



Structures déployables constituées de mètres rubans : modélisations et essais expérimentaux

Maverick Martin, Stéphane Bourgeois, B. Cochelin, J Ducarne, F. Guinot

► To cite this version:

Maverick Martin, Stéphane Bourgeois, B. Cochelin, J Ducarne, F. Guinot. Structures déployables constituées de mètres rubans : modélisations et essais expérimentaux. CFM2017, 23ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2017, Lille, France. hal-01770247

HAL Id: hal-01770247

<https://hal.science/hal-01770247>

Submitted on 18 Apr 2018

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.

Structures déployables constituées de mètres rubans : modélisations et essais expérimentaux.

M. MARTIN ^{a,b}, S. BOURGEOIS ^a, B. COCHELIN ^a,
J. DUCARNE ^b, F. GUINOT ^b.

a. LMA, Centrale Marseille, CNRS, UPR 7051, Aix-Marseille Univ, F-13451 Marseille, France

Martin@lma.cnrs-mrs.fr, {Stephane.Bourgeois,Bruno.Cochelin}@centrale-marseille.fr

b. Thales Alenia Space, Cannes, France, {Julien.Ducarne,Francois.Guinot}@thalesaleniaspace.com

Résumé :

Les travaux présentés ici portent sur la modélisation et la caractérisation expérimentale du comportement en statique de rubans composites. Les modèles de poutres à section flexible précédemment développés sont étendus ici à l'utilisation de matériaux composites. Des mètres rubans ont été fabriqués à partir de plis unidirectionnels carbone/époxy pour servir d'éprouvette dans une machine d'essais conçue dans le but de confronter le modèle à des résultats expérimentaux. L'essai réalisé est la flexion transverse du ruban qui présente un scénario complexe de formation de plis faisant intervenir des phénomènes de flexion et de torsion. Une discussion est menée au sujet de la confrontation numérique/expérimental pour l'essai de flexion transverse de rubans composites.

Abstract :

The study focuses on the numerical modeling and experimental characterisation of the static behaviour of composite tape springs. Rod models with flexible cross section have been developed and are extended in order to take into account the use of composite materials. Tape springs have been manufactured with carbon/epoxy plies to use it in an experimental set-up to compare rod models to experimental results. The pure bending test highlights a complex scenario of folding that involves both bending and twisting mechanisms. The comparison between numerical and experimental results of the transverse bending of tape springs is discussed.

Mots clefs : mètres rubans, poutre à section flexible, éléments finis, matériaux composites, flexion transverse.

1 Introduction

L'utilisation grandissante de structures déployables dans le secteur spatial a mené les industriels à développer de nouveaux concepts de déploiement [1]. Grâce à leur compacité dans l'état plié ou en configuration enroulée et à leur capacité de déploiement autonome par libération d'énergie élastique, les mètres rubans constituent une alternative intéressante à l'emploi de structures articulées. Plusieurs études ont été menées afin de comprendre et de modéliser le comportement complexe de ces structures à section

mince semi-circulaire [3, 6]. Un modèle de poutre à section flexible a été développé par Guinot *et al.* [2] et a été étendu par Picault *et al.* [4, 5] pour prendre en compte le mécanisme de torsion. Une implémentation éléments finis de ce modèle démontre sa capacité à bien appréhender les comportements complexes des mètres rubans : formation, disparition ou dédoublement de plis par exemple. Ces démonstrations ont été réalisées pour des rubans constitués de matériaux isotropes, et on cherche à prendre en compte l'utilisation de matériaux composites dans les modèles. Les résultats numériques sont comparés à ceux obtenus expérimentalement à l'aide de rubans constitués de fibres de carbone liées par une matrice époxy pour un essai de flexion transverse. Cet essai fait intervenir des modes de déformation en torsion et en flexion, le rendant assez complexe à modéliser. Le modèle de poutre à section flexible complet, son implémentation dans un code de calculs éléments finis et les résultats d'un essai de flexion transverse de rubans sont présentés dans cet article.

2 Modèle de poutre à section flexible

Le modèle de poutre à section flexible est présenté succinctement ici. On renvoie aux articles de Guinot *et al.* [2] et de Picault *et al.* ([4, 5]) pour un historique complet du modèle. La cinématique du ruban est tout d'abord définie permettant ensuite d'obtenir une expression analytique de l'énergie de déformation de la poutre à section flexible.

