

Fibres végétales, bioinspiration et structures déployables

Natural fibres, bioinspiration and deployables structures

Antoine le Duigou,

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

Antoine.Le-duigou@univ-ubs.fr

Résumé

Depuis une quinzaine d'années, les possibilités d'application des fibres végétales sont étudiées pour le renforcement de matériaux composites. Ces biocomposites souffrent d'une sensibilité à l'humidité qui se traduit par une réduction de leurs propriétés mécaniques.

Présentés dans le cadre du Prix Daniel Valentin, ces travaux proposent une autre vision que celle présentée actuellement par la littérature avec particulièrement la volonté de profiter de cette sensibilité à l'humidité plutôt que de la subir. Une démarche de bioinspiration est alors menée en s'inspirant de la connaissance de structures biologiques afin de tirer avantage des propriétés hygro-élastiques des fibres végétales. C'est sur ce principe qu'une nouvelle génération de composites, les (bio)composites hygromorphes sont développés inspirés des pommes de pin.

L'objectif de cet article est dans une première section de présenter et de détailler la démarche de bioinspiration. La deuxième section présentera le fonctionnement du modèle biologique sélectionné, la pomme de pin. La troisième section évoquera les biocomposites hygromorphes, à travers une définition de leur fonctionnalité et une synthèse de leurs performances. La quatrième partie illustrera ces concepts par des prototypes de structures déployables et discutera les applications envisagées. La cinquième et dernière partie évoquera les verrous actuels et opportunités à prendre.

Abstract

For the past fifteen years, the possibilities of application of vegetable fibres have been studied for the reinforcement of composite materials. These biocomposites suffer from a sensitivity to moisture that results in a reduction in their mechanical properties.

Presented as part of the Daniel Valentin Prize, these works propose a different vision than the one currently presented by the literature, with a particular desire to take advantage of this sensitivity to humidity rather than to suffer it. A bioinspiration process is then carried out based on the knowledge of biological structures in order to take advantage of the hygro-elastic properties of plant fibres. It is on this principle that a new generation of composites, the hygromorph (bio)composites are developed inspired by pine cones.

The objective of this article is in a first section to present and detail the bioinspiration process. The second section will present the functioning of the selected biological model, the pine cone. The third section will discuss hygromorph biocomposites, through a definition of their functionality and a synthesis of their performance. The fourth part will illustrate these concepts with prototypes of deployable structures and discuss the applications envisaged. The fifth and last part will discuss the current locks and opportunities to be taken.

Mots Clés : Bioinspiration, fibres végétales, composites, matériau stimuable, morphing

Keywords : Bioinspiration, natural fibres, composites, smart materials, morphing

1. Bioinspiration, pluridisciplinarité et collaborations

1.1 Démarche de bioinspiration « Attrait technologique ou Top-Down »

La démarche de bioinspiration, soit s'inspirer de la Nature pour concevoir des matériaux/structures, n'est pas une idée nouvelle en soit. En effet, il suffit de s'intéresser aux inventions de Léonard de Vinci pour comprendre la relation entre observation/compréhension du monde environnant et innovation technologique. Néanmoins, depuis quelques années et plus récemment encore en France à travers le CEEBIOS s'appuyant sur les travaux de T. Speck ou G. Jeronimidis, la bioinspiration se formalise avec l'apparition d'un cadre normatif et d'une méthodologie [1]. À la différence d'autres méthodologies (Qualité, Eco-conception...), la bioinspiration cible la créativité, ce qui permet potentiellement l'innovation de rupture.

La démarche se décompose en deux volets : Bottom-Up (poussée biologique) et Top-Down (attrait technologique). La première consiste en un développement dont le point de départ est la recherche fondamentale dans le domaine de la biologie. La seconde s'articule autour d'un développement de produits aux fonctions nouvelles/augmentées grâce au transfert et à l'application de principes biologiques. Cette seconde méthode est utilisée pour le développement des biocomposites hygromorphes. La bioinspiration (top-down) s'appuie tout d'abord sur l'identification de verrous techniques. Dans le domaine des composites à fibres végétales, un de verrous majeur demeure la sensibilité à l'humidité des fibres végétales [2]. En effet, Il est communément admis dans la littérature que ces fibres absorbent une très forte quantité d'eau de l'ordre de 20-25% à 95% RH [3], ce qui génère une prise de masse élevée au sein du stratifié, un état de contrainte complexe lié au gonflement différentiel [4], des endommagements comme la décohésion de l'interface fibre/matrice [5], le délaminage, la perte de matière par lessivage [6][7], la réduction des propriétés mécaniques [8][9] et finalement la réduction de la durée de vie de ces biocomposites. Actuellement, la majorité des recherches se concentrent sur la dénaturation des fibres par des traitements chimiques ou physiques, très souvent extrapolés de l'industrie des fibres de verre [10].

L'intérêt de la bioinspiration apparaît ici avec la possibilité de sortir du dogme actuel consistant à transposer la connaissance des matériaux synthétiques aux matériaux biologiques. La deuxième étape consiste en la recherche d'un modèle biologique analogue proposant des stratégies pour tirer bénéfice de point faible.

