



HAL
open science

Conception de structures robotiques exploitant des origamis non rigidement pliables

John Berre

► **To cite this version:**

John Berre. Conception de structures robotiques exploitant des origamis non rigidement pliables. Automatique / Robotique. Université de Strasbourg, 2022. Français. NNT : 2022STRAD026 . tel-04012014

HAL Id: tel-04012014

<https://theses.hal.science/tel-04012014v1>

Submitted on 2 Mar 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.



UNIVERSITÉ DE STRASBOURG



École doctorale MSII

ICube - UMR 7357

Équipe RDH

THÈSE

Auteur : John BERRE

Soutenue le : 16 décembre 2022

Pour l'obtention du grade de : Docteur de l'université de Strasbourg

Spécialité : Robotique

Conception de structures robotiques exploitant des origamis non rigidement pliables

Directeur de Thèse : Pierre Renaud

Co-encadrants : François Geiskopf et Lennart Rubbert

JURY :

Rapporteurs :

Chedli BOUZGARROU Professeur des universités, SIGMA, Clermont Ferrand, Institut Pascal
Stéphane CARO Directeur de recherche CNRS, LS2N, Nantes

Examineurs :

Stéphane VIOLLET Directeur de recherche CNRS, ISM, Marseille
Pierre RENAUD Professeur des universités, INSA Strasbourg
François GEISKOPF Maître de conférences, INSA Strasbourg
Lennart RUBBERT Maître de conférences, INSA Strasbourg

Remerciements

Ainsi débute ce manuscrit avec un remerciement pour toutes les personnes qui ont rendu cette expérience possible.

Pour commencer, j'adresse un chaleureux remerciement à mon directeur de thèse Pierre Renaud, pour m'avoir permis de découvrir le travail dans le cadre de la recherche académique au travers du projet Origabot lors de mon stage de fin d'études. Cette première expérience dans le monde de la recherche qui m'a donné envie de poursuivre l'expérience trois années de plus au sein de ce même projet, mais dans le rôle cette fois-ci de doctorant. Trois années supplémentaires durant lesquelles j'ai pu continuer d'apprécier son encadrement de qualité tant par la justesse de ses remarques que par le suivi régulier qui m'ont permis d'évoluer sereinement lors de mon travail. Je remercie également mes encadrants François Geiskopf et Lennart Rubbert pour la qualité de leur encadrement qui fut tout aussi important que celui de mon directeur. Ce trio composé d'esprits complémentaires a rendu nos échanges riches en propositions. Au-delà de leurs qualités en tant que chercheur, j'ai pu apprécier leur esprit, bonne humeur et bienveillance qui ont rendu ces trois années particulièrement agréables.

Je remercie également chaleureusement les membres du jury lors de ma soutenance, les rapporteurs Stéphane Caro, président du jury et Chedli Bouzgarrou pour m'avoir fait l'honneur de relire mes travaux. Je remercie également l'ensemble du jury aussi composé de Stéphane Viollet pour leurs questions et remarques pertinentes lors de l'oral.

Je remercie les collaborateurs, collègues, et stagiaires qui ont participé activement à rendre ce travail possible, en particulier Benoît Wach, Cédric Roth, Olivier Schalck, Vincent Vottero, Léo Wurtz, Damien Cartier Millon et Corentin Brice.

Pour l'ambiance de travail particulièrement agréable dans l'open-space, mais aussi en dehors, je remercie tous mes collègues de travail au sein du laboratoire.

Enfin, je remercie bien évidemment mes amis et ma famille pour tout le soutien qu'ils m'ont apporté pendant ces trois années. En particulier, je remercie mes parents, grands-parents et ma sœur pour m'avoir accompagné et encouragé tout au long de mes études. Je pense aussi à Jean-Paul Dudon qui m'a inspiré dans mon choix de réaliser une thèse. Je remercie aussi vivement ma chère Erin Bastien pour m'avoir accompagné tout au long de ces trois années, pour son soutien aussi bien moral que pour sa participation active dans la relecture de mes travaux.

Table des matières

Introduction	5
1 État de l'art	8
1.1 Présentation du domaine des origamis	8
1.1.1 Introduction	8
1.1.2 Définition d'un origami et terminologie	10
1.2 Origamis et robotique	13
1.2.1 Cinématique	14
1.2.2 Géométrie variable	17
1.2.3 Ratio entre masse et forces admissibles	18
1.2.4 Raideur et multistabilité	19
1.3 Conception de robots exploitant les origamis	21
1.4 Synthèse et structure du manuscrit	26
1.4.1 Synthèse	26
1.4.2 Plan de thèse	27
2 Conception d'un mécanisme inspiré du Flasher	29
2.1 Introduction	29
2.2 Choix du patron	29
2.3 Démarche de conception d'un mécanisme inspiré du Flasher	31
2.3.1 Étude préliminaire : identification du caractère non rigidement pliable.	32
2.3.2 Étape 1 : Modification de la cinématique	33
2.3.3 Étape 2 : Conception du mécanisme rigide avec épaisseur	39
2.4 Synthèse	44
3 Conception d'un mécanisme basé sur la tour de Kresling	46
3.1 Introduction	46
3.2 Choix du patron	47
3.3 Fabrication de structures basées origami	49
3.3.1 Choix de la feuille	49
3.3.2 Choix du procédé de fabrication	51
3.3.3 Choix de la géométrie de l'enlèvement de matière	52
3.3.4 Choix du protocole de collage	53

3.3.5	Synthèse	54
3.4	Modélisation de la tour de Kresling	55
3.4.1	Élaboration d'un modèle analytique	55
3.4.2	Validation expérimentale	64
3.5	Ouverture de lignes de pliages	69
3.5.1	Synthèse d'un paramètre d'ouverture	69
3.5.2	Résultats expérimentaux	70
3.6	Synthèse	73
4	Mécanisme actif de modulation du comportement cinétostatique de la	
	tour de Kresling	74
4.1	Introduction	74
4.2	Détermination de la stratégie de rigidification de l'origami	76
4.3	Conception des mécanismes de rigidification	79
4.3.1	Principe de fonctionnement	79
4.3.2	Stratégies d'actionnement	80
4.4	Caractérisation expérimentale	82
4.4.1	Protocole	82
4.4.2	Résultats	85
4.5	Synthèse	87
5	Exploitation pour la robotique mobile	89
5.1	Introduction	89
5.2	Conception d'une roue à géométrie variable inspirée du Flasher	90
5.2.1	Contexte	90
5.2.2	Démarche de conception d'une roue à géométrie variable inspirée du Flasher	93
5.2.3	Exploitation	95
5.2.4	Synthèse	101
5.3	Conception d'un drone exploratoire monorotor	101
5.3.1	Contexte	101
5.3.2	Proposition d'exploitation d'un origami	103
5.3.3	Conception	105
5.3.4	Synthèse	107
	Conclusions et perspectives	109
1	Robotique mobile multimodale	109
2	Conception d'un mécanisme inspiré origami	111
3	Conception d'un mécanisme basé origami	113
	Liste des publications	116
	Table des figures et liste des tableaux	118

Annexes	127
A : Démonstration pliage non rigide du Flasher	127
B : Fonctionnement de l'AMF	129
C : Illustration de la roue quasi-circulaire	132

Introduction

Cette thèse prend place dans un projet de recherche collaborative, le projet ANR Origabot dont l'objectif global a fait émerger les problématiques abordées dans ce travail. Il est donc intéressant de débiter ce manuscrit en abordant cet objectif. L'ambition est de proposer de nouveaux robots mobiles pour l'exploration en milieux incertains, par exemple, pour assister des secours après une catastrophe. Pour être efficaces dans leurs déplacements et profiter d'une grande autonomie, ces robots sont vus comme devant disposer d'une capacité de locomotion multimodale. En associant des modes de locomotion différents, la capacité et la vitesse de franchissement du robot doivent pouvoir être améliorées tout en limitant la consommation énergétique. Limiter la consommation énergétique et ainsi augmenter l'autonomie, notamment dans un mode volant, conduit à chercher des architectures robotiques légères, dont les dimensions sont typiquement de quelques dizaines de centimètres, et les changements de formes permettent de disposer de plusieurs modes de locomotion. Légèreté et changement de forme sont des caractéristiques que les origamis peuvent offrir, comme nous le reverrons plus en détail dans le chapitre 1. Ainsi dans le projet Origabot l'exploitation d'origamis pour la robotique est un élément central, avec un usage qui peut être décrit schématiquement par la figure 1 : un robot prend une forme cylindrique pour rouler au sol, puis change de configuration en passant par une forme sphérique pour basculer et passer en mode volant. Ce mode de locomotion requiert alors une consommation énergétique plus élevée, mais il permet de passer au-dessus d'obstacles infranchissables en mode roulant. En mode rampant, le mouvement de sa structure lui permet de progresser dans des conduits étroits inaccessibles dans les autres modes. Ce parti pris a conduit à considérer la question de la conception robotique en exploitant des origamis.

L'observation et l'analyse des origamis existant dans la littérature montre qu'une grande variété de structures est déjà disponible. Dans cette thèse, nous nous sommes donc intéressés à exploiter des origamis déjà existants en vue de concevoir des composants ou des structures pour un système robotique. Beaucoup d'origamis offrent des capacités de changement de formes ou de dimensions importantes. Certaines structures disposent même de propriétés telles que la multistabilité : ces structures peuvent être exploitées dans deux ou plusieurs configurations stables. La structure origami maintient ces configurations sans apport d'énergie. Dans le contexte du projet, cette propriété permettant de limiter la consommation énergétique est naturellement apparue intéressante.

Les origamis offrant multistabilité et capacité de déploiement partagent une carac-

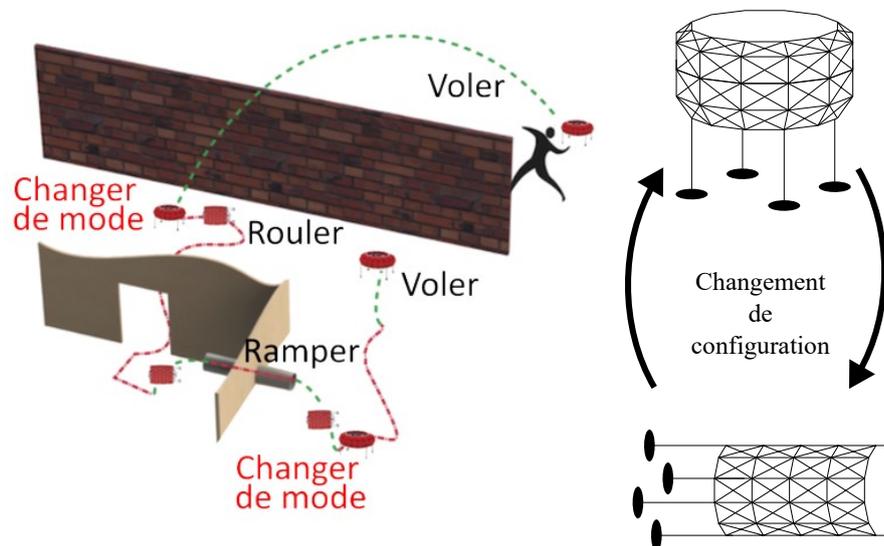


FIGURE 1 – Illustration de l'utilisation envisagée du robot exploratoire inspiré des origamis à locomotion multimodale

téristique, celle d'être non rigidement pliable. C'est donc l'exploitation d'origamis non rigidement pliables pour la conception robotique qui est le sujet de cette thèse. Dans le chapitre 1, nous explicitons cette caractéristique en partant des bases de l'origami nécessaires à la compréhension du reste du document. Nous abordons les propriétés offertes par les origamis qui sont à considérer et à exploiter pour la conception robotique. L'analyse de l'état de l'art nous permet alors d'identifier les problématiques à notre sens ouvertes et qui sont à traiter dans ce travail.

Cela nous conduit dans le chapitre 2 à nous intéresser aux origamis comme point de départ pour élaborer des mécanismes polyarticulés qui ont une grande variation de forme tout en étant capables de supporter des sollicitations importantes. Partant d'un origami du type Flasher, une démarche en 2 étapes est proposée. Le suivi de ces étapes conduit à l'implémentation d'un prototype validant la démarche.

Dans les chapitres 3 et 4 nous proposons d'étendre la gamme de comportements que peuvent présenter des origamis exploités comme éléments structuraux d'un robot. La proposition est élaborée en étudiant la tour de Kresling, origami souvent exploité en robotique et disposant de la propriété de bistabilité. Premièrement, nous proposons une modélisation permettant de faire la synthèse cinématique de cet origami y compris en dehors de ses configurations stables. Deuxièmement, nous proposons de modifier le patron de l'origami afin d'ajuster les propriétés géométriques et cinéostatiques sans couplage. Troisièmement, nous proposons de concevoir des éléments actifs intégrés à l'origami pour disposer de structures origami actives dont les caractéristiques peuvent être ajustées de manière dynamique. Ces trois propositions ont conduit à la réalisation de prototypes permettant de les évaluer expérimentalement.

Enfin, dans le chapitre 5, nous exploitons dans le contexte du projet les mécanismes précédemment étudiés afin de concevoir des composants pour la robotique mobile. Premièrement, le mécanisme inspiré du Flasher est utilisé pour réaliser une roue à géométrie

variable. La grande déployabilité est exploitée pour disposer d'un ratio entre petit et grand diamètre intéressant. Nous proposons aussi d'exploiter le changement de forme du mécanisme pour modifier le type de contact entre la roue et le sol. Deuxièmement, le mécanisme basé sur la tour de Kresling est utilisé pour concevoir une solution de stabilisation d'un drone monorotor pendant son vol. L'originalité tient à la possibilité de moduler le couple contra-rotatif pour disposer de deux états distincts, avec rotation propre nulle ou bien réduite et exploitable par exemple pour balayer l'environnement. Le changement de configuration de l'origami est exploité pour faire varier l'orientation d'ailerons. La bistabilité permet le maintien des ailerons dans des positions établies lors de la conception, sans apporter d'énergie.

Chapitre 1

État de l'art

1.1 Présentation du domaine des origamis

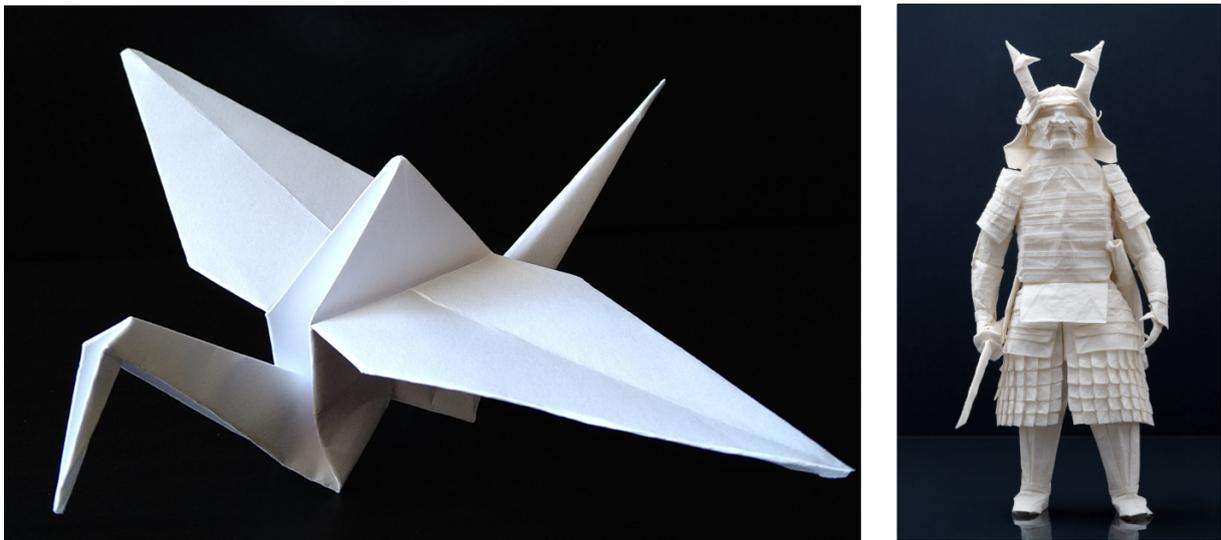


FIGURE 1.1 – Illustration d'origamis d'art. La grue à gauche et un samouraï réalisé par Juho Konkkola (1)

1.1.1 Introduction

Le terme « origami » vient du japonais « Ori » pliage et « Kami » papier, signifiant littéralement pliage du papier. C'est initialement un art asiatique datant du premier siècle avant J.-C, qui consiste à réaliser des œuvres en 3D en partant d'une feuille de papier que l'on plie pour former des facettes. En fonction du nombre d'opérations de pliage, il est possible de réaliser des sculptures plus ou moins complexes comme le montre la figure 1.1 ¹ Le caractère artistique de ces œuvres a largement été vulgarisé dans des livres comme

1. <https://museum-week.org/magazine/2022/03/03/5-questions-for-origami-artist-juho-konkkola/>

[Lang, 2012] ou [Coleman, 2018]. Ces dernières années, les domaines des mathématiques et de l'ingénierie se sont intéressés à cet art. L'origami a connu une évolution passant d'activité de loisir artistique vers un outil considéré pour la conception de structures techniques. On trouve aujourd'hui des structures origami de toutes échelles, allant de quelques centimètres (Fig. 1.2 a.²) jusqu'à plusieurs mètres (Fig. 1.2d.³). Ces structures sont utilisées dans des domaines variés tels que la mode (Fig. 1.2 a et b⁴), la conception de mobilier (Fig. 1.2c), l'architecture (Fig. 1.2d), ou encore la robotique. Dans ce dernier cas, ces structures réalisent des fonctions diverses : on trouve dans la littérature des exemples d'utilisations pour concevoir des préhenseurs [Yasuda et al., 2022] [Bassik et al., 2010], des roues à géométries variables [Lee et al., 2021], des robots mobiles, etc. Nous reviendrons plus en détails sur ces usages en robotique. Avant cela, il paraît intéressant de mettre en avant le déclencheur de cette évolution, à savoir la découverte, la formalisation et l'utilisation de propriétés non conventionnelles offertes par ces structures.

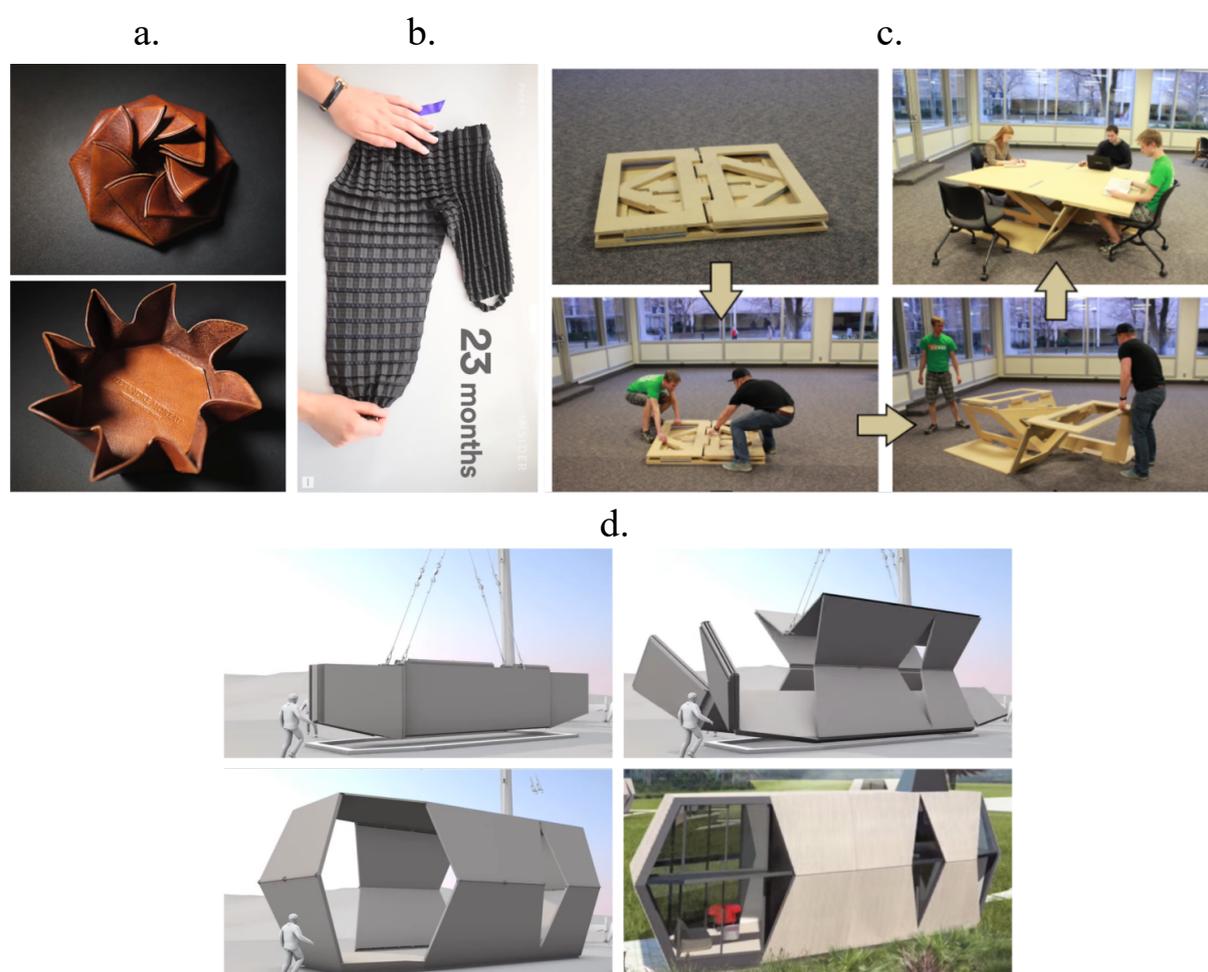


FIGURE 1.2 – Illustration de différents concepts d'objets : un porte-monnaie en cuir (a), un pantalon extensible en tissu(b), une table pliable en bois(c) modifiée dans [Morgan et al., 2016] et un module d'habitation (d).

2. www.youtube.com/watch?v=cxf-ZboFCx0

3. www.youtube.com/watch?v=JHbUaYxDgW4

4. www.youtube.com/watch?v=E87aCLSqMeM

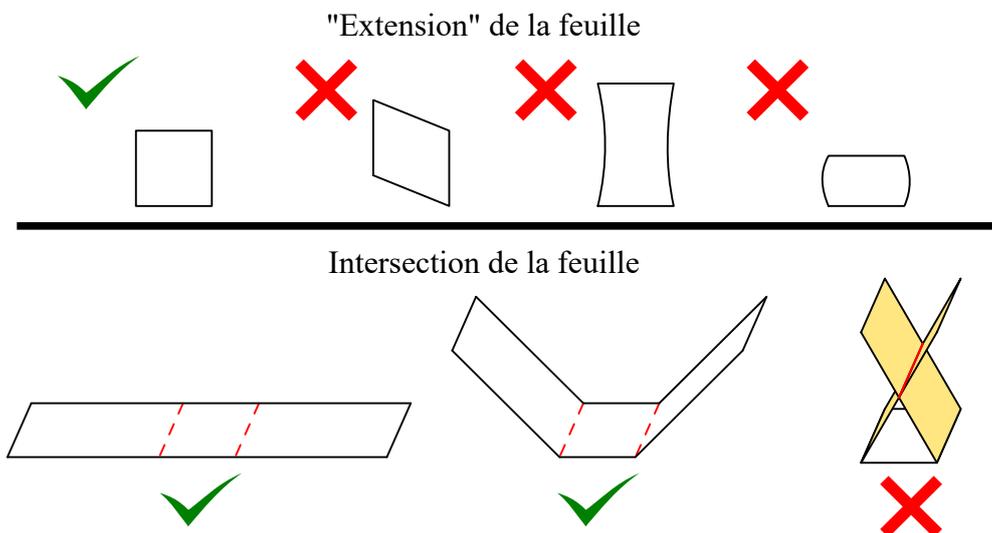


FIGURE 1.3 – Illustrations des deux propriétés à respecter pour un origami selon [Lang, 2018]. Une coche verte est apposée quand la propriété est respectée, et une croix rouge quand elle ne l'est pas.

1.1.2 Définition d'un origami et terminologie

Pour ce faire, il nous faut donner les éléments essentiels à la compréhension de la conception des origamis. Ceci nous permet d'aller progressivement vers les problématiques propres à l'utilisation de structures origami en robotique. Pour introduire ces éléments, nous nous appuyons sur l'ouvrage de Robert J. Lang [Lang, 2018], un des pères de l'analyse moderne des origamis. Le lecteur trouvera dans son ouvrage une présentation complète du domaine.

Un origami est réalisé à partir d'une feuille de matériau considéré fin. Qualitativement, il s'agit de pouvoir considérer qu'un pli de papier peut se plier avec une amplitude de 180° sans être entravé par l'épaisseur du papier. La feuille désigne l'élément de base utilisé pour concevoir l'origami. Aujourd'hui, son matériau n'est pas restreint à du papier. Dans le contexte artistique, stylique ou de l'ingénierie, l'usage d'une variété de matériaux (Fig. 1.2) a été considéré. De manière non exhaustive, nous avons observé l'utilisation de plastique [Sareh et al., 2018], de cuir 2, de métaux [Bassik et al., 2010, Lee et al., 2021], de tissu 4, de bois [Morgan et al., 2016].

Dans [Lang, 2018], est considéré comme un origami toute structure qui respecte les deux propriétés au niveau de la feuille (Fig. 1.3) :

- *La feuille est non extensible.* La forme pliée vient d'une déformation 3D d'une surface plane qui ne s'étire ni ne se comprime.
- *La feuille ne s'intersecte pas.* Le papier ne peut pas s'entrecroiser dans la forme pliée, ni à aucun stade intermédiaire lors du passage de la forme plane à la forme finale.

Une feuille devient un patron d'origami une fois les lignes de pliage ajoutées. Les lignes de pliage ont un sens de rotation. Lorsque le pli sort du plan de la feuille après pliage, comme sur la figure 1.4, on parlera de pli « montagne ». Dans le cas inverse, on parlera de

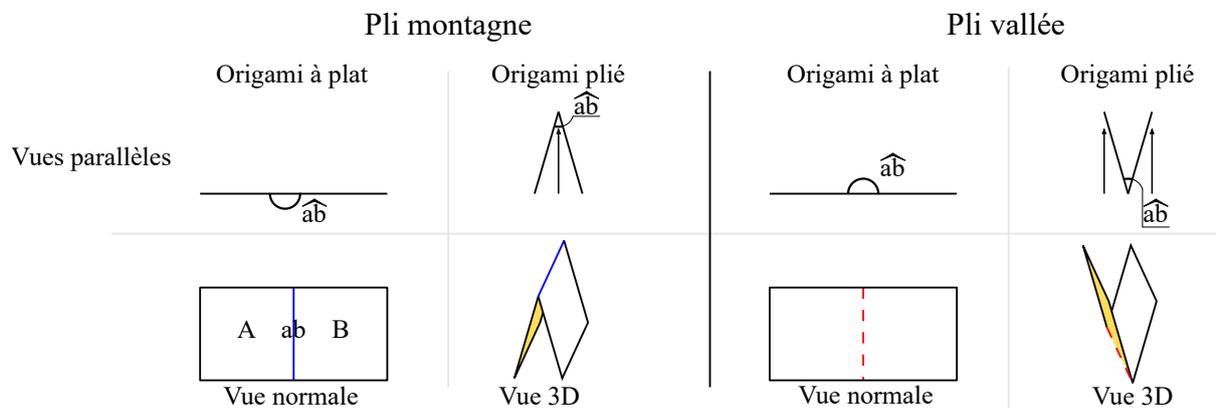


FIGURE 1.4 – Illustration en différentes vues et dans différentes configurations d’un pli montagne à gauche et d’un pli vallée à droite.

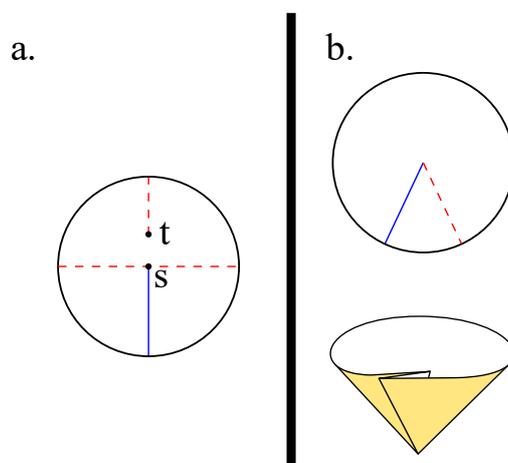


FIGURE 1.5 – Illustration d’un patron avec un sommet (t) qui ne s’intersecte pas en a. et d’un motif de pliage qui n’est pas rigidement pliable en b.

pli « vallée ». Pour différencier ces plis, nous utiliserons la convention proposée dans [Lang, 2018] où les plis montagne sont représentés en lignes pleines de couleur bleue et les plis vallée en lignes pointillés rouges. Les bords de l’origami sont représentés en traits pleins noirs. Ils correspondent à la forme qui doit être découpée pour obtenir le patron.

Les intersections entre des plis et des bords ou d’autres plis du patron forment les sommets. Dans ce document, un patron dont une ligne de pliage ne rejoint pas un autre trait n’est pas valide. La figure 1.5 a montre à gauche un patron non valide car le sommet t d’une ligne de pliage ne rejoint pas d’autre trait. Le panneau désigne la zone entre les plis. Comme dans [Lang, 2018], nous appliquerons la couleur jaune au verso du patron facilitant la visualisation du pliage.

Pendant les étapes de pliage, les panneaux doivent parfois subir des déformations pour permettre le passage en 3D. Dans ce cas, l’origami est dit « non rigidement pliable », traduction littérale du terme anglo-saxon présent dans la littérature. À l’inverse, si les étapes de pliage peuvent se réaliser sans déformation de ces panneaux, l’origami est dit « rigidement pliable ». Sur la figure 1.5b, la vue de droite montre un patron qui n’est pas rigidement pliable.

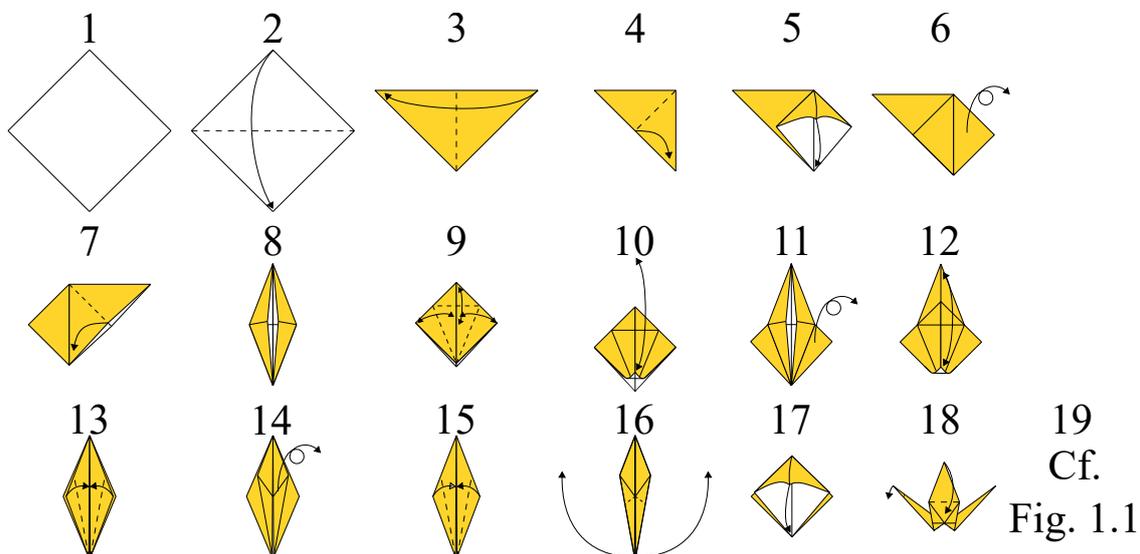


FIGURE 1.6 – Illustration de la séquence de pliage permettant d’obtenir la grue représentée en figure 1.1

Nous utilisons, comme dans [Lang, 2018], des lettres en majuscules pour nommer les panneaux. Nous proposons de manière complémentaire une notation pour identifier les plis, les longueurs des plis et les angles entre les panneaux. Comme le montre la figure 1.4, le pli entre les panneaux A et B se note ab , la longueur de ce pli $[ab]$ et son angle \widehat{ab} . Les sommets sont identifiés par des lettres minuscules comme le montre la figure 1.5.

Pour concevoir des origamis dans le domaine artistique, on suit une séquence comme celle illustrée en figure 1.6. Initialement, la feuille n’a pas de plis, et c’est lors des étapes de conception que les plis apparaissent. Pour les structures issues des origamis techniques, la lecture du patron tel que représenté en figure 1.7 suffit à fabriquer la structure correspondante. Dans un premier temps, les plis sont réalisés en suivant le patron. Dans un second temps, la structure est exploitée après pliage de l’ensemble des plis. Dans la suite du document, lors de la définition des structures origami utilisées, nous utilisons des patrons similaires à la figure 1.7 et non des séquences de pliage (Fig. 1.6). Il est ici important de souligner qu’il est possible d’avoir une infinité de configurations après pliage, dans la mesure où l’on peut adopter différentes valeurs d’angles de plis. Certaines configurations particulières sont fréquemment rencontrées. Nous les désignons comme suit : i) configuration plane, tous les plis valent 180° , ii) la configuration totalement pliée, tous les plis valent 0° iii) configuration stable, configuration 3D constituant un état d’équilibre statique de l’origami, sans action extérieure.

Comme nous pouvons le voir sur les exemples en figure 1.7, dans les patrons d’origamis techniques, nous observons souvent des motifs qui se répètent. Dans [Lang, 2018] une propriété de « périodicité » du patron d’un origami est formalisée. Ce terme désigne alors un patron dont un motif se répète de manière périodique. Dans ce document, nous utiliserons le terme de motif élémentaire pour désigner le motif qui se répète pour former l’origami, comme surligné en vert en figure 1.7. Ainsi, l’identification et l’utilisation de motifs élémentaires permet de séquencer et hiérarchiser l’étude des structures origami.

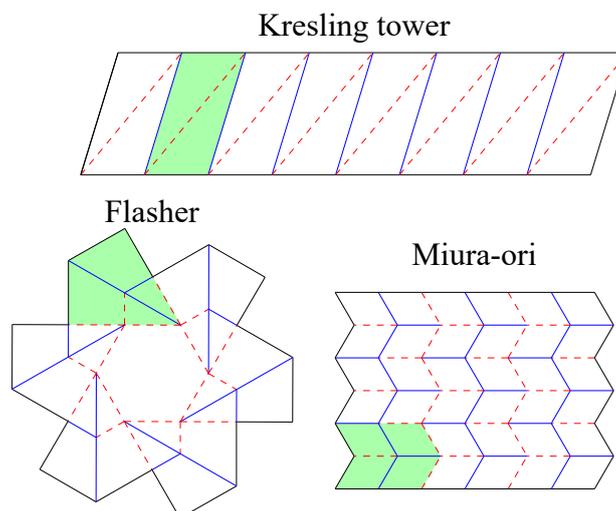


FIGURE 1.7 – Illustration de trois patrons d’origamis utilisés dans les domaines de la mécanique et de la robotique.

1.2 Origamis et robotique

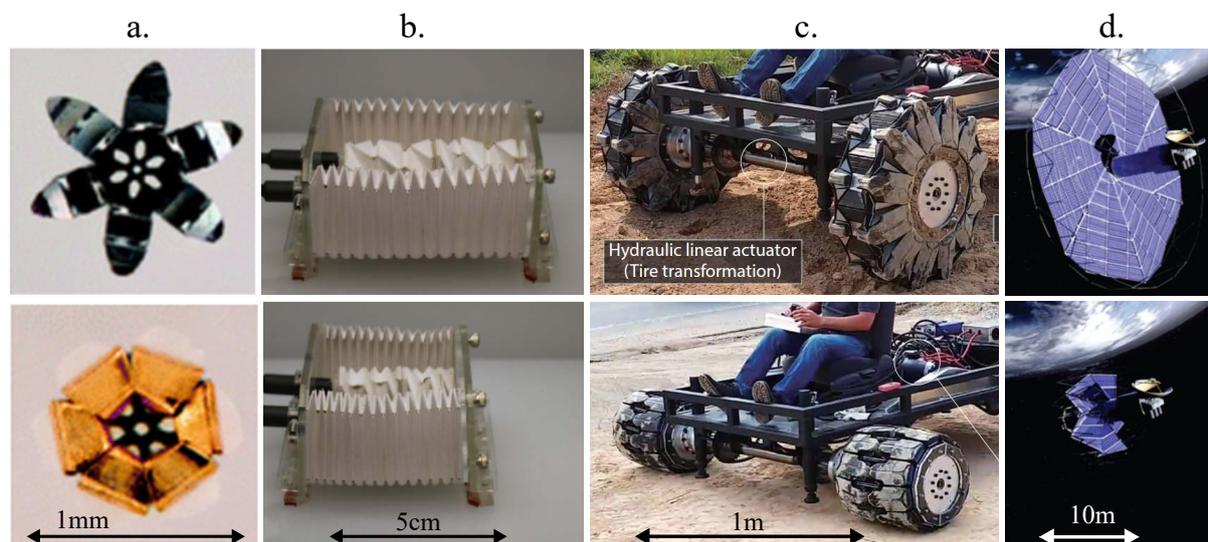


FIGURE 1.8 – Illustration de mécanismes basés origamis dans la robotique. L’ordre de grandeur de leur dimension est indiqué. En a., un préhenseur dans [Johnson et al., 2017], en b. un robot rampant dans [Pagano et al., 2017], en c. une roue à géométrie variable dans [Lee et al., 2021] et en d. une structure pour déployer des panneaux solaires dans [Zirbel et al., 2013].

Nous avons donc vu que les origamis ont été considérés dans le domaine de l’art, de la mode, du mobilier ou bien encore du génie civil. En parallèle, dans le domaine de la robotique, l’exploitation d’origamis pour former l’architecture d’un robot et lui procurer ses mobilités est aussi considérée de manière très active. Les échelles et les domaines d’application en robotique sont très variés comme l’illustre la figure 1.8. On retrouve par exemple des micro-structures robotiques mesurant moins d’un millimètre dans le domaine médical dans [Johnson et al., 2017] (Fig. 1.8a), des mégas-structures de plusieurs dizaines de mètres dans le domaine du spatial (Fig. 1.8d) dans [Zirbel et al., 2013], en passant

par des structures macroscopiques dans le domaine de la robotique [Lee et al., 2021]. Les fonctions réalisées par ces structures sont aussi diverses. Elles sont considérées entre autres pour réaliser des préhenseurs dans [Johnson et al., 2017] (Fig. 1.8a) et dans [Yasuda et al., 2022], des robots mobiles dans [Angatkina et al., 2017] ou dans [Lee et al., 2021](Fig. 1.8b et c), ou encore des bras manipulateurs dans [Wu et al., 2021] ou [Jeong and Lee, 2018]. Enfin, la manière d’exploiter les origamis varie. Il est possible de directement exploiter un origami comme élément structurel, par exemple en figure 1.8b. Nous pouvons alors clairement voir un origami construit à partir d’une feuille. Dans la suite, nous parlerons pour un mécanisme conçu de cette manière d’un « mécanisme basé origami ». Il est aussi possible de concevoir un mécanisme polyarticulé en envisageant son architecture grâce à l’inspiration d’un origami. Ainsi, en figure 1.9, une tour de Kresling origami représentée à gauche donne lieu à la création d’un mécanisme polyarticulé. Nous parlerons dans ce cas d’un « mécanisme inspiré d’origami ».

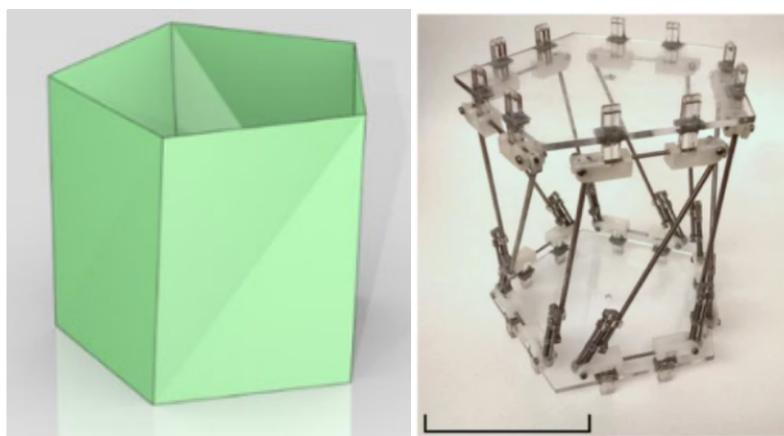


FIGURE 1.9 – Illustration dans [Yasuda et al., 2017] de la tour de Kresling en origami à gauche et d’un mécanisme inspiré de cet origami à droite.

La grande diversité d’utilisation des origamis s’explique par leurs propriétés atypiques permettant de réaliser des fonctions différentes des mécanismes conventionnels. Dans la suite de ce chapitre, nous faisons un état de l’art des propriétés qui nous semblent particulièrement intéressantes pour la conception robotique.

1.2.1 Cinématique

Par cinématique, nous entendons ici le mouvement des origamis, suivant en cela la définition de l’IFTToMM⁵. Le mouvement est défini comme le changement de position au cours du temps d’un point par rapport à un bâti. Dans le cas de l’origami, le point peut appartenir à un sommet, une ligne, ou un panneau.

Dans la littérature, des travaux ont traité des mouvements que réalisent les origamis et du parallèle entre ces mouvements et ceux des liaisons mécaniques conventionnelles. Ainsi, une rotation peut être produite simplement avec un pli (Fig. 1.10) comme dans [Sung and Rus, 2015]. Dans ce cas, un panneau fait office de bâti, l’axe de rotation d’un pivot

5. iftomm-terminology.antonkb.nl/index.html

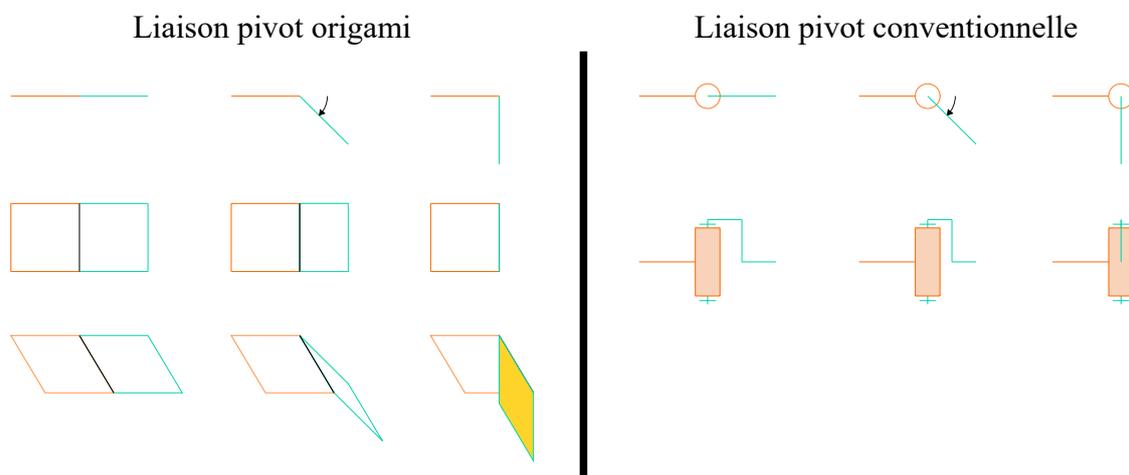


FIGURE 1.10 – Illustration d’une liaison pivot conventionnelle et d’une équivalence en origami.

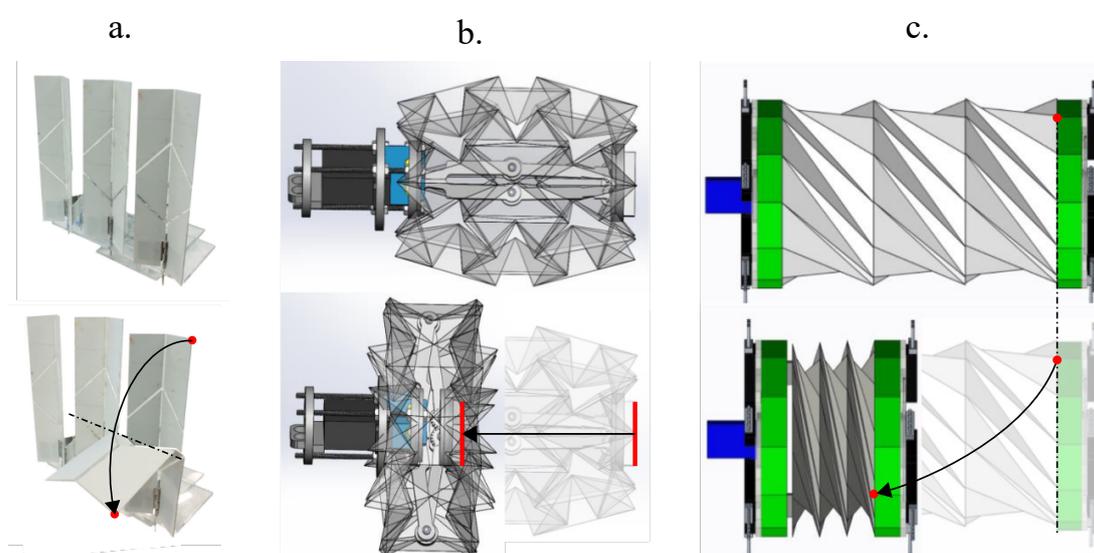


FIGURE 1.11 – Illustration de structures origami réalisant une cinématique spécifique. Les patrons utilisés sont respectivement le Miura-ori an a. dans [Zuliani et al., 2018], la Magic-ball en b. dans [Fang et al., 2017] et la tour de Kresling en c. dans [Pagano et al., 2016]

correspond à l’axe du pli et le second panneau réalise une rotation par rapport au bâti. D’autres types de mouvements peuvent être réalisés comme une translation (Fig. 1.11b) dans [Fang et al., 2017], un mouvement hélicoïdal (Fig. 1.11c) [Pagano et al., 2016], ou encore des rotations dont l’axe n’est pas coaxial à un pli avec des structures origami [Zuliani et al., 2018] (Fig. 1.11 a). L’utilisation de structures origami permet de faciliter la miniaturisation de ces mécanismes (Fig. 1.12). Par exemple, dans [Haldane et al., 2015], un mécanisme possède 32 liaisons pivots pour une structure mesurant moins de 60mm de côté.

Dans [Kalafat et al., 2021], un robot delta (Fig. 1.12 d) est implémenté en utilisant des liaisons compliantes basées origamis à la place de pivots conventionnels. La légèreté des origamis est un atout pour réduire l’inertie de la structure, et les procédés de fabrication origamis permettent de faciliter la réduction d’échelle. Les exemples précédents montrent

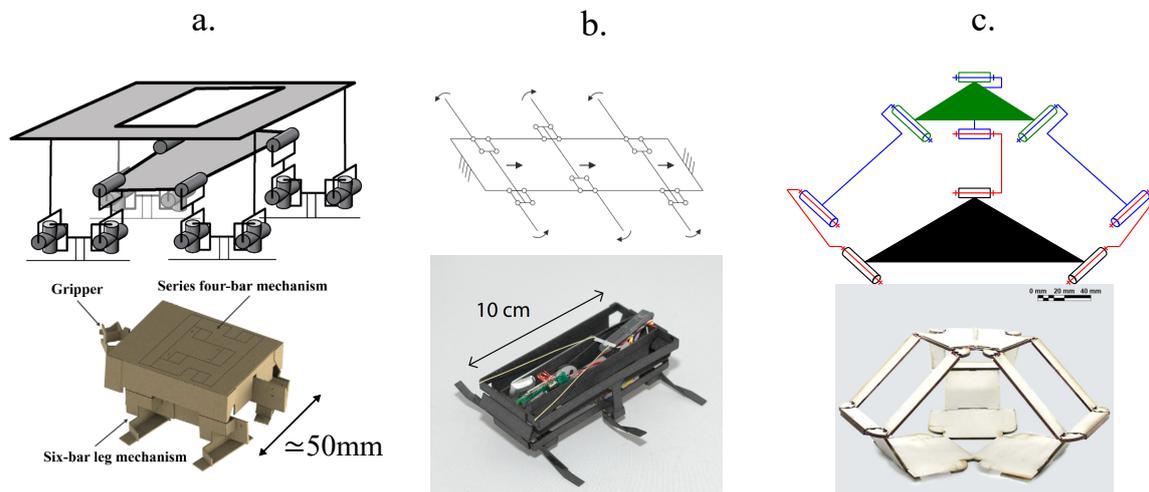


FIGURE 1.12 – Illustration de mécanismes dont la cinématique est basée sur les propriétés d’une structure origami. Illustration d’un robot volant et marchant dans [Mulgaonkar et al., 2016] en b., d’un robot marchant dans [Birkmeyer et al., 2009] en c. et d’un robot parallèle dans [Kalafat et al., 2021] en d.

qu’utiliser des structures origami pour implémenter la fonction de liaisons mécaniques conventionnelles est possible. Nous pouvons alors bénéficier des avantages propres aux structures origami comme la conception monolithique ou la légèreté.

Par ailleurs, des structures origami déjà existantes permettent des utilisations qui vont au-delà de la simple utilisation de la cinématique (Fig. 1.11) et offrent des propriétés supplémentaires aux mécanismes basés origamis. Lors de l’utilisation de ces structures, quand nous parlons de la cinématique, nous nous référons au mouvement réalisé par un point ou un élément en particulier, en rouge sur la figure 1.11 et non au mouvement de chaque panneau. La structure de Miura-ori (Fig. 1.11a) est utilisée pour réaliser des articulations de doigts pour un préhenseur. Cette structure réalise la cinématique d’une liaison pivot et offre en plus la particularité de permettre une transformation de mouvement entre l’angle des panneaux à la base du doigt en entrée et la rotation de l’articulation en sortie. La Magic-ball (Fig. 1.11b) dans [Fang et al., 2017] permet de réaliser une translation lors de sa compression, ce mouvement est accompagné d’un changement de forme. L’utilisation de cette propriété de changement de forme permet à la structure de s’ancrer lors d’une locomotion péristaltique. Enfin, la tour de Kresling (Fig. 1.11c) est utilisée dans [Paganò et al., 2016] pour réaliser un mouvement hélicoïdal pour comprimer la structure et déplacer le robot avec une locomotion péristaltique. Une propriété intéressante de cette structure est la bistabilité qui permet de placer le robot dans des configurations connues. Dans [Angatkina et al., 2017], une combinaison de structures origami avec la tour de Kresling et un soufflet permet de réaliser une transformation de mouvement à la manière d’un mécanisme vis-écrou. Nous pouvons voir ici un avantage à l’usage des origamis, celui d’agencements spécifiques sur le plan géométrique avec une forme tubulaire de ces deux structures, qui permet dans l’application décrite de gagner en compacité en plaçant une structure dans la seconde, tout en gardant de l’espace pour faire passer des éléments tels que des câbles électriques.

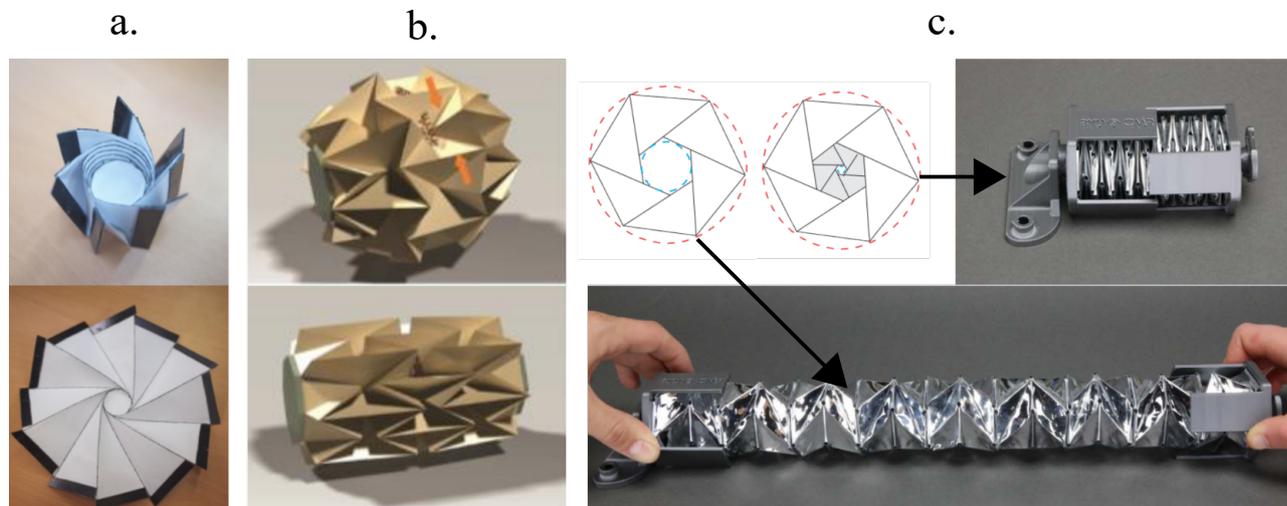


FIGURE 1.13 – Illustration de structures origami à géométrie variable considérées pour la robotique. Une roue à diamètre variable en a, issue de [Lee et al., 2013a], une seconde roue à diamètre variable issue de [Lee et al., 2013b] en b et une structure de longueur et de diamètres internes variables pour l’insertion de bronchoscope en c issue de [Sargent et al., 2020]

Nous observons ici que les structures origami sont utilisées d’une part pour convertir des mécanismes en remplaçant des pivots par des plis, permettant au passage de gagner en compacité, en légèreté et de réduire le nombre d’opérations de fabrication et d’assemblage. D’autre part, des structures déjà existantes permettent de réaliser des cinématiques spécifiques tout en offrant des propriétés supplémentaires telles que le changement de forme ou la bistabilité.

1.2.2 Géométrie variable

Grâce à leurs plis, les structures origami peuvent changer de forme, par exemple lors du passage du patron à plat vers la structure 3D une fois pliée. Il existe dans la littérature un grand nombre de patrons déjà existants qui permettent d’aboutir à des structures de forme différentes. Il a été montré que l’utilisation de structures origami permet de réaliser des mécanismes dont la variation de géométrie qui conduit à l’implémentation de fonctions techniques. Ainsi, dans [Zirbel et al., 2013], la structure origami Flasher est utilisée pour déployer des panneaux solaires d’un satellite. Dans la configuration pliée, cette structure a une forme cylindrique de petit diamètre. Une fois dépliée, elle prend la forme d’un disque de grand diamètre avec un ratio important de 9,2 entre ces deux diamètres. Les variations géométriques de cette structure origami permettent de passer d’un volume occupé relativement faible dans la configuration pliée pendant son stockage par rapport à une surface exploitable des panneaux solaires relativement grande une fois dépliée. Une structure similaire est utilisée dans [Lee et al., 2013b] pour modifier le diamètre d’une roue d’un robot mobile. Dans cet article, c’est la variation du diamètre de la structure entre sa configuration pliée et plane qui est utilisée. Le mécanisme n’exploite pas la variation géométrique dans sa globalité mais se concentre sur un paramètre dimensionnel en

particulier.

Dans [Fang et al., 2017], la structure Magic-ball (Fig. 1.11b) peut passer d'une géométrie cylindrique avec une largeur élevée et un diamètre faible vers un cylindre de largeur faible et de diamètre élevé, en passant par une géométrie semblable à une sphère. La variation de largeur combinée à la variation de diamètre externe permet de créer une locomotion péristaltique. Dans [Lee et al., 2021] (Fig. 1.8c), cette même structure est utilisée pour réaliser une roue à géométrie variable. La variation de diamètre de la structure permet de changer le diamètre de la roue avec un ratio de 1,7. Le changement de positionnement des panneaux entre les deux configurations de la structure permet de modifier la nature du contact avec le sol en sortant des crampons. Ces deux mécanismes exploitent la variation géométrique globale de la structure origami pour réaliser une fonction différente.

Dans [Sargent et al., 2020], l'origami utilisé est la tour de Kresling (Fig. 1.13c). Les grandeurs géométriques qui varient avec le changement de configuration de cette structure sont le diamètre interne, la hauteur entre les extrémités et l'angle de rotation entre les extrémités. La variation de hauteur d'une structure permet de changer la longueur du mécanisme guidant un bronchoscope pendant son insertion. Une autre structure est ajoutée pour créer un point de passage en utilisant la possibilité d'ajuster le diamètre interne via le choix du patron.

Pour résumer, des variations de géométrie comme l'augmentation ou la diminution d'une dimension, mais aussi les modifications globales de la structure ou encore la position des panneaux sont apparues d'intérêt. Il s'agit là d'un aspect spécifique à l'emploi d'origamis.

