

Quand l'origami inspire la construction

Élève de l'ENS Paris-Saclay, Illyana Lebrere, lors de sa première année en Sciences pour l'Ingénieur (année SAPHIRE) a suivi le parcours « Ingénierie civile ». Dans ce cadre les élèves ont, sur un thème imposé, à réaliser un état de l'art, un mémoire et à présenter une courte leçon. Cette ressource est issue de ce dossier.

Depuis des siècles, l'origami, art traditionnel japonais du pliage du papier, a captivé l'imagination à travers le monde. Cette activité artistique inspire aujourd'hui de nombreux domaines tel que les mathématiques, l'ingénierie spatiale ou encore la construction, sujet de cette ressource. En effet, l'origami ne se limite pas seulement à des créations esthétiques, ses différents motifs permettent une bonne résistance mécanique et des possibilités structurelles intéressantes. En explorant ces différents aspects, nous pouvons découvrir comment des techniques ancestrales de pliage peuvent être adaptées pour répondre aux exigences de la construction moderne, tant en termes de durabilité que de flexibilité. L'origami peut ainsi être utilisé pour améliorer les constructions existantes et susciter des idées novatrices pour celles à venir.

Cette ressource, introduction à l'utilisation des principes de l'origami dans la construction, se concentre sur l'inspiration de la construction dans l'art de l'origami et comment ses différentes propriétés sont utilisées pour construire de nouveaux bâtiments, adapter les existants ou encore trouver des solutions innovantes à des enjeux actuels.

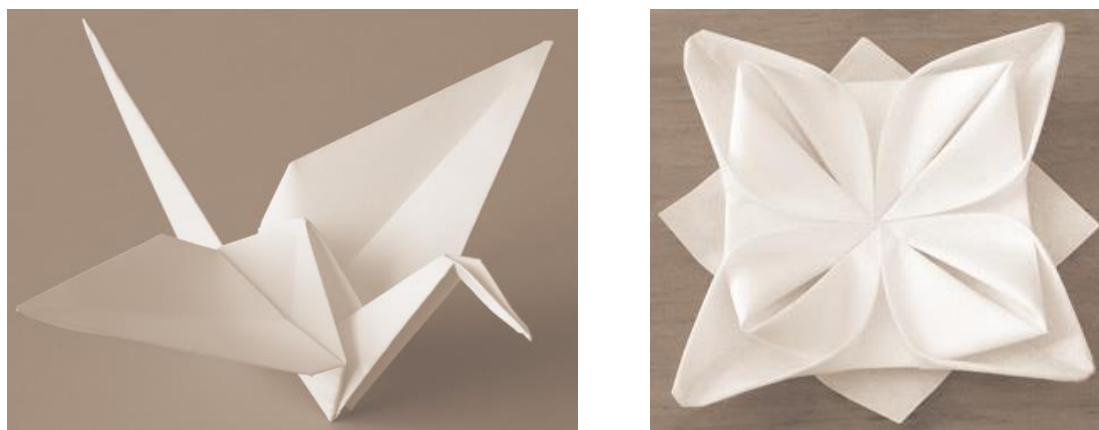


Figure 1 : Origami classique de la grue en papier et origami de fleur pour une serviette de table

1 - Construire en origami

L'utilisation des principes de l'origami pour la construction peut se justifier par son esthétisme, mais aussi sa capacité à changer de forme en un mouvement (protection solaire) ou encore sa résistance structurelle.

1.1 - Historique et définition

Étymologiquement, l'*origami* vient du japonais *oru* qui signifie *plier* et *kami* (prononcé *gami*) pour papier. Cela désigne plus largement l'art de plier le papier [1]. Originaire de Chine, cet art est né

probablement conjointement aux premières fabrications de papier au 1^{er} siècle. La diffusion de l'art du pliage accompagne la diffusion de la fabrication du papier ; arrivé au Japon au VII^e siècle, l'origami y connaît un essor particulièrement important. Comme la fabrication du papier, l'origami apparaît plus tardivement sur le continent européen vers le XVI^e siècle en support tissu, comme le pliage des serviettes sur un table (figure 1). Les origamis tels qu'on les connaît aujourd'hui (figure 2) vont être démocratisés par Friedrich Fröbel¹, éducateur allemand du XIX^e siècle [3].



Figure 2 : Photographies de pliages en origami [4]

L'utilisation de l'origami dans le domaine de la construction est déjà réelle, des architectes et des ingénieurs ont utilisé ses grands principes pour construire de manière plus ergonomique ou encore esthétique (exemple section suivante). Dans un contexte où l'industrie de la construction cherche à se renouveler, l'exploration de l'origami en tant que source d'inspiration pour l'architecture apparaît intéressante, et on peut imaginer que cet art fera partie de la formation des futurs constructeurs [5].

1.2 - Un exemple de projet de construction : les tours jumelles Al Bahr, entre esthétique et protection solaire

Un exemple de construction récente d'utilisation de l'origami est les tours jumelles Al Bahr située aux Emirats arabes unis (figure 3). Dans une région aux températures pouvant dépasser les 50°C, un des principaux enjeux de la construction réside dans la protection contre les rayons lumineux et la ventilation des bâtiments pour garantir un confort thermique aux usagers et ce quelques soient les conditions climatiques extérieures.



Figure 3 : Une des deux tours Al Bahr aux Emirats arabes unis [6]

¹ Friedrich Fröbel (1782-1852), pédagogue allemand, à l'origine des jardins d'enfants [2]

Les techniques d'origami sont utilisées dans la double peau du bâtiment. Pour faire face aux fortes chaleurs, les architectes ont repris le principe du Moucharabieh², en ajoutant un caractère mobile puisque cette double peau se rétracte ou se détend modifiant ainsi la surface d'ouverture.

La figure 4 montre le principe de fonctionnement des triangles utilisés autour des façades des tours Al Bahr. Comme le montre la figure 4a les triangles fonctionnent en six pyramides reliées les unes aux autres et chacune est pilotée par un piston. Ce dernier permet alors de mettre en mouvement les faces des différents triangles pour permettre aux rayons lumineux de pénétrer plus ou moins dans le bâtiment mais également favoriser ou non la circulation de l'air pour la ventilation. Avec un seul actionneur (un piston central, figure 5), une pyramide est mise en mouvement. Pour envisager faire un mécanisme similaire de manière traditionnelle sans utiliser les principes des origamis, il aurait fallu un actionneur pour chaque panneau de chaque pyramide et les synchroniser entre eux. Les lois de commande seraient alors d'autant plus compliquées. L'utilisation du principe des origamis permet une simplification des commandes et du fonctionnement.