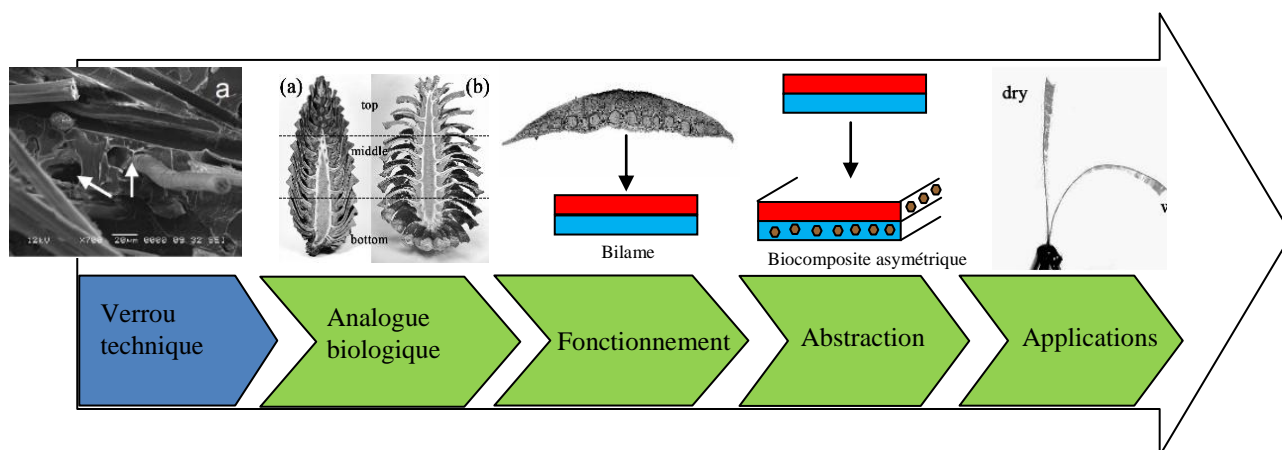


Fig 1 Approche "Top down" de la bioinspiration appliquée aux composites renforcés par des fibres végétales pour le développement de biocomposites hygromorphes (d'après speck et al [11])

Dans la Nature, pour disperser leurs graines, les plantes peuvent développer des stratégies de déploiements autonomes déclenchés par des gradients d'humidités. Cette fonction d'actionneur hydraulique (hygromorphe) comme celle présente chez la pomme de pin. Il s'agit de notre modèle de base. Les étapes n°2 et 3 consistent en sélection de système biologique, à la compréhension

fondamentale et la description du fonctionnement de l’analogue biologique qui puisse servir de base d’inspiration au développement de solutions originales et performantes. Plusieurs solutions à ce stade, soit l’utilisation de base de données bibliographiques issus des travaux en biologie, botanique, mécanique... soit la recherche collaborative. Pour schématiser, l’ouverture/fermeture des écailles de pomme de pin s’effectue grâce à une structure composite à empilement asymétrique (ou bilame) où chaque tissu composant l’écaille possède des propriétés hygro-élastiques distinctes. Les couplages générés seront responsables de la courbure de l’écaille lors d’une variation d’humidité.

La quatrième étape se nomme l’abstraction avec la retranscription du phénomène par le développement d’un analogue synthétique. Ici, l’analogue synthétique est un bilame hygroscopique dont l’hydrophilie et les couplages associés sont apportés par l’usage de fibres végétales. Leur orientation au sein du stratifié permet de contrôler la réponse de l’analogue du fait de leur forte anisotropie. L’étape finale est le développement d’applications basées sur les nouvelles fonctionnalités des matériaux développés : les biocomposites hygromorphes capables de déploiement ou de génération d’effort.

Actuellement, la notion de bioinspiration est totalement décorrélée d’une quelconque volonté de réduire les impacts environnementaux du matériau ou de la structure développée. Le développement des biocomposites hygromorphes proposent d’aller plus loin en associant bioinspiration comme source de créativité, éco-conception et ACV comme méthode d’évaluation environnementale et usage de matériaux biosourcés comme moyen réduire l’impact.

1.2 La pomme de pin : modèle de compréhension

Comme évoqué dans le paragraphe précédent, la démarche consistant à analyser et comprendre le fonctionnement de l’analogue biologique, la pomme de pin, est essentiel pour permettre de développer les biocomposites hygromorphes et même imaginer les améliorer.

