



HAL
open science

Robotique et origamis

Stéphane Violette, Kanty Rabenorosoa, Pierre Renaud

► **To cite this version:**

Stéphane Violette, Kanty Rabenorosoa, Pierre Renaud. Robotique et origamis. Techniques de l'Ingénieur, 2023, Automatique - Robotique, S7861, 10.51257/a-v1-s7861 . hal-04125916

HAL Id: hal-04125916

<https://amu.hal.science/hal-04125916>

Submitted on 13 Jun 2023

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.

Copyright

Robotique et Origamis

Robotics and Origamis

par **Stéphane VIOLLET**

Directeur de recherche CNRS

ISM, CNRS/Aix-Marseille Université, Marseille, France

par **Kanty RABENOROSOA**

Maître de conférences (HDR)

Femto-ST, ENSMM, Besançon, France

par **Pierre RENAUD**

Professeur des Universités

INSA Strasbourg, laboratoire ICube, Strasbourg, France

Résumé

Elaborer des systèmes robotiques à partir d'origamis constitue une approche en rupture dans la manière de concevoir, de réaliser et d'utiliser un robot. Cet impact concerne la robotique de manipulation comme de locomotion, en disposant de robots personnalisables et ayant de grandes capacités d'adaptation. Dans cet article, un tour d'horizon complet de la robotique à base d'origami est proposé. Sur le plan applicatif, l'accent est mis en particulier sur les robots mobiles à locomotion multimodale. Les performances de ces robots sont liées à la capacité à concevoir, produire, modéliser et commander des structures origami avec actionnement intégré. Ces différents volets sont donc traités. La robotique basée sur les origamis est une voie de recherche interdisciplinaire à l'interface entre la mécanique, la science des matériaux et la robotique. L'article souligne les limites actuelles et problématiques ouvertes posées dans ces disciplines par la réalisation de robots origamis.

Mots-clés

Origamis, Robotique, Structures, Actionneurs, Compliance.

Abstract

Building robotic systems from origami is a breakthrough approach in the way of designing, realizing and using a robot, whether for manipulation or locomotion robotics, by having customizable robots with great adaptation capabilities. In this article, a complete overview of origami-based robotics is proposed. On the application side, the focus is on mobile robots with multimodal locomotion. The performances of these robots are linked to the ability to design, produce, model and control origami structures with integrated actuation. These different aspects are therefore addressed. Origami-based robotics is an interdisciplinary research path at the interface between mechanics, materials science and robotics. The article highlights the current limits and open problems posed in these disciplines by the realization of origami robots.

Keywords

Origamis, Robotics, Structural design, Actuators, Compliance.

Table des matières

1	Les fondamentaux liés aux Origamis	3
1.1	Les origines des origamis et leurs applications	3
1.2	Pliabilité d'un origami	5
1.3	Exemples d'origamis 2D et 3D pour la robotique	8
2	Panomara des robots Origamis	11
2.1	Robots manipulateurs	11
2.2	Préhenseurs	12
2.3	Robots mobiles	13
2.3.1	Terrestre	13
2.3.2	Volant	13
3	Modélisation et Synthèse	14
3.1	Approche géométrique	14
3.2	Approche géométrico-statique	17
3.2.1	Introduction	17
3.2.2	Origami non-rigide : la tour de Kresling	17
3.2.3	Ligne de pliage en déformation axiale	19
3.2.4	Panneau en flexion	19
3.3	Approche par éléments finis	20
3.4	Méthodologie de conception	21
4	Fabrication	22
4.1	Fabrication	23
4.1.1	Introduction	23
4.1.2	Réalisation mono-matériau	23
4.1.3	Réalisation multi-matériaux	24
4.1.4	Cas de la fabrication additive	26
4.1.5	Compléments	28
4.2	Mise en forme	28
4.2.1	Introduction	28
4.2.2	Stratégie manuelle	29
4.2.3	Stratégie active	29
5	Actionnement et Commande	31
5.1	Les différents actionneurs d'origamis	32
5.1.1	Actionnement thermo-mécanique	32
5.1.2	Actionnement électro-mécanique	32
5.1.3	Actionnement magnétique	33
5.1.4	Les actionneurs pneumatiques/hydrauliques	33
5.2	Changement de forme	33
5.2.1	Actionnement local	33
5.2.2	Actionnement global	34
5.3	Commande des structures origami	34
6	Conclusion et Perspectives	35

Introduction

Les robots origami vont redéfinir notre manière de concevoir et d'utiliser les robots pour créer des robots personnalisables ayant de grandes capacités d'adaptation. Il s'agit ici de décrire les développements robotiques innovants associés, basés sur une nouvelle famille de structures origamis pour des robots ayant une structure mécanique flexible à la fois active, reconfigurable et déformable. Les robots origamis peuvent par exemple être des robots mobiles à locomotion multimodale ayant une structure reconfigurable afin de rouler, voler, voire glisser sur et dans leur environnement. L'efficacité de ces robots est liée aux capacités du roboticien à concevoir, produire, modéliser et commander des structures origami avec actionnement intégré. Les robots origamis peuvent en particulier être pilotés par des micro-actionneurs intégrés au niveau de leurs structures. Il s'agit ici de résumer les bases du développement de futurs robots reconfigurables et déformables, avec la possibilité d'exploiter une structure innovante pour augmenter des capacités robotiques de positionnement, de manipulation, de vol ou de franchissement.

Comme il est décrit dans cet article, la conception et la réalisation de robots origamis est très interdisciplinaire, à l'interface entre plusieurs domaines de recherche tels que la mécanique, la science des matériaux et la robotique. Les robots origamis sont une preuve de concept d'une nouvelle classe de robots à structure déformable de manière dynamique. Pour les développer, des limites dans chacun des domaines mentionnés existent, tout comme à leurs interfaces.

1 Les fondamentaux liés aux Origamis

Dans cette section, les éléments de terminologie et définitions usuelles issues du monde des origamis sont introduits. Les théorèmes et conditions de base ainsi que les motifs élémentaires de pliage sont brièvement décrits, car impactant ensuite la conception de robots origamis. Un focus particulier est mis sur les origamis géométriques en trois dimensions. Des pointeurs concernant les outils de représentation 3D et simulation sont précisés.

1.1 Les origines des origamis et leurs applications

Depuis ses origines en Chine et au Japon, l'art de l'origami a toujours été un artisanat aux possibilités infinies [1]. Il a connu plusieurs révolutions : le développement d'un nouveau langage visuel dans l'art du pliage du papier au XXe siècle, celui d'un langage mathématique pour modéliser le pliage en 3D et, récemment, celui de structures mécaniques qui se plient toutes seules dans le domaine dit de la matière programmable. La conception de structures basées sur l'origami est entrée dans une nouvelle ère lorsque des micro-actionneurs tels que les polymères électro-actifs (EAP) et les alliages à mémoire de forme (SMA) ou les polymères à mémoire de forme (SMP) ont été introduits afin de rendre les structures auto-déployables [2, 3], ce qui a permis de changer de forme de manière dynamique.

L'usage des origamis peut trouver des applications dans de nombreux domaines. La robotique est un domaine grandissant de leur utilisation. On peut aussi en trouver dans bien d'autres domaines car l'étude des origamis c'est l'étude de trois objets géométriques bien distincts mais entièrement dépendants les uns des autres :

- les **liaisons mécaniques** définies par des barres rigides reliées entre elles par des pivots. Il ne peut pas y avoir de croisement entre les barres hormis dans des plans différents.
- le **papier** qui ne peut pas être étiré, déchiré et coupé.
- les **polyèdres** constituant la forme finale de l'origami, un fois tous les plis réalisés. Il existe d'ailleurs un problème ouvert décrit dans la figure 1 pour passer d'un polyèdre à un motif à plat 2D indiquant les plis.

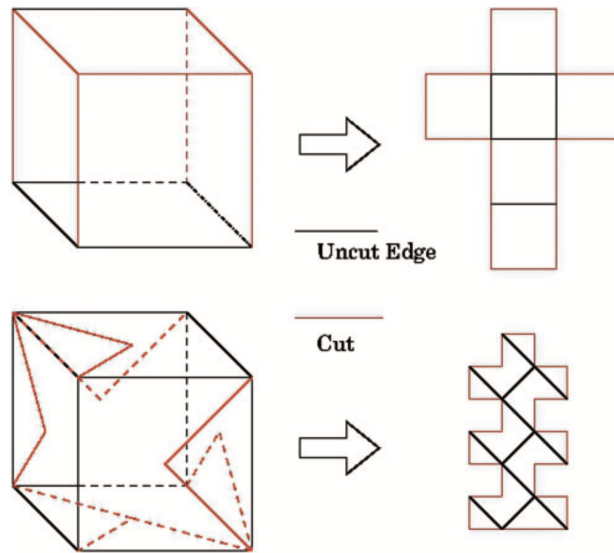


FIGURE 1 – Exemple illustrant le passage d'un polyèdre à un motif de plis 2D *et vice versa* en appliquant des plis (traits noirs) aux endroits adéquats. Il est possible d'obtenir la même forme finale à partir de différents motifs de plis. Il n'y a donc pas d'unicité de motifs de plis pour une forme finale donnée. ([4])

A travers l'étude des trois objets cités précédemment, on peut trouver des domaines d'applications des origamis très variés tels que :

- l'infographie : lorsqu'il s'agit d'animer des objets de synthèse pour les faire changer de forme ou de calculer par interpolation des mouvements d'objets complexes composés de multiples liaisons mécaniques.
- la mécanique : modélisation et mise en oeuvre d'objets capables de se plier ou de se déployer [5, 6]
- la fabrication : l'art de plier des tôles de métal par emboutissage et donc par pliage
- l'architecture : la tour Bahr Towers à Abu Dhabi (Émirats Arabes Unis) est équipée d'un système d'ombrage adaptatif pour chacune de ses fenêtres (cf. figure 2). Les origamis ont été utilisés ici pour créer des surfaces reconfigurables servant d'obturateur de la lumière du soleil ([5]).
- le biomédical : comme montré dans la figure 2, le motif appelé water-bomb a été utilisé pour le déploiement de stent dans les artères ([7])
- la biologie : il semble exister des similitudes entre le repliement des protéines et certaines structures origamis ([8])
- le spatial : le motif de Miura-ori ([9]) a été utilisé pour le déploiement de panneaux solaires dans l'espace.

La figure 2 montre la polyvalence et la diversité des structures de pliage qui peuvent conduire au développement de structures innovantes en les associant à des micro-actionneurs. Les mécanismes économes en énergie basés sur les origamis peuvent inclure des propriétés mécaniques de *bistabilité* ([10, 11]) résultant des effets de flambage ou de la cinématique bio-inspirée basée sur des mécanismes de plante carnivore ([12, 13]) : l'énergie n'est requise que très transitoirement dans ces dispositifs pour plier les structures auxquelles sont fixés les micro-actionneurs.

Des techniques inspirées de l'origami ont récemment été utilisées pour créer des structures tridimensionnelles en pliant des matériaux bidimensionnels ([3, 14, 15]). Il existe de nombreuses techniques de production planes, telles que la découpe laser et la lithographie, qui peuvent être utilisées pour créer des composites (cf. section 4). Les méthodes basées sur les techniques de fabrication additive

3D présentent également de grands avantages, notamment dans le choix des matériaux puisque plusieurs couches composées de matériaux différents (plus ou moins souples) peuvent être déposées successivement, c'est-à-dire en un seul processus.

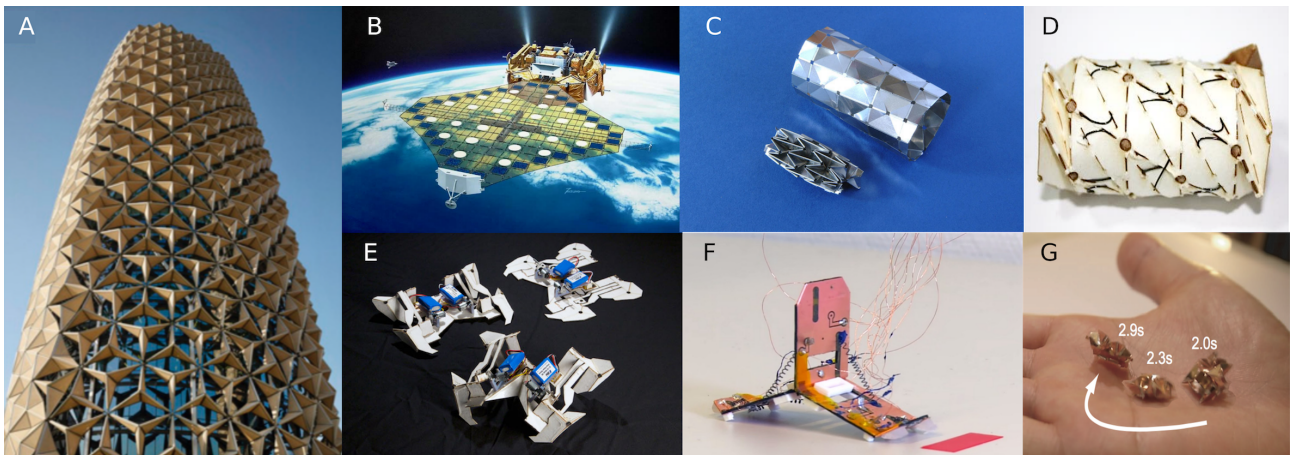


FIGURE 2 – Sept exemples emblématiques d'applications de l'origami. a) Rideaux déployable pour le contrôle de la lumière intérieure, Al Bahr Towers, Abu Dhabi, Émirats arabes unis [16]. b) Panneau solaire Miura-ori [17]. c) Prototype de stent cardiaque [18]. d) Structure auto-déployable avec actionneurs en alliage à mémoire de forme (SMA) [7]. e) Robot marcheur auto-pliant [19]. f) Robot mobile Tribot pouvant sauter et ramper [20]. g) Micro-robot auto-pliant contrôlé à distance par champ magnétique [21]

1.2 Pliabilité d'un origami

Avant d'aborder les propriétés des origamis et notamment leur pliabilité, c'est-à-dire le fait de plier un certain motif respectant les contraintes décrites précédemment au niveau des liaisons et du papier (matériau) utilisé, il faut d'abord définir la terminologie décrivant un origami :

- pli : ligne ou courbe dessinée sur le papier (substrat)
- motif de plis : ensemble de plis dessinés sur le papier
- état plié : origami dans son état final
- pli en montagne : côté du dessus du papier se touchant
- pli en vallée : côté du dessous du papier se touchant

Comme montré dans la figure 3a, il vaut mieux utiliser un papier bicolore présentant une couleur différente sur chacun de ses côtés (dessus et dessous). En général comme montré dans les figures 3c et 3d, les traits rouges représentent les plis en montagne et en bleu les vallées. Il peut exister aussi une convention entre traits pleins et traits pointillés pour différencier montagnes et vallées.

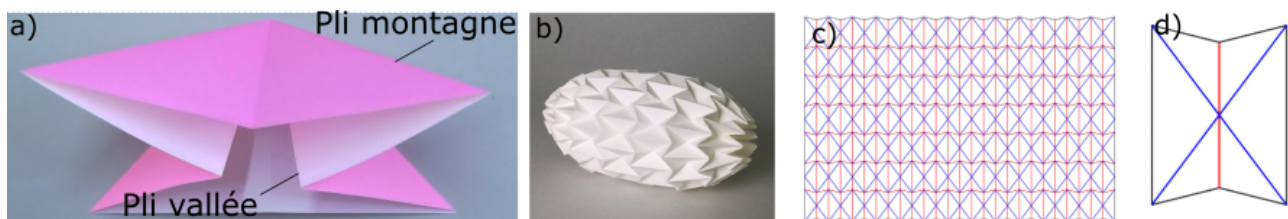


FIGURE 3 – a) Exemple de pli de type "water bomb". b) Magic ball basé sur une distribution du motif "water bomb". c) Motif à plat de la magic ball. d) Représentation schématique du motif "water bomb".

Avant d'aborder les propriétés de pliage de origamis, on peut de manière très simplifiée parler de la rigidité des liaisons mécaniques. La figure 4 illustre trois configurations simples d'articulations où pour chaque cas deux questions sont posées : est-ce complètement rigide dans le plan (2D) ou en 3D ou est-ce flexible en 2D ou en 3D ? Il existe de nombreux théorèmes pour prouver qu'un ensemble d'articulations est rigide ou flexible. Ici la notion de flexibilité signifie que l'ensemble des articulations peut se déplacer selon un mouvement complexe ([22, 6]). On peut aussi savoir comment agir sur les liaisons pour rendre l'assemblage rigide ou pliable. Par contre le passage en 3D de rigide à flexible ou comment trouver de manière systématique un configuration pour rendre flexible un assemblage rigide en 3D reste un problème ouvert. Ces problèmes sont fondamentaux notamment pour des applications robotiques car leurs solutions permettent d'insérer de la rigidité ou au contraire de la flexibilité à un mécanisme en fonction de l'application visée.

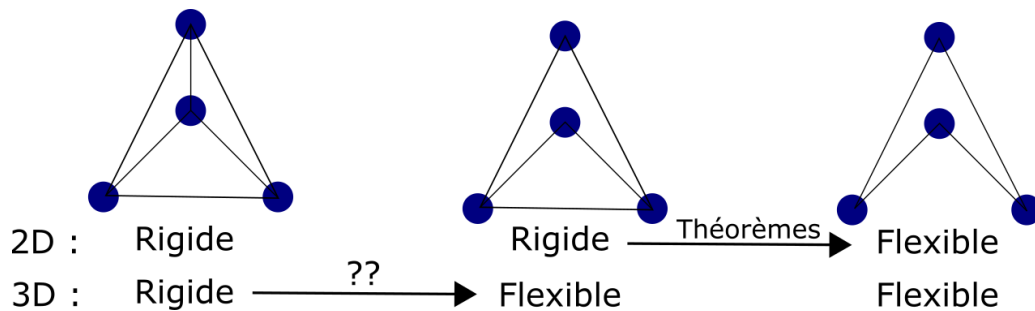


FIGURE 4 – Trois exemples d'assemblage d'articulations formées de barres rigides reliés par des liaisons rotule. La flexibilité 3D signifie ici qu'un mouvement hors du plan de la feuille est possible. Le passage rigide vers flexible dans le plan est bien décrit dans la littérature ([22]). L'équivalent en 3D reste un problème ouvert.

La représentation circulaire des motifs de plis autour de chaque sommet d'un origami telle que celle de la figure 5 va nous permettre d'aborder une propriété fondamentale des origamis à savoir la pliabilité à plat. Est-ce qu'il est possible à partir du motif de plis de savoir si un origami quelconque une fois plié pourra être plié à plat ? Cette propriété revient à étudier la faisabilité d'un origami et va avoir des conséquences importantes sur la modélisation et la simulation du pliage d'un origami. Nous nous intéressons ici au cas d'un simple sommet. L'étude de la pliabilité à plat d'un origami complexe composé de nombreux sommets est un cas extrêmement complexe (problème de classe NP) qui dépasse largement le cadre de cet article.

La notion de pliabilité d'un origami commence par l'analyse des sommets des plis d'un origami quelconque. La figure 5b montre qu'il est possible, même à partir d'un origami complexe dans son état final d'extraire une forme locale pliée et d'en tirer à partir du sommet une distribution angulaire de plis une fois mis à plat, ce qui constitue le motif de plis. Par convention, comme indiquée dans la figure 6, les secteurs angulaires sont ordonnés selon le sens inverse des aiguilles d'une montre. Ce qu'il importe de voir ici, c'est que chaque secteur est connecté de la même manière à ses voisins, que ce soit à plat ou dans la configuration pliée. Cependant, selon le motifs de plis, certains secteurs angulaires correspondent à la face du dessus du papier ou à la face du dessous, ce qui a d'importantes conséquences par la suite. En outre, lorsque l'on s'intéresse à la conception d'origamis pour la robotique, il est important de disposer de critères permettant de savoir si un origami est rigidement pliable ou pas ou encore si il peut être pliable à plat une fois dans son état final. Pour cela il suffit d'appliquer le théorème de Kawasaki-Justin suivant : pour un sommet composé de secteurs consécutifs $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$ (N doit être pair) alors le motif de plis peut se plier à plat si et seulement si :

$$\theta_1 - \theta_2 + \theta_3 - \theta_4 + \dots - \theta_N = 0 \quad (E0.1)$$

Le théorème de Kawasaki-Justin (KJ) est un outil majeur dans l'arsenal des théorèmes pour créer des origamis pliés à plat. Le théorème de KJ traite des secteurs angulaires mais pas de la distribution

des types de plis auour d'un sommet. Pour cela, il faut considérer le théorème de Maekawa-Justin (MJ) suivant : pour n'importe quel sommet pliable à plat, considérons M le nombre de plis en montagne et V le nombre de plis en vallée, alors

$$M - V = \pm 2 \quad (E0.2)$$

Non seulement le théorème de MJ permet de valider la pliabilité à plat d'un origami mais permet aussi de guider le concepteur partant d'un nombre fixe de plis en vallée et en montagne de manière à ajouter les plis menant à la fin à un pliage à plat. Il n'est pas question ici d'aborder l'ensemble des théorèmes (au total 7) associés à l'étude de la pliabilité à plat des origamis. ces théorèmes sont largement décrits dans le livre de Robert Lang ([23]). Dans la partie 1.3, nous allons nous intéresser aux motifs d'origamis élémentaires susceptibles d'intéresser le roboticien dans la conception d'origamis 2D et 3D géométriques déformables selon certaines directions et à mouvements plus ou moins complexes.