(a) Vues extérieures



(b) Vue intérieure

Figure 4 : Motif en triangles des tours d'Al Bahr aux Emirats arabes unis [6]

La vidéo [Kinetic architecture - al bahar towers](#) de Rhino Grasshopper [8] montre l'évolution de la membrane et l'exécution des actionneurs cités précédemment (figure 5).

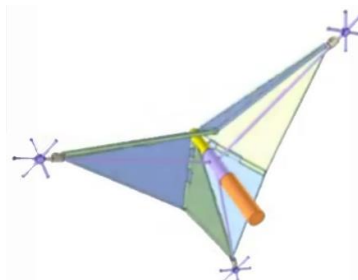


Figure 5 : Image extraite de la vidéo du fonctionnement de la cinématique des triangles utilisée pour les tours Al Bahr [8]

² Cloison ajourée permettant une ventilation naturelle ou forcée, fréquemment utilisée dans l'architecture traditionnelle des pays arabes [7]

2 - Le fonctionnement mécanique de l'origami : l'origami pour construire

L'art de l'origami présente un intérêt dans la résistance mécanique, thème que nous allons maintenant aborder.

2.1 - Plier pour résister : résistance mécanique

Prenons l'exemple simple d'une feuille de papier pliée en deux : dans son état déplié, elle ne tient pas en équilibre en trois dimensions, mais pliée en deux, on obtient une configuration qui s'avère être stable. Un simple pli augmente la résistance mécanique de cette structure élémentaire. C'est plus généralement le cas pour les différents motifs d'origami les plus connus tels que :

- Motif Miura Ori (figures 7a et 12, détaillé section 2.2) ;
- Motif Ron Resch's (figure 6) ;
- Motif en boîte d'œufs (figure 7b) ;
- Et bien d'autres encore ...

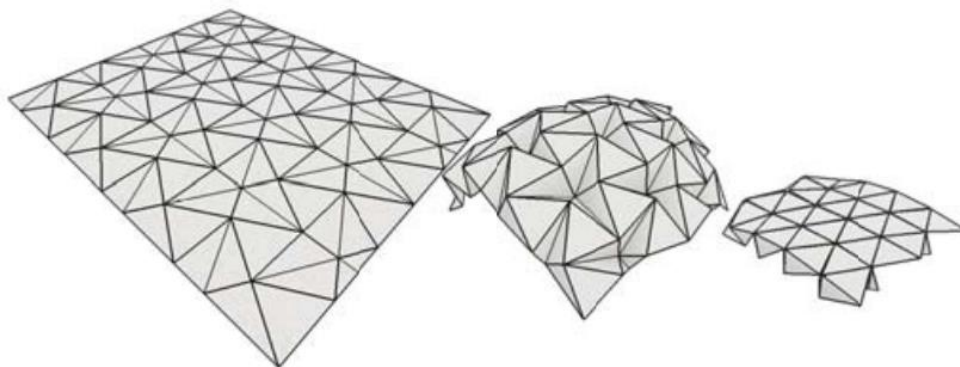
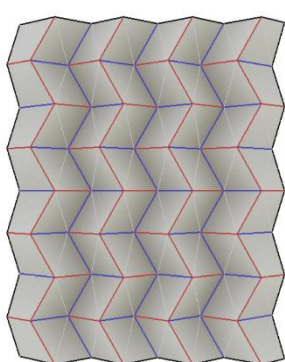


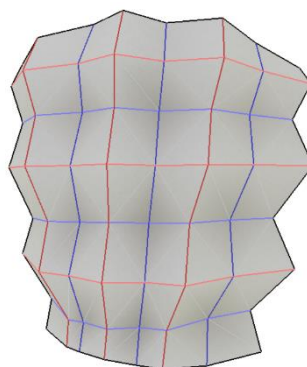
Figure 6 : Motif Ron Resch's dans 3 états : à plat, semi plié et plié [9]

2.1.1 - Un logiciel de modélisation des motifs

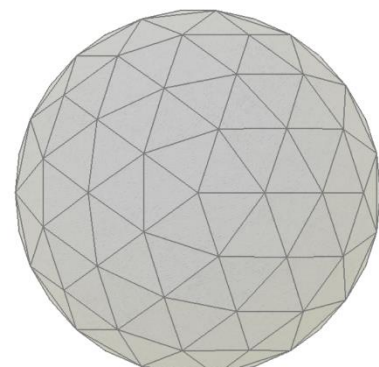
Tomahiro Tashi³ a développé un logiciel de modélisation de motifs : *FreeformOrigami*⁴. Il propose quelques exemples, dont certains, présentés en figure 7, montrent la diversité des géométries qu'il est possible de générer. Le motif *Miura Ori* (figure 7a) est étudié plus précisément section 2.



(a) Motif Miura Ori



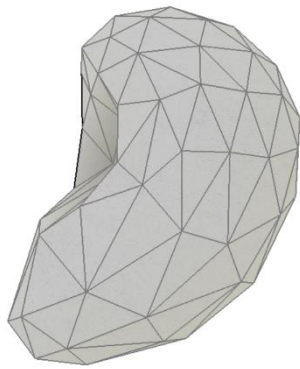
(b) Motif boîte d'œufs



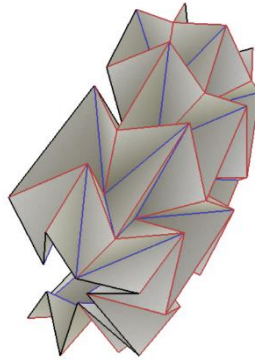
(c) Motif géodésique

³ Tomahiro Tashi (1982), universitaire japonais, spécialiste de l'origami dans une vue interdisciplinaire combinant des approches mathématiques du pliage du papier, de la rigidité structurelle, de la géométrie computationnelle, de l'architecture et de la science des matériaux [10].

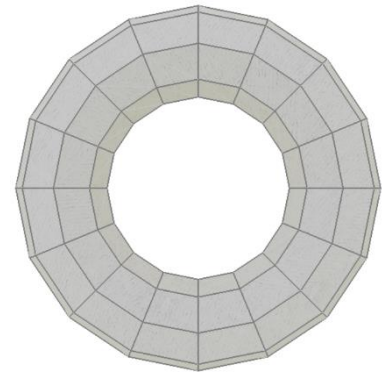
⁴ <https://www.tsg.ne.jp/TT/software/#ffo>



(d) Motif en mousse



(e) Motif bombe à eau



(f) Motif tore plié

Figure 7 : Motifs proposés par FreeformOrigami [11]

2.1.2 - Décrire géométriquement un pavage

Nous allons désormais chercher à établir des sortes de modèles de comportement des origamis. La conversion de structures périodiques discrètes en milieux homogènes continus peut s'avérer très complexe. En effet, un pli est possible mais décrire l'interaction de différentes structures périodiques entre elles (formant un pavage⁵) peut être très compliqué. Dans ce document, introduction à l'utilisation des principes de l'origami dans la construction, on ne présentera volontairement pas toute la théorie géométrique.