1.2.3 Ratio entre masse et forces admissibles

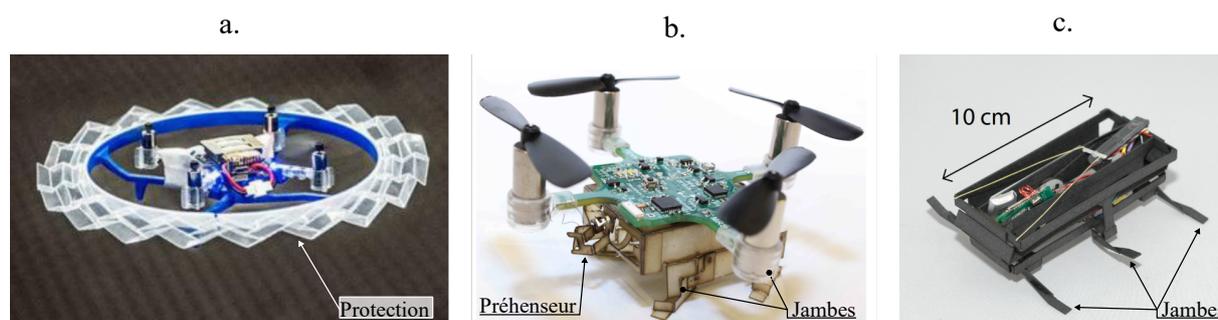


FIGURE 1.14 – Illustration de robots utilisant des origamis de faible masse. Un drone dans [Sareh et al., 2018] avec une protection basée origami en a., un drone dans [Mulgaonkar et al., 2016] avec une structure légère de robot marcheur basé origami en b. et un robot marcheur basé origami capable de résister à des chutes en c. dans [Birkmeyer et al., 2009]

Partir d'une feuille de matériau pour concevoir une structure 3D conduit à utiliser relativement peu de matière par rapport au volume occupé. Les structures origami sont utilisées pour la faible masse qui en résulte et pour la capacité de charge qui est grande, relativement à cette masse.

Ainsi, dans [Sareh et al., 2018], une structure origami (Fig. 1.14a) est utilisée pour protéger un drone. La faible masse est particulièrement intéressante dans le contexte de locomotion aérienne. L'utilisation de l'origami permet de couvrir toute la périphérie du drone tout en limitant l'ajout de masse. De plus, la déformation élastique de l'origami permet de supporter les chocs à la place de la structure du drone et de limiter le pic en force perçu par le drone lors d'un impact.

Dans [Mulgaonkar et al., 2016] une structure origami (Fig. 1.14b) réunissant la fonction de marche et de préhension est réalisée à l'aide d'une conversion de mécanisme polyarticulé vers un patron composé de plis réalisant des liaisons pivots comme présenté en section 1.2.1. Cette structure origami permettant de marcher et d'attraper des objets ne représente que 17% des 30g de la masse du robot. Cette faible masse est intéressante dans le contexte aérien. À partir des valeurs issues du papier, nous observons que la structure origami est capable de supporter près de 6 fois son propre poids.

Dans [Birkmeyer et al., 2009], un robot marcheur (Fig. 1.14c) hexapode est réalisé. Le robot ne pèse que 16,1g pour un volume de 500cm^3 . L'objectif derrière la réduction de masse est double dans cet article. Premièrement, cela permet de concevoir un robot avec une densité de puissance de 20W.Kg^{-1} . À titre de comparaison, des athlètes courant pendant quatre minutes ont une densité de puissance inférieure à 5W.kg^{-1} selon les résultats dans [Austin, 2018]. Deuxièmement, la légèreté couplée à la compliance des structures origami permet de rendre le robot robuste aux chutes de manière analogue aux insectes. Dans [Birkmeyer et al., 2009], le robot est lâché de 28 m soit 280 fois sa taille sans subir de dommages.

Dans les exemples ci-dessus, des matériaux fins sont utilisés afin d'obtenir les ratios mentionnés entre masse et charges admissibles présentés. Ces ratios sont intéressants car très différents de ce qui peut être fait avec des mécanismes conventionnels. Cependant, la charge admissible de ces structures reste de manière absolue faible par rapport à des mécanismes conventionnels de même dimension. Pour rendre ces mécanismes capables de supporter des charges plus importantes, un changement de matériau est généralement opéré comme dans [Lee et al., 2021] (Fig. 1.8c) où la structure origami est réalisée avec des panneaux en aluminium lui permettant de supporter une charge supérieure à 50 fois son propre poids. Ce changement de matériau n'est pas trivial puisqu'il soulève de nouvelles contraintes : l'épaisseur du matériau n'est plus négligeable, ce qui a été mentionné en début de chapitre comme une hypothèse fondamentale pour les origamis. Par ailleurs, pour un origami non rigidement pliable, la déformation du panneau est attendue, ce qui n'est plus évident à gérer dans ce cas. La gestion de la capacité de charge est à notre sens d'une limite importante à étudier.

1.2.4 Raideur et multistabilité

Le principe de base de l'origami est d'appliquer une déformation plastique pour réaliser le pli. Cette déformation de la feuille conduit à la création d'un axe autour duquel les

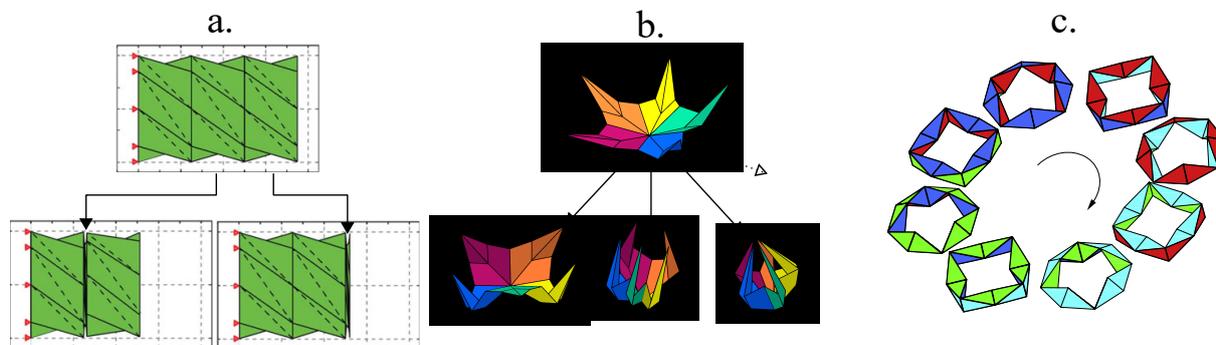


FIGURE 1.15 – Illustration de structures origami multi-stables. La tour de Kresling en a dans [Liu and Paulino, 2017], le préhenseur inspiré en b dans [Yasuda et al., 2022] et le kaleïdocycle dans [Tang and Dai, 2018].

panneaux pivotent. De ce fait, un mécanisme basé origami fait partie des mécanismes compliants et en possède les propriétés. Par exemple, les plis ne sont pas soumis à du frottement sec, mais possèdent une certaine raideur en torsion. Selon les matériaux de feuille utilisés, différentes propriétés peuvent apparaître ou varier, comme i) la plasticité du pli qui ne retourne pas dans sa position initiale si l’amplitude de la déformation est trop grande, ii) la visco-élasticité du matériau qui modifie la raideur du pli en fonction de la vitesse de pliage, ou encore iii) la propriété d’élasticité en torsion du pli qui permet d’emmagasiner de l’énergie.

Par ailleurs, lorsque l’origami n’est pas rigidement pliable, sa mise en forme 3D requiert des déformations au niveau des panneaux qui peuvent conduire certaines structures à avoir un comportement multistable. C’est le cas par exemple avec l’utilisation d’une structure avec plusieurs tours de Kresling (Fig. 1.15a) pour laquelle chaque étage peut présenter une bistabilité. Dans certains cas, la structure de Miura-ori présente une bistabilité étudiée dans [Liu and Paulino, 2017], et utilisée pour réaliser un préhenseur à doigts bistables (Fig. 1.15b) dans [Yasuda et al., 2022]. Ou encore le kaleïdocycle (Fig. 1.15c) qui dans [Tang and Dai, 2018] possède huit configurations stables.

Ainsi, dans [Sargent et al., 2020], une structure origami qui peut être monostable ou bistable est utilisée comme élément de guidage d’un bronchoscope. Ce mécanisme basé origami a été introduit en section 1.2.2. En modifiant uniquement la géométrie du patron, les auteurs montrent qu’il est possible de modifier la raideur de la structure pour choisir entre monostabilité et bistabilité.

Dans [Bhovad and Li, 2018](Fig. 1.16), ce même patron est utilisé pour réaliser un robot à locomotion péristaltique. Deux tours de Kresling de raideur différentes sont assemblées. Il est alors possible de définir une séquence d’actionnement avec un seul actionneur. Les structures les moins raides changent de configurations en premier comme le montre la figure 1.16. Le changement de forme de la structure permet l’ancrage.

Pour modifier la raideur de ces structures, influant sur le caractère multistable, il est possible de modifier le patron, le choix du matériau ou l’épaisseur du matériau. La modification du patron entraîne une modification de la cinématique réalisée par les structures.

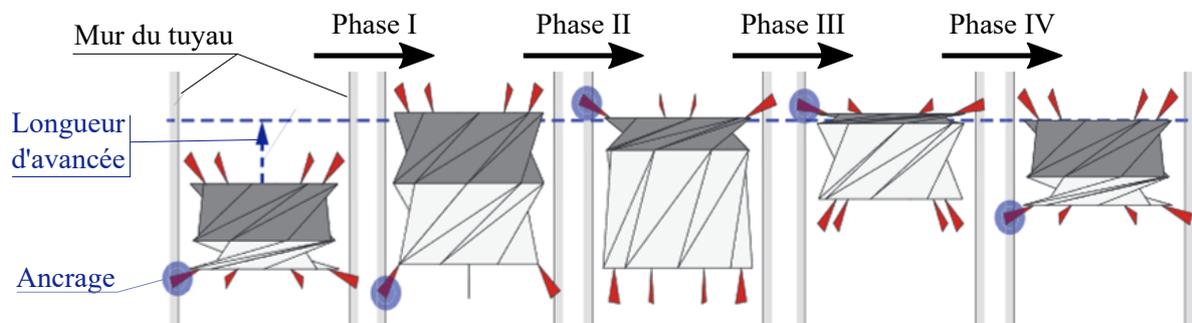


FIGURE 1.16 – Images modifiées dans [Bhovad and Li, 2018]. Illustration de la séquence d'actionnement avec des tours de Kresling de raideurs différentes.

Ceci peut poser problème. Le choix du matériau peut être contraint par, le procédé de fabrication, ou encore les interactions avec l'environnement du robot. Enfin, la réduction de l'épaisseur entraîne une fragilisation de la structure tandis que l'augmentation peut soulever des problématiques de raideur ou d'épaisseur trop élevée. La modification de raideur de ces structures multistables n'est donc pas triviale. Le couplage qui existe entre la cinématique de la structure, sa raideur et son matériau force à faire des compromis lors de la conception de mécanismes basés origami. Il nous semble donc pertinent d'investiguer des méthodes pour moduler la raideur des origamis, sans modifier la géométrie du patron ni le choix matériau.

1.3 Conception de robots exploitant les origamis

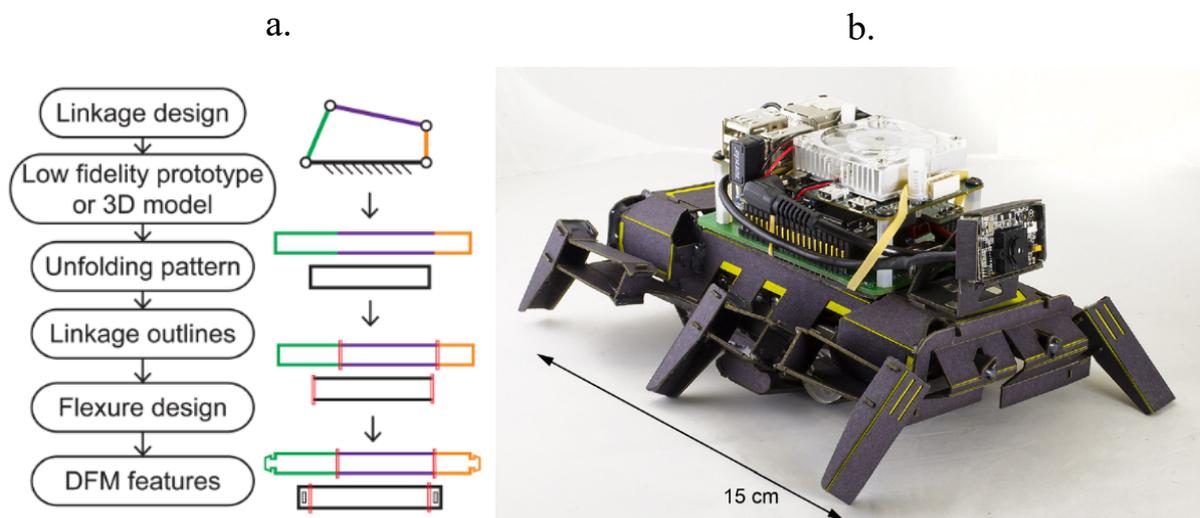


FIGURE 1.17 – Illustration de la démarche de conversion de mécanismes vers des origamis en a. dans [Haldane et al., 2015]. Robot implémenté grâce à cette démarche en b.

Les propriétés énoncées dans la section précédente ont motivé la communauté des concepteurs en robotique à considérer les structures origami. Il est à noter que la conception de robots basés origami est très récente et les prototypes décrits ont été introduits ces 20 dernières années. Deux aspects doivent être traités pour concevoir la structure

d'un robot origami. Le premier concerne la topologie du robot et le second la synthèse dimensionnelle.

Pour des mécanismes basés origamis, il est possible de s'appuyer pour le choix de topologie sur des approches dédiées aux mécanismes conventionnels. Ainsi, dans [Haldane et al., 2015], un mécanisme quatre barres est implémenté à l'aide d'une structure origami pour réaliser un robot marcheur (Fig. 1.17 b). Les liaisons pivots sont obtenues par l'emploi de plis. Une formalisation de la démarche est proposée dans [Haldane et al., 2015] (Fig. 1.17 a). Nous nous interrogeons sur le caractère potentiellement itératif de la démarche, qui n'apparaît pas en Fig. 1.17 a. La structure du robot est aussi réalisée par la structure origami, le robot entier est conçu en partant du patron en 2D. Une fois plié et assemblé, le patron prend la forme d'un robot marcheur avec six pattes utilisant le mécanisme quatre barres et un châssis les reliant. On retrouve cette démarche dans d'autres travaux comme dans [Mulgaonkar et al., 2016] ou encore [Birkmeyer et al., 2009] (Fig. 1.12 a et b).

Par ailleurs, il existe dans la littérature une grande variété d'origamis déjà existants. Nous avons fait le choix de considérer que l'existant permet de s'affranchir de la question de la synthèse topologique, de ce fait, la recherche de topologie n'est pas nécessaire.

La synthèse dimensionnelle de robot conduit au choix des dimensions des différents ensembles cinématiques d'un robot. Dans le cas des structures origami, cela revient à lier la géométrie du patron avec les propriétés cinématiques, géométriques et énergétiques de la structure une fois pliée. Comme pour la robotique, il existe des outils pour réaliser cette synthèse sur les structures origami.

Les structures converties à partir de mécanismes rigides polyarticulés comme décrits en section 1.2.1 conservent la même cinématique que le mécanisme de base. Les outils pour étudier et concevoir ces structures sont les mêmes que pour les robots conventionnels.

Pour les structures origami utilisant un patron déjà existant, il faut différencier les origamis rigidement et non rigidement pliables. Dans le cas des origamis rigidement pliables, une conversion du patron vers une cinématique de mécanisme rigide polyarticulé est possible. Par exemple, dans [Sanprueksin and Wongviriyawong, 2017], les plis du patron de l'origami Miura donnent directement les axes des liaisons pivots, et les panneaux forment les éléments rigides reliant les liaisons mécaniques. Dans ce cas, l'utilisation des outils basés sur la cinématique de mécanismes conventionnels est possible après conversion.

Pour les origamis non rigidement pliables, la déformation des panneaux et des lignes de pliage doit être prise en compte pour réaliser la synthèse dimensionnelle. La tour de Kresling (Fig. 1.9) est un bon exemple pour illustrer comment les différents auteurs proposent de conduire la synthèse dimensionnelle pour ces origamis. Dans la littérature, il n'y a à vrai dire pas de proposition de démarche de synthèse dimensionnelle permettant de faire le lien entre la cinématique de la tour et son patron. On trouve néanmoins des synthèses pour lier le patron de la tour avec des dimensions géométriques dans ces configurations comme la hauteur [Lang, 2018], ou le rayon interne [Sargent et al., 2020], mais uniquement dans les configurations stables. La caractéristique non rigidement pliable em-

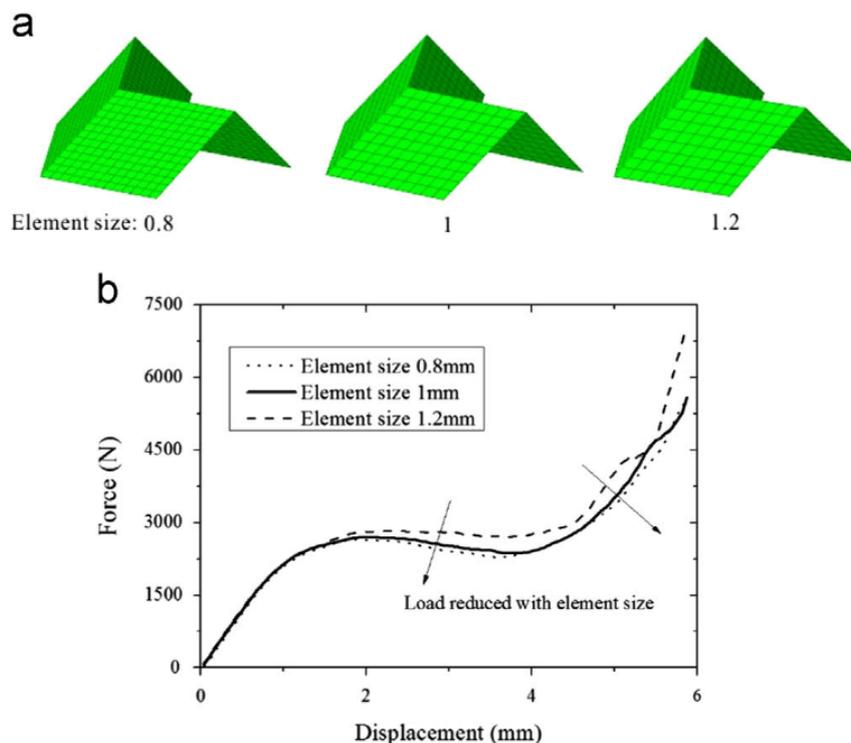


FIGURE 1.18 – Illustration de la convergence des simulations avec la réduction de la taille du maillage dans [Liu et al., 2015]

pêche d'étendre ces synthèses à l'intégralité du mouvement. Par ailleurs, on trouve dans la littérature des outils permettant d'analyser et de simuler le comportement d'un origami non rigidement pliable tel que la tour de Kresling, à savoir l'utilisation de modèles d'éléments finis (EF) et l'utilisation de modèles à barres et liaisons⁶. Les modèles à éléments finis sont connus pour leur capacité à donner des informations détaillées sur le comportement mécanique des structures mais nécessitent des temps de calcul relativement élevés. Dans un premier temps, les structures doivent être maillées (Fig. 1.18). Un maillage plus fin permet d'augmenter la précision de la simulation, mais augmente le temps de calcul. Dans [Liu et al., 2015], un maillage intermédiaire (1.18 « Element size : 1mm ») est choisi car le gain de précision est jugé non significatif par les auteurs par rapport au temps de calcul avec un maillage plus fin. Par ailleurs, les propriétés du matériau doivent être renseignées pour pouvoir effectuer la simulation. Dans [Nayakanti, 2016], des tests expérimentaux préliminaires sur une feuille de papier sont réalisés pour connaître le module d'Young, le coefficient de poisson et le module de cisaillement. Une fois le maillage et les propriétés du matériau fixés, la simulation peut être effectuée (Fig. 1.19 et Fig. 1.20). Elle consiste généralement à appliquer une ou plusieurs contraintes en un ou plusieurs points de l'origami puis de simuler le déplacement (Fig. 1.19) et la répartition des contraintes (Fig. 1.20) dans la structure. Les modèles à éléments finis ont été affinés pour prédire de manière plus efficace les comportements spécifiques des origamis. Une amélioration proposée dans [Heimbs, 2009] consiste à considérer l'anisotropie du papier Fig. 1.21. Les mailles sont déformées de manière aléatoire pour prendre en compte les imperfections du papier.

6. Le terme anglais utilisé dans la littérature est « bar and hinge »

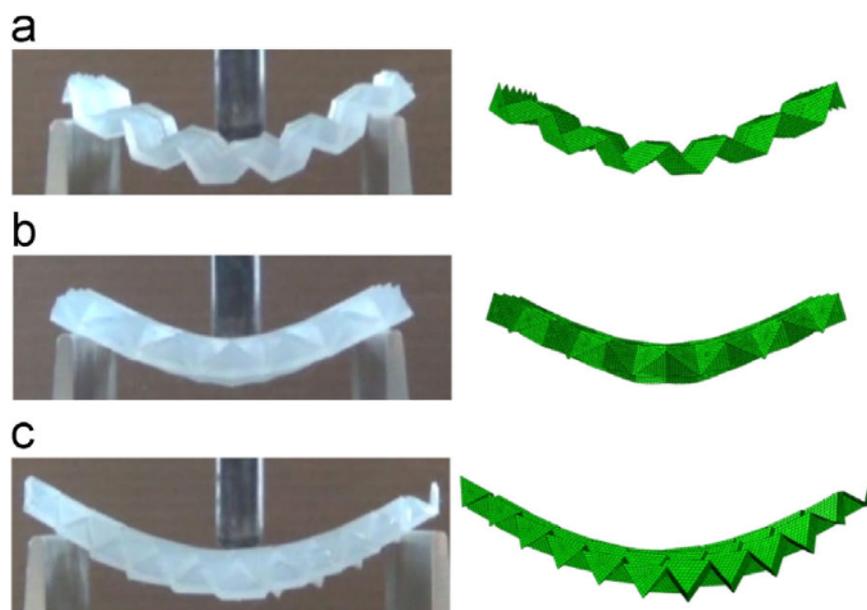
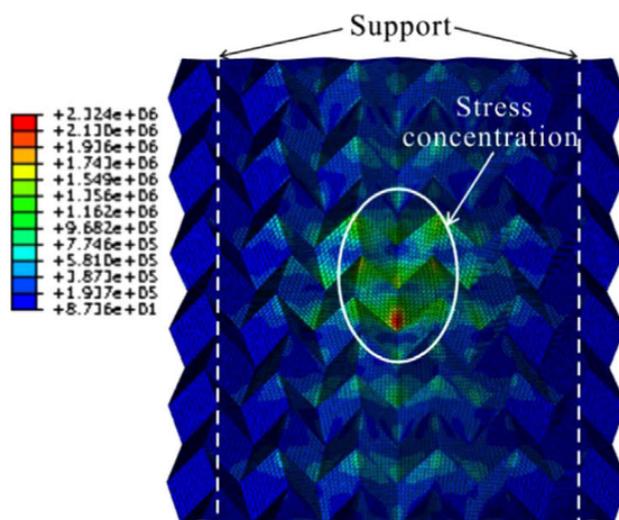


FIGURE 1.19 – Illustration de la comparaison entre la simulation et l'expérimentation dans [Liu et al., 2015].



15

FIGURE 1.20 – Illustration de la visualisation des concentrations de contraintes, résultat de la simulation EF dans [Liu et al., 2015].

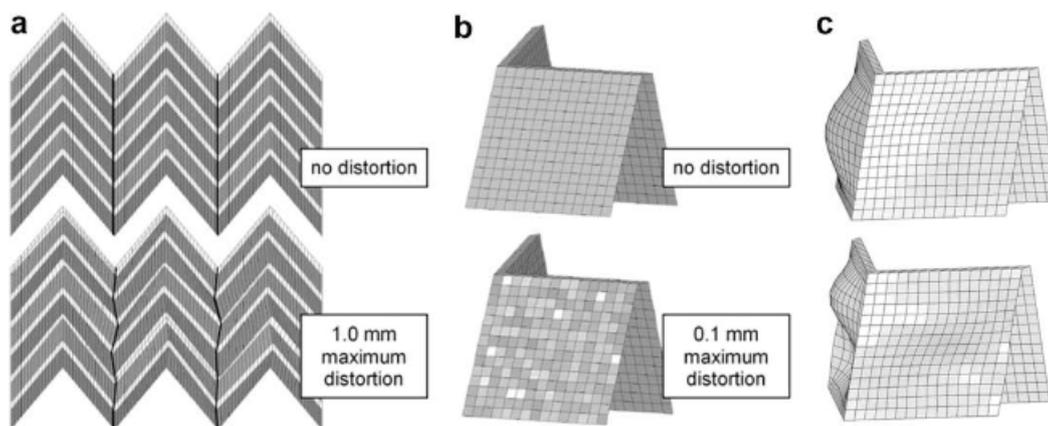


FIGURE 1.21 – Illustration de la modification aléatoire de la géométrie des mailles pour prendre en compte les imperfections du papier dans [Heimbs, 2009].

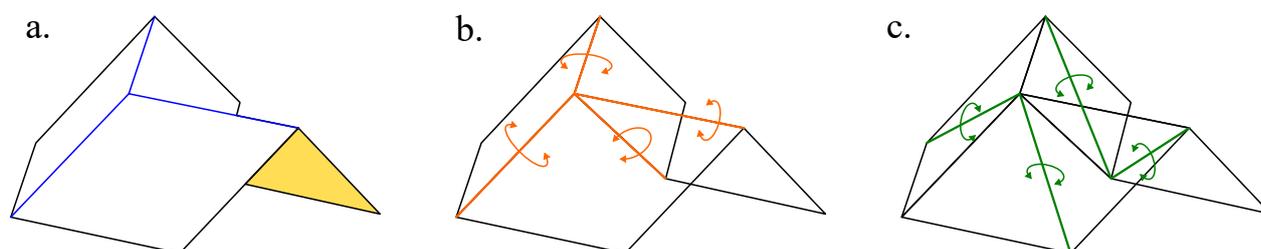


FIGURE 1.22 – Illustration des étapes pour passer d'un origami vers la structure à barres et liaisons utilisée pour simuler le comportement de l'origami.

Dans [Nayakanti, 2016], l'anisotropie du matériau est prise en compte en utilisant deux modules d'Young en fonction du sens de sollicitation de la feuille. Une seconde amélioration de ce modèle pour se rapprocher du comportement d'un origami est de considérer la discontinuité entre les panneaux à cause des plis qui possèdent des propriétés différentes des panneaux. Dans [Hu et al., 2021], les panneaux sont modélisés par des éléments finis, et une liaison pivot avec un ressort de torsion remplace la ligne de pliage. Ainsi, le comportement est plus proche de celui d'un origami, notamment lorsque les plis des origamis réalisent une variation angulaire importante au cours du mouvement.

Utiliser ce type de modèle pour aider à la conception robotique possède deux limites. Premièrement une phase expérimentale peut être requise si les propriétés matériaux ne sont pas connues. Deuxièmement, le temps de calcul est dépendant de la précision de la simulation souhaitée, et peut être relativement long. Par ailleurs, puisque le modèle ne permet pas de faire la synthèse du mécanisme, une démarche de conception itérative doit être utilisée pour faire le lien entre le patron et la cinématique ou la raideur. Avec cette méthode, le point du temps de calcul est d'autant plus limitant que le calcul pour simuler le comportement doit être effectué de manière répétée.

La modélisation avec barres et liaisons, comme dans [Schenk et al., 2011], consiste à supprimer les panneaux et remplacer les plis par des barres pour obtenir une structure en treillis (Fig. 1.22b). Les barres en orange sur la figure peuvent pivoter sur elles-mêmes permettant à la structure de bouger comme l'origami qu'elle remplace. Ces barres, nom-

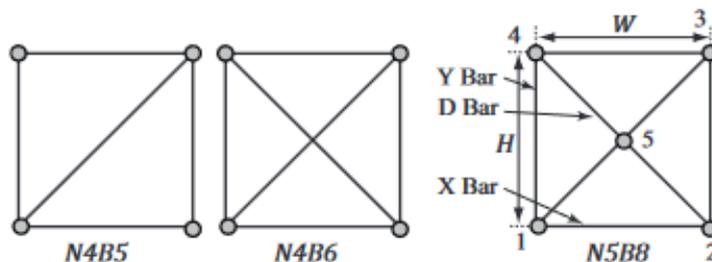


FIGURE 1.23 – Illustration du placement de barres de panneau sur un panneau carré.

mées « barres de pli » possèdent une certaine raideur en rotation permettant de simuler la raideur du pli. Pour considérer les origamis non rigidement pliables, des barres sont ajoutées en plus des plis, en vert sur la figure 1.22c. Ce deuxième type de barres nommé par la suite « barres de panneau » simule la flexion des panneaux qui apparaît lors du pliage de ces origamis. La raideur associée à la rotation des barres est différente. Se pose alors la question du positionnement des barres de panneau. Dans [Schenk et al., 2011] et [Liu and Paulino, 2017], le pli est placé sur une diagonale du panneau qui a quatre côtés. Il y a donc deux possibilités sur le panneau. Le choix est fait de manière arbitraire dans ces articles. Dans [Filipov et al., 2017], les différentes possibilités de placement de ce pli de panneau sont étudiées. Les résultats présentés montrent qu’il est possible d’améliorer la prédiction du modèle en rajoutant des barres de panneau (Fig. 1.23). Cependant, dans les travaux discutés ci-dessus, les panneaux qui sont modifiés pour prendre en compte leur flexion ont tous quatre côtés. Les propositions d’ajout de barres de panneau ne sont donc pas généralisables à tous les origamis. Pour la tour de Kresling dont les panneaux possèdent trois côtés, ces méthodes ne sont donc pas directement applicables. Dans [Pagano et al., 2017], une barre de panneau est ajoutée de manière arbitraire pour pouvoir analyser la tour avec les modèles à barres et liaisons. Dans [Yasuda et al., 2017], la déformation du panneau de la tour de Kresling est modélisée par une raideur en traction compression des barres de pli au lieu d’ajouter des barres de panneau. Ce qui résout la problématique de leur positionnement.

Comme pour les modèles à éléments finis, cet outil ne permet pas de lier le patron de l’origami à sa cinématique ou sa raideur, et nécessite de renseigner des raideurs pour les barres de pli et de panneau. Afin de simuler correctement le comportement de l’origami, une phase expérimentale peut être nécessaire pour calibrer la valeur des raideurs à utiliser pour le modèle. Enfin, comme pour les modèles à EF, cet outil permet de simuler ou d’analyser le comportement de l’origami et non pas d’en faire la synthèse dimensionnelle. Une démarche de conception itérative peut être utilisée pour faire le lien entre le patron et la cinématique ou la raideur. Les modèles de barres et liaisons ont l’avantage d’avoir un nombre de paramètres et des temps de calculs inférieurs ce qui le rend plus intéressant si l’on souhaite l’utiliser pour la conception.

Nous relevons dans la littérature un manque d’outil pour faire la synthèse dimensionnelle au sens de l’architecture du robot concernant les origamis non rigidement pliables. Les modèles utilisant des structures avec des barres et des liaisons semblent cependant une

piste prometteuse pour développer ce genre d'outil, du fait de leur moindre complexité numérique.

1.4 Synthèse et structure du manuscrit

1.4.1 Synthèse

Lors de l'état de l'art, nous observons que la transition du domaine origami pour le loisir vers une utilisation technique pour la robotique est bien avancée. Ces structures sont de plus en plus utilisées pour réaliser des fonctions très différentes dans tout type de domaines, et leur intérêt applicatif est aujourd'hui communément admis : légèreté, changement de forme, fabrication à diverses échelles, etc. Plusieurs propriétés les rendent particulièrement intéressants pour notre contexte comme mis en avant en section 1.2.

Cependant, la conception robotique exploitant les origamis reste relativement nouvelle. Lors de l'état de l'art, nous avons identifié des limites dans cette nouvelle manière de concevoir des robots. Dans ce manuscrit, nous visons à résoudre trois limites. La première concerne la capacité des structures origami à supporter des charges élevées. Certains systèmes sont capables de supporter des efforts relativement importants par rapport à leur masse. Cependant, de manière absolue, ces efforts restent faibles comparativement à la capacité des mécanismes conventionnels. Il est possible de concevoir des mécanismes rigides inspirés d'origamis pour bénéficier des propriétés de changement de forme ou de déployabilité sans être limité par la charge admissible. La problématique est alors de pouvoir concevoir un mécanisme rigide fonctionnel lorsque l'origami ayant servi d'inspiration n'est pas rigidement pliable.

La deuxième limite est le manque d'outil permettant de faire la synthèse dimensionnelle des origamis non rigidement pliables. Pour ces origamis, et notamment la tour de Kresling introduite en exemple, il n'y a pas d'outils permettant de lier la cinématique ou la forme de l'origami en fonction de la géométrie de son patron.

La troisième et dernière limite est le couplage qui existe entre la géométrie du patron, la cinématique et la raideur de l'origami. C'est le cas de nouveau avec la tour de Kresling dont le patron est modifié soit pour changer sa forme dans les configurations stables, soit pour changer sa raideur, mais où il n'est pas possible en conservant le même matériau de moduler ces caractéristiques indépendamment.

Ces trois limites nous ont conduit à contribuer dans le domaine de conception robotique exploitant les propriétés des origamis. Nos contributions pour résoudre les problématiques associées à ces limites sont détaillées dans les chapitres 2, 3 et 4, et dans le chapitre 5 nous appliquons les résultats de nos travaux dans le contexte applicatif de notre projet pour la robotique mobile. Ceci nous conduit au plan de manuscrit détaillé ci-dessous.

1.4.2 Plan de thèse

Dans le chapitre 2, nous traitons de la limite des structures origami à supporter des charges importantes. Nous proposons de convertir un origami non rigidement pliable sélectionné pour sa grande déployabilité, le Flasher (Fig. 1.8d), en mécanisme rigide polyarticulé capable de supporter des efforts plus importants tout en conservant la grande déployabilité de l'origami dont il est inspiré. Pour réaliser cette conversion, nous considérons le caractère non rigidement pliable de cet origami.

Dans le chapitre 3, nous étudions la structure de la tour de Kresling, origami qui peut posséder deux configurations stables. Nous proposons un modèle analytique permettant de faire la synthèse dimensionnelle de l'origami en liant la géométrie du patron à sa cinématique y compris en dehors des configurations stables. Ce modèle est vérifié expérimentalement. Puis nous introduisons un nouveau paramètre de définition géométrique du patron de cette structure permettant de moduler la relation force-déplacement de la tour sans en modifier la cinématique. Les variations du comportement cinéto-statique des tours modifiées sont mesurées expérimentalement.

Dans le chapitre 4, nous proposons de modifier temporairement le comportement cinéto-statique de la tour à l'aide de mécanismes de rigidifications actifs. Dans un premier temps, nous étudions la nature et la localisation du mécanisme de rigidification. Dans un second temps, nous proposons trois mécanismes de rigidifications actionnés. Ces trois mécanismes sont choisis pour être très différents en terme de technologie, de dynamique et de raideur. Nous évaluons leurs performances expérimentalement en mesurant les changements qu'ils apportent sur la relation force-déplacement de la tour.

Enfin, dans le chapitre 5, nous exploitons les structures étudiées précédemment dans le cadre du projet Origabot. Nous proposons un premier mécanisme inspiré du Flasher pour réaliser une roue à géométrie variable afin d'améliorer la capacité de franchissement dans le mode roulant. Nous proposons ensuite un mécanisme basé sur la tour de Kresling pour stabiliser un drone volant avec un seul rotor.

Finalement, en conclusion, nous dressons un bilan des contributions de ce travail de thèse, des limites et perspectives identifiées dans la conception robotique exploitant les origamis.

Chapitre 2

Conception d'un mécanisme inspiré du Flasher

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous partons donc d'un origami spécifique pour traiter de la question de la démarche de conception d'un mécanisme inspiré d'origami. L'objectif est de pourvoir concilier capacité de déploiement observée au chapitre 1, et charges admissibles en profitant des capacités de charge offertes par les liaisons conventionnelles. Nous nous intéressons à l'origami Flasher dont le patron est illustré en figure 2.1 et sa séquence de déploiement en figure 2.2. Il s'agit d'un origami non rigidement pliable, comme nous le reverrons en section 2.3. Sa particularité est d'avoir une déployabilité importante, au sens d'une large variation du diamètre extérieur de l'origami entre sa configuration pliée et plane.

Notre objectif est d'identifier une démarche de conception pour passer de cet origami non rigidement pliable à un mécanisme polyarticulé inspiré de cet origami.

2.2 Choix du patron

Le patron du Flasher est présenté en figure 2.1. Il est composé d'un motif élémentaire en vert foncé sur les figures 2.1, 2.3 et 2.4. Avec ce choix de motif élémentaire, il y a 4 panneaux symétriques deux à deux que l'on nomme A (resp. B) et leurs symétriques A' (resp. B'). Il existe plusieurs choix de panneaux pour définir le motif élémentaire comme le montre les exemples de la figure 2.4. Pour aboutir au choix présenté, nous avons dressé la liste des cinq solutions possibles. Puis nous avons sélectionné la solution avec le moins de panneaux adjacents en vert clair.

Les diamètres dans les configurations « extrêmes », c'est à dire pliée et plane, sont définis comme les diamètres des cercles circonscrits par lesquels passent les sommets de l'origami. Ils sont reportés en rouge sur la figure 2.2. Le rapport entre eux peut aller jusqu'à 9,2 comme dans [Zirbel et al., 2013] (Fig. 1.8d). Il est possible de faire varier le

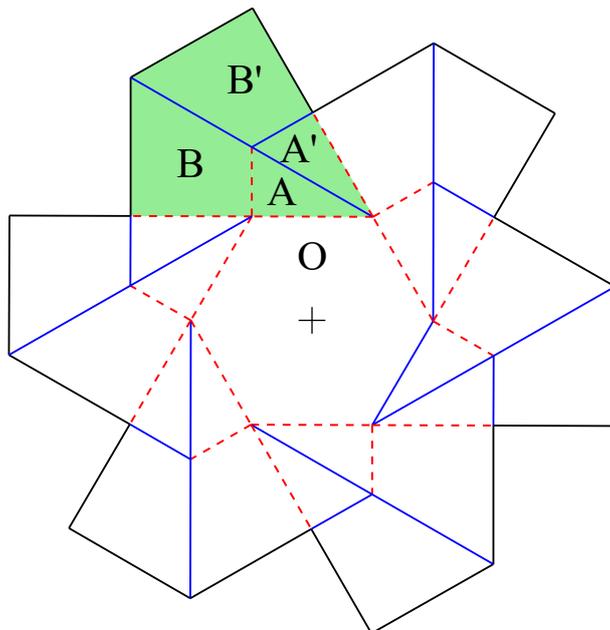


FIGURE 2.1 – Illustration du patron du Flasher et de son motif élémentaire en vert.

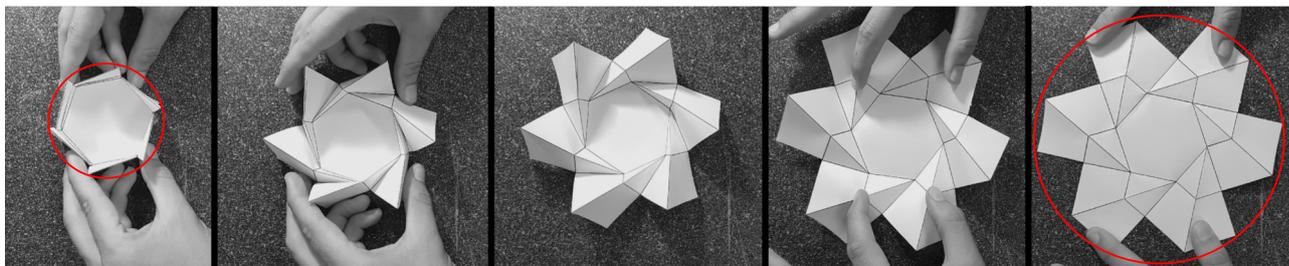


FIGURE 2.2 – Illustration de la séquence de déploiement du Flasher.

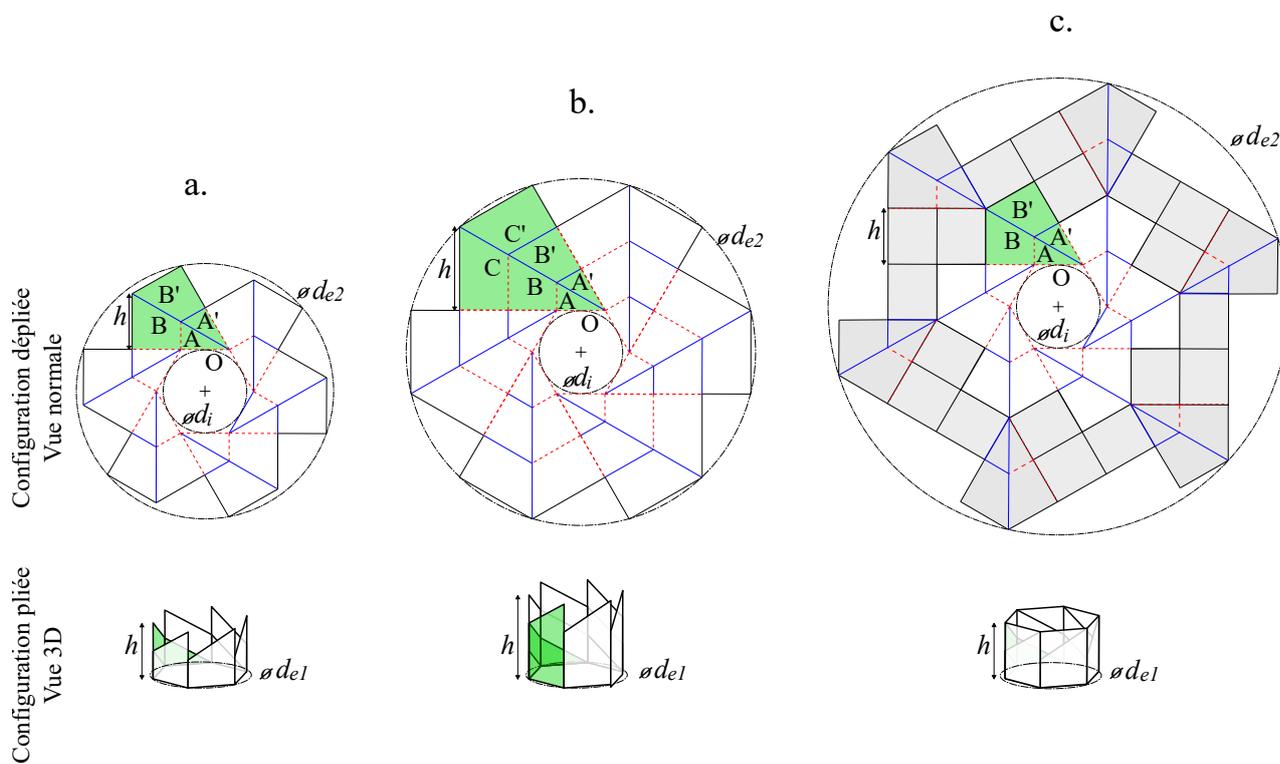


FIGURE 2.3 – Illustration du Flasher sans épaisseur dans sa configuration pliée et plane.

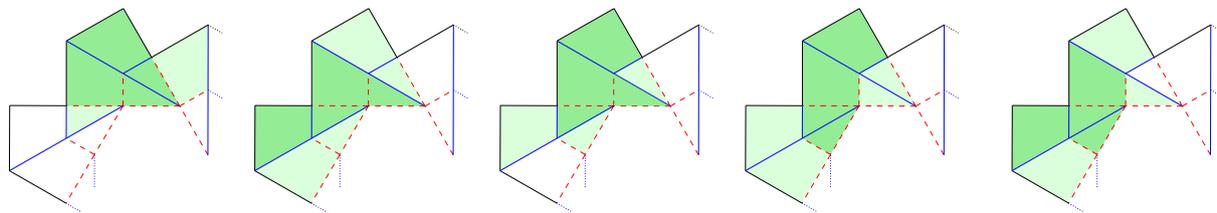


FIGURE 2.4 – Exemple de choix de motif élémentaire possible en vert foncé, et les panneaux adjacents correspondant en vert clair.

ratio entre les diamètres des configurations pliée (d_{e1}) et plane (d_{e2} Fig. 2.3) en modifiant la géométrie du patron. Sur le patron, il est possible de changer le nombre de panneaux qui composent le motif élémentaire (Fig. 2.3b), le nombre de côtés du polygone central ou encore la répétition radiale du motif élémentaire (2.3 c). Afin de faciliter la lecture, nous introduisons uniquement les paramètres que nous utilisons pendant l'étude. Nous montrons le potentiel de la structure à changer de diamètre avec des ratios importants à l'aide de la figure 2.3. Modifier le nombre de côtés du polygone central n'a quasiment pas d'impact sur la variation de diamètre. Sur cette figure, nous retrouvons un patron en figure 2.3a. pour lequel le motif élémentaire est répété six fois axialement, au sens d'une rotation autour de l'axe perpendiculaire au plan, repéré par une croix au centre du panneau O . Sur la figure 2.3c., le motif élémentaire est aussi répété radialement, dans la direction de l'axe passant par le pli aa' de chaque motif élémentaire. Sur la figure 2.3b., le nombre de panneaux du motif élémentaire est augmenté, ce qui entraîne à la fois une augmentation de la variation du diamètre et de la hauteur h en configuration pliée. Pour les deux patrons en figure 2.3a et c, la hauteur h dans la configuration pliée est la même tandis que le diamètre d_{e2} dans la configuration plane est augmentée pour la figure 2.3c. Si l'épaisseur de l'origami est négligée, la surface du patron peut être augmentée théoriquement à l'infini en augmentant le nombre de répétitions radiales sans augmenter ni la hauteur ni le diamètre d_{e1} de la structure une fois pliée comme le montre la figure 2.3. C'est ce qui a motivé le choix de cet origami dans ce chapitre.

2.3 Démarche de conception d'un mécanisme inspiré du Flasher

La démarche de conception proposée dans cette section se décompose en deux étapes elles-mêmes divisées en activités.

L'étape 1 est constituée de deux activités. Elle consiste à passer d'un patron non rigidement pliable avec des plis vers une chaîne cinématique déployable au sens des mécanismes polyarticulés. L'activité 1.1 vise à identifier un pli à remplacer pour ajouter des degrés de liberté et permettre la déployabilité du mécanisme. L'activité 1.2 consiste à proposer la chaîne cinématique qui remplace le pli précédemment identifié.

L'étape 2 est la conception du mécanisme inspiré du Flasher et utilisant la cinématique définie lors de la première étape. Elle est divisée en trois activités. L'activité 2.1 permet

de sélectionner une méthode d'ajout d'épaisseur pour passer du domaine des origamis vers celui des mécanismes polyarticulés. L'activité 2.2 correspond à l'implémentation de la méthode précédemment sélectionnée appliquée au mécanisme défini ici. Enfin, dans l'activité 2.3, le mécanisme avec épaisseur est conçu puis implémenté sous forme d'un prototype fonctionnel validant la démarche.

2.3.1 Étude préliminaire : identification du caractère non rigidement pliable.

Le motif élémentaire isolé peut être rigidement plié à condition de suivre une séquence de pliage spécifique (Fig. 2.5). Dans un premier temps (Fig. 2.5b), les plis aa' et bb' sont actionnés de manière synchronisée, pour atteindre l'angle de 0° (Fig. 2.5c). En parallèle, le pli \widehat{oa} atteint 90° . Les plis ab et $a'b'$ sont alors confondus (Fig. 2.5c), ils peuvent se plier de manière synchronisée pour atteindre 120° (Fig. 2.5e).

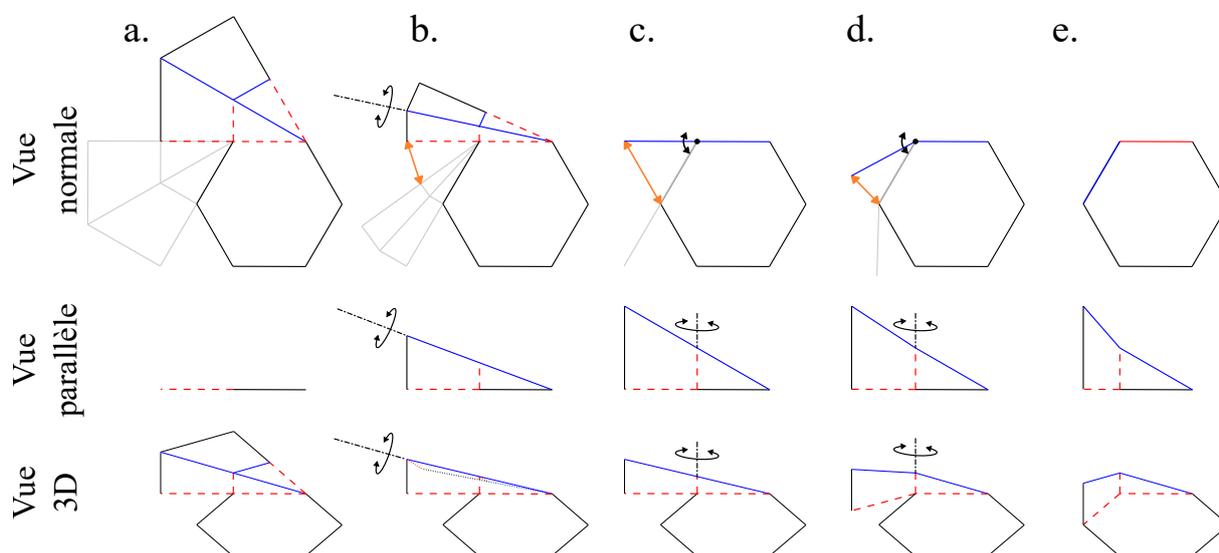


FIGURE 2.5 – Illustration de la séquence de pliage du motif élémentaire permettant de plier rigidement.

Dans la vue normale de la figure 2.5, nous avons illustré en gris un second motif élémentaire respectant cette séquence de pliage. Nous avons illustré par une flèche orange la déconnexion des arêtes de panneaux adjacents lors du pliage respectant cette séquence. Avec l'origami complet, cette séquence ne peut plus être respectée et les panneaux des motifs élémentaires doivent se déformer pour permettre le changement de configuration en restant connectés. Une démonstration géométrique disponible en annexe A prouve l'unicité de cette séquence de déploiement du motif élémentaire sans déformation qui est incompatible avec le déploiement de l'origami complet. Cette démonstration nous permet de conclure sur le caractère non rigidement pliable du Flasher. La déformation des panneaux peut être clairement observée (Fig. 2.6). Pour expliciter le pliage non rigide de manière alternative, la figure 2.6 correspond à une photo en gros plan des panneaux d'un prototype réalisé en papier lorsque l'origami se situe dans une configuration intermédiaire.



FIGURE 2.6 – Illustration des déformations du papier lors du pliage du Flasher.

2.3.2 Étape 1 : Modification de la cinématique

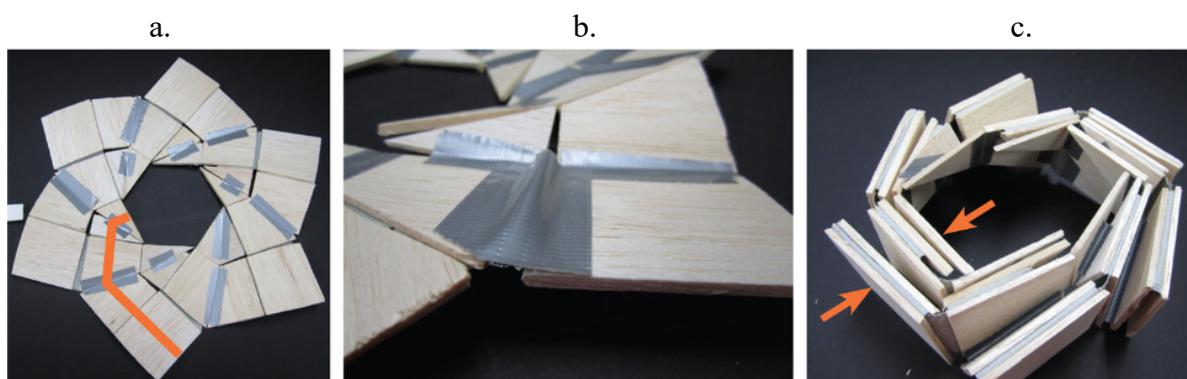


FIGURE 2.7 – Illustration de l'utilisation d'une membrane dans [Zirbel et al., 2013]. Mécanisme dans sa configuration plane en a. Vue agrandie en b. Mécanisme replié en c.

Dans [Zirbel et al., 2013] (Fig. 2.7), un travail pour prendre en compte l'épaisseur et le caractère non rigidement pliable du Flasher a été effectué. Dans cet article, des degrés de liberté ont été ajoutés afin de relaxer certaines contraintes cinématiques et permettre de plier la structure avec des panneaux rigides. La solution implémentée (Fig. 2.7) consiste à utiliser des membranes souples pour connecter les panneaux. Les panneaux sont alors placés à une distance supérieure ou égale à deux fois l'épaisseur les uns des autres pour éviter les collisions comme le montre la figure 2.8. Il n'y a alors plus un axe de rotation défini, mais un ensemble de mobilités possibles avec la membrane. Cette solution peut rapidement trouver ses limites. En effet, l'ajout de mobilités modifie la cinématique de manière non maîtrisée et introduit des mobilités internes. Le mécanisme est conçu pour être dans la situation illustrée en figure 2.9a lorsqu'il est dans sa configuration plane. Si une force extérieure est appliquée, les panneaux sont capables de la supporter dans la situation b. Cependant, les mobilités ne permettent pas de maintenir les panneaux dans cette position, par conséquent, les membranes n'empêchent pas les panneaux de se retrouver dans la situation illustrée en figure 2.9c pour laquelle le mécanisme est déformé sous l'effet de la force extérieure. La cinématique de l'origami n'est alors plus respectée.

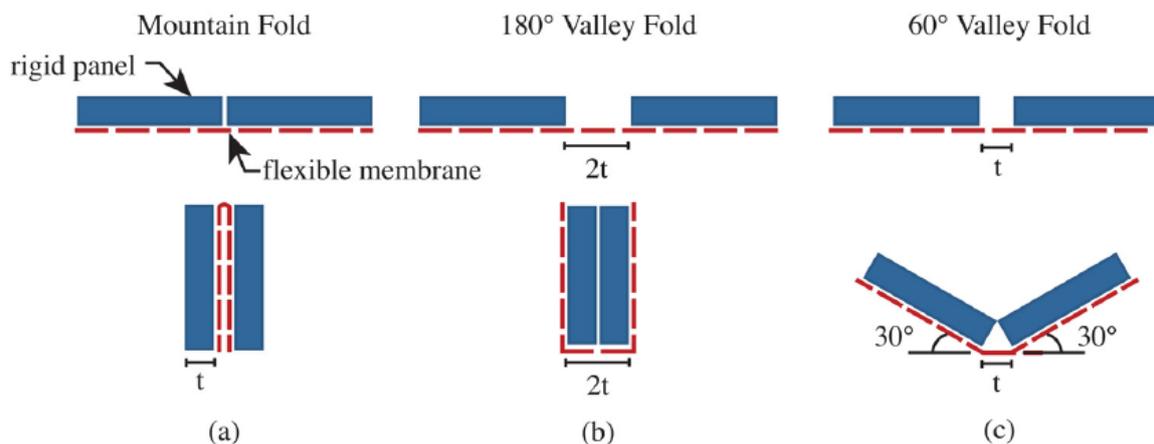


FIGURE 2.8 – Illustration du pliage des panneaux en fonction du type de pli, de la distance entre les panneaux et de l'épaisseur t des panneaux dans [Zirbel et al., 2013]. En (a) un plis montagne avec une distance nulle entre les panneaux, en (b) un plis vallée avec une distance égale à deux fois l'épaisseur entre les panneaux, et en (c) un plis vallée avec une distance égale à une fois l'épaisseur entre les panneaux.