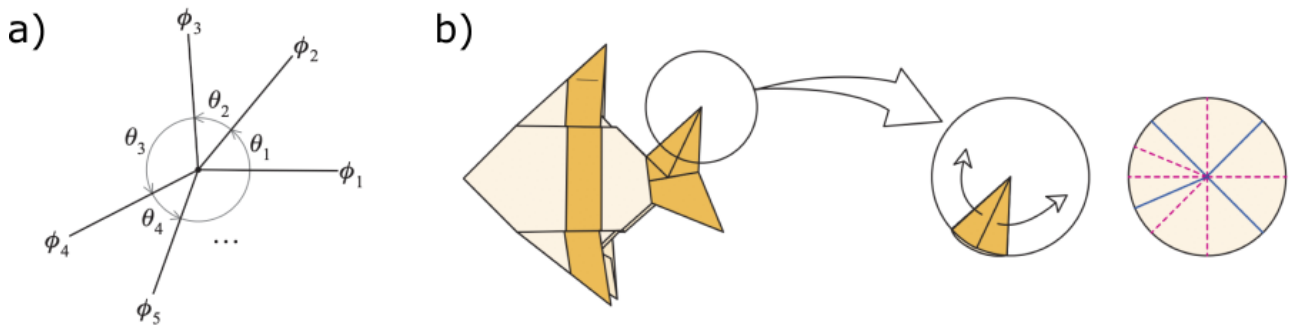


FIGURE 5 – a) Origami comportant des secteurs nommés θ_i et des orientations de plis nommées ϕ_i . b) Gauche : découpe d'un sommet d'un origami complexe dans sa version pliée. Milieu : découpe circulaire du morceau. Droite : le motif des plis après dépliage vue de "dessus" (montagne en bleu et traits pleins, vallée en rouge et traits pointillés). Adapté de [23]

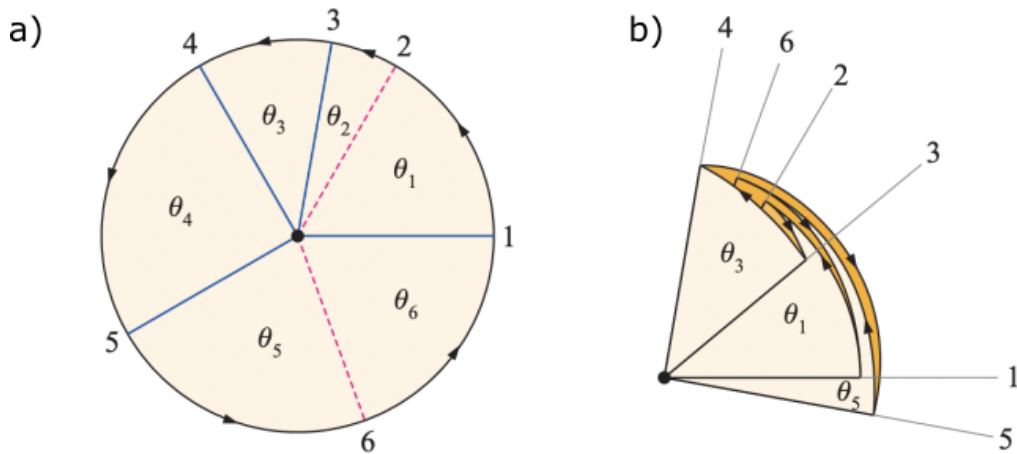


FIGURE 6 – a) Représentation schématique d'un sommet d'un origami comportant des secteurs nommés θ_i et des orientations de plis nommées ϕ_i . L'ordre des secteurs se dans l'ordre inverse des aiguilles d'une montre. b) Motif des plis après pliage. Adapté de [23]

Enfin pour analyser la pliabilité en 3D d'un sommet, il est aussi possible d'adopter un autre mode de représentation basé sur la sphère de Gauss. Considérons un point sur la surface de l'objet 3D

de la figure 7 (ici un cube) et dessinons un contour fermé C en suivant le sens inverse des aiguilles d'une montre. À chaque point lisse de la surface, il existe un vecteur normal bien défini, qui est perpendiculaire au plan tangent. Lorsque nous suivons le chemin autour du contour C , la direction du vecteur varie dans l'espace le long du chemin. Lorsque le vecteur normal change le long de la trajectoire, sa position sur la sphère de Gauss change. Si nous considérons le vecteur normal comme une flèche dont la queue est fixée au centre de la sphère de Gauss, lorsque le vecteur normal change d'orientation, sa pointe tracera un chemin différent sur la surface de cette sphère. Ce nouveau contour sur la sphère de Gauss est appelé la trace du chemin original, et nous le désignons par C' . Ainsi pour le cube de la figure 7, chaque arc de cercle (en vert) de la sphère de Gauss va correspondre à une arête du cube tandis que les angles entre chaque arc de cercle vont représenter les angles entre chaque face. De la même manière, le motif de Miura-ori peut être représenté dans la sphère de Gauss par 4 arcs de cercle ayant des signes différents car associés à des plis en vallée et montagne. Ainsi, en raison de la dualité entre le contour du sommet et la trace, les angles de secteur sur le sommet deviennent des angles entre les arcs de la trace, tandis que les angles de pliage du sommet deviennent les arcs de polygone sphérique de la trace le long du contour C' .

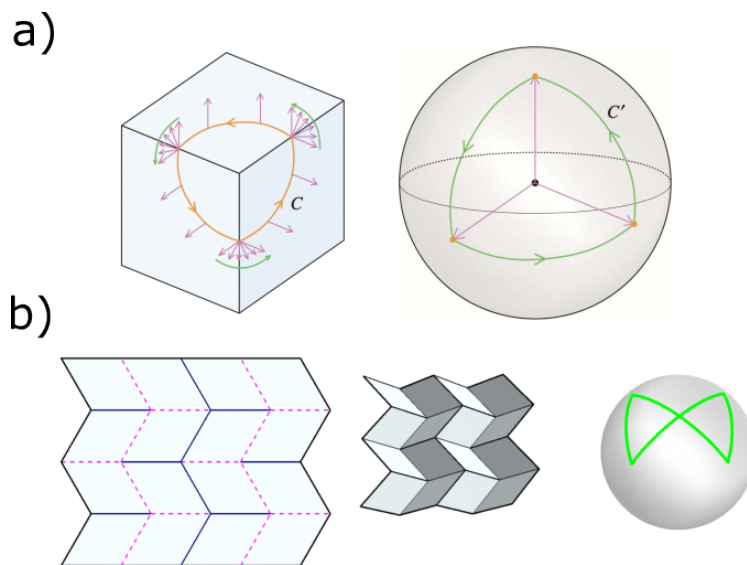


FIGURE 7 – a) Contour le long d'un cube montrant le changement de l'orientation du vecteur normal le long du contour C et représentation de l'évolution du même vecteur normal dans la sphère de Gauss le long du contour C' . b) (gauche) Motif de plis Miura-ori, (centre) version pliée et (droite) représentation dans la sphère de Gauss. Adapté de [23]

1.3 Exemples d'origamis 2D et 3D pour la robotique

Il ne s'agit pas ici de donner une vision exhaustive des origamis susceptibles d'intéresser le roboticien mais plutôt de présenter quelques motifs élémentaires aux propriétés et applications intéressantes pour la robotique [24]. Le motif Miura-ori, le motif "water-bomb", le motif Yoshimura et le motif diagonal sont tous des motifs communs rigidement pliables. La figure 8 montre ces quatre motifs de plis, qui peuvent être tessellés pour former des structures à n'importe quelle échelle. Les principales caractéristiques qui distinguent ces motifs sont les suivantes : le "water-bomb" et les motifs Miura-ori peuvent se déployer et se contracter dans toutes les directions, le motif Yoshimura est capable d'effectuer des mouvements de translation et le motif diagonal est capable d'effectuer des mouvements de rotation. Le motif diagonal peut aussi être associé à la tour de Kresling dont la dynamique est décrite en détails par Kidambi et Wang [25] et la cinématique par Berre et al. (citeBerre2021 qui ont aussi modélisé le flambage existant le long des lignes de plis. Il d'ailleurs intéressant de noter que

ce flambage est fonctionnel car il permet à la tour de se compresser lors du mouvement de torsion, ce n'est donc pas un pliage complètement rigide.

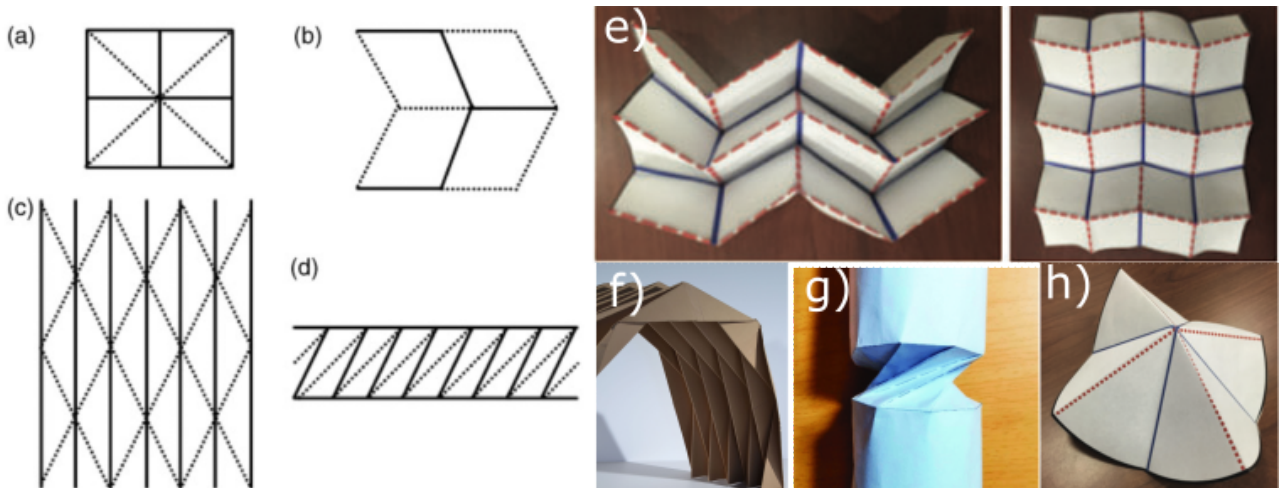


FIGURE 8 – a) Motif "water-bomb". b) Motif Miura-ori. c) Motif Yoshimura. d) Motif diagonal. e) Exemple de Miura-ori. f) Exemple de Yoshimura. g) Exemple de motif diagonal qui peut s'obtenir naturellement par torsion d'un cylindre de papier. h) Motif "water-bomb". (Traits pointillés indiquent les plis en montagne et traits continus indiquent les plis en vallée).

1.3.0.1 Motif Miura-ori Le motif Miura-ori est auxétique, c'est-à-dire qu'il présente un coefficient de Poisson négatif (ainsi que lorsque le motif est étiré dans une direction, la feuille pliée se dilate dans la direction orthogonale, plane), une pliability à plat et rigide et un actionnement à un seul degré de liberté. Il a été inventé pour être utilisé dans les panneaux solaires spatiaux ([9]). Le motif Miura-ori a largement été utilisé dans l'ingénierie ([17, 26]). On peut retenir trois propriétés extrêmement intéressantes du motif Miura-ori :

- il peut se déployer selon deux directions orthogonales et son déploiement est homogène dans chaque direction
- il ne possède qu'un seul degré de liberté de mouvement quelle que soit sa taille
- son déploiement et sa rétraction suivent le même chemin

1.3.0.2 Motif Water-bomb Le motif "water-bomb" a des applications dans le domaine des matériaux intelligents et de l'actionnement grâce à sa géométrie simple et de ses multiples configuration de mouvement. Ce motif est généralement utilisé comme base pour des conceptions plus complexes. Le motif "water-bomb" est également pliable à plat et, lorsqu'il est tessellé, il crée un segment de contraction axiale avec un coefficient de Poisson négatif entre les directions radiales et axiales.

1.3.0.3 Motif Yoshimura Le motif de Yoshimura est une tessellation de diamants, avec soit tous les plis de montagne, soit tous les plis de vallée le long des diagonales. La courbe de la feuille après pliage, qui donne le rayon d'un cylindre ou d'une courbe, dépend de la forme des diamants du motif. Une variation hexagonale de ce motif de plis est également possible si des plis supplémentaires sont effectués le long des diagonales des diamants.

1.3.0.4 Motif diagonal Le motif diagonal est également couramment utilisé dans les cylindres de pliage. Cependant, au lieu de se contracter en translation, il tourne lorsqu'il s'effondre. Il a été observé pour la première fois comme la réaction naturelle du papier lorsqu'une torsion est appliquée

à un cylindre en papier. Le motif de plis est constitué de parallélogrammes qui sont pliés dans une direction le long de leurs diagonales et dans la direction opposée le long de leurs parallèles comme montré dans la figure 8d.

1.3.0.5 Origamis dits non pliables Il existe toute une classe d'origamis dits non pliables mais néanmoins pliables sous certaines contraintes mécaniques car il existe dans ces pliages une compétition entre le nombre de degrés de liberté internes N_f et le nombre de contraintes mécaniques internes N_c . Si l'on considère par exemple le motif appelé "square twist" est isostatique (cf. figure 9), on peut en appliquant l'équation E0.3 issue de la caractéristique d'Euler en déduire que le nombre de degré de liberté est nul ([27]) :

$$\text{DOF} = N_{E,b} - 3 - \sum_{N_{f,i} > 3} (N_{f,i} - 3) \quad (\text{E0.3})$$

avec $N_{E,b}$ le nombre de bords extérieurs du motif (ici 12), $N_{f,i}$ le nombre de bord de la $i^{\text{ème}}$ facette (ici 4) pour ici 9 facettes ($i = 1 \dots 9$).

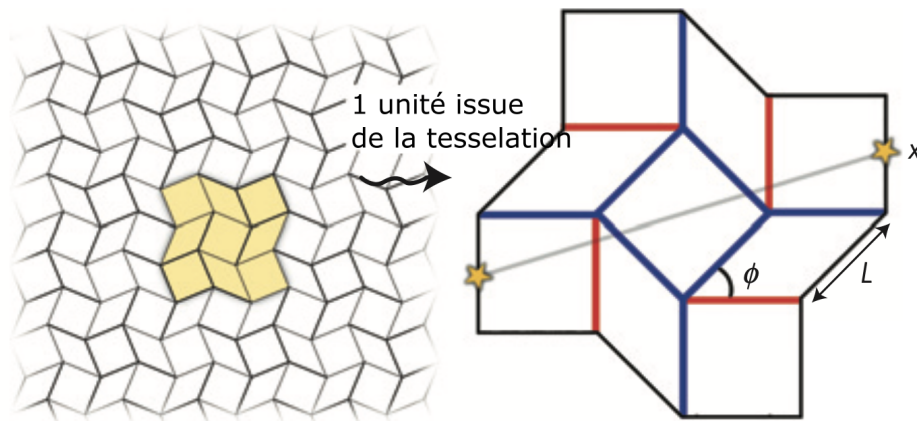


FIGURE 9 – Motif "square twist" caractérisé par trois paramètres : L , Φ et la distance x . Cet origami n'est pas pliable au sens rigide du terme car il est isostatique si l'on analyse ses degrés de liberté. Cependant il peut quand-même prendre une forme carré dans son pliage final à plat grâce à la déformation du matériau le constituant (adapté de [27]).

Bien que la pliability rigide semble être une simplification raisonnable du comportement de pliage, le fait que les matériaux réels puissent se plier est une pièce essentielle de l'étude de ce type d'origami dits non pliables au sens mathématique tel que défini précédemment. En fait, il n'existe actuellement aucune approche générale permettant de comprendre et de prédire le comportement mécanique des structures d'origami lorsque leurs propriétés matérielles sont prises en compte. Par exemple, en présence d'un motif non rigidement pliable, il est possible de le transformer en un motif rigidement pliable par une simple stratégie : le forcer à se plier, chercher les facettes qui se courbent, puis ajouter un pli le long de la courbure. Parfois, cela fonctionne, parfois non. Un motif où cette méthode de forçage fonctionne très bien est la torsion du motif $(MV)^2$. Le fait de forcer son ouverture et sa fermeture induit très clairement un pliage le long de l'une ou l'autre diagonale du carré central ; en ajoutant explicitement ce pliage diagonal, comme dans la figure 10, nous retrouvons la pliability rigide, et le mouvement a ici un seul degré de liberté (6 facettes et 9 bords extérieurs).

A retenir :

- Des théorèmes mathématiques permettent de savoir si un origami est pliable à plat ou non (pliability)

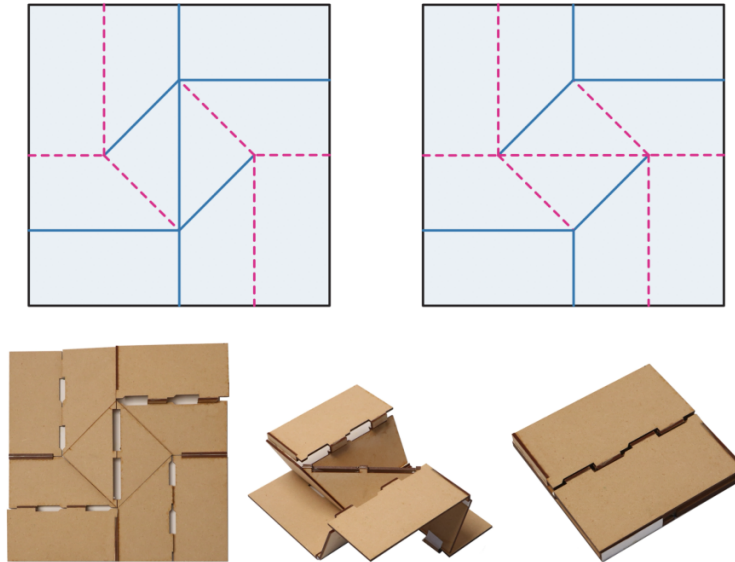


FIGURE 10 – a) Motif appelé $(MV)^2$ qui n'est normalement pas rigidement pliable mais rendu ici pliable par l'ajout d'un pli (montagne ou vallée) dans la diagonale du carré central (adapté de [28]). b) Mise en oeuvre du pliage ici en plaques de bois (médium) découpées au laser.

- Des représentations géométriques (angles, contours) permettent de rendre compte de la pliability d'un origami.
- Des origamis dits non pliables peuvent quand même se plier par déformation locale des liaisons générant des propriétés de monostabilité ou bistabilité.

2 Panomara des robots Origamis

L'état de l'art des dispositifs, aujourd'hui considérés au stade de preuves de concept, est ici présenté. Les robots origami sont créés à l'aide de procédés de pliage, qui constituent une approche simple pour fabriquer un large éventail de morphologies de robots. Ils peuvent également résulter d'une fabrication 3D dont la forme s'inspire d'un motif origami défini précédemment. Par la suite, nous proposons de classer les robots suivant leur fonction : positionnement, préhenseur et robot mobile. Ces fonctions restent valables quelle que soit l'échelle considérée.

2.1 Robots manipulateurs

Les robots manipulateurs ou de positionnement permettent d'atteindre une position et une orientation donnée dans leur espace de travail. Ils assurent le déplacement d'un outil qui se trouve à leur extrémité et interagissent avec leur environnement si la tâche effectuée le requiert. Les différentes réalisations montrent que les robots à base d'origami existent pour les différentes géométries : série [29], parallèle [30] et continûment déformable [31], comme l'illustre la Figure 11. Les robots parallèles à base d'origami sont beaucoup plus développés car ils bénéficient de l'actionnement localisé à la base [32, 33, 34, 35, 36]. Une étude récente a proposé la conception et la réalisation de la paille souple multistable en origami [11]. Cette structure permet de reproduire un structure cylindrique flexible ayant des propriétés de variation de longueur et de changement de rayon de courbure tout en maintenant une courbure donnée même en l'absence d'efforts externes (multistabilité). Cette multistabilité du cylindre déformable pourra avoir ici de multiples applications pour la conception de robots manipulateurs.

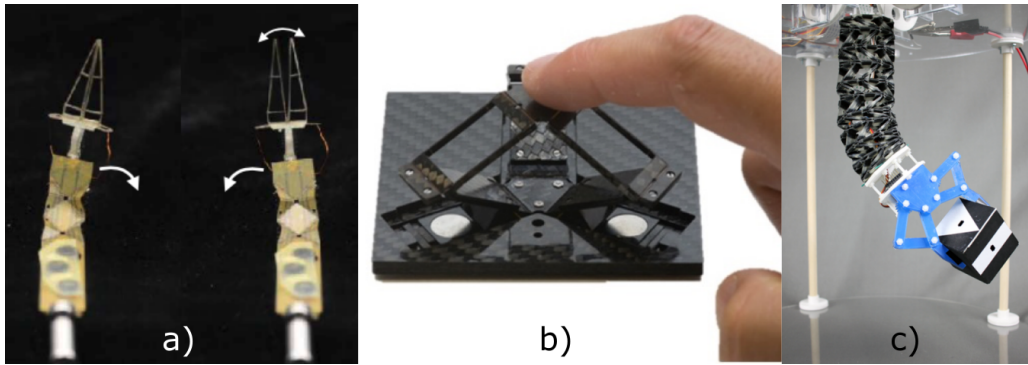


FIGURE 11 – Exemples de robots origami avec les différentes géométries : a) robot série à 4 degrés de liberté [29], b) robot parallèle à 3 degrés de liberté [30], et robot manipulateur continûment déformable à actionnement par câble à 2 degrés de liberté [31].

