



Origami & biomimétisme

Un art ancestral qui ouvre des perspectives d'application pour le biomimétisme

Introduction

L'origami, de *oru*, « plier », et *kami*, « papier », est l'art du pliage du papier. Issu d'une longue tradition japonaise et chinoise, l'origami offre de nombreuses techniques qui ouvrent aujourd'hui le champ des possibles en matière d'innovation bioinspirée.

- ❖ Ses techniques permettent non seulement de **reproduire les structures de pli du vivant**, mais également les **fonctions** associées (**légèreté, compacité, protection, changement** en réponse à la température ; interaction avec l'eau, etc.) et permettent d'explorer la **notion d'enveloppe** dans le vivant.
- ❖ Les applications couvrent les sciences des matériaux, l'énergie, la miniaturisation de composants, la robotique, etc. L'application des techniques de l'origami, pour les emballages notamment, est aujourd'hui peu exploitée par rapport à leur potentiel. Il y a pourtant un **vaste champ applicatif** dans tous les domaines, offrant de nouvelles fonctionnalités pour les emballages : déployabilité, élasticité, adaptabilité, réutilisation.
- ❖ Enfin, l'**écoconception** est inhérente aux techniques de l'origami (fabrication en papier, faible besoin énergétique, réutilisation possible, etc.).

Les plis dans le vivant

Qu'est-ce-qu'un pli ?

Selon la définition du Larousse, un pli désigne :

1. une « partie **repliée sur elle-même** d'une étoffe, d'un papier, etc., et formant une double épaisseur ». Synonyme : repli
2. une « **déformation** souple des couches géologiques sous forme d'ondulations à plus ou moins grand rayon de courbure, **à la suite d'une contrainte** tectonique. » Synonymes : plissement, sinuosité.

Les plis résultent ainsi de contraintes de forces, comme cela peut être observé pour les plis d'une formation géologique ou dans le cortex cérébral.



Fig. 1 / Observation de différents plis sur du tissu ou des roches

Quelles sont les fonctions des plis dans le vivant ?

- ❖ **Compacté** : les jeunes feuilles ou fleurs sont pliées dans les bourgeons avant de se développer. Il s'agit d'une forme miniature d'une structure déjà formée. L'arrangement plié permet un gain de place et une protection des structures par les enveloppes externes du bourgeon. Le même principe peut être observé au niveau des ailes de coléoptères. Les motifs de plis de Miura sont des exemples emblématiques au niveau des feuilles du charme (*Carpinus betulus*). Les nervures des feuilles ou des ailes fixent une contrainte géométrique, de sorte que la forme compacte repliée émerge spontanément par symétrie autour des nervures lorsqu'une force est appliquée.
- ❖ **Solidité** : les plis rigidifient par exemple la feuille de palmier, leur confèrent un maintien et une meilleure résistance aux vents et aux intempéries.



Fig. 2 / Exemples de plis qui permettent un arrangement compact des pétales, feuilles, ailes, etc. Extrait Couturier et al. 2011

Au niveau des ailes de la coccinelle, il existe un compromis entre la **déformabilité** (instabilité) requise pour le pliage de l'air et la **rigidité** (stabilité) pour le vol. Le pliage de type origami permet de résoudre ce compromis.