Objectif : On cherche à relier les différents paramètres géométriques d'un pavage pour à terme pouvoir trouver une combinaison optimale pour une utilisation donnée.

Paramétrisation générale : pour un pavage quelconque, deux modèles de représentations sont utilisés [8], ils se basent respectivement sur :

1. Les sommets (modèle dit en « treillis avec des instabilités ») ;
2. Les angles des pyramides (modèle dit de « charnières rotatives »).

On cherche à paramétrer un motif ou plus généralement une succession périodique de motifs. Commençons par étudier un pli dans un motif comme représenté sur la figure 8. Sur celle-ci, on caractérise un pli entre deux lignes (notées i et $i+1$) séparées par un angle α_i et, pour faire apparaître la troisième dimension, l'angle ρ_i avec le pli précédent (non représenté sur la figure 8) et un angle ρ_{i+1} avec le pli qui suit. Ces paramètres seront rangés dans une matrice χ_i .

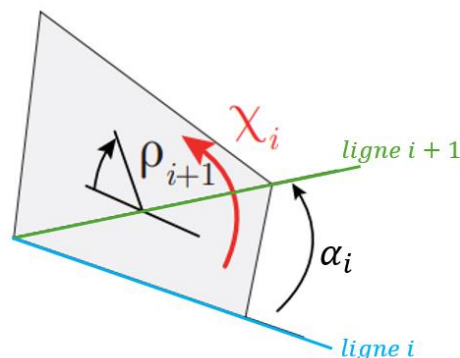


Figure 8 : Modélisation d'un motif d'origami et paramétrisation avec ρ_i , α_i et χ_i [9]

On pose (x_i, y_i, z_i) une base pour le pli i . On obtient les figures géométrales proposées en figure 9.

⁵ Ce qui s'appelle un pavage est la répétition périodique d'un motif.

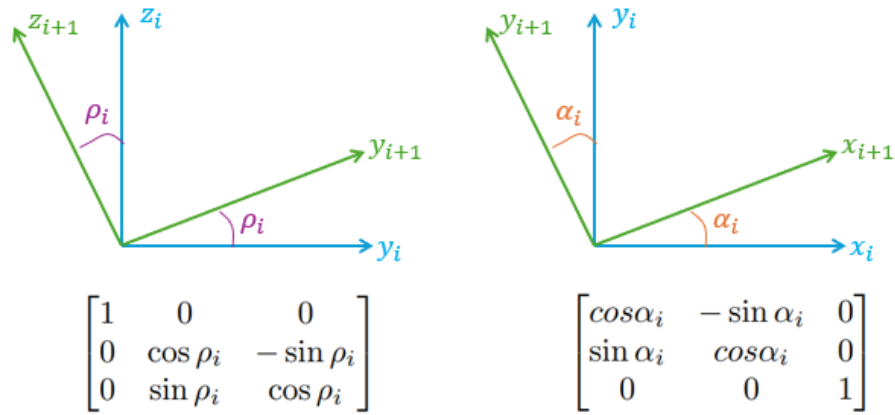


Figure 9 : Figures géométrales de changement de base

Ces changements de base peuvent être représentés par des matrices de rotation présentées en dessous des figures géométrales. Ainsi, pour chaque sommet intérieur et ses lignes de pli d'angles (figure 8) ρ_1, \dots, ρ_n , on a [9] :

$$R(\rho_1, \dots, \rho_n) = \prod_{i=1}^n \chi_i \chi_2 \dots \chi_n \quad (1)$$

où χ_i représente la rotation par les lignes de pli :

$$\chi_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \rho_i & -\sin \rho_i \\ 0 & \sin \rho_i & \cos \rho_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

avec α_i , l'angle entre les lignes de pli i et $i+1$.

En prenant $R(2,3)$, $R(3,1)$ et $R(1,2)$ on obtient trois équations [8]. En généralisant pour N_{V_i} sommets intérieurs on obtient donc $3 * N_{V_i}$ équations.

Usuellement, on range les équations obtenues dans une matrice de taille $3 * N_{V_i} * N_{E_i}$ où N_{E_i} est le nombre de lignes de pliage du pavage considéré.

Application : Étude du cas particulier d'un sommet de degré 4, sommet reliant quatre faces. Une représentation en trois dimensions est proposée en figure 10.

Remarque 1. Ici, $i \in [1,4]$

Pour un tel exemple, le but est de connaître l'évolution d'un angle en fonction de la variation d'un autre. Imaginons une application dans la structure de double peau des tours d'Al Bahr présentée section 1.2, il faut connaître précisément l'influence de la variation de l'angle piloté sur les autres angles de pliages pour maîtriser la commande des triangles tous pilotés par le piston central et obtenir la structure finale souhaitée.