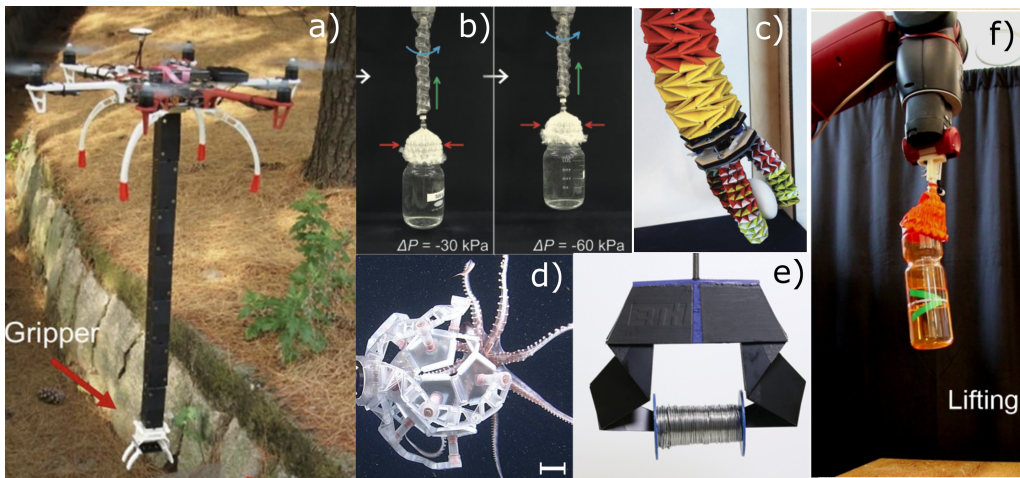


FIGURE 12 – a) Robot volant utilisant un bras téléscopique composé d'éléments origamis auto-verrouillable ([37]). b) Préhenseur pneumatique basé sur un origami de type zig-zag. ([38]) c) Préhenseur basé sur un origami de type "twisted tower" ([39]) d) Dodécaèdre articulé utilisé ici comme récolteur d'échantillons. ([40]) e) Préhenseur utilisant un motif de pliage inspiré des ailes de la forficule ([41]). f) Préhenseur pneumatique basé sur un origami de type "magic ball" ([42]).

2.2 Préhenseurs

Les robots dits préhenseurs ("gripper") occupent une place de choix dans la gamme des robots réalisables en origami. En effet, ce type de structure offre naturellement les déformations adéquates tout en assurant une flexibilité, une souplesse et une robustesse très bien adaptées à la fonction de préhension. On peut classer la préhension en différents types : la préhension multi-digitale qui s'appuie sur les forces de frottement produites entre les doigts et l'objet, et la préhension englobante où une forme complexe vient épouser la forme de l'objet. La figure 12 illustre la diversité des solutions envisagées pour la mise en oeuvre de préhenseurs à base d'origamis. Là encore, on retrouve une certaine dualité entre l'utilisation de motifs 2D rigidelement pliables et l'impression 3D directe d'origamis articulés.

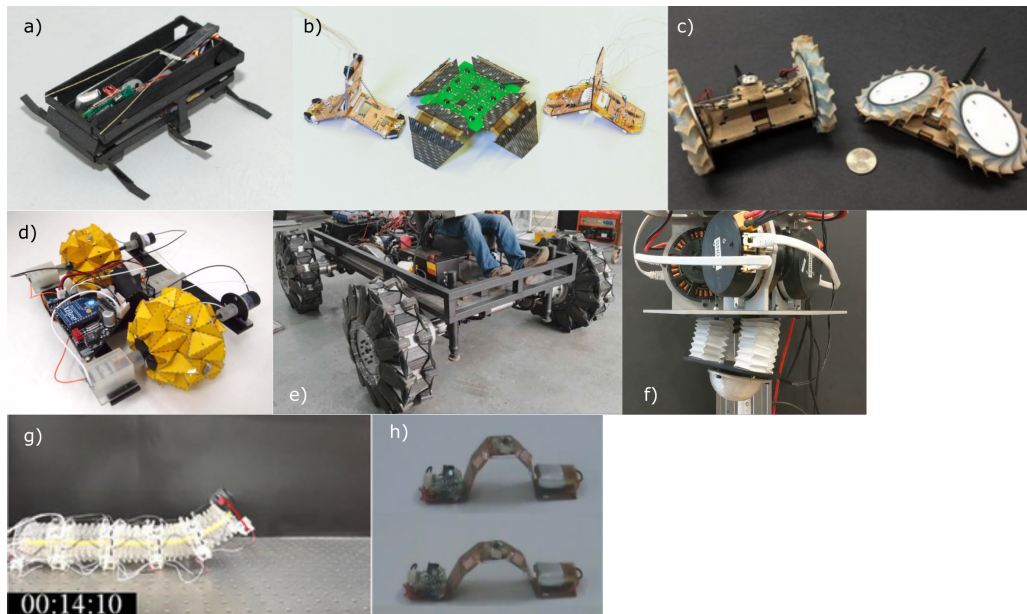


FIGURE 13 – Robots terrestres : a) à six pattes [43], b) la famille Robogami [3] à quatre pattes et Tripod [20], c) robot A-PUFFER ("*Autonomous Pop-Up Flat Folding Explorer Robot*") de la NASA, d) robot à roues à diamètre variable [44] et e) la version à grandes charges [45], f) robot sautant [46], g) robot rampant [47], et h) robot chenille [48].

2.3 Robots mobiles

2.3.1 Terrestre

Lorsque l'on s'intéresse à la robotique terrestre à base d'origamis, on peut constater que leur utilisation se retrouve dans tous les types de locomotion de la robotique mobile. Comme illustré dans la figure 13, il existe des robots rampants, des robots marcheurs, des robots sauteurs et même des robots roulants dont la roue peut changer de diamètre (motif "magic ball"). Tout l'intérêt de l'utilisation des origamis réside dans la possibilité de doter ces robots terrestres de capacités de transformation ou de changement de forme sans pour autant complexifier leurs structures. C'est pour cette raison que les origamis ont toute leur place dans une robotique reconfigurable à la locomotion multimodale telle que l'on pourra l'envisager dans la robotique mobile du futur.

2.3.2 Volant

La figure 14 montre quelques exemples de robots volants à voilure fixe ou tournante équipés de structures souples basées sur des motifs origamis. L'origami ici ou plus simplement les plis permettent à ces robots d'avoir une structure souple déformable pour encaisser les chocs notamment en cas de crash. Ils permettent aussi aux robots à voilure fixe de replier ou déployer leurs ailes à la manière de leur modèle biologique animal.

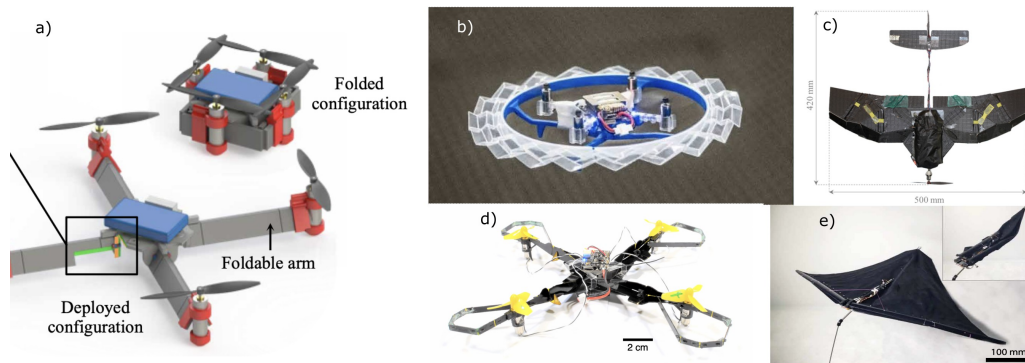


FIGURE 14 – a) Robot quadrirotor pliable grâce à l’emploi de liaisons élastiques ([49]). b) Robot disposant d’un carénage en origami (Miura-Ori) ([50]) c) Robot à voilure fixe capable de se replier ([51]). d) Quadrirotor dont les moteurs sont protégés par des structures origamis ([52]) e) Voilure fixe dont la structure peut se déployer à la manière des élytres de la coccinelle ([53]).

A retenir :

- Les applications des origamis en robotique sont multiples tant au niveau des actionneurs que des structures.
- Les origamis permettent de simplifier la mise en œuvre de déformations structurelles de grande amplitude.
- Les origamis ont toute leur place pour la mise en œuvre de robots mobiles reconfigurables à locomotion multiple.

3 Modélisation et Synthèse

Comme pour tout système robotique, la maîtrise d’un robot construit sur la base d’origamis passe par la mise en place de modèles pour décrire son comportement. Pour des architectures poly-articulées conventionnelles, les modèles d’intérêt sont ceux liant l’état des liaisons actionnées aux variables décrivant l’état de l’effecteur. Le lecteur pourra se référer à [S7730] pour retrouver la définition des modèles géométriques, cinématiques et dynamiques. Les modèles disponibles pour les origamis sont essentiellement de nature géométrique. Cela est lié d’une part à la complexité de ces structures, pour lesquelles des travaux sont encore en cours pour compléter les techniques de modélisation et disposer notamment d’informations sur leur dynamique [54]. D’autre part, force est de constater que les applications sont pour l’instant souvent des applications où les vitesses et accélérations sont assez limitées, comme visible en section 2, aussi la modélisation géométrique permet-elle déjà d’avancer largement dans le dimensionnement adéquat d’un origami pour une tâche donnée.

Dans la suite, nous allons présenter les trois approches de modélisation qui sont communément utilisées dans la littérature : géométrique, géométrico-statique et les éléments finis. Après une introduction de l’approche, l’application à un cas d’étude est discutée. Ensuite, les outils logiciels pour les mettre en œuvre sont répertoriés.

3.1 Approche géométrique

Nous ne discuterons pas dans cet article de la recherche de la forme 3D pour un patron 2D donné. Le lecteur pourra considérer des références comme [55], [23] pour ce volet. Pour le cas de la robotique, il est surtout intéressant de se concentrer sur la recherche du modèle liant l’état des plis à l’état de l’élément utile de l’origami qui sera exploité pour le robot ainsi conçu. L’état de départ est donc la forme 3D obtenue après pliage.

Dans le cas d'un origami rigidement pliable, une voie simple pour mettre en place un modèle géométrique est de considérer chaque pli comme une articulation, et chaque panneau comme un élément rigide. Considérons par exemple l'interface haptique développée dans [30] (figure 11b). Pour cette interface (figure 15), la structure est celle d'un robot parallèle Delta [S7768]. Considérer les plis comme de simples articulations conduit à pouvoir utiliser les méthodes classiques en robotique de modélisation géométrique pour disposer du modèle liant l'état des moteurs pilotant les liaisons situées sur la base du dispositif avec l'état de l'effecteur, qui est alors défini par 3 coordonnées de position.

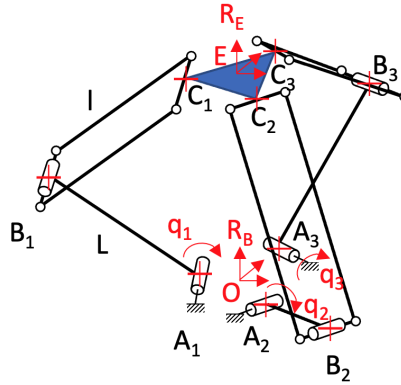


FIGURE 15 – Modèle associé au mécanisme parallèle de type Delta utilisé dans [30]

On peut en effet pour l'exemple de l'interface haptique mettre en place rapidement un modèle liant position de l'effecteur et état des liaisons actives. Ainsi, en s'appuyant sur la vue de droite de la figure 15, on a la longueur l des éléments de type parallélogramme articulé qui peut s'exprimer pour chaque jambe i , $i \in 1, 3$ comme :

$$l = \|\overrightarrow{B_i C_i}\| = \|\overrightarrow{B_i A_i} + \overrightarrow{A_i O} + \overrightarrow{O E} + \overrightarrow{E C_i}\| \quad (E0.4)$$

Le mécanisme Delta permet une translation spatiale de l'effecteur par rapport à la base. On a donc les termes $\overrightarrow{E C_i}$, $\overrightarrow{A_i O}$ qui sont constants lorsqu'ils sont exprimés dans le repère de base R_B . Par ailleurs le vecteur $\overrightarrow{O E}$ exprime dans ce même repère la position de l'effecteur, donc les coordonnées opérationnelles X . Finalement les termes $\overrightarrow{A_i B_i}$ se projettent simplement dans le repère de base en fonction des variables articulaires pilotées q_i , $i \in 1, 3$. Les 3 relations contenues en (E0.4) permettent donc de disposer du modèle géométrique inverse.

Une telle modélisation est d'une précision satisfaisante seulement si la raideur des panneaux et des plis est d'une influence limitée. Pour le mettre en avant, on peut prendre l'exemple du système développé dans [56], celui d'un robot mobile dont les pattes sont obtenues par pliage à partir d'une forme 2D. Le robot est composé de plusieurs chaînes cinématiques ouvertes en partant du corps du robot pour aller vers l'extrémité de chaque patte. Il est donc assez simple de mettre en place un modèle géométrique liant l'état des liaisons actionnées à la position des extrémités des pattes. Pour l'exploiter, la souplesse du matériau exploité pour la structure doit cependant rester négligeable. Si ce n'est pas le cas, il n'est plus possible de considérer les segments du robot comme rigides : cela pose une difficulté dans la modélisation, et aussi dans l'utilisation du robot comme les déformations des segments peuvent devenir significatives. Dans [56], l'approche proposée est de compléter la patron, avec des plis passifs pour réaliser des structures en caisson de raideur améliorée.

Pour appréhender l'impact de l'utilisation d'une structure en caisson, on peut, comme le font les auteurs, observer le ratio entre la raideur de liaison, donc du pli, et de l'élément structural qu'est le caisson. Pour une liaison conçue comme sur la figure 17, en réalisant des ouvertures régulières le

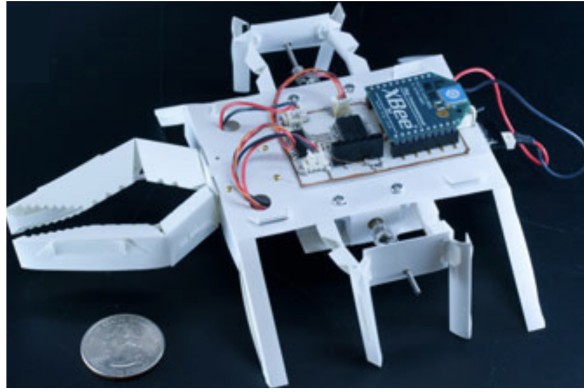


FIGURE 16 – Robot mobile multi-pattes [56].

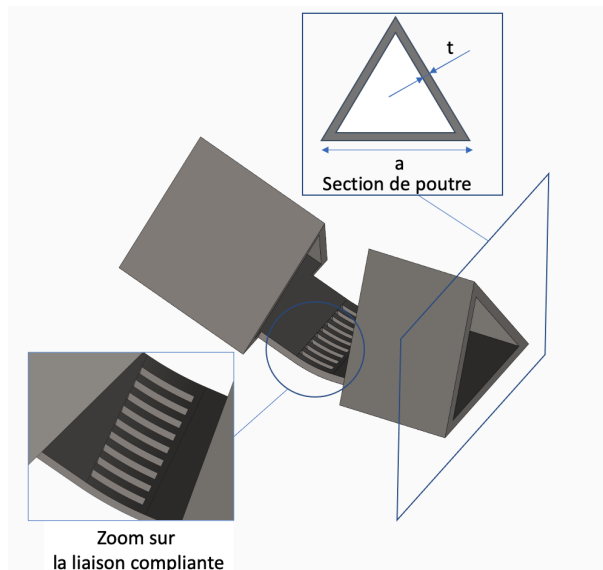


FIGURE 17 – Modification pour assurer le bon comportement des plis et panneaux, exemple issu de [56]

long de l'axe du pli, la raideur en flexion peut s'exprimer comme

$$K_{liaison} = \frac{Efat^3}{12l} \quad (E0.5)$$

avec E le module d'Young du matériau, f la fraction de matériau présente au niveau du plai, a la largeur du pli, t l'épaisseur de la feuille exploitée et l la longueur des éléments flexibles qui constituent la liaison. Dans le même temps, la raideur en flexion d'une poutre de section triangulaire de côté a , d'épaisseur t et de longueur l est égale à

$$K_{poutre} = \frac{3Ea^3t}{4l} \quad (E0.6)$$

Le ratio entre les raideurs des 2 éléments pour une même longueur est donc égal à

$$\frac{K_{poutre}}{K_{liaison}} = \frac{9a^2}{ft^2} \quad (E0.7)$$

Pour une liaison dont la largeur représente 10 fois l'épaisseur de la feuille de matériau employé, avec une fraction de découpe de 50%, on a une raideur de structure qui est prédominante. Par ailleurs, la raideur des plis peut aussi avoir une importance. Soit car elle est importante par rapport à la raideur des segments, et la déformation de la structure n'est alors plus concentrée au

niveau des liaisons. Pour éviter cela, la rigidification de la structure au niveau des panneaux est de nouveau utile. La raideur a dans tous les cas un impact potentiel sur les forces et couples requis par les actionneurs du robot pour obtenir les changements de configuration souhaités au niveau du robot. La situation est identique à celle de la conception de robots sur la base de liaisons compliantes, pour laquelle il est nécessaire de mettre en place des modèles géométrico-statiques [57].

3.2 Approche géométrico-statique

3.2.1 Introduction

En introduction de cette partie, nous avons mentionné que les modèles disponibles sont essentiellement géométriques. Nous venons d'y revenir en évoquant le cas où les plis ont une raideur importante, avec une énergie nécessaire pour modifier l'état du robot par déformation élastique qui devient significative. L'autre cas où des modèles purement géométriques ne sont plus exploitables, et le plus important sans doute, est celui des origamis non rigidement pliables. Il n'est alors en effet pas possible, du fait de leur fonctionnement même, de considérer de manière parfaitement séquentielle d'une part le lien entre position des plis et position de l'effecteur, et d'autre part le lien entre raideur des plis et panneaux et raideur globale de l'architecture. Comme pour les mécanismes compliantes exploités par exemple en micro-robotique [58], il est nécessaire de mettre en place des modèles géométrico-statiques pour extraire les informations d'intérêt à la fois pour la conception, donc pour le dimensionnement, et par ailleurs pour la commande ensuite de la structure.

3.2.2 Origami non-rigide : la tour de Kresling

Parmi les origamis non-rigidement pliables, qu'il faut comprendre comme ayant des panneaux qui se déforment pour garantir la pliability, la tour de Kresling est un exemple très représentatif. Elle trouve des multitudes d'applications dans le domaine des sciences de l'ingénieur, scrupuleusement répertoriées par l'inventrice elle-même dans [59]. Son introduction est liée à l'analyse du comportement d'un tube cylindrique soumis à une charge de torsion. Le modèle de Kresling a été proposé par Biruta Kresling [60, 61] dans ce contexte. Les paramètres définissant un motif élémentaire sont présentés sur la Figure 18-a). L'angle entre les deux plis horizontaux, appelé angle de fermeture β , peut être obtenu par la méthode de la géométrie des triangles sphériques :

$$\beta(\alpha) = \pi - 2\arctan\left(\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\tan(\varphi_1)\right) + 2\arctan\left(\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\tan(\varphi_2)\right)$$

avec α l'angle de pliage comme décrit sur la Figure 18-b) pouvant varier de 0° à 180° . Dans la configuration complètement fermée (voir Figure 18-c) , l'angle de fermeture β est donné par

$$\beta = \pi - 2\varphi_1 + 2\varphi_2$$

Un exemple d'un patron pour 2 unités à 6 plis est présenté sur la Figure 19-a) et la forme 3D après pliage 19-b) qui ne peut s'obtenir que sous certaines conditions. Les plis horizontaux forment alors un polygone régulier, de sorte que l'angle de fermeture β doit répondre à la condition suivante :

$$n\beta(\alpha) = (n - 2)\pi \quad (\text{E0.8})$$

avec n le nombre de faces du polygone. En combinant cette équation avec celle de l'angle de fermeture (3.2.2), on obtient :

$$\tan(\varphi_1)\tan(\varphi_2)\tan\frac{\pi}{n}\cos^2\frac{\alpha}{2} + (\tan(\varphi_1) - \tan(\varphi_2))\cos\frac{\alpha}{2} + \tan\frac{\pi}{n} = 0 \quad (\text{E0.9})$$

En particulier, dans la configuration entièrement pliée, où l'angle de pliage est nul, l'équation (E0.9) peut être réécrite comme suit

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\pi}{n} \quad (\text{E0.10})$$

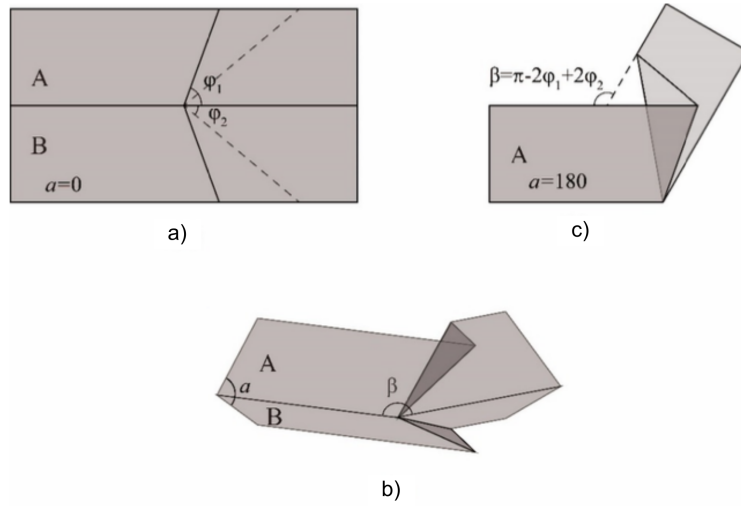


FIGURE 18 – Les règles de base du pliage d'un motif Kresling [62] : a) définition des paramètres, b) évolution de l'angle de pliage α entre les deux plaques A et B, c) le pli en état complètement fermé définissant l'angle de fermeture β .

