour l'essai 2

#### 4.2 Traitement d'images

En utilisant le logiciel ImageJ, on tire de chaque image (correspondante à un instant  $t$ ) des points expérimentaux correspondants à la ligne moyenne. Ensuite, j'utilise la méthode d'approximation des moindres carrés pour trouver un polynôme dont la courbe représentative lisse ces points expérimentaux. Pour le calcul de ce polynôme, on impose que sa dérivée est nulle au point d'application de la force. La figure 14 montre les points expérimentaux et la courbe d'approximation qui représente la ligne moyenne pour l'instant correspondant à un déplacement de 30 mm.

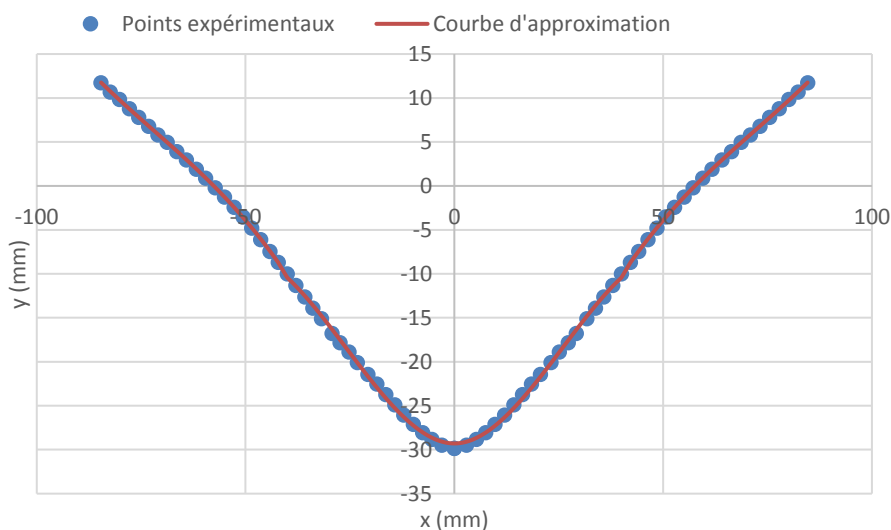


Fig. 14. Points expérimentaux sur la ligne moyenne, et courbe d'approximation qui la représente



### 4.3 Recherche du modèle anélastique

#### 4.3.1 Relation moment courbure expérimental

Pour obtenir un nuage de points moment en fonction de la courbure, on calcule pour chaque instant  $t$  la courbure et le moment au point d'application de la force. La courbure est calculée à partir du polynôme qui représente la ligne moyenne en utilisant la formule :

$$C(x) = \frac{y''(x)}{(1 + y'^2(x))^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{Eq. 1})$$

Le calcul de la courbure et du moment à tout instant au point d'application de la force de l'essai 1 nous donne le nuage des points de la figure 15.

#### 4.3.2 Modèle anélastique représentant la relation moment-courbure

Le modèle que l'on cherche doit décrire 2 phases, la première est lorsque la dérivée en fonction du temps de la courbure augmente (charge), et la deuxième lorsque la dérivée en fonction du temps de la courbure diminue (décharge). Soit :

$$M(C) = \begin{cases} A(1 - e^{-\frac{C}{B}}), & \frac{dC}{dt} \geq 0 \\ N \cdot \log(1 - \frac{x-r}{K}), & \frac{dC}{dt} < 0 \end{cases} \quad (\text{Eq. 2})$$

Avec  $A$ ,  $B$ ,  $N$  et  $K$  sont des constantes choisies d'une façon à obtenir l'erreur minimale et  $r$  est égale à la courbure du point de retour correspondante à un moment nul.

A partir de ces constantes on peut représenter le modèle non élastique de la relation moment de flexion-courbure (figure 15).