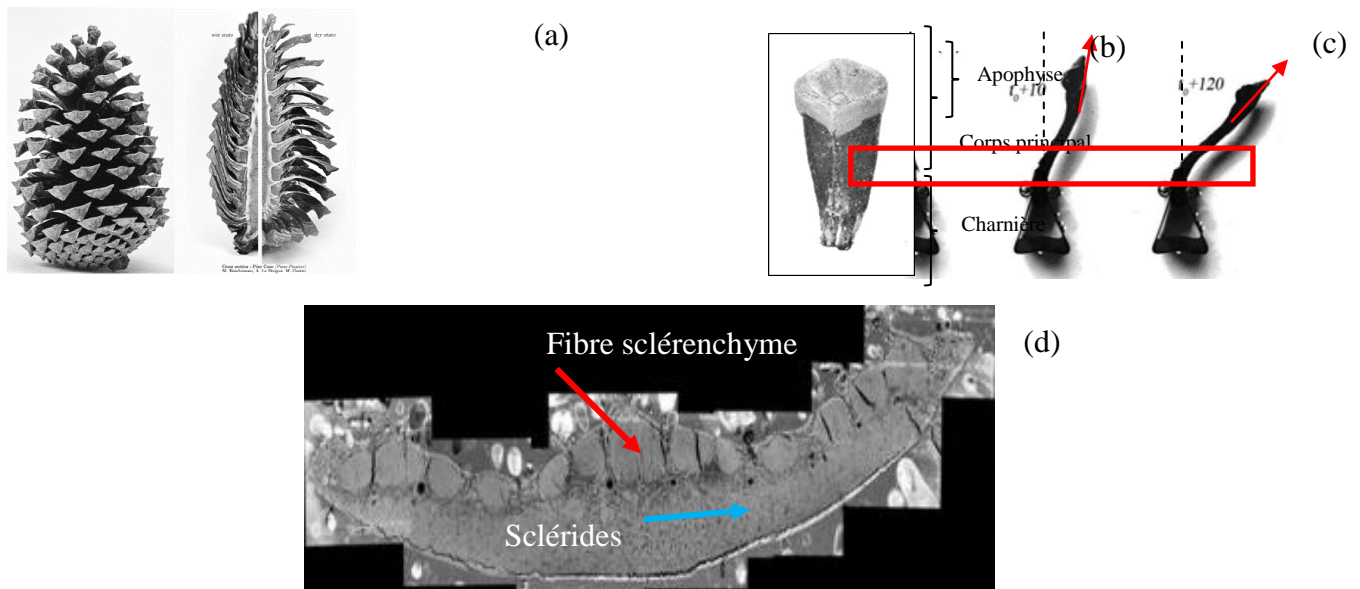


Fig. 2 Photographie d’une pomme de pin (*Pinus pinaster*) (a), d’une écaille de pomme de pin (*Pinus Pinaster*) extraite du tiers milieu (b) et mouvement d’une écaille induite par une variation de teneur en eau (immersion) (c). Le rectangle rouge représente la zone charnière, Section d’une écaille de pomme prélevée dans la zone charnière (d).

En première approche, une écaille de pomme de pin possède deux zones distinctes, le corps principal, et une zone particulière pilotant visiblement la réponse, nommée la zone « charnière » (en rouge sur la fig. 2b et c). Des analyses de compositions biochimiques notent que la zone de charnière est beaucoup plus riche en polyside (58 versus 49 %) et appauvrit en lignine (un tiers de

moins) que le corps principal de l'écaille. On peut s'attendre de fait à une plus grande capacité d'interactions avec l'eau dans la zone de charnière puisqu'elle est particulièrement riche en hémicelluloses et pectines. Ces polysaccharides sont riches en groupement hydroxyles 'hydrophiles' susceptibles de fixer des molécules d'eau. De plus, la moins grande proportion de lignine 'hydrophobe', semble souligner cette adaptation de la nature à disposer de propriétés graduelles au sein de l'écaille en terme d'hygroscopie. Des manipulations sont en cours afin d'évaluer plus finement la distribution des composés lignifiés au sein des écailles par tomographie et spatialisation des lignines par coupes sériées.

L'observation de la section d'une écaille à partir d'une coupe transversale effectuée dans la zone de charnière (Fig. 2d) montre qu'en première approximation, la microstructure d'une écaille peut être assimilable à un bilame nano-structuré ou à un stratifié asymétrique. Il s'agit d'ailleurs de l'hypothèse très majoritairement développée dans la littérature. La zone de transition (interphase) entre couches est très peu discutée malgré son rôle central dans le transfert de charge hygroscopique et donc dans la réponse des écailles. Les écailles sont constituées de deux types de tissus organisés sous forme de faisceaux de fibres, i.e. les fibres sclérenchymes (environ 35%) et les sclérides (environ 65%) (Fig. 2d) [12]. Enfin, l'échelle inférieure de la microstructure hiérarchique est celle de la paroi et *in fine* de ces constituants. Les analyses biochimiques sur l'ensemble de l'écaille, présentent des valeurs proches de celles observées pour les fibres de bois (tension ou compression) [13].

Au-delà de la composition biochimique, la microstructure des fibres et de la paroi S_2 conditionne les propriétés hygro-élastiques. Les parois sont constituées d'une matrice hydrogel dont le gonflement est modulé par la fraction de cellulose et son angle d'enroulement (MFA) le long de la fibre. Ainsi les fibres sclérenchymes possèdent un angle microfibrillaire d'environ $30 \pm 2^\circ$ et $74 \pm 5^\circ$ pour les sclérides [14]. Ceci démontre l'influence du MFA sur la capacité d'actionnement. Ce point sera mis en avant lors de l'étude de l'influence de la microstructure des fibres au sein de biocomposites hygromorphes.

Les observations au MEB mettent également en avant que les fibres sclérenchymes et sclérides possèdent un taux de remplissage différent. Les fibres sclérenchymes sont composées de parois épaisses à l'inverse des sclérides. Outre le rapport rigidité/masse, ce milieu poreux favorise le transport de l'eau par capillarité [15][16].

Évaluée à l'aide de microtomographie et d'outils de CAO (Fig 3a et b), le rapport des épaisseurs des tissus (sclérides et sclérenchymes) varie suivant l'axe longitudinal L de l'écaille, mais finalement peu selon l'axe transverse (non montrée ici). Il existe donc une singularité géométrique au niveau de l'apophyse dont le rôle reste encore inconnu. Les propriétés hygro-élastiques de ces deux tissus diffèrent fortement ($E_{\text{fibre}} = 4.53 \pm 0.9$ GPa, $E_{\text{sclérides}} = 0.86 \pm 0.05$ GPa, $\beta_{\text{fibre}} = 0.06 \pm 0.05$ ε/RH et $\beta_{\text{sclérides}} = 0.20 \pm 0.04$ ε/RH) [14]. Néanmoins ces valeurs ne représentent à priori que les propriétés suivant l'axe longitudinal de l'écaille pour une humidité et une concentration en eau qui demeurent inconnues [14].