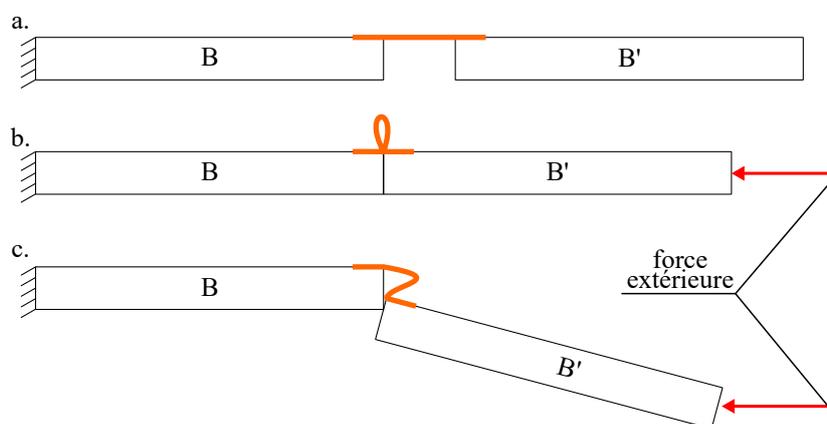


FIGURE 2.9 – Exemple de situation illustrant les limites de la solution implémentée dans [Zirbel et al., 2013].

Les travaux effectués dans la littérature pour concevoir un mécanisme inspiré du Flasher sont limités. Par conséquent, nous proposons ici une démarche permettant de concevoir un mécanisme inspiré du Flasher qui répond aux besoins de la robotique.

Activité 1.1 : Identification du pli à remplacer

Pour permettre au mécanisme polyarticulé de se déployer, nous devons ajouter un ou plusieurs degré(s) de liberté. Par « déployer », nous entendons que le mécanisme est capable de changer de configuration. L'ajout de degrés de liberté doit être maîtrisé pour ne pas se trouver dans la situation dans [Zirbel et al., 2013] discutée ci-dessus. La méthode choisie pour considérer le pliage rigide est de remplacer un pli du motif élémentaire par un ensemble de liaisons ajoutant les degrés de liberté nécessaires de manière empirique. Nous détaillons dans la suite la succession d'étapes que nous avons conduit pour obtenir une chaîne cinématique opérationnelle. Sur le motif élémentaire sélectionné, il y a quatre

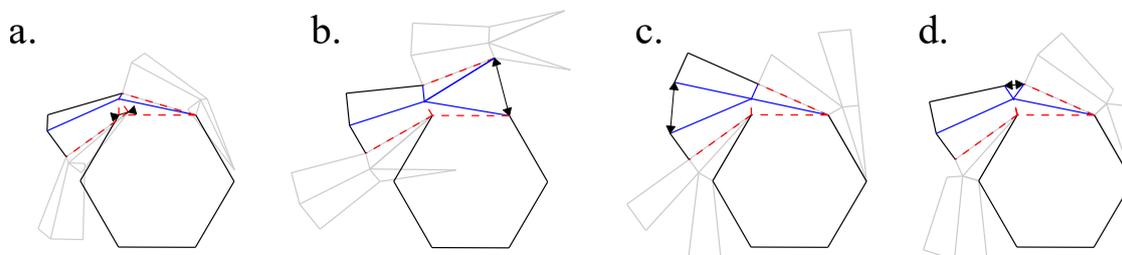


FIGURE 2.10 – Illustration des possibilités de suppression de plis sur le motif élémentaire. Suppression du pli ab en 1), aa' en 2), bb' en 3) et $a'b'$ en 4).

possibilités de plis à remplacer (aa' , bb' , ab et $a'b'$). Un choix doit être fait. Pour obtenir des arguments sur le pli à remplacer, nous travaillons par itérations successives. Nous avons supprimé un pli et observé les conséquences sur le mécanisme (Fig. 2.11) avant de passer au pli suivant.

Les conséquences de la suppression des plis ab et aa' , respectivement illustrées en figures 2.10a et b, posent problème au niveau de la connexion entre les motifs élémentaires et la base hexagonale de l'origami. La répétition du motif élémentaire ne permet pas dans ces cas d'assembler les motifs élémentaires tout en respectant la forme du Flasher.

Pour choisir entre la suppression des plis $a'b'$ et $a'b$, nous avons considéré l'épaisseur du motif élémentaire. À ce stade de l'étude, nous ne cherchons pas à valider la méthode d'ajout d'épaisseur, mais uniquement à trouver un élément discriminant pour le choix de la suppression du pli. Cela permet d'identifier et d'anticiper une collision illustrée en figure 2.11b. Sur cette figure, nous observons en orange la collision entre les panneaux B et B' dans la configuration pliée du motif élémentaire. Le pli $a'b'$ ne peut atteindre son amplitude complètement pliée à cause de cette collision. La figure 2.11a montre que la prise en compte de l'épaisseur ne posera pas de problème au niveau du motif élémentaire si le pli $a'b'$ est supprimé. C'est donc ce pli que nous remplaçons par un mécanisme rigide polyarticulé sans épaisseur dans la suite de l'étude.

Activité 1.2 : Remplacement du pli par une chaîne cinématique

La chaîne cinématique qui remplace le pli supprimé doit permettre le changement de configuration sans déformation. La méthode proposée est la suivante.

Nous plaçons le motif élémentaire dans une configuration intermédiaire illustrée en figure 2.6 avec $(\widehat{aa'}; \widehat{bb'}; \widehat{ab}) = (90^\circ; 90^\circ; 30^\circ)$. Nous regardons combien de changements de repères sont nécessaires pour passer du repère $R_{A'}$ de centre $O_{A'}$ appartenant au panneau A' vers le repère $R_{B'}$ de centre $O_{B'}$ appartenant au panneau B' . Nous dénombrons quatre rotations et une translation illustrés en figure 2.13 dans l'ordre suivant :

- Rotation $\theta_{A'}$ selon $x_{A'}$
- Rotation $\phi_{A'}$ selon z_1
- Translation l selon y_2
- Rotation $\theta_{B'}$ selon z_3
- Rotation $\phi_{B'}$ selon x_4

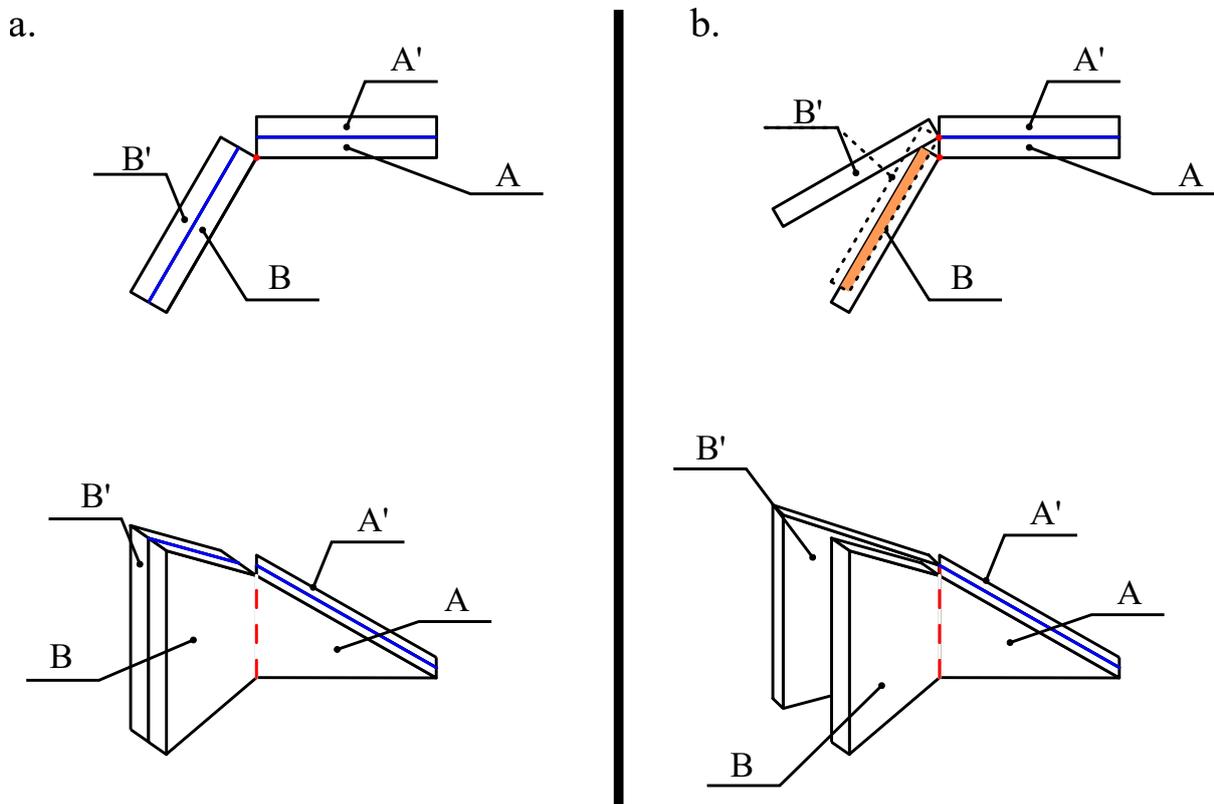


FIGURE 2.11 – Illustration des possibilités de suppression de plis sur le motif élémentaire épais. Suppression du pli $a'b'$ en 1), bb' en 2).

À partir de cette observation, nous supposons que la cinématique à créer pour remplacer le pli $a'b'$ doit posséder plusieurs liaisons mécaniques apportant les cinq degrés de liberté requis pour permettre un changement de configuration du mécanisme inspiré du motif élémentaire.

Plusieurs architectures cinématiques permettent d'introduire les degrés de liberté nécessaires. Une proposition inspirée de la méthode de changement de repère est de placer une liaison cardan en $O_{A'}$, une seconde en $O_{B'}$ et une liaison glissière entre les deux. Bien que faisable, cet ensemble cinématique fait appel à des liaisons difficiles à implémenter. Nous ajoutons donc comme contrainte de n'utiliser que des liaisons pivots plus faciles à implémentées afin de limiter cette difficulté. Le schéma cinématique proposé est illustré en figure 2.14a. Le pli $a'b'$ est maintenant remplacé par une chaîne cinématique de cinq liaisons numérotées 4 à 8 sur la figure. L'objet présenté devient alors un mécanisme inspiré d'un origami et non plus une structure origami. Sur la figure 2.14, nous avons utilisé des couleurs représentant les classes d'équivalence cinématiques. Sur un schéma cinématique conventionnel, les éléments reliant les liaisons mécaniques sont généralement représentés en traits fins. Nous faisons le choix de les représenter en élément surfacique pour aider à visualiser la forme de l'origami.

À l'aide de l'outil de simulation de systèmes multi-corps intégré au logiciel PTC CREO Parametric, nous vérifions que ce mécanisme inspiré du motif élémentaire peut se déployer. Dans la configuration plane, les liaisons pivots sont placées de telle manière que le mécanisme est dans une position singulière. Ainsi, en fonction des considérations sur les

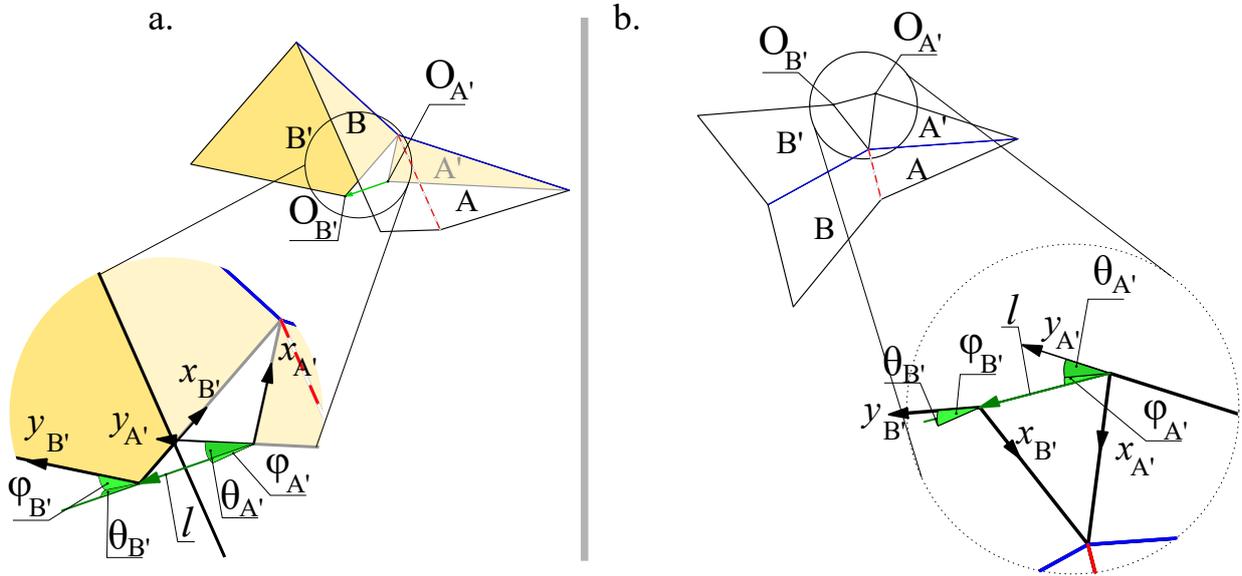


FIGURE 2.12 – Illustration sous deux vues différentes et accompagnée d'un plan rapproché de la configuration choisie

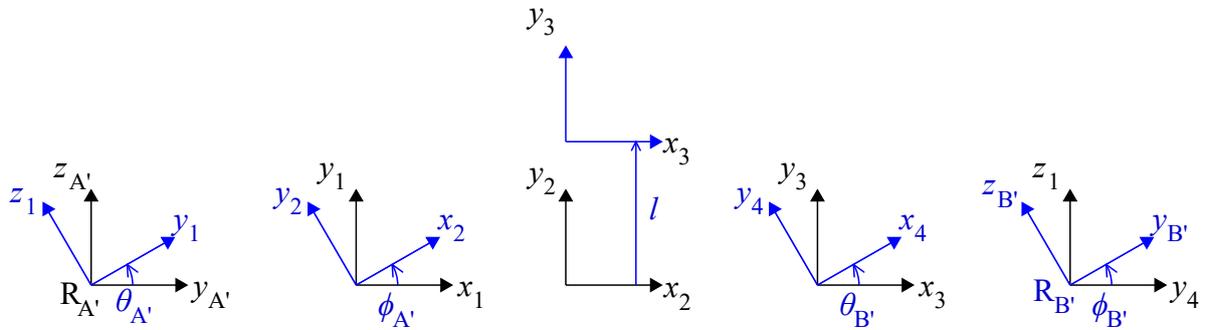


FIGURE 2.13 – Illustration des 5 changements de repère pour passer de $R_{A'}$ au repère $R_{B'}$ dans l'ordre.

liaisons actives et passives, il y a un risque d'être dans l'incapacité de déployer le mécanisme. Nous considérons la liaison 2 comme active contrôlée en position par l'angle $\widehat{aa'}$. Dans le cas mécanisme inspiré du motif élémentaire, nous rendons aussi actif la liaison 1 contrôlée en position par l'angle \widehat{ab} . Enfin, pour correspondre au mouvement du motif élémentaire sur l'origami, les liaisons 1 et 2 sont liées par les relations $\widehat{aa'} = 180 - t \cdot 180$ et $\widehat{ab} = 180 - t \cdot 60$ avec $t = [0 : 1]$. Quand $t = 0$, le mécanisme est dans la configuration plane, quand $t = 1$, le mécanisme est dans la configuration pliée. La simulation ainsi définie nous permet de valider que le mécanisme inspiré du motif élémentaire est déployable. Nous passons maintenant à l'articulation du mécanisme complet.

Nous répétons radialement ce mécanisme inspiré du motif élémentaire pour obtenir un mécanisme inspiré du Flasher (Fig. 2.14b). Nous effectuons une nouvelle vérification par simulation de la déployabilité du mécanisme inspiré du Flasher. Dans le cas du mécanisme complet, la liaison 1 devient passive. C'est la fermeture de la chaîne cinématique apportée par la répétition qui contraint la variation de l'angle \widehat{ab} au cours du déploiement. Il y a alors six liaisons actives appartenant respectivement aux six liaisons 2 de chaque motif élémentaire. La position angulaire de ces six liaisons est synchronisée pour

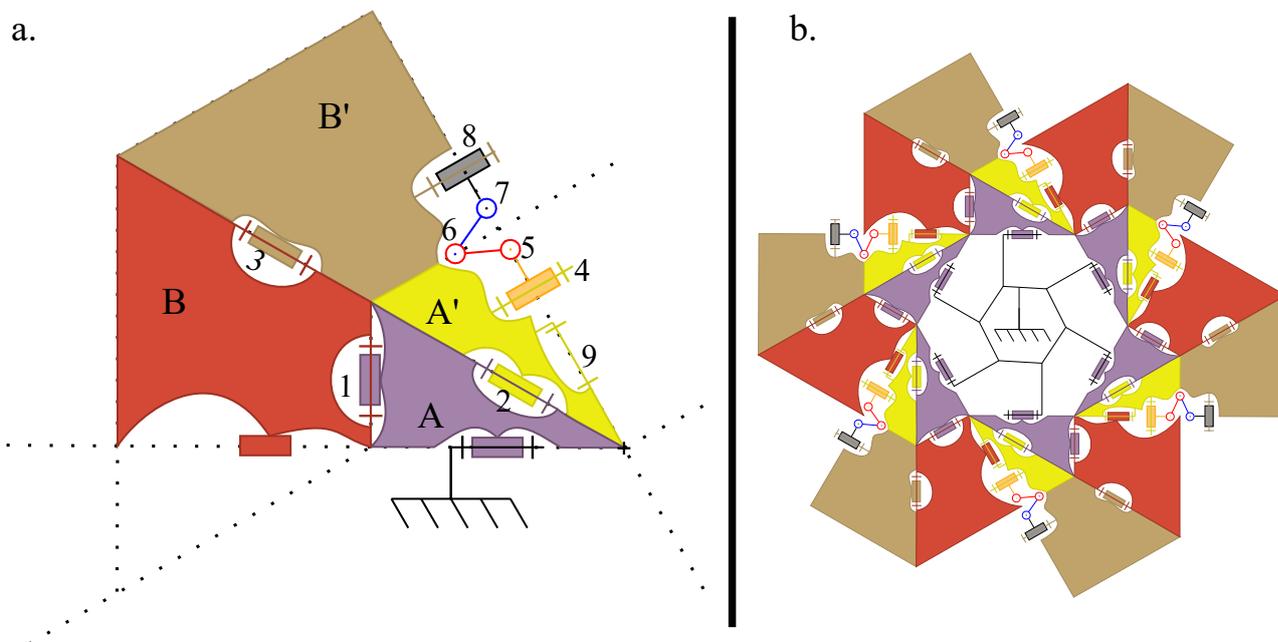


FIGURE 2.14 – Schéma cinématique du motif élémentaire remplaçant le pli $a'b'$ en a. et du mécanisme complet en b.

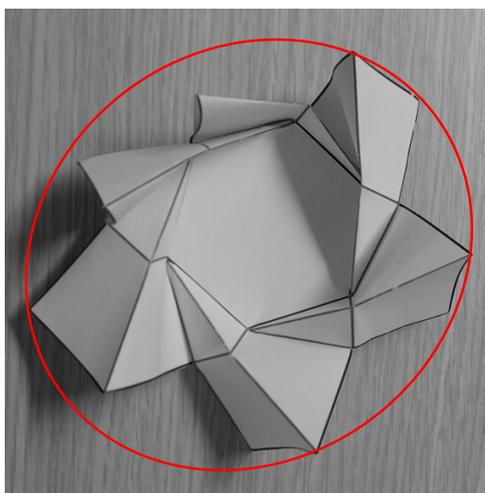


FIGURE 2.15 – Illustration d'un déploiement non synchrone sur l'origami Flasher.

obtenir un déploiement semblable à l'origami. Cette condition de synchronisation permet d'obtenir un déploiement « synchrone » de l'origami. Le terme synchrone signifie ici que la forme passant par les sommets externes du mécanisme reste circulaire comme illustrée en figure 2.2 et non pas comme le contre-exemple en figure 2.15. La seconde simulation ainsi définie nous permet de vérifier que le mécanisme inspiré du Flasher est déployable avec la chaîne cinématique proposée.

Nous disposons donc d'un mécanisme rigide polyarticulé sans épaisseur permettant de changer de configurations à la manière du Flasher sans subir de déformation. Pour passer à la fabrication de ce mécanisme polyarticulé, l'ajout d'épaisseur doit maintenant être pris en compte.

2.3.3 Étape 2 : Conception du mécanisme rigide avec épaisseur

Activité 2.1 : Identification de la méthode d'ajout d'épaisseur adaptée au contexte

Le passage d'un origami en matériau souple vers la conception d'un mécanisme rigide polyarticulé passe par l'utilisation de matériaux avec une épaisseur non négligeable. Dans la littérature, le problème de la gestion de l'épaisseur pour concevoir des mécanismes origami a été assez largement abordé. Nous nous appuyons sur l'article de synthèse [Morgan et al., 2016] qui liste et compare différentes méthodes. Le tableau en figure 2.16 est une capture du tableau dans [Morgan et al., 2016] comparant les méthodes d'ajout d'épaisseur en fonction de cinq critères. Ces critères d'évaluations sont : la conservation de la ciné-

Method	Kinematics preserved	ROM preserved	Single DOF	Unfolds flat	Application considerations
Axis-shift Tachi (2011)	No	Yes	Yes	Yes	Limited to selected fold patterns
Offset joint Hoberman (1991) Hoberman (2010)	No	Yes	Yes	Yes, varied thickness	Limited to selected fold patterns
Membrane folds Zirbel et al. (2013)	No	Yes, if gaps between panels $\geq 2 \times$ thickness	No, gaps allow movement	Yes	Deployed system requires tension at edges to keep membranes stretched
Tapered panels Tachi (2011)	Yes	No	Yes	Yes	Required tapering of panels limits possible geometry and materials
Offset crease Abel et al. (2015)	No	Yes	No	Yes	Panels required to be trimmed to avoid self-interference at vertices
Spatial linkages Chen et al. (2015)	No	Yes	Yes	No	Fold angles and panel thicknesses limited by the spatial mechanism
Offset panel Edmondson et al. (2014)	Yes	Yes	Yes	No	Cutouts in panels may be required to avoid self-intersection

FIGURE 2.16 – Tableau de comparaison des méthodes de gestion d'épaisseur dans [Morgan et al., 2016].

matique (*Kinematics preserved*), la conservation de l'amplitude de rotation du pli (*ROM preserved*), l'ajout d'un degré de liberté unique (*Single DOF*), la capacité de se plier à plat (*Unfolds flat*) et les conditions d'applications de la méthode (*Application considerations*).

Nos besoins pour le mécanisme épais sont :

- Conserver l'amplitude des plis
- Conserver la configuration plane
- Ne pas ajouter de degrés de liberté lors de l'ajout d'épaisseur.

Par rapport aux informations dans [Morgan et al., 2016], la méthode de changement d'axes dans [Tachi et al., 2011] permet de répondre à notre besoin même si elle n'est pas généralisable et ne convient a priori pas à tous les origamis. Nous devons donc vérifier s'il est possible de l'utiliser dans notre cas. La méthode illustrée en figure 2.17 consiste à décaler les axes des plis montagne sur la surface frontière inférieure et les axes des plis vallée sur la surface frontière supérieure. Pour notre mécanisme, la cinématique peut être modifiée dans la mesure où nous devons conserver l'amplitude des plis pour atteindre les

configurations souhaitées. Par ailleurs, comme le montre la figure 2.17a., l'ajout d'épaisseur constitue une butée mécanique limitant l'amplitude de la rotation. L'utilisation de cette butée peut contribuer à l'amélioration de la capacité de charge du mécanisme.

Activité 2.2 : Ajout d'épaisseur à la cinématique du mécanisme

Dans le cas du mécanisme rigide polyarticulé sans épaisseur présenté en Fig. 2.14a, les liaisons mécaniques 1, 2, 3 et 9 sont le résultat de la conversion des plis en liaison pivot. Nous leur appliquons donc la méthode de changement d'axes. Pour les liaisons 4 à 8, qui remplacent le pli $a'b'$, nous proposons arbitrairement de les laisser dans le plan médian puisqu'elles ne correspondent plus à un ancien pli.

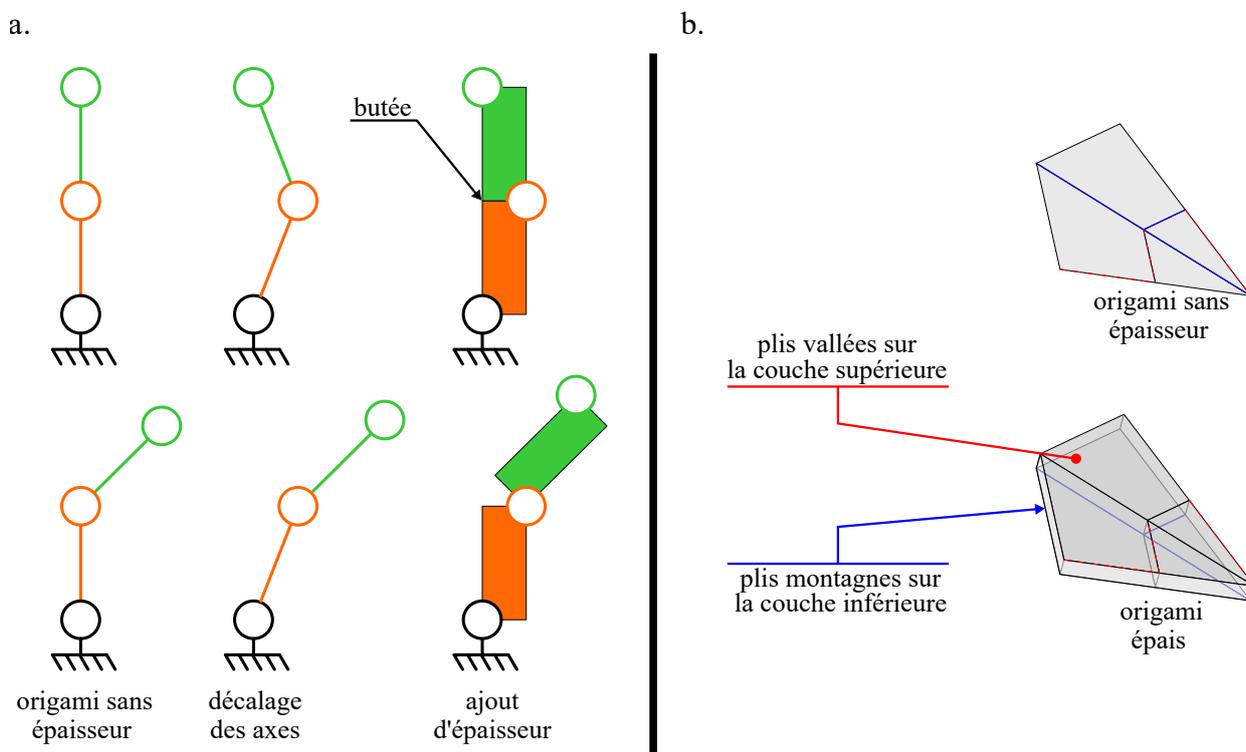


FIGURE 2.17 – Illustration de la méthode de changement d'axe issue de [Morgan et al., 2016] en a). Application au motif élémentaire en b).

Nous utilisons une méthode à itérations successives pour vérifier que le changement des axes des liaisons permet toujours de changer de configuration. Dans un premier temps, nous vérifions la capacité de changer de configuration du nouveau mécanisme rigide polyarticulé épais inspiré du motif élémentaire. La simulation indique que le mécanisme limité au motif élémentaire est déployable.

Dans un second temps, nous vérifions la capacité à changer de configuration du nouveau mécanisme rigide polyarticulé épais inspiré du Flasher. Pour réaliser le changement de configuration en simulation, comme précédemment, les six liaisons 2 sont rendues actives et sont synchronisées. Dans ces conditions, la simulation ne parvient pas à faire bouger le mécanisme qui n'est alors pas déployable.

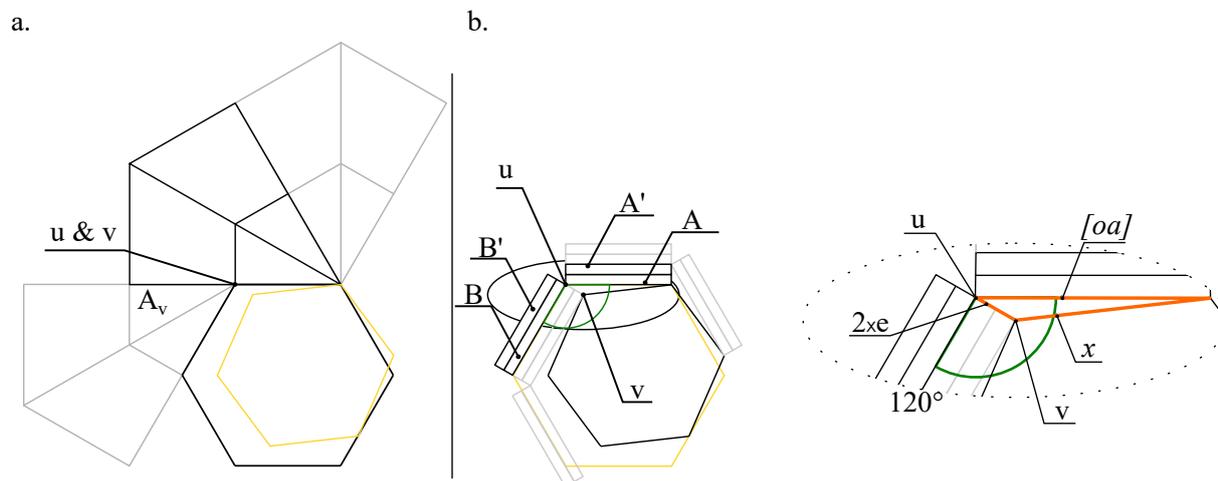


FIGURE 2.18 – Illustration du décalage entre les sommets u et v dans les configurations respectivement plane en a et pliée en b.

Comme le montre la figure 2.18, nous observons que l'épaisseur des panneaux entraîne un décalage entre l'assemblage du mécanisme dans la configuration plane figure 2.18a et pliée b, visualisé par la différence de forme de l'hexagone central en noir correspondant à la configuration courante et à celui représenté en jaune dans l'autre configuration. Ce décalage représente deux fois l'épaisseur du panneau noté e . Sur la figure 2.18 le sommet v appartenant au panneau noté A_v (désignant le panneau A du motif élémentaire voisin) et le sommet noté u sont confondu dans la configuration plane mais distant dans la configuration pliée. La cinématique précédente ne permet pas de s'adapter à ce décalage, ce qui empêche le changement de configuration. Nous ajoutons donc des degrés de liberté afin de rendre la cinématique compatible avec l'épaisseur et permettre le changement de configuration.

Suite à l'étude empirique sur le degré de liberté à ajouter pour considérer le décalage des sommets u et v , nous avons identifié deux solutions détaillées dans la suite. La figure 2.19 illustre les deux solutions. Pour la première que nous appelons « décalage radial », nous ajoutons un degré de liberté permettant aux sommets v des panneaux A de se translater selon la trajectoire tracée en ligne mixte. Pour la seconde, que nous appelons « décalage tangentiel », nous ajoutons un degré de liberté permettant aux panneaux B et A_v de se translater selon la ligne de pliage $a'_v b$ marquée par une ligne mixte.

Pour chacune de ces propositions, nous concevons un mécanisme polyarticulé épais que nous simulons pour vérifier la déployabilité. Ces mécanismes sont illustrés en figures 2.20 et 2.21. Ces simulations valident que la nouvelle chaîne cinématique de ces mécanismes les rend déployables.

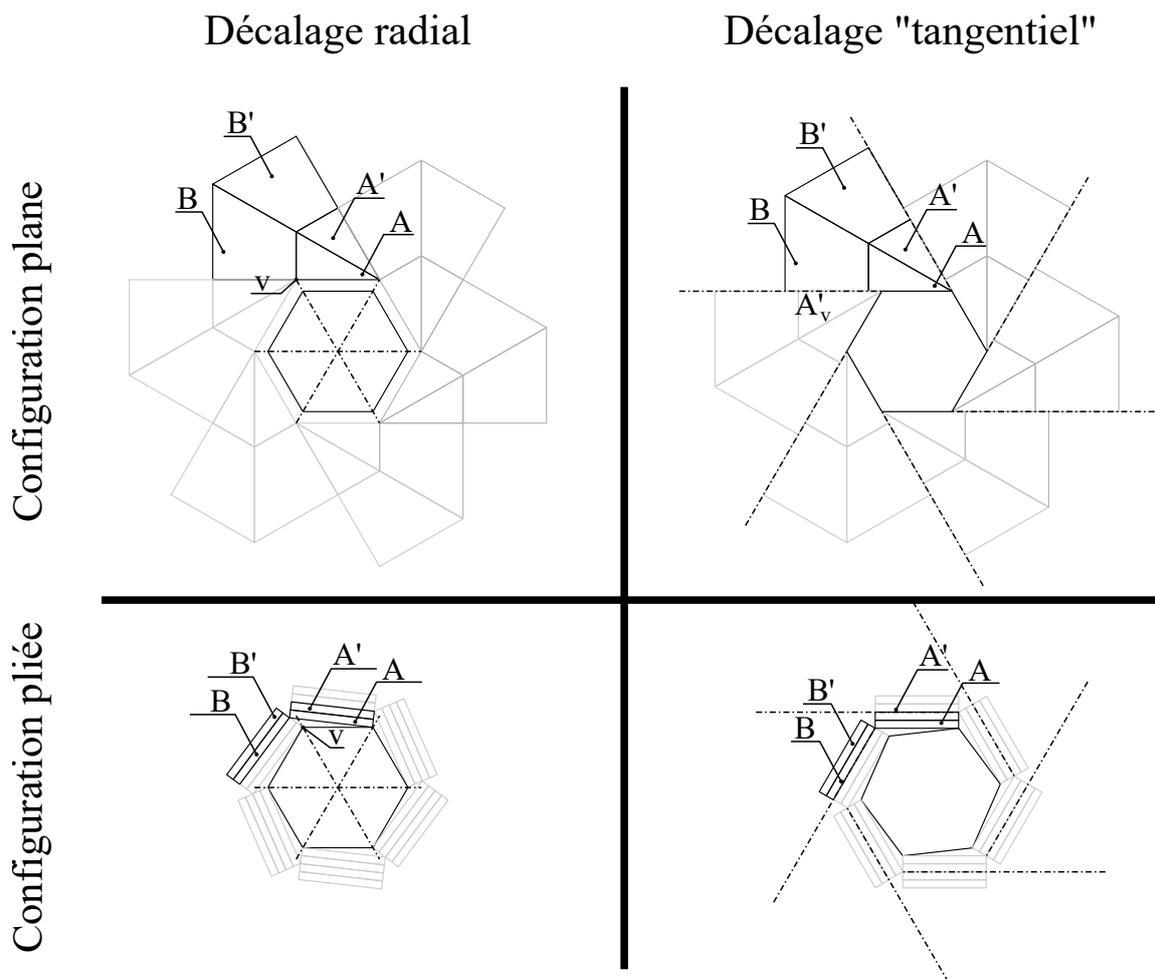


FIGURE 2.19 – Illustration des deux solutions proposées dans leurs deux configurations.

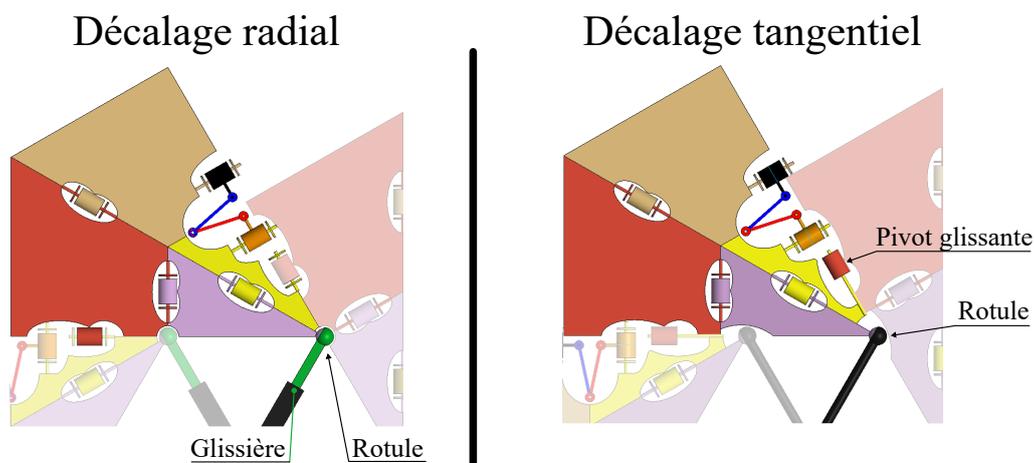


FIGURE 2.20 – Illustration des deux solutions proposées avec la modification de la cinématique.

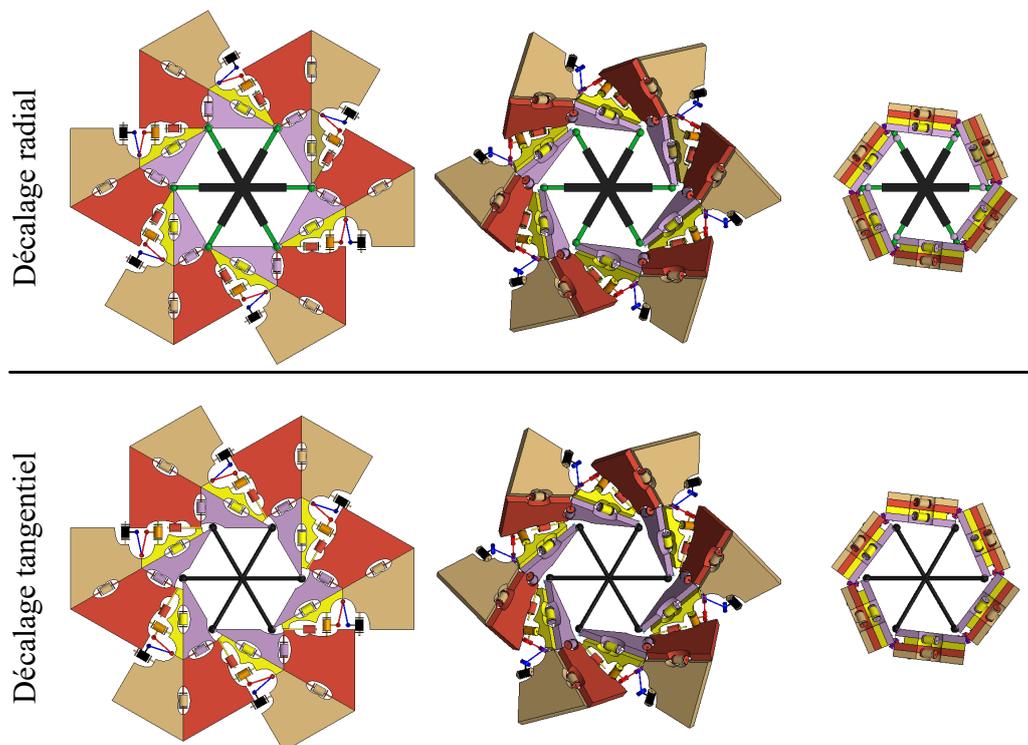


FIGURE 2.21 – Illustration des solutions de mécanismes rigides épais polyarticulés inspirées du Flasher.

Activité 2.3 : Conception détaillée du prototype

Les mécanismes présentés en figure 2.21 ont pour but de valider la cinématique du mécanisme polyarticulé prenant en compte l'épaisseur du matériau. Pour que le mécanisme puisse être implémenté, nous modifions les formes des panneaux d'une part pour intégrer les surfaces fonctionnelles réalisant les liaisons cinématiques, d'autre part pour éviter les interférences (Fig. 2.22). Pour cette partie, nous avons décidé arbitrairement d'implémenter la solution à décalage radial.

Dans un premier temps nous fixons les dimensions du prototype : la longueur $[oa]$ est prise égale à 50 mm et l'épaisseur des panneaux à 8 mm ce qui nous permet d'avoir un diamètre dans la configuration pliée d'environ 156 mm, et 266 mm dans la configuration plane. Avec ces dimensions pour le mécanisme, l'ensemble des liaisons 4 à 8 sont composées de pièces dont les dimensions sont de l'ordre du centimètre.

Nous choisissons de réaliser les liaisons pivots sous forme de charnières utilisant des axes en acier de 3 mm de diamètre. Les volumes fonctionnels nécessaires pour accueillir ces axes sont ajoutés sur le mécanisme (Fig. 2.22).

Le procédé de fabrication retenu est l'impression 3D par dépôt de filament (FDM) pour les pièces relativement volumineuses et l'impression 3D par jet de polymère (Stratasys Polyjet) plus adapté pour les pièces moins volumineuses. En effet, en considérant le placement des différentes liaisons à implémenter, la réalisation par usinage est écartée car elle nécessiterait plusieurs étapes de changement de blocages de la pièce suivies de prise de références pour effectuer un recalage. Étapes chronophage et qui augmentent le risque d'erreur de positionnement des différents axes des pivots. Lors de l'impression,

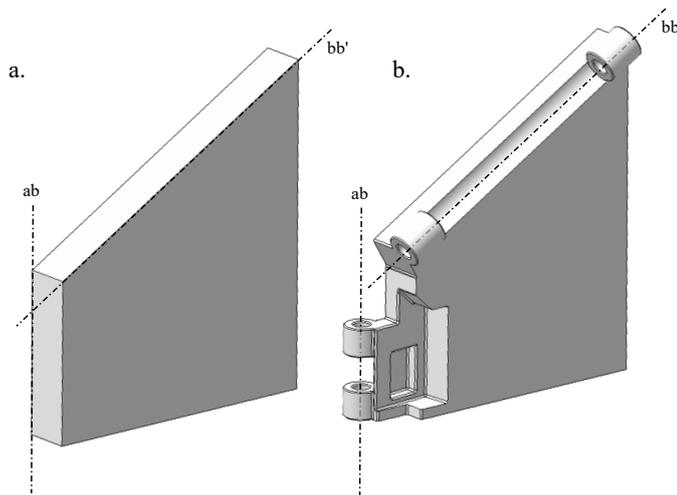


FIGURE 2.22 – Illustration sur la pièce B des volumes retirés entre la pièce initiale en a et la pièce modifiée en b pour gérer les interférences et des volumes ajoutés pour disposer des surfaces fonctionnelles.

une sur-épaisseur est ajoutée au niveau des charnières pour nous permettre d'ajuster les alésages après impression. Le jeu dans la charnière est ainsi mieux maîtrisé. Une partie des charnières est alésée pour obtenir un jeu de fonctionnement pour faciliter la rotation tandis que l'autre partie est percée à un diamètre inférieur pour permettre de maintenir l'axe serré.

Nous utilisons la simulation pour identifier les interférences qui pourraient apparaître lors du changement de configuration. Dans un premier temps, nous traitons les interférences par observation dans les configurations plane et pliée. Nous plaçons le mécanisme dans chacune des configurations et nous retirons la matière là où nous observons des interférences. Dans un second temps, nous utilisons l'outil de détection des interférences du logiciel de CAO. Le changement de configuration est découpé en séquences de manière arbitraire. Plus les séquences sont nombreuses, plus le temps de calcul est important, mais si le découpage est trop grossier, il y a un risque de rater des interférences. Pour chacune des séquences, le logiciel révèle les interférences ce qui nous permet de supprimer la matière (Fig. 2.22) dans les zones indiquées.

Quand la suppression concerne les volumes fonctionnels permettant par exemple de réaliser une liaison cinématique, nous ne supprimons pas simplement le volume. Ce volume est déplacé ou modifié afin de conserver son rôle fonctionnel.

Nous obtenons ainsi le prototype en figure 2.23. Il est constitué de 67 pièces, reliées par 54 liaisons pivots réalisées par des charnières qui utilisent 54 axes. Parmi ces pièces, nous avons aussi 6 liaisons rotules et 6 liaisons glissières. Nous pouvons clairement voir les panneaux comme étant des solides rigides et épais. Malgré tout, grâce au travail d'identification d'une cinématique modifiée, le changement de configuration est possible avec des volumes et des formes fonctionnels.

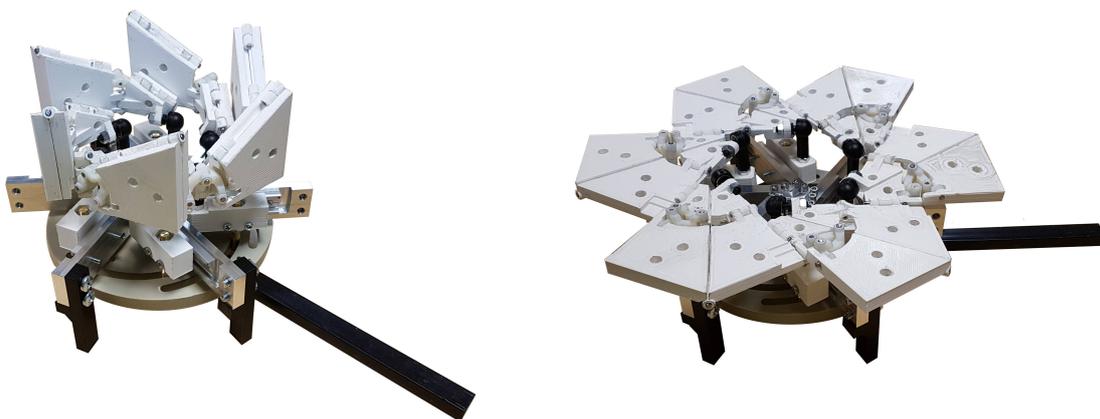


FIGURE 2.23 – Illustration du mécanisme inspiré du Flasher fabriqué.

2.4 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons atteint notre objectif de convertir un origami non rigidement pliable sélectionné pour sa grande déployabilité, le Flasher, en un mécanisme rigide polyarticulé capable de supporter des charges. Le mécanisme a été conçu en suivant une démarche en deux étapes permettant d’aller jusqu’à l’implémentation du mécanisme en Fig. 2.23.

Premièrement, nous avons modifié la cinématique du patron pour prendre en compte le caractère non rigidement pliable de l’origami Flasher et permettre son déploiement entre les différentes configurations. Nous avons découpé cette étape en deux sous étapes permettant de donner des pistes pour identifier le pli à remplacer puis une méthode pour remplacer le pli par une chaîne cinématique. Les modifications réalisées pendant cette première étape sont partiellement empiriques et non unique.

Dans la deuxième étape, nous avons ajouté de l’épaisseur pour basculer d’une cinématique inspirée d’origami vers un mécanisme capable de supporter des efforts. Lors de cette opération, nous nous sommes inspirés de solutions existantes dans la littérature. Nous avons adapté une des méthodes pour obtenir un mécanisme polyarticulé épais déployable capable de changer de configuration à la manière du Flasher. Ce mécanisme a été implémenté à une échelle d’une vingtaine de centimètres et le prototype qui en résulte est illustré en figure 2.23.

Au vu de ses dimensions, nous envisageons comme perspective d’utiliser des liaisons compliantes pour certaines liaisons d’amplitude angulaire dont le débattement requis est faible. L’intérêt d’un mécanisme hybride utilisant liaisons compliantes et liaisons conventionnelles pourrait être de limiter le nombre de pièces limitant ainsi la masse du mécanisme et éventuellement faciliter une réduction d’échelle. Nous y revenons dans les conclusions générales du manuscrit.

Chapitre 3

Conception d'un mécanisme basé sur la tour de Kresling

3.1 Introduction

La tour de Kresling (Fig. 3.1) est un origami nommé d'après B. Kresling, suite à ses travaux sur l'effet de flambage des tubes de papier [Kresling, 2008]. Dans la littérature, nous pouvons remarquer que des patrons similaires ont également été observés dans [Nojima et al., 2002], [Guest and Pellegrino, 1994] même s'ils sont alors désignés différemment.

Comme décrit au chapitre 1, la tour de Kresling présente un mouvement relatif de ses faces supérieure et inférieure qui correspond à un mouvement hélicoïdal à pas variable. Cette structure a de plus la particularité de pouvoir être bistable, ce qui rend son utilisation intéressante pour certaines applications robotiques comme dans [Bhovad and Li, 2018] (Fig. 1.16) où la bistabilité permet de maintenir la fonction d'ancrage d'un robot à locomotion péristaltique sans apport énergétique. Dans [Sargent et al., 2020], l'utilisation de la tour de Kresling permet au robot de guider l'insertion d'un bronchoscope, et de rester dans la dernière position atteinte par le praticien.

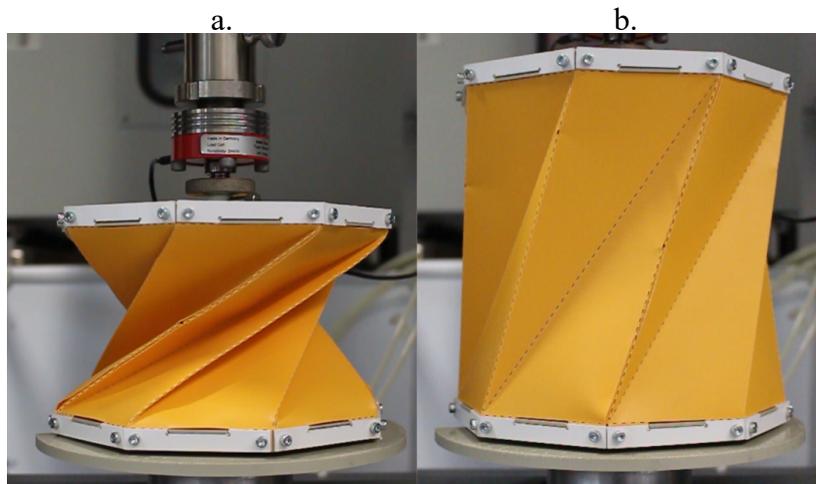


FIGURE 3.1 – Illustration d'une tour de Kresling bistable dans ses deux configurations stables, basse (resp. haute) à gauche (resp. droite).

Dans la littérature, des travaux pour la synthèse de mécanismes inspirés de cette tour ont été conduits, en considérant trois types de besoins : i) La synthèse du patron a été conduite en considérant la variation de géométrie d'une configuration par rapport à la seconde comme dans [Sargent et al., 2020]. La tour est alors choisie pour avoir un diamètre interne déterminé lors d'une phase spécifique de son déploiement. ii) Le patron est fixé pour répondre à un besoin cinématique. Dans [Angatkina et al., 2017] *réparer la citation*, le mouvement hélicoïdal de la tour de Kresling permet de réaliser un système vis-écrou selon des caractéristiques souhaitées et ainsi de transformer la rotation d'un servo-moteur en translation. iii) Enfin, la synthèse de la tour a été conduite pour moduler les besoins énergétiques de la tour et ainsi modifier sa bistabilité. Dans [Bhovad and Li, 2018], des patrons sont synthétisés pour réaliser des tours de raideurs différentes pour définir l'ordre de pliage des tours selon une séquence avec un seul actionneur.

En observant les démarches de synthèses proposées, nous avons pu constater qu'aucune ne permet de gérer les trois types de besoin à la fois. Il apparaît comme nous allons le détailler dans la suite que l'on ne peut choisir un patron satisfaisant simultanément à des besoins géométriques, cinématiques et cinétostatiques. Afin de faciliter son intégration dans le domaine de la robotique, nous visons à lever ces limites. Dans un premier temps nous cherchons à lier la géométrie du patron avec la cinématique et la géométrie de l'origami pour pouvoir en faire la synthèse. Dans un second temps, nous étudions un moyen de moduler les propriétés énergétiques tout en ayant fixé un patron pour réaliser une cinématique spécifique¹.

3.2 Choix du patron

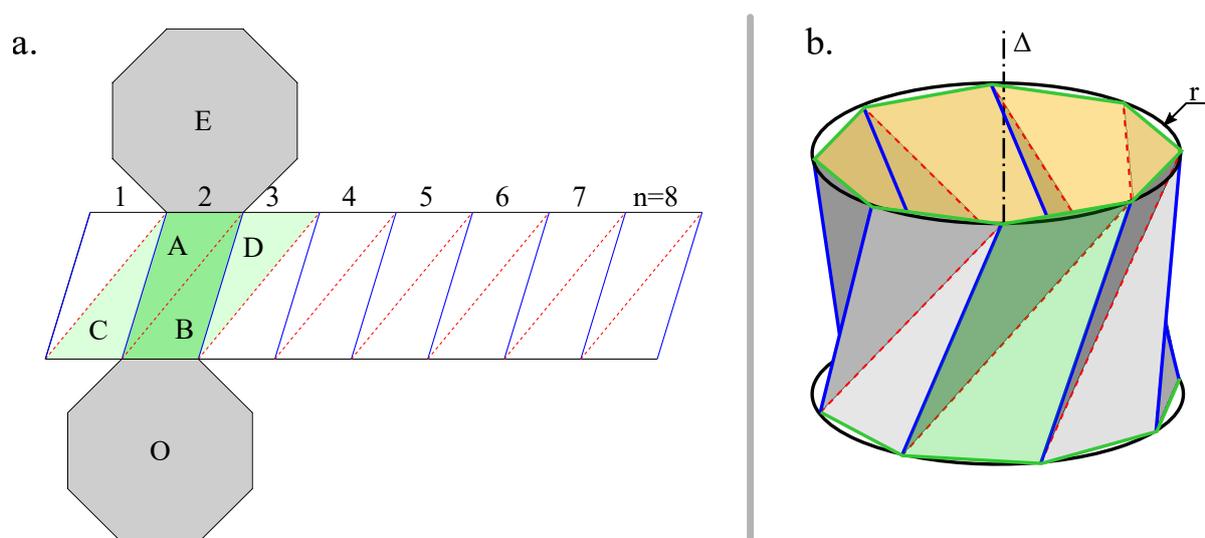


FIGURE 3.2 – Illustration du patron 2D de la tour de Kresling en a. Illustration de ce patron une fois conformé en b.

1. Le travail exposé dans ce chapitre correspond à une version étendue des publications IDETC (doi.org/10.1115/DETC2021-68904) et JMR (doi.org/10.1115/1.4053378)

Le patron de la tour de Kresling est représenté en figure 3.2. Il est composé d'un motif élémentaire représenté en vert foncé en b, et en a. Ce motif élémentaire est répété n fois autour de l'axe Δ pour donner la structure 3D. Cette structure origami doit être conformée pour prendre sa forme 3D qui est tubulaire comme le montre la figure 3.2b. Le pli montagne à gauche du motif élémentaire numéroté 1 et le pli montagne de droite du motif élémentaire numéroté 8 doivent être superposés lors d'une étape de montage ou de collage. Les éléments octogonaux correspondant à la base et à l'effecteur sur la figure 3.2 doivent être rigides pour que la structure se comporte correctement. Sur la figure 3.2, ils sont représentés comme des panneaux mais grisés ce qui nous permet de les désigner selon la convention des origamis. L'élément en O (resp. E) est nommé base (resp. effecteur) de la structure dans le reste du document.

Les paramètres géométriques qui permettent de concevoir le patron de cette structure origami sont :

- La longueur $[ab]$
- La longueur $[bd]$, aussi égale à la longueur $[ca]$
- Le rayon r du cercle circonscrit des polygones formant les plateaux.
- Le nombre de côtés n , qui correspond au nombre de fois que le motif élémentaire est répété.

La longueur $[ob]$, aussi égale à la longueur $[ha]$, ne fait pas partie des paramètres définissant le patron puisqu'elle est liée au nombre de côtés et au rayon par la relation

$$[ob] = 2 \cdot r \cdot \sin(\pi/n) \quad (3.1)$$

Nous définissons η , le jeu de paramètres minimal pour concevoir le patron de la tour tel que : $\eta = (r; n; [ab]; [bd])$.

Comme nous l'avons dit précédemment, cette structure origami a la particularité de pouvoir être bistable. À notre sens, disposer de la bistabilité est très intéressant sur un plan applicatif. Aussi dans la suite nous allons exclure le cas d'une tour monostable. Pour cet origami, la bistabilité peut être caractérisée par deux hauteurs illustrées sur la figure 3.1. Dans ces deux configurations, la structure se trouve dans un équilibre stable, et toute autre configuration ne pourra être maintenue sans apport d'énergie. Cette propriété de bistabilité existe car les panneaux subissent des déformations lors du changement de configuration (Fig. 3.3). Les deux configurations stables correspondent aux configurations où les panneaux ne subissent pas de déformations (Fig. 3.1a et b). Nous qualifions de configuration basse (Fig. 3.1a) respectivement haute (Fig. 3.1b) la configuration où la hauteur de la tour de Kresling est la plus petite (respectivement grande), correspondant à la hauteur h_1 (respectivement h_2).