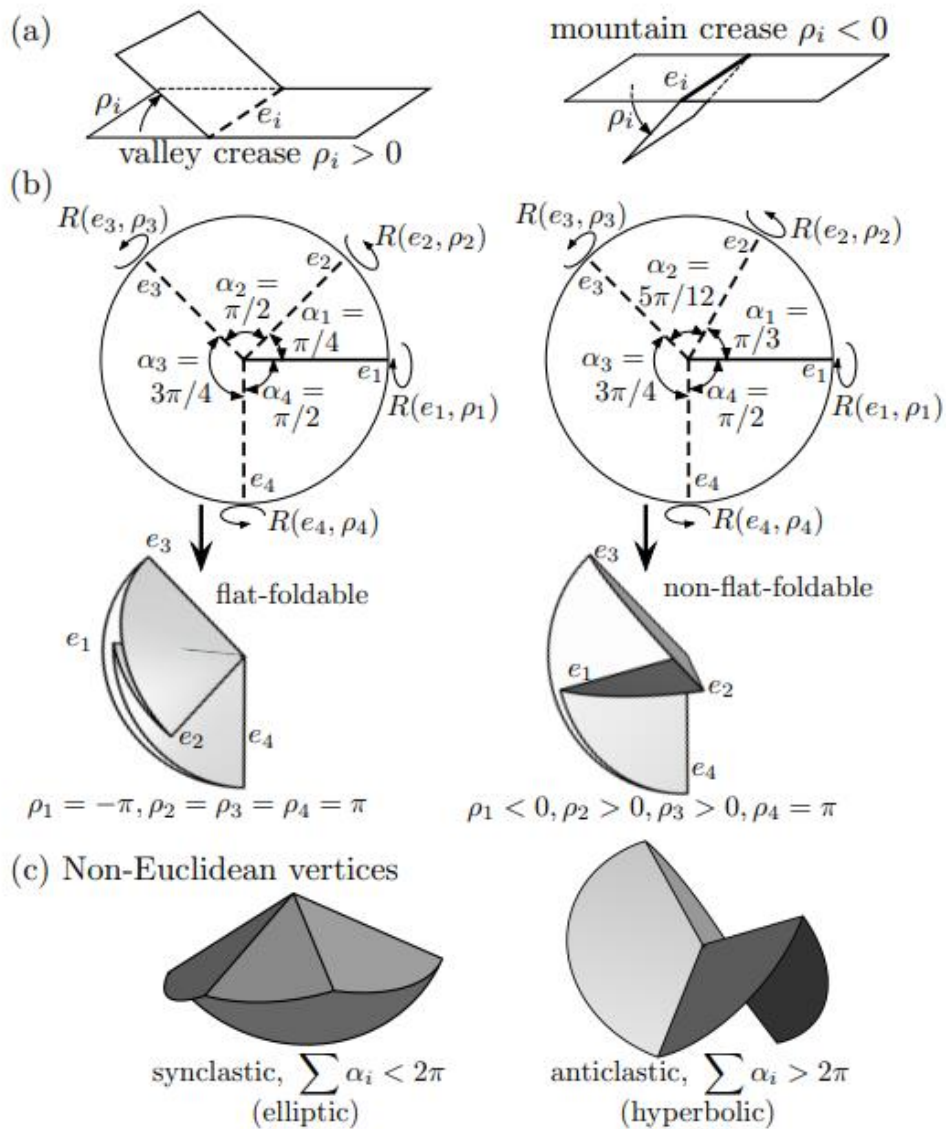


Figure 10 : (a) Les angles de pliage ρ_i définissent les plis en « vallée » et en « montagne »
 (b) Les angles de secteur α_i définissent des exemples de sommets pliables à plat et non pliables à plat
 (c) Exemples de sommets non euclidiens [12]

La figure 10 met en évidence les différents types de pliages comportant un sommet et quatre faces liées deux à deux ; pour un seul sommet de degrés 4 on s'aperçoit qu'il y a une multitude de possibilités de configurations pliées et dépliées. L'étude présentée porte uniquement sur les sommets euclidiens dont le motif est pliable dans le plan. Toutefois, il existe une généralisation pour un motif à quatre faces et un sommet [12].

On distingue :

- Les sommets euclidiens ;
 - Les motifs pliables dans le plan (\mathbb{R}^2) ;
 - Les motifs non pliables dans le plan (non étudiés dans cette ressource).
- Les sommets non euclidiens (non étudiés dans cette ressource).

Posons les variables d'études nécessaires au problème :

- Angles de pliages : ρ_i ;
- Pli (vecteur) : e_i ;
- Secteurs (angles sur le plan) : α_i .

On remarque que l'on peut mettre en évidence l'existence d'un unique degré de liberté, en effet, ici on a quatre plis d'angles ρ_i , $i \in [1,4]$, quatre angles α_i , $i \in [1,4]$ et $3 \cdot N_V \cdot (N_E - 1) = 9$ équations, il reste donc un degré de liberté.

On cherche à établir une relation entre les différents angles paramétrant le motif.

Le théorème 1 (ci-après) nous permet d'établir une relation entre ρ_1 et ρ_2 . On peut donc lier nos angles et envisager des lois de pilotage de ces derniers ou optimiser le choix de ces derniers pour obtenir la résistance structurelle voulue ou encore l'encombrement souhaité pour laisser passer (ou pas) les rayons lumineux.

Théorème : [12] Pour un sommet d'origami développable, pliable à plat de degré 4 avec des angles de secteur α_i tels que $\alpha_1 \leq \alpha_2 < \alpha_3, \alpha_4$, les angles de pliage ρ_i vérifient :

$$\rho_1 = \rho_3, \quad \rho_2 = -\rho_4, \quad \tan\left(\frac{\rho_2}{2}\right) = -\frac{\cos\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}\right)} \tan\left(\frac{\rho_1}{2}\right) \quad (3)$$

ou

$$\rho_1 = -\rho_3, \quad \rho_2 = \rho_4, \quad \tan\left(\frac{\rho_1}{2}\right) = \frac{\sin\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right)} \tan\left(\frac{\rho_2}{2}\right) \quad (4)$$

Nota : pour la démonstration, une preuve est proposée dans [13].

La figure 11 illustre les deux modes générées par les équations du théorème.

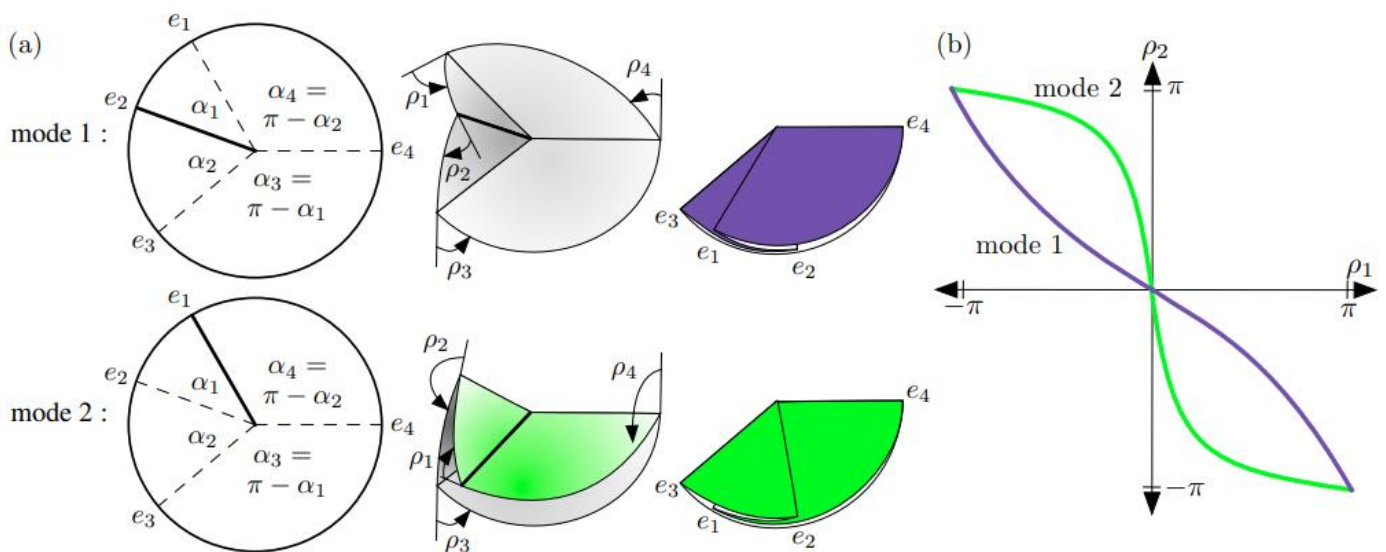


Figure 11 : (a) Les deux modes de pliage d'un sommet développable et pliable à plat de degré 4
(b) Les courbes de l'espace de configuration pour les angles de pliage ρ_1 et ρ_2 [12]

On a illustré la détermination simplifiée des angles de paramétrage d'un motif. D'autres théorèmes ont été démontrés pour des formes plus complexes, des méthodes numériques ont également été développées pour calculer les angles de pliage ρ_i , on peut notamment citer le logiciel *Tachi's Rigid Origami Simulator*.