2.1 Cinématique

Dans son état non déformé, le ruban peut être défini comme une poutre de section mince semi-circulaire. Le vecteur \mathbf{e}_1 est colinéaire à la ligne moyenne de la poutre qui passe par le barycentre de chacune des sections du ruban. Soit O le barycentre d'une des extrémités du ruban (voir Figure 1). Le vecteur \mathbf{e}_3 est défini tel que le plan $(O, \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_3)$ soit le plan de symétrie longitudinal du ruban et le vecteur \mathbf{e}_2 est tel que $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$ soit un repère orthonormé direct. Le ruban est paramétré par deux abscisses curvilignes : s_1 le long de la ligne moyenne et s_2 dans la direction transverse.

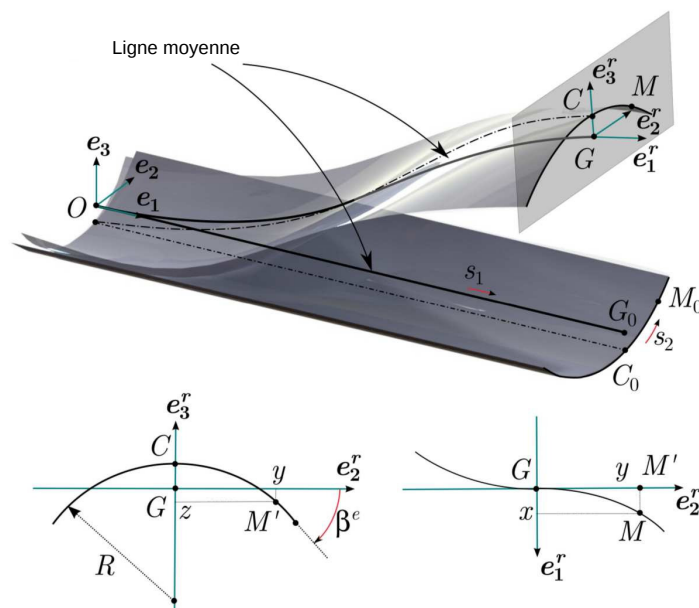


FIGURE 1 – Cinématique du ruban (issue de [5])

Le point de départ du modèle de poutre à section flexible est un modèle de coque qui est ensuite réduit en lui appliquant plusieurs hypothèses cinématiques :

1. Le plan $(\mathbf{G}, \mathbf{e}_2^r, \mathbf{e}_3^r)$ reste perpendiculaire à la ligne moyenne,
2. Le gauchissement de la courbe section est uniquement dû à la torsion et est régi par une cinématique de type Vlassov,
3. La projection de la courbe section sur le plan $(\mathbf{G}, \mathbf{e}_2^r, \mathbf{e}_3^r)$ est inextensible.

Soit \mathbf{M} un point de la surface moyenne de la coque et \mathbf{G} le barycentre de la section à laquelle appartient \mathbf{M} . La position de \mathbf{M} est donnée par le vecteur \mathbf{OM} défini ci-après :

$$\mathbf{OM}(s_1, s_2) = \mathbf{OG}(s_1) + \mathbf{GM}(s_1, s_2) \quad (1)$$

où les vecteurs $\mathbf{OG}(s_1)$ et $\mathbf{GM}(s_1, s_2)$ sont définis à tout instant par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} \mathbf{OG} &= (s_1 + u_1(s_1))\mathbf{e}_1 + u_2(s_1)\mathbf{e}_2 + u_3(s_1)\mathbf{e}_3 \\ \mathbf{GM} &= x(s_1, s_2)\mathbf{e}_1^r + y(s_1, s_2)\mathbf{e}_2^r + z(s_1, s_2)\mathbf{e}_3^r(s_1) \end{cases} \quad (2)$$

avec $u_1(s_1)$, $u_2(s_1)$ et $u_3(s_1)$ les déplacements des points de la ligne moyenne, et x , y et z les coordonnées du point \mathbf{M} dans le repère local $(\mathbf{G}, \mathbf{e}_1^r, \mathbf{e}_2^r, \mathbf{e}_3^r)$. La troisième hypothèse concernant le gauchissement de la courbe section par une cinématique de type Vlassov conduit à l'expression

$$x = \omega k_t^r \text{ avec } \omega_{,2} = zy_{,2} - yz_{,2} \quad (3)$$

où k_t^r correspond à la courbure de torsion de la ligne moyenne et ω est une fonction géométrique homogène à une inertie et appelée *fonction de gauchissement*. L'hypothèse cinématique d'inextensibilité de la courbe section permet d'écrire les expressions de $y_{,2}$ et $z_{,2}$, les dérivées de y et z par rapport à l'abscisse curviligne s_2 .