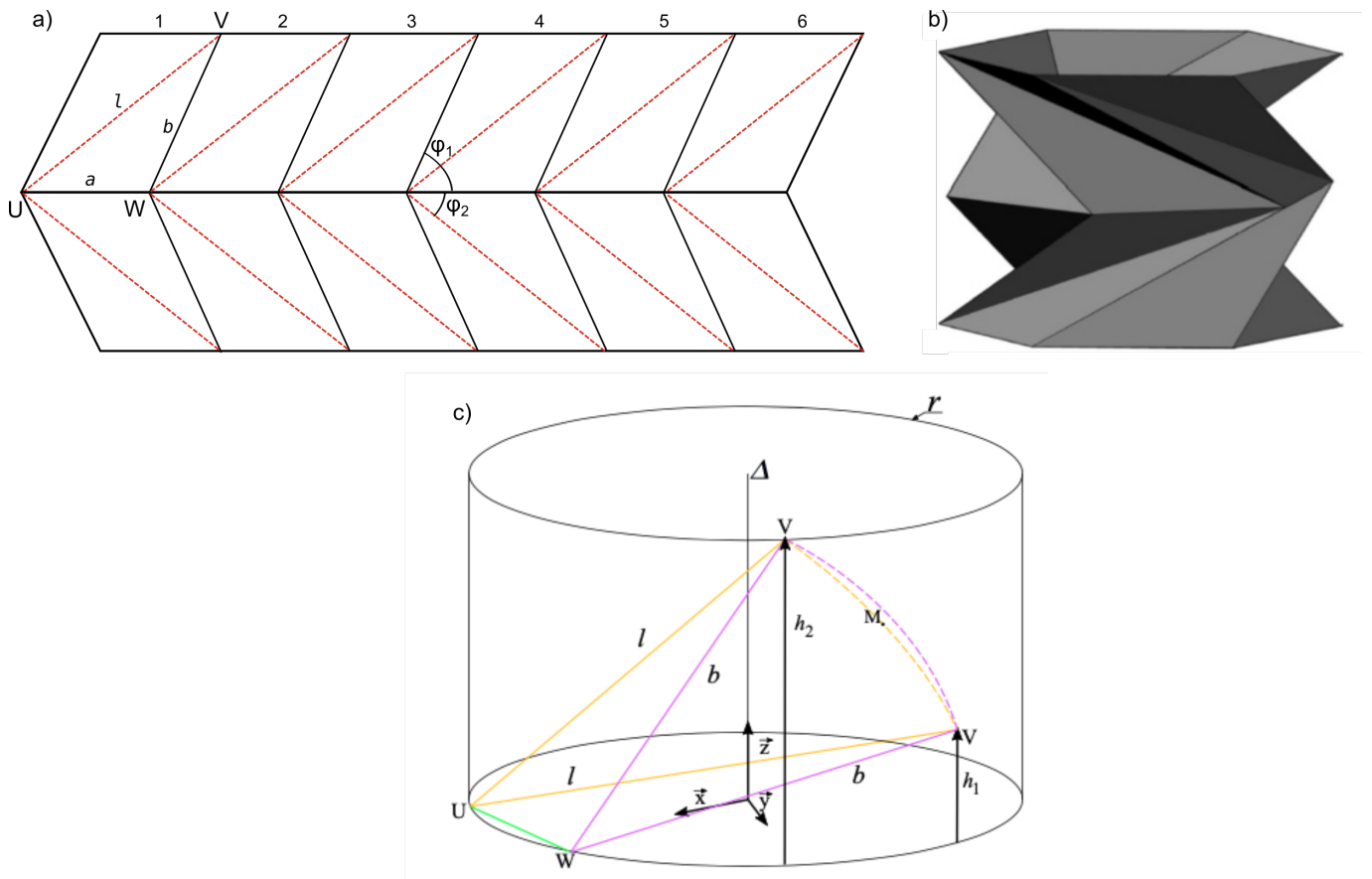


FIGURE 19 – L'origami à base de motif de Kresling avec 2 unités à 6 plis : a) le patron avant le pliage - en traits plein les montagnes et en pointillés rouge les vallées, b) la tour de Kresling après pliage disposant de base polygone, c) représentation du motif élémentaire sur une vue 3D de la tour et mouvement des barres l et b pendant le déploiement [63].

Tous les angles de pliage α ne satisfont pas à la condition de fermeture Eq.(E0.9) et les quelques solutions correspondent à des angles de pliage spécifiques. Mécaniquement, lorsque le cylindre est soumis à une charge axiale, la déformation dans les panneaux d'origami est supposée élastique et

les plis sont considérés comme une charnière parfaite, par conséquent, l'énergie stockée dans les plis en rotation est donc négligée. Le modèle géométrique seul ne permet pas de décrire tout le comportement du système. Il devient indispensable de tenir compte des déformations des panneaux pour décrire l'état de la structure. Elles se traduisent par une déformation axiale de la ligne de pliage ou la flexion des panneaux.

3.2.3 Ligne de pliage en déformation axiale

Des modèles de la structure origami se basent sur un assemblage de treillis dont les dimensions et la disposition des treillis correspondent au modèle réel d'origami. Les treillis remplacent alors les lignes de pliage et leur déformation axiale est prise en compte. On définit deux points V_l et V_b construits à partir du point V mais appartenant respectivement à la barre l et à la barre b de les Figures 19-a) et c). Ces deux points sont contraints comme les autres sommets de se déplacer à une distance constante r de l'axe de la tour. L'angle de rotation ϕ de chaque point peut être exprimé en fonction de la hauteur h d'une unité :

$$\begin{aligned}\phi_l(h) &= 2 \arcsin\left(\frac{\sqrt{l^2 - h^2}}{2r} - \frac{\pi}{n}\right) \\ \phi_b(h) &= 2 \arcsin\left(\frac{\sqrt{b^2 - h^2}}{2r} + \frac{\pi}{n}\right)\end{aligned}\tag{E0.11}$$

Il a été montré dans [63] que la barre b est sollicitée en compression dans le domaine des hauteurs $[h_1, h_2]$ lorsqu'elle est connectée à V_l et la barre l est sollicitée en traction lorsqu'elle est connectée à V_b . Il devient alors possible de modéliser le mouvement de la tour entre les deux configurations stables par le chemin de V_l décrit par ϕ_l , mais aussi d'extraire ces deux configurations stables.

Les configuration stables correspondent à la situation où $V_l=V_b$ qui peut s'obtenir par l'Equation (E0.11).

$$\begin{aligned}G(h, \eta) &= \phi_l(h) - \phi_b(h) \\ &= 2\left(\arcsin\left(\frac{\sqrt{l^2 - h^2}}{2r}\right) - \arcsin\left(\frac{\sqrt{b^2 - h^2}}{2r}\right) - \frac{\pi}{n}\right)\end{aligned}\tag{E0.12}$$

avec $\eta=(b, l, n, r)$ un ensemble de paramètres géométriques de la tour.

3.2.4 Panneau en flexion

Le modèle peut être également enrichi par la déformation des panneaux en considérant une raideur (ressort rotatif) sur la ligne diagonale de chaque panneau, également appelée ligne de flexion [64], [10]. L'approche dans [31], [65] propose une formulation entièrement non linéaire, basée sur les déplacements, pour construire des analyses par éléments finis quasi-statiques de structures en origami, sur la base d'une simplification de type barre et charnière des panneaux (voir Figure 20). Les paramètres du modèle sont listés dans le Tableau 1. Cette formulation conduit à une approche numérique efficace et robuste pour prédire les grands déplacements et les grandes déformations locales des structures origamis. Une implémentation de l'approche est proposée dans les bibliothèques Merlin et Merlin 2 sous Matlab en accès libre. Le modèle de la tour de Kresling à 8 unités est établi dans Merlin 2 pour permettre l'étude de la hauteur de la tour h , l'angle de pliage ϕ , le rayon interne r_i , l'angle entre les panneaux et le plan ρ , et l'angle d'attaque hélicoïdal de la tour γ comme proposé dans [66].

Pour la configuration de tour de Kresling ayant les paramètres du Tableau 2, la prédiction de la position des deux états stables est obtenue par le passage au couple égal à 0 sur la courbe Angle-Couple sur la Figure 21.

Il est à noter que le modèle géométrico-statique permet de définir l'évolution de l'angle de pliage en fonction de la force (ou du couple) appliquée sur la tour, comme illustré sur la Figure 21. Cette

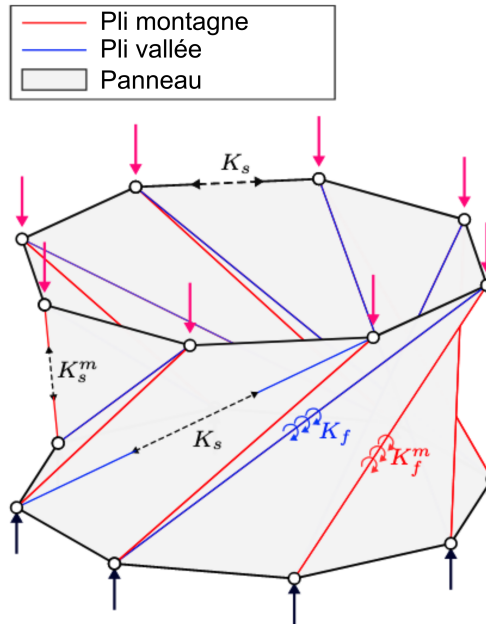


FIGURE 20 – Illustration du modèle non-linéaire où les lignes en tirets de couleur noire représentent les éléments de la barre étirable, les lignes pleines bleues correspondent aux plis de la vallée, et les lignes pleines rouges aux plis de la montagne.

Paramètres	Description
K_s	rigidité axiale de la barre
K_f	rigidité torsionnelle de la barre
K_s^m	rigidité axiale de la barre pour le pliage en montagne
K_f^m	rigidité torsionnelle pour le pliage en montagne

TABLEAU 1 – Les paramètres du modèle présenté.

Paramètres	Valeur
R	33 mm
b	56.1 mm
l	65.1 mm
n	8
Matériau	polypropylène

TABLEAU 2 – Les paramètres de la tour étudiée.

information est indispensable pour aller vers le dimensionnement d'actionneurs embarqués pour garantir le changement de forme ou le basculement entre les deux états stables.

3.3 Approche par éléments finis

L'approche barre-charnière peut être considérée comme une méthode d'éléments finis simplifiée qui peut prendre en compte des panneaux déformables et des plis élastiques. Les modèles à base des méthodes par éléments finis permettent d'aller au-delà et de considérer l'ensemble des phénomènes physiques qui régissent le fonctionnement du système. Ils peuvent être très complets mais en contrepartie ils nécessitent un coût en temps de calcul assez élevé. Les modèles formulés en milieu continu intègrent le type de structures étudiées (poutre, plaque, coque ou volume tridimensionnel), les lois de comportements, les phénomènes physiques et les conditions aux limites. Ils sont ensuite discrétisés en

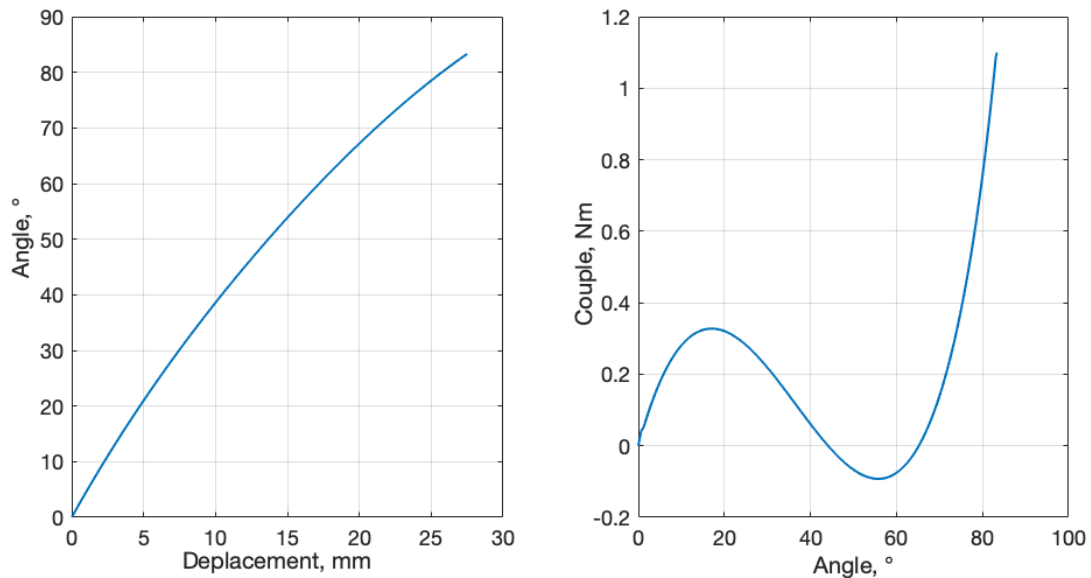


FIGURE 21 – Relation déplacement-angle et angle-couple d'une tour de Kresling ayant les paramètres du tableau 2 et simulée avec Merlin 2.

sous-domaines ou éléments pour permettre la construction de l'approximation nodale et le calcul des matrices élémentaires. S'ensuit la résolution du système d'équations en considérant les conditions aux limites. Une phase de post-traitement permet enfin de ressortir les résultats (force/déplacement, contrainte de Von Mises, etc.) Plusieurs modèles de matériaux peuvent être utilisés et des bases de données comme [67]¹ servent de sources d'informations très utiles pour débiter la conception à base de modèles. Plusieurs études ont utilisé une approche par éléments finis pour étudier le comportement de systèmes à base d'origamis : des origamis actionnés par élastomères magnéto-actifs et diélectriques [68], un résonateur de Helmholtz à base de Waterbomb [69] différentes bases d'origami incluant Miura-Ori et la tour de Kresling [70], une tour de Kresling à plusieurs étages [71]. Les logiciels commerciaux les plus utilisés sont Comsol, ANSYS, LS-Dyna, et ABAQUS et permettent avec chacun leur spécificités d'établir le modèle de systèmes à base d'origamis.

3.4 Méthodologie de conception

Malgré la disponibilité d'algorithmes théoriques, la réalisation pratique de systèmes basés sur l'origami reste un défi. La conception des robots origamis est complexe et ne suit pas la conception de robots rigides ou conventionnels. En effet, ils sont composés de partie rigides et souples comme décrit précédemment, et leur conception ne correspond pas à la conception de robots conventionnels. Le schéma de conception des robots conventionnels suit une approche séquentielle et chaque sous-bloc est étudié et normalisé par des modèles de mécanismes, de structures géométriques tridimensionnelles, de composants mécaniques, ainsi que de matériaux employés. La figure 22 compare les deux approches et montre que la conception de robot à base d'origamis nécessite une conception et un développement simultanés, et il n'existe pas de modèle standard. Comme la fonctionnalité des robots origamis dépend fortement des matériaux, dont les propriétés varient grandement en fonction de la composition, de la géométrie et du procédé de fabrication, il n'existe pas de solution unique. La conception nécessite des essais itératifs de fabrication et de caractérisation pour atteindre les fonctionnalités et les performances souhaitées. On note que cette approche présente des similitudes avec la conception de robots souples [72, 73].

La conception s'appuie sur un modèle pour permettre de guider le choix de la géométrie de l'ori-

1. <https://soro-materials-database.herokuapp.com/>

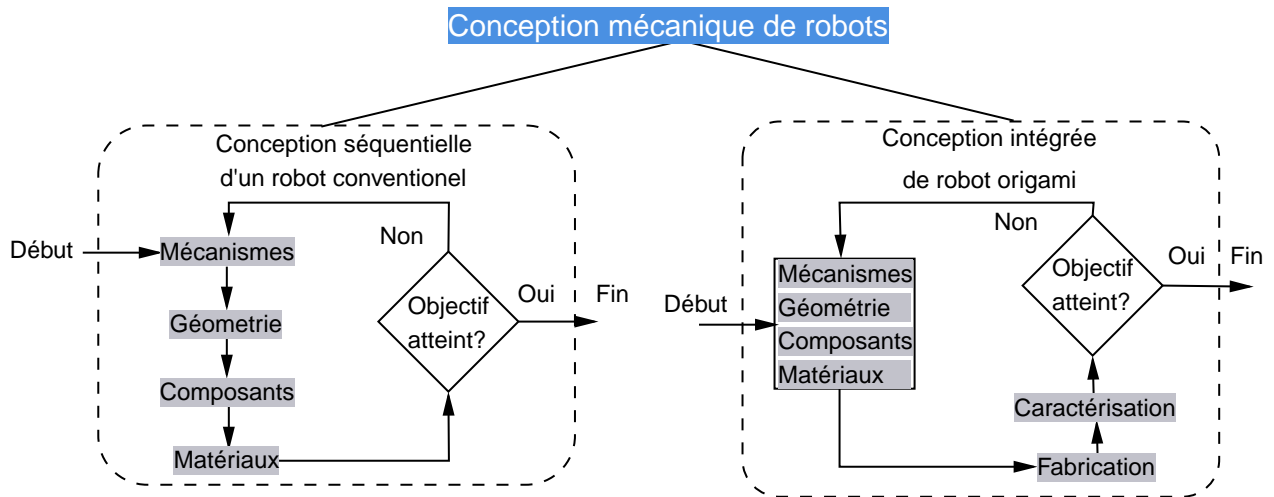


FIGURE 22 – Comparaison des approches de conception mécanique des robots conventionnels et des robots en origami proposée dans [74].

gami, des mécanismes et composants qui le composent, et bien entendu les matériaux utilisés qui déterminent également les techniques de fabrication envisagées. Sur le choix de la géométrie, de nombreux outils existent pour étudier le pliage : Origamizer² [55], Rigid Origami Simulator, Origami Simulator³, popupCAD⁴ [75]. Une fois la géométrie, c'est-à-dire la forme, les montagnes et les vallées définies, les matériaux et les composants doivent être choisis parmi ceux qui sont déjà utilisés dans la littérature [72, 74, 76] ou en s'appuyant sur les connaissances du concepteur. Finalement, la fabrication qui sera détaillée dans le paragraphe 4 précède la caractérisation pour vérifier que les fonctionnalités et les performances souhaitées sont bien obtenues.

A retenir :

- Trois approches peuvent être considérées pour la modélisation d'origamis : modélisation géométrique, géométrico-statique, et simulation numérique
- La modélisation géométrique peut suffire à décrire le comportement d'un robot conçu à partir d'un origami, pour faire décrire l'état du système en fonction de l'actionnement. La démarche n'est applicable que pour un origami rigidement pliable.
- Une approche géométrico-statique est requise pour la conception à base de modèle de système à base d'origami non-rigide.
- La synthèse des robots origamis dépend fortement des propriétés des matériaux utilisés et conduit à une approche itérative combinant la fabrication et la caractérisation pour atteindre les fonctionnalités et les performances souhaitées.

4 Fabrication

Le fait de concevoir un dispositif robotique à partir d'origamis a nécessairement un impact sur les techniques de fabrication appropriées. En effet, il s'agit de réaliser tout ou partie d'un robot en utilisant une forme initialement plane, puis réaliser un pliage pour passer d'une forme 2D à une

2. <https://origami.c.u-tokyo.ac.jp/tachi/software/index.html>

3. <https://origamisimulator.org/>

4. <http://www.popupcad.org/>

forme 3D, avant de l'exploiter. Pour chacun de ces deux aspects, fabrication dans le plan et mise en forme, des techniques spécifiques à privilégier sont aujourd'hui apparues. Elles sont discutées dans les deux parties qui suivent, en se concentrant donc sur la gestion de la production de l'origami en 3D, mais pas son actionnement lors de la commande du robot, qui fait l'objet de la section 5.

