

Optimisation topologique de structures mécaniques bioinspirées : application au morphing passif des appendices de navires

M. SPAHIC^a, A. LE DUIGOU^b, N. DI CESARE^c, V. KERYVIN^d

a. Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56100 Lorient, France

malik.spahic@univ-ubs.fr

b. antoine.le-duigou@univ-ubs.fr

c. noelie.di-cesare@univ-ubs.fr

d. Vincent.keryvin@univ-ubs.fr

Résumé :

Dans le but de rendre les hydrofoils des appendices de navires adaptables passivement, nous avons décidé d'étudier les systèmes de morphing utilisés dans l'aéronautique. Un de ces systèmes utilise des métamatériaux auxétiques pour réaliser un morphing passif. Dans le but d'adapter ce système de l'aéronautique à l'hydraulique, nous allons, dans un premier temps, présenter une étude bibliographique du morphing dans l'aéronautique et des métamatériaux auxétiques. Suite à cela, nous allons parler des expériences de flexions de poutres en métamatériaux qui vont nous permettre de mieux comprendre les mécanismes internes mis en avant lors de la flexion de métamatériaux due au cambrement de l'hydrofoil.

Mots clefs : Métamatériaux ; Auxétiques ; Photoélasticimétrie ; Hydrofoil ; Simulation numérique

1 Introduction

Dans le but de permettre le cambrage et le décambrage des hydrofoils utilisés dans les appendices de navires, la clé est de pouvoir comprendre le fonctionnement des différents verrous de systèmes permettant le morphing et de comprendre en quoi les métamatériaux auxétiques vont permettre à l'hydrofoil de se cambrer ou se décambrer.

C'est pourquoi, nous allons, dans un premier temps, étudier différents systèmes de morphing utilisés dans l'aéronautique. Ainsi, nous pourrions dégager les caractéristiques que doivent obligatoirement remplir les technologies permettant le morphing.

Dans un deuxième paragraphe, nous allons lister les différents types de métamatériaux auxétiques existants et leurs différents mécanismes de déformations. Cela nous permettra de mieux comprendre en quoi ces matériaux vont permettre à l'aile de se cambrer.

2 Le morphing

Le morphing, du grec « morphos » qui veut dire forme, fait référence à la capacité qu'a un objet à transformer sa forme ou sa structure. Dans le domaine de l'aéronautique, l'idée est d'adapter la forme

de l'aile d'avion dans le but d'obtenir de meilleures performances de vol en fonction des conditions de vol : améliorer le contrôle en vol, ou encore la distance de vol [1].

Pour obtenir les effets escomptés, nous allons étudier l'airfoil morphing.

L'airfoil morphing peut se décomposer en deux sous-catégories :

-le leading-edge morphing

-le trailing-edge morphing [1]

Ces différentes catégories se réfèrent à la position sur laquelle le morphing va agir au niveau de l'airfoil (voir figure 1).

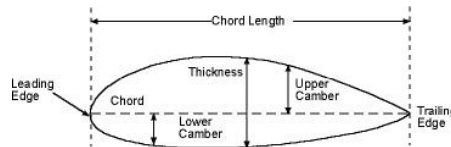


Figure 1: Paramètres géométriques d'un airfoil [2]

2.1 Leading-edge morphing

Le leading-edge morphing consiste à pouvoir mouvoir l'avant de l'airfoil de bas en haut de façon à modifier le coefficient de portance C_L de l'aile d'avion. Cette technologie vise à remplacer les « slats » utilisés à l'avant de l'avion (voir figure 2). Le plus gros projet visant à développer les leading-edges intelligents est un projet européen appelé SADE (Smart High Lift Devices for Next Generation Wings) [3], qui est le fruit d'une collaboration entre Airbus Group Innovations et la commission européenne.

Dans ce projet un leading-edge intelligent a été développé en combinant des peaux anisotropes avec des mécanismes cinématiques permettant la flexion de ce dernier [3]. Des actionneurs ont également été ajoutés dans le but de pouvoir activer les mécanismes de morphing lorsque c'est possible (voir figure 3).

