

Analyse dynamique du phénomène d’auto-blocage dans les charnières de type Carpentier

S. Hoffait¹, O. Brüls¹, D. Granville², F. Cugnon², G. Kerschen¹

¹ Département d’Aérospatiale et de Mécanique, Université de Liège
Chemin des Chevreuils, 1, 4000 Liège, Belgique
{Sebastien.Hoffait,O.Bruls,G.Kerschen}@ulg.ac.be

² Samtech s.a.
Rue des Chasseurs-Ardenais, 8, 4031 Liège, Belgique
{didier.granville,frederic.cugnon}@samcef.be

Résumé — Cet article concerne l’étude du comportement dynamique d’une charnière de type Carpentier utilisée lors du déploiement de structures spatiales (panneaux solaires, antennes,...). Une telle charnière permet de regrouper en un seul élément les fonctions de déploiement, de guidage et d’auto-blocage. Une analyse détaillée des phénomènes de flambement et d’hystérésis observés dans le comportement de cette charnière est réalisée à l’aide d’un modèle éléments-finis. Une explication physique du phénomène d’auto-blocage est finalement proposée.

Mots clés — structure déployable, dynamique non-linéaire, flambement, hystérésis, auto-blocage.

1 Introduction

La conception de mécanismes fiables est essentielle pour le développement de structures déployables destinées aux applications spatiales. Les charnières de type Carpentier sont composées d’un ou plusieurs ressorts à lame qui sont de fines bandes métalliques dont la section droite est courbe. Ce composant permet d’intégrer les fonctions de déploiement, de guidage et d’auto-blocage durant le déploiement d’une structure (*e.g.* un panneau solaire) à partir d’un satellite. L’étude réalisée comprend des simulations de type éléments-finis mises en oeuvre afin d’analyser la cinématique complexe et le comportement dynamique d’une charnière industrielle de ce type. Une attention toute particulière est portée sur l’analyse du phénomène d’auto-blocage qui permet la stabilisation du système dans sa position d’équilibre suite au déploiement.

Le comportement fortement non-linéaire d’un ressort à lame soumis à un couple longitudinal symétrique a fait l’objet de nombreuses études par le passé. Une relation analytique moment/angle de rotation a été proposé par Wüst [11], Rimrott [5], Calladine [1] et Mansfield [4]. Plus récemment, des modélisation par éléments-finis ont été réalisées afin d’étudier le comportement d’un tel ressort avec une précision accrue (voir Seffen [7] et Walker [9]).

Plusieurs types de charnières utilisant différents arrangements de ressorts à lames ont été proposés et testés pour le déploiement de panneaux solaires, d’antennes et de bras [10, 7]. Le centre de recherche du CNES (Centre National d’Études Spatiales) et la société 01dB-Metravib (groupe Areva) ont développé la charnière dite MAEVA (FIG.1 (a)) utilisant un arrangement particulier de trois ressorts à lame encastrés entre deux bases. La lame centrale est disposée en sens opposé des deux autres afin d’accroître la stabilité en torsion lorsque la charnière se trouve en configuration

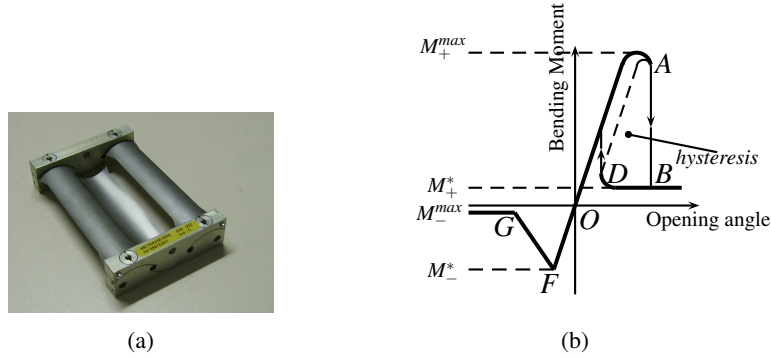


Figure 1 – Charnière Maeva (a) - Relation $M(\theta)$ schématique (Seffen [7]) (b)

déployée. Sur base de tests expérimentaux (tests en laboratoire et tests en condition de micro-gravité) et également sur base de simulations numériques, Givois *et al.* [3, 8] ont démontré la possibilité d'effectuer une opération de déploiement dans de bonnes conditions à l'aide de cette charnière. Cependant, à la connaissance des auteurs, aucune explication physique acceptable, basée sur une simulation numérique, du phénomène d'auto-blocage de la charnière n'a été trouvée dans la littérature scientifique. Dans cet article, nous proposons une explication physique de ce phénomène.