4.1 Fabrication

4.1.1 Introduction

A l'issue de la conception, le patron de l'origami souhaité est figé. Il est pour rappel constitué d'un ensemble de plis, dont la nature (montagne ou vallée), et la position sur le patron donnent les propriétés à l'origami. Cela a été remarqué précédemment : pour passer du 2D au 3D, puis en utilisation, c'est un mécanisme compliant que l'on exploite. Autrement dit, chaque pli est utilisé pour réaliser une fonction cinématique, correspondant idéalement à une rotation autour de la ligne définie sur le patron. Pour la réalisation d'une liaison compliant, on sait qu'on doit gérer un compromis entre plusieurs exigences :

- l'amplitude de mouvement : elle est souhaitée maximale.
- la précision cinématique : le mouvement idéal est une rotation pure autour du pli. On souhaite minimiser tout mouvement parasite, par exemple une translation entre les deux panneaux connectés par le pli qui serait induite par la rotation.
- la raideur selon l'axe : l'énergie nécessaire au pliage doit être minimale.
- la raideur hors axe : le mouvement de rotation est souhaité autour de la ligne du pli. Lors du pliage, puis de l'utilisation, on souhaite en revanche que les déformations du pli sous l'effet des forces qui lui sont appliquées soient minimales.
- la résistance à la fatigue : pour un usage dans un robot dont le fonctionnement va être répétitif, par exemple dans un robot mobile [56], les plis vont connaître des déformations répétées. Le pli va se dégrader sous l'effet de cette répétition, par fatigue du matériau utilisé.
- la résistance aux conditions d'usage : les conditions d'utilisation (température, humidité, contact avec d'autres éléments, ...) ne doit pas provoquer la défaillance du pli.

Pour les mécanismes compliant, un grand nombre de propositions de profils de liaisons existe [57]. Pour le cas d'un origami, on parle de choix qui doivent respecter la nature plane initiale du patron. Différentes approches ont été identifiées comme pouvant être pertinentes. Elles sont généralement l'association d'un procédé de fabrication et de matériaux spécifiques, reprenant ici le triptyque produit-procédé-matériau lors de la conception d'un produit. Nous décrivons ici les options à envisager pour un problème donné, en tenant compte des exigences listées ci-dessus pour en évaluer la pertinence.

4.1.2 Réalisation mono-matériau

Une réalisation mono-matière, en utilisant donc un seul matériau pour réaliser le patron, a le mérite de la simplicité de fabrication. Cela peut éviter la gestion de collage de plusieurs matériaux et les problèmes potentiels de délamination entre ces derniers. Le choix d'un matériau polymère a été proposé par les concepteurs de plusieurs robots basés origamis. En termes de résistance aux conditions d'usage, un matériau polymère peut en effet être intéressant, et il a par ailleurs une densité faible.

Ainsi, on peut recourir à des feuilles de PET (polyéthylène téréphtalate) [77, 78], de PP (polypropylène) [50, 79, 63], de PEEK (polyétheréthercétone) [56], de PTFE (polyéthylenterephtalate) [14]. Dans [80], des alternatives sont évaluées comme le Tyvek, un textile non tissé de fibres de polyéthylène haute densité, l'UHMPWE (polyéthylène à très haut poids moléculaire), le Mylar, un film

polyester et un film d'ETFE (éthylène tétrafluoroéthylène). Ces deux derniers montrent une résistance en fatigue au pliage environ 10 fois plus faible que les autres matériaux. A noter par ailleurs que le comportement mécanique des polymères peut largement varier, et par exemple la visco-élasticité du PP peut être problématique si les composants conçus sur base d'origamis supportent des charges constantes au cours du temps.

Pour la réalisation, il est nécessaire de définir une stratégie de matérialisation des plis. Il est possible de graver les plis pour avoir un enfoncement de matière définissant la ligne de pliage. Ceci est possible de manière asymétrique (gravure sur 1 côté, Fig. 23) ou symétrique (gravure sur 2 côtés). L'asymétrie peut rendre difficile le pliage. A l'inverse une double gravure suppose de réaliser la gravure sur 2 faces successivement. Sur un plan pratique, il faut alors être capable de gérer le positionnement de la feuille pour aligner parfaitement les gravures.

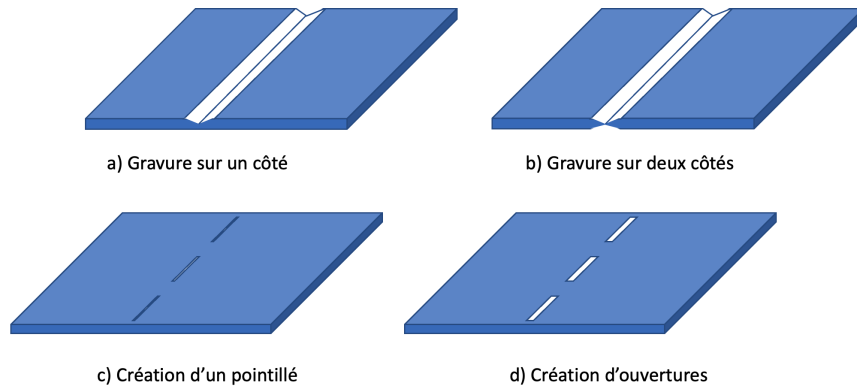


FIGURE 23 – Quelques variantes possibles pour la matérialisation des plis : a) gravure sur une face, b) gravure sur deux faces, c) découpe de pointillés, d) réalisation d'ouvertures, ici pour l'exemple avec une forme rectangulaire

Pour un matériau polymère, l'utilisation d'une découpe laser avec un laser CO2 est un procédé simple, et a été exploité dans les cas cités au-dessus avec PP, PET, PTFE, PEEK. Le pli peut être produit en réalisant un pointillé, ou bien une ouverture (Fig. 23). Le pointillé a l'avantage de la précision cinématique. La réalisation d'ouvertures peut limiter en revanche les concentrations de contrainte si l'on choisit des formes sans singularités géométriques comme de simples profils oblongs, et tend donc à améliorer la durée de vie de la structure. Le choix approprié de géométrie d'ouvertures est a priori dépendant des amplitudes de mouvement, du matériau et de l'épaisseur de feuille. Une approche expérimentale est nécessaire pour déterminer les géométries appropriées.

4.1.3 Réalisation multi-matériaux

La réalisation d'origamis s'appuyant sur le papier à l'origine, il a été bien sûr envisagé de réaliser des éléments structurels d'un robot avec ce matériau. En termes de durabilité, il est cependant difficile d'envisager un usage pérenne d'un tel matériau. Pour y remédier, il est alors apparu pertinent d'associer une simple feuille de papier avec un revêtement de protection, comme un film polyimide (Kapton) adhésif placé sur la feuille [44]. Pour marquer le pli et améliorer la précision cinématique, une modification peut être faite en réalisant une découpe par exemple au laser d'un pointillé matérialisant la ligne de pliage. Pour éviter des concentrations de contrainte sur les sommets, i.e. les points de rencontre des plis, la réalisation de trous à leur niveau améliore la résistance à la fatigue de l'origami [56] (Fig. 24).

En exploitant un seul matériau, il peut être difficile de satisfaire simultanément toutes les exigences mentionnées plus haut concernant le comportement du pli. Une stratégie de fabrication multicouches permet comme dans le cas ci-dessus de veiller à concilier précision cinématique, résistance à la fatigue, et également raideur des panneaux. Cette approche de réalisation multi-matériaux s'est

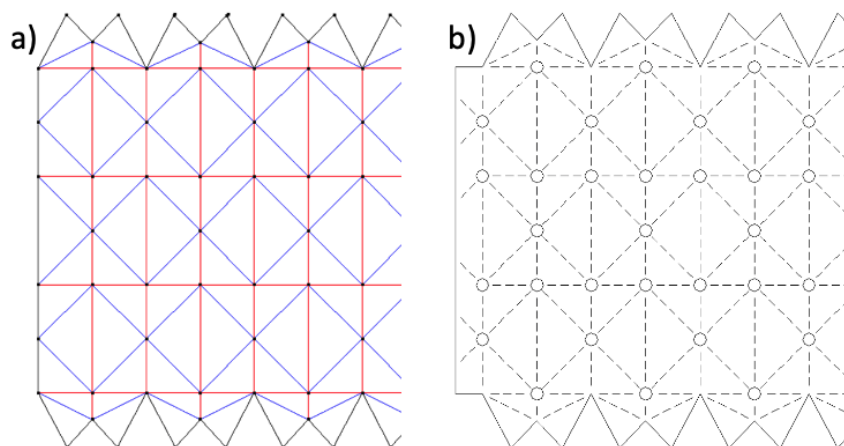


FIGURE 24 – a) extrait de patron décrivant la position et la nature des plis (rouge : montagne, bleu : vallée), b) profil de découpe effectif, adapté de [44]

donc développée et l'on dispose de plusieurs techniques et différentes associations de matériaux possibles.

Pour l'âme centrale du sandwich finalement créé (Fig. 25), le choix dépend des contraintes d'usage du pli. Pour les couches extérieures, il est possible d'exploiter des matériaux simples comme du balsa [81], ou d'aller jusqu'à des matériaux très rigides comme de l'acier [82] ou l'aluminium [45] utilisé pour un système ayant une capacité de charge élevée. L'avantage est évident en termes de rigidité de panneau et de résistance de la structure créée à partir de l'origami.

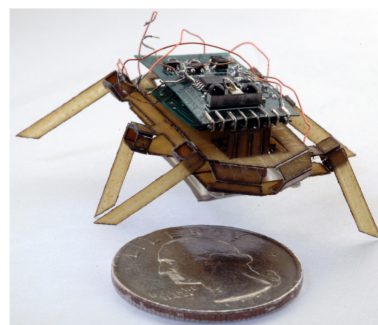
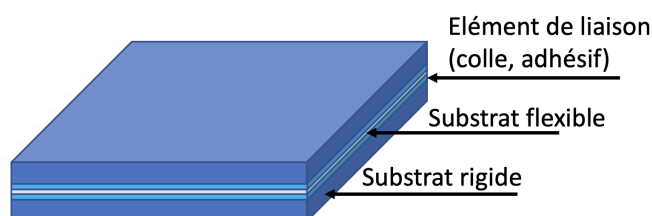


FIGURE 25 – Représentation schématique d'une structure sandwich pour la fabrication d'origami à gauche, exemple à droite issu des travaux décrits dans [81]

Un point essentiel est la jonction des couches entre elles. Avec des matériaux métalliques comme dans [82] ou [45], des solutions simples comme l'utilisation d'un adhésif double face, ou le rivetage des plaques entre elles, ont été utilisées avec succès. La solution du rivetage est intéressante car elle permet de plus de faciliter l'alignement des plaques, en se servant des axes des rivets comme éléments de localisation.

Pour descendre en échelle sur le plan dimensionnel, ces solutions deviennent limitées. Des techniques alternatives sont possibles, pour parvenir à ce qui est parfois désigné comme [81, 83] des SCM (Smart Composite Microstructures). L'approche est de réaliser en plusieurs étapes l'assemblage des panneaux rigides et de la membrane souple assurant les mobilités au niveau des plis. Dans [83], des panneaux en matériau composite pré-imprégnés sont utilisés. La résine présente est utilisée pour solidariser la membrane d'un premier panneau par passage au four pour la cuisson du matériau. Ensuite le deuxième panneau est ajouté et la procédure de cuisson du composite est reconduite. Les propriétés mécaniques du matériau composite utilisé, dans l'exemple à base de fibres de carbone, sont un net avantage de la technique. Le procédé requiert cependant des moyens spécifiques pour réaliser

correctement la cuisson. Une variante plus simple à mettre en oeuvre est celle détaillée dans [84] : la structure du sandwich est obtenue en empilant deux panneaux rigides, et à l'intérieur deux couches d'adhésif (Fig. 26). L'ensemble est passé entre deux rouleaux chauffants, pour appliquer à la fois une pression et une montée en température faisant fondre les couches adhésives pour solidariser l'ensemble.

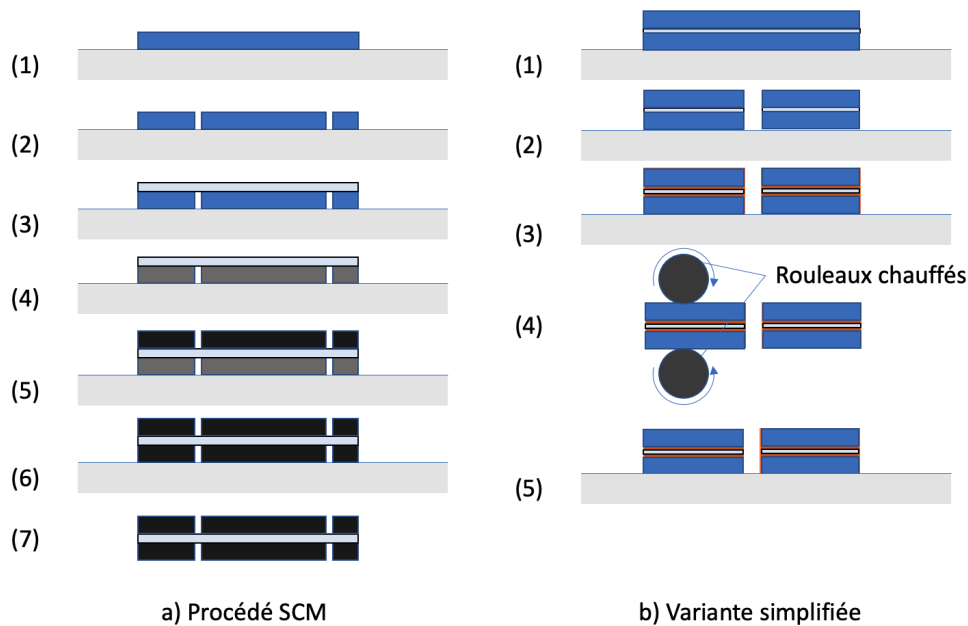


FIGURE 26 – A gauche le procédé SCM avec 1) fixation d'un composite pré-impregné, 2) découpes laser à l'endroit des articulations, 3) positionnement d'un substrat flexible, 4) collage par cuisson de l'ensemble, 5) placement d'un autre composite découpé au préalable, 6) cuisson de l'ensemble, 7) extraction de l'ensemble. A droite une version simplifiée avec des matériaux simples présentée dans [84] : 1) découpe d'un substrat type carton, 2) découpe à l'emplacement des plis souhaité 3) placement de 2 couches de polymère adhésif et du substrat flexible, 4) passage sous rouleaux chauffés pour appliquer pression et élévation de température, assurant le collage avec 2 couches identiques de carton découpé intégrées, 5) découpe du profil

Le fait de travailler à petite échelle par assemblage de différentes couches de matériaux se rapproche de travaux de longue date en micro-fabrication. L'approche de réalisation de sandwichs a en fait été envisagée dès les années 1990, avec le travail de l'équipe de H. Miura [85], [86]. Le silicium est découpé par une technique de gravure au plasma. Les plis sont réalisées avec une feuille de polyimide déposée par spin coating sur la base silicium. On exploite ainsi des procédés développés pour les micro-mécanismes, et il est alors possible de réaliser des structures de type origami à très petite échelle.

4.1.4 Cas de la fabrication additive

Selon le patron, la mise en forme pour passer du 2D au 3D peut être complexe, on l'imagine facilement en regardant les exemples de la figure 2. En fonction du contexte, il peut être envisagé de recourir à la fabrication additive pour produire directement la forme 3D de l'origami souhaité. Le premier intérêt est donc la simplicité de réalisation, en supprimant la phase de pliage. Le deuxième intérêt peut être la précision obtenue dans l'obtention d'une configuration au repos de la structure. Enfin, cette structure est alors sans déformation dans son état initial, contrairement à un origami qui est une structure compliant dont les plis sont déformés pour parvenir à la forme 3D souhaitée.

Sur le principe l'approche est donc intéressante. Dans [87], une fabrication par photopolymérisation est ainsi utilisée pour produire des structures à partir d'un polymère souple. Avec un tel procédé mono-matériau, il est bien sûr difficile de concilier raideur de panneau et souplesse des plis. Par ailleurs, le comportement en fatigue des matériaux polymères obtenus par fabrication additive reste une faiblesse.

Pour remédier au premier problème, un procédé multi-matériaux peut être envisagé. C'est le cas pour les prototypes produits dans [88, 89] (Fig. 23). Le procédé Polyjet (Stratasys, USA) permet d'avoir une forme 3D, avec un matériau polymère considéré comme rigide pour les panneaux, et un matériau de type élastomère pour les plis. La durabilité reste cependant assez limitée, avec une endurance de l'ordre de 1000 cycles, et le comportement de la structure évolue au cours des cycles, avec une perte de raideur de la structure sensible.

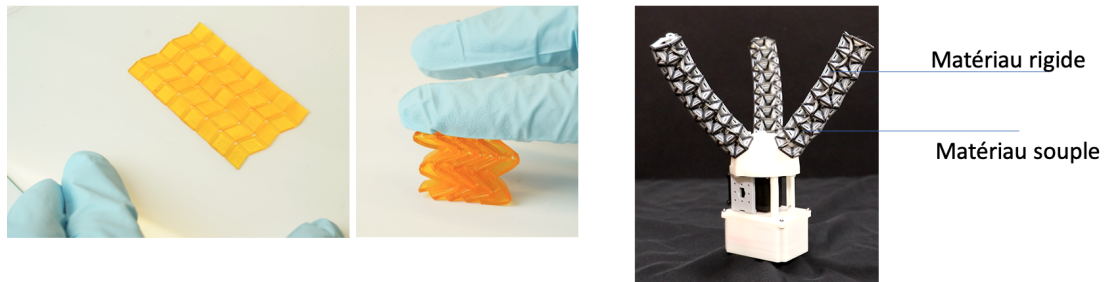


FIGURE 27 – A gauche, exploitation d'impression 3D de type photopolymérisation [87], à droite d'impression 3D multi-matériaux [88]

Un procédé intermédiaire entre fabrication additive et procédés 2D de découpe de patron est le procédé SDM (Shape Deposition Manufacturing). Il consiste en une succession de cycles d'usinages et moulages, chaque usinage permettant de préparer la forme moulée à l'étape suivante. On peut alors profiter de meilleures propriétés mécaniques. Largement manuel, le procédé est cependant très lent, et sa mise en oeuvre est délicate si l'on considère l'expérience décrite dans [90].

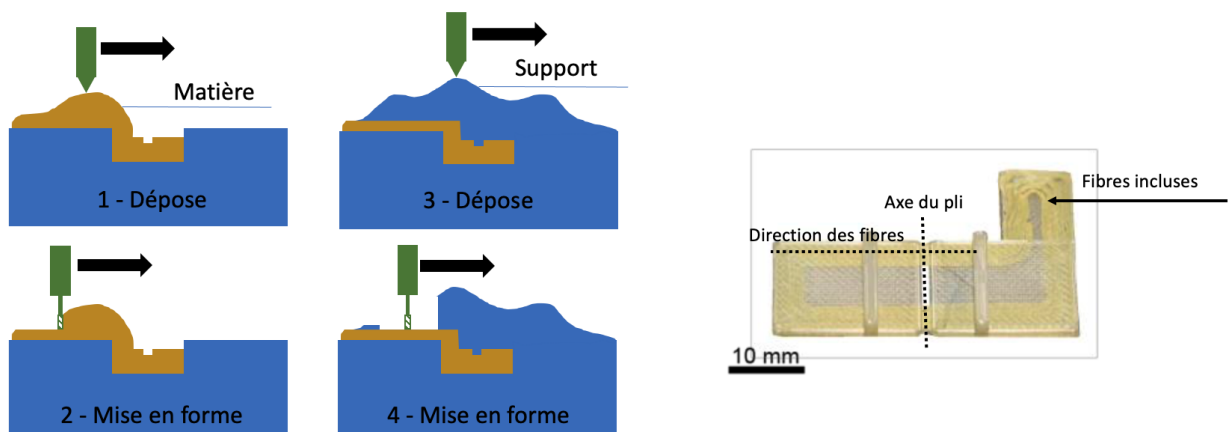


FIGURE 28 – A gauche, cycle de fabrication avec le procédé SDM. A droite, réalisation avec dépose de fibres longues, selon des directions transverses à l'axe du pli [91].

Enfin, autre alternative pour améliorer la durabilité des plis produits par fabrication additive, l'utilisation de matériaux renforcés par des fibres longues (Fig. 28). L'usage de telles fibres placées au sein du filament déposé par extrusion doit permettre d'améliorer la résistance à la fatigue des plis [91]. Ces fibres sont en effet susceptibles de supporter sans rupture la sollicitation en fatigue lors des

pliages. Il ne s'agit pas à ce stade d'une solution mature, mais elle montre l'évolution toujours en cours sur ce volet procédé.

4.1.5 Compléments

L'exposé des techniques de fabrication des plis montre qu'il n'y a pas aujourd'hui une réponse unique au besoin de fabrication des structures en origami. La stratégie la plus adaptée dépend évidemment des critères évoqués. Compte tenu de la relative simplicité des procédés, une étude expérimentale directe doit être envisagée pour déterminer l'approche et le(s) matériau(x) les plus appropriés pour un problème de conception donné.

Pour terminer cette analyse des stratégies de fabrication de pli, on remarquera deux choses. En premier lieu, l'approche largement répandue et décrite ici consiste à fabriquer dans le plan les plis, et à viser des épaisseurs réduites pour se rapprocher du cas original de l'origami papier. Une stratégie alternative peut être de réaliser des plis "épais", mais dont le profil est tel qu'il permette son repliement [92] (Fig. 29). L'approche peut être intéressante pour la liberté qu'elle offre en termes de choix de matériau des panneaux. Bien entendu, comme on le voit sur la figure 29, la compacité des structures fabriquées, un des points forts des origamis, n'est alors plus évidente.