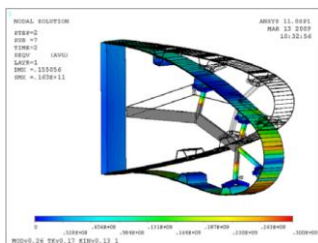


Figure 3 : Mécanismes permettant le cambrement du leading-edge [3]



Figure 2 : Slats présents dans une aile d'avion [4]

2.2 Trailing-edge morphing

Le Trailing-edge morphing a pour but de réussir à avoir un cambrement différentiel sans trous dans le sens de la corde de l'airfoil et dans le sens de l'envergure de l'aile [1].

Pour arriver à cet objectif, la plupart des technologies observées ont le même but : remplacer l'ossature rigide de l'airfoil actuel, ossature aussi appelée « rib », par un rib plus souple. Les deux pionniers dans ce domaine sont le « rib-finger concept » [5] et le « belt-rib concept » [6].

Le finger-rib concept consiste à remplacer le rib rigide de l'airfoil de base par des plaques articulées par des cylindres (figure 4). Le décambrement ou le cambrement de l'airfoil se fait grâce à un actionneur qui modifie la position du premier élément plaque, ce changement de position est ensuite transmis dans tout l'airfoil grâce aux articulations [5].

Le belt-rib concept consiste à changer le rib rigide en un rib creux dans lequel on va venir attacher des rayons à la gaine creuse. Dans le but de pouvoir avoir un mouvement de l'airfoil, les rayons sont liés à la structure creuse par des charnières semi-rigides permettant la rotation des rayons et donc le

cambrément de l'airfoil [6]. Le cambrément se fait à l'aide d'actionneurs permettant de faire tourner les rayons de l'airfoil [6].

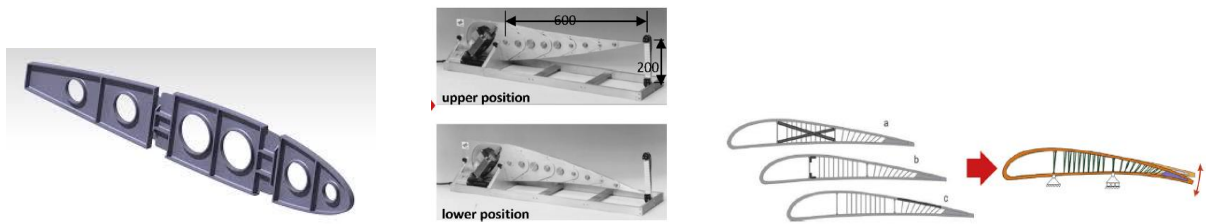


Figure 4 : Photo d'un rib rigide d'aile d'avion [7] (à gauche). Photo d'un rib avec des plaques articulées [5](au milieu). Photo d'un belt-rib [6](à droite)

Jusqu'à maintenant, la plupart des systèmes de morphing observés ont combiné 2 choses : Une structure interne souple et des systèmes d'actionneurs. Or, les systèmes d'actionneurs utilisés ont tendances à rendre les systèmes complexes et plus lourds. C'est pourquoi, des chercheurs ont tenté de remplacer ces systèmes de morphing par actionnements en systèmes de morphing passifs. C'est notamment le cas de Fabrizio Scarpa [8] et de Spadoni et Ruzzene [9] et [10] qui ont introduit un métamatériau auxétique : La structure chirale alvéolaire.

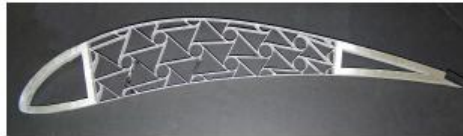


Figure 5 : Airfoil à structure chirale alvéolaire [10]

Fabrizio Scarpa a été le premier chercheur à avoir l'idée d'utiliser un matériau cellulaire comme la structure chirale alvéolaire dans l'airfoil [8]. L'idée d'utiliser cette structure dans un airfoil est lié à son mécanisme de déformation unique lui permettant de faire de grands déplacements tout en restant en petite déformation [8] (plus de détails dans la partie 3.2). Grâce à ce mécanisme, l'airfoil reviens dans sa position normale suite à son décambrément (voir figure 6). Le fonctionnement de ce mécanisme de morphing est simple, à partir d'une certaine vitesse de déplacement dans l'air, la pression du fluide est assez importante pour venir activer le mécanisme de déformation de la structure chirale alvéolaire ce qui provoque un décambrément de l'airfoil en question.