Cet article est organisé comme suit. La Section 2 est consacrée à l'analyse quasi-statique d'un ressort à lame simple et d'une charnière à trois lames. Le modèle éléments-finis proposé est validé par comparaison avec des résultats analytiques, expérimentaux et numériques trouvés dans la littérature. Nous montrerons que notre modèle est capable de reproduire les phénomènes de flambement et d'hystérésis présents dans le système. Le comportement dynamique d'une charnière à trois lames est étudié dans la Section 3 à l'aide de la simulation du déploiement d'une structure. Une explication du phénomène d'auto-blocage est alors proposée. Finalement, nous concluons par quelques remarques dans la Section 4.

2 Analyse quasi-statique

Cette section vise à la caractérisation du comportement statique, c'est à dire de la relation entre le moment de flexion M et l'angle de rotation θ , d'une lame simple et d'une charnière à trois lames. La principale difficulté lors d'une telle étude est liée au caractère fortement non-linéaire d'un tel système.

La littérature nous fournit les conclusions d'études analytiques, expérimentales et numériques d'un ressort à lame et d'une charnière à trois lames [7, 4, 3, 8].

- Mansfield [4] a proposé une relation $M(\theta)$ théorique d'un lame simple soumise à flexion.
- Il est observé expérimentalement que lors d'un tel chargement, lorsqu'une certaine valeur critique de la sollicitation est atteinte, un phénomène de flambement se produit conduisant à la formation d'un pli au centre de cette lame. A cet instant, la valeur du moment de flexion tend vers une valeur constante. Calladine [1] fournit une expression analytique de la valeur de ces moments résiduels.
- Des observations expérimentales menées par Seffen [7] ont montré le caractère non-linéaire, non-symétrique de la relation $M(\theta)$ (Fig.1 (b)). Nous pouvons remarquer la présence d'un point limite et d'un hystérésis lors d'un cycle charge-décharge.

2.1 Modèle éléments-finis d'un simple ressort à lame

L'ensemble des études éléments-finis a été réalisé à l'aide du module non-linéaire MECANO du logiciel SAMCEF [6]. Les lames étudiées sont modélisées par un ensemble d'éléments de

coque de type *Mindlin*.

L'étude de la lame simple a été réalisée sur une demi-lame grâce à la symétrie du comportement attendu. Un noeud de référence est disposé au centroïde de chaque extrémité de la demi-lame afin de faciliter la définition des conditions aux limites. Le mouvement est piloté par l'imposition d'un angle de rotation aux noeuds de référence.

Comme décrit précédemment, le comportement attendu est caractérisé par la présence d'un point limite lorsque le flambement de la lame se produit. Deux méthodes permettant de traiter ce point limite sont disponibles dans le logiciel SAMCEF : une méthode de continuation (Riks) et une étude pseudo-dynamique impliquant un amortissement numérique important (schéma de Newmark dans lequel le rayon spectral infini est fixé à 0 de telle sorte qu'une oscillation haute fréquence est filtrée en un seul pas de temps). Nous vérifions la stabilité du mode de déformation suivi après le flambement par la rapide décroissance de l'énergie cinétique vers zéro. Les deux méthodes ont été appliquées et les résultats obtenus ont été comparés aux résultats analytiques et expérimentaux décrits précédemment.