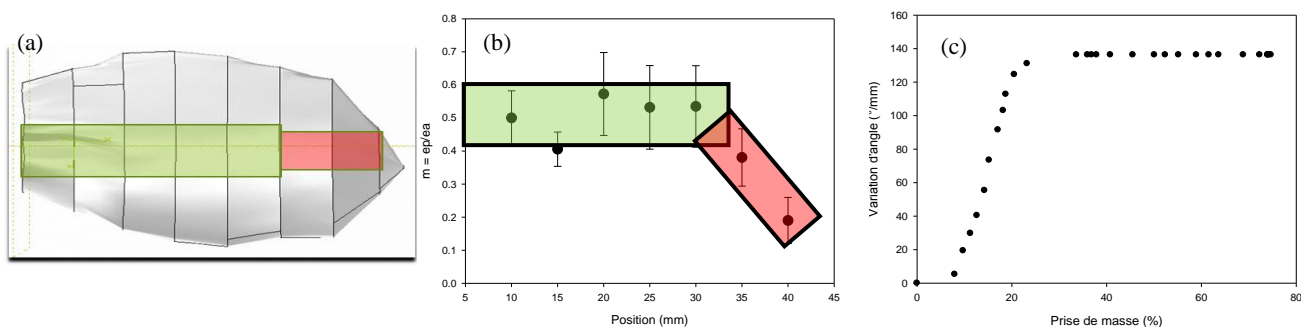


Fig 4 Géométrie globale et détails de la microstructure d'une écaille de pomme de pin (a-b), évolution du rapport d'épaisseur entre tissus (c-d)

De plus, ces tissus, pouvant être assimilés à des fibres de bois, ont un comportement isotrope transverse. Donc, comme le confirme les travaux de Lin *et al.* [17], l'écaille de pomme de pin possède non pas une seule courbure longitudinale mais une double courbure de type synclastique.

L'influence de l'architecture interne, des propriétés hygro-mécaniques des constituants sur la réponse de l'écaille de pomme est actuellement en cours.

La réponse d'un actionneur hygromorphe est déclenchée par un gradient d'humidité. Ce dernier provoque le gonflement des différents tissus qui engendre la courbure de l'écaille. Immersées, la réponse de l'écaille s'opère en trois étapes (Fig 4c). Entre 0 et 10%, une période de latence est constatée suivi par une relation quasi-linéaire entre la variation d'angle et la teneur en eau (entre 10 et 20%) (Fig 4a). Dans cette gamme de temps, l'eau absorbée provoque un gonflement des parois, un gonflement différentiel entre tissus et donc la réponse de l'écaille. Ensuite, l'écaille continue à absorber de l'eau sans pour autant induire une réponse supplémentaire. Ce phénomène, peu étudié dans la littérature, peut être lié à la modification du transport de l'eau au sein du milieu poreux par le gonflement des parois ou à des potentiels endommagements. Le temps de réponse médian est d'environ 100 minutes suivant les espèces. La prédiction de la réponse des écailles est effectuée avec un modèle analytique simple de poutre de Timoshenko [15][18] en substituant l'expansion thermique par l'expansion hygroscopique.

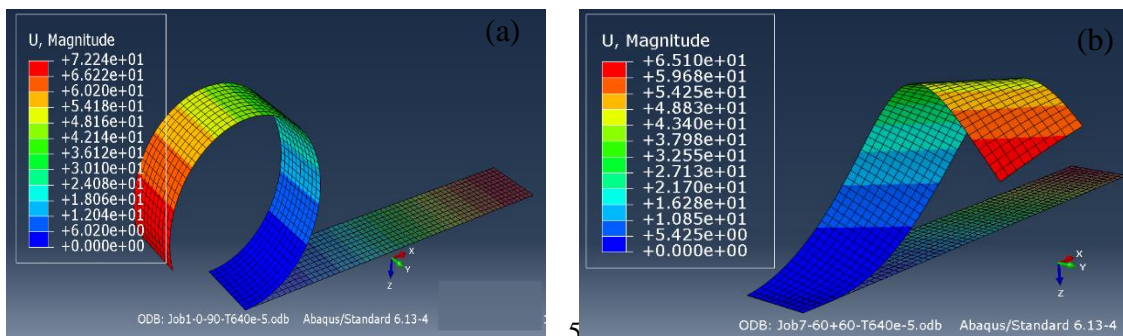
Plusieurs axes de travail sont en cours afin d'alimenter la démarche top-down notamment à travers la compréhension de leur durabilité vis-à-vis de l'environnement, ce qui pourrait permettre la conception de biocomposites hygromorphes durables.

1.3 Les biocomposites hygromorphes : une définition

Les biocomposites hygromorphes sont des matériaux architecturés (*Material by Design*) utilisant l'hygroscopicité et l'anisotropie des fibres végétales (lin, chanvre, coco, jute...) pour contrôler leur réponse. À l'heure actuelle les biocomposites hygromorphes sont majoritairement constitués de nappes unidirectionnelles de fibres végétales sont employés

À la différence d'un très grand nombre d'articles se focalisant sur un actionnement thermo-activé basé sur la déformation thermique du/des matériau(x), les biocomposites hygromorphes sont des matériaux adaptatifs (actionneurs) dont la réponse est pilotée par la variation de la teneur en eau (et les déformations induites) mais aussi potentiellement par la température (directement ou indirectement). L'avantage des déformations hygroscopiques réside dans leur large amplitude notamment pour les matériaux dit « hydrophiles » et plus spécifiquement les fibres végétales qui surpasse leurs déformations thermiques. Le potentiel d'actionnement, prédit par le modèle de Timoshenko, est donc largement plus important. De plus, la multiplication des stimuli permet l'accroissement de l'enveloppe de design pour les structures déployables.

Les biocomposites hygromorphes produisent une réponse autonome (sans énergie extérieure) dite « programmable ». La réponse peut être un déplacement sous la forme d'une courbure (Fig 5a), d'une torsion (Fig 5b) ou bien d'un effort (récupération d'énergie) lorsque le déplacement est bloqué [12].