2.2 - Un exemple de pavage : le motif *Miura Ori*

La description analytique du motif d'origami étant faite, examinons sa résistance mécanique afin de déterminer les directions de sollicitations à privilégier pour limiter les déformations. Cette ressource présente l'étude des essais mécaniques menés sur le motif *Miura Ori*, un des motifs de pavage les plus utilisés (figure 12).



Figure 12 : Pliage avec le motif *Miura Ori*

On étudiera deux types d'essais [14] :

1. Essai de compression uniaxial (hors et dans le plan) ;
2. Essai de flexion en 3 ou 4 points.

Toute cette partie est traitée dans le repère $(\vec{X}_1, \vec{X}_2, \vec{X}_3)$ présenté en figure 13 ; les deux essais sont menés sur un pavage motifs *Miura Ori* moulée par compression d'un matériau commercial, le copolymère Elvaloy [14].

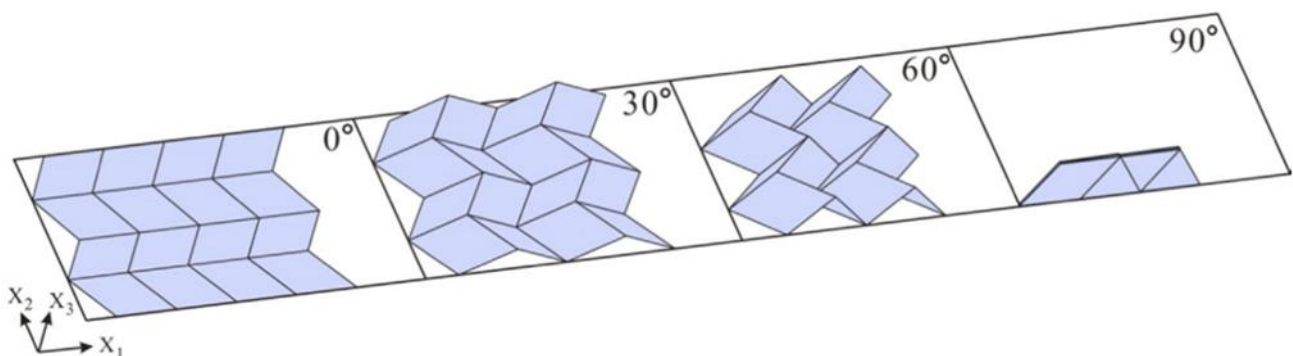
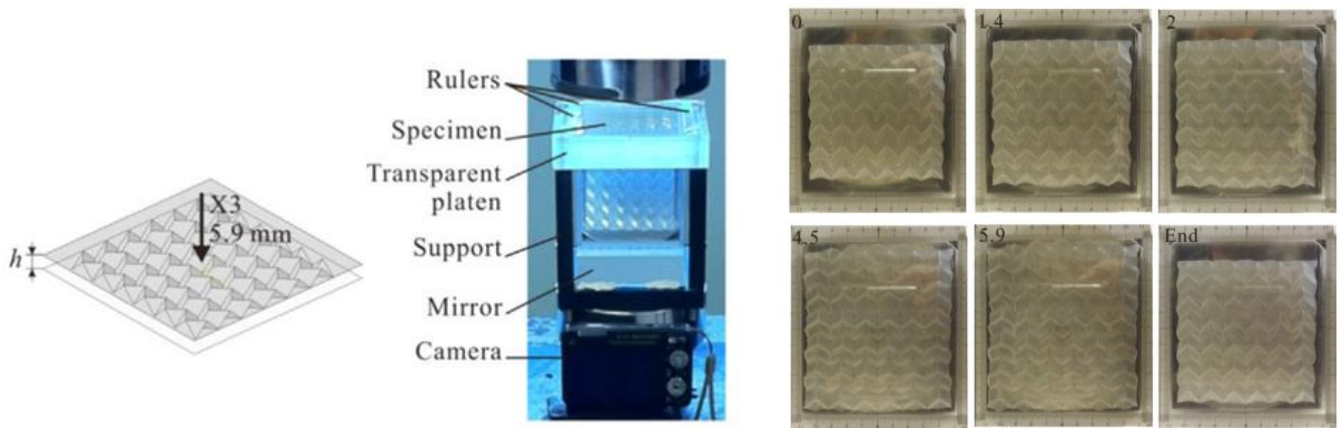


Figure 13 : Repère $(\vec{X}_1, \vec{X}_2, \vec{X}_3)$ pour le motif *Miura Ori* [14]

2.2.1 - Essai de compression hors plan

La mise en place de l'essai de compression hors plan est présentée en figure 14a. L'échantillon est placé entre un miroir et un plateau transparent. Une caméra est également placée sur le dispositif pour obtenir les résultats de la déformée (figure 14b).

Les figures 14b et 15 montrent les résultats obtenus dans [14] pour un essai en compression hors plan sur un motif de pavage *Miura Ori*. Sur la déformée on remarque que cette dernière évolue avec le temps et donc le chargement qui augmente, la déformation atteint un état irréversible.



(a) Mise en place de l'essai

(b) Déformée

Figure 14 : Essai en compression hors plan sur le motif Miura Ori [14]

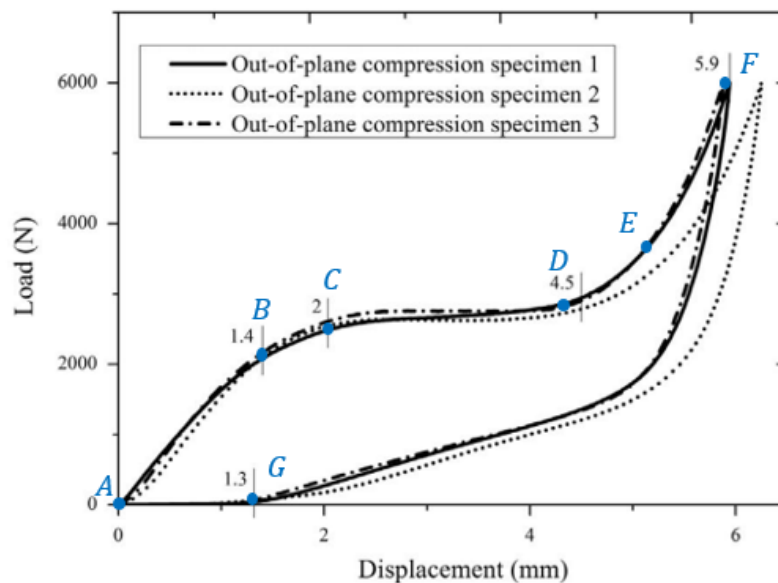


Figure 15 : Déplacement (en mm) en fonction de l'effort appliqué pour un essai en compression hors plan sur le motif Miura Ori [14]

Remarque 2. Le phénomène d'hystérésis visible sur la figure 15 est caractéristique de la phase de déchargement opérée [14].