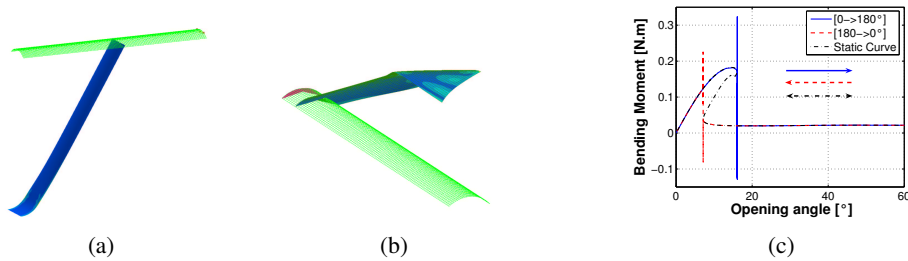


Figure 2 – Configurations résultantes pour les deux sens de chargement (a et b) - Courbe $M(\theta)$ suite à un chargement positif (c)

Les configurations prises par la lame pour les deux sens de chargement (moment positif et négatif) sont présentées aux figures 2 (a) et (b). La création d'un pli dans la partie centrale est observée pour le chargement positif, ce qui correspond aux observations décrites par Seffen. Les résultats obtenus pour le chargement négatif montrent la présence d'un mode de déformation couplé de flexion et de torsion. L'ensemble des caractéristiques du comportement observé sont en accord avec les prédictions énoncées par Seffen dans son article.

La courbe $M(\theta)$ obtenue pour le sens de chargement positif est présentée à la figure 2 (c). La méthode de continuation permet de déterminer la courbe complète en une seule analyse, y compris la partie instable. L'analyse pseudo-dynamique au contraire se limite à la partie stable durant toute la simulation. Les simulations numériques effectuées ont permis de reproduire le phénomène d'hystérésis prédit par Seffen. L'aire sous-tendue par les deux chemins différents représente la quantité d'énergie dissipée durant un cycle charge/décharge.

Les valeurs caractéristiques obtenues à l'aide des simulations numériques ont été comparées aux résultats analytiques et ont montré des valeurs numériques proches.

2.2 Modèle éléments-finis d'une charnière à trois lames de type Carpentier

Suite à des études expérimentales et numériques, Givois *et al.* [3, 8] fournissent la valeur minimale pour le *couple de retenue* (4.5 Nm) et pour le *couple d'entraînement* (0.15 Nm). Le *couple de retenue* est défini comme étant la valeur maximale dans la relation $M(\theta)$. Cette valeur représente le couple à partir duquel la charnière est débloquée. Le *couple d'entraînement* est quant à lui défini par la valeur du couple résiduel après le flambement de la charnière.

Une simulation quasi-statique de l'opération de pliage (à l'aide d'un schéma d'intégration de Newmark fortement amorti) est réalisée. Ce calcul a pour but la définition de la configuration initiale afin d'initialiser la simulation dynamique du déploiement d'une structure. Cette étude

quasi-statique nous a également permis de juger de la cohérence du modèle éléments-finis réalisé en comparant les résultats obtenus avec ceux annoncés [3, 8].

Les simulations réalisées ont montré des résultats compris dans les marges annoncées. Le couple de retenue calculé est de 6.67 Nm et le couple minimum d'entraînement est de 0.16 Nm . Les figures 3 (a) et (b) montrent les deux configurations initiales conventionnellement utilisées.



Figure 3 – Configuration repliée de la charnière trois lames

3 Analyses dynamiques

En vue d'analyser le comportement complexe d'une charnière à trois lames durant le déploiement d'une structure, un modèle complet comprenant les trois lames et les deux bases rigides est développé. Lors de la simulation de déploiement, une des bases est encastrée tandis qu'une masse concentrée est fixée à une certaine distance de l'autre base afin de simuler la présence d'un panneau solaire.