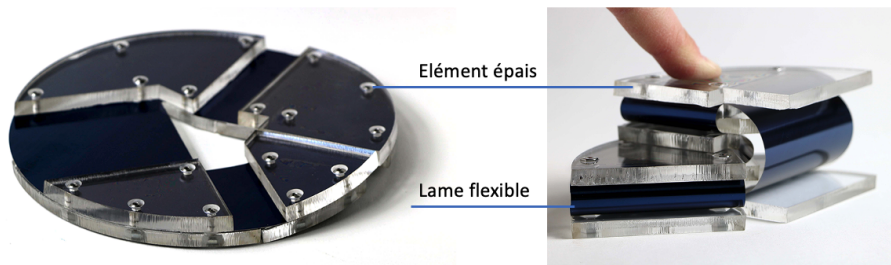


FIGURE 29 – Alternative avec la fabrication d'origamis épais mais sans interférences pendant le repliement

En deuxième lieu, plusieurs stratégies de fabrication présentées permettent de réaliser des structures multi-matériaux. Le besoin premier était de disposer de propriétés mécaniques appropriées pour les plis et panneaux. Il est aussi possible de mettre en place des assemblages multi-fonctions, en disposant d'éléments actifs pour la mise en mouvement, ou sensibles pour la perception. La question de l'intégration d'éléments actifs va être couverte pour partie dans cette section, en parlant de la mise en forme, et pour partie dans la section 6.

4.2 Mise en forme

4.2.1 Introduction

Quiconque réalise son premier origami réalise rapidement que la mise en forme, donc le passage du patron à la forme 3D, peut être un challenge. Pour des structures telles qu'exploitées en robotique, avec des nombres de motifs importants, comme l'usage par exemple d'une Magic Ball ou d'une tour de Kresling, c'est aussi le cas. Nous nous intéressons donc dans cette partie à la gestion de cette difficulté.

Au-delà de la mise en forme, la question de la fermeture des structures se pose également. Il est assez peu documenté. Pour des matériaux tels que le papier ou le métal, les techniques d'assemblage sont bien connues. Pour des matériaux polymères, un certain nombre de solutions existent comme le soudage par ultrasons ou le collage. Le lecteur pourra se référer à [93]. Cette question de la fermeture de l'origami doit être traitée avec attention. Tout d'abord car la jonction entre les extrémités du patron peut être le point faible de la structure, et étant donc le lieu de rupture le plus probable par déchirement ou décollement. Ensuite, le comportement de la jonction peut impacter le comportement

de l'ensemble de la structure obtenue après pliage : la présence d'une surépaisseur peut générer une asymétrie si l'on exploite par exemple une tour de Kresling qui est obtenue par fermeture d'un patron rectangulaire pour former une structure cylindrique. Dans le cas d'un collage, le comportement de la colle peut introduire des non linéarités de fonctionnement si son épaisseur est significative.

4.2.2 Stratégie manuelle

La première stratégie possible pour mettre en forme l'origami est bien sûr la réalisation manuelle du pliage. Elle est possible et a été exploitée par exemple dans [56], [63].

Une première limite à l'approche est le temps de réalisation. Par ailleurs, et peut-être encore plus important, la réalisation manuelle du processus de pliage peut introduire des imprécisions conduisant à des erreurs de positions des lignes de pliage, induisant des modifications de comportement. Enfin, la réalisation manuelle d'un pliage trouve ses limites aux petites échelles : la conception basée origami de micro-robots est un champ en expansion, pour lequel on ne peut envisager de travailler sans une autre stratégie de pliage.

4.2.3 Stratégie active

Par stratégie active, on entend l'emploi d'un matériau actif, permettant sans action manuelle d'avoir le mouvement de reconfiguration pour le passage 3D. Ce passage peut être suffisant pour un mécanisme déployable. Ici, c'est a priori seulement le changement permettant de disposer de la configuration spatiale de l'origami, avant de l'exploiter pour le système robotique. Dans la communauté anglo-saxonne on parle ici de self-folding. Le tableau 30 fait la synthèse des approches envisageables, commentées dans la suite.

Matériau	Stimulus	Description
Polymère à mémoire de forme	Lumière	Exposition globale à la lumière. Elle provoque une élévation de température de lignes de couleur noire peintes sur le motif
	Laser – exposition indirecte	Des matériaux actifs sont activés par une exposition laser du substrat sur lequel est situé le motif
	Laser – exposition directe	Une encre noire est ajoutée en surface aux lieux où l'élévation de température est souhaitée. Une ligne laser balaye la surface, seule les surfaces noires sont activées.
	Laser – balayage dynamique	Un balayage dynamique est réalisé de la surface, avec un contrôle de l'énergie transmise sans ajout de motif imprimé
	Chauffage résistif	Un circuit résistif est utilisé pour échauffer localement le polymère
	Micro-ondes	Un faisceau de micro-ondes est projeté, qui est absorbé localement en cas de présence d'une charge de type graphène
	Chauffage uniforme	Placement localisé de matériau actif, élévation globale de température pour l'activation
Autres matériaux	Tension de surface	Liquéfaction de grains métallique pour créer une tension de surface provoquant la sortie du plan
	Chauffage uniforme	Autoassemblage par chauffage globale d'un motif conçu en polyimide
	Laser et gravité	La déformation de la matière sous son propre poids durant le chauffage permet la sortie du plan

FIGURE 30 – Synthèse des approches considérées pour une mise en forme active, adaptée de [94]

Différents effets physiques peuvent être exploités. Pour des structures à l'échelle nanométrique (panneaux de quelques centaines de nanomètres), dans [95], le dépôt d'un film mince est réalisé sur une structure plane. La liquéfaction de ce film induit une tension de surface qui provoque une sortie du plan de la structure (Fig. 31). Dans [96], c'est la rétraction sous l'effet de la chaleur d'un film en polyimide inséré entre 2 panneaux qui est exploitée. Du fait du positionnement du polyimide, de manière asymétrique par rapport au panneau, une flexion est générée sur la structure pour son mouvement hors plan.

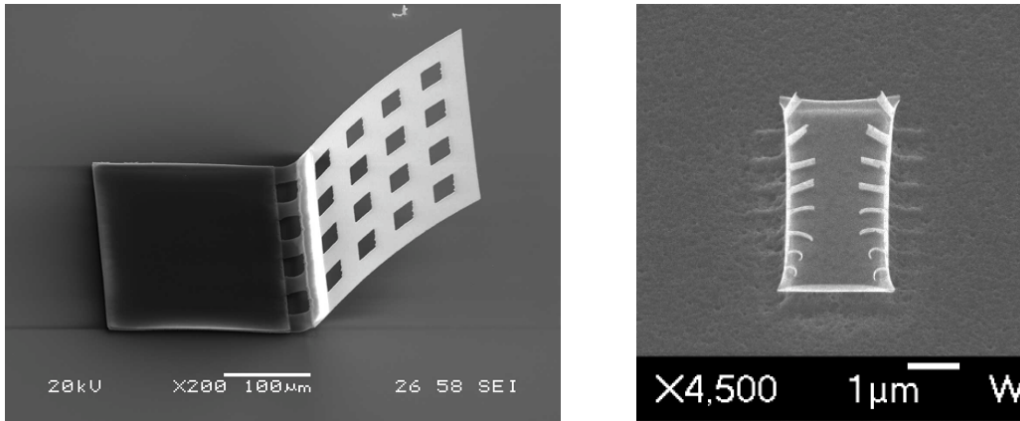


FIGURE 31 – A gauche, approche par exploitation de la rétraction d'un film de polyimide [96] et à droite par liquéfaction de film mince [95].

La chaleur peut aussi être utilisée pour simplement profiter de l'effet de la gravité, comme dans [97], où un laser est employé pour échauffer le matériau (acrylique) et avoir une déformation sous le poids propre de ce dernier.

Une voie largement explorée est celle de l'utilisation de polymère à mémoire de forme (PMF, ou SMP pour l'acronyme anglais). Dans [98], un film de polystyrène précontraint est intégré dans un composite, en suivant le principe de fabrication de SCM exposé ci-dessus. Une activation thermique par chauffage global de la structure permet alors d'avoir le mouvement de déploiement. En recourant au même type de matériau, et via un dépôt en surface d'encre ou métallique, il est possible de réaliser l'activation du PMF via l'envoi de micro-ondes [99] ou de manière plus simple par effet Joule [19]. Dans [100] c'est finalement un matériau composite exploitant des fibres en SMP et une matrice élastomère qui est activé par exposition à la chaleur. Un autre stimulus possible est la lumière, soit via une exposition globale, soit via une activation localisée en utilisant un laser qui vient balayer les plis dont on souhaite le mouvement pour la sortie du plan [94].

Les alliages à mémoire de forme (AMF, ou SMA pour l'acronyme anglais) peuvent constituer une alternative aux PMF. Ils sont ainsi exploités dans [101]. Les températures de transition de phase de ces matériaux peuvent cependant être difficilement compatibles avec les matériaux utilisés pour le patron de l'origami.

Globalement, les techniques mises en jeu sont encore d'un faible niveau de maturité. Des preuves de concept ont permis de montrer la réalisation de pliages pour obtenir un cube (Fig. 32), ou certains prototypes de robots mobiles. Les angles sont significatifs, de l'ordre de 40 à 140°. La précision de pliage reste cependant délicate à maîtriser. Par ailleurs les approches pour gérer le pliage de manière globale sont limitées, car ne permettant pas de reproduire l'aspect séquentiel généralement nécessaire dans le pliage du patron. *A contrario*, on peut alors envisager d'utiliser des stimuli lumineux par laser ou électrique, moyennant d'anticiper la séquence lors la mise en place du réseau d'alimentation électrique. Le domaine reste cependant en constante évolution, étant à la jonction avec le domaine dit de l'impression 4D, où des matériaux sensibles à un stimulus sont déposés de manière additive.

A retenir :

- La production d'un origami suppose la fabrication de son patron et sa mise en forme.
- La fabrication du patron est possible via un large panel de techniques. Les procédés additifs sont envisageables mais restreints par les propriétés matériaux notamment en fatigue. Différentes technologies 2D spécifiques ont été élaborées, à choisir en fonction des matériaux exploités.
- Les techniques d'auto-repliement ("self-folding") peuvent grandement simplifier le processus de mise en forme. Les procédés restent cependant émergents.

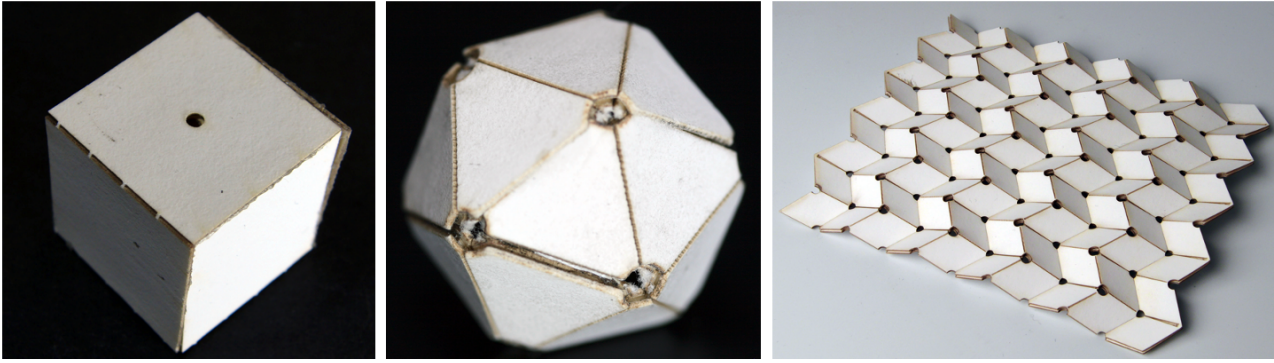


FIGURE 32 – Exemples de repliements obtenus avec une approche par chauffage global. Chaque structure est obtenue par repliement d'un motif plan [102].

5 Actionnement et Commande

Dans cette dernière section, la question de l'actionnement est discutée. On distingue alors la possibilité d'actionner la structure de manière globale ou localement au niveau de ses plis. Deux objectifs sont souvent visés : l'auto-plier et le changement de forme. L'auto-plier est une capacité importante des structures d'origami car elle permet de bénéficier des moyens de fabrication planaire pour ensuite se transformer en structure 3D par auto-plier. De ce fait, elle a été discutée dans la section 4. Les mêmes principes d'actionnement peuvent être exploités pour atteindre les deux objectifs.

L'utilisation de matériaux actifs est alors mise en avant. Pour plus de détails sur le fonctionnement de base, nous invitons les lecteurs à se référer à [S7769v1] pour les alliages à mémoire de formes (AMF) et les actionneurs pneumatiques, [D3720v1, D3765v1] pour les moteurs électriques et [103] pour les actionneurs magnétiques. Les travaux concernant la commande de structures à base d'origamis, même si parcellaires, sont alors présentés pour situer les difficultés spécifiques et approches envisageables.

Une synthèse des performances souvent utiles au dimensionnement de l'actionnement de structures origami est présentée à la Table 3.

Type d'actionneur	Contrainte (MPa)	Déformation (%)	Efficacité (%)	Bande passante (Hz)	Densité d'énergie (J/cm ³)
Moteurs électriques	0.05	10	90	10000	2
AMF	200	10	1-10	10	10
Polymère ionique	0.3	40	30	0.1-1000	0.0024
Pneumatique	0.7	50	90	20	0.175
Hydraulique	20	50	80	4	5
Magnétique (souple)	0.5	40	80	4000	
Piézoélectrique	35	0.2	50	5000	0.035

TABLEAU 3 – Comparaison des performances des actionneurs, inspirée de [104], [105] et [106], complétée par des données issues de [107], [S7769v1] et [108].

La figure 33 illustre les deux objectifs de l'actionnement à savoir l'auto-plier et le changement de forme. Les exemples de changement de forme proposées s'appuient sur une base de motif origami (Yoshimura, waterbomb, magic ball, Miura-Ori, accordion-shape, tour de Kresling) contrairement à l'auto-plier avec des formes libres mais respectant les règles énoncées.

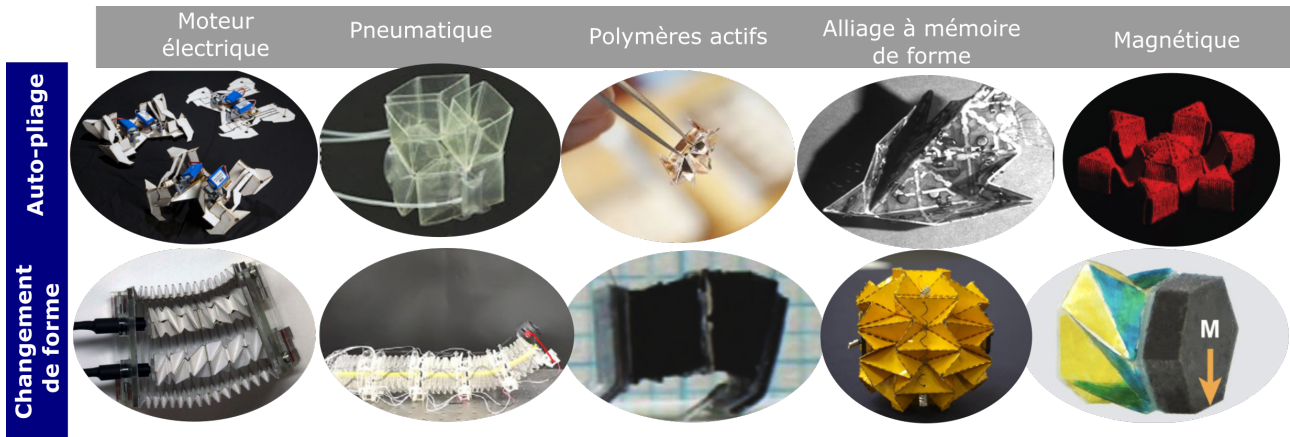


FIGURE 33 – Différents actionneurs utilisés pour l’auto-piage et le changement de forme, respectivement par moteur électrique [19]-[109], par actionnement pneumatique [110]-[47], par polymères actifs [111]-[112], par AMF [19]-[113] et par interaction magnétique [37]-[71].

5.1 Les différents actionneurs d’origamis

5.1.1 Actionnement thermo-mécanique

L’auto-piage par actionnement thermo-mécanique se base sur l’utilisation de matériaux à mémoire de forme ou thermo-sensibles placés sur les vallées et les montagnes des structures origamis. Ces matériaux peuvent être des alliages à mémoire de forme (AMF), des polymères à mémoires de formes (PMF), des composites [98], ou des polymères à cristaux liquides. Dans le cas de l’AMF, le matériau est chauffé par effet Joule en lui appliquant directement un courant. Autrement, un matériau conducteur, ayant des propriétés mécaniques stables même à haute température (type Inconel), est utilisé comme système de chauffage [114, 3]. Dans le cas du PMF, un faisceau laser peut être utilisée pour générer une augmentation de température en interagissant avec une matière absorbante placée sur les charnières [115]. Ce type d’actionnement présente l’avantage de disposer de grande densité d’énergie permettant de les appliquer à différentes échelles [116]. Le choix de la forme et de la température de changement ou de transition de phase est un critère clé lors de la conception, en plus de ses dimensions et de son intégration dans la structure origami.

Les actionneurs élémentaires à base de SMA peuvent être classés en trois catégories :

- les fils et ressorts linéaires sont les formes les plus courant des actionneurs AMF. Elles ont permis l’essor du développement de ces actionneurs dans l’industrie automobile et aéronautique.
- les éléments en flexion ont été beaucoup développés pour la robotique et les applications médicales en raison de leur faible encombrement, de leur facilité d’utilisation et de leur compatibilité avec l’imagerie médicale.
- les éléments en torsion qui s’appuient sur une grande déformation de la section active par un blocage des deux extrémités de l’actionneur sans mécanisme additionnel. Par conséquent, le processus de fabrication et d’assemblage peut être simplifié et a conduit au développement de nombreuses conceptions ces dernières années. Elles peuvent être sous forme de bande, de bar, de fil ou de tubes.

5.1.2 Actionnement électro-mécanique

La transduction électro-mécanique est la plus répandue et inclut essentiellement les moteurs électriques et les polymères électro-actifs (PEA). Pour les premiers, ils sont souvent associés à un mécanisme de transmission, par exemple, par câble dans [113, 19]. Les différentes technologies de

moteurs électriques [D3720v1] peuvent être sélectionnées suivant le cahier des charges de l'application. Les PEA se divisent en plusieurs catégories suivant le phénomène de transduction dont les plus répandus sont :

- électronique dont celui utilisé en origami est le polymère diélectrique. Ce dernier fonctionne par un champ électrostatique appliqué sur les électrodes placées sur chaque côté du matériau génère une pression hydrostatique de Maxwell qui le comprime. Il a été utilisé pour démontrer l'auto-plier réversible dans [117, 118] en utilisant un actionneur multi-couche.
- ionique : les déformations des actionneurs se basent sur le déplacement d'ions lors d'une réaction d'oxydo-réduction obtenue par l'application d'une tension. Parmi les polymères ioniques, les polymères conducteurs ont été utilisés pour démontrer le pliage réversible aux petites échelles en milieu liquide [119] pour des micro-boîtes de piégeage de cellules et dans l'air sur des actionneurs tri-couches [120].

5.1.3 Actionnement magnétique

L'auto-plier réversible est également possible par l'application de champs magnétique sur une structure origami équipée d'éléments magnétiques (des aimants ou des élastomères magnéto-actifs ou des particules magnétiques dispersées dans une membrane souple). L'orientation de la magnétisation est contrôlée lors de la fabrication planaire pour ensuite obtenir des formes complexes une fois pliée par l'application d'un champ magnétique [68, 121, 122, 37]. Ce mode d'actionnement constitue une solution privilégiée pour la robotique aux petites échelles [122, 71]. En effet, la génération et le contrôle d'un champ magnétique est plus aisée dans un volume de travail restreint (quelques mm^3 à quelques cm^3).

5.1.4 Les actionneurs pneumatiques/hydrauliques

Le pliage de charnière sur d'origamis rigides peut s'effectuer par des actionneurs pneumatiques positionnés dans les plis comme dans [110] pour le changement de forme de structures métamatériaux. Différents actionneurs pneumatiques à base d'origami ont été proposés pour l'extension/compression, la flexion et la torsion [123]. Une capacité de charge de plus de 1 kg est démontrée avec un actionneur 8.3 g et une pression de 238 mbar. Plus récemment, pour concevoir des structures gonflables modulaires capables de passer d'un mode de déformation à un autre en réponse à un seul signal de commande pneumatique, la multistabilité est programmée sur une structure à plusieurs étages de tour de Kresling [124].

5.2 Changement de forme

Les structures robotiques à base d'origami bénéficient de la reconfigurabilité que procure ces mécanismes. Par conséquent, il est impératif de garantir la réversibilité de l'actionneur pour effectuer le changement de forme des robots. Deux stratégies d'actionnement sont proposées : l'actionnement global et l'actionnement local.

5.2.1 Actionnement local

L'utilisation des actionneurs dans les plis correspond à un actionnement local. Les contributions élémentaires de chaque actionneur permettent alors de générer une déformation de la structure et le passage à différents états. Les problématiques de fabrication et d'intégration sont évidemment d'actualité et trouvent écho à ce qui ont été présentés à la section 4.