$$y_{,2} = \cos \beta \quad \text{et} \quad z_{,2} = \sin \beta \quad (4)$$

où β est l'angle entre l'axe Ge_2^r et le vecteur tangent à la projection de la courbe section au point \mathbf{M} . Ce paramètre peut être relié à la courbure transverse du ruban κ . En prenant une base de polynômes orthogonaux $P^i(s_2)$ (Legendre ici) d'ordre i pair, l'expression de κ est donnée par la méthode de Ritz :

$$\kappa(s_1, s_2) = \sum_{i=0}^N \kappa_i(s_1) P^i(s_2) \quad (5)$$

À l'instant initial, la courbure transverse est connue $\kappa = \frac{1}{R_0} P^0$ avec $P^0 = 1$ le premier polynôme de Legendre et R_0 le rayon initial de la section. En intégrant les polynômes $P^i(s_2)$, on obtient les polynômes $Q^i(s_2)$ qui permettent d'écrire le paramètre β .

$$\beta(s_1, s_2) = \kappa_i(s_1) Q^i(s_2) \quad (6)$$

L'approximation des petits angles sur β (cas des rubans à section fortement ouverte) permet alors d'écrire $y_{,2} \approx 1$ et $z_{,2} \approx \beta$. Notons $R^i(s_2)$ les polynômes issus de l'intégration des $Q^i(s_2)$, on obtient alors :

$$y(s_2) = s_2 \quad \text{et} \quad z(s_1, s_2) = \kappa_i(s_1)R^i(s_2) \quad (7)$$

2.2 Énergie de déformation

On considère que la coque ne subit que des petites déformations élastiques. On se limite aux stratifiés symétriques et équilibrés avec des plis d'angles $\pm\alpha$ uniquement. On suppose ainsi que la déformation membranaire en traction-compression est prépondérante selon l'axe longitudinal. Le couplage entre les phénomènes de flexion et de torsion est supposé négligeable. L'énergie de déformation peut alors s'écrire de la manière suivante :

$$U_e = \frac{1}{2} \int_0^L \int_{-a}^a (Ae_{11}^2 + D_{11}k_{11}^2 + 2D_{12}k_{11}k_{22} + 2D_{13}k_{11}k_{12} + 2D_{23}k_{22}k_{12} + D_{22}k_{22}^2 + 4D_{33}k_{12}^2) ds_2 ds_1. \quad (8)$$

où $A = A_{11} - \frac{A_{12}^2}{A_{22}}$ et les coefficients A_{ij} et D_{ij} sont calculés à partir des propriétés géométriques et mécaniques des plis composant le stratifié. Le paramètre L est la longueur longitudinale du ruban et a est la demi-longueur de la courbe section. Les déformations du feuillet moyen sont données par les équations du système (9).

$$\begin{cases} e_{11} &= e^r - yk_3^r + zk_2^r + \frac{1}{2}(y^2 + z^2)(k_t^r)^2 + \frac{1}{2}(y_{,1}^2 + z_{,1}^2) + (yz_{,1} - zy_{,1})k_t^r + \omega k_{t,1}^r + \omega_{,1}k_t^r \\ k_{11} &= -y_{,2}k_2^r - z_{,2}k_3^r + (yy_{,2} + zz_{,2})k_{t,1}^r + y_{,2}z_{,11} - z_{,2}y_{,11} + 2(y_{,1}y_{,2} + z_{,1}z_{,2})k_t^r + \dots \\ &\quad \dots - \omega_{,2}(k_t^r)^2 + \omega(k_3^r - z_{,2}k_2^r)(k_t^r)^2 \\ k_{22} &= \beta_{,2} - \beta_{0,2} \\ k_{12} &= k_t^r + \beta_{,1} \end{cases} \quad (9)$$

où $e^r = u_{1,1} + \frac{1}{2}(u_{1,1}^2 + u_{2,1}^2 + u_{3,1}^2)$. Les expressions des courbures de flexion (k_2^r et k_3^r) et de torsion (k_t^r) de la ligne moyenne sont définies à l'aide des vecteurs du repère local ($\mathbf{G}, \mathbf{e}_1^r, \mathbf{e}_2^r, \mathbf{e}_3^r$) :

$$k_2^r = \mathbf{e}_{3,1}^r \cdot \mathbf{e}_1^r, \quad k_3^r = \mathbf{e}_{1,1}^r \cdot \mathbf{e}_2^r \quad \text{et} \quad k_t^r = \mathbf{e}_{2,1}^r \cdot \mathbf{e}_3^r \quad (10)$$