La configuration initiale pliée n'étant pas connue *a priori*, la simulation dynamique est réalisée en deux étapes. La première consiste en l'étude quasi-statique de l'opération de pliage de la configuration déployée connue à la configuration pliée recherchée. Durant la seconde étape, le système est relâché et une simulation du déploiement est réalisée à l'aide d'un schéma d'intégration α -généralisé. Durant cette seconde phase, une certaine quantité de dissipation numérique est requise afin d'éliminer les modes non physiques de haute fréquence inévitablement introduit par la discrétisation éléments-finis. Le schéma de *Chung-Hulbert* [2] utilisé permet d'introduire de l'amortissement numérique dans les hautes fréquences tout en maintenant une précision du second ordre dans les basses fréquences, contrairement au schéma de Newmark amorti (premier ordre).

Comme mentionné à la Section 2.2, nous observons l'apparition de modes de torsion lorsqu'une lame simple est soumise à un moment de flexion de sens négatif. Vu la disposition des trois lames (FIG. 1), un tel mode de torsion est attendu lors de chaque flambement de la charnière. Deux simulations différentes ont été menées afin d'étudier l'impact de ces modes de torsion sur le comportement dynamique global : la première en bloquant l'apparition de ces modes particuliers et la seconde en autorisant leur apparition. La première simulation qui est proche d'une situation dans laquelle deux charnières sont utilisées pour déployer une structure nous permet une meilleure visualisation du phénomène de blocage. La seconde nous permet d'analyser la cinématique 3D de la charnière libre de tout blocage artificiel.

3.1 Modes de torsion bloqués

Les résultats obtenus nous montrent un blocage de la charnière en configuration déployée après 16 s (FIG.4). Sur la courbe $M(\theta)$, nous observons l'influence de l'hystérésis durant les oscillations de la masse concentrée. A la suite à chaque bifurcation, une quantité d'énergie est transférée vers les modes de déformations de hautes fréquences. Numériquement, ces oscillations de hautes fréquences sont dissipées par le schéma d'intégration et l'énergie du système décroît jusqu'au blocage final de la charnière. Ces observations sont également visibles sur la courbe d'évolution

de l'énergie. En effet, lors de chaque flambement, une perte d'énergie approximativement égale à l'énergie impliquée dans l'hystérésis est observée.

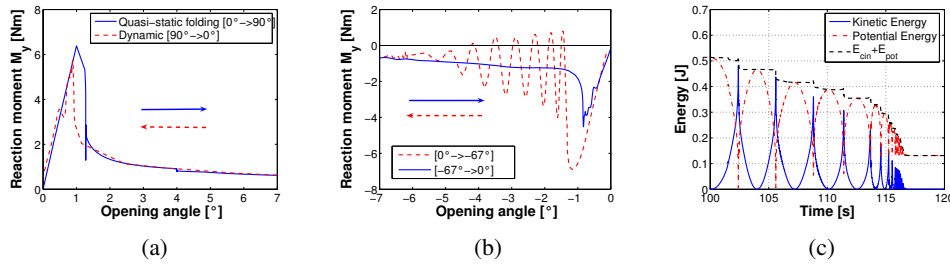


Figure 4 – Mode de torsion bloqué : courbe $M(\theta)$ (a) et (b) - Evolution de l'énergie (c)

3.2 Modes de torsion libres

Le blocage de la charnière est observé après un temps plus long que lorsque les modes de torsion sont bloqués. En observant les résultats obtenus (non présentés dans cet article), nous concluons que lorsqu'un angle de torsion résiduel est présent lors des phénomènes de flambement, l'hystérésis disparaît. Cette observation justifie la durée plus longue avant le blocage final.

Nous remarquons également l'influence significative des modes de torsion sur la cinématique 3D rendant impossible la modélisation de la charnière par des outils de modélisation classique disponible dans les logiciels de type MBS.

3.3 Dissipation numérique vs. physique : discussion

Dans le système physique, l'énergie dissipée par l'hystérésis est dans un premier temps transférée vers les modes de hautes fréquences et est ensuite dissipée par l'amortissement structural (qui n'est pas modélisé dans nos simulations). Au contraire, dans nos études éléments-finis, la dissipation d'énergie dans les hautes fréquences est uniquement due à l'amortissement numérique. Vu que l'amortissement numérique n'est pas lié à l'amortissement physique, le modèle proposé pourrait être jugé comme étant non représentatif de la réalité et il semblerait qu'une description complète de l'amortissement structural devrait être introduite dans le modèle.

