



**HAL**  
open science

## Réalisation et modélisation de rubans déployables pour application spatiale

François Guinot, Bruno Cochelin, Stéphane Bourgeois, Christian Hochard,  
Laurent Blanchard

► **To cite this version:**

François Guinot, Bruno Cochelin, Stéphane Bourgeois, Christian Hochard, Laurent Blanchard. Réalisation et modélisation de rubans déployables pour application spatiale. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03390962

**HAL Id: hal-03390962**

**<https://hal.science/hal-03390962>**

Submitted on 21 Oct 2021

**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.

# Réalisation et modélisation de rubans déployables pour application spatiale

F. GUINOT<sup>a</sup>, S. BOURGEOIS<sup>a</sup>, B. COCHELIN<sup>a</sup>, C. HOCHARD<sup>a</sup>, L. BLANCHARD<sup>b</sup>

*a. Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA), 31 chemin Joseph-Aiguier, 13402 Marseille cedex 20*

*b. Thales Alenia Space, 100 boulevard du Midi, 06156 Cannes la Bocca*

## Résumé :

*Dans ce travail est présenté un concept de ruban hybride utilisé pour le déploiement de structures spatiales. Le contrôle de son déroulement nécessaire à la non détérioration de la structure est effectué par le chauffage localisé d'une couche de matériau thermoplastique collée sur ce ruban. Les choix des caractéristiques géométriques et matériau sont réalisés grâce au calcul de l'énergie de déformation de l'état enroulé du ruban. Les premières étapes du développement d'un modèle dynamique à une dimension ayant pour but de simuler le déroulement du ruban sont également exposées.*

## Abstract :

*In this work we present a new concept of a hybrid tape-spring for the deployment of space structures. The control of its unreeling, needed to avoid any risk of damage, is done thanks to a local heating of a thermoplastic layer stuck on it. The material properties and the geometry are chosen by minimising the strain energy of the coiled state. Then the first steps of the development of a 1D dynamical model describing the uncoiling of the tape-spring are presented.*

**Mots clefs :** Mètre-ruban, Structure déployable, Elastica

## 1 Introduction

La taille des structures spatiales est limitée par le volume disponible sous la coiffe de la fusée. La mise en orbite de grandes structures nécessite donc l'emploi d'éléments déployables. Thales Alenia Space étudie un nouveau concept d'instrument d'observation déployable. Ce télescope est constitué de deux miroirs supportés par des plateaux étant reliés entre eux par six rubans. Lors de la mise en orbite, le passage de la configuration gerbée à la configuration déployée est effectué grâce au déroulement de ces rubans comme le montre la figure 1. De plus, des actionneurs présents à la base de ces 6 rubans permettent d'effectuer une correction du positionnement du miroir secondaire situé sur la plate-forme selon 6 degrés de liberté.

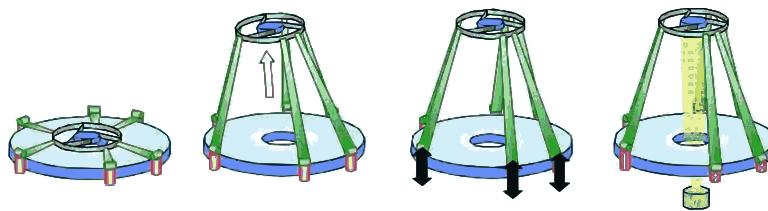


FIG. 1 – Principe de l'hexapode déployable

Des études antérieures [1] ont abouti à la réalisation d'un hexapode constitué de rubans métalliques illustré par la figure 2. Cependant, il a été montré que, sans système de régulation, le déroulement autonome des rubans risquait de générer des chocs trop importants pour des optiques de haute précision.

Dans la suite nous présenterons en premier lieu les résultats expérimentaux obtenus avec un nouveau type de ruban hybride dont la maîtrise du déroulement est effectuée par le chauffage progressif d'une couche de matériau thermoplastique. Dans une seconde partie la stratégie de la modélisation du comportement du ruban sera abordée.