Spadoni et Ruzzene ont poursuivi les travaux de Scarpa, notamment en étudiant l'influence de la géométrie des cellules chirales alvéolaires sur les performances de morphing [9]. Ils ont également réalisé des prototypes réels de ceux-ci grâce à de la découpe jet d'eau (figure 5) et vérifié si l'airfoil restait toujours en élasticité [10].

Des chercheurs coréens ont montré numériquement que d'autres structures alvéolaires, comme la structure alvéolaire classique, permettent un morphing de l'airfoil [11].

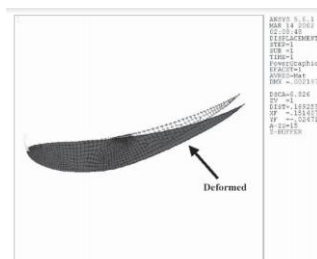


Figure 6 : Simulation EF de la déformation d'un airfoil après le dernier pas de temps

Dans ce nouveau système de morphing, l'actionnement n'est plus électronique mais structurel. L'élément d'actionnement devient la vitesse de l'airfoil dans l'air, qui à partir d'un certain seuil exerce assez de pression sur l'airfoil pour l'obliger à décambrer. Ici, les principales problématiques vont concerner les valeurs de ces vitesses seuils, celles-ci sont dépendantes de la géométrie des structures cellulaires utilisées dans l'airfoil et de leur mécanisme de déformation. Ce sont ces deux

problématiques qu'il va nous falloir gérer pour l'hydrofoil 2D. Dans la partie qui va suivre, nous allons essayer de voir les différents types de métamatériaux auxétiques et les mécanismes de déformation qui régissent leur comportement.

3 Les métamatériaux auxétiques

Les métamatériaux sont des matériaux artificiellement architecturés qui possèdent des propriétés exceptionnelles. Les premiers métamatériaux sont apparus au XIX^{ème} siècle, ils se déclinent sous différentes formes : matériaux à élasticité négative, matériaux à compressibilité négative, matériaux à coefficient de poisson nul...[12] Les matériaux qui vont nous intéresser sont dits auxétiques, le mot auxétique a été introduit par Evans en 1991 et vient du grec « auxeticos » soit « ce qui tend à augmenter ». Ce mot désigne donc les matériaux possédant un coefficient de poisson ν négatif [12].

Dans notre cas, deux grandes familles de métamatériaux auxétiques vont nous intéresser : les métamatériaux réentrants et chiraux.

3.1 Les métamatériaux auxétiques réentrants

Les métamatériaux réentrants sont des métamatériaux ayant une géométrie particulière « en forme de flèche » leur permettant de plus facilement se déployer lorsqu'ils sont soumis à un effort de traction dans n'importe quelle direction (voir figure 7). Ce genre de métamatériau est anisotrope, et possède des coefficients de rigidité au cisaillement G_{zx} et G_{zy} très élevés [12]. Le coefficient de Poisson de ce genre de cellule est plus petit que -1 et vaut -1,7 environ [13].

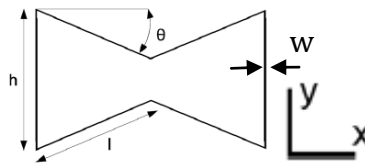


Figure 7 : Géométrie de la cellule hexagonale rééminente. h : longueur ligament vertical, l : longueur ligament diagonal, θ : Angle entre les ligaments de la cellule et w : épaisseur des murs [12]

Les propriétés mécaniques de ce genre de matériau vont être liées très fortement aux paramètres géométriques. L'épaisseur des ligaments w va notamment avoir un impact très important sur les mécanismes de déformation [12].

Lorsque $w_{\text{vertical}} \leq w_{\text{diagonal}}$, le mécanisme dominant est la flexion des ligaments verticaux des cellules qui commencent même à flamber lorsque un seuil de déformation critique est atteint [14].

Lorsque $w_{\text{vertical}} \ll w_{\text{diagonal}}$ et que la direction de sollicitation se fait suivant y , l'élongation des murs verticaux domine la déformation [14].

L'angle θ va lui influencer fortement la rigidité globale des cellules rééminentes. Le ratio h/l va lui plutôt gouverner la valeur du coefficient de poisson de la cellule rééminente [12].