Sur la figure 15, on distingue cinq phases :

1. Phase linéaire élastique (AB) ;
2. Augmentation non linéaire du déplacement avec la charge appliquée (BC) ;
3. Plateau de déformation (CD) ;
4. Effondrement de certains panneaux (DE) ;
5. Effondrement du motif (EF) ;
6. Phase de déchargement : le motif essaye de retrouver (sans succès) sa configuration initiale (FG).

2.2.2 - Essai de compression dans le plan

Désormais, nous allons étudier un essai de compression dans le plan. À l'inverse du premier essai de compression hors plan, cette fois-ci la force est appliquée dans la direction de repliement du pavage *Miura Ori*. Comme montré sur la figure 16a, on place deux plaques transparentes pour observer la déformée (figure 16b).

Les figures 16b et 17 montrent les résultats obtenus lors d'un essai en compression dans le plan sur un motif de pavage *Miura Ori*. On remarque que le motif essaye de revenir à sa configuration initiale [14].

Sur la figure 17, on remarque à nouveau ce phénomène d'hystérésis caractéristique du changement de raideur dans les différentes directions du pavage. Il semble important de noter que les dimensions de l'échantillon jouent un rôle important dans la raideur. Cette dernière dépend du point d'application de la force et de la taille de l'échantillon.

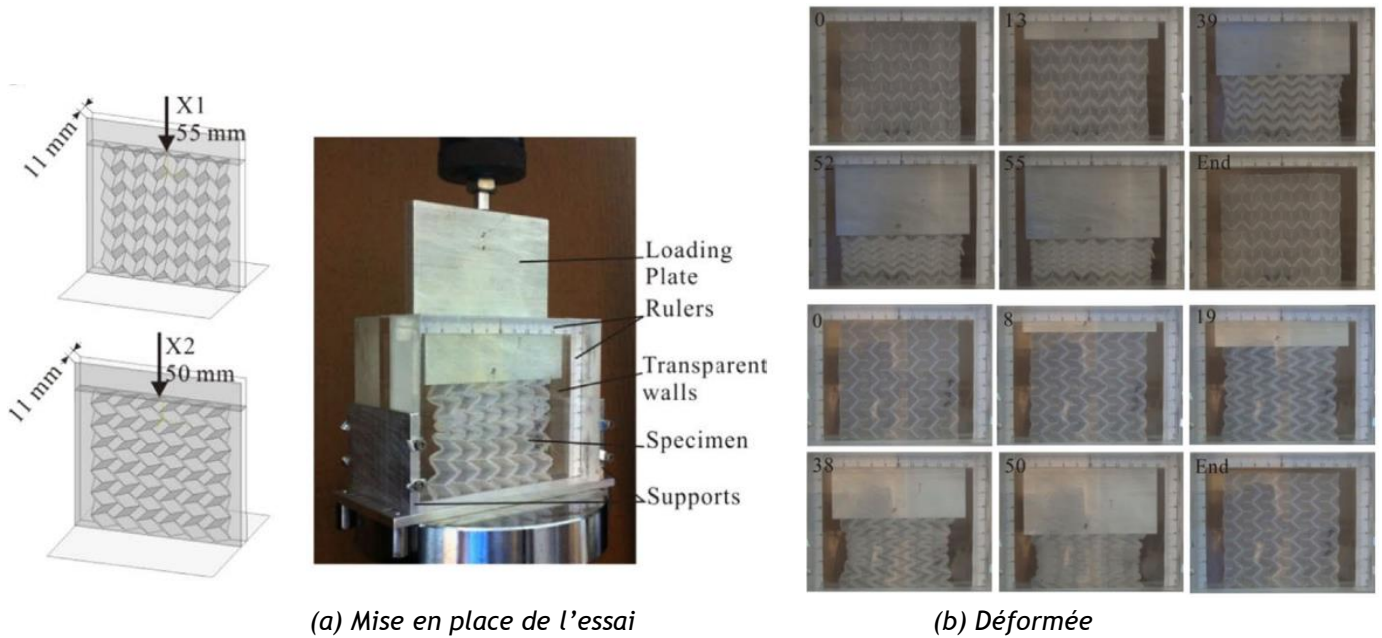


Figure 16 : Essai en compression dans le plan sur le motif Miura Ori [14]