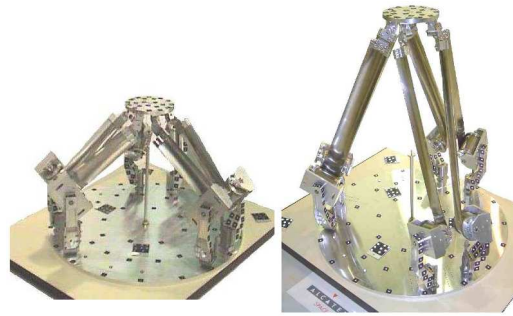


FIG. 2 – Hexapode à rubans métalliques

## 2 Concept et définition d'un ruban déployable

### 2.1 Concept

Différents principes fondés sur le déploiement de rubans ont été développés. Des rubans flexibles ont été mis au point [2] mais les déformations auxquelles ils sont soumis peuvent être importantes et le risque de plastification n'est pas négligeable. Les propriétés des composites utilisant une résine à mémoire de forme ont été explorées [3] mais la modélisation de ce type de matériaux reste un obstacle. Des rubans dits "bi-stables" utilisant de manière judicieuse les propriétés des matériaux composites ont été mis en œuvre. Ils possèdent la particularité d'être stable à la fois dans leur état enroulé et dans leur état déroulé. Des travaux conséquents ont été menés afin de maîtriser leur fabrication et la modélisation de leur comportement [4], [5], [6], [7]. Un des enjeux fondamentaux est la maîtrise du déroulement des rubans afin d'éviter tout déploiement brutal. L'utilisation de rubans bistables nécessite, d'une part, un apport d'énergie déclenchant le déroulement et, d'autre part, une absorption d'énergie permettant le contrôle du déroulement. Dans le cas de l'utilisation de simples rubans monostables, une seule de ces étapes doit être assurée : seul le freinage du déroulement est nécessaire. C'est l'option qui est ici retenue. Ce contrôle est effectué par le réchauffement progressif d'une couche de matériau thermoplastique présent sur le ruban. Cette couche thermoplastique permet également le maintien de la position enroulée : après la fabrication du ruban initialement déroulé, un film thermoplastique est collé sur ses faces. L'ensemble est chauffé à une température supérieure à la température de transition vitreuse ( $T_g$ ) du thermoplastique. Le ruban est ensuite amené dans sa configuration enroulée puis, en maintenant cette déformation, la température est baissée jusqu'à l'ambiante : le thermoplastique retrouve alors sa rigidité initiale et peut maintenir le ruban dans son état enroulé. Un re-chauffage localisé au dessus de la  $T_g$  du thermoplastique assouplit fortement ce dernier et permet un déroulement régulé du ruban.

### 2.2 Définition des caractéristiques d'un ruban

La vitesse de déroulement d'un ruban est directement liée à l'énergie de déformation emmagasinée dans l'état enroulé. Grâce à leurs propriétés mécaniques ajustables en fonction de l'orientation des fibres, les matériaux composites font figure de candidats idéaux. En effet, l'énergie de déformation de l'état enroulé du ruban dépend directement de l'orientation des fibres. En plus de sa longueur totale  $L$ , le ruban est parfaitement défini par  $\beta$  et  $R$ , respectivement l'angle d'ouverture et le rayon de la section. On note  $k_x$  la courbure de l'état enroulé (figure 3).

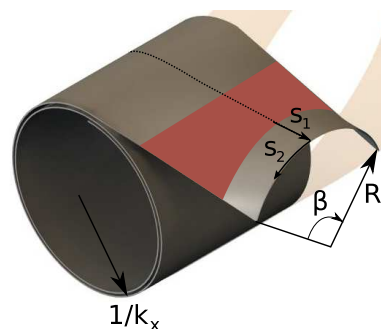


FIG. 3 – Paramètres géométriques du ruban

La densité d'énergie de déformation du ruban dans son état totalement enroulé est uniforme et vaut [8] :

$$U = \frac{1}{2} \epsilon K \epsilon^t \quad (1)$$

où

$$\epsilon = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ k_x \\ k_y \\ 2k_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{et} \quad K = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \quad (2)$$