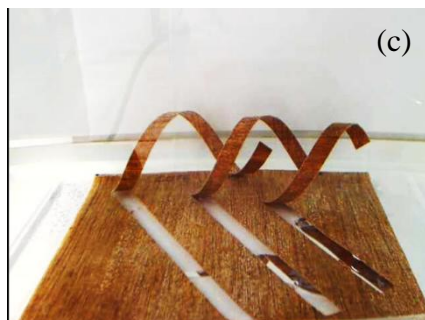


Fig 5 Résultats issus d'une simulation numérique d'un biocomposite hygromorphe avec une orientation $[0,90^\circ]_s$ (a) et $[\pm 45^\circ]_s$ (b). Résultats expérimentaux de découpes à 45° (kirigami) d'une plaque de biocomposite hygromorphe.

Les biocomposites hygromorphes sont transformables facilement grâce à l'usage d'une matrice polymérique soit thermodurcissable soit thermoplastique. Suivant leur formulation, ils peuvent être biobasés partiellement ou complètement, élaborés à partir de ressources locales, recyclables, compostables.

Enfin, ils apparaissent comme des briques élémentaires/plateformes pour le développement de structures architecturées déployables ou de métamatériaux adaptatifs. La figure 6a, b, c et d présente plusieurs exemple d'amplification géométrique de déploiement.

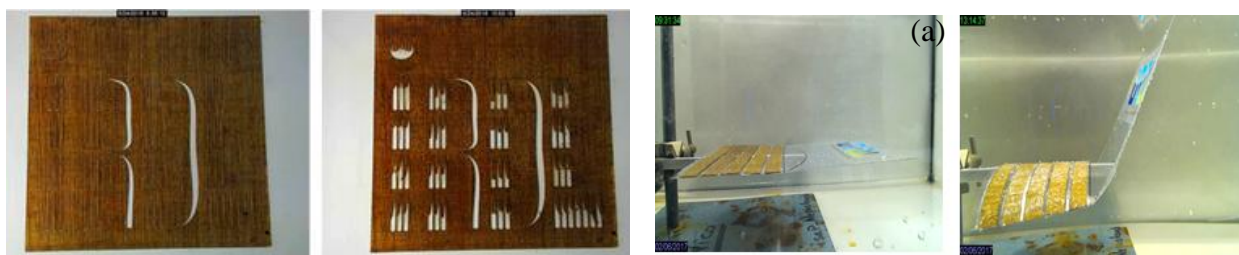
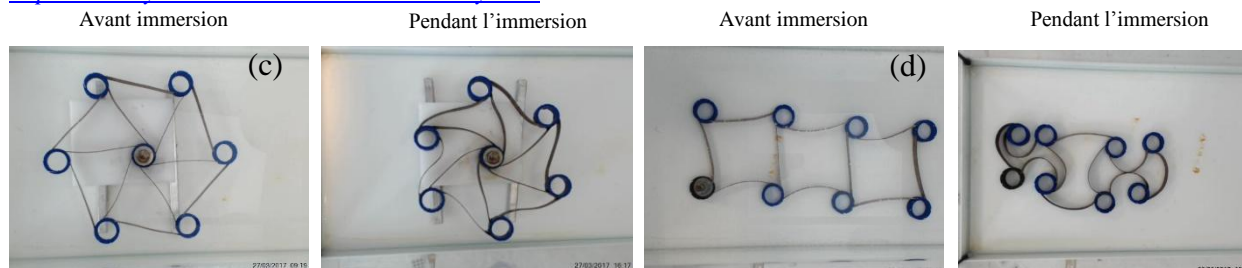


Fig 6 Exemple de structures déployables à base de composite hygromorphe s'appuyant sur l'usage de kirigami (a), d'origami à pliure courbe (b), de métamatériaux à motif hexachiral (c) et tetrachiral (d). Les vidéos correspondantes sont consultables : https://www.youtube.com/watch?v=N0fW_3u4IAU et <https://www.youtube.com/watch?v=rBu0LnyrF6c>



1.4 Les biocomposites hygromorphes : quelle niveau de performance ?

Les biocomposites hygromorphes développés actuellement sont basés sur une formulation référence MAPP/Lin. Ils représentent une nouvelle gamme de matériaux intelligents qui présentent une autorité d'actionnement intéressante avec rigidité/déformation spécifiques élevées comparables à

celles des alliages à mémoire de forme et des actionneurs hydrauliques. Ces matériaux sont considérés comme des actionneurs structuraux. La figure 7b représente l'évolution des biocomposites hygromorphes en fonction d'un environnement plus ou moins humide (0%-90%RH) (Fig 7b). Un changement de courbure apparaît à 50%RH laissant penser à l'annulation des contraintes hygrosopique pour cette condition. Un pré-programmation de la réponse de bilame de bois peut s'effectuer par le collage des lames à différentes teneur en eau [20]. Dans notre cas, la transformation à chaud semble réduire cette opportunité. Des travaux sont en cours afin de d'identifier le rôle de l'eau lors du process de thermocompression sur l'état de contrainte interne (Thèse Samuel Requile, Victor Popineau).