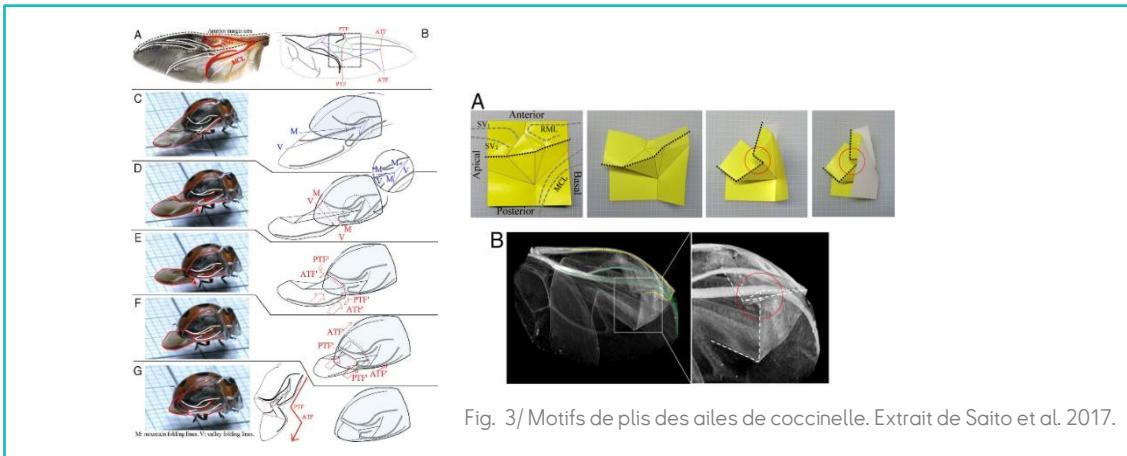


Fig. 3/ Motifs de plis des ailes de coccinelle. Extrait de Saito et al. 2017.

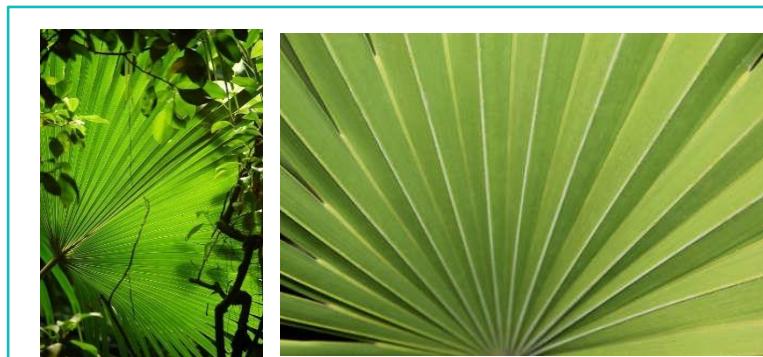


Fig. 4/ Plis du palmier lui confèrent une rigidité.

- ❖ **Multiplication des surfaces d'échanges** : les plis contribuent à augmenter les surfaces d'échange avec un milieu environnement (air, eau ou fluide corporel – sang ou lymphé). Par exemple, les cornets nasaux du dromadaire permettent de favoriser la condensation de l'eau en provenance des voies respiratoires et ainsi de réduire les pertes hydriques, tout en refroidissant et humidifiant l'air inspiré chaud et sec en entrée.

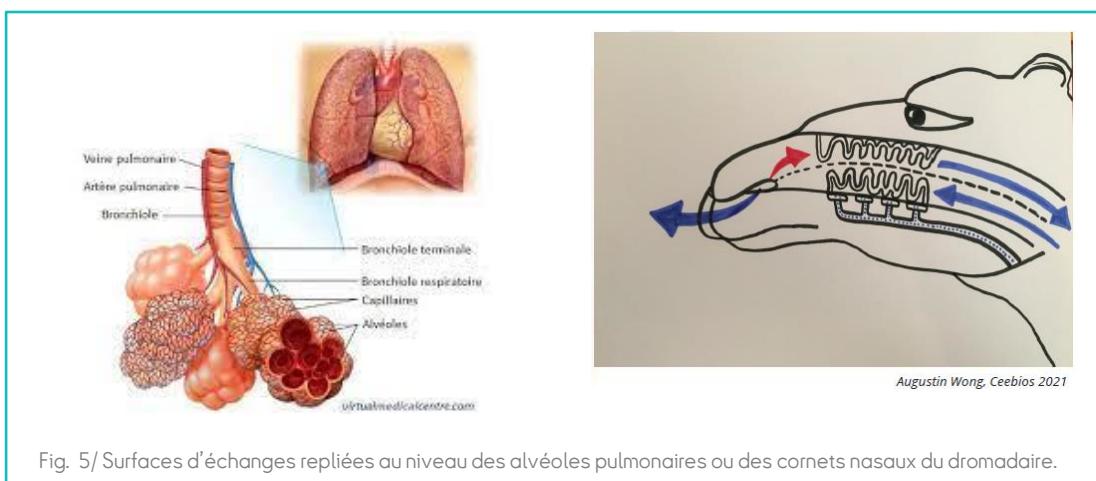


Fig. 5/ Surfaces d'échanges repliées au niveau des alvéoles pulmonaires ou des cornets nasaux du dromadaire.

- ❖ **Mouvement**: le motif de pli de certaines fleurs ou ailes favorise leur ouverture par le stockage d'énergie élastique dans le pli qui est libérée lors du déploiement de la structure. Les ailes de coccinelle se déplient très rapidement grâce à ce mécanisme, en moins d'un dixième de seconde (Saito et al. 2017).