$\epsilon$  est le vecteur des déformations de membrane et de flexion. Les matrices  $A$ ,  $B$  et  $D$  sont respectivement les matrices de rigidité de tension, de couplage tension/flexion et de rigidité de flexion. Nous faisons l'hypothèse que dans l'état enroulé l'énergie de déformation due à la tension est négligeable (seule l'énergie de déformation de flexion intervient par l'intermédiaire de la matrice  $D$ ). Les composantes de cette matrice sont directement influencés par le type d'empilement de fibres choisi : épaisseur des plis et orientation des fibres. Afin que le ruban s'enroule suivant un cylindre parfait, le couplage entre la flexion et la torsion ne doit pas intervenir (auquel cas l'enroulement aurait une forme spiralée). Les termes  $D_{13}$  et  $D_{23}$  doivent donc être nuls. Ceci est possible par l'utilisation d'un stratifié antisymétrique : les plis en vis à vis par rapport au plan médian du stratifié sont d'orientation opposée. Ainsi il est possible d'opter pour un empilement du type  $[\alpha/\alpha]$  ou  $[0^\circ/90^\circ]$ .  $\alpha$  étant l'angle d'orientation des fibres par rapport à l'axe longitudinal du ruban. Finalement l'énergie de déformation par unité de surface de l'état enroulé s'exprime de la manière suivante :

$$U = \frac{1}{2}\beta R \left( D_{11}k_x^2 + 2D_{12}k_x \left(-\frac{1}{R}\right) + D_{22} \left(-\frac{1}{R}\right)^2 \right) \quad (3)$$

Minimiser l'énergie de déformation de l'état enroulé permet soit de minimiser l'épaisseur de thermoplastique pour un rayon d'enroulement fixé, soit de minimiser le rayon d'enroulement pour une épaisseur de thermoplastique fixée. Cette minimisation est possible par un choix judicieux du jeu de paramètres suivant :  $\beta$ ,  $R$ ,  $\alpha$ ,  $k_x$ . Les figures 4 et 5 représentent les isovaleurs de l'énergie de déformation du ruban enroulé. Les couleurs tendant vers le bleu foncé indiquent un faible niveau d'énergie. La figure 4 permet de déterminer le rayon d'enroulement optimal ( $k_x$ ) lorsque  $\alpha$  et  $R$  sont fixés (graphique de gauche) ainsi que le rayon optimal de la section ( $R$ ) lorsque  $\alpha$  et  $k_x$  sont fixés (graphique de droite).