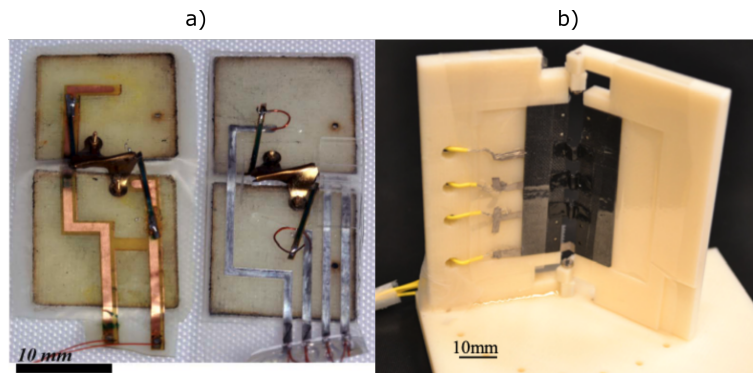


FIGURE 34 – Les capteurs intégrés dans les plis pour mesurer l'état du pliage : a) à gauche le circuit à mailles de cuivre et à droite, le circuit à base d'eutectique gallium-indium (eGaln) [128], b) capteurs à base d'encre de carbone [127].

5.2.2 Actionnement global

Il se focalise sur la génération d'une déformation globale qui va induire le pliage des montagnes-vallées de la structure origami. L'actionneur choisit doit assurer le degré de liberté désiré en termes de course, en translation ou en rotation, et de force (ou couple). Il y a pour l'heure pas de travaux qui parlent de dynamique d'où l'absence du critère temps de réponse ou bande passante. Sur les roues déformables, un actionneur AMF [113] et un moteur électromagnétique [125] ont été utilisés respectivement pour une structure à base de waterbomb et une structure à pli diagonal.

5.3 Commande des structures origami

Pour effectuer les différentes tâches, les commandes mises en place sont souvent simples pour démontrer la preuve du concept. Typiquement, des commandes de type tout-ou-rien sont mises en œuvre sur les préhenseurs [42], les robots mobiles [113] et les robots reconfigurables [126]. Une commande en boucle fermée de la position angulaire de chaque patte d'un robot mobile a été démontrée afin d'optimiser la tâche de locomotion [127]. Cette dernière est possible grâce à l'intégration de capteurs d'angle à base d'encre de carbone dans les plis comme présentée sur la Figure 34-b). Une stratégie d'intégration de capteurs à maille de cuivre et d'alliage à faible température de fusion (voir Figure 34-a) est proposée dans [128].

En revenant sur le contrôle des charnières élémentaires, plusieurs travaux proposent la commande en boucle fermée de charnières à actionnement par AMF. Ces derniers, comme mentionné précédemment, offrent l'avantage d'être compact et disposent de grande densité d'énergie, avantages indispensables pour être intégrés dans les charnières et pour des applications aux petites échelles. Principalement, un correcteur PID (proportionnel-intégral-dérivée) est utilisé. Le retour de la position de la charnière s'effectue par un encodeur [129, 130], un capteur de flexion [127], un circuit à résistance variable intégré dans les plis [128] ou un thermocouple [131].

L'utilisation de commandes avancées n'est pas à l'heure actuelle très répandue car elle se heurte à la limitation des retours d'information capteurs disponibles sur les robots présentés auparavant. C'est un champ d'investigation ouvert qui va certainement bénéficier des dernières avancées en termes de moyen de fabrication. De plus, certaines conceptions, de par leur fonctionnement bistable, ne nécessitent pas l'utilisation d'une commande en boucle fermée.

A retenir :

- L'actionnement des systèmes à base d'origami se fait majoritairement par des moteurs électriques et des alliages à mémoires de formes.
- Deux approches d'actionnement sont utilisées pour le changement de forme : un actionnement

global et un actionnement local dans les plis.

- La commande des robots origamis est majoritairement en boucle ouverte et les développements futurs des capteurs intégrés conduiront certainement à des améliorations de performances par la boucle fermée.

6 Conclusion et Perspectives

L'utilisation d'origamis dans la conception de robots est une méthode qui est encore très récente. Il existe pour l'instant peu d'applications industrielles même si cette approche vient parfaitement dans l'idée de concevoir de futurs robots interagissant mieux avec l'homme et avec leurs environnements souvent complexes et changeants. Les structures origamis dans la robotique peuvent s'employer à toutes les échelles. Des outils de simulation dynamiques sont déjà en place, il reste encore à les améliorer pour tenir compte des matériaux et d'éventuelles déformations conduisant des phénomènes de bistabilité. Le fait de vouloir créer des robots reconfigurables, changeant par exemple de formes en fonction d'un mode de locomotion souhaité place les origamis au coeur de la conception de tels robots. Le fait de pouvoir créer des liaisons cinématiques par pliage de structures mono ou multi-matériaux est un avantage indéniable vis à vis de liaisons mécaniques plus classiques à base d'axes par exemple. Les applications et contextes applicatifs possibles sont nombreux : dispositifs biomédicaux, robotique d'exploration, réalisation de nouveaux organes robotisés... Les avancées de cette nouvelle robotique ne pourront se faire que grâce à une interaction forte entre les différentes disciplines gravitant autour des origamis. Il faudra s'appuyer sur un répertoire déjà large de structures origamis existantes combiné à des idées foisonnantes provenant des roboticiens pour la conception de futurs OrigaBots.

Pour en savoir plus

Robotique et Origamis

par **Stéphane VIOLLET**

Directeur de recherche CNRS

ISM, CNRS/Aix-Marseille Université, Marseille, France

par **Kanty RABENOROSOA**

Maître de conférences (HDR)

Femto-ST, ENSMM, Besançon, France

par **Pierre RENAUD**

Professeur des Universités

INSA Strasbourg, laboratoire ICube, Strasbourg, France

Sources bibliographiques

- [1] Meher McARTHUR et Robert J. LANG. *Folding Paper : the Infinite Possibilities of Origami*. Tuttle Publishing, 2012.
- [2] S. FELTON et al. "A method for building self-folding machines". In : *Science* 345.6197 (août 2014), p. 644-646. ISSN : 0036-8075, 1095-9203. DOI : 10.1126/science.1252610. URL : <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1252610> (visité le 03/09/2022).
- [3] Amir FIROUZEH et Jamie PAIK. "Robogami : A Fully Integrated Low-Profile Robotic Origami". In : *Journal of Mechanisms and Robotics* 7.2 (mai 2015). ISSN : 1942-4302. DOI : 10.1115/1.4029491.
- [4] Erik DEMAINE et al. "Metamorphosis of the cube". In : *Proceedings of the fifteenth annual symposium on Computational geometry*. 1999, p. 409-410.
- [5] Alden YELLOWHORSE et al. "Creating linkage permutations to prevent self-intersection and enable deployable networks of thick-origami". In : *Scientific reports* 8.1 (2018), p. 1-9.
- [6] Nicholas TURNER, B. GOODWINE et M. SEN. "A review of origami applications in mechanical engineering". In : (2016). DOI : 10.1177/0954406215597713. URL : <https://www.semanticscholar.org/paper/c7530fb14ea2c6edb2c702000c8848a13d2bfb51>.
- [7] J. KIM et al. "A self-deployable origami structure with locking mechanism induced by buckling effect". In : *Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on*. Mai 2015, p. 3166-3171. DOI : 10.1109/ICRA.2015.7139635.
- [8] Hay AZULAY, Aviv LUTATY et Nir QVIT. "How Similar Are Proteins and Origami?" In : *Biomolecules* 12.5 (2022), p. 622.
- [9] Koryo MIURA. "Map fold a la Miura style, its physical characteristics and application to the space science". In : *Research of Pattern Formation* (1994), p. 77-90.

- [10] Jesse L. SILVERBERG et al. "Using origami design principles to fold reprogrammable mechanical metamaterials". In : *Science* 345.6197 (août 2014), p. 647-650. ISSN : 0036-8075. DOI : 10.1126/science.1252876.
- [11] Evandro BERNARDES et Stéphane VIOLLET. "Design of an origami bendy straw for robotic multistable structures". In : *Journal of Mechanical Design* 144.3 (2022).
- [12] Seung-Won KIM et al. "Flytrap-inspired robot using structurally integrated actuation based on bistability and a developable surface". In : *Bioinspiration & biomimetics* 9.3 (2014), p. 036004.
- [13] Nakul Prabhakar BENDE et al. "Geometrically controlled snapping transitions in shells with curved creases." eng. In : *Proc Natl Acad Sci U S A* 112.36 (sept. 2015), p. 11175-11180. DOI : 10.1073/pnas.1509228112. URL : <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1509228112>.
- [14] Cagdas D. ONAL, Robert J. WOOD et Daniela Rus. "Towards printable robotics : Origami-inspired planar fabrication of three-dimensional mechanisms". en. In : *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Shanghai, China : IEEE, mai 2011, p. 4608-4613. ISBN : 978-1-61284-386-5. DOI : 10.1109/ICRA.2011.5980139. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/5980139/> (visité le 03/09/2022).
- [15] Evgueni T. FILIPOV, Tomohiro TACHI et Glaucio H. PAULINO. "Origami tubes assembled into stiff, yet reconfigurable structures and metamaterials." eng. In : *Proc Natl Acad Sci U S A* 112.40 (oct. 2015), p. 12321-12326. DOI : 10.1073/pnas.1509465112. URL : <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1509465112>.
- [16] Pedro M. REIS, FRANCISCO LÓPEZ JIMÉNEZ et Joel MARTHELOT. "Transforming architectures inspired by origami." eng. In : *Proc Natl Acad Sci U S A* 112.40 (oct. 2015), p. 12234-12235. DOI : 10.1073/pnas.1516974112. URL : <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1516974112>.
- [17] Koryo MIURA et Robert J LANG. "The science of Miura-ori : A review". In : *Origami* 4 (2009), p. 87-99.
- [18] Kaori KURIBAYASHI et al. "Self-deployable origami stent grafts as a biomedical application of Ni-rich TiNi shape memory alloy foil". In : *Materials Science and Engineering : A* 419.1-2 (mars 2006), p. 131-137. ISSN : 09215093. DOI : 10.1016/j.msea.2005.12.016.
- [19] S. FELTON et al. "A method for building self-folding machines". In : *Science* 345.6197 (août 2014), p. 644-646. ISSN : 0036-8075. DOI : 10.1126/science.1252610.
- [20] Zhenishbek ZHAKYPOV et al. "The design and control of the multi-modal locomotion origami robot, Tribot". In : *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, sept. 2015, p. 4349-4355. ISBN : 978-1-4799-9994-1. DOI : 10.1109/IROS.2015.7353994.
- [21] Shuhei MIYASHITA et al. "An untethered miniature origami robot that self-folds, walks, swims, and degrades". In : *Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on*. IEEE, 2015, p. 1490-1496.
- [22] E. DEMAINE et J. O'ROURKE. *Geometric folding algorithms - linkages, origami, polyhedra*. Cambridge University Press, 2007. URL : <https://www.semanticscholar.org/paper/70b5e6b667163f1dd6e0849c9266c3b40df3372e>.
- [23] Robert J. LANG. *Twists, tilings, and tessellations : mathematical methods for geometric origami*. Boca Raton : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018. ISBN : 978-1-56881-232-8.

- [24] C. D. ONAL, R. J. WOOD et D. RUS. "Towards printable robotics : Origami-inspired planar fabrication of three-dimensional mechanisms". In : *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*. Mai 2011, p. 4608-4613. DOI : 10.1109/ICRA.2011.5980139.
- [25] N. KIDAMBI et K. W. WANG. "Dynamics of Kresling origami deployment." In : *Physical review. E* 101 (2020), p. 063003. DOI : 10.1103/physreve.101.063003. arXiv : 2003.10411. URL : <https://www.semanticscholar.org/paper/8d21e31ef5ddd734a29e7e4c3b77a0c3fb4bb387>.
- [26] Robert J LANG. *Origami 4*. CRC Press, 2009.
- [27] Jesse L SILVERBERG et al. "Origami structures with a critical transition to bistability arising from hidden degrees of freedom". In : *Nature materials* 14.4 (2015), p. 389-393.
- [28] R. LANG. *Twists, Tilings, and Tessellations : Mathematical Methods for Geometric Origami*. CRC Press, 2018. URL : <https://www.semanticscholar.org/paper/fa41ccb9ef25cead8c63c6c7805c9>
- [29] Mustafa BOYVAT, Je-Sung KOH et Robert J. WOOD. "Addressable wireless actuation for multijoint folding robots and devices". In : *Science Robotics* 2.8 (juill. 2017). ISSN : 2470-9476. DOI : 10.1126/scirobotics.aan1544.
- [30] Stefano MINTCHEV et al. "A portable three-degrees-of-freedom force feedback origami robot for human-robot interactions". In : *Nature Machine Intelligence* 1.12 (déc. 2019), p. 584-593. ISSN : 2522-5839. DOI : 10.1038/s42256-019-0125-1.
- [31] K. LIU et G. H. PAULINO. "Nonlinear mechanics of non-rigid origami : an efficient computational approach". In : *Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 473.2206 (oct. 2017), p. 20170348. ISSN : 1364-5021. DOI : 10.1098/rspa.2017.0348.
- [32] SERGIO ANDREE LESCOANO. "Design, fabrication and control of a microrobot for laser phonomicrosurgery". Thèse de doct. Besançon : Université de Franche-Comté, 2015.
- [33] Sa-Reum KIM et al. "Fast, compact, and lightweight shape-shifting system composed of distributed self-folding origami modules". In : *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, mai 2016, p. 4969-4974. ISBN : 978-1-4673-8026-3. DOI : 10.1109/ICRA.2016.7487704.
- [34] Hayley McCLINTOCK et al. "The milliDelta : A high-bandwidth, high-precision, millimeter-scale Delta robot". In : *Science Robotics* 3.14 (2018). ISSN : 24709476. DOI : 10.1126/scirobotics.aar3018.
- [35] Hiroyuki SUZUKI et Robert J. WOOD. "Origami-inspired miniature manipulator for teleoperated microsurgery". In : *Nature Machine Intelligence* 2.8 (août 2020), p. 437-446. ISSN : 2522-5839. DOI : 10.1038/s42256-020-0203-4.
- [36] Peter A. YORK et al. "Microrobotic laser steering for minimally invasive surgery". In : *Science Robotics* 6.50 (jan. 2021). ISSN : 2470-9476. DOI : 10.1126/scirobotics.abd5476.
- [37] Suk-Jun KIM et al. "An origami-inspired, self-locking robotic arm that can be folded flat". In : *Science Robotics* 3.16 (mars 2018). ISSN : 2470-9476. DOI : 10.1126/scirobotics.aar2915.
- [38] Shuguang LI et al. "Fluid-driven origami-inspired artificial muscles". In : *Proceedings of the National academy of Sciences* 114.50 (2017), p. 13132-13137.
- [39] Donghwa JEONG et Kiju LEE. "Design and analysis of an origami-based three-finger manipulator". In : *Robotica* 36.2 (2018), p. 261-274.
- [40] Zhi Ern TEOH et al. "Rotary-actuated folding polyhedrons for midwater investigation of delicate marine organisms". In : *Science Robotics* 3.20 (2018), eaat5276.

- [41] Jakob A FABER, Andres F ARRIETA et André R STUDART. "Bioinspired spring origami". In : *Science* 359.6382 (2018), p. 1386-1391.
- [42] Shuguang LI et al. "A Vacuum-driven Origami Magic-ball Soft Gripper". In : *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, mai 2019, p. 7401-7408. ISBN : 978-1-5386-6027-0. DOI : 10.1109/ICRA.2019.8794068.
- [43] P. BIRKMEYER et R. S. FEARING. "DASH : A resilient high-speed 15g hexapedal robot". In : *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, oct. 2009, p. 418-419. ISBN : 978-1-4244-3803-7. DOI : 10.1109/IROS.2009.5353975.
- [44] Dae-Young LEE et al. "The Deformable Wheel Robot Using Magic-Ball Origami Structure". In : *Volume 6B : 37th Mechanisms and Robotics Conference*. Portland, Oregon, USA : American Society of Mechanical Engineers, août 2013, V06BT07A040. ISBN : 978-0-7918-5594-2. DOI : 10.1115/DETC2013-13016. (Visité le 03/09/2022).
- [45] Dae-Young LEE et al. "Highload capacity origami transformable wheel". In : *Science Robotics* 6.53 (avr. 2021). ISSN : 2470-9476. DOI : 10.1126/scirobotics.abe0201.
- [46] Wei-Hsi CHEN et al. "A Tendon-Driven Origami Hopper Triggered by Proprioceptive Contact Detection". In : *2020 3rd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*. IEEE, mai 2020, p. 373-380. ISBN : 978-1-7281-6570-7. DOI : 10.1109/RoboSoft48309.2020.9116040.
- [47] Qiwei ZHANG, Hongbin FANG et Jian XU. "Yoshimura-origami Based Earthworm-like Robot With 3-dimensional Locomotion Capability". In : *Frontiers in Robotics and AI* 8 (août 2021). ISSN : 2296-9144. DOI : 10.3389/frobt.2021.738214.
- [48] Je-Sung KOH et Kyu-Jin CHO. "Omegabot : Biomimetic inchworm robot using SMA coil actuator and smart composite microstructures (SCM)". In : *2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. IEEE, déc. 2009, p. 1154-1159. ISBN : 978-1-4244-4774-9. DOI : 10.1109/ROBIO.2009.5420752.
- [49] Stefano MINTCHEV, Jun SHINTAKE et Dario FLOREANO. "Bioinspired dual-stiffness origami". In : *Science Robotics* 3.20 (2018), eaau0275.
- [50] Pooya SAREH et al. "Rorigami : A rotary origami protective system for robotic rotorcraft". In : *Science Robotics* 3.22 (sept. 2018), eaah5228. ISSN : 2470-9476. DOI : 10.1126/scirobotics.aah5228. URL : <https://www.science.org/doi/10.1126/scirobotics.aah5228> (visité le 03/09/2022).
- [51] Louis DUFOUR et al. "A drone with insect-inspired folding wings". In : *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Ieee. 2016, p. 1576-1581.
- [52] Jing SHU et Pakpong CHIRARATTANANON. "A quadrotor with an origami-inspired protective mechanism". In : *IEEE Robotics and Automation Letters* 4.4 (2019), p. 3820-3827.
- [53] Sang-Min BAEK et al. "Ladybird beetle-inspired compliant origami". In : *Science Robotics* 5.41 (2020), eaaz6262.
- [54] N. KIDAMBI et K. W. WANG. "Dynamics of Kresling origami deployment". In : *Phys. Rev. E* 101 (6 juin 2020), p. 063003. DOI : 10.1103/PhysRevE.101.063003. URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.101.063003>.
- [55] T. TACHI. "Origamizing Polyhedral Surfaces". In : *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 16.2 (mars 2010), p. 298-311. ISSN : 1077-2626. DOI : 10.1109/TVCG.2009.67.

- [56] Cagdas D. ONAL et al. "Origami-Inspired Printed Robots". In : *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 20.5 (oct. 2015), p. 2214-2221. ISSN : 1083-4435, 1941-014X. DOI : 10.1109/TMECH.2014.2369854. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/6975157/>.
- [57] Florent COSANDIER et al. *Flexure mechanism design*. First edition. Lausanne : EFPL Press, 2017. ISBN : 978-2-940222-56-8.
- [58] Arnaud HUBERT et Yassine HADDAB. "Conception, modélisation et commande des systèmes microrobotiques". fr. In : *Robotique* (mai 2015). DOI : 10.51257/a-v1-s7712. URL : <https://www.techniques-ingenieur.fr/doi/10.51257/a/v1/s7712> (visité le 03/09/2022).
- [59] BIRUTA KRESLING. *Films and Clips up-dates about Kresling-origami*. Jan. 2021. URL : https://www.researchgate.net/publication/344780932_24_28_Films_and_Clips_up-dates_about_Kresling-origami_08i2021.
- [60] BIRUTA KRESLING. "Plant "design" : mechanical simulations of growth patterns and bionics". In : *Biomimetics*. 1995, p. 105-222.
- [61] BIRUTA KRESLING. "Folded Tubes as Compared to Kikko ("Tortoise-Shell") Bamboo". In : *Origami* {3}. Sous la dir. de Thomas HULL. T. 1st. A K Peters/CRC Press, juill. 2002, p. 12. ISBN : 9780429064906. DOI : 10.1201/b15735.
- [62] Q ZHANG et al. "Bistable behaviour of a deployable cylinder with Kresling pattern". In : *Proceedings of the 7th International Meeting on Origami in Science, Mathematics and Education (7OSME)*, Oxford, UK. 2018, p. 4-7.
- [63] J. BERRE et al. "Toward the Design of Kresling Tower Origami As a Compliant Building Block". en. In : *Journal of Mechanisms and Robotics* 14.4 (août 2022), p. 045002. ISSN : 1942-4302, 1942-4310. DOI : 10.1115/1.4053378. URL : <https://asmedigitalcollection.asme.org/mechanismsrobotics/article/14/4/045002/1130972/Toward-the-Design-of-Kresling-Tower-Origami-As-a> (visité le 03/09/2022).
- [64] T. A. WITTEN. "Stress focusing in elastic sheets". In : *Reviews of Modern Physics* 79.2 (avr. 2007), p. 643-675. ISSN : 0034-6861. DOI : 10.1103/RevModPhys.79.643. URL : <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.79.643>.
- [65] K. LIU et G. H. PAULINO. "Highly efficient nonlinear structural analysis of origami assemblages using the MERLIN2 software". In : *Origami* 7. 2018.
- [66] Kejun HU et al. "Toward actuation of Kresling pattern-based origami robots". In : *Smart Materials and Structures* 31.10 (oct. 2022), p. 105025. ISSN : 0964-1726. DOI : 10.1088/1361-665X/ac9020.
- [67] LUC MARECHAL et al. "Toward a Common Framework and Database of Materials for Soft Robotics". In : *Soft Robotics* 8.3 (juin 2021), p. 284-297. ISSN : 2169-5172. DOI : 10.1089/soro.2019.0115.
- [68] Saad AHMED et al. "Multi-Field Responsive Origami Structures : Preliminary Modeling and Experiments". In : *Volume 6B : 37th Mechanisms and Robotics Conference*. American Society of Mechanical Engineers, août 2013. ISBN : 978-0-7918-5594-2. DOI : 10.1115/DETC2013-12405.
- [69] Amine BENOUBHA et al. "Origami-based auxetic tunable Helmholtz resonator for noise control". In : *Smart Materials and Structures* (jan. 2021). ISSN : 0964-1726. DOI : 10.1088/1361-665X/abe180.