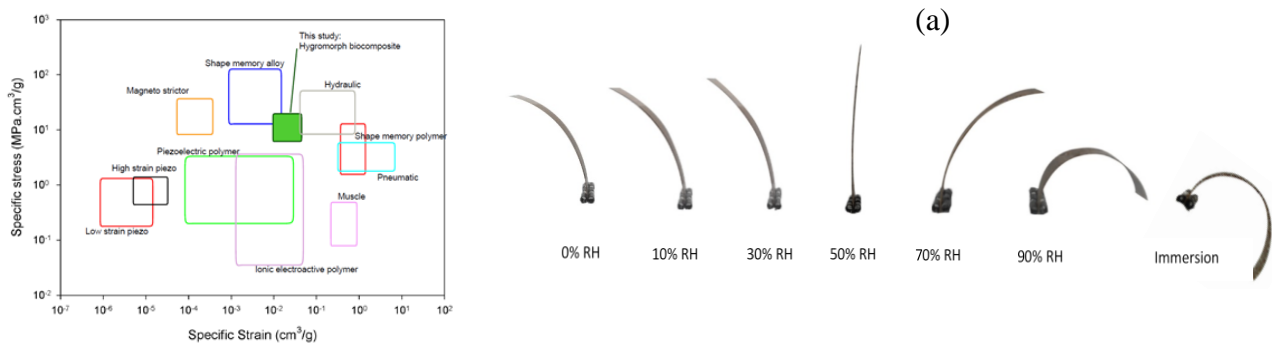
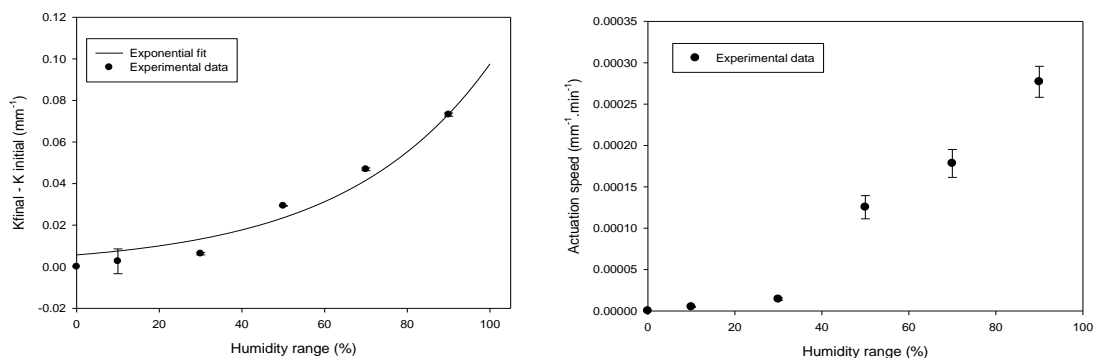


Fig 7 Performances spécifiques de matériaux stimulables (a) [21], photos représentant l'évolution des bilames en fonction des conditions environnementales (humidité relative et immersion)[22].

L'étude des résultats, en terme d'amplitude ou de réactivité (vitesse d'actionnement), met en avant que sur la formulation sélectionné (MAPP/lin), la majeure partie de l'actionnement apparait pour une gamme se situant entre 50 et 95% RH. En d'autre terme, si l'application envisagée requiert un grand et « rapide » déplacement, elle ne pourra s'effectuer que si l'environnement extérieur balaye cette gamme d'humidité (Fig 8a). Un des avantages des biocomposites hygromorphes est la possibilité d'adapter la formulation (type de polymère/fibres) au cahier de charges ainsi qu'aux conditions environnementales locales.

Comme pour les actionneurs biologiques, la vitesse de réaction est pilotée par le transport de l'eau et par la cinétique de gonflement des matériaux. Comme pour les pommes de pin, on constate un comportement complexe de l'actionnement vis à vis de la teneur en eau avec une évolution de type sigmoïdale (Fig 8c). Aujourd'hui, l'idée est donc de mieux comprendre les mécanismes diffusifs au sein de biocomposites à empilement symétrique ou asymétrique ainsi que la genèse des couplages hygromécaniques et des endommagements associés. Ces travaux s'effectuent en collaboration avec le GeM (St Nazaire). Il s'avère que sur un biocomposite hygromorphe MAPP/lin avec un plan de stratification [0₁ ; 90₅], il existe un état de contrainte complexe lié à la distribution de teneur en eau, aux déformations hygrosopiques et à l'évolution des propriétés élastiques (Fig 8d). Les contraintes de traction orientées transversalement aux fibre atteignent environ 10 MPa ce qui est supérieur aux propriétés transverses d'un pli UD MAPP/lin.



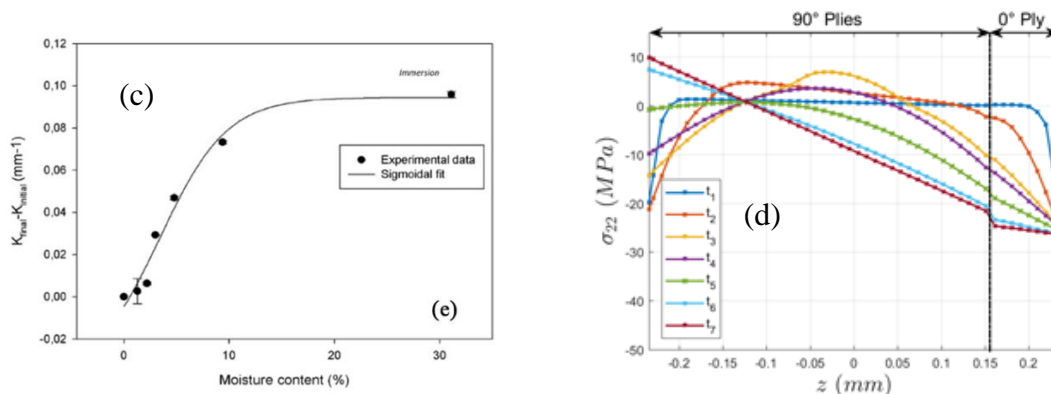


Fig 8 Evolution de l'amplitude d'actionnement (a), de la vitesse d'actionnement (b) en fonction de l'humidité. Évolution de l'amplitude d'actionnement en fonction de la teneur en eau (c) [22]. Distribution de la composante transverse du tenseur de contrainte à travers l'épaisseur du stratifié asymétrique pour différents temps caractéristiques (d) [4].