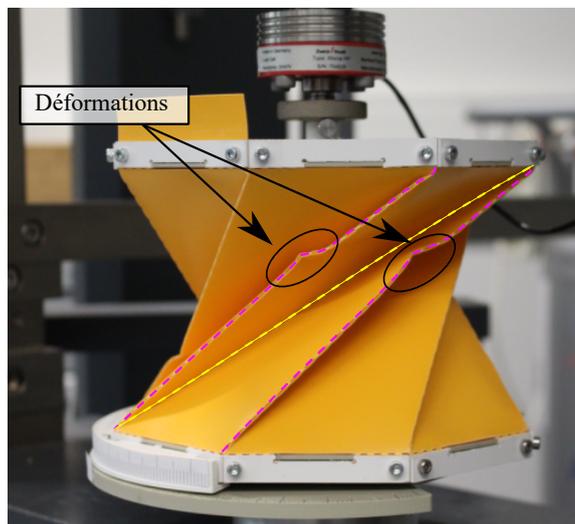


FIGURE 3.3 – Illustration des déformations apparaissant sur les plis montagne lorsque la tour est entre ses deux configurations stables.

3.3 Fabrication de structures basées origami

Avant de travailler sur la synthèse de la tour de Kresling, nous détaillons ici les méthodes de fabrication utilisées dans la littérature pour les structures origami. Nous sélectionnons ainsi les procédés de fabrication pour nos propres réalisations.

3.3.1 Choix de la feuille

Historiquement, les origamis sont fabriqués en papier, un matériau peu coûteux et universellement disponible. On trouve dans la littérature des structures origami utilisant du papier pour réaliser des mécanismes techniques. Cependant, ce matériau possède plusieurs limites. Premièrement, les propriétés de ce matériau ne sont pas formulées conformément aux besoins du domaine de la robotique. Par exemple, la caractéristique utilisée pour définir le papier est un grammage, qui correspond en réalité à une densité surfacique (g/cm^2). Dans certains cas, le type de fibre de cellulose utilisé est renseigné (fibre de bambou, fibre de chanvre, fibre de bois etc). Cependant, avec ces informations, nous ne sommes pas en mesure de connaître l'épaisseur de la feuille, ni si elle est isotrope. Par ailleurs, c'est un matériau qui ne résiste pas à l'humidité. Cette caractéristique limite les environnements dans lesquels une structure origami en papier peut évoluer. Par conséquent, nous cherchons dans la littérature des matériaux plus adaptés à la réalisation de systèmes techniques.

La feuille dans laquelle nous réalisons les plis peut être une feuille mono-matériau, ou un assemblage de différents matériaux formant un « sandwich » alors désigné comme une feuille multi-matériaux (Fig. 3.4). L'assemblage de différents matériaux permet d'associer un matériau souple pour réaliser la fonction du pli et un matériau rigide pour réaliser la fonction du panneau. Cela permet de pouvoir moduler la raideur du pli et du panneau de manière indépendante. Cela rend cependant la fabrication plus complexe. Une étape d'assemblage généralement par collage est ainsi nécessaire. Lors de cette étape, un effort

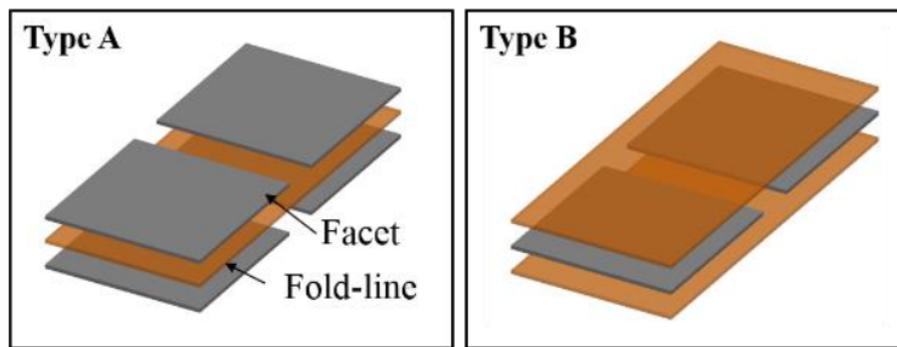


FIGURE 3.4 – Illustration de deux manières de réaliser un pli dans une feuille multi-matériaux dans [Baek et al., 2016]. En orange le matériau souple pour le pli, en gris le matériau rigide pour le panneau.

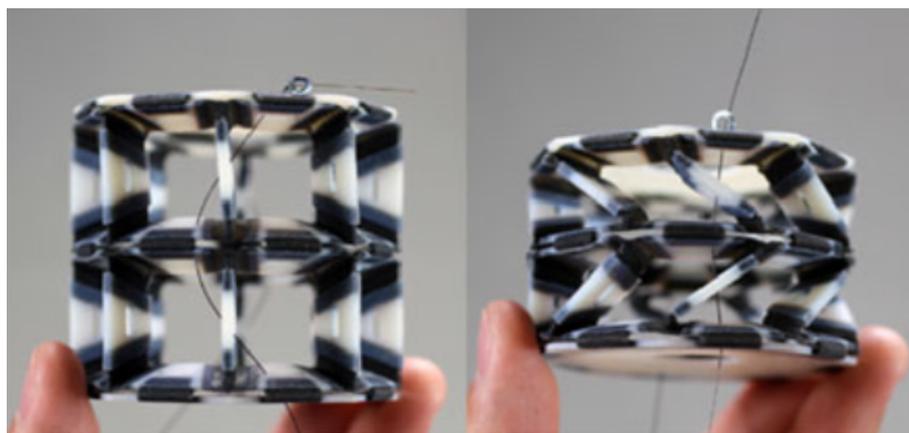


FIGURE 3.5 – Illustration d'un origami en impression 3D multi-matériaux dans [Liu et al., 2017]. En noir les éléments en matériaux souples et en blanc, les éléments en matériaux rigides.

doit être porté sur la mise en position des différentes feuilles. Une erreur lors de la mise en position peut entraîner une modification de la géométrie du patron, ce qui a des conséquences sur la forme, la cinématique et éventuellement la raideur de l'origami. Par ailleurs, la durabilité de ces structures est, dans certains cas, dégradée avec l'apparition de délamination entre les différentes feuilles comme mentionné dans [Baek et al., 2016]. Les différentes feuilles de matériau se séparent et l'intégrité de la structure est mise en défaut. Cela revient à ne plus avoir une ligne de pliage clairement définie mais une zone de pli comme c'est le cas avec l'utilisation de membranes, discuté dans le chapitre 2. Au vu de ces limites, nous choisissons de ne pas utiliser de feuilles multi-matériaux.

Il existe des cas d'utilisation d'impressions 3D multi-matériaux pour réaliser des origamis (Fig. 3.5). Dans [Liu et al., 2017], la structure inspirée origami est imprimée avec une technologie multi-matériaux. La structure est imprimée dans sa configuration pliée avec les panneaux réalisés dans un matériau rigide et les plis dans un matériau souple. De cette manière, le temps de pliage réalisé manuellement est remplacé par du temps d'impression. Cependant, la durabilité et la répétabilité en fonctionnement sont limitées puisque la raideur de la structure diminue sensiblement au cours des cycles de fonctionnement et l'endurance se situe autour de mille cycles.

Pour ces raisons, nous choisissons d'utiliser une feuille de polymère mono-matériau. Dans la littérature, plusieurs types de polymères ont en effet déjà été utilisés avec succès, notamment des feuilles de PET (polyéthylène téréphtalate) [Sargent et al., 2020], de PP (polypropylène) [Sareh et al., 2018, Gattas and You, 2013], de PEEK (polyétheréthercétone) [Onal et al., 2014], ou encore de PTFE (polyéthylèneterephtalate) [Onal et al., 2012]. Le comportement mécanique varie pour ces différents matériaux. De plus, le procédé de fabrication peut influencer sur le choix du matériau. Pour cette raison, nous nous intéressons d'abord au procédé de fabrication avant de choisir le polymère qui sera utilisé pour la conception.

3.3.2 Choix du procédé de fabrication

De manière traditionnelle, dans la réalisation d'origami artistique, les plis sont marqués par un pliage manuel du patron au fur et à mesure de la réalisation de la sculpture, comme illustré par la séquence de pliage Fig. 1.6 en 1. Pour passer dans le domaine de la conception mécanique, un certain degré de précision lors de la réalisation et du positionnement des plis est nécessaire, surtout que l'erreur de positionnement d'un pli peut se répercuter lors du pliage des plis suivants.

Pour concevoir des structures origami en robotique, on trouve dans la littérature toutes sortes de procédés de fabrication qui permettent de réaliser les plis de manière plus ou moins automatisée. On trouve des exemples de pliage de structures automatisées à l'aide de robots [Balkcom and Mason, 2008, Tanaka et al., 2007](Fig. 3.6a), par emboutissage [Zhao et al., 2015](Fig. 3.6b. et c), moulé par soufflage [Zhao et al., 2015](Fig. 3.6e), ou encore moulé par aspiration [Zhao et al., 2015](Fig. 3.6d). Ces méthodes s'adressent plutôt à la production de structures origami en série. En effet, la mise en place de ces procédés nécessite du temps et des moyens, rentabilisé par le gain de temps de fabrication des futures structures origami. Dans le cadre cette thèse, nous réalisons des structures unitaires, aussi, une approche automatisée ne se justifie pas d'un point de vue du gain de temps.

Un procédé de fabrication largement répandu est la réalisation des lignes de pliage par enlèvement de matière dans la feuille. La ligne de pliage est ensuite pliée manuellement pour obtenir le pli. L'opération d'enlèvement de matière se fait avec une machine de production permettant de placer les plis avec une meilleure précision que manuellement. Parmi les machines qui permettent de réaliser des origamis selon cette méthode, la découpe laser, la plus fréquemment utilisée dans la littérature, permet de découper sans contact. Certains matériaux ne peuvent cependant pas être découpés par risque d'incendie ou d'émanation toxique lors de la découpe. L'enlèvement de matière par usinage est possible mais complexe pour les faibles épaisseurs. Par ailleurs, l'amélioration de la précision ne justifie pas son utilisation par rapport à la découpe laser. Des machines de découpe 2D à lames sont aussi utilisées comme dans [Terada et al., 2017]. Les épaisseurs pouvant être découpées avec ce type de machines sont plus faibles qu'avec le laser. Au final, nous sélec-

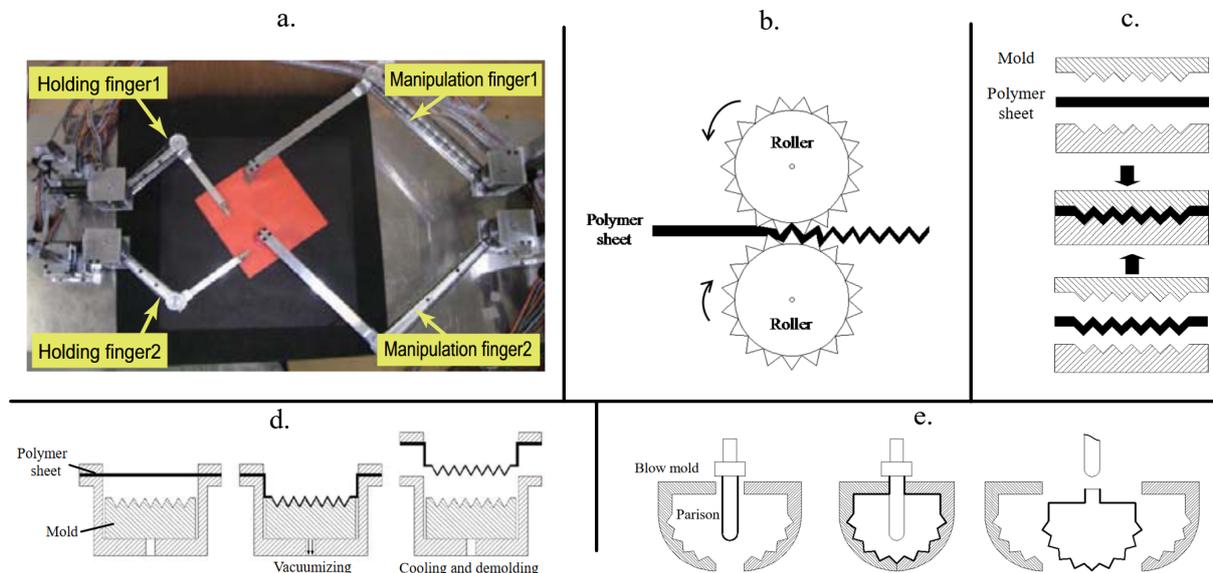


FIGURE 3.6 – Illustration de différents procédés de fabrications automatisés. Utilisation d'un robot conçu pour plier des origamis dans [Tanaka et al., 2007] en a. Procédé étudié dans [Zhao et al., 2015] de b. à e. avec respectivement deux solutions par emboutissage, une solution par aspiration et une solution par soufflage.

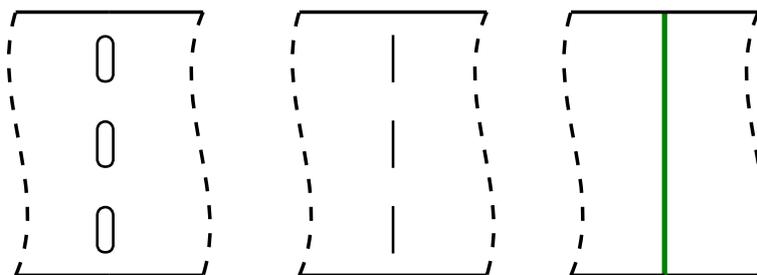


FIGURE 3.7 – Illustration des trois géométries de réalisation du pli possible.

tionnons le procédé de découpe laser qui permet de découper rapidement et simplement différents matériaux. Ayant accès à une machine de découpe laser au CO_2 (Speedy 300 Trotec), nous choisissons finalement un matériau adapté au mode de réalisation du pli. Notre choix de polymère se porte sur du PP de 0,5mm d'épaisseur, qui peut être découpé avec la technologie laser sans risque et sans dégradation de ses propriétés mécaniques.

3.3.3 Choix de la géométrie de l'enlèvement de matière

Nous avons identifié différentes géométries de pli par enlèvement de matière dans la littérature. Le choix de la géométrie de découpe n'est cependant pas discuté. Ici, nous proposons donc une étude expérimentale pour choisir cette géométrie. Sur la base des approches vues dans la littérature, nous avons sélectionné 3 géométries différentes visibles en figure 3.7 : une découpe intermittente avec un profil oblong, une découpe intermittente de largeur minimale atteignable avec le laser, et une gravure continue. La largeur de coupe minimale est d'environ 0,3 mm compte tenu des caractéristiques de la focale du laser employé. Des observations microscopiques (Fig. 3.8) sont utilisées pour comparer les approches. Le procédé de gravure conduit à une anisotropie du pli. Pour que les

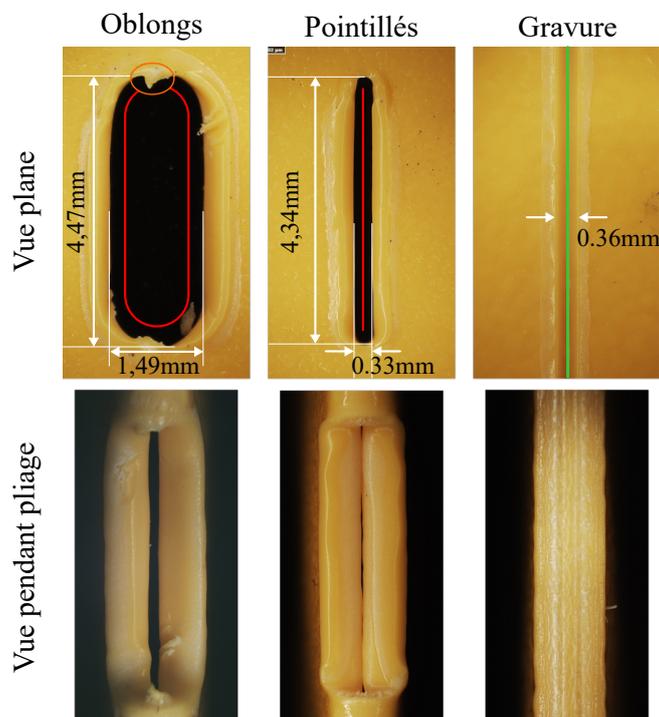


FIGURE 3.8 – Observation microscopique des profils de réalisation du pli dans une vue plane et pendant un pliage.

plis montagne et vallée se comportent de la même manière, les gravures doivent être réalisées des deux côtés de la feuille en fonction du type de pli. Cela augmente le temps de fabrication et le risque d'erreurs de positionnement des sommets et des plis.

Le profil oblong permet de prendre en compte l'épaisseur du matériau grâce à la largeur de l'oblong. Sur la figure 3.8, nous observons que dans la vue pendant pliage, il y a moins de contact entre les panneaux adjacents au pli. Cependant, ce profil de découpe nécessite une séparation manuelle des chutes. En effet, sur les petites chutes, il arrive que le matériau fusionne après la découpe. Sur la vue plane (Fig. 3.8), nous voyons entouré en orange une marque laissée par la fusion de la partie interne au oblong après découpe.

Cette étape fastidieuse est évitée en choisissant la découpe intermittente, nommée par la suite « ligne pointillée ». Par ailleurs, les observations expérimentales faites sur la géométrie des lignes de pliage montrent une endurance comparable entre les différents profils de découpe. Le profil de ligne en pointillée est donc retenu, avec un ratio de 1 : 1 entre les traits et les trous, comme le montre le motif de découpe de la figure 3.7.

3.3.4 Choix du protocole de collage

La tour de Kresling nécessite une opération de conformage pour obtenir la forme tubulaire en 3D. Une solution récurrente dans la littérature pour fermer un origami est le collage. Le procédé de collage dépend du matériau utilisé. Une étude expérimentale pour sélectionner la procédure de collage du PP a été réalisée². Cette étude prend en compte le traitement du matériau avant collage et le type de colle utilisée.

2. Cette étude a été réalisée par un stagiaire ingénieur co-encadré, Damien Cartier Millon

Cinq modes de traitements pour la préparation de la surface avant collage ont été comparés en considérant qu'ils peuvent être combinés :

- Pas de traitement
- Traitement par ponçage : du papier de verre est utilisé sur les surfaces en contact lors du collage pour homogénéiser l'état de surface.
- Traitement plasma : un système de traitement plasma manuel (MTP2 de STTS) souffle un gaz chargé en ions pour oxyder la surface du matériau. L'oxydation augmente l'adhérence de la colle avec la surface.
- Traitement chimique : un primaire (PPXP) permet de traiter chimiquement la surface de plastiques dont le PP afin de permettre le collage avec de la colle cyanoacrylate qui n'adhère pas au PP sans ce traitement.
- Nettoyage : la surface est rincée à l'eau pour retirer la poussière puis séchée et enfin dégraissée avec de l'isopropanol.

Trois types de colles ont été confrontées :

- Cyanoacrylate
- Néoprene
- MS Crystal : colle à base de polymères polyoxypropylènes polymérisant avec l'humidité de l'air de la marque Adheko.

Pour tester le collage, nous avons utilisé des éprouvettes dont la géométrie correspondait à la surface des languettes utilisées pour le patron défini en figure 3.18. Les éprouvettes ont été testées en tension et en cisaillement. Le collage des panneaux doit limiter l'ajout de rigidité au niveau des panneaux. L'ajout de rigidité locale sur la structure introduit de l'anisotropie. La rigidité en flexion a donc été évaluée pour quantifier l'altération de rigidité du panneau lié au collage.

Finalement, le procédé le plus approprié est défini par la séquence suivante : i) préparer la surface par ponçage pour uniformiser la surface après la découpe, ii) nettoyer la zone de collage pour retirer la poussière et la graisse, iii) traiter la surface avec le pistolet plasma pour favoriser l'accroche de la colle, iv) coller les deux surfaces en utilisant de la colle néoprène.

3.3.5 Synthèse

Dans cette section, nous avons défini le processus de fabrication pour concevoir une tour de Kresling. Nous avons sélectionné le matériau et la nature de la feuille que nous souhaitons utiliser, en accord avec le procédé de réalisation des plis. Ensuite, nous avons étudié la meilleure géométrie de pli à utiliser en prenant en compte le procédé de découpe et le matériau à découper. Enfin, nous avons défini un protocole pour fermer la tour de Kresling en considérant le matériau utilisé.

Ce processus nous permet de garantir un niveau de maîtrise et de répétabilité lors de la fabrication de nos différents tours de Kresling compatible avec la précision attendue des utilisations faites dans la suite.

3.4 Modélisation de la tour de Kresling

3.4.1 Élaboration d'un modèle analytique

Objectif

Dans cette partie, nous proposons un modèle analytique permettant de lier la géométrie du patron avec la cinématique et la géométrie de la structure. Ce modèle permet de faire la synthèse de la tour, nécessaire pour concevoir une structure qui répond à des besoins sur la cinématique ou sur la géométrie.

Dans [Lang, 2018], des équations analytiques basées sur la géométrie de la structure origami sont utilisées pour déterminer les dimensions du motif élémentaire en fonction de la hauteur de la structure. Ces relations sont utiles pour définir la géométrie de la tour mais elles ne sont valides que pour les configurations stables sans déformation.

Par ailleurs, dans [Sargent et al., 2020], la valeur du rayon intérieur de la structure, doit être évaluée pour ne pas subir de collisions avec d'autres composants. Cette grandeur est nommée r_i dans la suite du chapitre et illustrée dans la figure 3.9). L'angle de rotation ϕ entre la base et l'effecteur de la tour est également une information clé dans [Bhovad and Li, 2018]. Ces caractéristiques font partie des caractéristiques géométriques qu'il nous semble nécessaire de synthétiser à l'aide d'un modèle pour prédire le comportement de la tour. De la même manière, nous souhaitons pouvoir caractériser la valeur de l'angle ρ entre les panneaux et la base au cours du mouvement de la tour. Dans la suite, nous utiliserons l'indice 1 (resp. 2) pour définir les caractéristiques précédemment mentionnées dans les configurations stables basses (resp. hautes).

À notre connaissance, il n'existe aucun modèle donnant des expressions analytiques de ces propriétés pour des configurations en dehors des états stables. Dans [Angatkina et al., 2017, Sargent et al., 2020, Pagano et al., 2016], ces caractéristiques sont en effet calculées uniquement dans les configurations stables. Notre approche consiste donc à enrichir un tel modèle pour accéder à ces caractéristiques, avec des relations explicites entre leurs valeurs et les paramètres qui définissent le patron d'origami. Ces relations nous permettent de faire la synthèse de la tour de Kresling. En résumé, nous souhaitons extraire les expressions de $(\phi; r_i; \rho)$ pour toutes les tours conçues avec le jeu de paramètre η en fonction de la hauteur h utilisée pour décrire le mouvement.

Définition du modèle implémenté

Le modèle recherché doit lier la variation de hauteur h avec la variation angulaire de l'effecteur. Cela nous permet de décrire pendant le changement de configuration l'évolution du sommet u appartenant à l'effecteur qui est mobile par rapport à la base. Nous connaissons la position des sommets s et t puisqu'ils appartiennent à la partie fixe. Si nous connaissons la position du sommet u , nous pouvons alors reconstruire le panneau B constitué par les sommets s , t et u lors du changement de configuration comme le montre la figure 3.10. Puisque la tour est composée d'une répétition autour de l'axe Δ du mo-

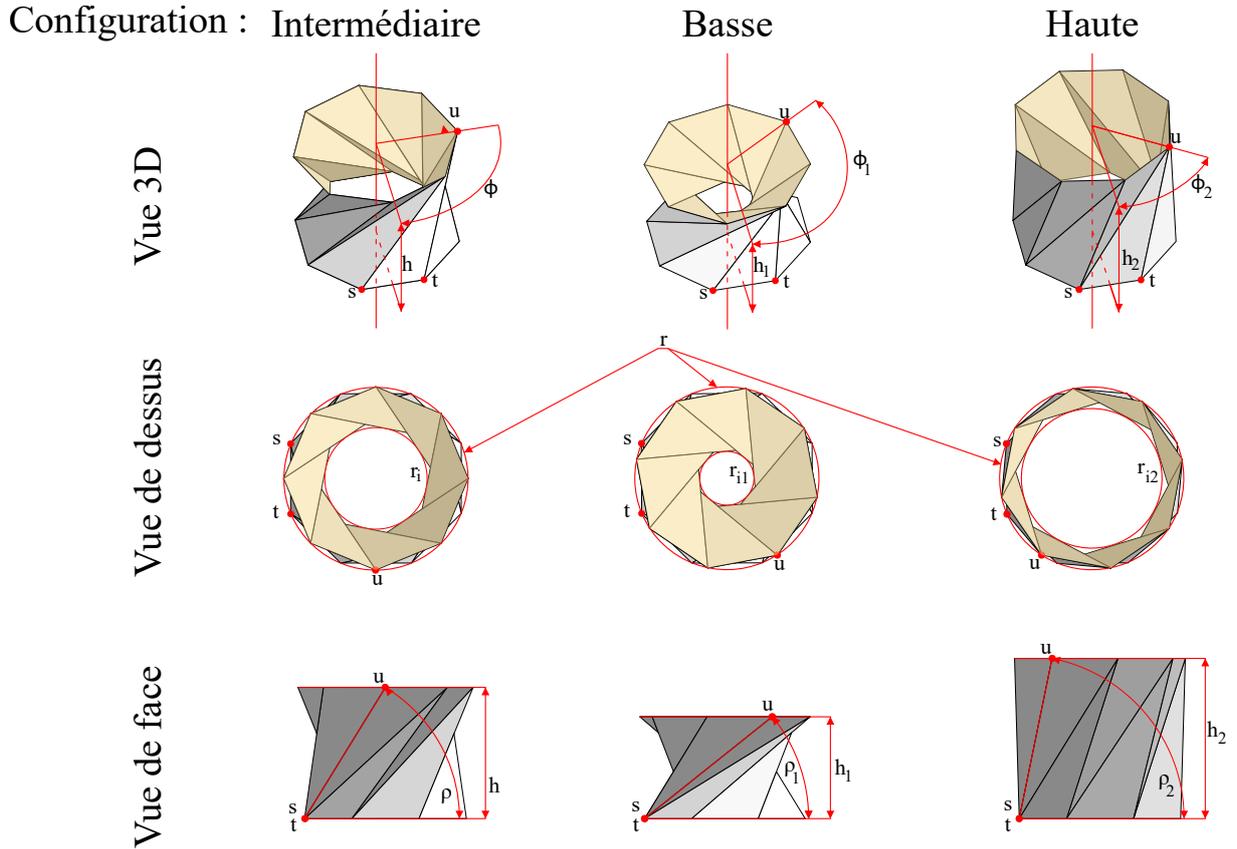


FIGURE 3.9 – Représentation des caractéristiques d'intérêt de la tour de Kresling.

tif élémentaire lui-même composé du panneau B et de son symétrique A , nous pouvons déduire le mouvement complet de la tour en modélisant uniquement le panneau B .

Pour modéliser ce comportement, nous considérons un mécanisme rigide polyarticulé. Nous remplaçons comme dans [Liu and Paulino, 2017] les lignes de pliage par des barres rigides connectées par des liaisons rotules aux sommets connectant les triangles aux plateaux (base et effecteur). Pour éviter d'avoir à traiter des configurations symétriques, nous imposons $h > 0$ et $\phi > 0$. Avec ces conditions, il existe deux configurations dans lesquelles le mécanisme à barres peut s'assembler. Ces configurations correspondent aux deux configurations où les panneaux de la structure origami ne subissent pas de déformation.

L'angle ϕ est défini (Fig. 3.10) comme l'angle entre le plan xz et la droite passant par le sommet u et perpendiculaire à l'axe Δ . Les barres ab en jaune et bd en rose ont des longueurs différentes égales respectivement à $[ab]$ et $[bd]$. Elles sont considérées comme rigides et tournent respectivement autour des sommets s et t , comme indiqué en figure 3.10. Nous contraignons le sommet u à rester coïncident avec le cylindre de rayon r , pour obtenir la trajectoire théorique que doit suivre l'effecteur en utilisant seulement le panneau B . Or, avec les barres rigides considérées dans notre modèle, le sommet u ne peut pas rester connecté aux deux barres pendant le changement de configuration. Nous avons donc défini deux sommets u_{ab} et u_{bd} appartenant respectivement aux barres ab et bd .

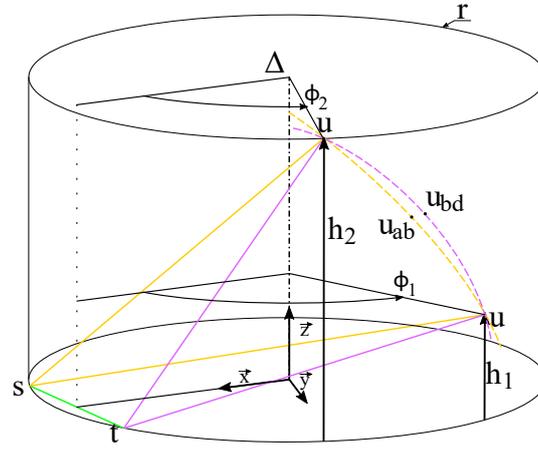


FIGURE 3.10 – Représentation du triangle élémentaire B dans une vue 3D avec la trajectoire suivie par les sommets respectivement u_{ab} et u_{bd} des barres ab et bd respectivement représentées en jaune et en rose.

La condition de coïncidence des sommets avec le cylindre de rayon r revient à se placer dans un système de coordonnées cylindriques de rayon fixe égal à r . L'équation 3.2 permet de lier la valeur de l'angle ϕ pour les points u_{ab} et u_{bd} respectivement notés ϕ_{ab} et ϕ_{bd} par rapport à la hauteur h .

$$\begin{aligned}\phi_{ab}(h) &= 2 \cdot \text{asin} \left(\frac{\sqrt{[ab]^2 - h^2}}{2r} \right) - \frac{\pi}{n} \\ \phi_{bd}(h) &= 2 \cdot \text{asin} \left(\frac{\sqrt{[bd]^2 - h^2}}{2r} \right) + \frac{\pi}{n}\end{aligned}\quad (3.2)$$

Nous avons donc en Eq. 3.2 deux expressions de ϕ pour une seule valeur de hauteur h . Chacune respecte l'hypothèse que les lignes de pliage sont des barres rigides. Dans le cas de la structure origami avec une feuille, il y a forcément une déformation du panneau entraînant un changement de la longueur d'au moins un des plis. Nous devons faire un choix sur la longueur à considérer pour exprimer correctement la relation entre ϕ et h . Dans [Bhovad and Li, 2018] et [Pagano et al., 2016], les auteurs ont rencontré le même problème, et ont considéré la barre ab rigide. Ce choix est arbitraire dans ces articles. Pour que notre modèle soit au plus près du comportement de l'origami, nous avons étudié expérimentalement le comportement de la structure lors de son changement de configuration. Lors de ces manipulations expérimentales, nous avons observé des déformations locales sur les lignes de pliages bd comme le montre la figure 3.3 alors que les lignes ab semblent garder une forme rectiligne. Au vu de ces observations, nous considérons que c'est la barre ab qui doit être choisie pour décrire le mouvement de la structure tour de Kresling entre les configurations stables puisque c'est ce pli qui ne semble pas subir de déformation sur l'origami.

Nous pouvons obtenir le même résultat en raisonnant sur le type de contrainte que subit l'origami si la longueur du pli ab respectivement bd subit une déformation. Lorsque l'origami est entre les deux configurations $h \in]h_1, h_2[$, comme le montre la figure 3.10, la distance entre les points t et u_{ab} est plus courte que la distance entre t et u_{bd} . Cela signifie, dans le cas de l'origami où les sommets sont connectés, que la distance entre

les sommets s et u doit augmenter et/ou que la distance entre les sommets t et u doit diminuer. Sur un panneau en matériau fin, appliquer un effort qui tend à éloigner des sommets revient à appliquer une contrainte de traction sur la feuille. Or les matériaux fins, que ce soit en papier ou en PP, sont plutôt raides en traction. Cet effort tend plutôt à provoquer une déchirure de la feuille qu'une élongation. À l'inverse, appliquer un effort qui tendrait à rapprocher des sommets d'une feuille tendrait à la faire flamber. Or dans une certaine mesure, une feuille peut subir un flambement tout en conservant son intégrité. Nous concluons que la relation $\phi_{ab}(h)$ permet de décrire la cinématique de l'effecteur de la tour de Kresling dans l'intervalle $h \in [h_1, h_2]$. Par ailleurs, pour $h < h_1$ et $h > h_2$, c'est la distance entre t et u_{bd} qui est plus courte avec le même raisonnement, nous concluons que c'est la relation $\phi_{bd}(h)$ qui permet de décrire la cinématique de la tour dans cet intervalle.

Nous considérons de nouveau notre modèle à barres rigides dont les longueurs sont constantes, et nous définissons la relation $\phi(h)$ par intervalle en fonction des hypothèses énoncées ci-dessus. Ce qui nous donne la relation de $\phi(h)$ ci-dessous :

$$\phi(h) = \begin{cases} \phi_{bd}(h) & \text{si } h \in]h_{min}; h_1[\cup]h_2; h_{max}[\\ \phi_{ab}(h) & \text{si } h \in [h_1; h_2], \end{cases} \quad (3.3)$$

Avec les bornes h_{min} et h_{max} définies ci-dessous

Relations pour la synthèse du patron

Avec le jeu de paramètres $\eta = (ab, bd, b, r)$ définissant la géométrie du patron, nous pouvons en déduire les hauteurs (h_1, h_2) des configurations stables. Ces configurations sont obtenues quand $u_{ab} = u_{bd}$. En utilisant le système d'équations 3.2, nous pouvons exprimer la résolution des deux fonctions sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} G(h, \eta) &= \phi_{ab}(h) - \phi_{bd}(h) \\ &= 2 \left(\text{asin} \left(\frac{\sqrt{ab^2 - h^2}}{2r} \right) - \text{asin} \left(\frac{\sqrt{bd^2 - h^2}}{2r} \right) - \frac{\pi}{n} \right) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Hauteur des configurations stables

Nous pouvons concevoir une tour en imposant les valeurs des hauteurs h_1 et h_2 avec :

$$\begin{cases} G(h_1, \eta) = 0 \\ G(h_2, \eta) = 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

Ces relations ne sont pas valides pour tout h réel. Nous définissons ci-dessous l'intervalle de définition dans lequel le système d'équations 3.5 est valide. La hauteur minimale atteignable en configuration basse dépend de la longueur de la barre bd . Elle peut atteindre $h = 0$ au minimum si la longueur $[bd]$ le permet. Dans cette position, la configuration stable basse est complètement pliée, et la structure n'a théoriquement pas d'épaisseur. La hauteur maximale est atteinte quand la plus petite barre bd est en position verticale. Cette hauteur est égale à la longueur $[bd]$ elle-même dépendante de la hauteur minimale.

Nous notons que bien que toutes les hauteurs soient théoriquement atteignables, tous les couples de hauteurs ne le sont pas. Le choix d'une hauteur que ce soit dans la configuration haute ou basse entraînera des limites dans le choix de la seconde configuration. Nous donnons ci-dessous une explication géométrique de ces limites ainsi que les relations qui en découlent. Ces relations sont décomposées en deux cas :

- La hauteur h_2 de la configuration haute est fixée et nous en déduisons la hauteur h_{1m} minimale atteignable.
- La hauteur h_1 de la configuration basse est fixée et nous en déduisons la hauteur h_{2M} maximale atteignable.

Pour construire la tour, nous utilisons des projections du panneau B selon les axes \vec{x} , \vec{y} et \vec{z} . Dans la vue projetée selon \vec{z} de la figure 3.11, nous avons un arc de cercle bleu (resp. orange) qui correspond à la position possible du sommet u dans la configuration basse (resp. haute). Le sommet u ne peut appartenir au reste de l'arc de cercle délimité par la partie grisée car cela entraîne des interférences entre les panneaux comme le montre la figure 3.12. En effet, si la ligne ab dépasse le centre du cercle comme en pointillé sur la figure 3.11, elle traversera les autres panneaux. Cette condition peut aussi être exprimée en imposant que l'angle \widehat{stu} du panneau soit supérieur à 90° . À titre d'exemple, sur la figure 3.12 cet angle vaut 85° .

Cas où la hauteur h_1 est fixée

Nous sommes en mesure de construire la tour dans sa configuration basse en utilisant les projections correspondantes de la figure 3.11. Nous cherchons la hauteur maximale du triangle stu de sommet u qui respecte les contraintes de notre modèle : la distance entre u et Δ égale à r et les longueurs $[ab]$ et $[bd]$ sont fixes. En maximisant la hauteur de ce triangle, nous maximisons la hauteur de la configuration haute.

Dans la vue projetée selon \vec{y} , de la figure 3.11 la longueur des barres ab et bd correspondent directement à la hauteur du triangle. Nous observons également que pour augmenter la longueur projetée dans cette vue, il faut placer le sommet u à la distance $r \cdot \cos(\frac{\pi}{n})$ du centre dans le sens opposé à \vec{x} . Le triangle stu forme alors un triangle rectangle en t . Sa hauteur correspond à la longueur $[bd]$, exprimée :

$$[bd]^2 = [ab]^2 - [ob]^2 \quad (3.6)$$

La longueur de la barre ab est définie par la hauteur h_1 avec la relation :

$$[ab]^2 = h_1^2 + (2r)^2$$

D'où

$$\begin{aligned} h_{max} &= [bd] \\ &= \sqrt{[ab]^2 - [ob]^2} \\ &= \sqrt{h_1^2 + (2r)^2 - [ob]^2} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Cette équation est toujours définie car la relation 3.1 implique que $ob < 2r$.

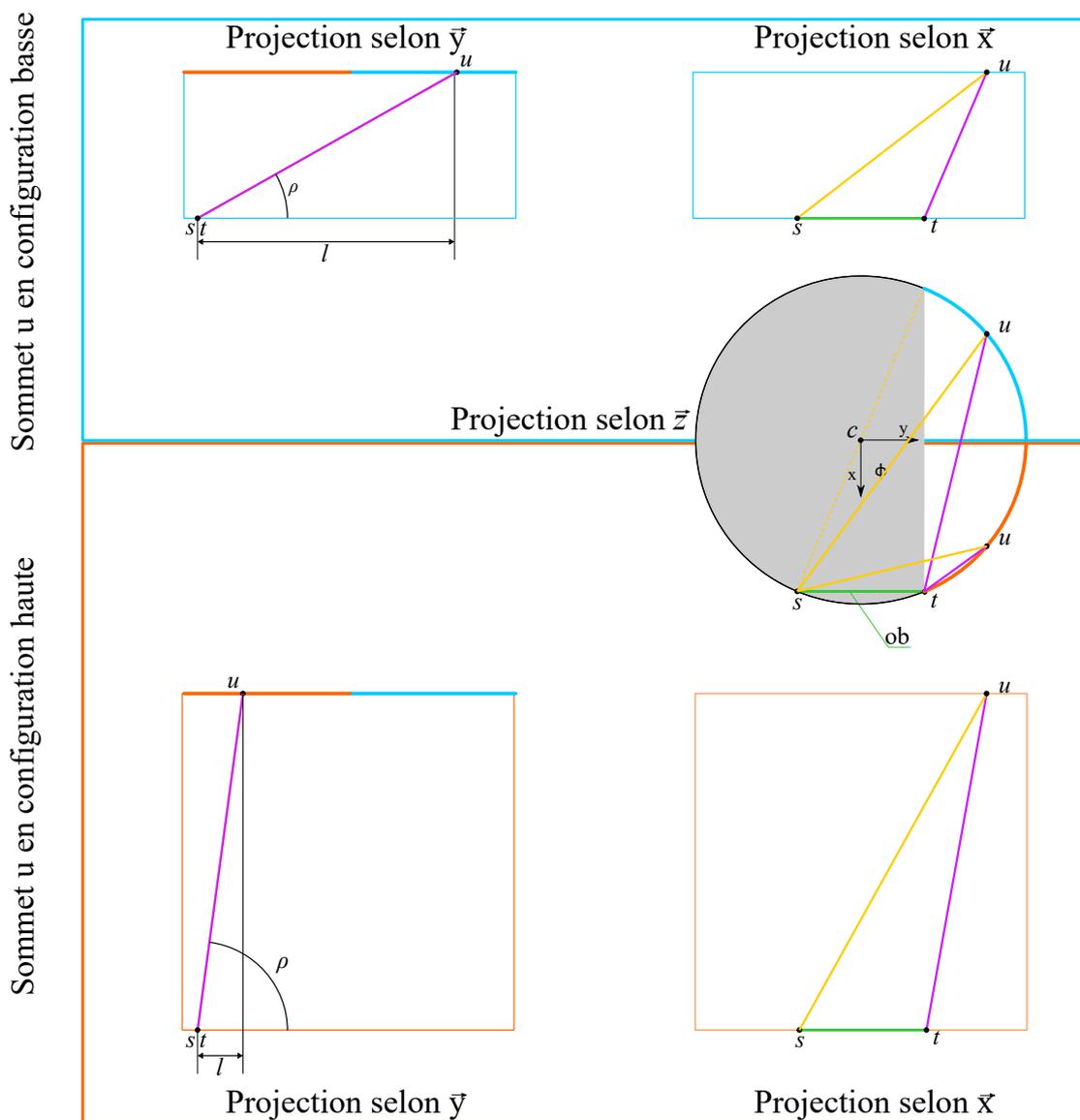


FIGURE 3.11 – Vue projetée selon les normales aux vecteurs x , y et z de la position possible du sommet u en fonction de la configuration de la tour.

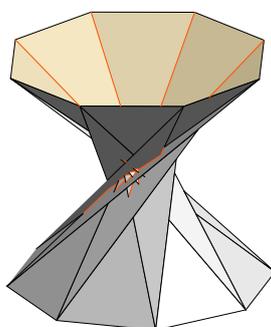


FIGURE 3.12 – Illustration des intersections en orange dans le cas où l'angle \widehat{stu} du motif élémentaire est construit avec un angle inférieur à 90° (85° ici).

Cas où la hauteur h_2 est fixée

Nous avons été capables de définir la hauteur maximale atteignable pour la tour une fois la hauteur en configuration basse fixée en utilisant les projections correspondantes de la figure 3.11. De manière antagoniste, nous cherchons la hauteur minimale du triangle stu de sommet u qui respecte les contraintes de notre modèle. En minimisant la hauteur de ce triangle, nous minimisons la hauteur de la configuration basse.

Dans la vue projetée selon \vec{y} , nous observons que pour diminuer la longueur projetée des barres dans cette vue, il faut placer le sommet u à la verticale de la base du triangle, soit à la distance $r \cdot \cos(\frac{\pi}{n})$ dans le sens de \vec{x} . Le triangle stu forme alors un triangle rectangle en t . Sa hauteur correspond à la longueur $[bd]$, exprimée en Eqn. 3.6, égale à h_2 . D'où

$$\begin{aligned} [ab]^2 &= [bd]^2 + [ob]^2 \\ &= h_2^2 + [ob]^2 \end{aligned} \quad (3.8)$$

De plus, dans le cas où le triangle est rectangle en t , la barre ab passe par le centre c du triangle, et sa longueur projetée selon \vec{z} vaut $2r$. Finalement,

$$\begin{aligned} h_{min} &= \sqrt{[ab]^2 - (2r)^2} \\ &= \sqrt{h_2^2 + [ob]^2 - (2r)^2} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Dans le cas où $[ab] < 2r$ alors $h_{min} = 0$.

Ces deux cas montrent que la tour possédant le plus d'amplitude entre ses configurations stables, lorsque la hauteur d'une configuration est fixée, est la tour où le triangle stu est rectangle en t .

Nous avons donné ici les limites de définition de la conception d'une tour de Kresling pour lesquelles les hauteurs des configurations stables sont fixées comme élément de conception. Cela permet de définir les limites de conception de la tour en utilisant les hauteurs stables comme paramètres de conception.

Rayon interne

Le rayon interne r_i est calculé en utilisant la vue projetée le long de l'axe \vec{z} comme le montre la figure 3.11.

Dans la vue projetée en figure 3.11, le triangle scu est isocèle en c et sa hauteur donne le rayon r_i . L'angle \widehat{scu} est égal à $\phi + \frac{\pi}{n}$ avec $\frac{\pi}{n}$ l'angle entre \vec{x} et \vec{cs} . À partir d'une analyse trigonométrique, nous obtenons finalement :

$$r_i(h) = \sqrt{r^2 - 4 \cdot r^2 \sin\left(\frac{\phi(h) + \frac{\pi}{n}}{2}\right)} \quad (3.10)$$

Avec $\phi(h)$ dépendant de η .

La relation 3.10 nous permet d'exprimer le rayon interne pour toutes les tours conçues à partir de η et même en dehors des configurations stables.

Angle des panneaux

La valeur de l'angle ρ entre les panneaux et la base nous intéresse pour la conception de structures origami pour la robotique. L'application envisagée utilisant cette grandeur est décrite en 5.3. Cet angle est illustré en figure 3.11 dans les vues projetées selon \vec{y} .

$$\rho(h) = \text{atan} \left(\frac{h}{l} \right) \quad (3.11)$$

Avec l correspondant à la projection de la hauteur du triangle stu selon \vec{z} . Dans la vue projetée en figure 3.11, on a :

$$\begin{aligned} l &= r + r \cdot \cos(\pi - \phi(h)) \\ &= r - r \cdot \cos(\phi(h)) \\ &= r(1 - \cos(\phi(h))) \end{aligned} \quad (3.12)$$

D'où

$$\rho(h) = \text{atan} \left(\frac{h}{r(1 - \cos(\phi(h)))} \right) \quad (3.13)$$

La relation 3.13 nous permet d'obtenir l'angle des panneaux en fonction du jeu de paramètres η de la tour et de sa configuration.

Angle d'hélice

La tour de Kresling peut être utilisée pour réaliser une liaison hélicoïdale souple à pas variable. Pour ce type de liaison, le concepteur peut être intéressé par la valeur de ce que l'on appelle angle d'hélice, illustré dans la figure 3.13 et noté γ . L'expression de cet angle en fonction de la hauteur $\gamma(h)$ décrit la relation entre la variation de la hauteur du sommet u et sa position angulaire. Pour une hauteur donnée h , l'angle d'hélice peut être calculé comme le rapport entre la variation infinitésimale de hauteur dh et du déplacement tangentiel $r \cdot d\phi$, d'où l'expression $\gamma(h) = \text{atan}(dh/r \cdot d\phi)$, détaillée dans la relation 3.14.

$$\gamma(h) = \begin{cases} \text{atan} \left(-\frac{\sqrt{[ab]^2 - h^2} \cdot \sqrt{1 - \frac{[ab]^2 - h^2}{4 \cdot r^2}}}{h} \right) & \text{si } h \in [h_1; h_2] \\ \text{atan} \left(-\frac{\sqrt{[bd]^2 - h^2} \cdot \sqrt{1 - \frac{[bd]^2 - h^2}{4 \cdot r^2}}}{h} \right) & \text{si } h \in]h_{min}; h_1 \cup]h_2; h_{max}[\end{cases} \quad (3.14)$$

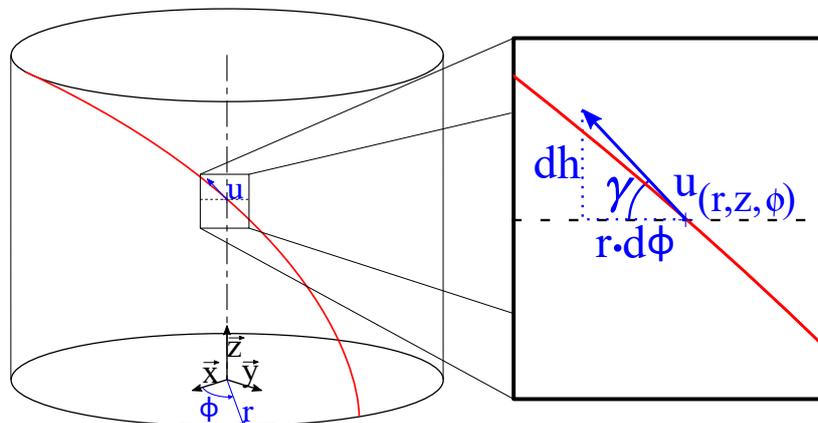


FIGURE 3.13 – Illustration de l’angle d’hélice γ dans une vue globale sur la trajectoire du point u et un zoom sur le plan tangent.

TABLE 3.1 – Liste des grandeurs caractéristiques et des équations nécessaires pour les évaluer.

Caractéristique	Notation	Eqn.
Hauteur de la tour	h	(3.2,3.4,3.5)
Angle de l’effecteur	ϕ	(3.3)
Rayon interne de la tour	r_i	(3.10)
Angle entre les panneaux et la base	ρ	(3.3, 3.13)
Évolution de l’ angle d’hélice	γ	(3.3,3.14)

Synthèse

Les relations données dans cette partie sont répertoriées dans le tableau 3.1 et liées aux caractéristiques géométriques et cinématiques correspondantes de la tour. Ces relations permettent au concepteur de calculer de manière analytique les caractéristiques de la tour pour un patron donné. Par ailleurs, elles permettent aussi de fixer les caractéristiques répondant à un besoin robotique et en déduire le jeu de paramètres η qui définit la géométrie du patron correspondant. Pour réaliser ce genre de synthèse de la tour de Kresling, la manière d’utiliser les relations dépendra évidemment des exigences de la conception. Comme il existe quatre paramètres géométriques indépendants définissant le patron de l’origami, quatre conditions doivent être remplies simultanément. Si le cahier des charges contraint moins de quatre caractéristiques, la résolution du problème pour concevoir le patron est sous-contraint et plusieurs tours sont réalisables. À titre d’exemple, nous considérons la synthèse d’une tour de Kresling dans la section 3.4.2 pour répondre à un besoin sur les hauteurs stables. Nous avons fixé les valeurs de (r, h_1, h_2) , et nous avons dû choisir arbitrairement une valeur de n pour obtenir 4 caractéristiques. Une fois le jeu de caractéristiques complet, nous résolvons le système d’équations correspondant pour obtenir le jeu de paramètres η .

TABLE 3.2 – Désignation et valeur des grandeurs caractéristiques des prototypes.

Tour	h_1 [mm]	h_2 [mm]	γ_{\max} [°]
0	106,3	166,3	31,5
1	41,5	124,7	54,3
2	80,0	130,0	39,4
3	106,3	166,3	35,8

3.4.2 Validation expérimentale

Synthèse et fabrication des tours de Kresling

L'approche de conception utilisant le modèle analytique proposé a été appliquée pour construire des prototypes avec différentes géométries. L'objectif est de vérifier la capacité à ajuster la position des configurations stables tout en modifiant le comportement de la liaison hélicoïdale équivalente, en modifiant la valeur de l'angle d'hélice. Le matériau, le procédé de fabrication et le procédé de collage correspondent à ce qui a été décrit en 3.3. Les paramètres des patrons et le protocole expérimental pour évaluer la synthèse sont détaillés ci-dessous.

Notre modèle ne prend pas en compte l'épaisseur de la feuille utilisée pour concevoir la structure. On cherche donc à avoir des prototypes avec l'épaisseur la plus fine possible. Nous sommes limités dans l'épaisseur minimal du matériau disponible chez nos fournisseurs (0.5mm). Nous cherchons par conséquent à maximiser la surface du patron afin de minimiser le ratio épaisseur / surface et ainsi se rapprocher le plus possible d'un modèle sans épaisseur. Notre machine de découpe laser a une surface de travail de 700x400mm. avec ces dimensions, nous avons fixé le rayon r de la tour à 90mm pour maximiser la surface du patron.

Nous souhaitons ensuite faire varier les hauteurs des configurations stables. Toutes les tours fabriquées dans cette partie ont des hauteurs dans l'intervalle $[0; H]$, avec la hauteur maximale atteignable quand $h_1 = 0$, en utilisant l'équation 3.7. Cela permet de garantir que toutes les tours pourront être construites dans l'intervalle $[0, H]$ tant que le rayon r et le nombre de côtés n sont conservés.

La tour 0 est considérée comme une tour de référence (Tableau 3.2). La valeur de h_2 est égale à H soit 166,3 mm. La hauteur h_1 est calculée à 106,3 mm pour atteindre 60 mm de course entre les deux configurations stables. La tour 1 est conçue pour que la course entre les deux configurations stables soit centrée autour de $H/2$. La tour 2 est construite pour atteindre 50 mm de course avec un décalage de $H/2$. Pour les tours 0, 1 et 2, le rayon r et le nombre de côtés n de la tour ne varient pas. Nous avons fixé le nombre de côtés arbitrairement à $n = 8$. Enfin, la tour 3 est construite avec les mêmes valeurs pour h_1 et h_2 que pour la tour 0, mais en ajustant ensuite les valeurs de r et n pour maximiser l'angle d'hélice le long du déploiement de la tour. Les ensembles η correspondants pour ces tours sont présentés dans le tableau 3.3.

TABLE 3.3 – Désignation et description du jeu de paramètres η pour les prototypes.

Tour	$[bd]$ [mm]	$[ab]$ [mm]	r [mm]	n
0	174,6	202,2	90	8
1	139,1	174,2	90	8
2	148,5	183,5	90	8
3	186,5	210,2	100	12

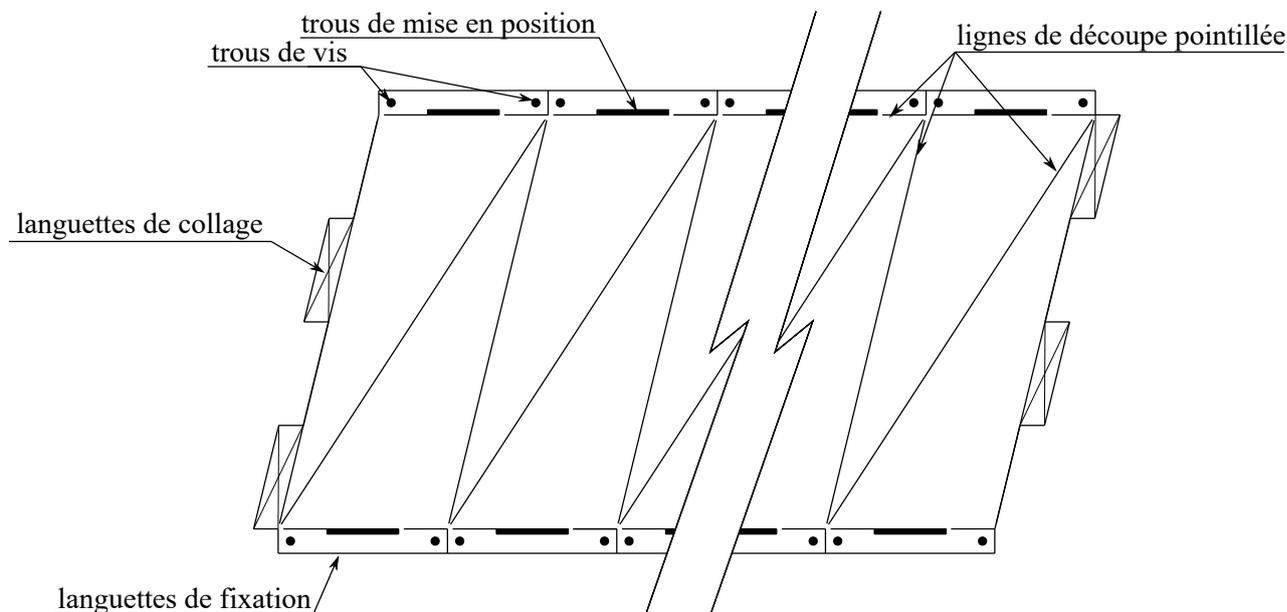


FIGURE 3.14 – Patron de découpe pour les prototypes.

Une vue CAO éclatée des prototypes est présentée dans la figure 3.15, avec la désignation des composants. La tour est composée de la tour de Kresling qui est montée sur la base et l'effecteur. La connexion est obtenue en vissant des plaques de blocage sur la périphérie des plateaux rigides.

La base et l'effecteur sont obtenus par fraisage d'une plaque de PP de 10 mm d'épaisseur. Des languettes de fixation avec des trous rectangulaires sur le modèle, sont ajoutées pour le positionnement de la tour. Le trou rectangulaire s'insère dans un volume fraisé sur les plateaux rigides. Les plaques de blocage sur la figure 3.15 et 3.14 permettent de maintenir en position les languettes à l'aide de l'extrusion rectangulaire et de la pression appliquée par les vis.

Les languettes de collage illustrées sur la figure 3.14 ont été intégrées au patron de l'origami pour fermer la structure. La taille des languettes a été réduite au minimum pour limiter les variations d'épaisseur dues à la superposition des matériaux. La largeur de ces languettes est fixée à 10 mm afin d'avoir une surface de contact suffisante pour le collage.