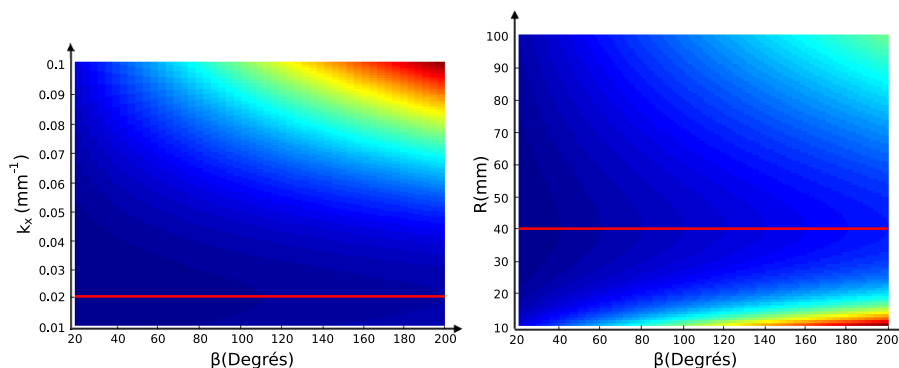


FIG. 4 – Energie de déformation de l'état enroulé

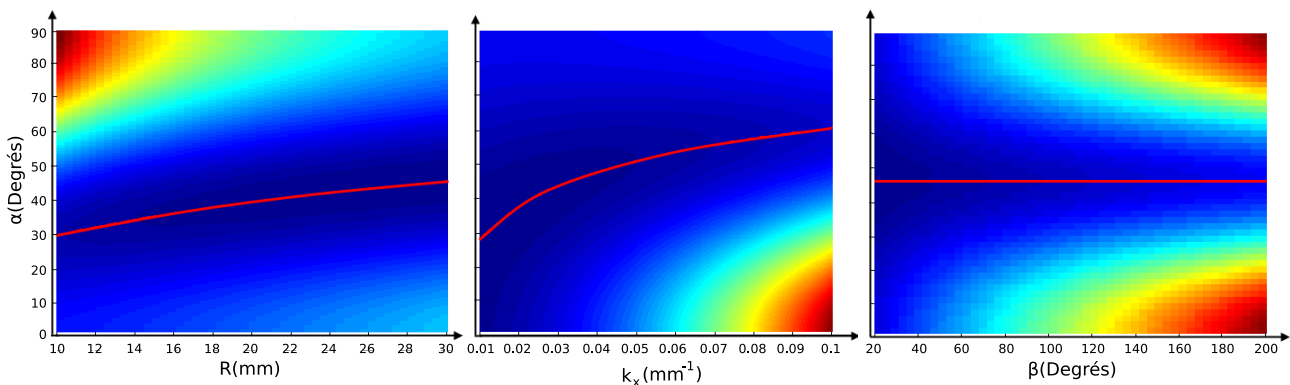


FIG. 5 – Energie de déformation de l'état enroulé

La figure 5 permet de déterminer l'orientation optimale des fibres ( $\alpha$ ) lorsque  $\beta$  et  $k_x$  sont fixés (graphique de gauche), lorsque  $\beta$  et  $R$  sont fixés (graphique du milieu) et lorsque  $k_x$  et  $R$  sont fixés (graphique de droite). Finalement, pour une orientation de fibres et un rayon de l'état enroulé fixés, il existe une géométrie de section qui minimise l'énergie de déformation. Réciproquement, pour une géométrie fixée, il existe une orientation de fibres qui minimise cette énergie.

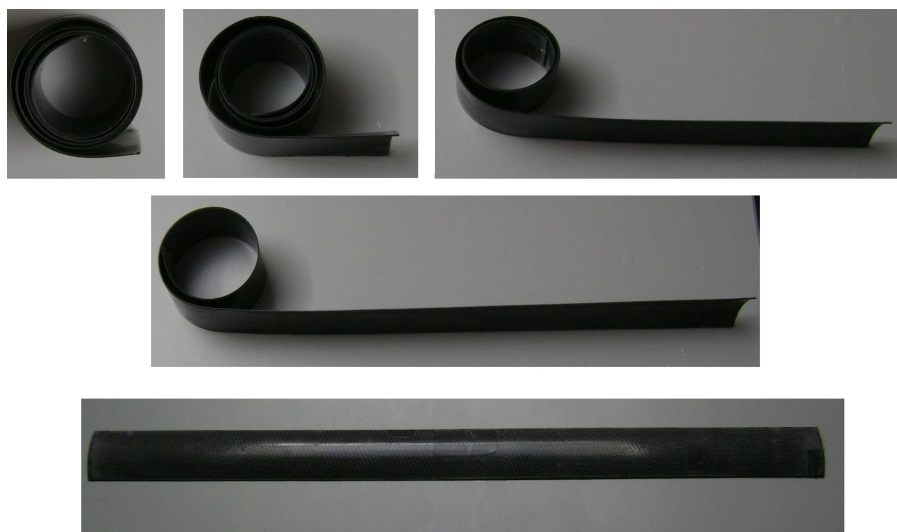


FIG. 6 – Déroulement du ruban hybride par chauffage localisé

La figure 6 illustre différentes étapes du déroulement du ruban. A l'heure actuelle, un démonstrateur est en cours de fabrication.

### 3 Stratégie de modélisation du déroulement du ruban

La modélisation du comportement du ruban à l'aide d'outils standards tels qu'ABAQUS s'avère très technique et dépend de nombreux paramètres non maîtrisables. L'objectif à terme est de proposer un modèle simplifié rendant compte des phénomènes principaux mis en jeu. La méthode consiste à remplacer le modèle tridimensionnel (ruban multicouches en 3D) par un modèle unidimensionnel en introduisant une cinématique adaptée dans la direction transversale et dans la direction de l'épaisseur. Ce modèle thermo-élastique doit rendre compte des grands déplacements et des petites déformations subis par la structure. De plus, le ruban étant très fin, l'hypothèse d'inextensibilité pour le comportement en membrane est envisagée. Dans la suite, on rappelle la stratégie d'établissement des équations du modèle pour une poutre inextensible en grands déplacements et en dynamique (modèle *Elastica*) ainsi que l'implémentation dans le logiciel COMSOL.