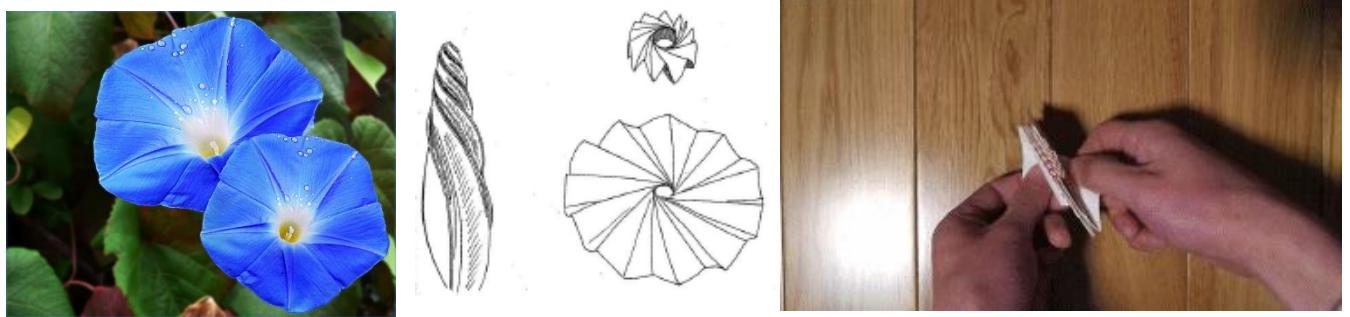


Fig. 6/ Ouverture des fleurs de Liseron.

Diversité des champs d'application

L'ingénierie issue de l'origami regroupe aujourd'hui une importante communauté d'amateurs passionnés et de professionnels en design, recherche ou activités industrielles avec un nombre croissant d'applications en ingénierie mécanique, agroalimentaire (TipToque), logistique (Foldcore), spatial (**déploiement de panneaux solaires** photovoltaïques embarqués à bord de satellites), sécurité (pliage de **coussins gonflables**), robotique, etc. Un petit **origami-robot** capable de marcher, nager et porter ou pousser de petites charges, contrôlé par un champ magnétique, a été mis au point par le Massachusetts Institute of Technology et l'Université de Munich, présenté au public en 2015. Hormis un petit aimant, les composants de ce microrobot sont solubles dans un solvant (eau ou acétone, selon le modèle) et recyclable.

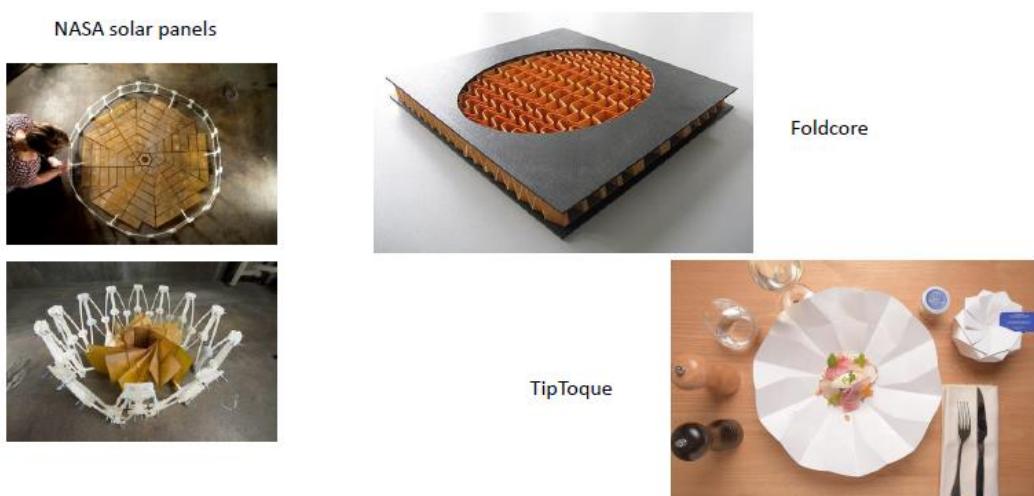


Fig. 7/ Exemples d'applications techniques de l'origami bioinspiré

Pour le biomimétisme, les **techniques de l'origami** (pliage rigide, modulaire, 3D, tessellations, froissage) permettent d'aller plus loin en reproduisant les **structures de pli présentes dans la nature** et les fonctionnalités dont elles sont responsables.