Vérification expérimentale des configurations stables

Avant les mesures, les tours sont soumises à une séquence de 10 allers-retours à l'aide d'une machine d'essai de traction afin de roder la tour et ses plis. Ce rodage est suivi

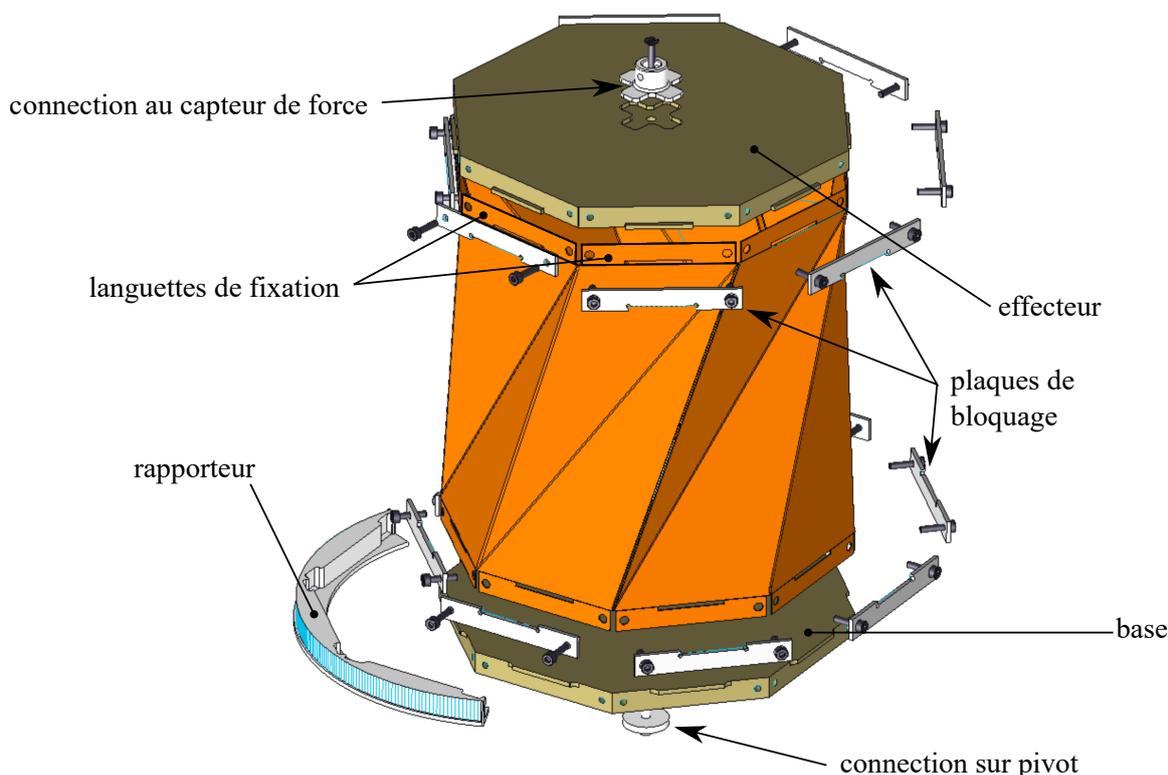


FIGURE 3.15 – Vue éclatée CAO du prototype de la tour.

TABLE 3.4 – Mesures de la hauteur des tours et erreurs relatives par rapport au rayon de la tour.

Tour	h_{1m} [mm]	Erreur	h_{2m} [mm]	Erreur
0	105,5(0,4)	0,8%	165,8(0,1)	0,6%
1	51,7(5,0)	11,3%	124,6(0,3)	0,1%
2	82,5(0,4)	2,7%	131,9(0,2)	2,1%
3	112,7(1,2)	6,4%	165,3(0,1)	1%

d'une période de repos de 30 minutes. L'historique de chargement est ensuite le même pour tous les prototypes. Le nombre de cycles est choisi en fonction de nos observations d'une stabilisation du comportement de la tour. L'évaluation de la tour est réalisée après cette phase.

L'évaluation a été réalisée en deux étapes. Tout d'abord, une mesure directe de la position des configurations stables a été réalisée. Les valeurs de la hauteur de la tour sont mesurées après avoir placé la tour dans les deux configurations. La tour est placée sur un marbre et la hauteur est mesurée à l'aide d'une jauge au bord du polygone. La valeur donnée est une moyenne basée sur quatre mesures, à 90° les unes des autres, pour éviter des erreurs dues à un non-parallélisme entre les deux plateaux de la tour.

Les résultats des mesures de la hauteur des tours sont rassemblés dans le tableau 3.4. Les valeurs indiquées entre parenthèses correspondent aux écarts types, et l'indice m désigne les valeurs mesurées pour les différencier des valeurs théoriques. On note une meilleure précision des hauteurs relevées dans la configuration haute, en h_2 , que dans

la configuration basse, en h_1 . En effet, l'écart entre la valeur théorique et la moyenne des positions en h_1 est d'environ 5,0 mm, alors que ce même écart en h_2 est d'environ 0,9 mm. Nous notons également que la plus grande différence à la valeur théorique se situe dans la configuration basse de la tour 1 qui présente la plus petite valeur de h_1 parmi les quatre prototypes. Notre hypothèse à propos de cette différence de précision des prédictions du modèle selon les hauteurs des configurations est la suivante : négliger l'épaisseur est raisonnable pour la configuration haute, mais limitant pour la configuration basse où l'angle des plis est plus petit. Au final, l'erreur absolue moyenne de ces résultats est d'environ 3mm entre les hauteurs calculées et mesurées pour des tours dont le diamètre moyen théorique est de 185mm. Par ailleurs, l'erreur relative moyenne sur les valeurs du tableau 3.4 est d'environ 3%. La précision générale nous semble satisfaisante, compte tenu de la simplicité du modèle. En effet, le modèle ne prend pas en compte l'épaisseur du matériau, ni les comportements du matériau tels que la viscoélasticité. Par ailleurs, lors de l'étape de collage manuel, des défauts de fabrication sont introduits, impactant le comportement. C'est la simplicité du modèle qui permet de faire la synthèse des tours de Kresling sans avoir à considérer le matériau ni l'épaisseur avec des relations analytiques. Nous faisons alors le choix de conserver ce modèle en l'état.

Prédiction de la cinématique

Un essai de compression a été réalisé à l'aide d'une machine d'essai de traction (Zwick/Roell, Z005), comme nous pouvons le voir sur la figure 3.16. L'extrémité inférieure est reliée à la machine par une liaison pivot glissante et l'extrémité supérieure est reliée à la partie mobile de la machine, qui est reliée au châssis de la machine par une liaison glissière. Le déplacement de l'extrémité supérieure est obtenu à l'aide du capteur intégré. Une caméra (Canon EOS 700D) est placée devant la tour, pour mesurer la rotation pendant l'essai de compression. La caméra est utilisée pour contrôler la valeur fournie par le rapporteur, comme le montre la figure 3.15. L'outil de mesure est intégré à l'extrémité inférieure de la structure, qui tourne pendant le pliage. Il est alors possible d'obtenir le temps nécessaire pour réaliser une rotation de 1° . La vitesse de translation étant réglée par la machine d'essai en traction, nous sommes en mesure de calculer la translation correspondante effectuée par la tour. Nous réalisons un recalage avec la hauteur de la tour au début de l'expérience pour passer d'une translation relative observée en une translation absolue avec comme origine la hauteur h_2 de la tour dans sa configuration haute. Finalement, l'évolution de l'angle de la tour ϕ peut être tracée en fonction de l'évolution de la position h de la tour.

Afin de valider notre modèle, nous traçons l'angle ϕ en fonction de la hauteur h de l'équation 3.2 et nous le comparons aux données expérimentales en noir sur la figure 3.17. Sur cette figure, la courbe jaune est la courbe théorique pour $\phi_{ab}(h)$ et la courbe rose est pour $\phi_{bd}(h)$. La courbe $\phi(h)$ est représentée en ligne continue à partir de ϕ_{ab} , respectivement ϕ_{bd} , selon l'intervalle de définition présenté dans l'équation 3.2. Nous remarquons que la distance, entre la courbe expérimentale et la courbe théorique de $\phi(h)$ en trait

plein est toujours plus petite qu'avec les lignes pointillées. Cette observation confirme notre proposition pour la définition de l'angle ϕ en fonction de l'intervalle tel que définit en 3.3.

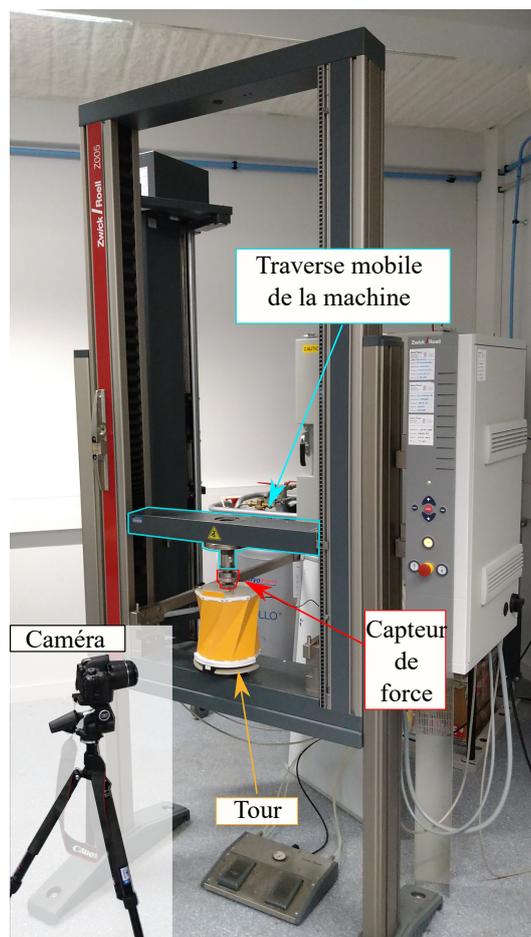


FIGURE 3.16 – Prototype en cours de test avec mesure de la rotation par la vision.

L'erreur relative moyenne, calculée entre l'évaluation expérimentale et les valeurs issues des modèles proposés, est de l'ordre de 1,5 %, 0,2 %, 0,9 % et 0,6 % respectivement pour les tours 0, 1, 2 et 3. Ces résultats, avec une erreur inférieure à 2% permettent de valider la capacité du modèle à prédire la cinématique de l'effecteur.

Finalement, le modèle proposé permet de prédire la cinématique de la tour de Kresling de manière analytique. La précision de la prédiction est remarquable compte tenu de la simplicité relative du modèle par rapport aux autres outils de modélisation pour les origamis non rigidement pliables. L'avantage de la relation analytique de la cinématique de la tour est que nous pouvons dériver d'autres relations concernant la géométrie de la tour. Nous pouvons aussi résoudre les relations avec des outils mathématiques usuels pour inverser le modèle et obtenir la géométrie du patron en fonction d'un besoin.

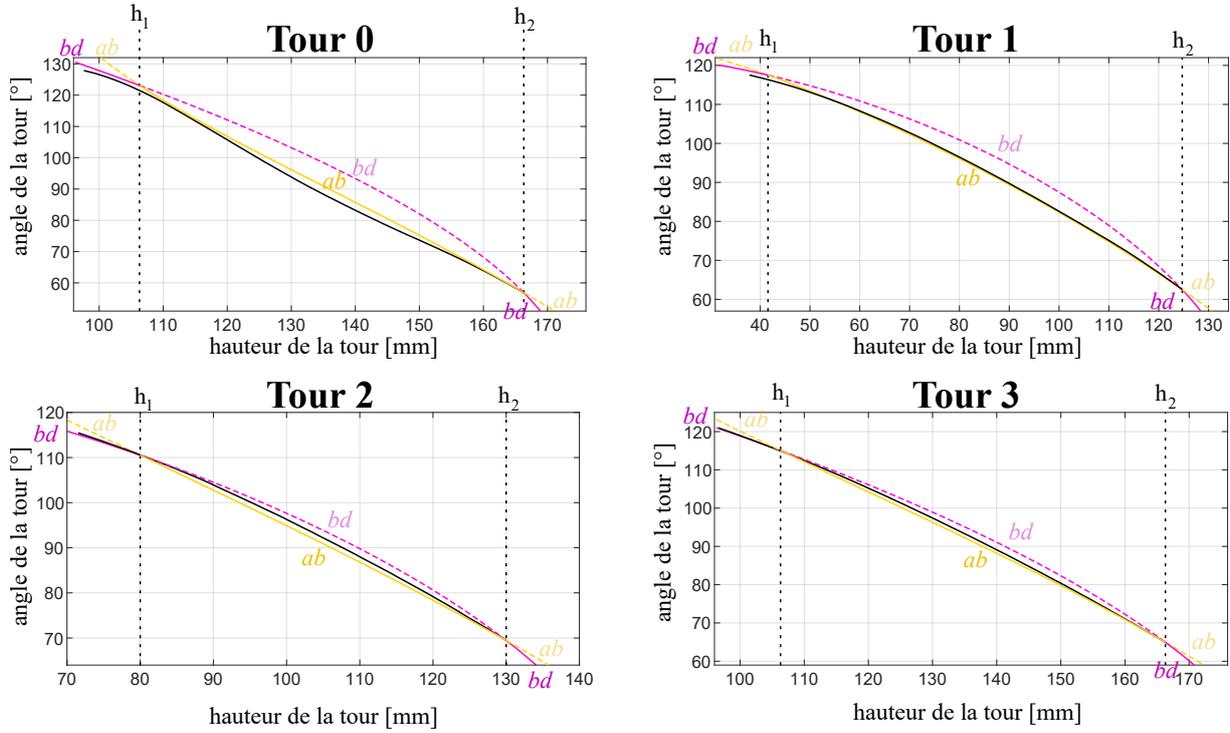


FIGURE 3.17 – Évolution de l’angle de la tour ϕ en fonction de la hauteur de la tour h . En rose, la courbe théorique pour ϕ_{bd} , en jaune, la courbe théorique pour ϕ_{ab} et en noir, la courbe mesurée. Le trait plein correspond à la courbe pour le $\phi(h)$ tel que défini en 3.2

3.5 Ouverture de lignes de pliages

Nous observons lors des manipulations expérimentales réalisées précédemment que des déformations apparaissent le long des plis bd , comme le montre la figure 3.3. Nous émettons l’hypothèse selon laquelle des concentrations de contraintes liées à la connexion des panneaux favorisent l’apparition de ces déformations localisées dans la zone centrale du pli.

3.5.1 Synthèse d’un paramètre d’ouverture

Pour moduler la raideur de la tour, et donc l’énergie nécessaire à son changement de configuration, nous proposons de supprimer localement la connexion entre les panneaux le long des plis. En faisant cela, nous avons l’intention d’agir sur l’énergie nécessaire pour déformer les panneaux. Cette modification du pli a aussi une conséquence sur sa raideur en rotation. Dans [Onal et al., 2014, Liu and Paulino, 2017, Filipov et al., 2015, Nayakanti, 2016], la rigidité de l’origami simulé est modifiée en modulant la raideur en rotation des lignes de pliages. Nous supposons que la raideur liée à la connexion des panneaux est prépondérante par rapport à la raideur liée à la rotation autour du pli. Hypothèse que nous vérifierons lors des manipulations expérimentales.

Nous paramétrons la suppression de matière sur la ligne de pliage par un paramètre que nous nommons « ouverture du pli », défini par une longueur en pourcentage de la ligne du pli comme le montre la figure 3.18. Une ouverture de 100% correspond à une

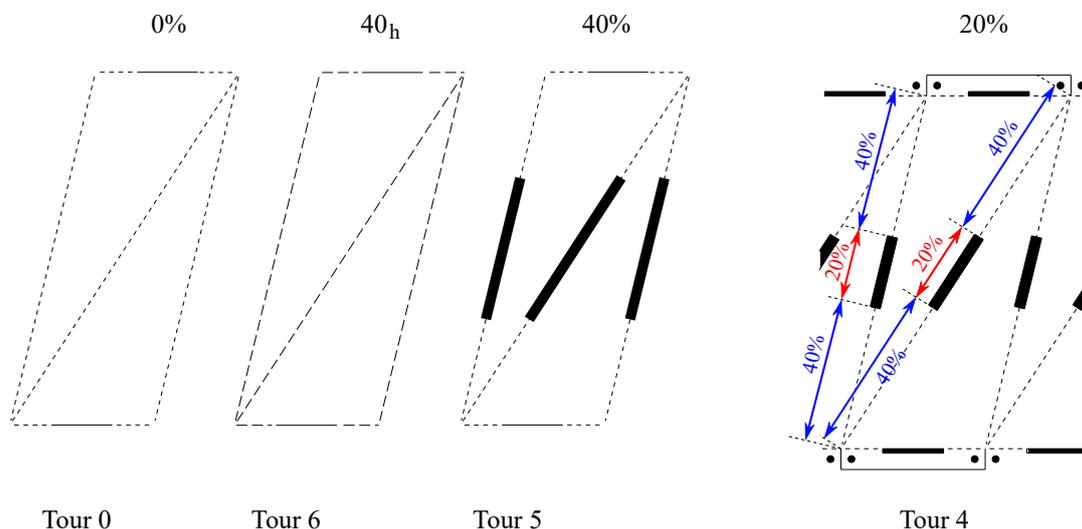


FIGURE 3.18 – Comparaison de la géométrie des lignes de pliage des tours 0, 6, 5 et 4 de gauche à droite. Pour la tour 4, l'ouverture est intégrée dans le patron de découpe.

ouverture totale du pli tandis qu'une ouverture de 0% signifie qu'il n'y a pas d'ouverture. L'ouverture du pli est de forme rectangulaire. La largeur de cette ouverture est choisie de manière à limiter les interférences entre les panneaux voisins. Nous la positionnons au centre du pli par rapport aux observations des déformations.

Nous concevons des tours qui possèdent le même ensemble η : $b = 174,6\text{mm}$, $l = 202,2\text{mm}$, $r = 90\text{mm}$ et $n = 8$ que la tour 0 mais sur laquelle nous avons ajouté des ouvertures avec des valeurs en pourcentage différentes. Les tours 4 et 5 sont des prototypes produits respectivement avec une ouverture fixée à 20% et 40%. La tour 6 est produite avec une ouverture de 0% mais avec une suppression homogène de la ligne en modifiant le ratio des pointillés lors de l'usinage laser de la ligne. Cette tour est caractérisée par la même quantité de matériau conservé le long de la ligne de pliage que la tour 5 avec l'ouverture de 40 %, mais avec une distribution homogène du matériau le long de la ligne de pliage. Elle est désignée dans la suite par l'indice 40_h comme indiqué dans la figure 3.18. La tour 6 est ensuite comparée à la fois à la tour 0 qui présente également une distribution homogène du matériau le long de la ligne de pliage, mais avec des pointillés différents. La tour 6 est aussi comparée à la tour 5. Ces deux tours présentent la même quantité de matériau le long du pli, mais la 5 avec une ouverture locale et la 6 avec des pointillés homogènes. Les comparaisons entre ces trois tours nous permettront de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse énoncée au début de cette section sur l'impact de l'ouverture localisée par rapport à une suppression homogène de matière.

Nous avons défini ici un nouveau paramètre qui ne change pas la géométrie du patron au sens où le jeu de paramètres η reste identique. Nous passons maintenant à l'évaluation expérimentale de ces tours dotées du paramètre d'ouverture.

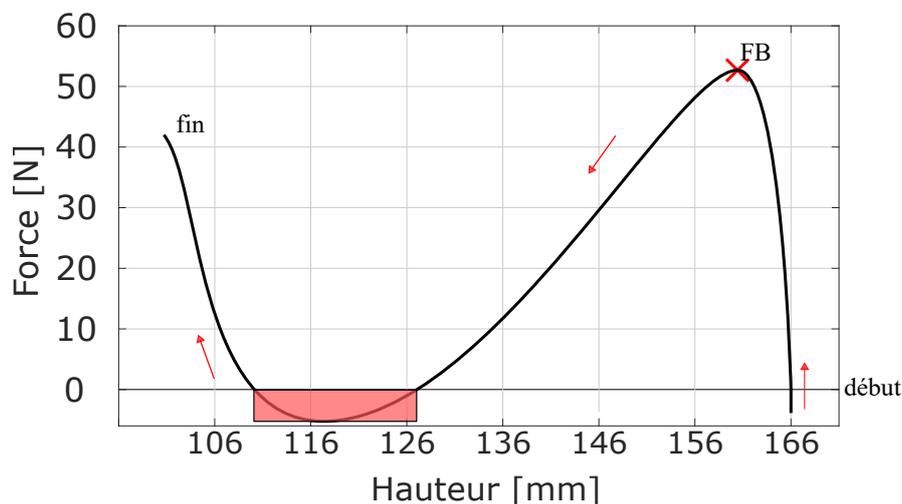


FIGURE 3.19 – Illustration d’une courbe force-déplacement idéalisée pour la tour de Kresling.

3.5.2 Résultats expérimentaux

Pour valider la réduction de la raideur de la tour en utilisant le paramètre d’ouverture proposé, nous utilisons le même protocole expérimental que pour la validation du modèle cinématique. La force lors de la compression est mesurée à l’aide d’une cellule de force (Zwick/Roell Xforce HP 500N), comme nous pouvons le voir sur la figure 3.16. Nous observons une variation de la relation force-déplacement en fonction de l’historique de la tour lorsque des tests consécutifs sont effectués (Fig. 3.19). Les résultats montrés en figure 3.20 correspondent à la mesure sur le même numéro de cycle consécutif (7). Au travers de ces tests dont nous voyons la courbe idéalisée en figure 3.19, nous souhaitons comparer l’impact de l’ouverture sur la force de basculement. Cette force correspond à la valeur de la force minimale qu’un actionneur linéaire doit fournir pour réussir à comprimer la tour. Elle est notée FB dans la suite du document et elle est repérée sur la courbe idéalisée en 3.19. Elle correspond à la force maximale atteinte entre les deux configurations stables.

Dans un premier temps, nous souhaitons vérifier notre hypothèse en début de 3.5.1 selon laquelle la modification locale d’ouverture du pli impact de manière plus significative la mesure de la force de basculement qu’une modification homogène. Nous commençons par évaluer la modification sur la raideur entre la tour 0 de référence et la tour 6 qui possède moins de matière le long du pli, mais répartie de manière homogène. La figure 3.20 montre des variations dans la relation force-déplacement entre ces deux tours, mais les valeurs des forces FB sont semblables avec une variation de seulement 3,8%. La force nécessaire pour actionner le changement de configuration est semblable pour ces deux tours. Nous comparons ensuite la tour 6 et 5 qui possèdent la même quantité de matière, mais répartie différemment le long du pli. Sur la figure 3.20, nous observons que ces deux tours ont une relation force-déplacement très différente. La tour 5 avec la suppression de matière localisée permet de changer de configuration avec une force FB environ 3,5 fois plus faible. La tour 5 par rapport à la tour 0 permet de réduire la valeur de FB de 63%.

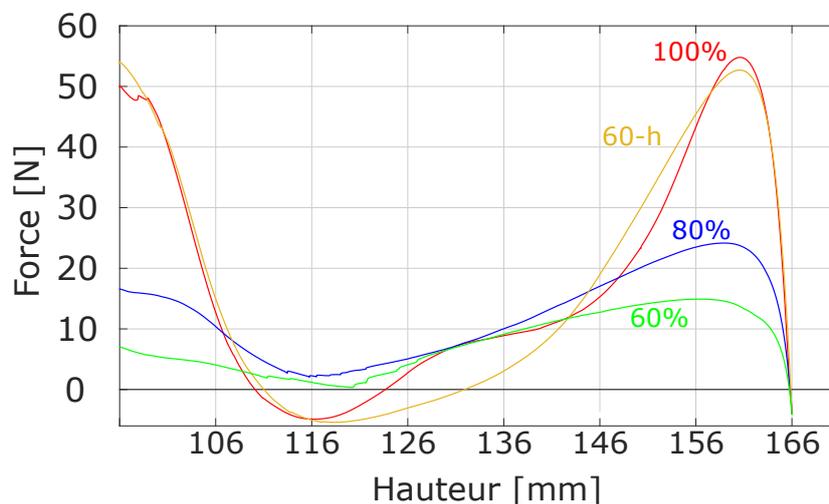


FIGURE 3.20 – Courbes force-déplacement obtenues à partir des essais des tours décrits dans le tableau 3.5.

Notre hypothèse selon laquelle la variation de la force de basculement de la tour et plus généralement sa relation force-déplacement est plus importante en supprimant localement une partie du pli qu'en supprimant de la matière de manière homogène est validée.

La valeur de la force FB pour la tour 4 (ouverture à 20 %) est réduite de 56 % par rapport à la tour 0. Cela signifie que la suppression de seulement 20 % de la ligne de pliage entraîne une diminution de la force de basculement de plus de moitié par rapport à la tour de référence. L'impact du paramètre d'ouverture sur la force nécessaire à la tour pour changer de configuration est très significatif. Son utilisation pour faciliter l'actionnement est donc validé.

Des mesures directes de la hauteur pour les configurations stables ont également été effectuées. Toutes les tours du Tableau 3.5 utilisent le même ensemble de paramètres η , ainsi les valeurs théoriques de h_1 et h_2 sont identiques et égales à 106,3 mm et 166,3 mm. La différence de position moyenne avec les valeurs théoriques pour les tours 0 et 6 avec des plis homogènes est d'environ 0,5 mm, tandis que pour les tours 4 et 5 avec l'ouverture locale, la différence moyenne est d'environ 3,6 mm. Pour ces tours, les différences les plus élevées sont relevées dans la configuration basse, qui correspond à la configuration où la tour est la plus comprimée. Le paramètre d'ouverture a des conséquences non désirées sur la position des configurations stables de la tour de Kresling. Nous considérons que le paramètre d'ouverture reste un outil pertinent puisque la dégradation des positions des configurations stables reste limitée, de l'ordre de 5%, et elle est compensée par le large gain produit sur la réduction de la force de basculement. Cela signifie que la synthèse de la tour peut être conduite en deux phases. Tout d'abord, la géométrie du patron est fixée grâce à la synthèse proposée en 3.4. Ensuite, la force de basculement peut être réduite en utilisant l'approche de modification des plis.

Pour les systèmes purement élastiques, le passage en dessous des abscisses illustré en rouge sur la figure 3.19 permet d'indiquer et de quantifier bistabilité du système. Cependant, sur la figure 3.20, nous observons que pour les tours avec ouverture, les courbes

TABLE 3.5 – Valeurs mesurées de h_1 , h_2 et force de basculement pour les prototypes avec lignes de pliage modifiées. L'indice "m" signifie que c'est une valeur mesurée.

Tour	ouverture	FB [N]	h_{1m} [mm]	h_{2m} [mm]
0	0%	54,8	105,5	165,8
4	20%	24,2	114,8	167,1
5	40%	14,9	110,3	167,3
6	40 _h	52,7	105,6	166,4

ne croisent pas l'axe des abscisses à 0 N comme c'est le cas pour les tours sans ouverture. L'observation des prototypes nous permet de constater que la bistabilité est bien toujours présente, même si bien moins prononcée. Le fait de ne plus passer dans le domaine des forces négatives tout en ayant la bistabilité nous paraît être lié au caractère viscoélastique du matériau. Il reste que l'utilisation du paramètre d'ouverture peut vraisemblablement conduire à la perte du caractère bistable de la tour.

3.6 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons proposé un modèle dont les hypothèses simplificatrices permettent de traiter de manière analytique la cinématique et la géométrie de la tour non seulement dans ses configurations stables, mais aussi dans les configurations intermédiaires. Nous avons vérifié expérimentalement les performances du modèle. Les résultats sont intéressants compte tenu du fait que le modèle ne s'appuie que sur des considérations géométriques, avec une erreur moyenne de l'ordre de 3% avec les tours réelles. Les écarts de prédiction du modèle, dans certaines configurations de l'origami, montrent qu'il existe une marge de progression pour affiner ce modèle.

Dans un second temps, nous avons identifié et implémenté un nouveau paramètre : l'ouverture de la ligne de pliage. Ce paramètre permet de réduire la force de basculement de la tour sans modifier la cinématique ni le jeu de paramètre η définissant la géométrie du patron. Réduire la force de basculement permet par exemple de réduire la force que doit développer l'actionneur de la tour pour changer de configurations. Sur cette base, des travaux visant à modéliser la relation force-déplacement tout en prenant en compte le paramètre d'ouverture ont été initiés en collaboration avec FEMTO-ST.

Nous notons cependant que la raideur dans les configurations stables est dégradée par ce paramètre, ce qui peut mettre en péril le caractère bistable de la tour de Kresling. Nous proposons alors en chapitre 4 l'ajout d'un mécanisme pour augmenter temporairement la raideur d'une tour avec ouverture. Ainsi, nous n'aurons potentiellement plus à faire de compromis entre force de basculement et raideur de la tour.

Chapitre 4

Mécanisme actif de modulation du comportement cinétostatique de la tour de Kresling

4.1 Introduction

En travaillant sur le caractère non rigidement pliable de la tour de Kresling, que nous avons proposé un paramètre d'ouverture du pli permettant de réduire la force de basculement nécessaire pour faire changer la tour de configuration avec un changement minime des positions des configurations stables. Nous avons cependant observé que la réduction de la force de basculement de la tour avec ce paramètre de conception supplémentaire impacte le caractère bistable de la tour. Pour pouvoir moduler la raideur de la tour indépendamment de sa cinématique, nous souhaitons donc ajouter un mécanisme de rigidification permettant d'augmenter la raideur de la tour de manière temporaire. Cela nous permet de limiter l'énergie que l'actionneur doit développer pour changer de configuration tout en maintenant une raideur élevée lorsque l'origami est dans une configuration stable, contribuant au maintien de la stabilité.

Au delà de l'augmentation de la raideur pour compenser les limites de l'ouverture effectuée dans les plis, l'ajustement dynamique du modèle cinétostatique présente d'autres intérêts. La tour de Kresling pourrait être utilisée, par exemple, comme élément structurel avec des caractéristiques de sécurité telles que la variation de la rigidité, ou un limiteur de force intégrée, pour les robots collaboratifs. Plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature pour moduler la raideur d'origamis. Dans [Li et al., 2019, Deshpande et al., 2017], une structure externe activée par le vide est ajoutée autour des origamis. Elle permet une modulation de la rigidité, mais le système externe peut interférer avec la liberté de mouvement de l'origami. Dans [Kim et al., 2015], les auteurs proposent de verrouiller le mouvement relatif des panneaux d'une tour de Kresling en intégrant des éléments actifs à base de fils en alliage à mémoire de forme (AMF) le long des plis. La solution est compacte, mais permet surtout une opération binaire et uniquement dans la configuration

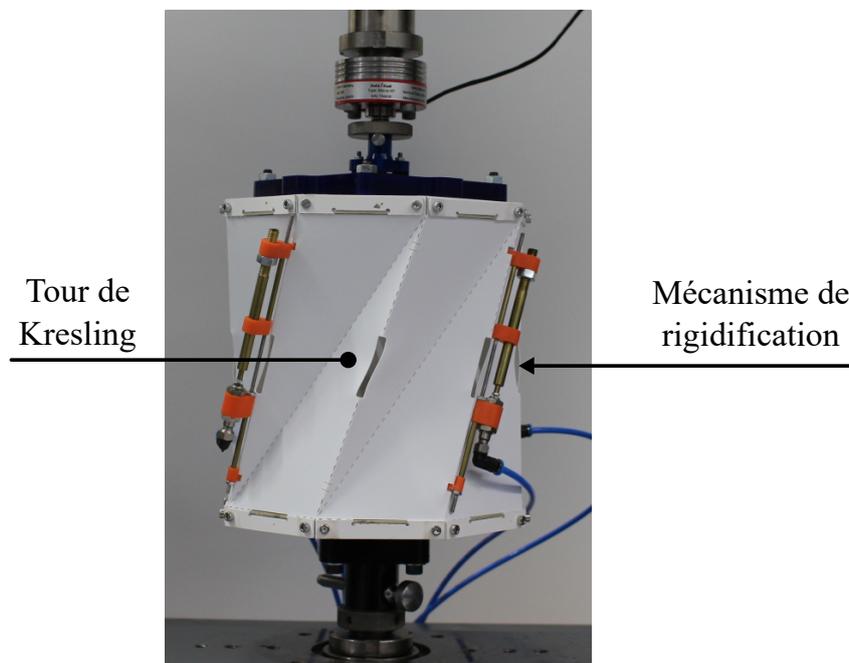


FIGURE 4.1 – Prototype de la tour de Kresling proposée avec des mécanismes de rigidification intégrés pendant l'évaluation.

haute. Dans [Zuliani et al., 2018], la rigidité en torsion des plis d'origami est modulée. Une variation de la rigidité est alors possible. Une telle variation de la rigidité en torsion des plis est également réalisée dans [Firouzeh and Paik, 2017] en utilisant des polymères à mémoire de formes. Avec la même technologie, l'origami utilisé dans [Lerner et al., 2020] peut être monostable ou bistable. Cependant, la position des configurations stables, la rigidité et les forces permettant de passer d'une configuration stable à l'autre sont alors couplées et ne peuvent être réglées indépendamment. Nous n'avons donc pas de solution dans la littérature qui permette de moduler la raideur d'un origami temporairement sans avoir d'impact sur la géométrie et la cinématique de la tour.

La géométrie de la tour est caractérisée par la forme de son enveloppe interne et externe définie par les caractéristiques du chapitre précédent. La cinématique est caractérisée par la relation 3.3. Quant à la raideur de la tour, elle est caractérisée dans notre étude par la raideur autour des configurations stables et par la force de basculement. La force de basculement est une information importante pour dimensionner l'actionneur nécessaire au changement de configuration. La raideur dans les configurations stables permet de quantifier la bistabilité, c'est-à-dire de savoir à quel point la structure peut rester immobile lorsqu'elle doit supporter des sollicitations. Nous proposons de développer un mécanisme actif sur la tour de Kresling pour répondre à ce besoin de modulation indépendante de ces caractéristiques.

Du fait de la complexité du comportement d'un origami comme la tour de Kresling, le processus de conception que nous avons adopté est principalement basé sur l'expérimentation. Ainsi, nous commençons par étudier la nature et la localisation les plus appropriées pour un mécanisme de rigidification installé sur la tour de Kresling.¹

1. Le travail exposé dans ce chapitre fait l'objet d'une soumission d'article en cours d'évaluation pour

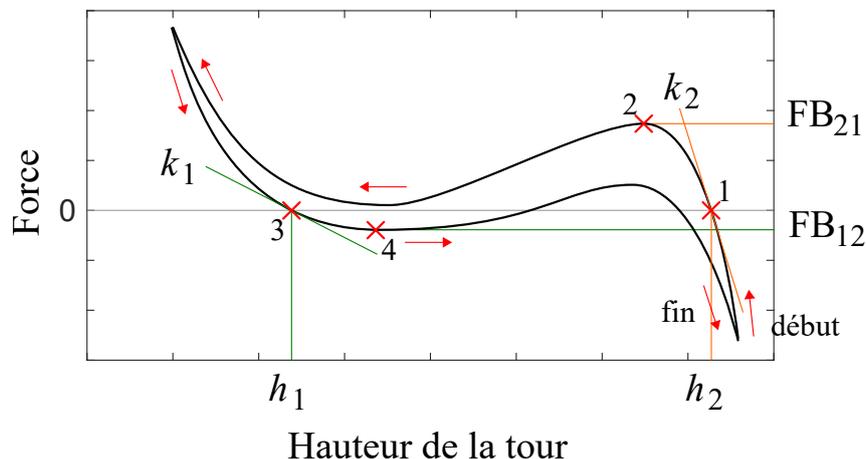


FIGURE 4.2 – Représentation d’une courbe idéalisée de la relation force-déplacement de la tour de Kresling pour illustrer les points d’intérêt. Les flèches rouges indiquent la direction du déplacement. Les points 1 à 4 permettent de caractériser la tour.

4.2 Détermination de la stratégie de rigidification de l’origami

Selon l’hypothèse de notre modèle mis en place au chapitre 3, la barre bd (Fig. 3.10) doit se comprimer pour permettre le changement de configurations. Nous supposons réciproquement qu’en empêchant le rapprochement des sommets t et u , nous empêchons la tour de changer de configuration. En pratique, comme le montre la figure 3.3, le rapprochement des sommets t et u lors du changement de configurations entraîne un flambement des panneaux. Flambement qui est facilité et amplifié localement par l’ouverture du pli. Nous proposons d’agir soit en empêchant le rapprochement des sommets soit en empêchant les panneaux de flamber afin de rigidifier la structure. Pour évaluer le potentiel relatif de ces stratégies, nous réalisons une série d’expérimentations préliminaires, elle ont pour objectifs de définir quelle nature (locale ou globale) et quel emplacement (pli ou panneau) est favorable à la rigidification de la structure par ajout de mécanisme.

Ces expériences nous renseigneront aussi de manière empirique sur la facilité apparente d’intégration des différentes natures de rigidification dans la tour. Le patron de la tour de Kresling considéré pendant ces tests correspond à la tour 4 (Tab.3.4) définie par $([ab], [bd], r, n) = (202,2 \text{ mm}, 174,6 \text{ mm}, 90 \text{ mm}, 8)$, de sorte que par conception $h_1 = 106,3 \text{ mm}$ et $h_2 = 166,3 \text{ mm}$. L’ouverture locale est de 20% de la longueur du pli de montagne.

Pour réaliser cette série d’expériences, quatre tours ont été réalisées. Des renforts métalliques, beaucoup plus rigides que la feuille de polymère de l’origami, sont placés sur les panneaux ou sur les plis. Leur impact est évalué sur quatre tours renforcées R_i , $i \in (1, 4)$ (Fig. 4.3, Tableau 4.1), sont comparées avant et après insertion des éléments de renforts. Pour la rigidification des panneaux (tours R_1, R_2), des lames sont insérées sur les panneaux adjacents à quatre plis montagne, un sur deux. Pour la rigidification des plis

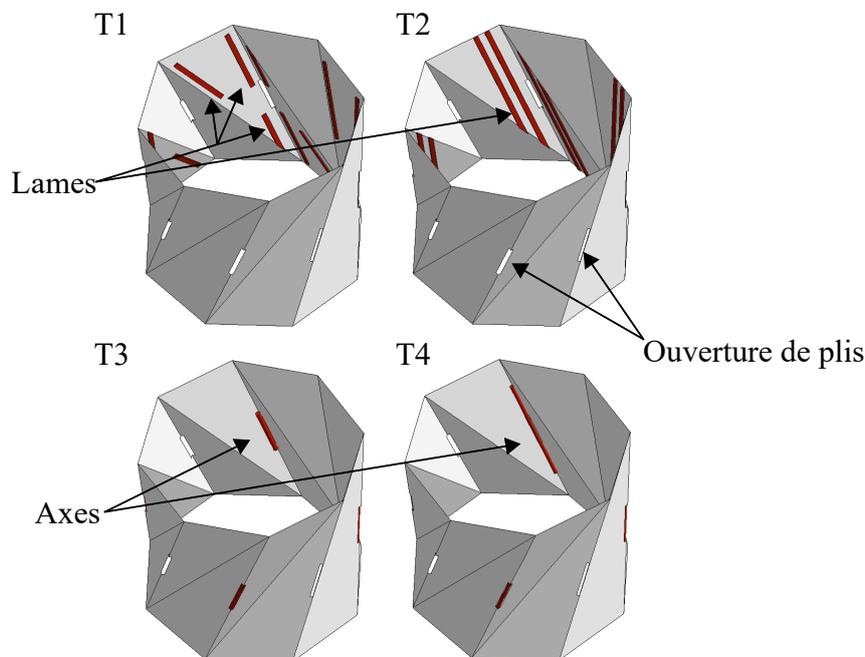


FIGURE 4.3 – Représentation schématique des 4 modes de renforcement testés : les composants de rigidifications sont en rouge. Les attaches ne sont pas représentées pour des raisons de visibilité.

TABLE 4.1 – Nature et impact des renforcements. Le type décrit la stratégie de renforcement : P (resp. F), le renfort est sur le panneau (pli). La position décrit le mode de fixation : G (resp. L) est pour la fixation globale (locale) le long du panneau/pli.

Tour	Type	Position	FB [N]	k_1 [N/mm]	k_2 [N/mm]
R1	P	L	+5,9	-0,1	-3,4
R2	P	G	+17,7	+0,5	+9,0
R3	F	L	+9,8	+0,2	+4,1
R4	F	G	>+22,6	+2,2	+11,6

(tours R3, R4), quatre tiges sont insérées le long des plis montagne, un sur deux. Dans les deux cas, nous considérons soit une fixation globale qui agit sur toute la longueur du panneau/pli, soit une fixation locale.

L'évaluation est réalisée à partir de deux critères : la force de basculement FB et la rigidité dans les deux configurations stables k_1 et k_2 . Pour évaluer la force de basculement, des masses sont ajoutées progressivement sur l'effecteur des prototypes, jusqu'à ce que le basculement soit observé (Fig. 4.4). Les incréments de masses sont de 100 g, et ils sont appliqués toutes les 30 secondes pour rendre les expériences comparables, même en présence de viscoélasticité du matériau. Les expériences sont arrêtées lorsque la masse installée atteint 6 kg, afin d'éviter la dégradation des prototypes.

Pour l'estimation de la hauteur, un comparateur et des cales étalons sont utilisés. Le ressort de rappel de la touche du comparateur est plus raide que la tour. Nous devons donc prendre des précautions pour que la nature du contact entre le comparateur et l'effecteur ne fausse pas la mesure de hauteur. Dans un premier temps, la touche du

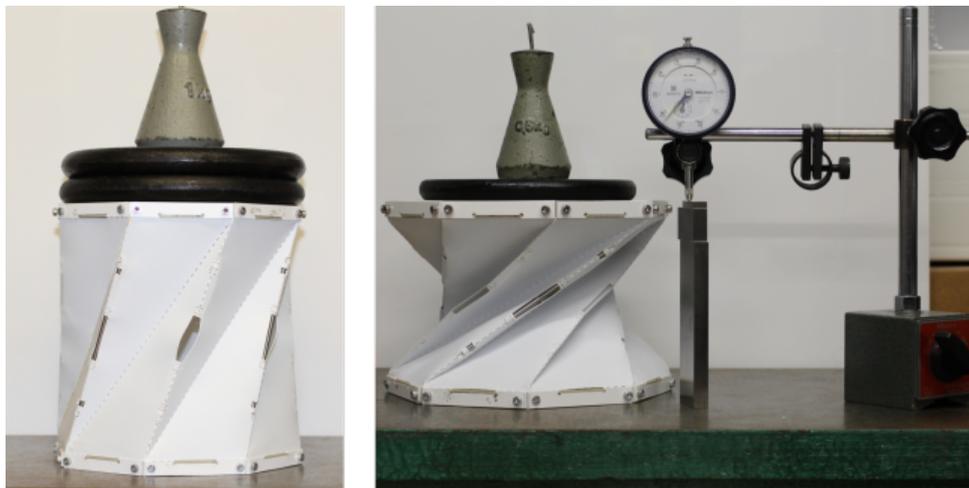


FIGURE 4.4 – Illustration de l'application progressive des poids pour définir la force de basculement (gauche). Mesure de la raideur en configuration basse (droite).

comparateur est mise au contact de l'effecteur de la tour à l'aide de la molette de réglage. Cela permet d'éviter d'appliquer une force significative qui induirait un déplacement de la tour. Ensuite, des cales sont empilées pour déterminer la hauteur de la touche. Le processus est répété pour 4 sommets de l'origami, et la hauteur moyenne est rapportée. Les sommets sont repérés pour que la mesure soit toujours localisée aux mêmes points.

Pour l'estimation de la rigidité, une masse de 1,5 kg est placée au sommet de la tour (Fig. 4.4). Un délai de 3 minutes après l'application de la masse est respecté, pour que toutes les mesures soient comparables. Le déplacement résultant de l'effecteur est mesuré. Nous convertissons la masse en poids pour obtenir la relation entre la force appliquée et le déplacement mesuré, ce qui caractérise la raideur aux points de fonctionnement particuliers que sont les configurations stables.

La procédure de test a également été utilisée avec des jeux de renforts placés aux alentours de 2 plis montagne opposés et aux alentours des 8 plis montagne de l'origami afin de déterminer combien de mécanismes doivent être utilisés. L'utilisation de 2 jeux de renforts n'a pratiquement aucun effet sur les grandeurs mesurées. L'utilisation de 8 jeux de renforts a un impact, mais inférieur au double de la variation introduite par 4 renforts alors que l'ajout de masse est doublé. Nous choisissons dans la suite d'appliquer la rigidification à l'aide des mécanismes aux alentours de 4 plis montagne soit un sur deux. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.1.

Pour une stratégie de renfort égale (colonne 2 Tab. 4.1), les tours avec le mode de fixation global (colonne 3 Tab. 4.1) ont une raideur et une force de basculement plus élevée. L'application globale des renforts le long de l'ensemble du panneau/pli a donc un impact plus important que l'application locale. Les variations les plus importantes sont observées avec les tours utilisant des renforts au niveau des plis. Avec la tour R4, la force de basculement est augmentée de plus de 22,6 N par rapport au comportement de la tour sans renfort. Cela représente une variation supérieure à 62%. Seule la tour R4 permet d'augmenter significativement la rigidité k_1 . De même, les meilleurs résultats en terme d'augmentation de la rigidité k_2 sont obtenus avec la tour R4. C'est la tour avec

le plus d'impact sur toutes les caractéristiques étudiées. Le mode de rigidification le plus intéressant est donc d'utiliser des mécanismes de rigidification fixés aux plis, sur la plus grande longueur possible.

4.3 Conception des mécanismes de rigidification

Lors de ces tests expérimentaux, nous avons observé que la réduction de l'espace à l'intérieur de la tour dans sa configuration basse limite la capacité d'intégration des mécanismes de rigidification à l'intérieur de la tour. Avec le jeu de paramètres η choisi, les panneaux adjacents par rapport aux plis montagne forment un angle de 20° , ce qui est relativement faible pour y insérer une solution. De plus, avec d'autres jeux de paramètres, cet angle peut atteindre 0° , c'est le cas lorsque la hauteur de la configuration basse est nulle. Il est alors impossible d'insérer un mécanisme à l'intérieur de la tour. Pour cette raison, nous avons décidé d'ajouter les mécanismes de rigidification à l'extérieur de la tour.

4.3.1 Principe de fonctionnement

Compte tenu des observations précédentes, 4 mécanismes identiques sont montés sur la tour. Ils ne sont pas reliés aux panneaux pour éviter toute restriction dans le mouvement de la tour de Kresling et placés à l'extérieur des plis montagne. Chaque mécanisme doit agir dans l'axe du pli. Pour expliquer le principe de fonctionnement proposé, nous considérons d'abord un mécanisme parfaitement rigide. Lorsque la tour de Kresling est dans l'une de ses deux configurations stables (Fig. 4.5.a), le mécanisme peut être activé pour supprimer le déplacement des sommets du pli, nécessaire lors du changement de configuration de la tour. Dans cette situation, la tour de Kresling devient totalement rigide. Pour s'éloigner d'une configuration stable, comme le montre la figure 4.5 b., le mécanisme est désactivé. La tour peut alors être utilisée normalement, avec une action externe pour déplacer l'effecteur. Pendant le mouvement de la tour, il y a un déplacement relatif des sommets du pli. Le composant de verrouillage (en rouge sur Fig. 4.5) doit être à une distance au moins égale à ce déplacement de la base du mécanisme (en bleu) pour éviter toute contrainte sur la tour.

La rigidité intrinsèque des composants du mécanisme, notamment de son actionneur, a un impact sur la modification du comportement de la tour de Kresling. Avec des actionneurs souples, il sera effectivement possible de passer d'une configuration stable à une autre pendant que les mécanismes de rigidification sont activés. Mais le comportement de la tour sera modifié par la flexibilité du mécanisme. En d'autres termes, le niveau de compliance de l'actionneur permet différents types de changements dans la relation force-déplacement de la tour.

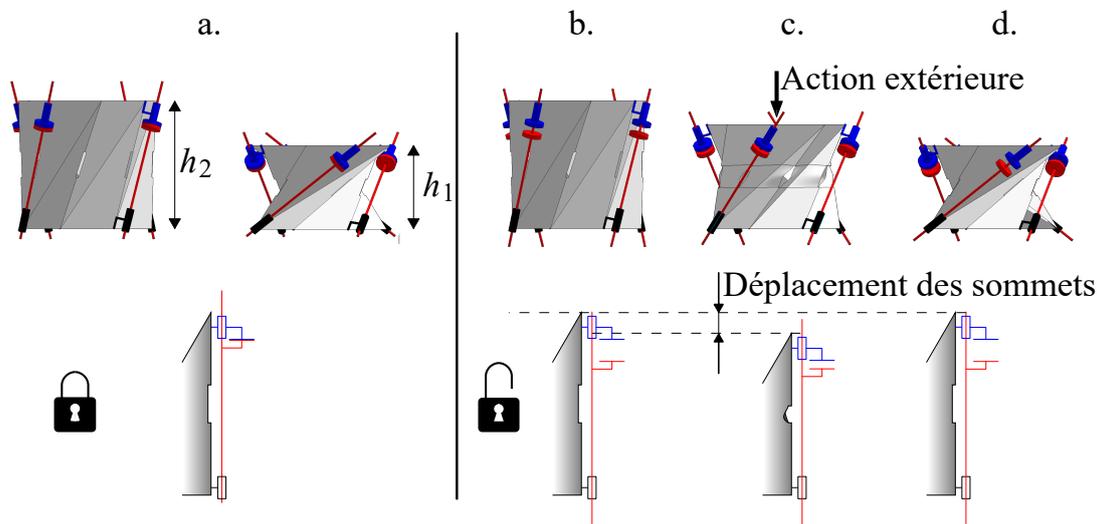


FIGURE 4.5 – Illustration du principe d'utilisation des mécanismes de rigidification.

4.3.2 Stratégies d'actionnement

Trois solutions distinctes sont envisagées pour évaluer l'importance du type d'actionnement, à savoir l'actionnement pneumatique, l'utilisation d'AMF et l'actionnement par moteur à courant continu (MCC). Elles sont choisies pour être très différentes en termes de rigidité, de dynamique et de technologies, tout en étant d'une compacité et une masse compatibles avec une intégration future sur une tour de Kresling.

L'actionnement pneumatique offre un niveau de compliance important grâce à la compressibilité de l'air. Pour la mise en œuvre (Fig. 4.6), un vérin de petite taille à simple effet est utilisé (CJPB4-10, SMC Corp). L'activation est obtenue en appliquant une pression dans le vérin entraînant la rigidification. L'utilisation des équations 3.2 nous permet de calculer un déplacement relatif entre les sommets d'environ 8 mm. La course du vérin est donc choisie égale à 10 mm. L'activation est quasi-instantanée et le mouvement lors de la désactivation est obtenu grâce au ressort de rappel du vérin pneumatique. Avec cette solution, il est possible de moduler la pression (jusqu'à 7 bars) et donc la force appliquée entre les extrémités du pli.

Le deuxième type d'actionnement est basé sur des fils d'AMF connus notamment pour leur compacité. Pour la mise en œuvre (Fig. 4.7), des fils de $375 \mu\text{m}$ sont utilisés (Flexinol LT $375 \mu\text{m}$, Muscle Wires®). Ils ont une déformation sous activation thermique par effet Joule de 3-5% et une force de traction de 22 N, selon les données du fabricant. En annexe B, nous avons fait le lien entre les propriétés matériau de l'AMF et l'état de rigidification du mécanisme en utilisant un exemple de séquence de fonctionnement du mécanisme. Pour l'intégration, une poulie est ajoutée afin d'utiliser la contraction du fil d'AMF dans la direction adéquate pour obtenir l'effet de rigidification. Tant que le fil est chaud, la tour est rigidifiée par le fil AMF qui tend à se contracter. Le temps d'activation est plus long qu'avec l'actionnement pneumatique, mesuré pour être de l'ordre de 10 secondes si l'on considère le temps de refroidissement donné par le constructeur. Le mouvement pendant la désactivation est assuré en introduisant manuellement une précontrainte initiale du fil.

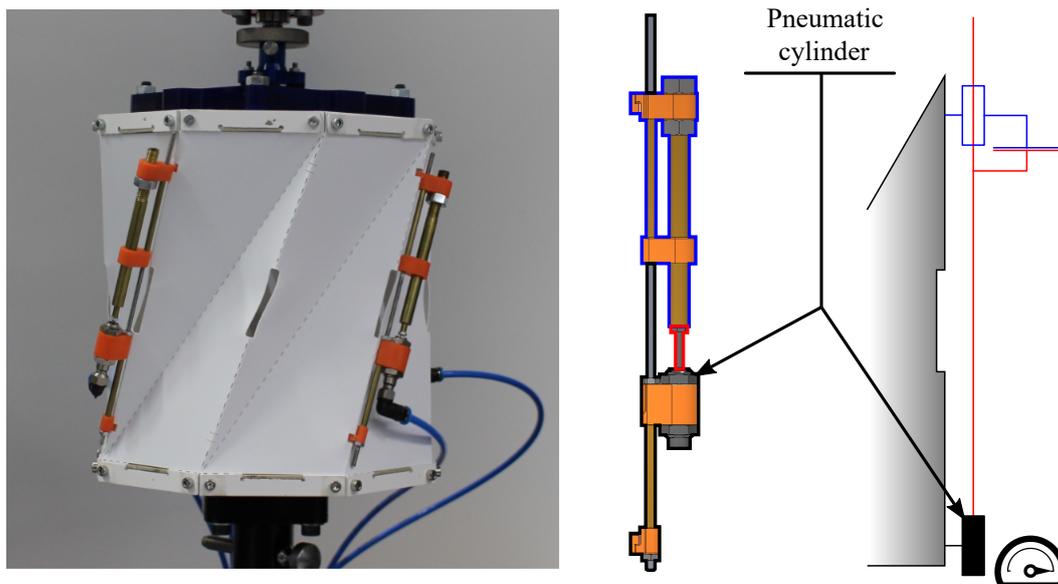


FIGURE 4.6 – Conception de mécanismes de rigidification avec actionnement pneumatique. Tour de Kresling modifiée (gauche), représentation CAO simplifiée (milieu) et schéma cinématique (droite).

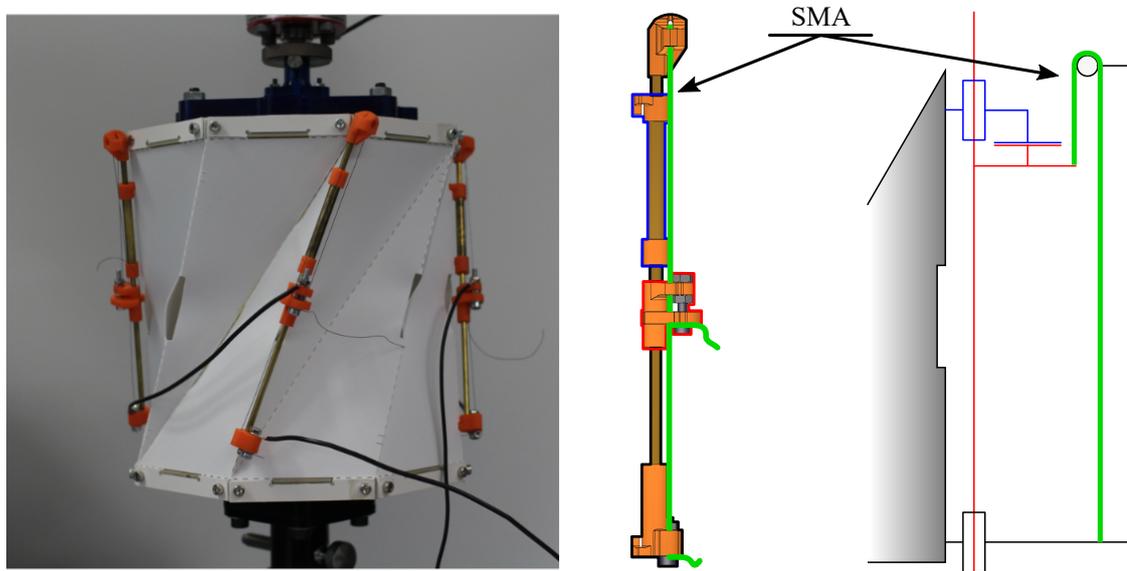


FIGURE 4.7 – Conception de mécanismes de rigidification avec actionnement par fils d'AMF. Tour de Kresling modifiée (gauche), représentation CAO simplifiée (milieu) et schéma cinématique (droite).