Soit X une variable cinématique, l'exposant X^r fait référence à un comportement de type rod et X^s fait référence au comportement de la courbe section. Dans les équations précédentes $X_{,j}$ avec $j \in [1, 2]$ correspond à la dérivée de X par rapport à l'abscisse curviligne s_j . Grâce aux expressions des équations (7) et (9), il est possible de procéder à une intégration analytique des quantités dans la section selon s_2 dans l'expression de l'énergie donnée par l'équation (8). L'expression de la densité linéique d'énergie de déformation de la poutre à section flexible est alors obtenue.

3 Implémentation éléments finis

Pour la discrétisation du modèle, on prend trois paramètres κ_i pour décrire la cinématique de section. Les rotations sont paramétrées à l'aide d'un pseudo vecteur rotation dont les trois composantes sont notées θ_i avec $i \in \{1, 2, 3\}$. La courbure de torsion de la ligne moyenne est définie comme un degré de liberté et est reliée aux rotations via le multiplicateur de Lagrange L_3 . Deux autres multiplicateurs

de Lagrange sont introduits afin de prendre en compte les deux contraintes cinématiques générées par l'hypothèse de perpendicularité entre le plan (\mathbf{G} , \mathbf{e}_2^r , \mathbf{e}_3^r) et la ligne moyenne (multiplicateurs L_1 et L_2). Le choix des interpolations des variables est reporté dans le tableau 1.

DDL	u_i	θ_i	κ_i	k_t^r	L_1	L_2	L_3
Polynômes	Lagrange	Hermite	Hermite	Hermite	Lagrange	Lagrange	Hermite
Ordre	1	3	3	3	1	1	3

TABLE 1 – Tableau des interpolations

Un élément poutre à deux nœuds avec 21 degrés de liberté par nœud est alors obtenu et il est nommé REFleXS pour Rod Element with Flexible X-Section, où X signifie Cross. Cet élément est implémenté dans un code de calcul par éléments finis développé sous Matlab.

3.1 Essai de flexion transverse

L'essai de flexion transverse consiste à appliquer des rotations opposées à chacune des extrémités du ruban autour de l'axe perpendiculaire au plan de symétrie longitudinal du ruban (axe \mathbf{e}_2 sur la Figure 1). Les extrémités du ruban sont encastées mais l'une d'elles est libre de translater selon l'axe longitudinal initial \mathbf{e}_1 du ruban. Les sections extrêmes sont bloquées afin de maintenir leur configuration semi-circulaire initiale tout au long de l'essai. Picault *et al.* [5] ont déjà présenté l'essai de flexion transverse dans le cas où les rubans sont constitués d'un matériau isotrope. Cet essai est plus complexe que celui de flexion pure souvent étudié dans la littérature ([6], [7]) car il présente un couplage entre la flexion et la torsion.

3.2 Comparaison des modèles numériques

Les caractéristiques géométriques et mécaniques utilisées pour les simulations correspondent à celles des rubans fabriqués spécialement pour l'étude expérimentale menée dans cette article. Ces rubans possèdent une longueur longitudinale de 1500 mm, une longueur transverse de 78.5 mm et un rayon égal à 50 mm. Les propriétés mécaniques des plis carbone/époxy utilisés ont été caractérisées expérimentalement :

$$E_l = 120 \text{ GPa}, \quad E_t = 8 \text{ GPa}, \quad G_{lt} = 3.5 \text{ GPa} \quad \text{et} \quad \nu_{lt} = 0.3.$$

où les indices l et t sont employés pour définir les propriétés selon l'axe longitudinal et l'axe transverse aux fibres. Des empilements symétriques et équilibrés sont choisis de sorte à obtenir un stratifié composé de 8 plis ayant la séquence d'empilement $[+15^\circ / -15^\circ / +15^\circ / -15^\circ]_s$. L'épaisseur théorique de chacun des plis est de 0.16 mm. Les coefficients A_{ij} et D_{ij} sont alors calculés à l'aide de la théorie des stratifiés, les A_{ij} conduisent à $A = 1.2342 \cdot 10^5 \text{ MPa} \cdot \text{mm}$ et les D_{ij} sont répertoriés dans le tableaux 2.