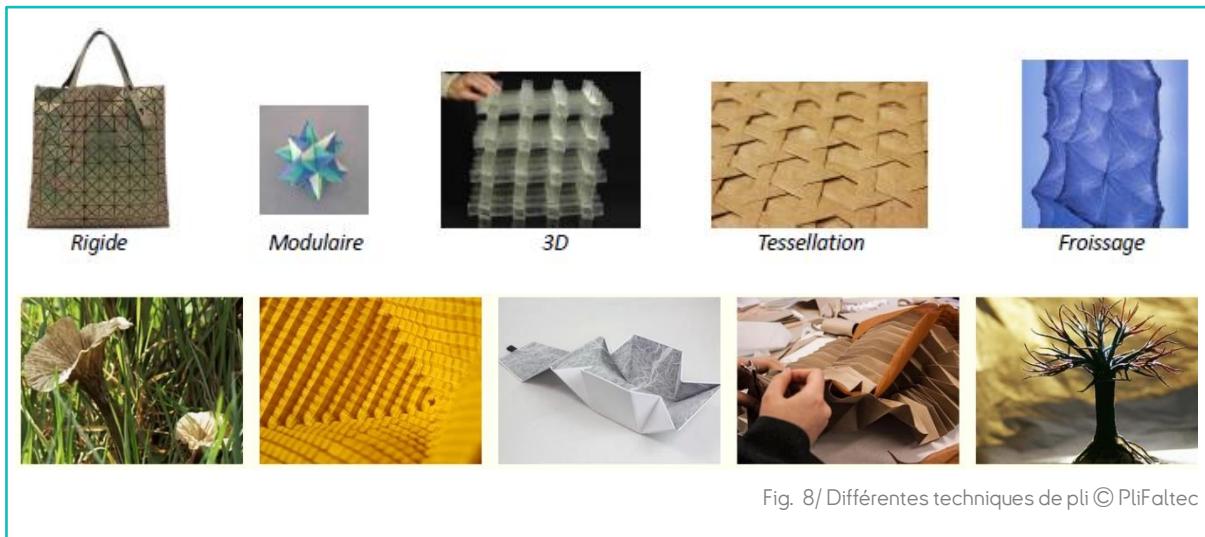


Fig. 8/ Différentes techniques de pli © PliFaltec

Ainsi, la fabrication de plis bio-inspirés permet d'atteindre de nombreuses propriétés :

- Structures **légères, compactes** (optimisation d'organisation) ;
- Structures **déployables** (gonflables, rétractables), transformables, adaptables ;
- Résistance **mécanique** avec une faible utilisation de matière, stabilité, robustesse ;
- Structures **fractales** (multiplication des surfaces obtenue par contraintes de forces).

Définitions : les matériaux peuvent être pliés : papiers, cartonnages, tissus, plastiques, métaux.

Selon la complexité des plis à réaliser, la fabrication est soit **manuelle**, soit **automatisée** mais cela ne concerne pas la majorité des structures pliées. Pour la conception des modèles, des outils CAO sont disponibles.

En particulier, pour des applications **d'emballages bio-inspirés et adaptatifs**, il existe :

- Des **origamis modulaires** offrant un système d'accrochage pour les lots de boîtes,
- Des boîtes ayant un intérêt esthétique et ludique grâce à des structures transformables,
- Des systèmes de **calage et de protection** composés d'un ensemble de structures pliées, comme du papier froissé pour le transport des fruits, développé en collaboration avec l'Université de Troyes et le Centre de recherche international en modélisation par le pli (CRIMP) ;
- Des emballages permettant de faciliter les opérations de transport, stockage, logistique et maintenance par la réduction de l'encombrement.

Origami bioinspiré et dimension artistique

PliFalTec a été fondée en 2013 sous l'impulsion de Vincent Floderer dans l'objectif de promouvoir le potentiel des techniques de pliage au travers d'applications artistiques ou industrielles. Ils réunissent un réseau d'experts origamistes (designers, laboratoires, industriels) pour des applications variées (textile, robotique, architecture, emballage ...). **Jean-Baptiste Floderer, Victor Coeurjoly et Vincent Floderer** de la société **PliFalTec** développent en particulier les techniques de **l'origami bio-inspiré** pour une variété d'usages esthétiques et/ou fonctionnels.