- [70] Y. C. HU et al. "Simulating flexible origami structures by finite element method". In : *International Journal of Mechanics and Materials in Design* 17.4 (déc. 2021), p. 801-829. ISSN : 1569-1713. DOI : 10.1007/s10999-021-09538-w.
- [71] Qiji ZE et al. "Soft robotic origami crawler". In : *Science Advances* 8.13 (avr. 2022). ISSN : 2375-2548. DOI : 10.1126/sciadv.abm7834.
- [72] Daniela RUS et Michael T. TOLLEY. "Design, fabrication and control of origami robots". In : *Nature Reviews Materials* 3.6 (juin 2018), p. 101-112. ISSN : 2058-8437. DOI : 10.1038/s41578-018-0009-8.
- [73] Jamie PAIK. "Soft robot design methodology for push-button manufacturing". In : *Nature Reviews Materials* 3.6 (juin 2018), p. 81-83. ISSN : 2058-8437. DOI : 10.1038/s41578-018-0014-y.
- [74] Zhenishbek ZHAKYPOV et Jamie PAIK. "Design Methodology for Constructing Multi-material Origami Robots and Machines". In : *IEEE Transactions on Robotics* 34.1 (fév. 2018), p. 151-165. ISSN : 1552-3098. DOI : 10.1109/TRO.2017.2775655.
- [75] Daniel M AUKES et al. "An analytic framework for developing inherently-manufacturable pop-up laminate devices". In : *Smart Materials and Structures* 23.9 (sept. 2014), p. 094013. ISSN : 0964-1726. DOI : 10.1088/0964-1726/23/9/094013.
- [76] Yee Ling YAP, Swee Leong SING et Wai Yee YEONG. "A review of 3D printing processes and materials for soft robotics". In : *Rapid Prototyping Journal* 26.8 (juin 2020), p. 1345-1361. ISSN : 1355-2546. DOI : 10.1108/RPJ-11-2019-0302.
- [77] Brandon SARGENT et al. "Heat set creases in polyethylene terephthalate (PET) sheets to enable origami-based applications". In : *Smart Materials and Structures* 28.11 (nov. 2019), p. 115047. ISSN : 0964-1726, 1361-665X. DOI : 10.1088/1361-665X/ab49df. URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-665X/ab49df> (visité le 03/09/2022).
- [78] Brandon SARGENT et al. "An Origami-Based Medical Support System to Mitigate Flexible Shaft Buckling". In : *Journal of Mechanisms and Robotics* 12.4 (août 2020), p. 041005. ISSN : 1942-4302, 1942-4310. DOI : 10.1115/1.4045846. URL : <https://asmedigitalcollection.asme.org/mechanismsrobotics/article/doi/10.1115/1.4045846/1072248/An-Origami-Based-Medical-Support-System-to> (visité le 03/09/2022).
- [79] Joseph M. GATTAS et Zhong YOU. "Quasi-Static Impact Response of Alternative Origami-Core Sandwich Panels". In : *Volume 6B : 37th Mechanisms and Robotics Conference*. Portland, Oregon, USA : American Society of Mechanical Engineers, août 2013, V06BT07A032. ISBN : 978-0-7918-5594-2. DOI : 10.1115/DETC2013-12681. (Visité le 03/09/2022).
- [80] Jared BUTLER et al. "Highly Compressible Origami Bellows for Harsh Environments". In : *Volume 5B : 40th Mechanisms and Robotics Conference*. Charlotte, North Carolina, USA : American Society of Mechanical Engineers, août 2016, V05BT07A001. ISBN : 978-0-7918-5016-9. DOI : 10.1115/DETC2016-59060.
- [81] Duncan W. HALDANE et al. "Integrated Manufacture of Exoskeletons and Sensing Structures for Folded Millirobots". en. In : *Journal of Mechanisms and Robotics* 7.2 (mai 2015), p. 021011. ISSN : 1942-4302, 1942-4310. DOI : 10.1115/1.4029495. URL : <https://asmedigitalcollection.asme.org/mechanismsrobotics/article/doi/10.1115/1.4029495/377419/Integrated-Manufacture-of-Exoskeletons-and-Sensing> (visité le 03/09/2022).

- [82] Alec ORLOFSKY et al. "Mechanically Programmed Miniature Origami Grippers". en. In : *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Paris, France : IEEE, mai 2020, p. 2872-2878. ISBN : 978-1-72817-395-5. DOI : 10.1109 / ICRA40945. 2020.9196545. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9196545/> (visité le 03/09/2022).
- [83] R. J. WOOD et al. "Microrobot Design Using Fiber Reinforced Composites". en. In : *Journal of Mechanical Design* 130.5 (mai 2008), p. 052304. ISSN : 1050-0472, 1528-9001. DOI : 10.1115/1.2885509. URL : <https://asmedigitalcollection.asme.org/mechanicaldesign/article/doi/10.1115/1.2885509/458340/Microrobot-Design-Using-Fiber-Reinforced> (visité le 03/09/2022).
- [84] Aaron HOOVER et Ron FEARING. "Fast Scale Prototyping for Folded Millirobots". In : (), p. 7.
- [85] K. SUZUKI, I. SHIMOYAMA et H. MIURA. "Insect-model based microrobot with elastic hinges". In : *Journal of Microelectromechanical Systems* 3.1 (mars 1994), p. 4-9. ISSN : 10577157. DOI : 10.1109 / 84.285718. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/285718/> (visité le 03/09/2022).
- [86] Takashi YASUDA, Isao SHIMOYAMA et Hirofumi MIURA. "Microrobot actuated by a vibration energy field". In : *Sensors and Actuators A : Physical* 43.1-3 (mai 1994), p. 366-370. ISSN : 09244247. DOI : 10.1016/0924-4247(93)00709-D. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/092442479300709D> (visité le 03/09/2022).
- [87] Zeang ZHAO et al. "3D printing of complex origami assemblages for reconfigurable structures". In : *Soft Matter* 14.39 (2018), p. 8051-8059. ISSN : 1744-683X, 1744-6848. DOI : 10.1039/C8SM01341A. URL : <http://xlink.rsc.org/?DOI=C8SM01341A> (visité le 03/09/2022).
- [88] Kiju LEE, Yanzhou WANG et Chuanqi ZHENG. "TWISTER Hand : Underactuated Robotic Gripper Inspired by Origami Twisted Tower". In : *IEEE Transactions on Robotics* 36.2 (avr. 2020), p. 488-500. ISSN : 1552-3098, 1941-0468. DOI : 10.1109/TRO.2019.2956870. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8949550/> (visité le 03/09/2022).
- [89] Yanzhou WANG et Kiju LEE. "3D-printed semi-soft mechanisms inspired by origami twisted tower". In : *2017 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS)*. 2017, p. 161-166. DOI : 10.1109/AHS.2017.8046373.
- [90] Benjamin P RHOADS et Hai-Jun SU. "The design and fabrication of a deformable origami wheel". In : *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. T. 50169. American Society of Mechanical Engineers. 2016, V05BT07A021.
- [91] Marius A. WAGNER et al. "Hinges for origami-inspired structures by multimaterial additive manufacturing". In : *Materials & Design* 191 (juin 2020), p. 108643. ISSN : 02641275. DOI : 10.1016/j.matdes.2020.108643. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127520301775> (visité le 03/09/2022).
- [92] Jared BUTLER, Nathan PEHRSON et Spencer MAGLEBY. "Folding of Thick Origami Through Regionally Sandwiched Compliant Sheets". In : *Journal of Mechanisms and Robotics* 12.1 (fév. 2020), p. 011019. ISSN : 1942-4302, 1942-4310. DOI : 10.1115 / 1.4045248. URL : <https://asmedigitalcollection.asme.org/mechanismsrobotics/article/doi/10.1115/1.4045248/1065793/Folding-of-Thick-Origami-Through-Regionally> (visité le 03/09/2022).

- [93] Evelyne DARQUE-CERETTI et Bernard MONASSE. "Assemblage des matériaux par collage". fr. In : *Plastiques et composites* (avr. 2008). DOI : 10.51257/a-v1-am3758. URL : <https://www.techniques-ingenieur.fr/doi/10.51257/a/v1/am3758> (visité le 03/09/2022).
- [94] Moataz ABDULHAFEZ, Joshua LINE et Mostafa BEDEWY. "Sequential Self-Folding of Shape Memory Polymer Sheets by Laser Rastering Toward Origami-Based Manufacturing". In : *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 143.9 (sept. 2021), p. 091008. ISSN : 1087-1357, 1528-8935. DOI : 10.1115/1.4050463. URL : <https://asmedigitalcollection.asme.org/manufacturingscience/article/143/9/091008/1103257/Sequential-Self-Folding-of-Shape-Memory-Polymer> (visité le 03/09/2022).
- [95] Jeong-Hyun CHO, Anum AZAM et David H. GRACIAS. "Three Dimensional Nanofabrication Using Surface Forces". en. In : *Langmuir* 26.21 (nov. 2010), p. 16534-16539. ISSN : 0743-7463, 1520-5827. DOI : 10.1021/la1013889. URL : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/la1013889> (visité le 03/09/2022).
- [96] Kenji SUZUKI et al. "Self-assembly of three dimensional micro mechanisms using thermal shrinkage of polyimide". In : *Microsystem Technologies* 13.8-10 (avr. 2007), p. 1047-1053. ISSN : 0946-7076, 1432-1858. DOI : 10.1007/s00542-006-0303-z. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s00542-006-0303-z> (visité le 03/09/2022).
- [97] Stefanie MUELLER, Bastian KRUCK et Patrick BAUDISCH. "LaserOrigami : laser-cutting 3D objects". In : *CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems on - CHI EA '13*. Paris, France : ACM Press, 2013, p. 2851. ISBN : 978-1-4503-1952-2. DOI : 10.1145/2468356.2479544. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2468356.2479544> (visité le 03/09/2022).
- [98] Michael T TOLLEY et al. "Self-folding origami : shape memory composites activated by uniform heating". In : *Smart Materials and Structures* 23.9 (sept. 2014), p. 094006. ISSN : 0964-1726. DOI : 10.1088/0964-1726/23/9/094006.
- [99] Duncan DAVIS et al. "Self-folding of polymer sheets using microwaves and graphene ink". In : *RSC Advances* 5.108 (2015), p. 89254-89261. ISSN : 2046-2069. DOI : 10.1039/C5RA16431A. URL : <http://xlink.rsc.org/?DOI=C5RA16431A> (visité le 03/09/2022).
- [100] Qi GE et al. "Active origami by 4D printing". In : *Smart Materials and Structures* 23.9 (sept. 2014), p. 094007. ISSN : 0964-1726, 1361-665X. DOI : 10.1088/0964-1726/23/9/094007. URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/23/9/094007> (visité le 03/09/2022).
- [101] Edwin PERAZA-HERNANDEZ et al. "Design and Optimization of a Shape Memory Alloy-Based Self-Folding Sheet". In : *Journal of Mechanical Design* 135.11 (nov. 2013), p. 111007. ISSN : 1050-0472, 1528-9001. DOI : 10.1115/1.4025382. URL : <https://asmedigitalcollection.asme.org/mechanicaldesign/article/doi/10.1115/1.4025382/693881/Design-and-Optimization-of-a-Shape-Memory> (visité le 03/09/2022).
- [102] Michael T TOLLEY et al. "Self-folding origami : shape memory composites activated by uniform heating". In : *Smart Materials and Structures* 23.9 (sept. 2014), p. 094006. ISSN : 0964-1726, 1361-665X. DOI : 10.1088/0964-1726/23/9/094006. URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/23/9/094006> (visité le 03/09/2022).
- [103] Jake J. ABBOTT, Eric DILLER et Andrew J. PETRUSKA. "Magnetic Methods in Robotics". In : *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems* 3.1 (mai 2020), p. 57-90. ISSN : 2573-5144. DOI : 10.1146/annurev-control-081219-082713.

- [104] Binayak BHANDARI, Gil-Yong LEE et Sung-Hoon AHN. "A review on IPMC material as actuators and sensors : Fabrications, characteristics and applications". In : *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 13.1 (jan. 2012), p. 141-163. ISSN : 1229-8557. DOI : 10.1007/s12541-012-0020-8.
- [105] Jaronie MOHD JANI et al. "A review of shape memory alloy research, applications and opportunities". In : *Materials & Design (1980-2015)* 56 (avr. 2014), p. 1078-1113. ISSN : 02613069. DOI : 10.1016/j.matdes.2013.11.084.
- [106] NianFeng WANG et al. "Advances in dielectric elastomer actuation technology". In : *Science China Technological Sciences* 61.10 (oct. 2018), p. 1512-1527. ISSN : 1674-7321. DOI : 10.1007/s11431-017-9140-0.
- [107] J. E. HUBER, N. A. FLECK et M. F. ASHBY. "The selection of mechanical actuators based on performance indices". In : *Proceedings of the Royal Society of London. Series A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 453.1965 (oct. 1997), p. 2185-2205. ISSN : 1364-5021. DOI : 10.1098/rspa.1997.0117.
- [108] Ali MAZIZ et al. "Demonstrating kHz Frequency Actuation for Conducting Polymer Microactuators". In : *Advanced Functional Materials* 24.30 (août 2014), p. 4851-4859. ISSN : 1616301X. DOI : 10.1002/adfm.201400373.
- [109] Alexander PAGANO et al. "A crawling robot driven by multi-stable origami". In : *Smart Materials and Structures* 26.9 (sept. 2017), p. 094007. ISSN : 0964-1726. DOI : 10.1088/1361-665X/aa721e.
- [110] Johannes T.B. OVERVELDE et al. "A three-dimensional actuated origami-inspired transformable metamaterial with multiple degrees of freedom". In : *Nature Communications* 7.1 (avr. 2016), p. 10929. ISSN : 2041-1723. DOI : 10.1038/ncomms10929.
- [111] Shuhei MIYASHITA et al. "Robotic metamorphosis by origami exoskeletons". In : *Science Robotics* 2.10 (sept. 2017). ISSN : 2470-9476. DOI : 10.1126/scirobotics.aao4369.
- [112] H OKUZAKI et al. "A biomorphic origami actuator fabricated by folding a conducting paper". In : *Journal of Physics : Conference Series* 127 (août 2008), p. 012001. ISSN : 1742-6596. DOI : 10.1088/1742-6596/127/1/012001.
- [113] Dae-Young LEE et al. "The Deformable Wheel Robot Using Magic-Ball Origami Structure". In : *Volume 6B : 37th Mechanisms and Robotics Conference*. American Society of Mechanical Engineers, août 2013. ISBN : 978-0-7918-5594-2. DOI : 10.1115/DETC2013-13016.
- [114] Jamie K PAIK et Robert J WOOD. "A bidirectional shape memory alloy folding actuator". In : *Smart Materials and Structures* 21.6 (juin 2012), p. 065013. ISSN : 0964-1726. DOI : 10.1088/0964-1726/21/6/065013. URL : <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.370.2353&rep=rep1&type=pdf>.
- [115] Ying LIU et al. "Self-folding of polymer sheets using local light absorption". In : *Soft Matter* 8.6 (2012), p. 1764-1769. ISSN : 1744-683X. DOI : 10.1039/C1SM06564E.
- [116] Kejun HU, Kanty RABENOROSOA et Morvan OUISSE. "A Review of SMA-Based Actuators for Bidirectional Rotational Motion : Application to Origami Robots". In : *Frontiers in Robotics and AI* 8 (juill. 2021). ISSN : 2296-9144. DOI : 10.3389/frobt.2021.678486.
- [117] Saad AHMED, Zoubeida OUNAIES et Erika Ann F. ARROJADO. "Electric field-induced bending and folding of polymer sheets". In : *Sensors and Actuators A : Physical* 260 (juin 2017), p. 68-80. ISSN : 09244247. DOI : 10.1016/j.sna.2017.03.025.

- [118] S AHMED, Z OUNAIES et M FRECKER. "Investigating the performance and properties of dielectric elastomer actuators as a potential means to actuate origami structures". In : *Smart Materials and Structures* 23.9 (sept. 2014), p. 094003. ISSN : 0964-1726. DOI : 10.1088/0964-1726/23/9/094003.
- [119] ELISABETH SMELA, OLLE INGANÄS et INGEMAR LUNDSTRÖM. "Controlled Folding of Micrometer-Size Structures". In : *Science* 268.5218 (1995), p. 1735-1738.
- [120] Amine BENOUIHA et al. "Electro-Active Polymer Based Self-Folding Approach Devoted to Origami-Inspired Structures". In : *Volume 1 : Development and Characterization of Multifunctional Materials; Modeling, Simulation, and Control of Adaptive Systems; Integrated System Design and Implementation*. American Society of Mechanical Engineers, sept. 2018. ISBN : 978-0-7918-5194-4. DOI : 10.1115/SMASIS2018-8153.
- [121] B.M. COWAN. "Cowan, B. M. (2015). Magnetically induced actuation and optimization of the Miura-ori structure". Thèse de doct. The Pennsylvania State University, 2015.
- [122] Tianqi XU et al. "Millimeter-scale flexible robots with programmable three-dimensional magnetization and motions". In : *Science Robotics* 4.29 (avr. 2019). ISSN : 2470-9476. DOI : 10.1126/scirobotics.aav4494.
- [123] Ramses V. MARTINEZ et al. "Elastomeric Origami : Programmable Paper-Elastomer Composites as Pneumatic Actuators". In : *Advanced Functional Materials* 22.7 (avr. 2012), p. 1376-1384. ISSN : 1616301X. DOI : 10.1002/adfm.201102978.
- [124] David MELANCON et al. "Inflatable Origami : Multimodal Deformation via Multistability". In : *Advanced Functional Materials* 32.35 (août 2022), p. 2201891. ISSN : 1616-301X. DOI : 10.1002/adfm.202201891.
- [125] Benjamin P. RHOADS et Hai-Jun SU. "The Design and Fabrication of a Deformable Origami Wheel". In : *Volume 5B : 40th Mechanisms and Robotics Conference*. American Society of Mechanical Engineers, août 2016. ISBN : 978-0-7918-5016-9. DOI : 10.1115/DETC2016-60045.
- [126] E. HAWKES et al. "Programmable matter by folding". In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107.28 (juill. 2010), p. 12441-12445. ISSN : 0027-8424. DOI : 10.1073/pnas.0914069107.
- [127] Amir FIROUZEH et al. "Sensor and actuator integrated low-profile robotic origami". In : *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, nov. 2013, p. 4937-4944. ISBN : 978-1-4673-6358-7. DOI : 10.1109/IROS.2013.6697069. URL : https://www.researchgate.net/profile/Jamie-Paik/publication/261353320_Sensor_and_actuator_integrated_low-profile_robotic_origami/links/58dba61b458515152b1f9e98/Sensor-and-actuator-integrated-low-profile-robotic-origami.pdf.
- [128] J. K. PAIK, R. K. KRAMER et R. J. WOOD. "Stretchable circuits and sensors for robotic origami". In : *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, sept. 2011, p. 414-420. ISBN : 978-1-61284-456-5. DOI : 10.1109/IROS.2011.6094746.
- [129] G SONG. "Design and control of a Nitinol wire actuated rotary servo". In : *Smart Materials and Structures* 16.5 (oct. 2007), p. 1796-1801. ISSN : 0964-1726. DOI : 10.1088/0964-1726/16/5/034.
- [130] Youngshik KIM et al. "Bidirectional rotating actuators using shape memory alloy wires". In : *Sensors and Actuators A : Physical* 295 (août 2019), p. 512-522. ISSN : 09244247. DOI : 10.1016/j.sna.2019.05.047.
- [131] Jun SHENG et al. "Development of a Meso-Scale SMA-Based Torsion Actuator for Image-Guided Procedures". In : *IEEE Transactions on Robotics* 33.1 (fév. 2017), p. 240-248. ISSN : 1552-3098. DOI : 10.1109/TRO.2016.2623348.