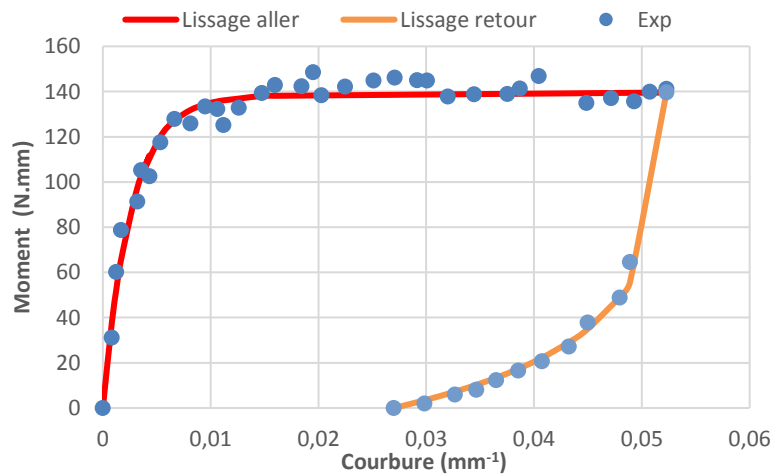


Fig. 15. Moment en fonction de la courbure (modèle + points expérimentaux) pour l'essai 1

Dans notre cas, la dérivée de la courbure en fonction du temps devient négative pour la phase de retour à partir du moment où la courbure atteint une valeur de  $0,053 \text{ mm}^{-1}$ . Par contre, la phase de retour peut être à partir d'une autre valeur de courbure (nommée  $L_C$ ). Pour qu'on puisse implémenter notre modèle non élastique dans PlasFib pour faire les simulations, on doit être capable de trouver les valeurs des constantes  $N$ ,  $K$  et  $r$  à partir de cette valeur  $L_C$ . Dans ce but on va voir comment l'équation représentante de la deuxième phase change avec différentes valeurs de  $L_C$ .

La figure 16 nous montre le nuage de points moment-courbure correspondants à l'essai 2 et la deuxième phase de notre modèle non réversible pour tous les retours (lissage des retours).

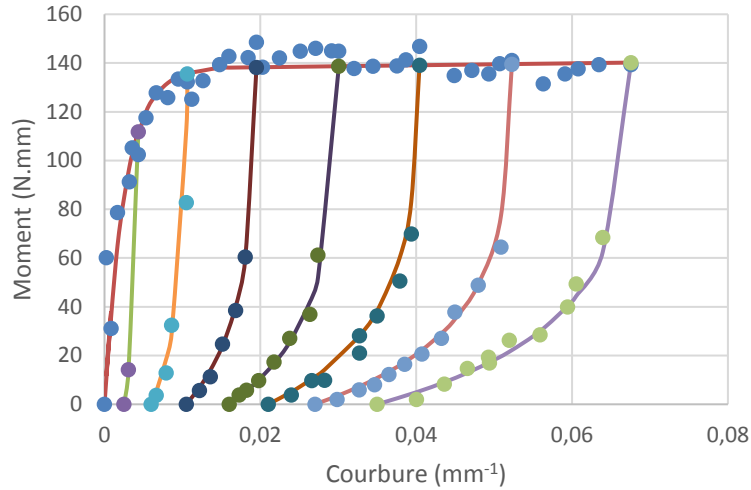


Fig. 16. Moment en fonction de la courbure (modèle + points expérimentaux) pour l'essai 2

A partir de ces résultats on remarque qu'il y a une relation linéaire entre les 3 paramètres  $N$ ,  $K$  et  $r$  avec les différentes valeurs de  $L_c$  (figure 17, 18 et 19).

Dans la suite, je vais implémenter ce modèle anélastique dans PlasFib pour comparer les résultats des simulations obtenus avec un modèle élastique et avec ce modèle anélastique.