Il est possible de piloter l'actionnement en modifiant la formulation (type de fibres, type de polymère, taux de fibre, orientation...), la géométrie, le rapport des épaisseurs entre couches et la distribution des agents d'expansion [19]. En d'autre terme, il est possible de designer à façon ce matériau suivant la réponse souhaitée.

Ainsi, l'augmentation de la fraction de fibres végétales accroît l'amplitude et la vitesse d'actionnement liés à leurs propriétés hygroscopiques [23]. Élaborés par thermocompression, les biocomposites hygromorphes atteignent une fraction volumique de renfort d'environ 60%.

Le type de fibre végétale, leur composition biochimique et la microstructure notamment à travers l'angle microfibrillaire (MFA) conditionne l'anisotropie, leurs propriétés élastiques et leur hydroexpansion et *in fine* l'actionnement [7]. Des essais comparatifs entre lin, jute, kénaf et coir ont confirmé ces affirmations. Ainsi, les fibres de lin et jute (MFA $\approx 10\text{-}15^\circ$) possèdent un potentiel d'actionnement nettement plus élevé que les fibres de coir (MFA $\approx 45^\circ$). Néanmoins, le principe de fonctionnement des biocomposites hygromorphes s'applique à toutes les fibres végétales, soulignant ce potentiel de valorisation de ressources locales.

La qualité de liaison interfaciale améliore le transfert de charge opéré à l'interface fibre/matrice. Réputé comme étant un point faible des biocomposites avec l'incompatibilité entre renfort hydrophile et matrice hydrophobe, l'interface fibre/matrice est aussi un point clé pour l'actionnement des biocomposites hygromorphes. Dans un des cas les plus défavorable, usage d'une matrice PP enrobant des fibres de lin, où aucune interaction (à part VdW) ne peut s'établir, l'actionnement/le déploiement des éprouvettes s'effectue malgré tout [24]. Ceci souligne clairement qu'un transfert de charge est présent, notamment induit par des contraintes de compression induite à l'interface par l'expansion différentielle entre composants. Des travaux sont en cours sur la compréhension de l'effet des contraintes hygroscopiques sur le transfert de charge dans un système fibre végétale/polymère (Thèse S Requile, V Gager). L'amélioration de l'adhérence fibre/matrice par le greffage d'anhydride maléique sur la matrice PP, permet de réduire la teneur en eau nécessaire à l'actionnement. En d'autre terme, le biocomposite hygromorphe est plus efficace mais aussi plus fiable (permet plusieurs cycles sans se réduire son actionnement).

1.5 Verrous, Perspectives et applications envisagées

Les verrous scientifiques actuels des biocomposites hygromorphes sont surtout liés au manque de recul et de temps d'étude. Parmi ces points durs, on peut citer la durabilité en environnement

sévère. Notons que ce verrou est aussi valable pour les biocomposites dits « conventionnels ». Toutefois, des travaux [21][23] ont permis de déceler les mécanismes de dégradation liés à la présence de couplage mais aussi de dégradation physico-chimique. Les cycle de sorption/désorption en environnement aqueux implique une évolution de la microstructure avec un accroissement drastique de la fraction de porosité ce qui conduit à une accélération de l'actionnement mais à une perte de fiabilité (non-retour à la position initiale). L'usage de fibre de jute à la place des fibres de lin permet de conserver les caractéristique d'actionnement initiale avec 50 cycles de sorption/désorption. En effet, la composition biochimique, plus riche en lignine et donc moins sensible aux dégradation hydrolytique ralentie la cinétique de dégradation. Des travaux sont en cours pour identifier les mécanismes de dégradation des biocomposites au cours du vieillissement (Thèse V Popineau). Des travaux examinent aussi les analogues biologiques (pomme de pin) pour comprendre les mécanismes qui régissent leur durabilité.

Autre verrou, la relative lenteur d'exécution. En effet, ces matériaux sont tributaires du transport de l'eau dans la structure. Par ailleurs, ces matériaux proposent une réponse autonome, ce qui peut être avantageux mais limitant dans certains cas le contrôle de l'actionnement est primordiale.

Les opportunités sont néanmoins nombreuses et promettent d'alimenter plusieurs années de recherche. Citons d'abord le volet « Material by Design ». Les biocomposites hygromorphes possèdent une architecture simple bioinspirée limitée principalement par la technique de mise en œuvre. Le développement de l'impression 3D et 4D permet d'aller plus loin et d'envisager l'élaboration de structures adaptatives (métamatériaux) à architecture complexe.

Ensuite, il est possible d'envisager accroître la fonctionnalité des biocomposites hygromorphes notamment en contrôlant la teneur en eau manuellement. Les travaux de thèse de Guillaume Chabaud vont dans ce sens avec le développement de composites électro-thermo-hygromorphe. La teneur en eau est alors contrôlée par effet Joule.

Les applications envisagées (question récurrente) concernent plusieurs secteurs d'activité avec en premier lieu le bâtiment. Ces matériaux pourraient permettre la confection de membranes adaptatives facilitant la régulation hygro-thermique du bâtiment de manière passive. De manière analogue, il est possible d'imaginer des brises-soleil et des supports de panneaux solaire mobiles contrôlés par l'évolution de la température et de l'humidité en fonction de la course de soleil.

Autre domaine, celui de la reconstruction de récifs coraliens endommagée en mimant le mouvement des algues avec un déploiement naturel. Nous pouvons prendre l'exemple de leur usage au niveau des fondations des éoliennes offshore qui garantira une réduction de la nuisance occasionnée.

Enfin dans le secteur de la défense et de l'aéronautique, en tant que métamatériaux adaptatifs, pour les structures terrestres/aérienne déployables comme les antennes intégrées aux drones ou bien comme structures adaptatives (hydrofoils ou dérives) intégrées à la conception de drones marins.