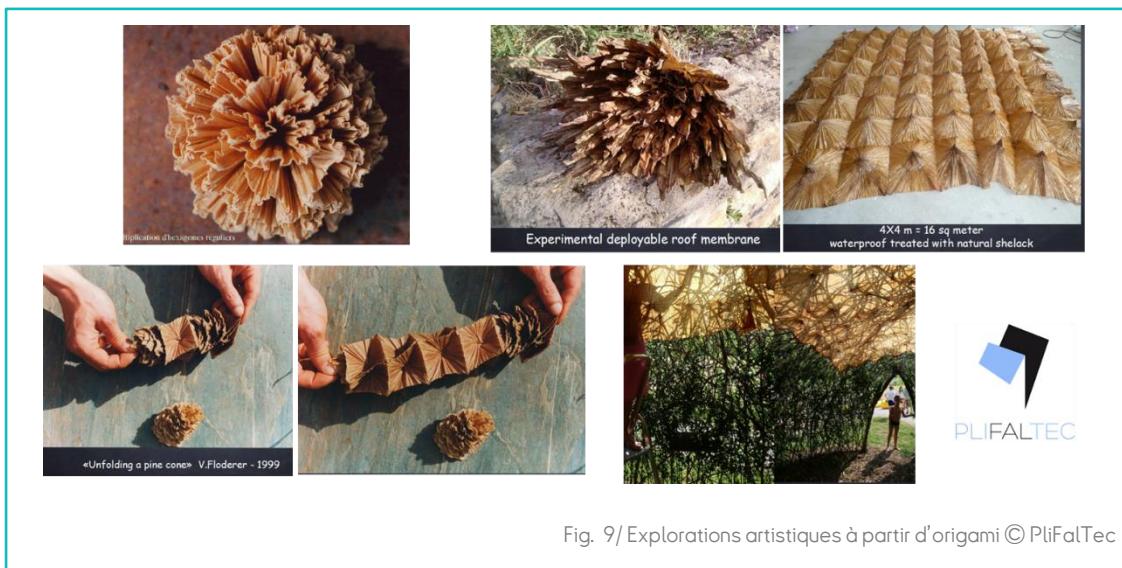


Fig. 9/ Explorations artistiques à partir d'origami © PliFalTec

Conclusion

Art ancestral, l'origami regroupe de nombreuses techniques de pliage qui permettent non seulement de **reproduire les structures de pli du vivant**, mais également les **fonctions associées (compacité, résistance mécanique, protection, matériaux adaptatifs)** en fonction des changements du milieu, etc.).

Les **applications de l'origami bioinspiré** sont multiples, selon les **matériaux** utilisés (papier, polymères, métaux, tissus) et les **échelles** mises en œuvre, des microrobots aux panneaux solaires déployables en passant par les emballages.

Au-delà de l'aspect **fonctionnel** de l'origami bioinspiré, en reproduisant des structures de pli du vivant, cette **approche créative** permet également de concevoir des modèles de plis présents chez les organismes vivants, qui permettent de mieux comprendre leur émergence et leur évolution à travers les espèces.

Rédactrice

Luce-Marie PETIT, Cheffe de projet Etudes industrielles Ceebios

Expertise matériaux bio-inspirés et formation initiale en sciences du vivant et ingénierie de l'environnement & biomécanique

Références

- ❖ Documentaire "Un monde en pli" <https://www.youtube.com/watch?v=hxZ5Y8UHx5g>
- ❖ Etienne Couturier, Sylvain Courrech Du Pont, Stéphane Douady. The filling law: A general framework for leaf folding and its consequences on leaf shape diversity. *Journal of Theoretical Biology*, Elsevier, 2011, 289, pp.47. 10.1016/j.jtbi.2011.08.020. hal-00739264
- ❖ Saito et al. Investigation of hindwing folding in ladybird beetles by artificial elytron transplantation and microcomputed tomography, *PNAS*, 114 (22) 5624-5628, 2017
- ❖ Robert Lang, *Origami design secrets: Mathematical Methods for an Ancient Art*
- ❖ Tomoko Fuse, *La reine de l'origami*
- ❖ Akira Yoshizawa, *Origami d'exception*.