La géométrie de la cellule a un impact très fort sur la valeur du coefficient de poisson, comme le montre Remillat [15] dans son étude où il arrondi les angles de la cellule pour modifier sa rigidité globale et son auxéticité.

Grâce à l'optimisation topologiques, de nouveaux motifs ont été trouvés gardant cette « forme de flèche » possédant les mêmes mécanismes de déformation que notre cellule rééminente [12], en figure 8, quelques exemples sont présentés :

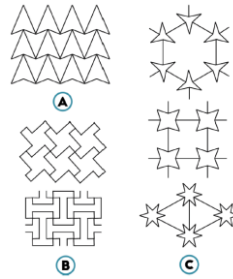


Figure 8 : Quelques formes de cellules réentrantes [12]

3.2 Les métamatériaux auxétiques chiraux

Les métamatériaux auxétiques chiraux sont des métamatériaux auxétiques développés par Lakes en 1997 [16], ces métamatériaux sont uniques de par leur géométrie unique (figure 9) et de par leur mécanisme de déformation unique également.

Ce métamatériau possède également des propriétés mécaniques très intéressantes, il est notamment isotrope transverse (voir équation 1) et possède un coefficient de poisson théorique $\nu_{\text{théorique}} = -1$ [16].

$$E_x \nu_{xy} = E_y \nu_{yx} \text{ avec } E_x = E_y \text{ et } \nu_{xy} = \nu_{yx} \quad (1)$$

Cette valeur de coefficient de poisson implique une rigidité théorique de cisaillement infinie dans le plan. Ces propriétés mécaniques macroscopiques découlent directement de la géométrie de la structure chirale alvéolaire et de son mécanisme de déformation [16].

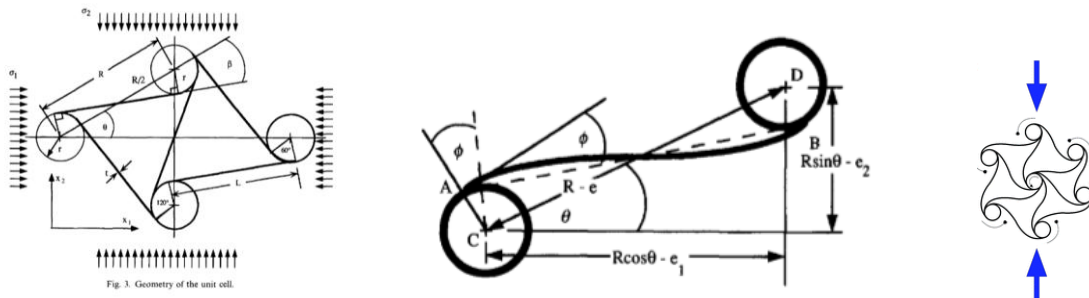


Figure 9 : Cellule unitaire de la structure chirale alvéolaire [16] (à droite). Mécanisme de déformation des ligaments sous sollicitations [16] (au centre). Ligaments qui s'enroulent autour des nœuds de la structure en compression

La géométrie de la structure chirale alvéolaire est composée de nœuds de rayon r et de ligaments de longueur L . Les ligaments doivent toujours être tangents aux nœuds, qui eux-mêmes doivent être inclinés d'un angle de $\theta = 30^\circ$. Les autres paramètres géométriques composant la cellule chirale alvéolaire sont l'épaisseur de cellule t [8].

Ces contraintes géométriques fortes font que lors de la mise en compression de la structure alvéolaire, les ligaments de la structure s'enroulent autour des nœuds (voir figure 9 centre et droite) tout en restant tangents aux nœuds. L'enroulement des ligaments autour des nœuds provoque une déformation en flexion de ceux-ci. Cette déformation reste dans le domaine élastique jusqu'à 25% de déflexion.

Parmi toutes les propriétés des métamatériaux auxétiques exposées ici, les plus intéressantes restent leurs mécanismes de déformations uniques permettant d'avoir de grands déplacements tout en restant en déformation élastique. C'est notamment ces propriétés qui vont permettre à notre hydrofoil de se décambler et de revenir dans sa position initiale lorsque le bateau sera statique.