Le comportement d'un ruban soumis à un essai de flexion transverse est représenté sur la Figure 2 pour un modèle de coque classique et pour le modèle de poutre à section flexible. Les réponses observées sont similaires et sont obtenues par une méthode de continuation par pseudo longueur d'arc. La partie linéaire initiale traduit la forte raideur en flexion du ruban dans le sens transverse. Cette partie linéaire se termine lorsque deux *demi-plis* se forment à proximité des extrémités réduisant alors la raideur en flexion du ruban. On parle de *demi-plis* car uniquement un des bords de la courbe section s'aplatit. Au cours de

D_{ij} (MPa.mm ³)	j=1	j=2	j=3
i=1	1.8578e+04	1.6228e+03	1.7030e+03
i=2	Sym.	1.5247e+03	0.1430e+03
i=3	Sym.	Sym.	1.8125e+03

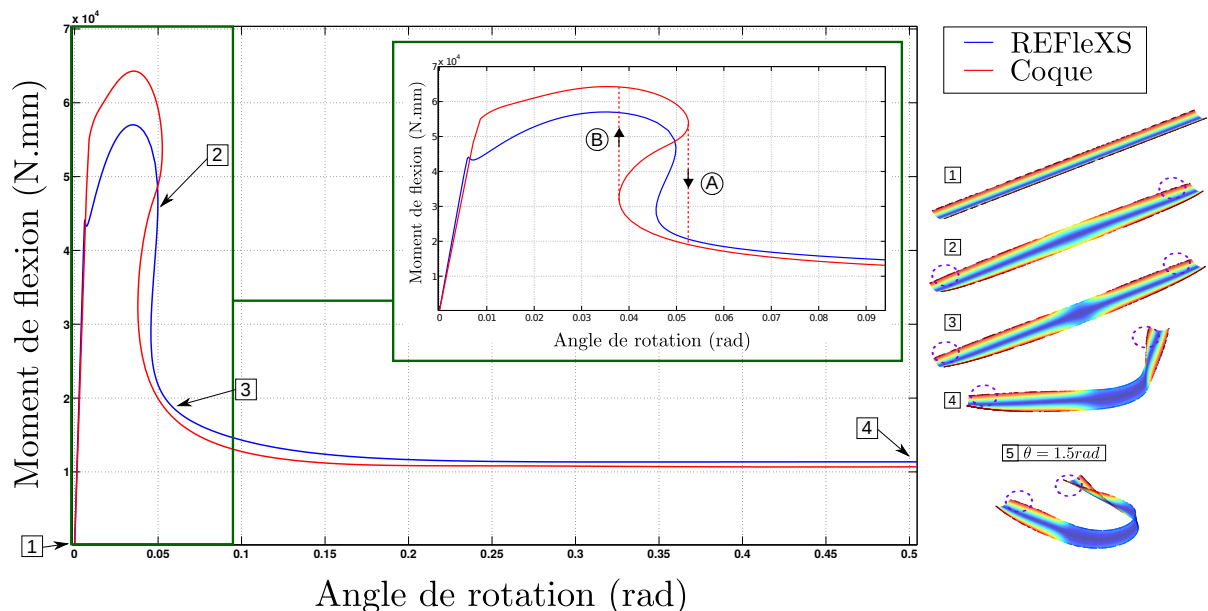
TABLE 2 – Tableau des coefficients D_{ij} 

FIGURE 2 – Courbes du moment mesuré en fonction de l'angle de rotation imposé pour le modèle REFleXS (bleu plein) et pour le modèle de coque (rouge plein). Les chemins en pointillés rouges marquent les sauts de moment à la formation (A) et à la disparition (B) du pli. La déformée reconstruite à partir des résultats du modèle de poutre à section flexible est donnée pour plusieurs instants de l'essai et les cercles violet indiquent les zones de formation des *demi-plis*.