Cependant, deux limitations importantes rendent une telle description pratiquement impossible. Premièrement, un maillage fortement raffiné serait requis afin de capturer correctement les modes de hautes fréquences ; ce qui entraînerait inévitablement un important surcoût de temps de calcul. Deuxièmement, une estimation correcte de l'amortissement structural dans le domaine des hautes fréquences est un problème compliqué. En effet, des ressources informatiques importantes et des données mécaniques additionnelles seraient requises en vue de modéliser correctement cet amortissement structural.

De plus, nous avons la conviction que le modèle proposé avec de l'amortissement numérique permet, raisonnablement, de tirer des conclusions intéressantes. En effet, notre intérêt majeur se situe dans l'étude du mouvement dans le domaine des basses fréquences et des grandes amplitudes, qui n'est que très peu affecté par la dissipation numérique. Les déformations locales hautes fréquences dans la charnière ont un intérêt moins marqué. Le fait important est que l'énergie dans les modes de hautes fréquences est rapidement dissipée, le mécanisme de dissipation n'étant pas d'une importance primordiale.

4 Conclusions

Cet article présente l'analyse cinématique et dynamique d'une charnière de type Carpentier. Une attention toute particulière est portée sur le phénomène d'auto-blocage qui permet une stabilisation rapide du système dans sa position d'équilibre suite à un déploiement.

Le modèle éléments-finis proposé a été validé à l'aide d'une solution analytique qui est disponible pour une lame simple. Les phénomènes non-linéaires complexes tel que le flambement et l'hystérésis ont été efficacement reproduits par le modèle numérique.

Le déploiement d'une charnière à trois lames a été étudié. Nous avons montré que le phénomène d'hystérésis est à l'origine de l'auto-blocage. La cinématique de la charnière possède un caractère fortement tridimensionnel rendant impossible la modélisation de l'articulation comme une simple charnière.

Dans le cas du déploiement de panneaux solaires, afin de réduire le risque de collisions entre la structure et le satellite, une configuration basée sur deux charnières pourrait être recommandée. En effet, dans une telle configuration, la torsion est fortement limitée permettant de réduire les oscillations avant le blocage complet du système.

Références

- [1] C.R. Calladine. The theory of thin shell structures. *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers*, 202 :1–9, 1988.
- [2] J. Chung and G.M. Hulbert. A time integration algorithm for structural dynamics with improved numerical dissipation : The generalized- α method. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 60 :371–375, 1993.
- [3] D. Givois, J. Sicre, and T. Mazoyer. A low cost hinge for appendices deployment : design, test and application, 9th European Space Mechanisms & Tribology Symposium Liège, 19-21, september 2001.
- [4] E.H. Mansfield. Large-deflexion torsion and flexure of initially curved strips. *Proceedings of the Royal Society of London, A* 334 :279–298, 1973.
- [5] F.P.J. Rimrott. Querschnittsverformung bei torsion offener profile. *Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik*, 50 :775–778, 1970.
- [6] Samtech S.A. Samcef user manual. *Version 12.0*, 2007.
- [7] K.A. Seffen. *Deployment of a Rigid Panel by Tape-Springs*. PhD thesis, University of Cambridge, 1997.
- [8] J. Sicre, D. Givois, and A. Emerit. Application of "MAEVA" hinge to myriade microsatellites deployments needs, 11th European Space Mechanisms and Tribology Symposium/ESMATS 2005 - ESA/CNES -Lucerne (Suisse) - 21-23, September 2005.
- [9] S.J.I. Walker and G.S. Aglietti. Study of the dynamics of three-dimensional tape spring folds. *AIAA Journal of Applied Mechanics*, 42(4) :850–856, 2004.
- [10] A.M. Watt and S. Pellegrino. Tape-spring rolling hinges. In *Proceedings of the 36th Aerospace Mechanisms Symposium, Glenn Research Center*, 2002.
- [11] W. Wüst. Einige anwendungen der theorie der zylinderschale. *Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik*, 34 :444–454, 1954.