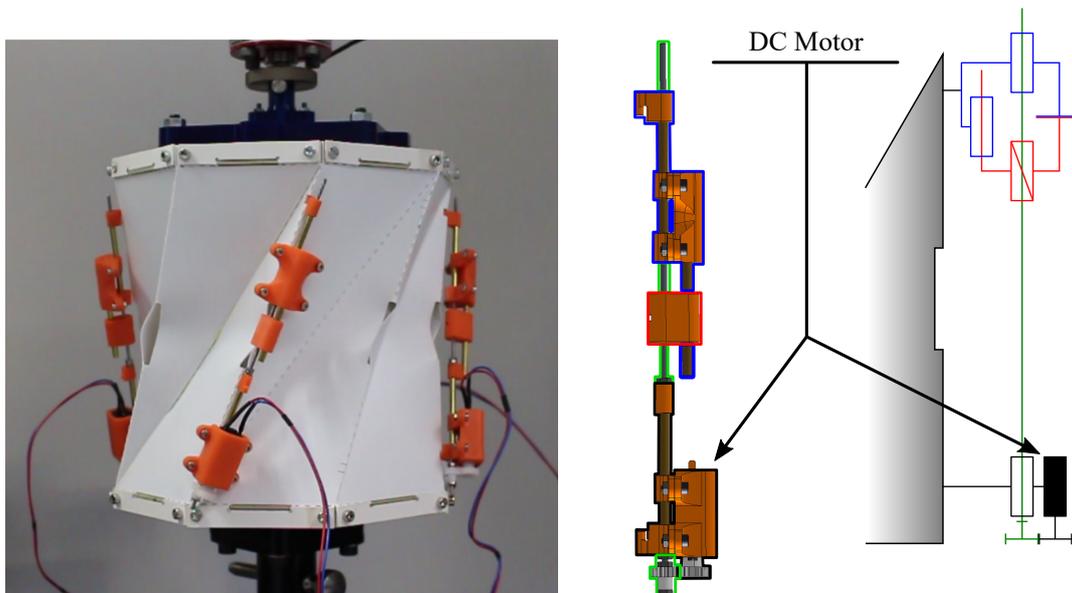


FIGURE 4.8 – Conception de mécanismes de rigidification avec actionnement par MCC. Tour de Kresling modifiée (gauche), représentation CAO simplifiée (milieu) et schéma cinématique (droite).

Enfin, un actionnement par moteur à courant continu est considéré. Pour la mise en œuvre (Fig. 4.8), une transmission vis-écrou est utilisée. Le moteur (RS Pro 834-7647) est un MCC à engrenage de 0,3 W qui peut générer un couple de 35 N.mm. Le système vis-écrou est non réversible et la transmission globale est beaucoup plus rigide qu'avec les deux autres stratégies d'actionnement. Le moteur est relié au système vis-écrou par un engrenage pour éviter les collisions avec les panneaux et les plis grâce à l'entraxe introduit. Le rapport de réduction lié à cet engrenage est de 0,83. Pour mettre le mécanisme en état actif, le moteur tourne pour mettre en place les butées : la partie mobile rouge (Fig. 4.8) est mise en contact avec la partie fixe bleue. Le courant dans chaque moteur est mesuré. Une fois en contact, un seuil est utilisé sur la mesure des courants des moteurs pour assurer un certain couple avant de couper l'alimentation. Enfin, pour mettre le mécanisme en état inactif, le moteur est utilisé pour faire reculer la pièce rouge, en utilisant une temporisation pour arrêter la rotation du moteur. Le mécanisme a besoin d'environ 3 minutes pour passer de son état inactif à son état actif.

4.4 Caractérisation expérimentale

4.4.1 Protocole

Lors des expérimentations précédentes au chapitre 3, nous avons relevé l'importance de prendre en compte le rodage et la viscoélasticité des tours. Les différentes tours ont été étudiées avec un même protocole, et notamment un même nombre de cycles de rodage. Ici, nous comparons différents mécanismes sur une même tour. La prise en compte du

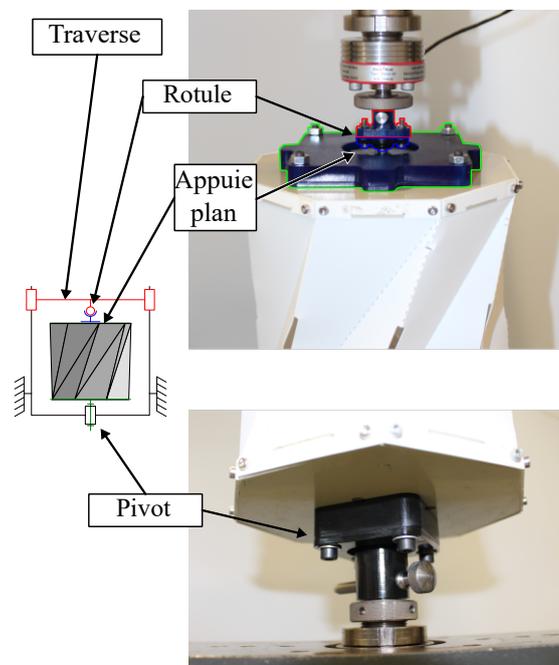


FIGURE 4.9 – Interface entre la tour de Kresling et la machine d’essai de traction.

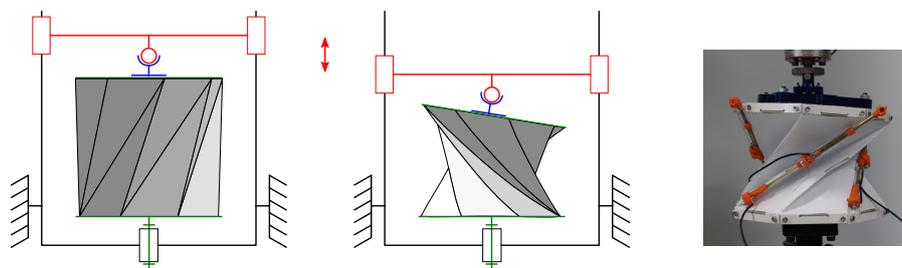


FIGURE 4.10 – Illustration de l’intérêt de l’ensemble reliant la tour à la machine de traction dans le cas d’un défaut de parallélisme.

rodage et du caractère viscoélastique doit permettre de garantir que leurs impacts sur les mesures sont non significatifs par rapport à l’impact des mécanismes. Nous ajustons donc notre protocole. Le comportement des prototypes est évalué à l’aide de la machine d’essai de traction (Zwick/Roell, Z005) introduite dans le chapitre précédent, avec le capteur de force (Zwick/Roell Xforce HP 500N). Le mouvement relatif entre la base et l’effecteur de la tour est assimilable à un mouvement hélicoïdal. Il a été observé que le parallélisme (Fig. 4.10) entre base et effecteur peut varier légèrement pendant le mouvement de la tour. Ainsi, un montage spécifique est construit pour connecter la tour de Kresling à la machine d’essai (Fig. 4.9). Il est composé d’une liaison rotule reliée en série à une liaison appui plan. Des cycles de traction-compression peuvent alors être appliqués aux prototypes de tour, en contrôlant la hauteur de la tour pendant les cycles. La plage de déplacement est choisie pour s’assurer que nous commençons au-dessus de la hauteur élevée de la tour h_2 et que nous descendons en dessous de la hauteur basse h_1 . Le contrôle de la vitesse de la traverse est réglé à 500 mm/min.

La viscoélasticité du PP a été décrite dans [Drozdov and Gupta, 2003]. Elle a été prise en compte dans la première phase expérimentale en utilisant des conditions identiques

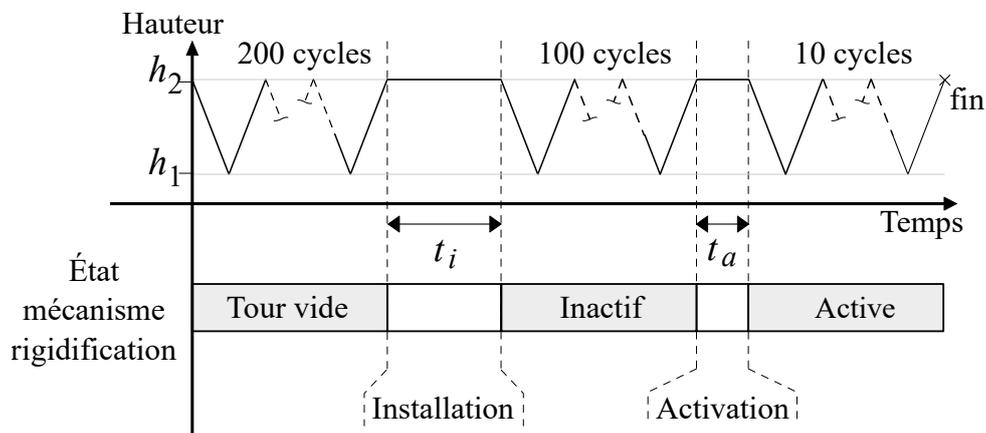


FIGURE 4.11 – Représentation simplifiée du protocole expérimental pour l'évaluation de l'impact du mécanisme de rigidification.

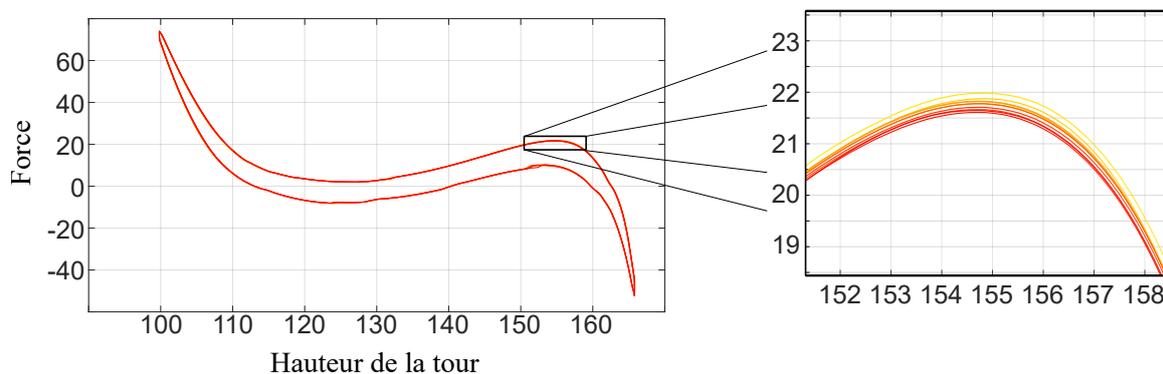


FIGURE 4.12 – Illustration des 10 dernières mesures de la phase 2 et leur répétabilité.

pour tous les prototypes. Dans cette seconde série de mesure, les mécanismes de rigidification ont des temps d'activation assez différents, donc le protocole expérimental (Fig. 4.11) est construit pour éviter tout biais. Le protocole est composé de 3 phases. Tout d'abord, une procédure de rodage de 200 cycles est effectuée. En effet, après la fabrication de la tour, la découpe réalisée guide la création du pli lors du premier pliage, mais la matière non découpée n'a pas encore été pliée. Lors des premiers pliages, la matière non découpée doit donc subir des déformations plastiques. Ces déformations ne posent pas de problème d'intégrité du pli, mais le comportement du pli s'en trouve modifié. Le rodage permet de garantir que les déformations plastiques sont toutes apparues avant de commencer les tests. Les mécanismes de rigidification sont ensuite montés. Un temps t_i d'au moins 2 heures est alloué à cette opération. La deuxième phase vise à stabiliser le comportement de la tour. La tour est soumise à 100 cycles, ce qui nous permet d'observer un comportement stable établi comme le montre la figure 4.12. Nous observons que sur les 10 derniers cycles, la variation sur la force de basculement est uniquement de 0,4 N. Nous estimons que cette variation est suffisamment faible pour considérer que la tour est stabilisée. Le dernier cycle est exploité pour évaluer la tour. Ensuite, les 4 exemplaires de chaque type de mécanisme de rigidification installés sur le prototype sont activés. Le temps d'activation est noté t_a . Après l'activation, 10 cycles sont effectués afin d'évaluer à nouveau la tour pendant que les mécanismes sont activés.

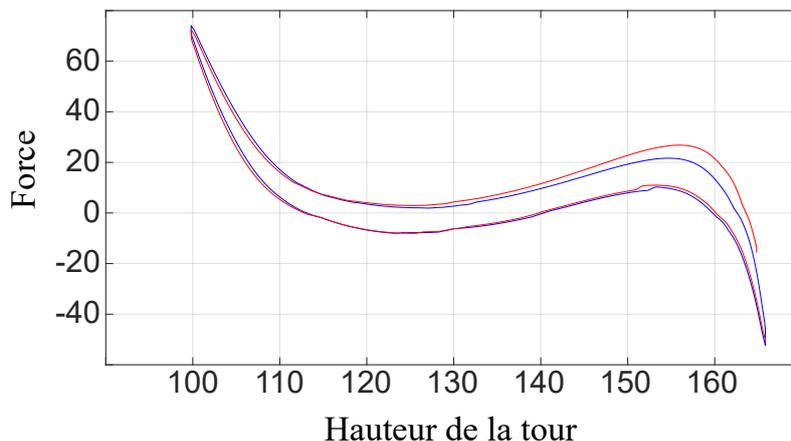


FIGURE 4.13 – Illustration de la différence sur le comportement de la tour sans mécanisme une fois stabilisée en bleu et après $t_a = 10s$ de temps de repos en rouge.

Les six valeurs d'intérêt sont estimées à partir des courbes force-déplacement (Fig. 4.2) : les hauteurs pour les configurations stables (h_1 et h_2), la rigidité autour de ces configurations (k_1 et k_2) et aussi la force de basculement FB_{21} (resp. FB_{12} pour passer de h_1 (h_2) à h_2 (h_1)). Elles sont obtenues en déterminant les coordonnées des points 1 à 4 sur la figure 4.2.

Le temps d'activation peut biaiser l'évaluation, à cause de la relaxation du PP (Fig. 4.13). Pour chaque prototype, le protocole est donc également réalisé pour la tour sans les mécanismes de rigidification, en utilisant le temps d'activation correspondant t_a comme temps de repos. Tous les résultats donnés dans le tableau 4.2 sont obtenus après avoir soustrait la variation de la force de basculement, de la rigidité et de la position de la configuration stable qui est due à la non-linéarité du PP. Les valeurs mesurées sur la tour après l'attente du temps de repos et utilisées pour quantifier la variation liée à la non-linéarité du PP sont données dans les lignes $t_a = 10s$ et $t_a = 3min$ de la tour sans mécanisme.

4.4.2 Résultats

Les résultats sont rassemblés dans le Tableau 4.2. Pour les mesures de hauteur, les différences Δh_1 et Δh_2 entre les valeurs mesurées et calculées à l'aide du modèle (3.4) sont rapportées. Pour l'actionnement pneumatique, il a été possible de faire basculer la tour plusieurs fois entre les deux configurations stables sans désactiver les mécanismes de rigidification. Ce n'était pas le cas pour l'actionnement avec les moteurs ni les fils d'AMF. La rupture de certains éléments de connexion avec la tour de Kresling s'est produite après 3 cycles pour l'actionnement par AMF et 1 cycle pour l'actionnement par moteur. Les résultats sont calculés en conséquence, en utilisant la tour de Kresling après le même nombre de cycles pour compenser l'impact du temps d'activation décrit ci-dessus. Les relations force-déplacement pour les trois stratégies d'actionnement sont représentées dans Fig. 4.14, 4.15 et 4.16. Pour l'actionnement du MCC, une légère discontinuité peut être observée autour de $h=125$ mm. Cela correspond à la rupture d'un élément de connexion après le point d'enregistrement 4 (Fig. 4.2). La rupture se produit après que toutes les caractéristiques

d'intérêt aient été relevées, elle n'est donc pas pénalisante pour l'évaluation.

Augmenter les dimensions des éléments de fixation signifie changer la forme du pli et risquer de modifier le comportement de l'origami. D'autre part, si la fixation est plus résistante, c'est la feuille de PP qui risque d'être endommagée. Nous préférons donc conserver ces fixations qui font également office de fusibles mécaniques et qui peuvent être remplacées facilement.

TABLE 4.2 – Résultats expérimentaux avec les 3 stratégies d'actionnement.

	Δh_2	Δh_1	k_2	k_1	FB_{21}	FB_{12}
	[mm]		[N/mm]		[N]	
Sans mécanisme						
/	3,7	6,8	5,1	1,3	21,6	-8,1
$t_a = 10s$	2,7	6,5	7,5	1,4	26,8	-8,0
$t_a = 3min$	1,8	5,9	9,5	1,2	34,45	-7,4
Actionnement pneumatique						
Inactif	3,7	6,0	4,9	1,4	21,5	-10,6
Actif (4bars)($t_a = 0$)	3,3	4,0	5,8	2,4	30,0	-13,8
Actif (7bars)($t_a = 0$)	2,5	2,1	9,0	2,6	33,4	-16,9
Impact (4bars)	11%	33%	19%	74%	26%	30%
Impact (7bars)	32%	65%	83%	89%	40%	59%
Actionnement AMF						
Inactif	3,6	6,0	5,0	1,5	21,6	-10,3
Actif ($t_a = 10s$)	3,2	3,8	6,7	3,1	37,2	-24,1
Impact	17%	37%	34%	107%	72%	134%
Actionnement MCC						
Inactif	4,5	5,3	5,3	1,5	21,6	-9,2
Actif ($t_a = 3min$)	4,1	0,6	108,3	4,3	67,2	-29,0
Impact	9%	88%	1953%	190%	211%	217%

Tous les mécanismes ont un impact significatif sur le comportement cinétostatique de la tour de Kresling. Tout d'abord, il est intéressant de noter que pour toutes les solutions, les positions des configurations stables h_1 et h_2 sont plus proches, après activation, des valeurs prédites avec le modèle (Tab. 3.2 et Tab. 4.2) : nous passons par exemple de 6,4% d'erreur relative sur la configuration basse sans mécanisme à 2,0% une fois le mécanisme à actionnement pneumatique activé avec 7 bars. Même si les erreurs relatives avant rigidification sont relativement faibles, de l'ordre de 5%, cela signifie que la présence de mécanismes de rigidification contribue à améliorer la précision de prédiction du modèle de tour de Kresling. L'intégration de mécanismes actifs le long des plis est utile, en particulier pour la configuration basse : nous pouvons noter en particulier qu'avec l'actionnement par MCC, l'erreur est presque annulée.

Pour toutes les solutions, nous sommes en mesure d'augmenter la force de basculement dans les deux directions de fonctionnement de la tour. Nous observons que l'augmentation de la force de basculement est corrélée à la rigidité de l'actionneur utilisé par le mécanisme. Cela entraîne également une augmentation des sollicitations aux encastresments des mécanismes, ce qui explique l'endommagement des éléments de fixations pour les deux

mécanismes les plus rigides lorsqu'ils restent activés pendant le mouvement de la tour. La valeur de la force de basculement dans les deux directions est triplée avec l'actionnement par MCC. L'actionnement pneumatique permet de faire varier le gain de rigidification en fonction de la pression de fonctionnement. L'actionnement par AMF a un impact important, de l'ordre 100% en moyenne sur les deux forces, tout en étant très intéressant en termes d'encombrement et de poids.

Concernant la raideur autour des deux configurations stables, le gain peut être très important puisque le mécanisme de rigidification actionné par MCC multiplie par vingt la raideur autour de la configuration haute. Ce comportement montre la capacité de ce mécanisme à être utilisé comme une solution de verrouillage, pour empêcher le changement de configuration de se produire. En ce qui concerne le mécanisme de rigidification avec actionnement par AMF, nous notons une augmentation relativement faible de la rigidité dans la configuration haute. Par ailleurs, l'intégration de fils d'AMF est plus délicate en raison de son comportement lorsqu'il est en interaction avec un élément souple, tel que le pli de l'origami. Pour cette solution, le jeu mécanique présent dans le prototype peut expliquer l'impact inférieur à nos attentes notamment pour la raideur en configuration haute. Comme pour la force de basculement, l'ajout progressif de pression dans le vérin permet d'ajouter progressivement de la raideur dans les configurations stables.

Nous notons que la modification des caractéristiques de la tour de Kresling apportée par les mécanismes de rigidification est toujours plus importante pour la configuration basse que pour la configuration haute. Nous observons que la déformation des plis est visuellement plus importante dans la configuration basse lorsque le mécanisme n'est pas activé. Une hypothèse est que l'activation des mécanismes réduit les déformations des panneaux et des plis. Le comportement de l'origami tend à se rapprocher de celui modélisé, où il est considéré en décrivant l'origami à l'aide de barres rigides.

4.5 Synthèse

Avec le modèle en 3.4, le motif de la structure peut être défini en fonction des besoins géométriques ou cinématiques. La force de basculement est alors réglée indépendamment du patron et du matériau grâce à l'ouverture du pli en 3.5. Dans ce chapitre, nous avons montré qu'il est possible de modifier la raideur et plus généralement les propriétés cinétostatiques de la tour de Kresling, un origami non rigidement pliable, en intégrant des mécanismes actifs le long de certains plis. La modification de la raideur axiale des plis a un fort impact sur la raideur et la force de basculement de la tour tout en améliorant la maîtrise de la position des configurations stables. L'ajout d'un mécanisme de rigidification permet de moduler activement le comportement cinétostatique de la structure. Cet ensemble d'outils permet d'augmenter la capacité d'intégration de la tour de Kresling dans des systèmes robotiques. En effet, ces outils agissent de manière indépendante sur des caractéristiques d'intérêt de la tour permettant de concevoir sans compromis un mécanisme basé origami répondant à un besoin spécifique.

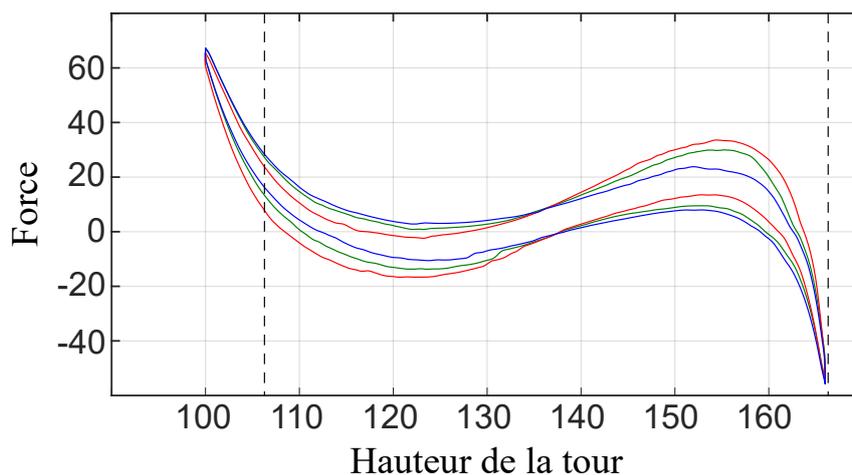


FIGURE 4.14 – Résultats expérimentaux avec l'actionneur pneumatique. Résultats avec le mécanisme inactif en bleu, en vert avec activation à une pression de 4 bars et en rouge avec une pression de 7 bars. Les lignes pointillées correspondent à la valeur théorique des configurations stables.

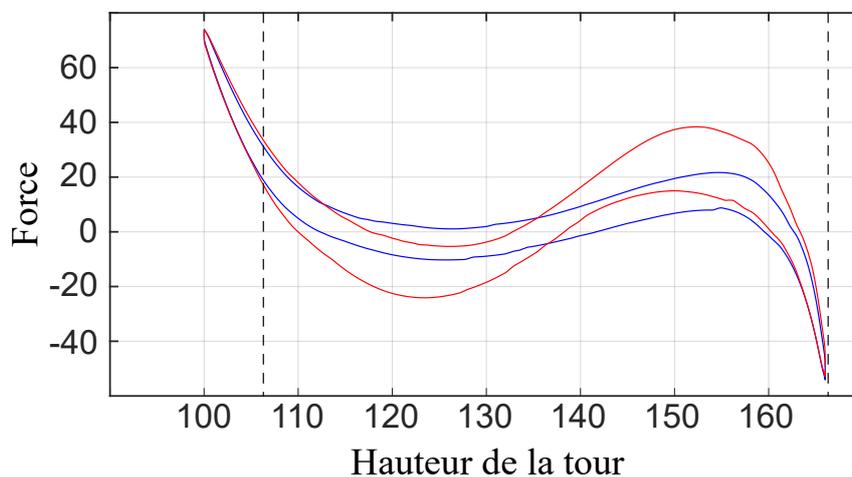


FIGURE 4.15 – Résultats expérimentaux avec l'actionnement basé sur l'AMF. Résultats avec le mécanisme inactif en bleu, en rouge avec l'activation.

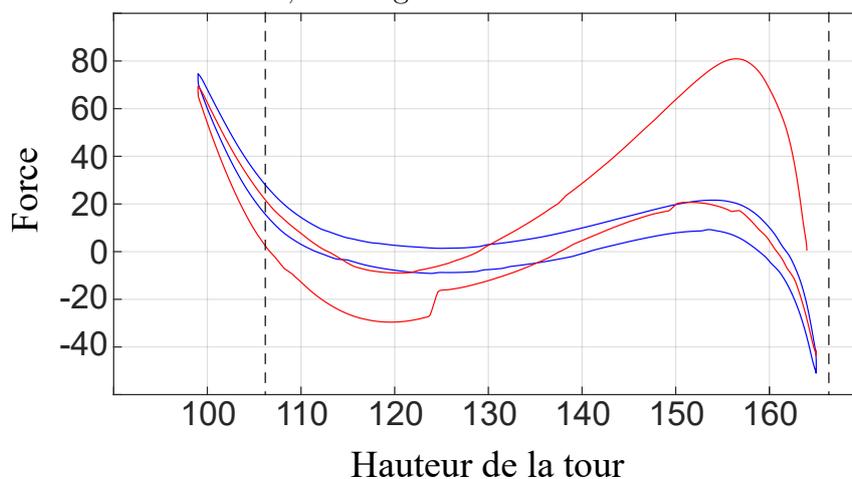


FIGURE 4.16 – Résultats expérimentaux avec l'actionnement du MCC. Résultats avec le mécanisme inactif en bleu, en rouge avec l'activation.

Chapitre 5

Exploitation pour la robotique mobile

5.1 Introduction

Comme nous l'avons évoqué en introduction, les travaux de cette thèse s'inscrivent dans le contexte d'un projet ayant pour objectif de concevoir un robot exploratoire à locomotion multimodale utilisant les origamis. Pendant cette thèse, nous avons cherché à explorer les possibilités d'utiliser des structures origami pour réaliser différentes fonctions d'intérêt pour la robotique mobile.

Le travail réalisé dans le chapitre 2 pour obtenir un mécanisme polyarticulé à grande déployabilité inspiré du Flasher nous permet d'envisager la conception d'une roue à géométrie variable. Cette roue peut en effet profiter de la grande déployabilité et du changement de forme offert par le Flasher, tout en étant capable de supporter le poids d'un robot grâce à la rigidité apportée par l'utilisation d'un mécanisme polyarticulé. Ces propriétés sont exploitées dans la section 5.2 pour concevoir une roue qui change de forme et/ou de diamètre en fonction de la configuration du mécanisme.

Par ailleurs, nous avons travaillé en collaboration avec l'ISM pour concevoir un drone volant monorotor. Ce type de drone souffre du couple de réaction du moteur, qui entraîne une rotation sur lui-même à grande vitesse. Si aucune action n'est mise en place pour contrôler cette rotation, elle peut rendre impossible le contrôle du drone. Nous envisageons d'utiliser une tour de Kresling munie d'ailerons pour stabiliser cette rotation. Les deux états stables de la tour peuvent alors permettre d'avoir des configurations répétables pour les ailerons exploités pour avoir deux types de vol. La bistabilité de la tour permet de plus un maintien dans des états sans apport d'énergie. Le fonctionnement et l'implémentation de cette solution basée origami sont développés en section 5.3.

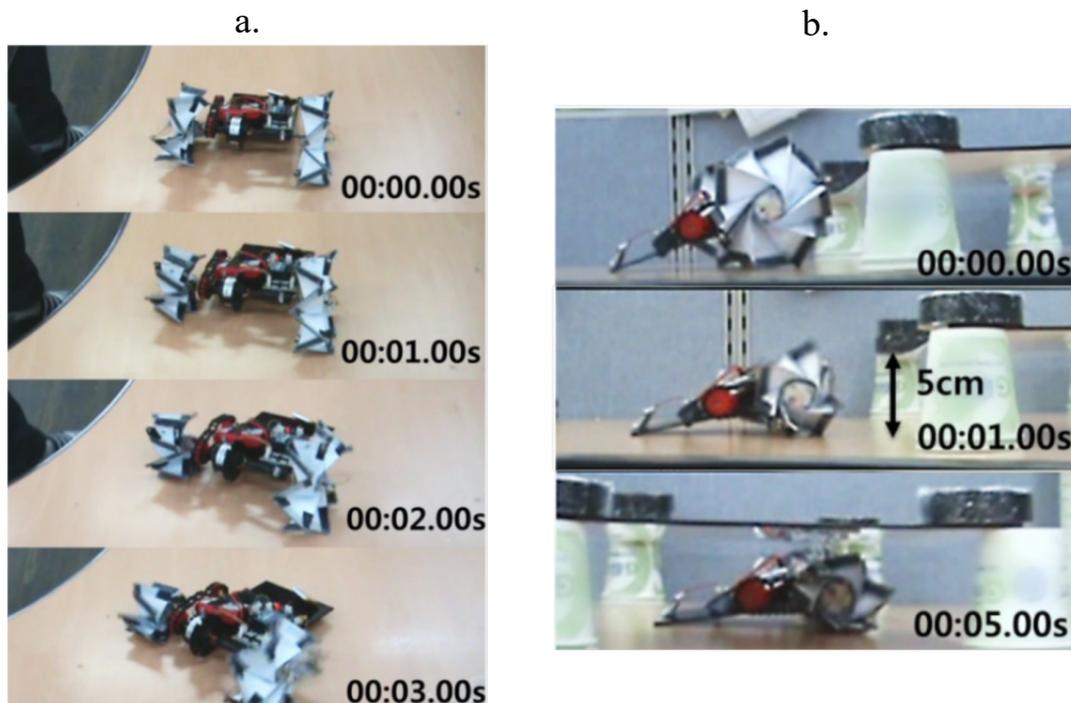


FIGURE 5.1 – Illustration de la rotation du robot dans [Lee et al., 2013a] avec la différence de diamètre des roues en a. Illustration du franchissement d’obstacles de hauteur faible en b.

5.2 Conception d’une roue à géométrie variable inspirée du Flasher

5.2.1 Contexte

Le mécanisme conçu dans le chapitre 2 possède une grande déployabilité et un changement de forme semblable au Flasher dont il est inspiré. Il bénéficie également d’une rigidité importante grâce à sa conception sous la forme d’un mécanisme polyarticulé.

L’intérêt d’exploiter le changement de forme dans le contexte d’un drone à locomotion multimodale est double. Premièrement, dans un mode volant tel que nous l’envisageons en introduction (Fig. 1), il permet de placer la structure dans une configuration favorable au vol en minimisant la surface de la structure. Ainsi, l’écoulement de l’air est favorisé, que ce soit par rapport au flux des propulseurs générant la poussée ou par rapport aux courants d’air extérieurs qui perturbent le drone. Le second intérêt est d’améliorer la mobilité dans un mode roulant. Dans la littérature, on trouve ainsi des exemples de robots utilisant des roues à diamètre variable pour améliorer le franchissement lorsqu’il s’agit de passer sous des obstacles de petites tailles comme dans [Lee et al., 2013a]. Dans cet article, la variation du diamètre des roues avec un mécanisme semblable au Flasher est suffisamment importante pour faire tourner le robot de $1.2^\circ/\text{cm}$ (Fig. 5.1a). Par ailleurs, comme le montre la figure 5.2, la capacité de franchissement d’un robot sur terrain accidenté est améliorée lorsque le diamètre des roues est plus grand. En effet, la pente équivalente à monter pour franchir est plus faible (en vert en Fig. 5.2) pour les

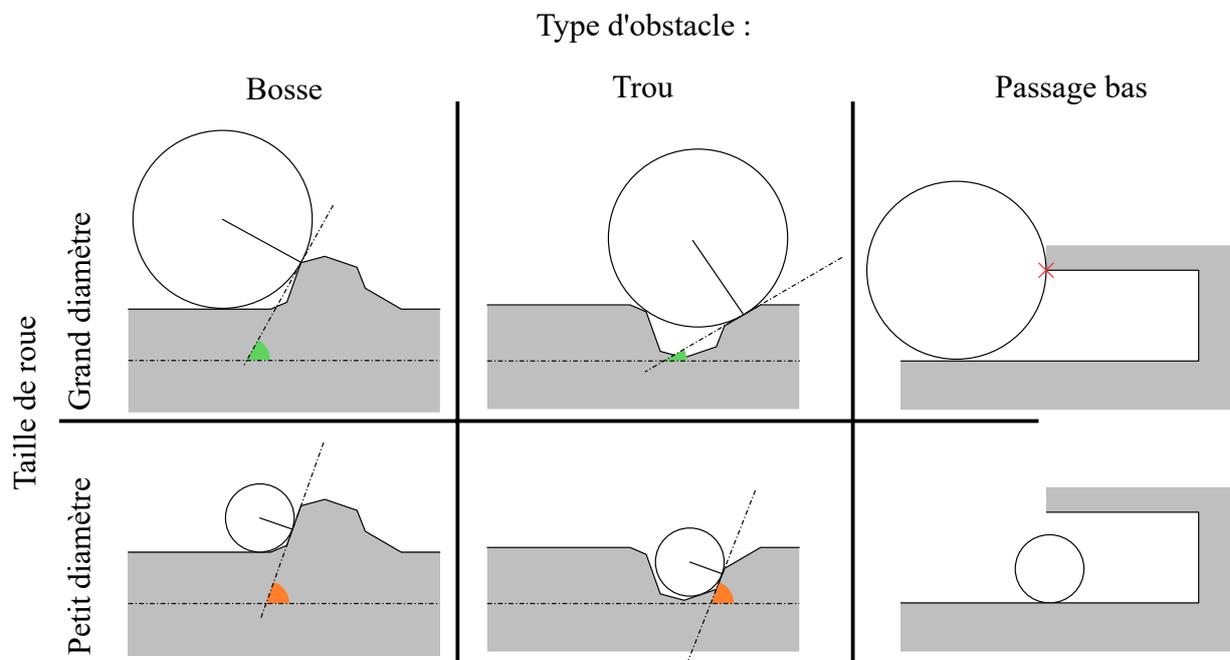


FIGURE 5.2 – Illustration du franchissement d'obstacle avec des roues de diamètres différents. Les angles représentés en vert et en orange sont les pentes équivalentes pour franchir l'obstacle.

roues à grand diamètre. Selon ce principe, les roues dans [Lee et al., 2021] (Fig. 5.3) ont un grand diamètre lorsque le terrain est accidenté et un diamètre plus petit lorsque le terrain le permet. Le changement de forme est aussi exploité pour faire sortir des crampons lors de la configuration pour terrains accidentés. Dans [Lee et al., 2017a], les auteurs utilisent la même structure et vont plus loin en proposant une roue hybride (Fig. 5.4) entre une roue cylindrique et une roue à jambes. Il est communément admis que les roues à profil circulaire permettent aux robots mobiles de se déplacer rapidement sur les terrains plats tandis que les roues à griffes ou roues à jambes permettent de franchir des obstacles plus facilement. On trouve dans la littérature de nombreux travaux de conception de roues à géométrie variable pour bénéficier des deux modes de locomotion. Sur la figure 5.5 issue

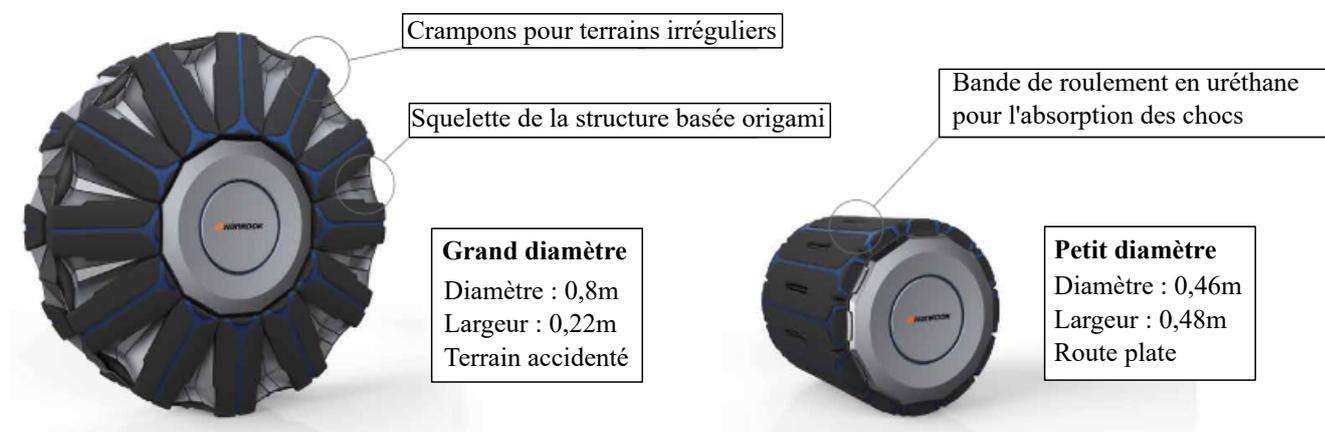


FIGURE 5.3 – Illustration des deux configurations de la roue issue et traduit de [Lee et al., 2021].

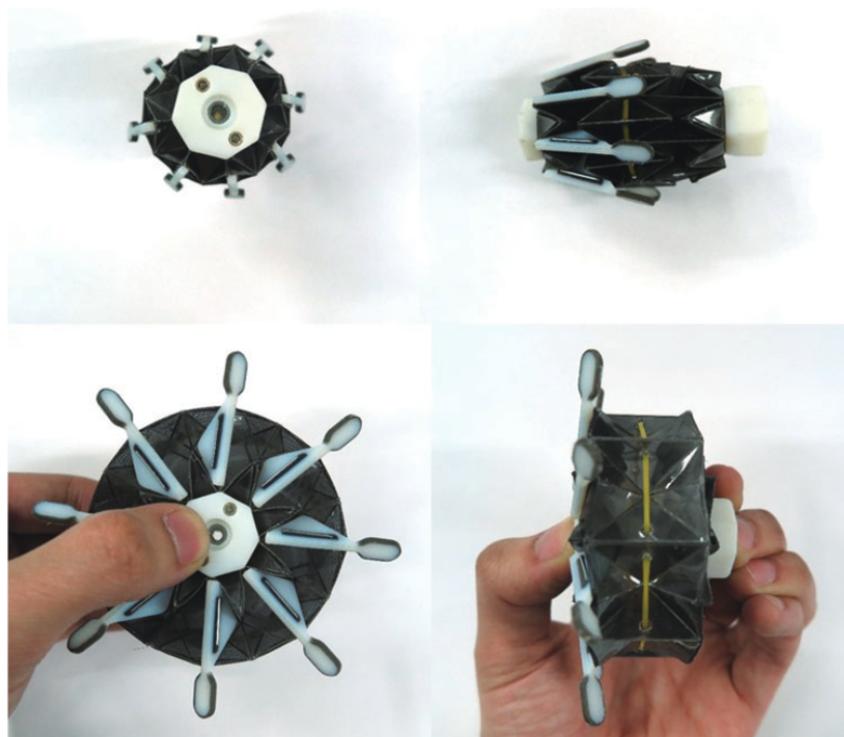


FIGURE 5.4 – Illustration de la roue à géométrie variable entre roue cylindrique et roue à jambes dans [Lee et al., 2017a]

de [Mertyüz et al., 2020], il y a neuf solutions de roue à géométrie variable permettant de passer d'un profil circulaire vers un profil à griffes ou à jambes. Dans le cadre de l'exploration en milieu urbain après une catastrophe, comme évoqué en introduction, le robot peut avoir à franchir certains types d'obstacles en passant par dessous et non par dessus, comme illustré dans le cas du passage bas en figure 5.2. Ce cas est traité dans [Lee et al., 2013a] et illustré dans la figure 5.1 b. où l'on voit le diamètre des roues du robot réduire pour permettre de passer en dessous d'un obstacle de 5 cm de hauteur.

Les exemples ci-dessus nous montrent qu'il n'existe pas un diamètre ni une forme optimale pour tous les types d'obstacles, ce qui justifie l'utilisation d'une roue à géométrie variable pour améliorer la capacité de franchissement et la mobilité d'un robot roulant. De plus, le diamètre d'une roue a aussi un impact sur le couple de traction et la vitesse de déplacement du robot. Faire varier le diamètre des roues latérales de manière indépendante peut aussi permettre à un robot de tourner sans utiliser d'actionneur supplémentaire pour la direction comme dans [Lee et al., 2013a]. Enfin, selon le milieu dans lequel évolue le robot, l'ajout d'éléments faisant office de crampons ou même de jambes pour améliorer l'adhérence et le franchissement peut s'avérer utile. Compte tenu de la variété de besoins sur les roues à géométrie variable, nous avons mis en place une démarche pour faciliter la conception de ce type de roue inspirée du Flasher utilisant le mécanisme conçu dans le chapitre 2. Deux exemples de roues à géométrie variable conçues avec cette démarche sont présentés, chacun destiné à une application spécifique. Ils permettent de discuter de l'applicabilité de la démarche.

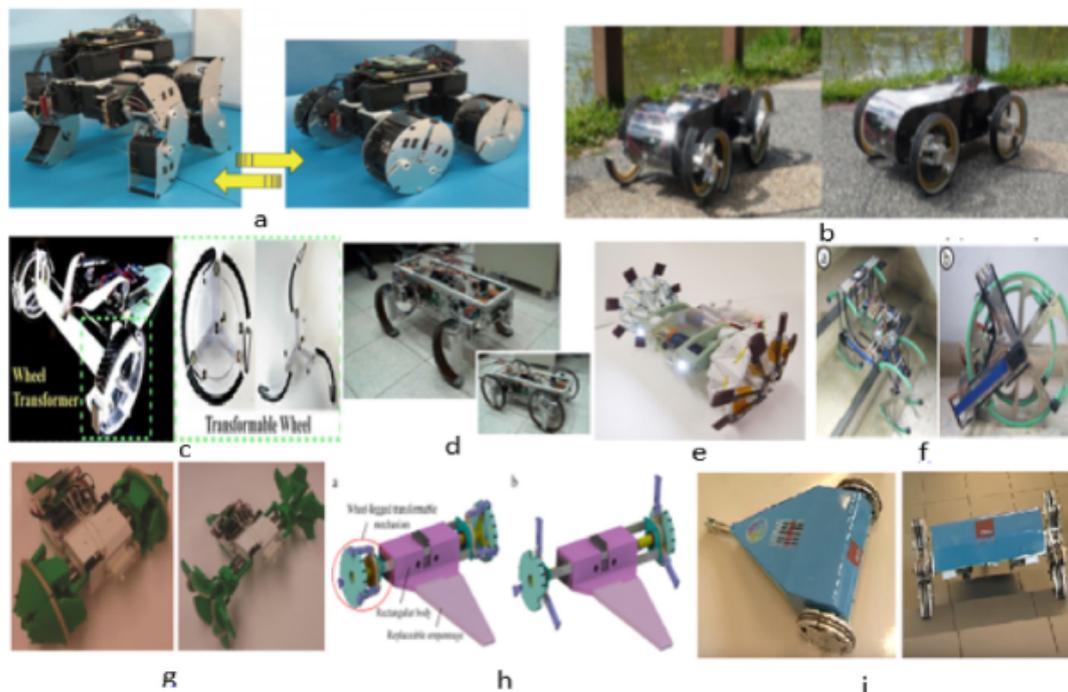


FIGURE 5.5 – Illustration issue de [Mertyüz et al., 2020] citant 9 solutions de roue à géométries variables issues de la littérature.

5.2.2 Démarche de conception d'une roue à géométrie variable inspirée du Flasher

La démarche que nous avons mise en place est présentée ici. Elle s'appuie sur un outil CAO pour élaborer une solution en fonction des contraintes spécifiques de forme devant être gérées. Une discussion sur la généralité de la démarche est proposée après que sa mise en œuvre soit décrite en 5.2.3.

Étape 1 : Identification des zones fonctionnelles

L'identification des zones fonctionnelles nous permet de ne pas ajouter de volumes aux endroits nécessaires au bon fonctionnement du mécanisme. Les zones fonctionnelles pour cet origami correspondent aux surfaces qui se retrouvent en contact les unes avec les autres entre les deux configurations. Par exemple, pour les pièces B et B' respectivement rouge et marron sur la figure 5.6, les surfaces visibles dans la configuration plane en vue de dessus se retrouvent en contact dans la configuration pliée. Pour ces surfaces, nous considérons impossible l'ajout de volumes au sens d'une extrusion normale à la vue en sortant du plan. Par conséquent, sur la figure 5.6, nous avons repéré en noir les zones dans lesquelles il n'est pas possible d'ajouter des volumes. Par ailleurs, il est possible d'ajouter des volumes de manière parallèle au plan de la vue. Ainsi, bien que dans la vue de dessus en configuration plane l'ensemble de la structure soit noirci, l'ajout de volume est toujours possible. C'est ce que nous faisons lors de l'étape 2.

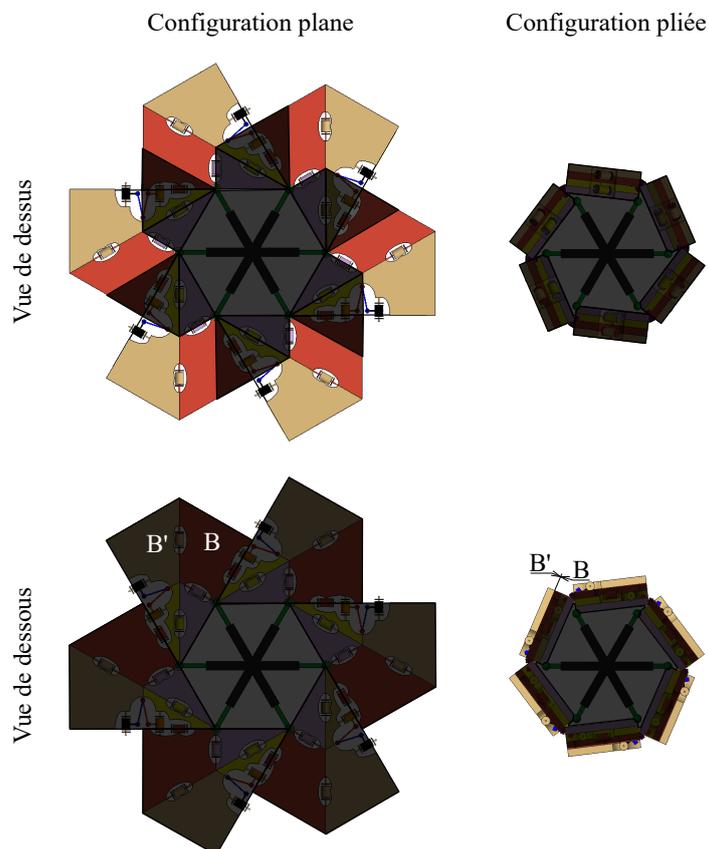


FIGURE 5.6 – Illustration du mécanisme avec les zones fonctionnelles sur lesquelles il n'est pas possible d'ajouter de volumes

Étape 2 : Ajout des volumes

Dans l'étape précédente, les volumes qui ne peuvent pas être modifiés ont été identifiés. Nous allons maintenant passer à l'ajout de volume pour donner au mécanisme la forme souhaitée. Dans cette étape, il s'agit donc de « modeler » ces solides selon le besoin. Il est aisé de travailler dans la vue de dessus qui donne directement le profil durant le roulage. Dans un premier temps, nous choisissons arbitrairement de modifier la forme des solides dans la configuration plane.

Ensuite, en Fig. 5.7b, nous plaçons le mécanisme dans la configuration pliée. Nous modifions alors les volumes pour donner la forme souhaitée au mécanisme dans cette seconde configuration comme illustré en figure 5.7b.

Enfin, une vérification est nécessaire pour s'assurer que les zones des solides donnant les formes externes dans les deux configurations ne sont pas dépendantes. Si elles sont dépendantes, la modification de forme dans la configuration pliée modifiera aussi la forme dans la configuration plane. Deux choix sont alors possibles : i) s'accommoder de la dépendance et avoir des formes qui ne respectent pas entièrement le besoin initial, ii) effectuer une itération en changeant la manière d'ajouter des volumes. Sans constituer une preuve, les exemples en 5.2.3 montrent l'obtention de solutions lors de cette étape pour les formes souhaitées.

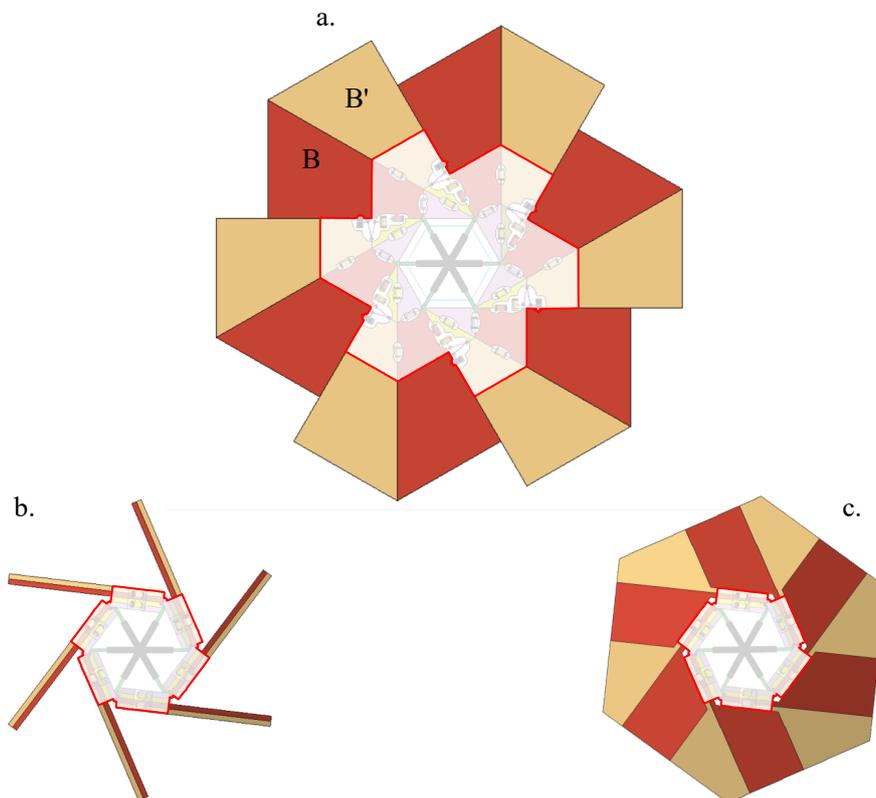


FIGURE 5.7 – Illustration des étapes d'ajout de volume pour modifier la forme de la roue. La forme blanche semi-transparente au centre illustre la forme de l'origami avant la modification de forme.

Étape 3 : Gestion des interférences pendant le déploiement.

L'outil de détection des interférences intégré au logiciel CREO est utilisé. Il permet de repérer les interférences qui apparaissent lors du déploiement comme en figure 5.8a. Pour utiliser cet outil, le déploiement est discrétisé. Plus le découpage est fin, plus l'analyse demande un temps de calcul conséquent. Cependant, si le découpage de la séquence de déploiement est trop grossier, nous risquons de rater certaines interférences. Lorsqu'une interférence est détectée, nous supprimons le volume qui pose problème. Lorsque toutes les interférences ont été gérées (Fig. 5.8b), nous obtenons un mécanisme déployable (Fig. 5.9) à géométrie variable fonctionnel. Cependant, il est possible que les volumes retirés aient un impact sur les formes initialement définies en configurations plane et plié. Il revient alors au concepteur de conserver ce mécanisme ou d'effectuer une itération pour retourner à l'étape 2 en modifiant la manière d'ajouter les volumes initiaux.

5.2.3 Exploitation

Dans cette section, nous utilisons la méthode développée pour réaliser deux types de roues à géométrie variable. La première doit avoir deux diamètres différents entre les configurations plane et pliée du mécanisme pour s'adapter aux différents types d'obstacles (Fig. 5.2). La seconde doit avoir des griffes et un petit diamètre dans la configuration pliée et un profil circulaire avec un grand diamètre dans la configuration plane. Cela permet

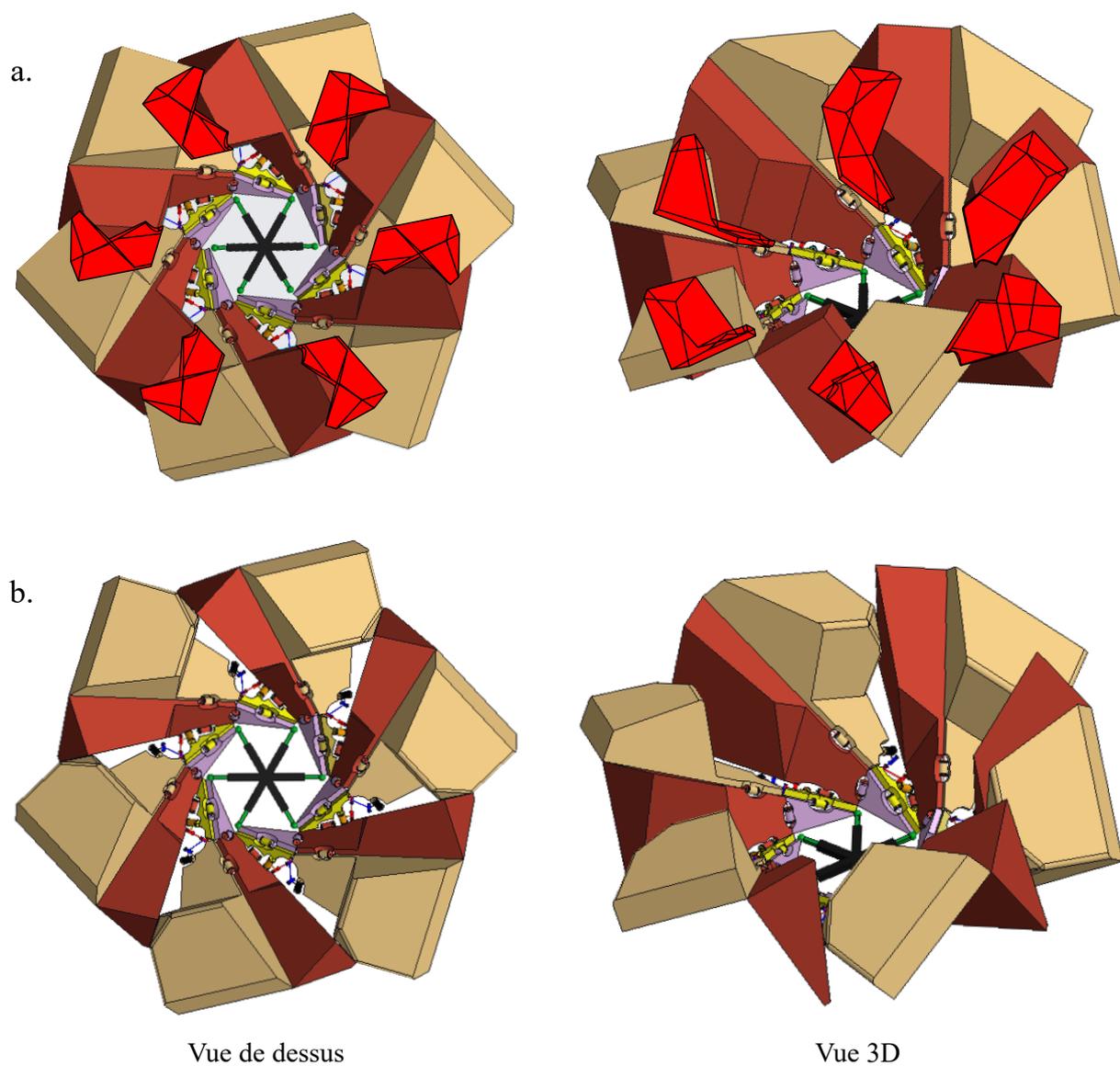


FIGURE 5.8 – Illustration du mécanisme avec les volumes en interférence en rouge en a. et une fois les interférences traitées en b.

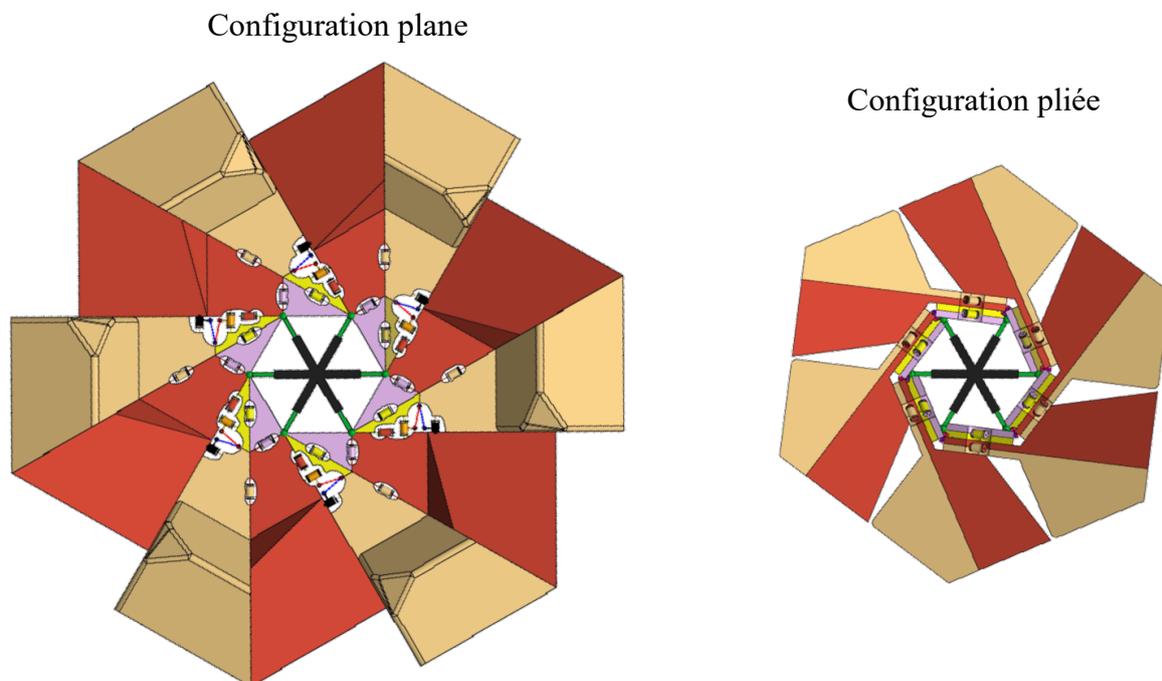


FIGURE 5.9 – Illustration du mécanisme dans les configurations extrêmes après traitement des interférences.

d'évoluer sur terrains accidentés avec une meilleure adhérence et avec un couple plus important, puis sur un terrain plat avec une vitesse plus importante.