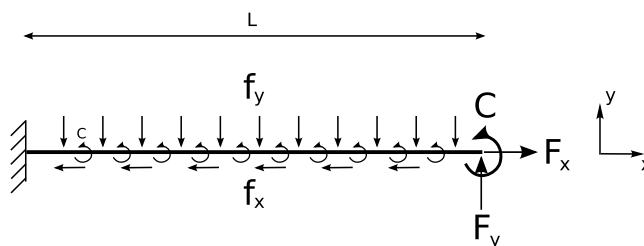


FIG. 7 – Poutre modélisée

La poutre de longueur  $L$  illustrée par la figure 7 est soumise à différents efforts ponctuels à son extrémité libre ainsi qu'à des couples et forces linéiques :  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $C$ ,  $c$ ,  $f_x$  et  $f_y$ . Chaque point de la poutre est repéré par son abscisse curviligne  $s$ . On introduit l'angle  $\theta(s)$  qui caractérise la rotation de la section de la poutre. Les conditions d'inextensibilité se traduisent par :

$$\frac{\partial x}{\partial s} = \cos \theta \quad (4)$$

$$\frac{\partial y}{\partial s} = \sin \theta \quad (5)$$

Les équations dynamiques du modèle sont obtenues par l'application du principe d'Hamilton [9] :

$$\delta H = 0 \quad (6)$$

avec

$$H = \int_{t_1}^{t_2} (T - P) dt \quad (7)$$

Où  $T$  est l'énergie cinétique :

$$T = \int_0^L \frac{1}{2} \rho S \|\dot{\vec{u}}\|^2 ds \quad (8)$$

avec  $\rho$  la masse volumique,  $S$  l'aire de la section de la poutre et  $\vec{u}(s) = (x(s) - s)\vec{x} + y(s)\vec{y}$  le vecteur déplacement. L'énergie potentielle  $P$  est définie par :

$$P = W_{def} - W_{ext} \quad (9)$$

où  $W_{def}$  représente l'énergie de déformation et  $W_{ext}$  l'énergie des efforts extérieurs :

$$W_{def} = \int_0^L \frac{1}{2} EI \left( \frac{\partial \theta}{\partial s} \right)^2 ds \quad (10)$$

$$W_{ext} = \int_0^L \vec{f} \vec{u} ds + \int_0^L c \theta ds + F u_L + C \theta_L \quad (11)$$

Avec  $E$  le module de Young,  $I$  le moment d'inertie,  $f$  les densités linéiques de forces,  $c$  la densité linéique de couple,  $F$  les forces ponctuelles et  $C$  le couple ponctuel. Finalement, il s'agit de minimiser  $H$  en respectant les contraintes (4) et (5). Pour cela des multiplicateurs de Lagrange  $\lambda_x$  et  $\lambda_y$  sont introduits. On obtient alors la fonction  $H^*$  qu'il faut minimiser sans contrainte en posant :

$$\delta H^* = 0 \quad (12)$$

Avec :

$$H^* = H + \int_{t_1}^{t_2} \left( \int_0^L \left( \left( \frac{\partial x}{\partial s} - \cos(\theta) \right) \lambda_x + \left( \frac{\partial y}{\partial s} - \sin(\theta) \right) \lambda_y \right) ds \right) dt \quad (13)$$

Après développement de l'équation (13), la détermination des conditions vérifiant l'équation (12) donne les équations du modèles valables sur l'intervalle ]0;L[ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial x}{\partial s} = \cos(\theta) \\ \frac{\partial y}{\partial s} = \sin(\theta) \\ -EI\theta'' - c + \sin(\theta)\lambda_x - \cos(\theta)\lambda_y = 0 \\ \rho S \ddot{x} - f_x - \lambda_x = 0 \\ \rho S \ddot{y} - f_y - \lambda_y = 0 \end{array} \right. \quad (14)$$

On obtient également les conditions limites :

$$\left\{ \begin{array}{l} EI\theta'(L) - C = 0 \\ \lambda_x(L) - F_x = 0 \\ \lambda_y(L) - F_y = 0 \\ x(0) = 0 \\ y(0) = 0 \\ \theta(0) = 0 \end{array} \right. \quad (15)$$