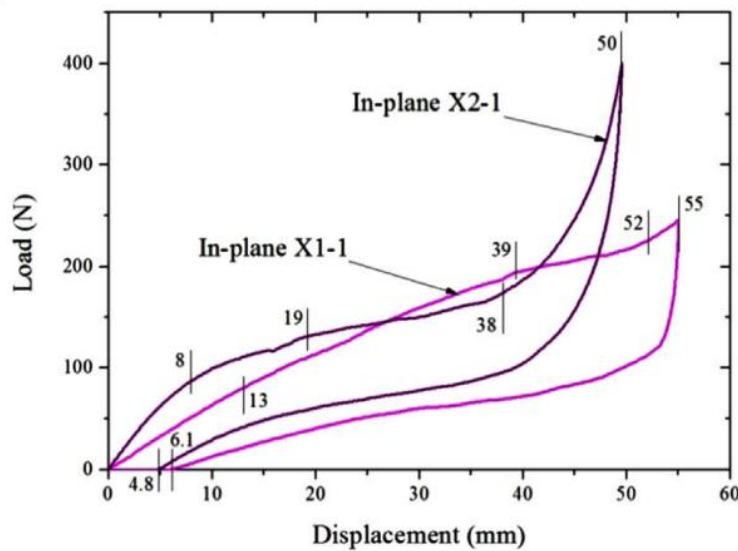


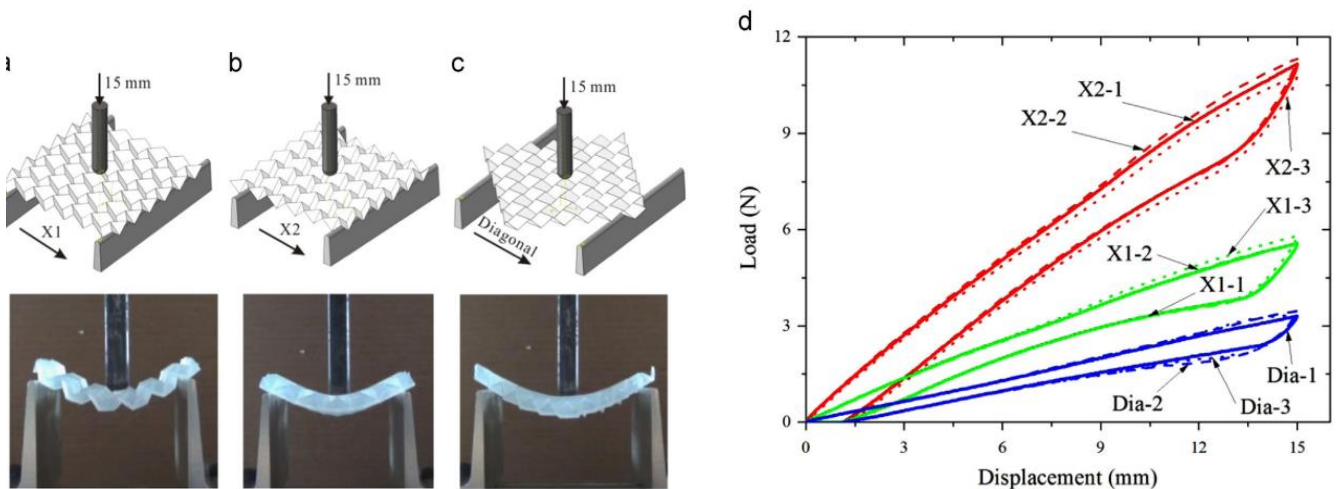
Figure 17 : Déplacement (en mm) en fonction de l'effort appliqué pour un essai en compression dans le plan sur le motif Miura Ori [14]

Les résultats dans la direction \vec{X}_2 ont montré une meilleure répétabilité que dans la direction \vec{X}_1 [14]. Cela peut notamment s'expliquer par de la friction entre le pavage et les parois transparentes. Seuls certains essais ont été pris en compte (X1- 1 et X2-1, cf. figure 17).

D'autre part, cet essai de compression dans le plan permet de mettre en évidence cette possibilité de mécanisme dans la direction dite « du plan ».

2.2.3 - Essai en flexion

Après avoir caractérisé le comportement en compression, une étude du comportement du pavage *Miura Ori* en flexion est réalisée. La figure 18a montre le positionnement des essais en flexion 3 points sur un motif *Miura Ori* selon 3 directions, les résultats obtenus sont présentés figure 18b (rouge direction X2, vert direction X1, bleu en diagonal).



(a) Mise en place et déformée flexion 3 points

(b) Déplacement flexion 3 points

Figure 18 : Essais en flexion 3 points sur le motif *Miura Ori* [14]

Lors de l'essai en flexion 3 points, on constate que le profil force-déplacement est quasi linéaire quelle que soit la direction de l'effort appliqué. En revanche, si l'on applique une force dans la direction \vec{X}_2 cette dernière devra être plus importante pour obtenir la même déformation que si elle était appliquée sur \vec{X}_1 ou dans la diagonale. On remarque qu'un motif *Miura Ori* est plus souple pour le cas en diagonal puis dans la direction \vec{X}_1 puis dans la direction \vec{X}_2 [14].

2.2.4 - Synthèse des essais

Suite à ces essais, on peut constater que :

- Les essais en compression ont mis en évidence l'absorption d'énergie de tels pavages [14]. Toutefois, un essai en compression dans le plan peut conduire au gauchissement des sections ;
- Selon la direction de sollicitation, les réponses obtenues et les énergies absorbées sont très différentes ;
- Ce pavage autorise des mécanismes dans une direction et possède une bonne résistance structurelle dans une autre direction.

Une comparaison de ces essais avec une simulation par éléments finis a été réalisée et une évaluation de l'épaisseur de la « feuille » et de l'influence des angles des motifs est également proposée [14].

3 - Quelle construction ?

Après avoir étudié le fonctionnement mécanique de l'origami et sa modélisation. Dans cette partie, on s'attachera à développer comment les principes d'origami vus précédemment sont concrètement appliqués dans la construction.

3.1 - Les grands principes de l'origami

Les grands principes de l'origami sont [1] :

- **Déployabilité** : capacité de passer d'une configuration 2D à 3D ;
- **Modularité** : applications à différentes échelles : passage de l'état microscopique à l'état macroscopique ;
- **Auto-déploiement** : capacité à atteindre l'état déplié sans actionneurs externes ;
- **Reconfigurabilité** : par un nouvel effort/actionneur appliqué, on modifie la forme 3D et on atteint un nouvel état stable ;

On peut également ajouter la capacité d'adaptation à un environnement donné et la facilité de fabrication.

Ces grands principes sont utilisés dans les différentes applications en construction.

3.2 - Modulable et transportable : l'exemple des abris gonflables

David Mélançon⁶ [15] a cherché à utiliser des motifs pour créer des structures avec un, voire **deux états stables**. On distingue deux états : **l'état plié et l'état déplié**. Prenons pour exemple une structure développée par David Mélançon : un abri gonflable (figure 19).

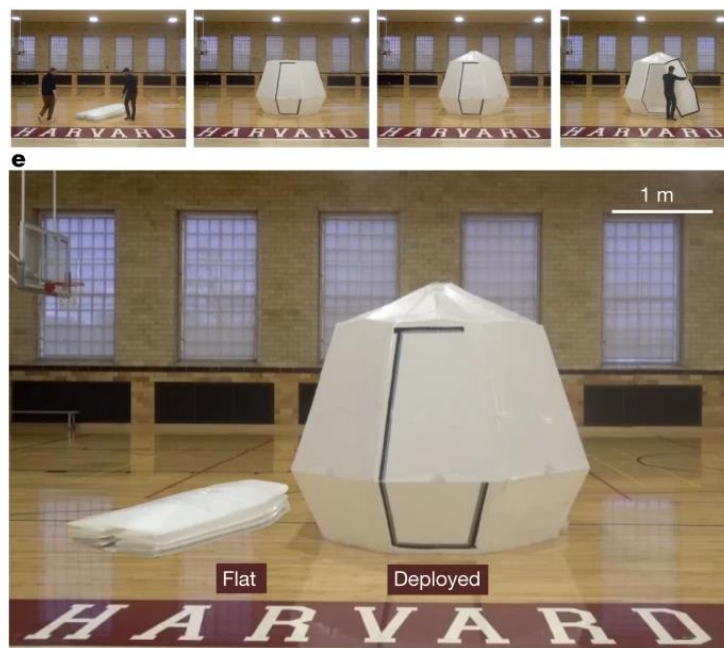


Figure 19 : État plié à plat et déployé de l'abri gonflable à l'échelle métrique [15]

Pour passer de l'état plat (ou plié) à l'état déplié, seule la pression de l'air est nécessaire. Contrairement à d'autres structures autoportantes, on n'a pas besoin de maintenir une pression dans la structure durant son utilisation. La pression est nécessaire seulement pour déployer la structure. La figure 19 est extraite de la vidéo « [Découverte : le génie de l'origami](#) » où l'on peut voir comment la pression de l'air permet à la structure autoportante d'abris de se déployer (2 :34 à 2 :51).