Cas 1 : conception d'une roue à diamètre variable

Nous avons d'abord utilisé la démarche pour concevoir une roue à profil circulaire et à diamètre variable. Ce que nous présentons dans la suite correspond au résultat lors de la deuxième itération de la démarche. En effet, après une première itération, la roue obtenue n'est qu'approximativement circulaire dans la configuration plane (annexe C, 5.24). Nous avons alors repris la démarche en changeant les modifications de forme de l'étape 2 dans l'objectif d'obtenir une roue à profil circulaire dans les deux configurations.

Nous avons utilisé la forme des cercles circonscrits pour l'étape 2 qui conduit à ajouter le volume comme illustré en figure 5.10. En figure 5.10 a, nous ajoutons du volume dans la configuration plane pour donner au mécanisme un profil circulaire. Puis en figure 5.10 b, nous plaçons le mécanisme en configuration pliée. Nous observons alors l'impact de l'ajout de volume dans cette configuration. En figure 5.10 c, nous modifions la forme pour obtenir un profil circulaire. Enfin, en figure 5.10 d, nous plaçons le mécanisme en configuration plane pour vérifier si la modification de forme en configuration pliée a impacté la forme de la configuration plane. Après vérification, nous retirons une partie du volume ajouté en figure 5.10 c. qui dépasse du cercle en configuration plane.

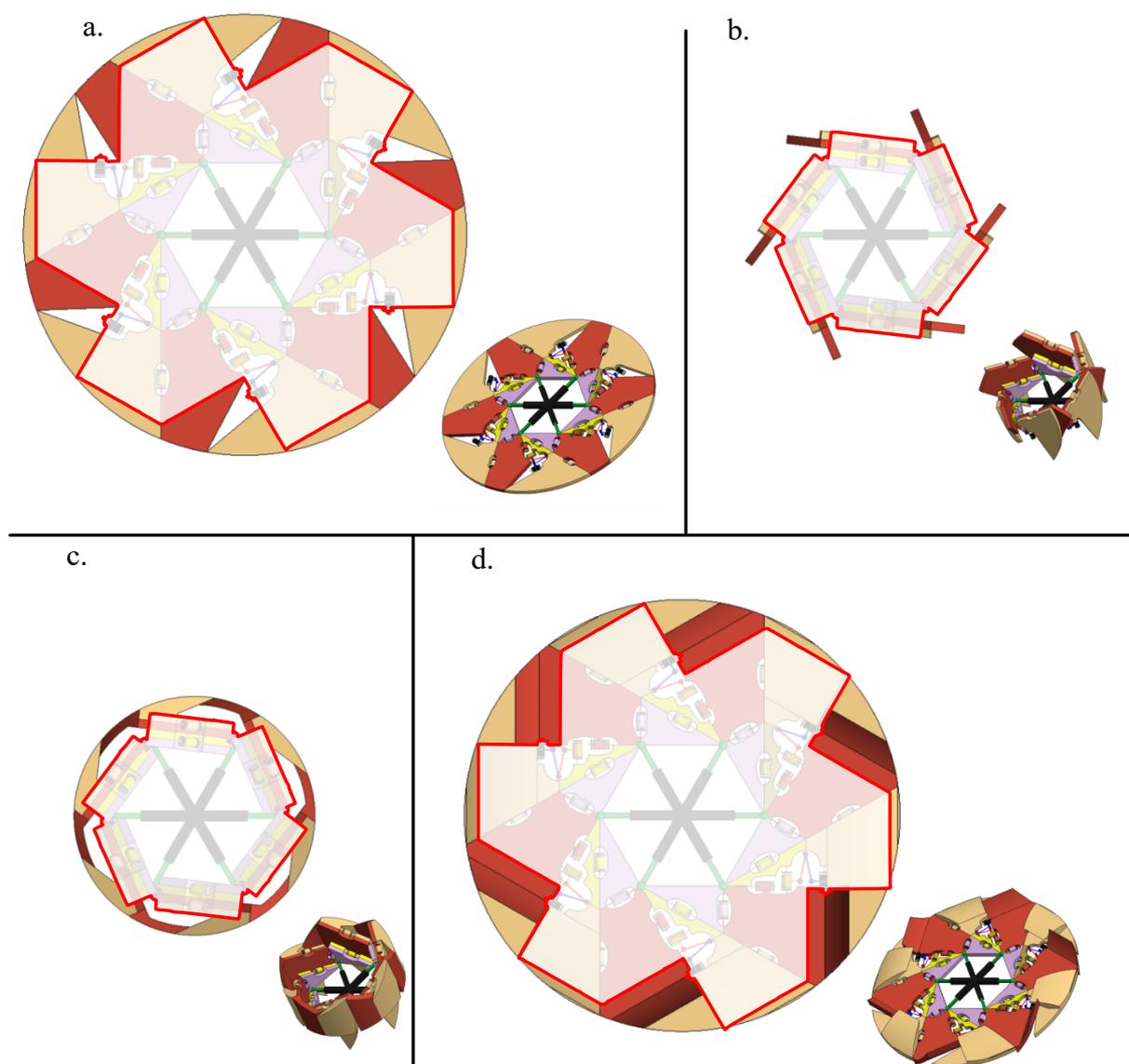


FIGURE 5.10 – Illustration de l'étape 1 d'ajout de volume pour obtenir un profil circulaire en configuration plane et en configuration pliée. En blanc semi-transparent, nous illustrons la forme du mécanisme avant l'ajout de volume. La première ligne est en vue de dessus et la seconde en vue 3D.

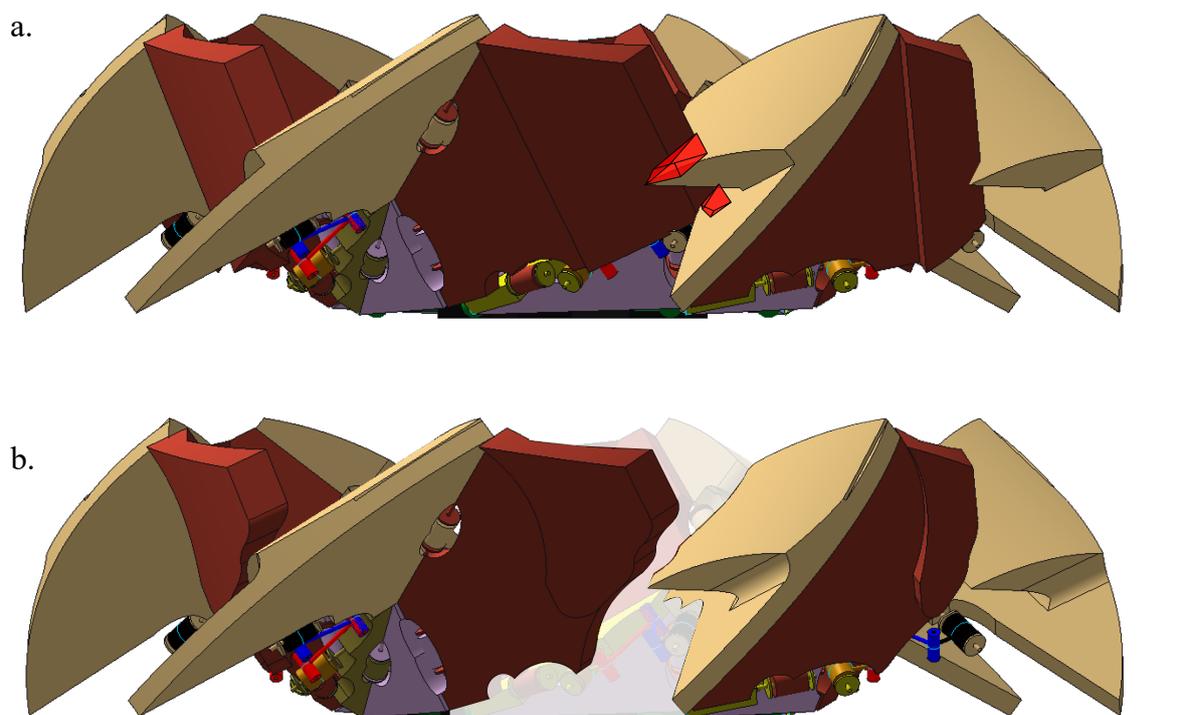


FIGURE 5.11 – Illustration du mécanisme dans une configuration intermédiaire. L'interférence est illustrée en rouge en a. en b, les panneaux sont modifiés pour ne plus avoir d'interférences.

Nous passons ensuite à l'étape 2. Le mécanisme est ensuite déployé pour passer de la configuration plane à la configuration pliée. Nous détectons des interférences lors du déploiement comme en figure 5.11 a. Nous enlevons alors les volumes responsables de l'interférence en Fig. 5.11b.

Le mécanisme final est illustré en figure 5.12. Le ratio entre les deux diamètres est alors de 1,86. Nous avons donc presque doublé le diamètre de la roue entre les deux configurations. Pour donner une valeur de comparaison, la roue dans [Lee et al., 2021] possède un ratio entre ses deux diamètres extrêmes de 1,7.

Cas 2 : conception d'une roue à griffes rétractables

Nous utilisons maintenant la démarche pour concevoir une roue à géométrie variable où le changement de configuration permet de changer le profil de la roue et le contact avec le sol. Nous souhaitons passer d'une roue à griffes de faible diamètre pour franchir les terrains accidentés avec un couple important vers une roue circulaire de grand diamètre pour se déplacer rapidement sur terrains plats.

En suivant l'étape 2 de la démarche, nous ajoutons du volume dans la configuration pliée (Fig. 5.13a) du mécanisme pour réaliser les griffes. Puis nous plaçons le mécanisme dans la configuration plane (Fig. 5.13 b). Dans cette configuration, nous avons modifié les volumes pour donner un profil circulaire. Lors de l'étape 3 pour cette roue, aucune interférence n'a été détectée. La roue ainsi obtenue est illustrée en figure 5.13.

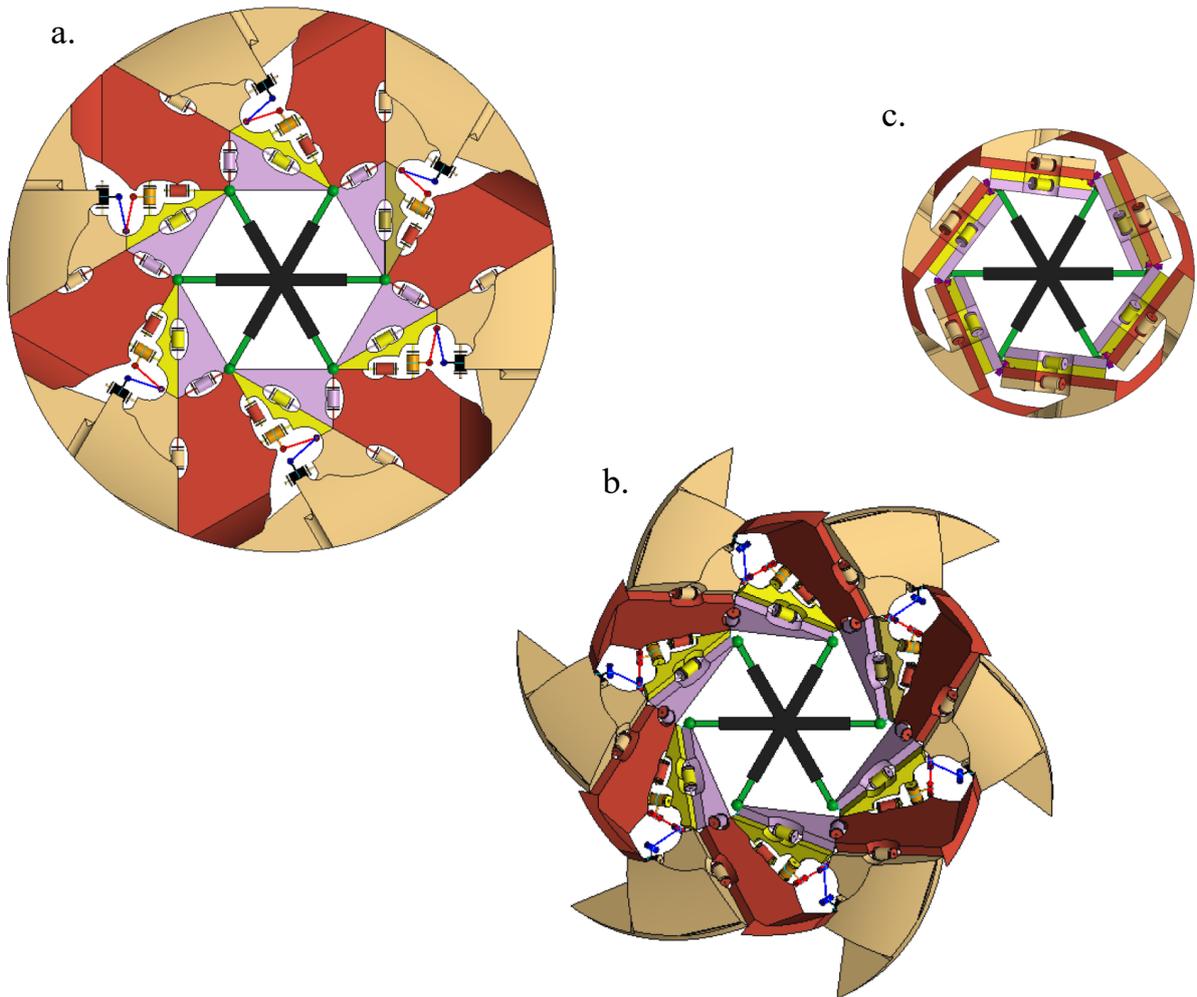


FIGURE 5.12 – Illustration du mécanisme permettant de réaliser une roue à diamètre variable dans la configuration plane en a, configuration intermédiaire médiane en b. et configuration pliée en c.

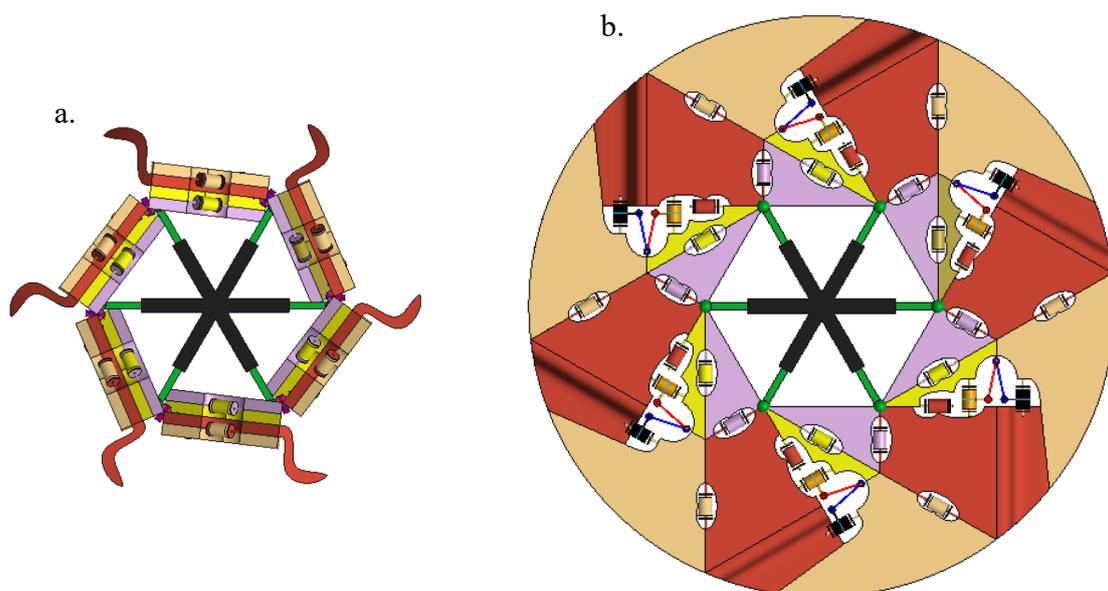


FIGURE 5.13 – Illustration de la roue à griffes rétractables.

5.2.4 Synthèse

Dans cette section, nous avons proposé une démarche pour faire varier la forme du mécanisme inspiré du Flasher. Cette démarche en trois étapes vise à donner la forme souhaitée au mécanisme puis de vérifier sa déployabilité en vérifiant les interférences. Nous avons ensuite exploité cette démarche pour deux exemples de conception de roues à géométrie variable. Les profils de ces deux roues ont été sélectionnés car ils sont intéressants pour la robotique mobile et plus particulièrement pour les robots roulants. L'application de la démarche a permis d'identifier des solutions aux deux problèmes. Cela valide à notre sens cette manière d'approcher le problème de conception, et par ailleurs a conduit à deux solutions originales.

La démarche proposée se contente de fixer la forme dans les configurations extrêmes¹ du mécanisme, à savoir les configurations plane et pliée. Or, nous observons sur la figure 5.12b. que dans la configuration intermédiaire, le mécanisme ressemble déjà à une roue à griffes. Il est théoriquement possible de modifier les solides dans une configuration intermédiaire pour maîtriser la forme comme c'est le cas pour les configurations extrêmes. Cependant, la complexité de conception s'en trouve augmentée. Afin d'utiliser plus de configurations pour avoir plus de formes maîtrisées au cours du déploiement, une méthode encore plus formelle d'ajout de volume serait alors nécessaire.

5.3 Conception d'un drone exploratoire monorotor

5.3.1 Contexte

Dans la littérature relative à la robotique aérienne, on trouve un grand nombre d'architectures différentes, allant de drones omnidirectionnels à 12 rotors [Yiğit et al., 2021] jusqu'au drone monorotor utilisant un seul actionneur [Win et al., 2021]. Dans le contexte d'un drone exploratoire, nous favorisons la compacité du robot pour augmenter ses capacités de franchissement. Par conséquent, nous nous sommes dès le début du projet tournés vers l'utilisation d'un drone monorotor que l'on pourrait qualifier de « minimaliste ». Dans ce contexte, ce terme signifie que nous visons à limiter le nombre de composants et d'actionneurs qui composent le drone.

Dans [Win et al., 2021](Fig. 5.14d), il n'y a qu'un actionneur : le rotor de l'hélice. Le nombre d'actionneurs pour ce drone est minimal car unique. Cependant, il ne permet pas d'évoluer dans des espaces étroits. En effet, sa méthode de vol en tournant sur lui-même revient à utiliser son corps comme une aile de grande envergure. Il n'est donc pas adapté à notre besoin. Cette observation permet de soulever une problématique importante des drones monorotors : la rotation non maîtrisée du corps du drone sur lui-même induite par le rotor. Nous nommons cette rotation la « rotation propre » dans la suite du document. Lorsque le rotor (Fig. 5.15) génère un couple pour faire tourner les pales, cela induit un

1. Pour rappel, les configurations extrêmes pour cet origami correspondent aux configurations plane et pliée.

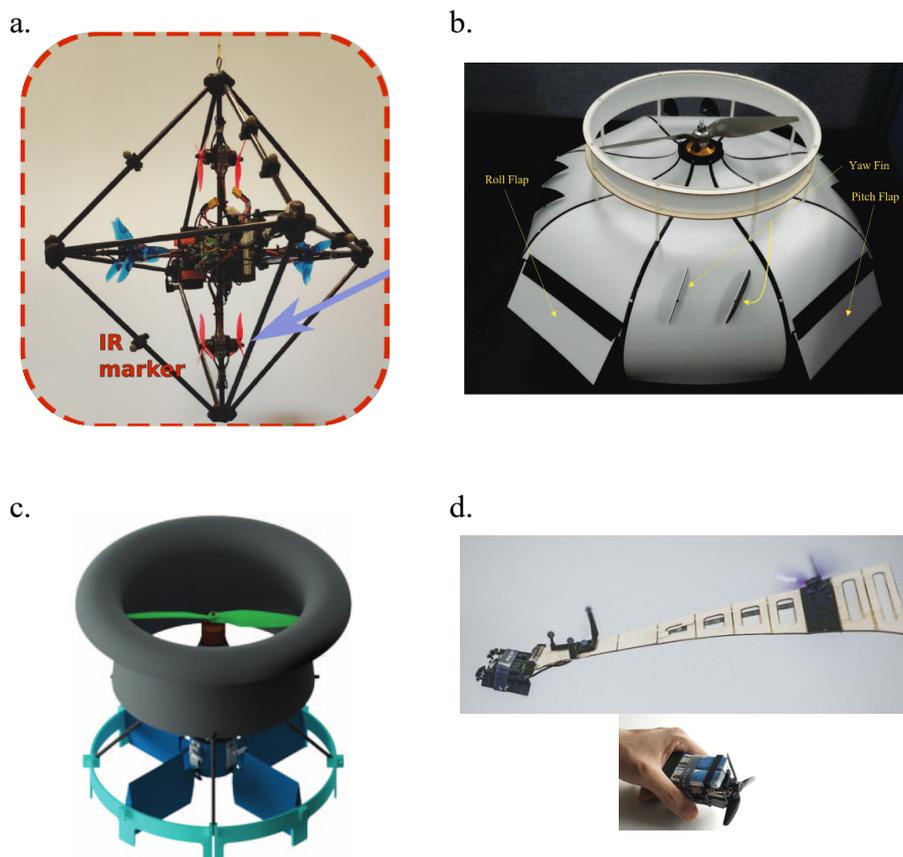


FIGURE 5.14 – Illustration de différentes architectures de drones. Un drone omnidirectionnel en a. avec 12 rotors ([Yiğit et al., 2021]). Des drones monorotors en b. c. et d. avec respectivement 5, 4 et 0 actionneurs supplémentaires respectivement dans [Lee et al., 2017b, Carholt et al., 2016, Win et al., 2021]

couple de réaction que l'on peut qualifier de « couple induit » au niveau du stator. Le stator étant connecté au corps du drone, le couple induit génère une accélération angulaire sur le corps. Si aucune action n'est mise en place, le drone se met à tourner sur lui-même à des fréquences potentiellement très élevées. Cela rend bien sûr complexe sinon impossible la commande du système. Dans [Lee et al., 2017b], des ailerons sont utilisés pour générer un couple contrarotatif (Fig. 5.15), terme utilisé pour définir le couple s'opposant au couple induit. Ce couple contrarotatif stabilise la rotation propre du drone. Dans cet article, les ailerons sont actifs pour moduler le couple contrarotatif en fonction du couple induit qui varie pendant le vol. En plus de ces ailerons, deux paires de volets eux aussi actionnés permettent de déplacer le drone. Au final, ce robot possède quatre actionneurs dont le rotor. Dans [Carholt et al., 2016], le nombre d'actionneurs est réduit à trois dont le rotor en utilisant des ailerons à la fois pour se déplacer et pour générer le couple contrarotatif.

Compte tenu des observations sur le compromis entre le nombre d'actionneurs et l'annulation de la rotation propre, nous cherchons à concevoir un drone capable de se stabiliser avec seulement un moteur pour son pilotage. Le terme « vol stabilisé » signifie dans ce cas que la rotation propre est suffisamment faible pour être prise en compte par le contrôleur de vol.

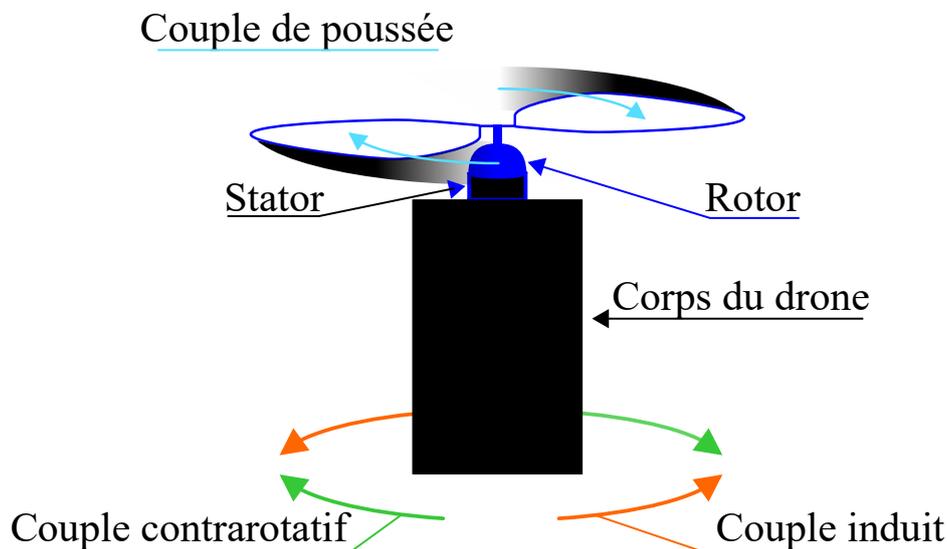


FIGURE 5.15 – Illustration des couples présents sur les différents éléments d’un drone monorotor

5.3.2 Proposition d’exploitation d’un origami

Afin de limiter le nombre d’actionneurs pour piloter le drone, nos collaborateurs de l’ISM ont proposé d’utiliser une technologie issue de [Paulos and Yim, 2015] permettant d’utiliser un seul moteur pour faire tourner les pales et pour gérer leurs inclinaisons. La variation de l’inclinaison des hélices permet de déplacer le drone dans l’espace. Cet actionnement seul permet de piloter le drone à condition de maîtriser sa rotation propre.

En partant du constat dans [Lee et al., 2017a] que des ailerons passifs placés sur la trajectoire du flux d’air permettent d’appliquer un couple contrarotatif, nous avons étudié la possibilité de mettre des ailerons sur un prototype de drone adapté à nos dimensions et nos choix technologiques (Fig. 5.16). Un banc permettant de tester la rotation propre du drone a été conçu, et un mécanisme permettant d’ajouter des ailerons sur le prototype à été intégré au prototype². Pour que l’étude de la rotation propre du drone sur le banc soit au plus proche du comportement en vol, nous avons fait attention lors de la conception à minimiser les inerties liées aux pièces mobiles du banc. Les tests sur ce prototype où l’angle des ailerons est variable nous servent de preuve de concept pour annuler la rotation propre avec notre architecture.

Chercher à annuler la rotation propre en permanence n’est pas forcément pertinent. En effet, utiliser cette rotation couplée à une caméra ou à un capteur laser peut permettre de réaliser la fonction de balayage pour scruter l’environnement à 360°. Ainsi, dans le contexte d’exploration après une catastrophe, il est intéressant de pouvoir alterner entre un vol stabilisé pour se déplacer et un vol qui permet de scruter l’environnement pour identifier les obstacles, des personnes à secourir ou d’autres éléments nécessaires à la mission et la navigation du drone. Qualitativement, cela implique de reconfigurer les ailerons dans une deuxième position (Fig. 5.17).

2. La conception du banc et le mécanisme pour placer les ailerons ont été réalisés par un ingénieur de recherche, Léo Wurtz

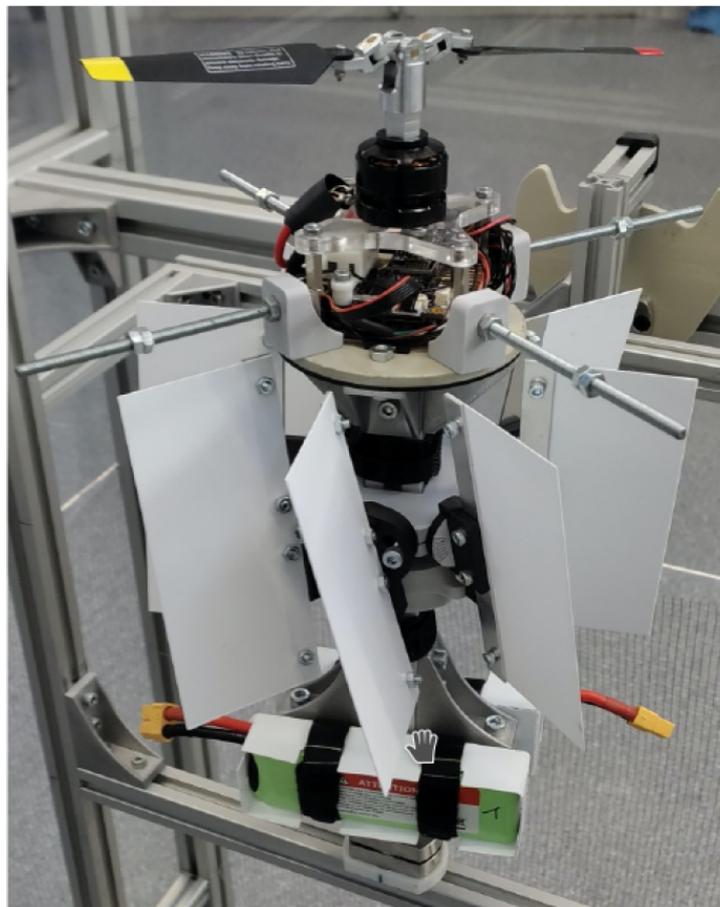


FIGURE 5.16 – Illustration d'un prototype pour étudier le concept d'ailerons sur le monorotor envisagé.

Nous visons finalement à avoir un ensemble d'éléments autour du corps. Avec deux configurations entre lesquelles nous souhaitons pouvoir basculer selon le scénario de vol souhaité.

Par rapport à ces fonctions souhaitées, il nous est apparu que l'usage d'une tour de Kresling était particulièrement pertinent. Les caractéristiques de la tour que l'on souhaite exploiter dans ce contexte sont les suivantes :

- Deux configurations stables qui ne nécessitent pas d'énergie pour en disposer.
- Structure origami bénéficiant d'une faible masse.
- Forme tubulaire propice à l'intégration de composant et plutôt favorable à l'aérodynamisme pour la géométrie de drone envisagée.
- Orientation variable des panneaux (Fig. 5.17).

Nous souhaitons utiliser une structure origami pour ajouter des ailerons afin de réguler la rotation propre tout en bénéficiant de la légèreté de ces structures. En plus de la fonction de stabilisation, nous souhaitons faire varier l'inclinaison des ailerons pour générer une rotation propre maîtrisée. Nous considérons que la rotation propre est maîtrisée si elle est suffisamment lente pour être prise en compte par le contrôleur et que le drone tourne toujours dans le même sens. Cette rotation propre couplée à une caméra ou à un système de scrutateur laser permet de réaliser la fonction de reconnaissance requise pour le drone. Le changement de forme des origamis peut alors être utilisé pour changer l'inclinaison

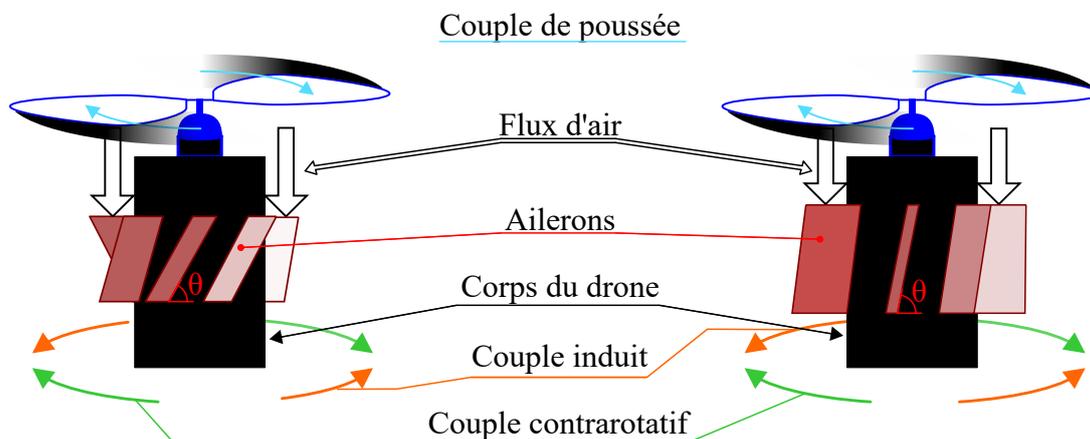


FIGURE 5.17 – Illustration des couples sur le drone en fonction de l’angle θ des ailerons. À gauche (resp. à droite), le couple résultant entre le couple induit et le couple contrarotatif est non nul (resp. nul).

des ailerons. Nous proposons d’utiliser une tour de Kresling. Les deux configurations de la tour sont alors utilisées pour gérer l’inclinaison des ailerons soit pour stabiliser le drone, soit pour balayer l’environnement. De plus, la tour de Kresling est bistable, ce qui permet de maintenir la configuration pour la stabilisation ou pour le balayage sans apport d’énergie. Cela constitue un avantage pour limiter la consommation énergétique du robot. Enfin, l’utilisation d’une tour de Kresling permet d’incliner simultanément n ailerons, avec n le nombre de côtés de la tour. Finalement, la tour constitue un unique composant léger qui remplit trois rôles : elle est utilisée comme un élément structural qui place les ailerons à l’endroit voulu. Elle sert de chaîne cinématique qui transmet le mouvement à n ailerons. De plus, elle permet de maintenir l’inclinaison des ailerons sans apport d’énergie. L’utilisation de cette structure origami est donc favorable à la conception minimaliste de ce robot tel que nous l’avons défini.

5.3.3 Conception

Choix des ailerons et de leur configuration

Nous devons donc connaître la valeur des angles θ et la géométrie des ailerons permettant soit de stabiliser le drone soit de le faire tourner lentement. Pour y parvenir, une approche expérimentale a été adoptée. Sur le prototype, un nouveau mécanisme³ (5.19 b) est ajouté, permettant de réaliser des essais avec différentes géométries d’ailerons et différents angles d’inclinaison à la manière d’une tour de Kresling.

Les ailerons sont des panneaux rectangulaires sur lesquels nous pouvons faire varier la longueur et la hauteur (Fig. 5.19a). Ils sont montés sur un système permettant de régler leur inclinaison (Fig. 5.19b) définie par l’angle θ . Ce mécanisme est conçu pour simuler une tour de Kresling, la position des ailerons, leur nombre et les angles d’inclinaisons

3. La conception du mécanisme pour tester les ailerons a été réalisée par un stagiaire ingénieur co-encadré, Damien Cartier Millon. Ce stagiaire a également conduit les tests afin de définir la géométrie et les inclinaisons des ailerons.

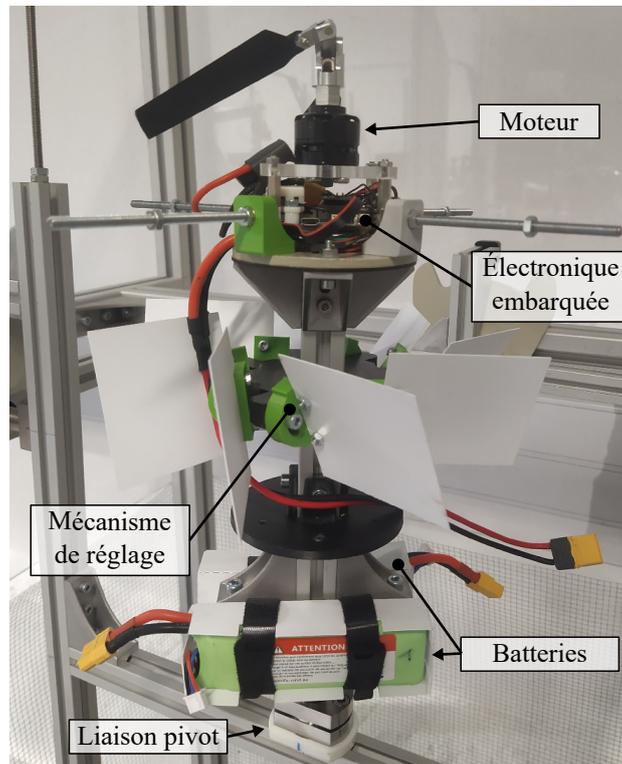


FIGURE 5.18 – Illustration du banc de test pour étudier la rotation propre du drone.

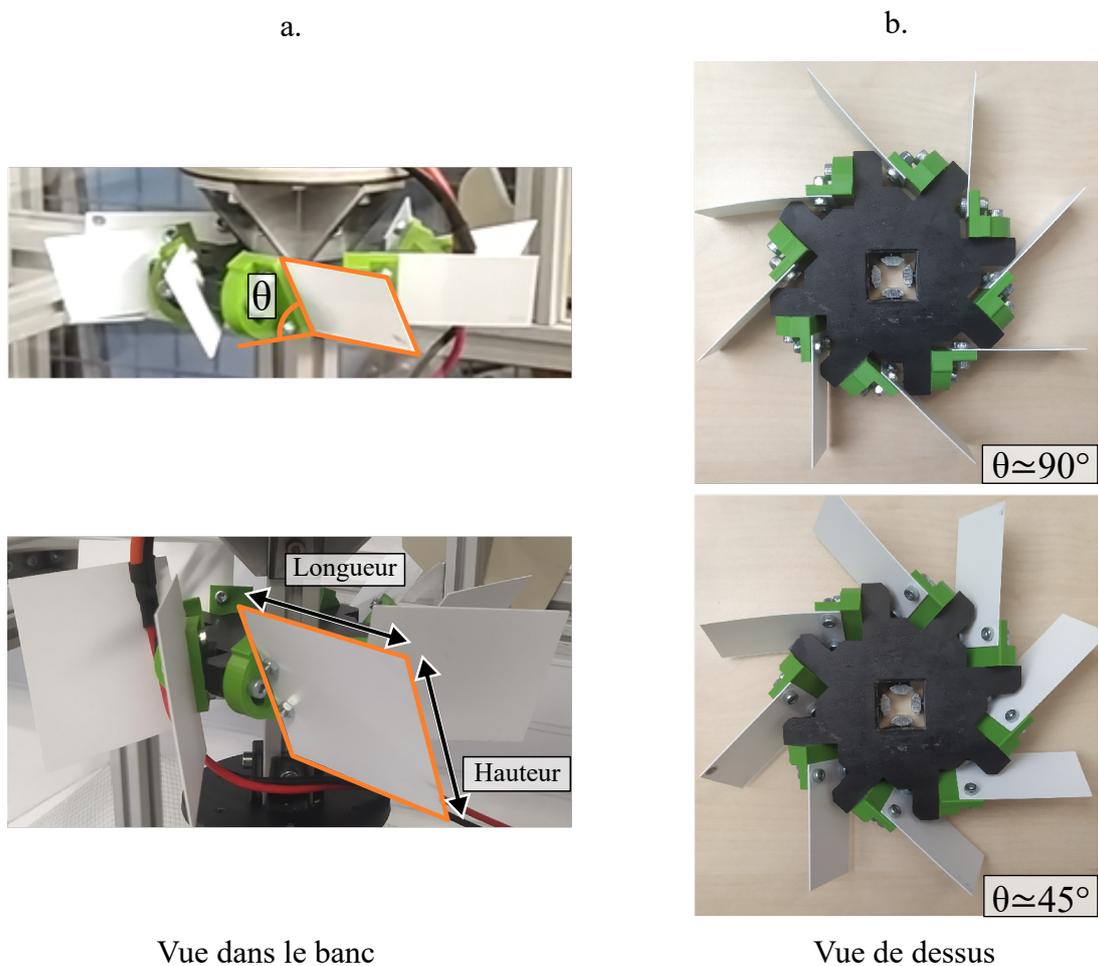


FIGURE 5.19 – Illustration du mécanisme de test pour définir la géométrie et l'angle d'inclinaison θ des ailerons pour stabiliser ou maîtriser la rotation propre du drone.

correspondant à ce qui est faisable avec une tour de 80 mm (soit $r = 40$ mm) de diamètre et avec huit côtés (soit $n = 8$). Après une série de tests réalisés en faisant varier la géométrie et l'inclinaison des ailerons pour des vitesses de rotation des pales différentes, nous obtenons les caractéristiques suivantes :

- Longueur = 45 mm
- Hauteur = 30 mm
- Angle vol stable $\theta = 61^\circ$
- Angle pour vol avec rotation $\theta = 45^\circ$

Le diamètre de la tour est fixé à 80mm, correspondant au diamètre du drone. Le nombre de côtés n fixé à 8. Les angles ρ_1 et ρ_2 des panneaux dans les configurations stables correspondent à l'angle θ mesuré pour obtenir un vol stable, ou un vol avec rotation. Nous sommes maintenant en mesure de fixer quatre paramètres de conception $(r; n; \rho_1; \rho_2) = (40\text{mm} ; 8 ; 45^\circ ; 61^\circ)$ pour en déduire les paramètres géométriques du patron $\eta = (r; n; [ab]; [bd])$. En utilisant les relations en section 3.4, et après résolution numérique, nous obtenons $\eta = (40\text{mm} ; 8 ; 82,7\text{mm} ; 66,5\text{mm})$.

Conception du drone

Ensuite, un travail de conception du drone ainsi que sa réalisation a été conduit conjointement avec Damien Cartier Millon. Le prototype obtenu est représenté en figure 5.20. La masse totale est de 292 g avec une force de poussée estimée à 400 g. Par ailleurs, nous constatons que la masse de la structure basée origami, constituée de la tour de Kresling et des ailerons représente 11 g, soit environ 4% de la masse totale. L'ensemble a été placé dans le banc pour mesurer la rotation propre dans les deux configurations disponibles. Dans sa configuration basse, les ailerons génèrent un couple contrarotatif supérieur au couple induit et le drone se met à tourner sur lui même avec une fréquence d'environ 0.64Hz. Lorsque la tour est dans sa configuration haute, le drone ne tournant pas, le couple induit semble égal au couple contrarotatif. La tour de Kresling remplit correctement la fonction attendue.

5.3.4 Synthèse

Nous avons montré la capacité de l'origami tour de Kresling à réaliser une fonction d'orientation de plusieurs ailerons de manière simultanée, limitant ainsi le nombre de composants du robot. Les deux configurations de la tour permettent de réaliser deux fonctions différentes pendant le vol : une fonction de stabilisation, ou une fonction de reconnaissance. L'inclinaison dans laquelle se trouvent ces ailerons est maintenue grâce à la bistabilité de la tour de Kresling. Enfin, l'utilisation d'un origami permet de limiter l'ajout de masse sur le drone. Cela permet de réaliser un drone minimaliste utilisant un seul actionneur pour le vol et un actionneur intermittent pour le changement de configuration de la tour.

Si les tests sur banc permettent de prédimensionner les tours, des ajustements seront



FIGURE 5.20 – Illustration du drone avec la structure origami composée de la tour et des ailerons.

certainement nécessaires lorsque le drone fonctionnera en vol libre. En effet, les inerties mises en jeu qui seront différentes auront un impact sur le comportement du robot en vol. L'utilisation d'une structure origami offre l'avantage d'être fabriquée rapidement et à faible coût, ce qui est un avantage en phase de développement, pour s'adapter à ce changement de comportement.

Conclusions et perspectives

Les travaux réalisés au cours de cette thèse traitent de conception robotique en cherchant à s'appuyer sur le domaine des origamis. Les structures origami ont en effet des propriétés originales et intéressantes pour la robotique telles que la déployabilité ou la bistabilité, en témoignent le nombre de publications présentant des dispositifs robotiques utilisant des origamis. Cependant, les origamis les plus riches à exploiter à notre sens sont ceux qui sont non rigidement pliables. Pour ces derniers, nous avons pu constater le manque d'outils de conception pour les exploiter en robotique. C'est ce constat qui a motivé l'ensemble des travaux présentés dans cette thèse.

Nous nous sommes concentrés sur la conception de mécanismes inspirés d'origamis d'une part et basés origamis d'autre part. Pour chaque cas, nous avons fait des propositions pour aller vers la mise en place de démarches de conception. Nous reprenons ici les résultats essentiels suivis d'une discussion sur les perspectives associées, en commençant avec la dimension projet autour de la robotique mobile ayant conduit à ces développements.

1 Robotique mobile multimodale

Bilan

Durant cette thèse, nous avons travaillé sur la synthèse de fonctions élémentaires intéressantes dans le contexte de la robotique mobile. Dans un premier temps, nous avons étudié la conception d'une roue à géométrie variable pour améliorer la capacité de franchissement d'un robot mobile roulant. Dans un second temps, nous avons travaillé sur un robot aérien en proposant l'utilisation d'une structure origami pour stabiliser le vol d'un drone monorotor.

Dans la littérature, on retrouve plusieurs types de profils de roues, permettant d'améliorer le franchissement en fonction du type d'obstacle rencontré. Il n'y a pas un profil ou une dimension qui permet d'optimiser la capacité de franchissement d'un robot mobile. Dans le cadre d'un robot exploratoire pouvant être confronté à différents types d'obstacles, être capable de modifier le profil de la roue en conséquence permet d'améliorer considérablement la capacité de franchissement. Notre contribution a été de proposer une méthode permettant de guider la conception pour donner au mécanisme inspiré du flasher (Fig. 2.23) des formes spécifiques pour répondre à un besoin. Nous avons étudié deux mécanismes permettant de concevoir des roues à géométries variables. La première roue a été conçue pour avoir un profil de roue circulaire à faible diamètre dans la configuration pliée

et un profil circulaire à grand diamètre dans la configuration plane. La seconde roue a été conçue pour avoir un profil à griffes avec un petit diamètre dans la configuration pliée et un profil circulaire avec un grand diamètre dans la configuration plane. La méthode proposée nous a permis de concevoir ces deux mécanismes.

La deuxième contribution dans le contexte du projet concerne l'implémentation de la fonction d'exploration avec un robot volant. Nous avons proposé l'utilisation d'une tour de Kresling pour positionner et contrôler des ailerons sur un drone monorotor. Ce type de drone nécessite une action pour stabiliser la rotation sur lui-même et l'utilisation d'ailerons permet d'y parvenir. En solidarissant des ailerons sur les panneaux de la tour de Kresling, nous pouvons bénéficier de deux orientations d'ailerons correspondant aux deux configurations de la tour. Nous avons alors obtenu deux comportements distincts pour le vol. La première orientation permet de stabiliser la rotation du drone sur lui-même. La seconde permet de maîtriser la rotation du drone sur lui-même pour réaliser une fonction de balayage. À l'aide d'un capteur laser ou d'une caméra, le balayage permet de scanner l'environnement pour la mission de reconnaissance. Nous avons alors utilisé la bistabilité de la tour pour positionner, orienter et maintenir les ailerons dans deux configurations pour lesquelles la tour a été conçue. Nous avons été en mesure d'aller jusqu'à l'implémentation d'un drone fonctionnel, détaillé dans [Cartier Millon, 2022]. Ce drone a été testé dans un banc et le rôle de la structure origami a été validé expérimentalement.

Perspectives

À notre sens, la première perspective concerne la roue à géométrie variable pour un robot exploratoire. Nous n'avons pas mené son étude jusqu'à la fabrication du mécanisme. Il serait donc intéressant de fabriquer des prototypes pour valider la capacité de franchissement ainsi que la capacité de charge sur un robot mobile les utilisant. Cette perspective peut être implémentée à court terme puisque tous les éléments sont disponibles. Par ailleurs, le système d'actionnement n'est pas encore conçu pour pouvoir utiliser ces roues de manière automatique. Pour l'actionnement, une piste privilégiée est d'utiliser des fils d'AMF en torsion le long des liaisons identifiées comme active lors des simulations. En effet, cette technologie possède un rapport couple / masse très intéressant. Nos collaborateurs de FEMTO-ST ont travaillé sur la modélisation de tels actionneurs pour faciliter leur intégration dans ce genre de mécanismes. Cela soulève cependant la question de la synchronisation des actionneurs qui n'est pas évidente avec cette technologie, or les liaisons actives sont synchronisées pendant la simulation du déploiement en chapitre 2. Il serait donc pertinent d'étudier la déployabilité non synchrone de ce mécanisme avant d'y intégrer les actionneurs AMF. Si le mécanisme est en mesure de se déployer de manière non synchrone, nous pouvons imaginer aboutir assez rapidement à un mécanisme actionné puisque tous les éléments sont réunis. Dans le cas contraire, une solution pour déployer le mécanisme de manière synchrone devra être identifiée, avec un effort de développement plus conséquent.

À ce stade, nous disposons d'un prototype du drone monorotor avec sa structure ori-

gami dont le fonctionnement a été validé sur un banc. Une tâche à effectuer dans la continuité du travail à court terme est de réaliser des essais en vol du drone pour valider l'impact de la structure sur son comportement. Il s'agit davantage d'une perspective du projet Origabot que d'une perspective de cette thèse, cette partie devant être conduite prochainement par nos collaborateurs de l'ISM. Lors de ces essais en vol, les inerties en jeu vont évoluer par rapport aux essais dans le banc. Par conséquent, le comportement du drone en fonctionnement stable ou en fonctionnement balayage va évoluer. Deux scénarios sont alors possibles : soit le changement de comportement est minime et le fonctionnement du drone avec la structure actuelle n'est pas remis en cause, soit le changement de comportement est important et la structure origami doit être modifiée. Dans le second scénario se dégage une perspective de travail à moyen terme : modifier la structure pour prendre en compte le changement d'inertie. Nous avons alors deux propositions de modifications qui peuvent être mises en place à court terme. La première consiste à modifier la géométrie de l'aileron pour compenser le changement de comportement. La seconde possibilité est de concevoir des tours pour obtenir des angles d'ailerons différents dans les configurations stables.

Enfin, la dernière perspective relative au projet consiste à réunir les différents éléments structuraux, éléments de conception, actionneurs et commandes de vol de chacun des collaborateurs pour développer un robot à locomotion multimodale. Cette tâche étant l'aboutissement du projet, il est naturel qu'elle soit la dernière à être implémentée. Au moment de la rédaction, le point le plus important à traiter pour aboutir à un robot à locomotion multimodale fonctionnel est de définir une stratégie de changement de mode de locomotion. Un travail a été réalisé dans [Berre, 2019] lors de ma période de stage de fin d'étude d'ingénieur précédent la thèse. Ce travail peut alors servir à guider la réflexion à moyen terme pour définir la stratégie de changement de locomotion.

2 Conception d'un mécanisme inspiré origami

Bilan

Pour répondre à la problématique de manque de démarche de conception de mécanismes inspirés d'origami non rigidement pliable, nous avons travaillé sur la conversion entre structures origami et mécanismes polyarticulés. Cette conversion est possible et des travaux dans la littérature ont déjà proposé des formalisations de démarche pour effectuer cette conversion. La conversion de structure origami vers un mécanisme est possible de manière assez simple à condition que l'origami soit rigidement pliable. En revanche, nous avons constaté l'absence dans la littérature de démarche générique pour convertir un origami non rigidement pliable en mécanisme polyarticulé. Notre contribution a consisté à convertir le Flasher, un origami à grande déployabilité non rigidement pliable, en un mécanisme polyarticulé.

Nous avons proposé une démarche en deux étapes permettant de passer de la structure origami vers un mécanisme polyarticulé. Le point de départ est la chaîne cinématique de

l'origami qui n'est pas déployable lorsque les plis du patron sont remplacés par des pivots, étant donné que la structure est non rigidement pliable. La première étape consiste à modifier cette cinématique pour permettre le déploiement. Lors de cette étape, nous avons remplacé une liaison pivot héritée d'un pli du patron par cinq liaisons pivots. La nouvelle chaîne cinématique ainsi obtenue permet de déployer un mécanisme polyarticulé à la manière du Flasher. La seconde étape consiste à ajouter des volumes permettant l'implémentation d'un mécanisme à partir de la cinématique préalablement définie. Finalement, nous avons abouti à la fabrication d'un prototype permettant de valider la déployabilité du mécanisme inspiré du Flasher.

Perspectives

La première perspective concerne l'implémentation du mécanisme. Nous envisageons la conception d'un mécanisme utilisant de manière complémentaire des liaisons compliantes et des liaisons conventionnelles. Ce type de conception permet de limiter le nombre de pièces utilisées pour réaliser les liaisons et ainsi limiter la masse du mécanisme. Cela permet aussi d'envisager une réduction d'échelle du mécanisme. Nous envisageons à ce sujet d'utiliser l'impression 3D multimatériaux qui nous semble adaptée pour la conception de liaisons compliantes à petites échelles et de faibles amplitudes angulaires. De plus, l'utilisation de liaisons compliantes possédant un état d'équilibre correspondant à la position dans laquelle elles ont été imprimées nous permet d'envisager l'introduction d'une bistabilité dans le déploiement de ce mécanisme pour permettre un maintien de la configuration sous charge. Cette perspective est exploratoire et aucun travail préliminaire n'a été réalisé dans ce sens. Cependant, les connaissances acquises sur ce mécanisme ainsi que sur la bistabilité de la tour de Kresling traitée en Chap. 3 et Chap. 4 permettent d'envisager une implémentation sur du moyen terme.

La seconde perspective à notre sens est d'appliquer la démarche proposée à d'autres origamis non rigidement pliables dans l'objectif d'identifier les limites de notre démarche, pour la rendre générique. Cela pourrait nous conduire à trouver une méthode plus systématique pour identifier et remplacer les plis permettant ainsi de rendre la cinématique déployable. Au vu de la spécificité des choix effectués lors de cette démarche, il s'agit d'un travail à long terme.

La méthode pour faire varier la géométrie du mécanisme conçu peut être utilisée pour concevoir différents objets à géométrie variable. Avec la méthode actuelle, la convergence de solution n'est pas garantie et des itérations sont parfois nécessaires pour obtenir la forme souhaitée. Mettre en place une méthode plus formelle permettant de faciliter les itérations et de quantifier la convergence constitue à notre sens une perspective intéressante pour améliorer la conception de ce mécanisme. Le verrou principal semble se trouver dans l'étape d'ajout de volume. Pour évaluer la convergence vers la forme souhaitée, il est nécessaire de fixer un critère d'évaluation de l'optimisation sur le respect des formes enveloppes spécifiées. Les formes enveloppes peuvent être spécifiées dans différentes configurations particulières. Il est aussi nécessaire de valider l'absence d'interférence entre les

volumes ajoutés lors du déploiement entre ces configurations. Plusieurs approches permettant de résoudre ce type de problème existent. La perspective sur du long terme serait dans un premier temps de caractériser le problème, puis d'identifier et d'implémenter l'approche la plus adaptée à sa résolution.

3 Conception d'un mécanisme basé origami

Bilan

L'utilisation de structures origami pour la conception de mécanismes basés origami permet d'offrir des propriétés originales comme la multistabilité. Dans le cas de la tour de Kresling, la bistabilité vient des déformations liées au pliage non rigide. Dans la littérature, un certain nombre de modèles permettent de simuler le comportement de la tour en fonction de la géométrie de son patron et de ses propriétés matériaux. Cependant, nous avons identifié un manque d'outils permettant de faire la synthèse entre le patron de l'origami et les propriétés géométriques et cinématiques de la structure.

Nous avons donc décidé de contribuer en proposant un modèle géométrique fournissant des relations analytiques pour faire la synthèse de la tour de Kresling. Nous nous sommes inspirés des modèles à barres et liaisons de la littérature que nous avons adaptés pour ne prendre en compte que les considérations sur la géométrie du patron. Avec ce modèle, nous avons obtenu des relations analytiques sur la géométrie et la cinématique de la tour dépendant des paramètres géométriques de son patron. Ce modèle a été validé expérimentalement sur une série de quatre tours différentes.

Par ailleurs, le comportement cinétostatique, la géométrie et la cinématique de la tour sont couplés avec la géométrie du patron. Il est donc impossible de moduler ces caractéristiques de manière indépendante avec seulement les paramètres géométriques du patron. Nous avons donc proposé un paramétrage et un mécanisme supplémentaires permettant de moduler les caractéristiques cinétostatiques de la tour indépendamment de sa cinématique et de sa géométrie.

Le paramétrage proposé intègre une ouverture locale du pli permettant de réduire la raideur et la force nécessaire au changement de configuration indépendamment du patron et de la cinématique de la tour. Nous avons ensuite proposé d'ajouter un mécanisme de rigidification actif sur les tours pour moduler de manière active le comportement cinétostatique de la tour de Kresling. Le principe de ce mécanisme est d'appliquer une force le long de certains plis pour générer un impact global sur la tour. Trois mécanismes de rigidification aux caractéristiques différentes ont été implémentés. L'impact de la longueur de l'ouverture ainsi que l'impact de la rigidification via les trois mécanismes conçus ont été évalués expérimentalement. Ces résultats expérimentaux ont permis de valider l'efficacité de la modulation du comportement cinétostatique de la tour sans modifier sa géométrie ni sa cinématique grâce à ces nouveaux outils d'aide à la conception.