Remerciements

Je tiens à remercier sincèrement tous les collègues et doctorants de l'IRDL qui ont, de près ou de loin, m'ont permis d'avancer dans un environnement très favorable. À ce titre, je remercie C Baley, A Bourmaud mais aussi PY Manach et Y Grohens pour leurs soutiens respectifs. Je tiens à remercier également J Breard, P Davies et F Jacquemin pour leur bienveillance. Depuis quelques années, mes travaux s'orientent vers la bioinspiration et les biocomposites hygromorphes. Cette nouvelle aventure se déroule grâce au concours de collègues très enthousiastes avec lesquels le travail ne l'est plus. Merci à M Castro, F Scarpa, J Beaugrand et V Keryvin. J'adresse également mes remerciements aux collègues avec qui j'échange régulièrement : l'IFREMER, GeM, INRA, FEMTO, C2MA, ENIT, ESPCI, CEEBIOS...et plus généralement la communauté des biocomposites. J'adresse enfin mes remerciements à la région Bretagne, DSTL/DGA et le CNRS pour leur soutien financier.

Références

[1] 18458:2015(F) I. Biomimétique — Terminologie, concepts et méthodologie n.d.

- [2] Faruk O, Bledzki AK, Fink H-P, Sain M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Prog Polym Sci* 2012;37:1552–96. doi:10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003.
- [3] Hill CAS, Norton A, Newman G. The Water Vapor Sorption Behavior of Natural Fibers. *J Appl Polym Sci* 2009;112.
- [4] Peron M, Céline C, Castro M, Jacquemin J, Le Duigou A. Study of hygroscopic stresses in asymmetric biocomposite laminates. *Compos Sci Technol* 2019.
- [5] Azwa ZN, Yousif BF, Manalo AC, Karunasena W. A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. *Mater Des* 2013;47:424–42. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.025.
- [6] Le Duigou A, Bourmaud A, Baley C. In-situ evaluation of flax fibre degradation during water ageing. *Ind Crops Prod* 2015;70:204–10. doi:10.1016/j.indcrop.2015.03.049.
- [7] A Le Duigou, S Requile, F Scarpa, M Castro, A Le Duigou, S Requile, F Scarpa, M Castro. Natural fibres actuators for smart bio-inspired hygromorph biocomposites. *Smart Mater Struct* 2017:125009.
- [8] Le Duigou A, Davies P, Baley C. Seawater ageing of flax/poly(lactic acid) biocomposites. *Polym Degrad Stab* 2009;94. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2009.03.025.
- [9] Le Duigou A, Bourmaud A, Davies P, Baley C. Long term immersion in natural seawater of Flax/PLA biocomposite. *Ocean Eng* 2014;90:140–8. doi:10.1016/j.oceaneng.2014.07.021.
- [10] Kabir MM, Wang H, Lau KT, Cardona F. Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Compos Part B Eng* 2012;43:2883–92. doi:10.1016/j.compositesb.2012.04.053.
- [11] S Schleicher, J Lienhard, S Popping, T Speck, J Knippers. A methodology for transferring principles of plant movements to elastic systems in architecture. *Comput Des* 2015;60:105–17.
- [12] Le Duigou A, Castro M. Evaluation of force generation mechanisms in natural, passive hydraulic actuators. *Sci Rep* 2016;6. doi:10.1038/srep18105.
- [13] Joffre T, Neagu RC, Bardage SL, Gamstedt EK. Modelling of the hygroelastic behaviour of normal and compression wood tracheids. *J Struct Biol* 2014;185:89–98. doi:10.1016/j.jsb.2013.10.014.
- [14] Dawson C, Vincent J, Rocca A. How pine cone open. *Nature* 1997;390:668.
- [15] Reyssat E, Mahadevan L. Hygromorph: from pine cone to biomimetic bilayers. *J R Soc* 2009;6:951–7.
- [16] Skotheim J, Mahadevan L. Physical limits and design principles for plant and fungal movements. *Sciences (New York)* 2005;308:1308–10.
- [17] S. Lin, YM. Xie, Q. Lib, X. Huang and SZ. On the shape transformation of cone scales. *Soft Matter* 2016;12:9797–802.
- [18] Timoshenko S. Analysis of bi-metal thermostats. *J Opt Soc Am* 1925;11:233–55.
- [19] S Turcaud. Some patterns of shape change controlled by eigenstrain architectures. *Thesis Rep* 2015;https://te.
- [20] Holstov A, Bridgens B, Farmer G. Hygromorphic materials for sustainable responsive architecture. *Constr Build Mater* 2015;98:570–82. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.136.
- [21] A Le Duigou, S Requile, J Beaugrand, F Scarpa, M Castro,. Natural fibres actuators for smart bio-inspired hygromorph biocomposites. *Smart Mater Struct* 2017;26.
- [22] Le Duigou A, Keryvin V, Beaugrand J, Pernes M, Scarpa F, Castro M. Humidity responsive actuation of bioinspired hygromorph biocomposites (HBC) for adaptive structures. *Compos Part A* 2019;116:36–45. doi:10.1016/j.compositesa.2018.10.018.
- [23] Le Duigou A, Castro M. Hygromorph BioComposites: Effect of fibre content and interfacial strength on the actuation performances. *Ind Crops Prod* 2017;99:142–9. doi:10.1016/j.indcrop.2017.02.004.
- [24] Le Duigou A, Castro M. Hygromorph BioComposites: Effect of fibre content and interfacial strength on the actuation performances. *Ind Crops Prod* 2017;99. doi:10.1016/j.indcrop.2017.02.004.