l'essai un bord est soumis à un comportement de traction tandis que l'autre est en compression. C'est le bord en compression qui flambe et entraîne la formation des deux *demi-plis*. La partie non linéaire croissante suivante correspond à l'aplatissement uniforme de la section du ruban entre les *demi-plis* jusqu'à atteindre le point de tangente verticale. Ce point indique la formation du pli central, l'énergie de déformation emmagasinée pour l'aplatissement du ruban est utilisée pour la création du pli central. La formation du pli est accompagnée d'un saut en moment (chemin (A) de la Figure 2) et si la charge continue, la solution suivie ensuite est une courbe de pente faible qui s'apparente à un plateau. La décharge est obtenue de manière réversible jusqu'à atteindre le second point de tangente verticale caractérisant la disparition du pli central (chemin (B) de la figure 2). La configuration initiale est obtenue par retour élastique après la disparition du pli. Un déversement au centre du ruban est obtenu lors du chargement et il augmente à mesure que la charge augmente, puis il disparaît à la fin du déchargement. La Figure 2 confirme donc la capacité du modèle de poutre à section flexible à reproduire le comportement qualitatif des rubans prédit par des modèles de coques, même pour l'utilisation de matériaux composites.

4 Étude expérimentale

4.1 Présentation du banc d'essai

Un banc d'essai dédié à la flexion transverse a été réalisé et reprend le principe d'un ciseau (Figure 3 (a) et (b)). Le ruban est initialement fixé sur deux bras : un fixe et le second mobile en rotation autour de l'axe e_3 . Le bras mobile est piloté en rotation via un volant mécanique. Le banc est équipé de deux capteurs permettant de mesurer l'angle de rotation du bras mobile ainsi que le moment résultant à l'une des extrémités du ruban. L'extrémité où est mesuré le moment est libre de translater selon l'axe e_1 .

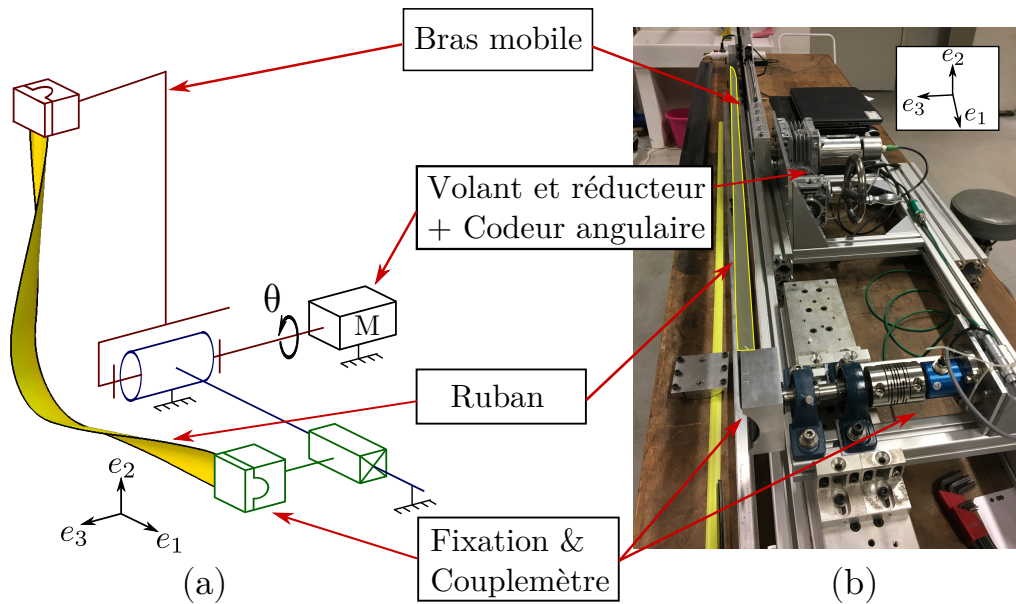


FIGURE 3 – Schéma de principe (a) et photographie du banc de flexion (b).