Les conditions initiales sont quant à elles définies par :

$$\left\{ \begin{array}{l} x(s, 0) = s \\ y(s, 0) = 0 \\ \dot{x}(s, 0) = 0 \\ \dot{y}(s, 0) = 0 \end{array} \right. \quad (16)$$

Résoudre ce système non linéaire faisant intervenir des dérivées spatiales et temporelles ne nécessite pas de développer un algorithme dédié. L'exploitation directe du logiciel COMSOL permet d'obtenir les solutions du problèmes. Afin de valider les équations de ce modèle, des comparaisons avec les résultats obtenus par un calcul implicite d'ABAQUS sont présentés à la figure 8.

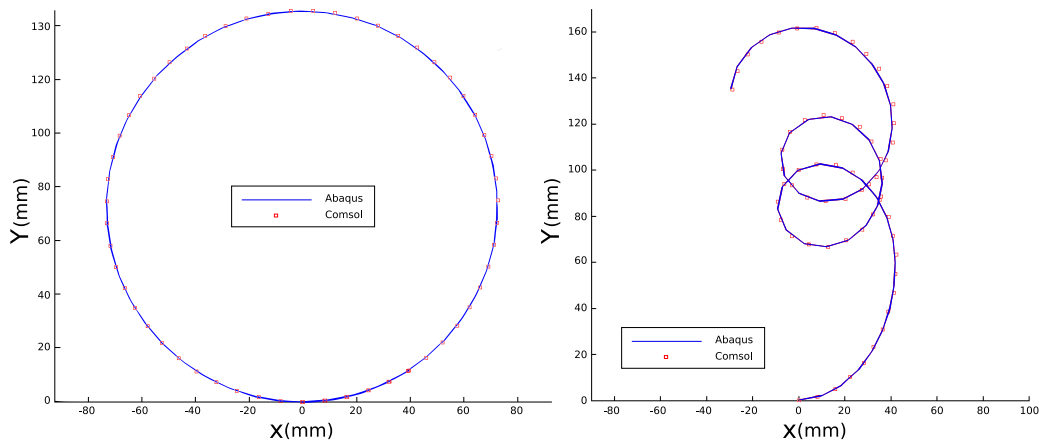


FIG. 8 – Comparaison Abaqus/Comsol

Les deux déformées sont obtenues par application d'un couple à l'extrémité libre de la poutre. Le graphique de gauche représente un essai quasi-statique (la vitesse de chargement est faible) dans lequel on retrouve le cercle attendu alors que le graphique de droite illustre un essai dynamique (la vitesse de chargement est rapide).

## 4 Conclusion

La parfaite corrélation entre les résultats fournis par Abaqus et ceux donnés par la résolution du système 14 à l'aide d'un code de calcul commercial nous ont permis de débiter la modélisation du comportement global d'un ruban. L'établissement des équations de ce modèles ainsi que leur résolution s'effectueront de manière similaire à ce qui a été présenté ci-dessus.

## Références

- [1] Arridon G. Dynamique du déploiement autonome d'un hexapode à rubans pour applications spatiales. PhD thesis, INSA Lyon, 2007.
- [2] Yee O., J.C.H. Soykasap and Pellegrino S. Carbon fibre reinforced plastic tape springs. 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference 19, 2004.
- [3] Campbell D. . a. Development of a novel, passively deployed roll-out solar array. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, 2006.
- [4] Iqbal K. and Pellegrino S. Bi-stable composites shells. AIAA, 2000.
- [5] Galletly D. and S.D. G. Bistable composite slit tubes. i. a beam model. International Journal of Solids and Structures, 2004.
- [6] Galletly D. and S.D. G. Bistable composite slit tubes. ii. a shell model. International Journal of Solids and Structures, 2004.
- [7] Guest S. and Pellegrino S. Analytical models for bistable cylindrical shells. Royal Society, 2006.
- [8] Berthelot J. Matériaux composites - comportement mécanique et analyses des structures. 4<sup>ème</sup> Édition - Tec & Doc Lavoisier, 2005.
- [9] Goldstein H. Classical mechanics (second edition). Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1980.