Or, lorsque l'hydrofoil va se décambler, notre structure alvéolaire va être sollicitée en flexion et non en traction et en compression. Quasiment toutes les références bibliographiques étudiées jusqu'ici présentent les propriétés des métamatériaux auxétiques en traction et en compression, mais pas en

flexion. Les mécanismes décrits ci-dessus sont-ils toujours vrais en flexion ? Seuls Li et Wang [13] ont exploré les propriétés en flexion des structures réentrantantes dans le plan. Nous voulons donc mener des expériences plus poussées sur des structures chirales alvéolaires et étudier les mécanismes présents lors de la flexion de poutres.

Notre approche pour caractériser le comportement de ces poutres va se faire en deux étapes : premièrement une vague de simulation numérique de flexion de poutres 3 points avec différents motifs va nous permettre de visualiser les mécanismes de déformations mis en jeu. Puis, nous allons vérifier ces résultats de simulations avec des résultats expérimentaux en fabriquant des poutres en métamatériaux biréfringents et en réalisant des tests de flexion 3 points dessus tout en utilisant la photoélasticimétrie pour visualiser les zones contraintes.

Références

- [1] **Daochun, L., Shiwei, Z. et Al.** A review of modelling and analysis of morphing wings. *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 100, 2018, p. 42-62.
- [2] **DAVID DARLING.** *Chord (of an airfoil)* [en ligne]. Disponible sur : http://www.daviddarling.info/encyclopedia/C/chord_airfoil.html (Consulté le 18 avril 2019).
- [3] **Monner, H. P., Kintscher M., Lorkowski T., Storm S.** Design of a Smart Droop Nose as Leading Edge High Lift System for Transportation Aircrafts. *50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 4 - 7 May 2009, Palm Springs, California*
- [4] **STACKEXCHANGE AVIATION.** *What is the difference between flaps and slats* [en ligne]. (modifié le 14 février 2014). Disponible sur : <https://aviation.stackexchange.com/questions/1734/what-is-the-difference-between-flaps-and-slats> (Consulté le 18 avril 2019).
- [5] **Monner, H.P.** Realization of an optimized wing camber by using formvariable flap structures. *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 5, 2001, p. 445-455
- [6] **Campanile, L.F., Sachau, D.** The Belt-Rib Concept : A Structronic approach to Variable Camber. *Journal Of Intelligent Material Systems And Structures*, Vol. 11, March 2000, p.215-224
- [7] **GRABCAD.** *Aircraft Rib* [en ligne]. (modifié en septembre 2011). Disponible sur : <https://grabcad.com/library/aircraft-rib> (consulté le 18 avril 2019).
- [8] **Bornengo, D., Scarpa, F., Remillat, C.** Evaluation of Hexagonal Chiral Structure for Morphing Airfoil Concept. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2005, p.219:185
- [9] **Spadoni, A., Ruzzene, M.** Static aeroelastic behavior of chiral core airfoils. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 11, 2007, p.1067-1075.
- [10] **Spadoni, A., Ruzzene, M.** Numerical and experimental analysis of the static compliance of chiral truss-core airfoils. *J. of Mechanics of Materials and Structures*, Vol. 2 N°5, 2007, p.965-981.
- [11] **Hyeonu, H., Jaehyung, J., Doo-Man K.** Compliant cellular structures : Application to a passive morphing airfoil. *Composite Structures*, 2013, p. 560-569.
- [12] **Kolken, H.M.A., Zadpoor, A. A.** Auxetic mechanical metamaterials. *Royal Society of Chemistry Adv.*, vol. 7, 2017, p. 5111-5129.
- [13] **Li, T., Wang, L.** Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials. *Composite Structures*, vol. 175, 2017, p. 46-57.
- [14] **Whitty, J., Nazare, F., Alderson, A.** Modelling the Effects of Density Variations on the In-Plane Poisson's Ratios and Young's Moduli of Periodic Conventional and Re-Entrant Honeycombs – Part 1: Rib Thickness Variations. *Cell. Polym.*, 2002, 21(2), P. 69–98.
- [15] **Bezazi, A., Scarpa, F., Remillat, C.** A novel centrosymmetric honeycomb composite structure. *Composite Structures*, vol. 71, 2005, p. 356-364.
- [16] **Prall, D., Lakes, R.S.** Properties of a chiral honeycomb with a poisson's ratio of -1. *Int. J. Mec. Sci.*, vol. 39, No. 3, 1997, p. 305-314.