4.2 Premiers essais

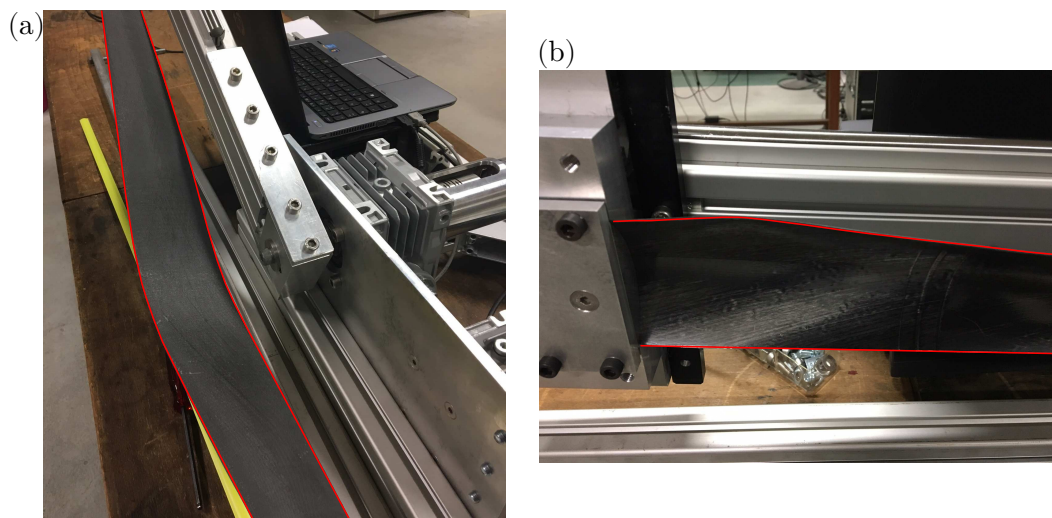


FIGURE 4 – Photographies du ruban en flexion : (a) illustration du déversement central et (b) *demi pli* proche d'une des extrémités. Les lignes rouges représentent les bords du ruban et sont destinées à mieux illustrer ces deux phénomènes.

Un essai consiste en la réalisation de plusieurs cycles de chargement-déchargement : la rotation aux extrémités augmente jusqu'à atteindre un angle de 0.5 rad et revient ensuite à 0 rad pour chacun des cycles. Les premiers cycles réalisés sont accompagnés de craquements de la matrice signifiant son endommagement. Plusieurs cycles sont alors nécessaires pour obtenir un comportement qui se stabilise et qui soit ensuite reproductible. La réponse d'un cycle stabilisé est présentée sur la Figure 5, la formation des deux *demi-plis* proche des extrémités est observée (Figure 4 (b)) par aplatissement local d'un seul des bords de la courbe transverse. En poursuivant la charge, le pli central est créé et son déversement est observé (Figure 4 (a)). Enfin, plus la rotation augmente, plus le déversement augmente jusqu'à atteindre la valeur de rotation maximale du cycle. Lors de la décharge, le pli central disparaît en premier suivi de la disparition des deux *demi-plis*. Notons θ_c l'angle de création du pli et θ_d l'angle de disparition du pli, on observe expérimentalement que $\theta_c > \theta_d$ illustrant le cycle d'hystérésis caractéristique de la flexion de rubans (voir la Figure 5).

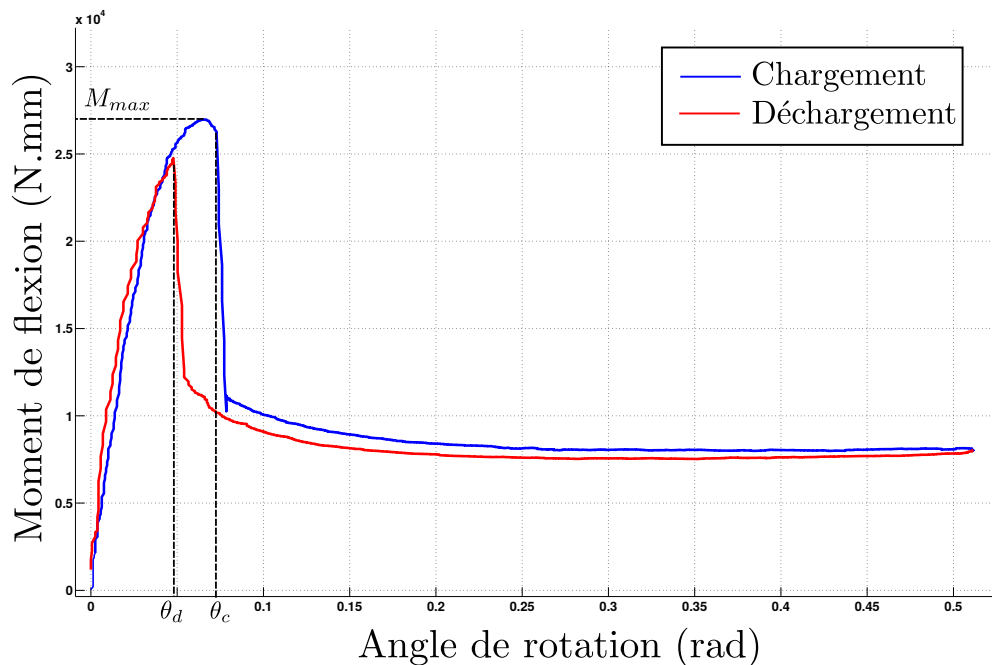


FIGURE 5 – Courbe moment mesuré en fonction de la rotation appliquée sur un cycle complet, en bleu la courbe obtenue lors du chargement du ruban et en rouge celle obtenue lors du déchargement.