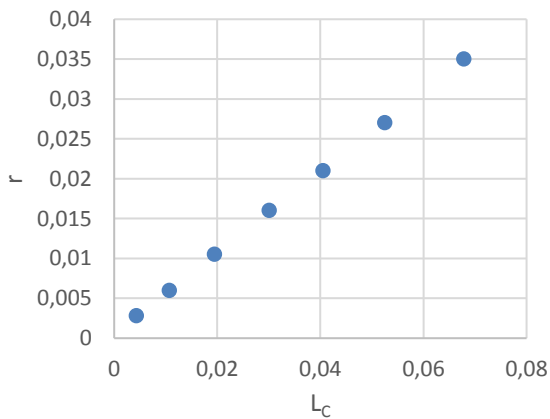


Fig. 17. Relation  $r$  en fonction de  $L_c$

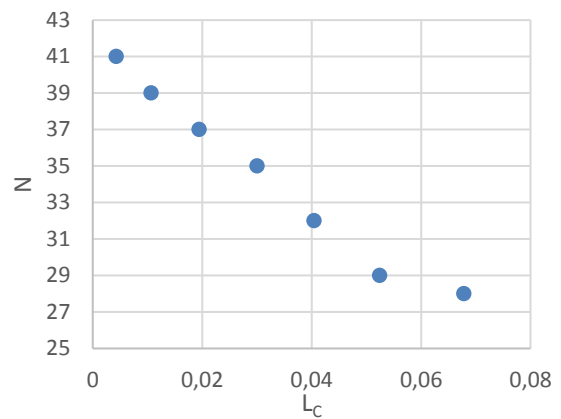


Fig. 18. Relation  $N$  en fonction de  $L_c$

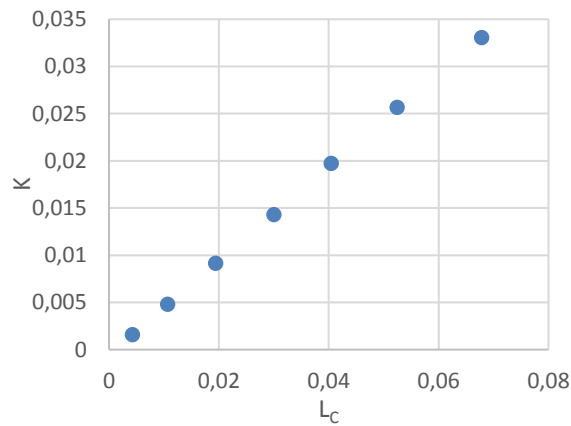


Fig. 19. Relation  $K$  en fonction de  $L_c$

## Conclusion

A partir de ce qu'on a vu, on remarque que pour les 3 modes de déformation on a obtenu des déplacements résiduels lors des charges/décharges d'où l'importance d'étudier l'influence de prendre en considération ces irréversibilités lors de la mise en forme des renforts.

En mode de déformation en flexion, le modèle anélastique qu'on a décrit permet de prévoir la relation moment-courbure non bijective en se basant sur la linéarité entre les paramètres décrivant ce modèle.

Le travail en cours vise à implémenter le modèle anélastique retenu dans le code de calcul éléments finis pour évaluer l'influence des irréversibilités dans la mise en forme.

## Références

- [1] Badel P., Vidal-Sallé E., Boisse P., « Large deformation analysis of fibrous materials using rate constitutive equations ». *Computers & Structures*, vol. 86, 2008, p. 1164-1175.
- [2] Khan M., Mabrouki T., Vidal-Sallé E., Boisse P., « Numerical and experimental analyses of woven composite reinforcement forming using a hypoelastic behaviour-application to the double dome benchmark ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, 2010, p. 378-388.
- [3] Charmetant A., Orliac J., Vidal-Sallé E., Boisse P., « Hyperelastic model for large deformation analyses of 3D interlock composite preforms. ». *Composites Science and Technology*, vol. 72, 2012, p. 1352-1360.
- [4] Gatouillat S., « Approche mésoscopique pour la mise en forme des renforts tissés de composites ». *Thèse de doctorat. INSA, Lyon*, 2010.
- [5] Robitaille, Francois, and Raymond Gauvin. « Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing. III: Reorganization of the fiber network. » *Polymer Composites*, 1999, vol. 20, no 1, p. 48-61.
- [6] HAMILA N., « Simulation de la mise en forme des renforts composites mono et multi plis. » *Thèse de doctorat. Villeurbanne, INSA*, 2007.
- [7] Hamila, N., Boisse, P., Sabourin, F., & Brunet, M., « A semi-discrete shell finite element for textile composite reinforcement forming simulation ». *International journal for numerical methods in engineering*, 2009, vol. 79, no 12, p. 1443-1466.