Perspectives

À propos du modèle proposé, la volonté de ne prendre en compte que des considérations géométriques en utilisant le jeu de paramètres géométriques du patron nous a permis d'établir des relations analytiques. Ces relations peuvent être résolues pour faire le lien entre la géométrie du patron et des caractéristiques géométriques et cinématiques de la tour. Pour aller plus loin, nous souhaitons enrichir ce modèle afin de prédire le comportement cinétostatique ainsi que de prendre en compte les modifications apportées par l'ouverture du pli et par l'ajout du mécanisme de rigidification. Un travail est déjà engagé à ce sujet en collaboration avec FEMTO-ST. Pour l'instant, ce travail a pour objectif de prendre en compte le paramètre d'ouverture du pli dans un nouveau modèle. Pour la rigidification le long du pli, les mécanismes de rigidification proposés permettent de réaliser une preuve de concept convaincante. Modéliser leur impact pour quantifier la force et la raideur des mécanismes obtenus est une perspective à conduire également.

Une seconde perspective concerne la généralisation de la modulation du comportement cinétostatique à d'autres structures origami non rigidement pliables. Nous souhaitons identifier sur d'autres structures des plis particuliers sur lesquels ajouter une ouverture ou un mécanisme de rigidification qui aurait un impact. Cela permettrait aussi de tester les modèles en cours de développement pour prendre en compte l'ouverture et la rigidification du pli. Une structure envisagée pour débiter l'étude de généralisation est la structure origami de la paille pliable⁴ pour laquelle nos collaborateurs de l'ISM ont étudié la bistabilité.

Lors de la réalisation de la tour pour le drone monorotor, nous avons relevé un faible maintien d'une des configurations de la tour. Il en découle un besoin d'adapter le mécanisme de rigidification à des tours plus petites. Le mécanisme de rigidification actionné avec des fils d'AMF semble le plus adapté grâce à son ratio force / volume favorable à une miniaturisation. Par ailleurs, dans l'état actuel, le mécanisme à actionnement AMF est « normalement inactif », c'est-à-dire que lorsque l'AMF n'est pas alimenté, le mécanisme est désactivé. Dans le cas d'une utilisation dans le drone, nous souhaitons avoir un mécanisme normalement actif afin de limiter la consommation énergétique lors du maintien de la tour dans un état raide. Un travail a d'ores et déjà été engagé dans cette direction par un étudiant ingénieur.

Ce qui a motivé notre travail sur le mécanisme de rigidification est l'augmentation de la raideur dans les configurations stables. Cependant, l'utilisation de mécanismes de rigidification peut être envisagée dans d'autres contextes. Par exemple, il est possible de concevoir une tour monostable et d'utiliser le mécanisme de rigidification pour créer une bistabilité temporaire. Cela revient à avoir une tour dans une configuration pliée existante grâce au mécanisme de rigidification, et qui basculerait dans la configuration dépliée lorsque le mécanisme de rigidification ne fait plus effet. Nous pouvons alors imaginer des applications comme un préhenseur sous-actionné qui déclenche la préhension lorsqu'une action mécanique est réalisée sur le mécanisme de rigidification. Ou encore envisager un déploiement spontané de la tour en utilisant des actions chimiques ou thermiques

4. Traduit de l'anglais « bending straw »

pour détruire le mécanisme de rigidification. Enfin, la capacité de moduler activement la raideur d'un mécanisme est pertinente dans le cadre de la cobotique. Muni d'un mécanisme de rigidification, une tour de Kresling peut être utilisée comme un élément fusible qui peut commuter avec des forces faibles lors d'interactions avec des humains, puis devenir beaucoup plus raide pour des manipulations isolées.

Nous avons vu au travers de ce travail de thèse la richesse de l'exploitation des origamis non rigidement pliables. Les perspectives discutées montrent à notre sens que ce travail est clairement à poursuivre.

Liste des publications

Revue internationale

1. Berre, J., Geiskopf, F., Rubbert, L., & Renaud, P. (2022). "Toward the Design of Kresling Tower Origami As a Compliant Building Block". Dans *Journal of Mechanisms and Robotics*, 14(4), 045002.

Conférences internationales

Publications en premier auteur :

1. Berre, J., Geiskopf, F., Rubbert, L., & Renaud, P. (2021, August). "Towards a Synthesis Method of Kresling Tower Used as a Compliant Building Block". Dans *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Vol. 85451, p. V08BT08A038)*. American Society of Mechanical Engineers. **Soumission dans la revue JMR**
2. Berre, J., Geiskopf, F., Rubbert, L., & Renaud, P. (2020, October). "Origami-Inspired Design of a Deployable Wheel". Dans *Joint International Conference of the International Conference on Mechanisms and Mechanical Transmissions and the International Conference on Robotics* (pp. 114-126). Springer, Cham.

Publication en auteur associé :

1. Hu, K., Jeannin, T., Berre, J., Ouisse, M., & Rabenoroso, K. (2022). "Toward actuation of Kresling pattern-based origami robots". Dans *Smart Materials and Structures*, 31(10), 105025.

Soumission en cours de traitement :

1. Berre, J., Geiskopf, F., Rubbert, L., & Renaud, P. (En attente). "Embedded active stiffening mechanisms to modulate Kresling tower kinetostatic properties". Dans *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.

Communications diverses

1. **J. BERRE**, L. RUBBERT, F. GEISKOPF and P. RENAUD, "Développement de structures basées origami pour la robotique", Journée de recherche de l'INSA de Strasbourg, 2022, poster.
2. **J. BERRE**, L. RUBBERT, F. GEISKOPF and P. RENAUD, "Conception de structures basées origami pour un drone à déplacement multimodal", Journée des doctorant de l'université de Strasbourg, 2020. **Sélectionné parmi les 10 meilleurs posters.**
3. **J. BERRE**, L. RUBBERT, F. GEISKOPF and P. RENAUD, "Conception de mécanisme inspiré des origamis", Journée des jeunes chercheurs en robotique, 2020. **Prix de la meilleure présentation orale.**

Diffusion de la connaissance

1. Participation à la fête de la science, 2021, Strasbourg, France

Table des figures et liste des tableaux

Table des figures

1	Illustration de l'utilisation envisagée du robot exploratoire inspiré des origamis à locomotion multimodale	6
1.1	Illustration d'origamis d'art. La grue à gauche et un samouraï réalisé par Juho Konkkola (1)	8
1.2	Illustration de différents concepts d'objets : un porte-monnaie en cuir (a), un pantalon extensible en tissu(b), une table pliable en bois(c) modifiée dans [Morgan et al., 2016] et un module d'habitation (d).	9
1.3	Illustrations des deux propriétés à respecter pour un origami selon [Lang, 2018]. Une coche verte est apposée quand la propriété est respectée, et une croix rouge quand elle ne l'est pas.	10
1.4	Illustration en différentes vues et dans différentes configurations d'un pli montagne à gauche et d'un pli vallée à droite.	11
1.5	Illustration d'un patron avec un sommet (t) qui ne s'intersecte pas en a. et d'un motif de pliage qui n'est pas rigidement pliable en b.	11
1.6	Illustration de la séquence de pliage permettant d'obtenir la grue représentée en figure 1.1	12
1.7	Illustration de trois patrons d'origamis utilisés dans les domaines de la mécanique et de la robotique.	13
1.8	Illustration de mécanismes basés origamis dans la robotique. L'ordre de grandeur de leur dimension est indiqué. En a., un préhenseur dans [Johnson et al., 2017], en b. un robot rampant dans [Pagano et al., 2017], en c. une roue à géométrie variable dans [Lee et al., 2021] et en d. une structure pour déployer des panneaux solaires dans [Zirbel et al., 2013].	13
1.9	Illustration dans [Yasuda et al., 2017] de la tour de Kresling en origami à gauche et d'un mécanisme inspiré de cet origami à droite.	14
1.10	Illustration d'une liaison pivot conventionnelle et d'une équivalence en origami.	15
1.11	Illustration de structures origami réalisant une cinématique spécifique. Les patrons utilisés sont respectivement le Miura-ori an a. dans [Zuliani et al., 2018], la Magic-ball en b. dans [Fang et al., 2017] et la tour de Kresling en c. dans [Pagano et al., 2016]	15

1.12	Illustration de mécanismes dont la cinématique est basée sur les propriétés d'une structure origami. Illustration d'un robot volant et marchant dans [Mulgaonkar et al., 2016] en b., d'un robot marchant dans [Birkmeyer et al., 2009] en c. et d'un robot parallèle dans [Kalafat et al., 2021] en d.	16
1.13	Illustration de structures origami à géométrie variable considérées pour la robotique. Une roue à diamètre variable en a, issue de [Lee et al., 2013a], une seconde roue à diamètre variable issue de [Lee et al., 2013b] en b et une structure de longueur et de diamètres internes variables pour l'insertion de bronchoscope en c issue de [Sargent et al., 2020]	17
1.14	Illustration de robots utilisant des origamis de faible masse. Un drone dans [Sareh et al., 2018] avec une protection basée origami en a., un drone dans [Mulgaonkar et al., 2016] avec une structure légère de robot marcheur basé origami en b. et un robot marcheur basé origami capable de résister à des chutes en c. dans [Birkmeyer et al., 2009]	18
1.15	Illustration de structures origami multi-stables. La tour de Kresling en a dans [Liu and Paulino, 2017], le préhenseur inspiré en b dans [Yasuda et al., 2022] et le kaleïdocycle dans [Tang and Dai, 2018].	20
1.16	Images modifiées dans [Bhovad and Li, 2018]. Illustration de la séquence d'actionnement avec des tours de Kresling de raideurs différentes.	20
1.17	Illustration de la démarche de conversion de mécanismes vers des origamis en a. dans [Haldane et al., 2015]. Robot implémenté grâce à cette démarche en b.	21
1.18	Illustration de la convergence des simulations avec la réduction de la taille du maillage dans [Liu et al., 2015]	23
1.19	Illustration de la comparaison entre la simulation et l'expérimentation dans [Liu et al., 2015].	24
1.20	Illustration de la visualisation des concentrations de contraintes, résultat de la simulation EF dans [Liu et al., 2015].	24
1.21	Illustration de la modification aléatoire de la géométrie des mailles pour prendre en compte les imperfections du papier dans [Heimbs, 2009].	25
1.22	Illustration des étapes pour passer d'un origami vers la structure à barres et liaisons utilisée pour simuler le comportement de l'origami.	25
1.23	Illustration du placement de barres de panneau sur un panneau carré.	25
2.1	Illustration du patron du Flasher et de son motif élémentaire en vert.	30
2.2	Illustration de la séquence de déploiement du Flasher.	30
2.3	Illustration du Flasher sans épaisseur dans sa configuration pliée et plane.	30
2.4	Exemple de choix de motif élémentaire possible en vert foncé, et les panneaux adjacents correspondant en vert clair.	31
2.5	Illustration de la séquence de pliage du motif élémentaire permettant de plier rigidement.	32

2.6	Illustration des déformations du papier lors du pliage du Flasher.	33
2.7	Illustration de l'utilisation d'une membrane dans [Zirbel et al., 2013]. Mécanisme dans sa configuration plane en a. Vue agrandie en b. Mécanisme replié en c.	33
2.8	Illustration du pliage des panneaux en fonction du type de pli, de la distance entre les panneaux et de l'épaisseur t des panneaux dans [Zirbel et al., 2013]. En (a) un plis montagne avec une distance nulle entre les panneaux, en (b) un plis vallée avec une distance égale à deux fois l'épaisseur entre les panneaux, et en (c) un plis vallée avec une distance égale à une fois l'épaisseur entre les panneaux.	34
2.9	Exemple de situation illustrant les limites de la solution implémentée dans [Zirbel et al., 2013].	34
2.10	Illustration des possibilités de suppression de plis sur le motif élémentaire. Suppression du pli ab en 1), aa' en 2), bb' en 3) et $a'b'$ en 4).	35
2.11	Illustration des possibilités de suppression de plis sur le motif élémentaire épais. Suppression du pli $a'b'$ en 1), bb' en 2).	36
2.12	Illustration sous deux vues différentes et accompagnée d'un plan rapproché de la configuration choisie	37
2.13	Illustration des 5 changements de repère pour passer de $R_{A'}$ au repère $R_{B'}$ dans l'ordre.	37
2.14	Schéma cinématique du motif élémentaire remplaçant le pli $a'b'$ en a. et du mécanisme complet en b.	38
2.15	Illustration d'un déploiement non synchrone sur l'origami Flasher.	38
2.16	Tableau de comparaison des méthodes de gestion d'épaisseur dans [Morgan et al., 2016].	39
2.17	Illustration de la méthode de changement d'axe issue de [Morgan et al., 2016] en a). Application au motif élémentaire en b).	40
2.18	Illustration du décalage entre les sommets u et v dans les configurations respectivement plane en a et pliée en b.	41
2.19	Illustration des deux solutions proposées dans leurs deux configurations.	42
2.20	Illustration des deux solutions proposées avec la modification de la cinématique.	42
2.21	Illustration des solutions de mécanismes rigides épais polyarticulés inspirées du Flasher.	43
2.22	Illustration sur la pièce B des volumes retirés entre la pièce initiale en a et la pièce modifiée en b pour gérer les interférences et des volumes ajoutés pour disposer des surfaces fonctionnelles.	44
2.23	Illustration du mécanisme inspiré du Flasher fabriqué.	45
3.1	Illustration d'une tour de Kresling bistable dans ses deux configurations stables, basse (resp. haute) à gauche (resp. droite).	46

3.2	Illustration du patron 2D de la tour de Kresling en a. Illustration de ce patron une fois conformé en b.	47
3.3	Illustration des déformations apparaissant sur les plis montagne lorsque la tour est entre ses deux configurations stables.	49
3.4	Illustration de deux manières de réaliser un pli dans une feuille multi-matériaux dans [Baek et al., 2016]. En orange le matériau souple pour le pli, en gris le matériau rigide pour le panneau.	50
3.5	Illustration d'un origami en impression 3D multi-matériaux dans [Liu et al., 2017]. En noir les éléments en matériaux souples et en blanc, les éléments en matériaux rigides.	50
3.6	Illustration de différents procédés de fabrications automatisés. Utilisation d'un robot conçu pour plier des origamis dans [Tanaka et al., 2007] en a. Procédé étudié dans [Zhao et al., 2015] de b. à e. avec respectivement deux solutions par emboutissage, une solution par aspiration et une solution par soufflage.	52
3.7	Illustration des trois géométries de réalisation du pli possible.	52
3.8	Observation microscopique des profils de réalisation du pli dans une vue plane et pendant un pliage.	53
3.9	Représentation des caractéristiques d'intérêt de la tour de Kresling.	56
3.10	Représentation du triangle élémentaire B dans une vue 3D avec la trajectoire suivie par les sommets respectivement u_{ab} et u_{bd} des barres ab et bd respectivement représentées en jaune et en rose.	57
3.11	Vue projetée selon les normales aux vecteurs x , y et z de la position possible du sommet u en fonction de la configuration de la tour.	60
3.12	Illustration des intersections en orange dans le cas où l'angle \widehat{stu} du motif élémentaire est construit avec un angle inférieur à 90° (85° ici).	60
3.13	Illustration de l'angle d'hélice γ dans une vue globale sur la trajectoire du point u et un zoom sur le plan tangent.	63
3.14	Patron de découpe pour les prototypes.	65
3.15	Vue éclatée CAO du prototype de la tour.	66
3.16	Prototype en cours de test avec mesure de la rotation par la vision.	68
3.17	Évolution de l'angle de la tour ϕ en fonction de la hauteur de la tour h . En rose, la courbe théorique pour ϕ_{bd} , en jaune, la courbe théorique pour ϕ_{ab} et en noir, la courbe mesurée. Le trait plein correspond à la courbe pour le $\phi(h)$ tel que défini en 3.2	69
3.18	Comparaison de la géométrie des lignes de pliage des tours 0, 6, 5 et 4 de gauche à droite. Pour la tour 4, l'ouverture est intégrée dans le patron de découpe.	70
3.19	Illustration d'une courbe force-déplacement idéalisée pour la tour de Kresling.	71
3.20	Courbes force-déplacement obtenues à partir des essais des tours décrits dans le tableau 3.5.	72

4.1	Prototype de la tour de Kresling proposée avec des mécanismes de rigidification intégrés pendant l'évaluation.	75
4.2	Représentation d'une courbe idéalisée de la relation force-déplacement de la tour de Kresling pour illustrer les points d'intérêt. Les flèches rouges indiquent la direction du déplacement. Les points 1 à 4 permettent de caractériser la tour.	76
4.3	Représentation schématique des 4 modes de renforcement testés : les composants de rigidifications sont en rouge. Les attaches ne sont pas représentées pour des raisons de visibilité.	77
4.4	Illustration de l'application progressive des poids pour définir la force de basculement (gauche). Mesure de la raideur en configuration basse (droite).	78
4.5	Illustration du principe d'utilisation des mécanismes de rigidification. . . .	80
4.6	Conception de mécanismes de rigidification avec actionnement pneumatique. Tour de Kresling modifiée (gauche), représentation CAO simplifiée (milieu) et schéma cinématique (droite).	81
4.7	Conception de mécanismes de rigidification avec actionnement par fils d'AMF. Tour de Kresling modifiée (gauche), représentation CAO simplifiée (milieu) et schéma cinématique (droite).	81
4.8	Conception de mécanismes de rigidification avec actionnement par MCC. Tour de Kresling modifiée (gauche), représentation CAO simplifiée (milieu) et schéma cinématique (droite).	82
4.9	Interface entre la tour de Kresling et la machine d'essai de traction.	83
4.10	Illustration de l'intérêt de l'ensemble reliant la tour à la machine de traction dans le cas d'un défaut de parallélisme.	83
4.11	Représentation simplifiée du protocole expérimental pour l'évaluation de l'impact du mécanisme de rigidification.	84
4.12	Illustration des 10 dernières mesures de la phase 2 et leur répétabilité. . . .	84
4.13	Illustration de la différence sur le comportement de la tour sans mécanisme une fois stabilisée en bleu et après $t_a = 10s$ de temps de repos en rouge. . .	85
4.14	Résultats expérimentaux avec l'actionneur pneumatique. Résultats avec le mécanisme inactif en bleu, en vert avec activation à une pression de 4 bars et en rouge avec une pression de 7 bars. Les lignes pointillées correspondent à la valeur théorique des configurations stables.	88
4.15	Résultats expérimentaux avec l'actionnement basé sur l'AMF. Résultats avec le mécanisme inactif en bleu, en rouge avec l'activation.	88
4.16	Résultats expérimentaux avec l'actionnement du MCC. Résultats avec le mécanisme inactif en bleu, en rouge avec l'activation.	88
5.1	Illustration de la rotation du robot dans [Lee et al., 2013a] avec la différence de diamètre des roues en a. Illustration du franchissement d'obstacles de hauteur faible en b.	90

5.2	Illustration du franchissement d'obstacle avec des roues de diamètres différents. Les angles représentés en vert et en orange sont les pentes équivalentes pour franchir l'obstacle.	91
5.3	Illustration des deux configurations de la roue issue et traduit de [Lee et al., 2021].	91
5.4	Illustration de la roue à géométrie variable entre roue cylindrique et roue à jambes dans [Lee et al., 2017a]	92
5.5	Illustration issue de [Mertyüz et al., 2020] citant 9 solutions de roue à géométries variables issues de la littérature.	92
5.6	Illustration du mécanisme avec les zones fonctionnelles sur lesquelles il n'est pas possible d'ajouter de volumes	94
5.7	Illustration des étapes d'ajout de volume pour modifier la forme de la roue. La forme blanche semi-transparente au centre illustre la forme de l'origami avant la modification de forme.	95
5.8	Illustration du mécanisme avec les volumes en interférence en rouge en a. et une fois les interférences traitées en b.	96
5.9	Illustration du mécanisme dans les configurations extrêmes après traitement des interférences.	97
5.10	Illustration de l'étape 1 d'ajout de volume pour obtenir un profil circulaire en configuration plane et en configuration pliée. En blanc semi-transparent, nous illustrons la forme du mécanisme avant l'ajout de volume. La première ligne est en vue de dessus et la seconde en vue 3D.	98
5.11	Illustration du mécanisme dans une configuration intermédiaire. L'interférence est illustrée en rouge en a. en b, les panneaux sont modifiés pour ne plus avoir d'interférences.	99
5.12	Illustration du mécanisme permettant de réaliser une roue à diamètre variable dans la configuration plane en a, configuration intermédiaire médiane en b. et configuration pliée en c.	100
5.13	Illustration de la roue à griffes rétractables.	100
5.14	Illustration de différentes architectures de drones. Un drone omnidirectionnel en a. avec 12 rotors ([Yiğit et al., 2021]). Des drones monorotors en b. c. et d. avec respectivement 5, 4 et 0 actionneurs supplémentaires respectivement dans [Lee et al., 2017b, Carholt et al., 2016, Win et al., 2021]	102
5.15	Illustration des couples présents sur les différents éléments d'un drone monorotor	103
5.16	Illustration d'un prototype pour étudier le concept d'ailerons sur le monorotor envisagé.	104
5.17	Illustration des couples sur le drone en fonction de l'angle θ des ailerons. À gauche (resp. à droite), le couple résultant entre le couple induit et le couple contrarotatif est non nul (resp. nul).	105

5.18	Illustration du banc de test pour étudier la rotation propre du drone. . . .	106
5.19	Illustration du mécanisme de test pour définir la géométrie et l'angle d'inclinaison θ des ailerons pour stabiliser ou maîtriser la rotation propre du drone.	106
5.20	Illustration du drone avec la structure origami composée de la tour et des ailerons.	108
5.21	Illustration de la démonstration et des annotations utilisées.	128
5.22	Lien entre l'état du mécanisme, en première ligne, l'état du fil d'AMF en deuxième ligne et l'état des cristaux dans l'AMF en troisième ligne. . . .	130
5.23	Courbe idéalisée illustrant la transition d'état des cristaux de matière en fonction de la température lorsqu'il n'y a pas de contrainte dans le matériau.130	
5.24	Illustration de la roue à profil quasi-circulaire après une itération.	132

Liste des tableaux

3.1	Liste des grandeurs caractéristiques et des équations nécessaires pour les évaluer.	63
3.2	Désignation et valeur des grandeurs caractéristiques des prototypes.	64
3.3	Désignation et description du jeu de paramètres η pour les prototypes.	65
3.4	Mesures de la hauteur des tours et erreurs relatives par rapport au rayon de la tour.	66
3.5	Valeurs mesurées de h_1 , h_2 et force de basculement pour les prototypes avec lignes de pliage modifiées. L'indice "m" signifie que c'est une valeur mesurée.	73
4.1	Nature et impact des renforcements. Le type décrit la stratégie de renforcement : P (resp. F), le renfort est sur le panneau (pli). La position décrit le mode de fixation : G (resp. L) est pour la fixation globale (locale) le long du panneau/pli.	77
4.2	Résultats expérimentaux avec les 3 stratégies d'actionnement.	86

Annexes

Annexe A : Démonstration du pliage non rigide du Flasher

Lorsque le Flasher est entre sa configuration pliée et plane, nous avons $\alpha \in]0^\circ, 60^\circ[$, avec α l'angle entre oa et $a'b$. Le temps de cette étude où nous isolons les panneaux A et B , les angles \widehat{oa} et $\widehat{a'b}$ ne sont pas définis. Nous introduisons en figure 5.21a les angles χ (resp. χ_1) entre les panneaux A (resp. B) et le plan xy . Nous cherchons le point d'assemblage du sommet s qui correspond au point où le sommet s_A (resp. s_B) appartenant au panneau A (resp. B) permet de connecter ces panneaux le long de la ligne de pliage ab . Ce point correspond à l'intersection du cercle C_A de rayon $[ab]$, d'axe x et au centre du repère et du cercle C_B de rayon $[ab]$, d'axe x_1 et au centre du repère.

Cela revient à résoudre $C_A = C_B$

Avec

$$\begin{aligned} C_A = & 0 \cdot \vec{x} \\ & [ab] \cos(\chi) \cdot \vec{y} \\ & [ab] \sin(\chi) \cdot \vec{z} \end{aligned} \quad (5.1)$$

et

$$\begin{aligned} C_B = & - [ab] \sin(\alpha) \cos(\chi_1) \cdot \vec{x} \\ & [ab] \cos(\alpha) \cos(\chi_1) \cdot \vec{y} \\ & [ab] \sin(\chi_1) \cdot \vec{z} \end{aligned} \quad (5.2)$$

D'où

$$\begin{aligned} C_A - C_B = & 0 \\ \Rightarrow & [ab] \sin(\alpha) \cos(\chi_1) = 0 \cdot \vec{x} \\ & [ab] \cos(\chi) - [ab] \cos(\alpha) \cos(\chi_1) = 0 \cdot \vec{y} \\ & [ab] \sin(\chi) - [ab] \sin(\chi_1) = 0 \cdot \vec{z} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Or $\alpha \neq 0$ et $[ab] \neq 0$

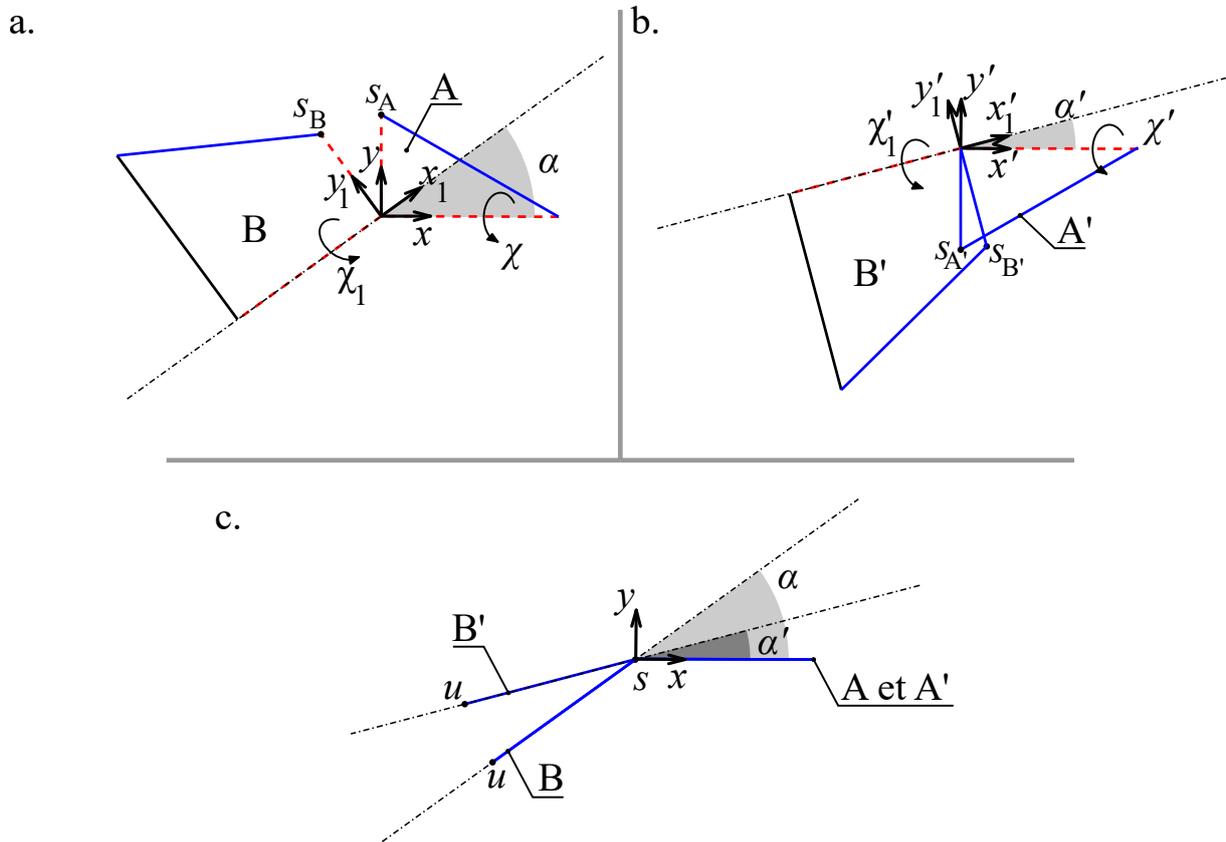


FIGURE 5.21 – Illustration de la démonstration et des annotations utilisées.

$$\begin{aligned}
 \Rightarrow \chi_1 &= \pm 90^\circ \\
 \chi &= \pm 90^\circ \\
 \chi &= \chi_1
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

Le patron est défini avec les plis oa et $a'b$ qui sont des plis vallée. On en déduit que $\chi = \chi_1 = 90^\circ$.

Avec le même raisonnement, on en déduit que pour assembler correctement les sommets $s_{A'}$ et $s_{B'}$, on a $\chi' = \chi'_1 = -90^\circ$. Le signe vient de la symétrie, comme le montre la figure Fig. 5.21 b. Les panneaux A' et B' sont respectivement reliés aux panneaux A et B par les plis aa' et bb' , ce qui est représenté en figure 5.21 c.

Pour satisfaire cette contrainte, et assembler les sommets u_B et $u_{B'}$ appartenant respectivement aux panneaux B et B' , il faut que $\alpha = \alpha'$, ce qui revient à rajouter la condition $\widehat{ab} = \widehat{a'b'}$.

Nous avons montré qu'avec ce patron, la seule configuration admettant un pliage des lignes aa' et bb' est lorsque ces dernières sont confondues, ce qui prouve l'unicité de la séquence de pliage en figure 2.5 permettant le pliage rigide du motif élémentaire.

Annexe B : Fonctionnement de l'AMF

Pour appréhender le fonctionnement de ces actionneurs, nous nous sommes appuyés sur l'ouvrage [Lagoudas, 2008], considéré comme une référence du domaine, pour fournir ici de manière simplifiée des éléments de compréhension du fonctionnement des AMF. Nous commençons par donner des explications sur les phénomènes physiques en jeu lors de l'utilisation de ces matériaux.

Les AMF ont deux phases cristallines possibles : phase « martensite » et « austénite ». Une schématisation des phases est illustrée en figure 5.22. Dans la phase martensite, les cristaux confèrent à la matière une élasticité importante. En effet, les cristaux peuvent s'orienter entre eux pour permettre la déformation de la matière sans dégradation. Quand les cristaux sont orientés de manière aléatoire, on parle de phase « martensite auto-accommodante ». Lorsque le matériau subit des contraintes dans cette phase, les cristaux s'orientent ce qui permet à la matière de se déformer de manière importante. On dit que les cristaux sont en phase « martensite orientée ». Lorsque la contrainte est retirée, les cristaux conservent leurs orientations. Pour obtenir l'effet mémoire de forme, il faut chauffer le matériau à des températures de l'ordre de grandeur de 70°C . Les cristaux changent alors de forme et le matériau est dans la phase austénite. Si le matériau est libre, les cristaux changent de forme. Si la forme du matériau est contrainte lors du changement de phase, ce dernier permet de générer une force qui tend à lui redonner sa forme en phase austénite. Tant que la température élevée est maintenue, le matériau reste dans la phase austénite. Enfin, lorsque la température du matériau chute, le matériau retourne dans la phase martensite. S'il n'y a pas de contrainte appliquée, les cristaux sont en phase martensite auto-accommodante, sinon ils sont en phase martensite orientée. Les transitions entre les phases ne sont pas binaires, la figure 5.23 illustre cette transition.

Nous faisons maintenant le lien entre la structure cristalline, la forme du fil d'AMF utilisé et les conséquences sur le mécanisme. Sur la figure 5.22a, nous avons un mécanisme où les ensembles cinématiques bleu et rouge sont en contact et où la structure cristalline est en phase martensite auto-accommodante. Pour placer le mécanisme dans son état inactif (Fig. 5.22b et c), nous appliquons une précontrainte manuellement sur l'ensemble cinématique rouge. Cette précontrainte a pour conséquence d'allonger le fil d'AMF, les cristaux s'orientent pour permettre l'allongement. Il y a maintenant une distance entre les ensembles cinématiques bleu et rouge, ce qui permet à la structure de changer de configuration sans que le mécanisme de rigidification n'ait d'impact (Fig. 5.22c). Sur la figure 5.22 d, un courant est utilisé pour chauffer l'AMF par effet joule. La structure cristalline passe dans la phase austénite et le fil d'AMF se contracte ayant pour conséquence de placer les ensembles bleu et rouge en contact. Tant que l'AMF est chauffé, le changement de configuration sera limité par la force que peut générer le fil d'AMF pour maintenir sa phase austénite. Une fois que le fil est refroidi (Fig. 5.22 c), la structure cristalline est de nouveau en phase martensite auto-accommodante. La longueur du fil reste dans son état « court » tant qu'aucune contrainte n'est appliquée.

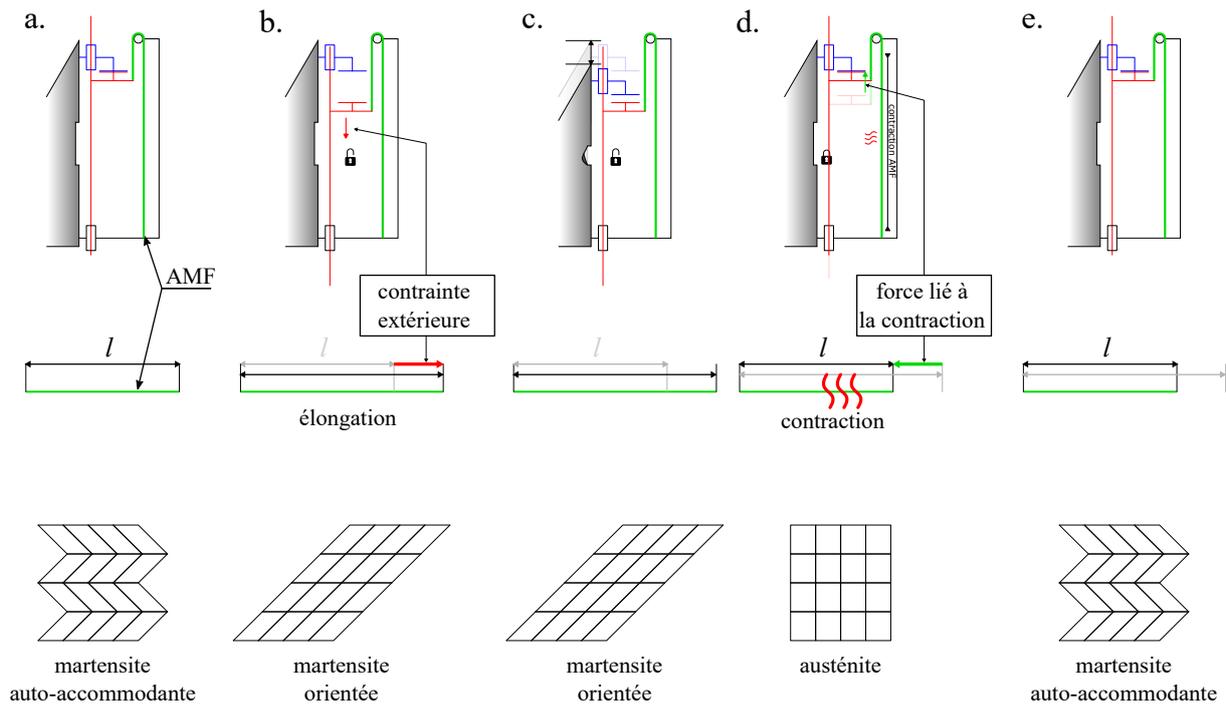


FIGURE 5.22 – Lien entre l'état du mécanisme, en première ligne, l'état du fil d'AMF en deuxième ligne et l'état des cristaux dans l'AMF en troisième ligne.

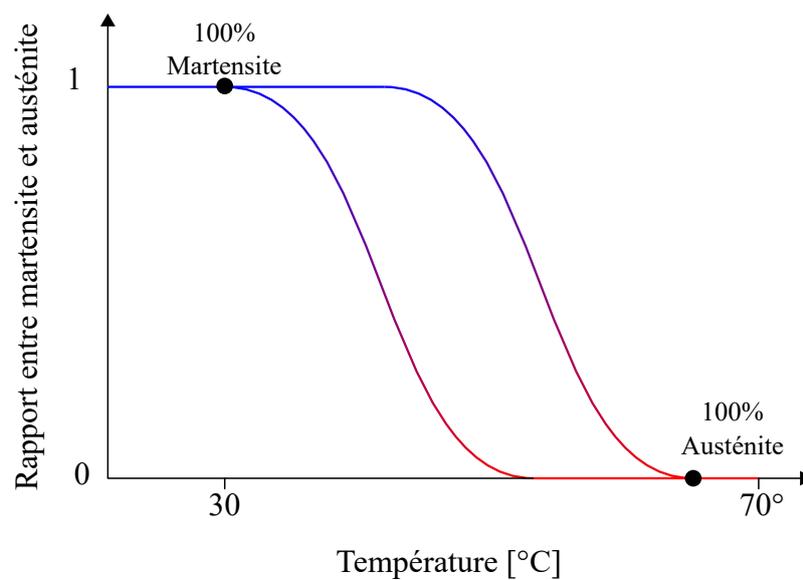


FIGURE 5.23 – Courbe idéalisée illustrant la transition d'état des cristaux de matière en fonction de la température lorsqu'il n'y a pas de contrainte dans le matériau.

Pour aller plus loin dans l'utilisation du fil d'AMF, nous ajoutons une précision : la phase de la structure n'est pas forcément la même sur toute la longueur du fil. Par ailleurs, il est possible d'utiliser la phase austénite pour appliquer une force de tension entre les sommets du pli en (Fig. 5.22d). Pour ce faire, à l'aide d'un réglage de longueur nous faisons en sorte que la longueur du fil entre la phase austénite (Fig. 5.22 d) soit plus courte que ce qui est possible mécaniquement par le mécanisme. Ainsi lorsque le fil est chauffé, une force apparait entre les ensembles cinématiques bleu et rouge. Lorsque le fil refroidit, il est encore sous contrainte. Pour une partie du fil la structure cristalline s'orientera.

Annexe C : Illustration de la roue quasi-circulaire

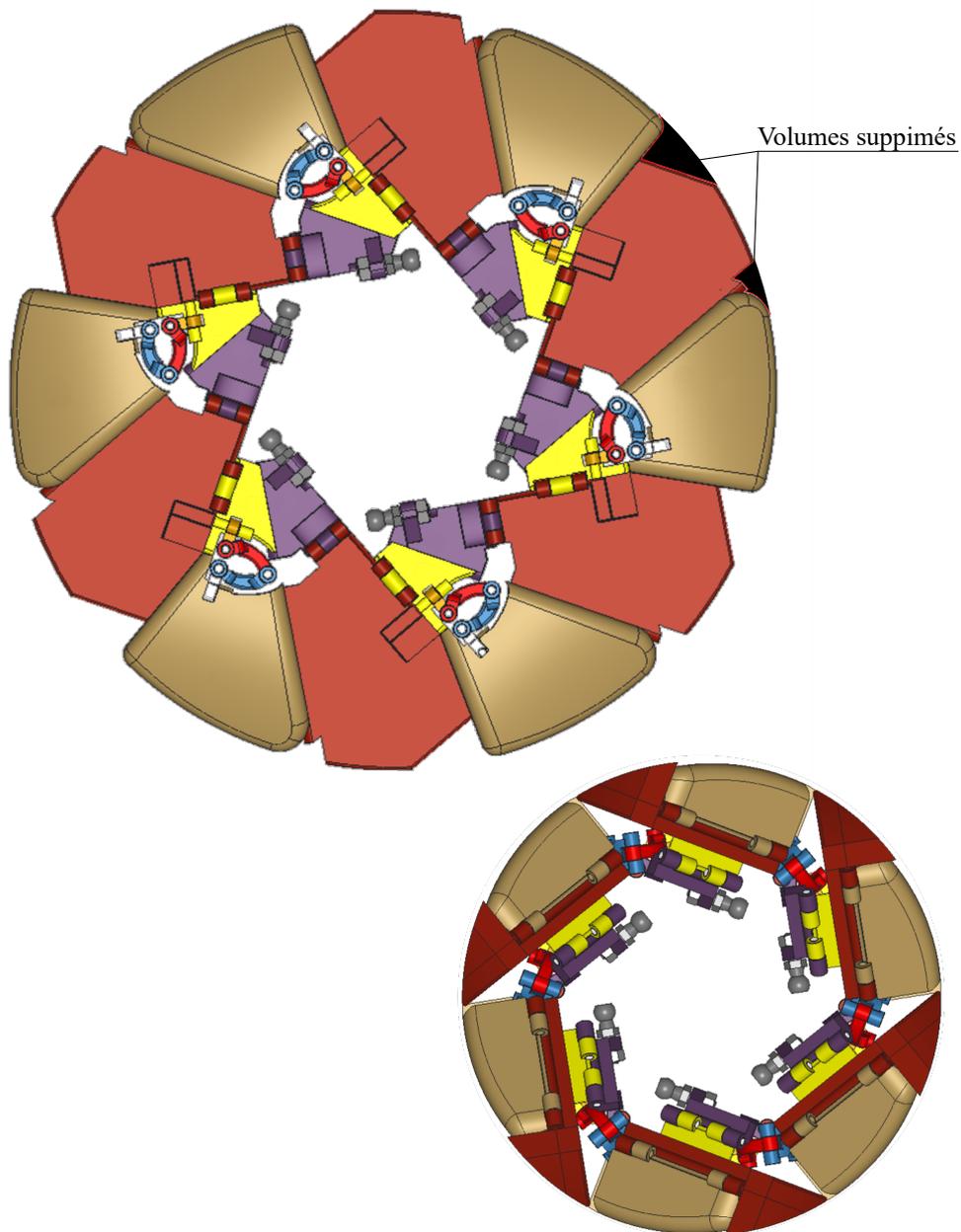


FIGURE 5.24 – Illustration de la roue à profil quasi-circulaire après une itération.

Bibliographie

- [Angatkina et al., 2017] Angatkina, O., Chien, B., Pagano, A., Yan, T., Alleyne, A., Tawfick, S., and Wissa, A. (2017). A metameric crawling robot enabled by origami and smart materials. In *Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, volume 58257, page V001T06A008. American Society of Mechanical Engineers.
- [Austin, 2018] Austin, C. (2018). *The relationship between Stryd power and running economy in well-trained distance runners 2018*. PhD thesis, SUNY College Cortland.
- [Baek et al., 2016] Baek, S.-M., Lee, D.-Y., and Cho, K.-J. (2016). Curved compliant facet origami-based self-deployable gliding wing module for jump-gliding. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, volume 50169, page V05BT07A028. American Society of Mechanical Engineers.
- [Balkcom and Mason, 2008] Balkcom, D. J. and Mason, M. T. (2008). Robotic origami folding. *The International Journal of Robotics Research*, 27(5) :613–627.
- [Bassik et al., 2010] Bassik, N., Brafman, A., Zarafshar, A. M., Jamal, M., Luvsanjav, D., Selaru, F. M., and Gracias, D. H. (2010). Enzymatically triggered actuation of miniaturized tools. *Journal of the American Chemical Society*, 132(46) :16314–16317.
- [Berre, 2019] Berre, J. (2019). Stratégies de conception et fabrication pour des systèmes robotiques basés sur les origamis. Master’s thesis, INSA de Strasbourg.
- [Bhovad and Li, 2018] Bhovad, P. and Li, S. (2018). Using multi-stable origami mechanism for peristaltic gait generation : A case study. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, volume 51814, page V05BT07A061. American Society of Mechanical Engineers.
- [Birkmeyer et al., 2009] Birkmeyer, P., Peterson, K., and Fearing, R. S. (2009). Dash : A dynamic 16g hexapedal robot. In *2009 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*, pages 2683–2689. IEEE.
- [Carholt et al., 2016] Carholt, O., Fresk, E., Andrikopoulos, G., and Nikolakopoulos, G. (2016). Design, modelling and control of a single rotor uav. In *2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, pages 840–845. IEEE.
- [Cartier Millon, 2022] Cartier Millon, D. (2022). Conception d’un drone basé sur des origamis. Master’s thesis, INSA de Strasbourg.
- [Coleman, 2018] Coleman, B. (2018). *Origami 101 : Master Basic Skills and Techniques Easily Through Step-by-Step Instruction*. 101. Quarry Books.

- [Deshpande et al., 2017] Deshpande, A. R., Tse, Z. T. H., and Ren, H. (2017). Origami-inspired bi-directional soft pneumatic actuator with integrated variable stiffness mechanism. In *2017 18th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, pages 417–421. IEEE.
- [Drozdov and Gupta, 2003] Drozdov, A. and Gupta, R. (2003). Non-linear viscoelasticity and viscoplasticity of isotactic polypropylene. *International Journal of Engineering Science*, 41(20) :2335–2361.
- [Fang et al., 2017] Fang, H., Zhang, Y., and Wang, K. (2017). An earthworm-like robot using origami-ball structures. In *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2017*, volume 10164, pages 229–238. SPIE.
- [Filipov et al., 2017] Filipov, E., Liu, K., Tachi, T., Schenk, M., and Paulino, G. H. (2017). Bar and hinge models for scalable analysis of origami. *International Journal of Solids and Structures*, 124 :26–45.
- [Filipov et al., 2015] Filipov, E. T., Tachi, T., and Paulino, G. H. (2015). Origami tubes assembled into stiff, yet reconfigurable structures and metamaterials. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(40) :12321–12326.
- [Firouzeh and Paik, 2017] Firouzeh, A. and Paik, J. (2017). An under-actuated origami gripper with adjustable stiffness joints for multiple grasp modes. *Smart Materials and Structures*, 26(5) :055035.
- [Gattas and You, 2013] Gattas, J. M. and You, Z. (2013). Quasi-static impact response of alternative origami-core sandwich panels. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, volume 55942, page V06BT07A032. American Society of Mechanical Engineers.
- [Guest and Pellegrino, 1994] Guest, S. D. and Pellegrino, S. (1994). The folding of triangulated cylinders, part i : Geometric considerations. *Journal of Applied Mechanics*, 61(4) :773–777.
- [Haldane et al., 2015] Haldane, D. W., Casarez, C. S., Karras, J. T., Lee, J., Li, C., Pullin, A. O., Schaler, E. W., Yun, D., Ota, H., Javey, A., et al. (2015). Integrated manufacture of exoskeletons and sensing structures for folded millirobots. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 7(2) :021011.
- [Heimbs, 2009] Heimbs, S. (2009). Virtual testing of sandwich core structures using dynamic finite element simulations. *Computational Materials Science*, 45(2) :205–216.
- [Hu et al., 2021] Hu, Y., Zhou, Y., Kwok, K., and Sze, K. (2021). Simulating flexible origami structures by finite element method. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 17(4) :801–829.
- [Jeong and Lee, 2018] Jeong, D. and Lee, K. (2018). Design and analysis of an origami-based three-finger manipulator. *Robotica*, 36(2) :261–274.
- [Johnson et al., 2017] Johnson, M., Chen, Y., Hovet, S., Xu, S., Wood, B., Ren, H., Tokuda, J., and Tse, Z. T. H. (2017). Fabricating biomedical origami : a state-of-the-art

- review. *International journal of computer assisted radiology and surgery*, 12(11) :2023–2032.
- [Kalafat et al., 2021] Kalafat, M. A., Sevinç, H., Samankan, S., Altınkaynak, A., and Temel, Z. (2021). A novel origami-inspired delta mechanism with flat parallelogram joints. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 13(2).
- [Kim et al., 2015] Kim, J., Lee, D.-Y., Kim, S.-R., and Cho, K.-J. (2015). A self-deployable origami structure with locking mechanism induced by buckling effect. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 3166–3171. IEEE.
- [Kresling, 2008] Kresling, B. (2008). Natural twist buckling in shells : from the hawkmoth’s bellows to the deployable kresling-pattern and cylindrical miura-ori. In *Proceedings of the 6th International Conference on Computation of Shell and Spatial Structures IASS-IACM*.
- [Lagoudas, 2008] Lagoudas, D. C. (2008). *Shape memory alloys : modeling and engineering applications*. Springer.
- [Lang, 2012] Lang, R. (2012). *The Complete Book of Origami : Step-by-Step Instructions in Over 1000 Diagrams*. Dover Origami Papercraft. Dover Publications.
- [Lang, 2018] Lang, R. J. (2018). *Twists, tilings, and tessellations : mathematical methods for geometric origami*. CRC Press.
- [Lee et al., 2013a] Lee, D.-Y., Jung, G.-P., Sin, M.-K., Ahn, S.-H., and Cho, K.-J. (2013a). Deformable wheel robot based on origami structure. In *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 5612–5617. IEEE.
- [Lee et al., 2021] Lee, D.-Y., Kim, J.-K., Sohn, C.-Y., Heo, J.-M., and Cho, K.-J. (2021). High-load capacity origami transformable wheel. *Science Robotics*, 6(53) :eabe0201.
- [Lee et al., 2013b] Lee, D.-Y., Kim, J.-S., Kim, S.-R., Koh, J.-S., and Cho, K.-J. (2013b). The deformable wheel robot using magic-ball origami structure. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, volume 55942, page V06BT07A040. American Society of Mechanical Engineers.
- [Lee et al., 2017a] Lee, D.-Y., Kim, S.-R., Kim, J.-S., Park, J.-J., and Cho, K.-J. (2017a). Origami wheel transformer : A variable-diameter wheel drive robot using an origami structure. *Soft robotics*, 4(2) :163–180.
- [Lee et al., 2017b] Lee, J. Y., Song, S. H., Shon, H. W., Choi, H. R., and Yim, W. (2017b). Modeling and control of a saucer type coandă effect uav. In *2017 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*, pages 2717–2722. IEEE.
- [Lerner et al., 2020] Lerner, E., Zhang, H., and Zhao, J. (2020). Design and Experimentation of a Variable Stiffness Bistable Gripper. In *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 9925–9931. IEEE.

- [Li et al., 2019] Li, S., Stampfli, J. J., Xu, H. J., Malkin, E., Diaz, E. V., Rus, D., and Wood, R. J. (2019). A vacuum-driven origami “magic-ball” soft gripper. In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 7401–7408. IEEE.
- [Liu and Paulino, 2017] Liu, K. and Paulino, G. (2017). Nonlinear mechanics of non-rigid origami : an efficient computational approach. *Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 473(2206) :20170348.
- [Liu et al., 2015] Liu, S., Lu, G., Chen, Y., and Leong, Y. W. (2015). Deformation of the miura-ori patterned sheet. *International Journal of Mechanical Sciences*, 99 :130–142.
- [Liu et al., 2017] Liu, T., Wang, Y., and Lee, K. (2017). Three-dimensional printable origami twisted tower : Design, fabrication, and robot embodiment. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(1) :116–123.
- [Mertyüz et al., 2020] Mertyüz, İ., Tanyıldızı, A. K., Taşar, B., Tatar, A. B., and Yakut, O. (2020). Fuhar : A transformable wheel-legged hybrid mobile robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 133 :103627.
- [Morgan et al., 2016] Morgan, M. R., Lang, R. J., Magleby, S. P., and Howell, L. L. (2016). Towards developing product applications of thick origami using the offset panel technique. *Mechanical Sciences*, 7(1) :69–77.
- [Mulgaonkar et al., 2016] Mulgaonkar, Y., Araki, B., Koh, J.-s., Guerrero-Bonilla, L., Aukes, D. M., Makineni, A., Tolley, M. T., Rus, D., Wood, R. J., and Kumar, V. (2016). The flying monkey : A mesoscale robot that can run, fly, and grasp. In *2016 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*, pages 4672–4679. IEEE.
- [Nayakanti, 2016] Nayakanti, N. (2016). *Flexigami : folded polygonal unit cells for deployable metamaterials and mechanisms*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- [Nojima et al., 2002] Nojima, T. et al. (2002). *Origami modeling of functional structures based on organic patterns*. PhD thesis, Kyoto University.
- [Onal et al., 2014] Onal, C. D., Tolley, M. T., Wood, R. J., and Rus, D. (2014). Origami-inspired printed robots. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 20(5) :2214–2221.
- [Onal et al., 2012] Onal, C. D., Wood, R. J., and Rus, D. (2012). An origami-inspired approach to worm robots. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(2) :430–438.
- [Pagano et al., 2016] Pagano, A., Leung, B., Chien, B., Yan, T., Wissa, A., and Tawfick, S. (2016). Multi-stable origami structure for crawling locomotion. In *Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, volume 50497, page V002T06A005. American Society of Mechanical Engineers.
- [Pagano et al., 2017] Pagano, A., Yan, T., Chien, B., Wissa, A., and Tawfick, S. (2017). A crawling robot driven by multi-stable origami. *Smart Materials and Structures*, 26(9) :094007.

- [Paulos and Yim, 2015] Paulos, J. and Yim, M. (2015). Flight performance of a swash-plateless micro air vehicle. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 5284–5289. IEEE.
- [Sanprueksin and Wongviriyawong, 2017] Sanprueksin, C. and Wongviriyawong, C. (2017). Kinematics and design of a rigid foldable origami robot. In *2017 18th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, pages 161–166. IEEE.
- [Sareh et al., 2018] Sareh, P., Chermprayong, P., Emmanuelli, M., Nadeem, H., and Kovac, M. (2018). Rotorigami : A rotary origami protective system for robotic rotorcraft. *Science Robotics*, 3(22) :eaah5228.
- [Sargent et al., 2020] Sargent, B., Butler, J., Seymour, K., Bailey, D., Jensen, B., Magleby, S., and Howell, L. (2020). An origami-based medical support system to mitigate flexible shaft buckling. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 12(4).
- [Schenk et al., 2011] Schenk, M., Guest, S. D., et al. (2011). Origami folding : A structural engineering approach. *Origami*, 5 :291–304.
- [Sung and Rus, 2015] Sung, C. and Rus, D. (2015). Foldable joints for foldable robots. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 7(2) :021012.
- [Tachi et al., 2011] Tachi, T. et al. (2011). Rigid-foldable thick origami. *Origami*, 5(5) :253–264.
- [Tanaka et al., 2007] Tanaka, K., Kamotani, Y., and Yokokohji, Y. (2007). Origami folding by a robotic hand. In *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2540–2547. IEEE.
- [Tang and Dai, 2018] Tang, Z. and Dai, J. S. (2018). Bifurcated configurations and their variations of an 8-bar linkage derived from an 8-kaleidocycle. *Mechanism and Machine Theory*, 121 :745–754.
- [Terada et al., 2017] Terada, K., Kadoi, K., Tokura, S., Sushida, T., and Hagiwara, I. (2017). The deformation mechanism on origami-based foldable structures. *International Journal of Vehicle Performance*, 3(4) :334–346.
- [Win et al., 2021] Win, S. K. H., Win, L. S. T., Sufiyan, D., and Foong, S. (2021). Design and control of the first foldable single-actuator rotary wing micro aerial vehicle. *Bioinspiration & Biomimetics*, 16(6) :066019.
- [Wu et al., 2021] Wu, S., Ze, Q., Dai, J., Udipi, N., Paulino, G. H., and Zhao, R. (2021). Stretchable origami robotic arm with omnidirectional bending and twisting. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(36) :e2110023118.
- [Yasuda et al., 2022] Yasuda, H., Johnson, K., Arroyos, V., Yamaguchi, K., Raney, J. R., and Yang, J. (2022). Leaf-like origami with bistability for self-adaptive grasping motions. *Soft Robotics*, 9(5) :938–947.
- [Yasuda et al., 2017] Yasuda, H., Tachi, T., Lee, M., and Yang, J. (2017). Origami-based tunable truss structures for non-volatile mechanical memory operation. *Nature communications*, 8(1) :1–7.

- [Yiğit et al., 2021] Yiğit, A., Perozo, M. A., Cuvillon, L., Durand, S., and Gangloff, J. (2021). Novel omnidirectional aerial manipulator with elastic suspension : Dynamic control and experimental performance assessment. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(2) :612–619.
- [Zhao et al., 2015] Zhao, D., Li, Y., Wang, M., Duan, C., and You, Z. (2015). Fabrication of polymer origami-based v-type folded core. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, volume 57137, page V05BT08A038. American Society of Mechanical Engineers.
- [Zirbel et al., 2013] Zirbel, S. A., Lang, R. J., Thomson, M. W., Sigel, D. A., Walkemeyer, P. E., Trease, B. P., Magleby, S. P., and Howell, L. L. (2013). Accommodating Thickness in Origami-Based Deployable Arrays¹. *Journal of Mechanical Design*, 135(11). 111005.
- [Zuliani et al., 2018] Zuliani, F., Liu, C., Paik, J., and Felton, S. M. (2018). Minimally actuated transformation of origami machines. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(3) :1426–1433.