4.3 Discussion

Le comportement expérimental est bien retranscrit par les modèles qui sont capables de prédire la formation du pli central et des *demi-plis*. Les angles de formation et de disparition des plis prédits par les modèles sont équivalents à ceux déterminés lors de la flexion transverse des rubans. Un écart important est cependant observé entre la valeur des moments mesurés expérimentalement et celle obtenue numériquement tout au long d'un cycle. Cela vient probablement du fort endommagement subi par le stratifié lors des premiers cycles de flexion. L'épaisseur relativement élevée des rubans génère des déformations importantes entraînant ainsi l'endommagement du matériau, notamment au niveau du pli central et des *demi-plis*. Une nouvelle campagne d'essais est envisagée pour des rubans constitués d'un stratifié composé de seulement 4 plis, réduisant ainsi leur endommagement.

5 Conclusion

Un modèle de poutre à section flexible précédemment développé est ici amélioré et étendu à l'utilisation de matériaux composites. Il est capable de reproduire le comportement d'un mètre ruban soumis à un essai de flexion transverse : le comportement obtenu est proche de celui prédit par des modèles de coques généralement utilisés comme référence. Un banc d'essais a été conçu pour générer la flexion transverse de rubans préalablement fabriqués à partir de plis unidirectionnels de matériaux composites. Bien que le comportement en flexion transverse des rubans soit bien retranscrit numériquement, les résultats numériques divergent des résultats expérimentaux. En effet, la formation du pli central et des deux *demi-plis* est prédite par les modèles mais ceux-ci surestiment fortement le moment mesuré aux extrémités des rubans. Une des raisons expliquant cette différence est l'apparition d'endommagement au sein du stratifié qui subit de fortes déformations. Cet endommagement n'étant pas pris en compte dans les modèles, il est compréhensible de trouver un écart important avec les essais. Il est possible de limiter l'endommagement en réduisant l'épaisseur des rubans testés : des rubans à 4 plis vont ainsi être fabriqués pour exécuter une nouvelle série d'essais. Une adaptation du banc est envisagée afin de réaliser des essais de flexion pure d'un ruban, mais aussi des essais de déploiement d'un ruban initialement plié, dans le but de confronter le modèle développé à un large panel d'expériences.

Remerciements Nous tenons à remercier O. Bardel et F. Mazerolle pour la conception et l'installation du banc d'essais ainsi que S. Feugas et D. Hoarau pour leur aide dans la réalisation des rubans composites.

Références

- [1] D. Givois, J. Sicre, T. Mazoyer. *A Low Cost Hinge For Appendices Deployment : Design, Test and Applications*. In Proceedings of the 9th European Space Mechanisms and Tribology Symposium, 2001, Liège, Belgique.
- [2] F. Guinot, S. Bourgeois, B. Cochelin, L. Blanchard. *A planar rod model with flexible thin-walled cross-sections. Application to the folding of tape springs*. Int. J. Solids Structures, 49 (1), 73-86, 2012.
- [3] K.A. Lazopoulos. *On rigid-elastic bending and buckling deformations of long beams*. Acta Mechanica, 169(1) :145-151, 2004.
- [4] E. Picault, P. Marone-Hitz, S. Bourgeois, B. Cochelin, F. Guinot. *A planar rod model with flexible cross-section for the folding and the dynamic deployment of tape springs : improvements and comparisons with experiments*. Int. J. Solids Structures, 51 (18), 3226-3238, 2014.
- [5] E. Picault, S. Bourgeois, B. Cochelin, F. Guinot. *A rod model with thin-walled flexible cross-section : Extension to 3D motions and application to 3D foldings of tape springs*. Int. J. Solids Structures, 84 (18), 64-81, 2016.
- [6] K.A. Seffen, S. Pellegrino. *Deployment dynamics of tape springs*. Proceedings of the Royal Society of London A, 455 :1003-1048, 1999.
- [7] S.J.I. Walker, G.S. Aglietti. *Experimental investigation of tape springs folded in three dimensions*. AIAA Journal, 44 :151-159, 2006.