⁶ David Mélançon, professeur adjoint au département de génie mécanique de l'Ecole polytechnique de Montréal [16].

Ces structures sont très prometteuses et pourraient à terme remplacer des structures temporaires de festivals, de l'armée ou bien des tentes de secouristes. Les structures n'ont pas besoin de mobiliser de nombreuses personnes pour leur montage/démontage. De plus, l'un des avantages majeurs de ce type de structure est la différence de volume occupé par la structure pliée et la structure dépliée. On peut alors stocker la version pliée plus facilement et ne la déployer que lorsque c'est nécessaire.

Cette propriété d'occupation différenciée de l'espace des structures s'inspirant de l'origami est également utilisée dans l'ingénierie aérospatiale. Par exemple, avant la mise en orbite il est intéressant que le satellite prenne le moins de place possible.

3.3 - Couvrir son bâtiment ?

Afin d'assurer le confort thermique des usagers d'un bâtiment tout en répondant aux normes en vigueur, beaucoup de solutions architecturales essayent d'utiliser les mécanismes des origamis.

Comme nous avons vu section 1.2, les bâtiments se recouvrent d'une deuxième peau pour tenter de faire face aux aléas climatiques, se protéger du soleil ou bien ventiler au mieux le bâtiment.

Exemple : influence d'une double peau sur la luminosité intérieure d'une pièce

Envisager un système en boucle fermée qui s'auto-régule permet de diminuer les coûts et l'énergie consommée [17]. À cela s'ajoute les gains en confort thermique des usagers par la ventilation, les radiations lumineuses bloquées. Étudions une façade que l'on recouvrirait d'une deuxième peau reprenant les principes de l'origami. Ces systèmes se basent sur différentes configurations géométriques de plus petites structures qui sont répétées pour former la double peau. Les actionneurs mis en jeu doivent pouvoir mettre en mouvement plusieurs éléments structurels reliés entre eux [17].

Durant un atelier sur les enveloppes de bâtiment modulables du département d'architecture de l'Université de Chypre en juillet 2019, les architectes ont utilisé et étudié un motif présenté en figure 20. On peut remarquer que selon la configuration de déploiement, les surfaces déployées dans les différentes directions sont très différentes. En effet, par exemple, sur la première image de la figure 20 on a une très faible surface sur la direction normale au plan du cadre. Si des rayons lumineux arrivent dans cette direction, ils ne seront pas absorbés. En revanche, dans la direction perpendiculaire à cette dernière, ils peuvent être absorbés car il y a une surface qui peut bloquer ces derniers. Tandis que sur la dernière image, c'est dans cette direction normale au cadre que la surface est la plus grande.



Figure 20 : Motif d'origami utilisé lors d'un atelier à l'Université de Chypre [17]

En étudiant ces différentes configurations, selon les niveaux d'éclairément, on remarque que l'ombre générée par la double peau peut grandement augmenter dans un état déplié (figure 21). L'actionnement pour plier ou déplier les structures constituant la double peau se fait par l'intermédiaire d'un système câble poulie.

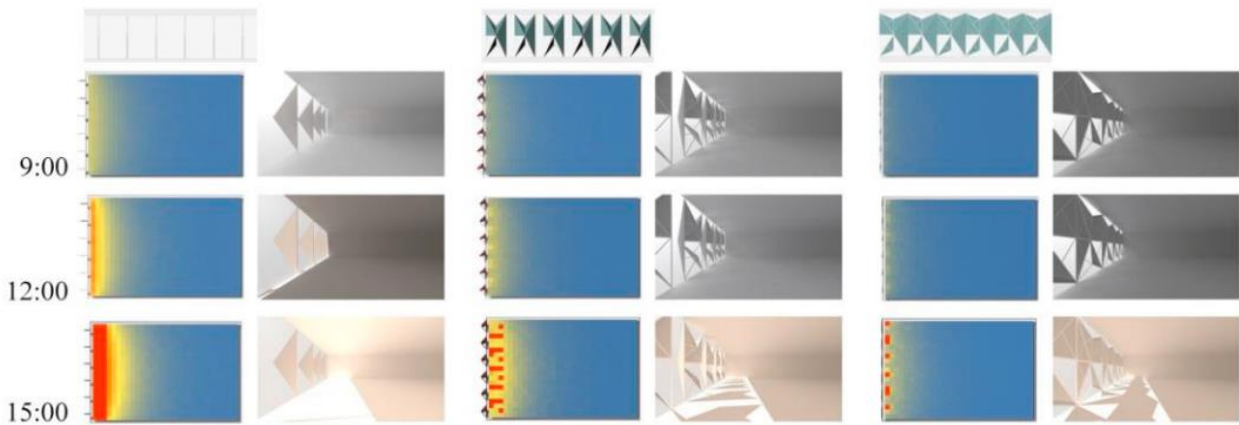


Figure 21 : Niveau d'éclairage pour le motif d'origami utilisé lors d'un atelier à l'Université de Chypre [17]

Cet exemple permet de mettre en évidence le gain de confort thermique des usagers en mettant en place une double peau sur le bâtiment. De plus, on peut souligner la simplicité des actionneurs mis en place par rapport à la complexité du mouvement effectué par les modules de la structure de double peau [17].

4 - Conclusion

Les projets actuels de construction ne construisent pas à proprement parler en origami mais ils reprennent les principes pour adapter leurs modalités de construction et d'exploitation de leur bâtiment. À l'heure où le monde de la construction cherche à se réinventer, toute solution se doit d'être explorée et les origamis peuvent apporter des réponses intéressantes sur les enjeux auxquels la construction doit faire face.

Nous avons mis en évidence deux applications principales de l'origami dans le domaine de la construction. Premièrement, en termes de confort thermique (exemple des tours jumelles Al bahr), les bâtiments peuvent être recouverts d'une seconde peau qui reprend les principes des origamis pour protéger les bâtiments et permet une ventilation de ces derniers. Deuxièmement, nous avons pu souligner les avantages structurels des structures reprenant les principes de l'origami. De nouvelles structures autoportantes, plus maniables et adaptables à différentes situations ont pu être créées.

De nombreuses autres applications en construction sont déjà mises en œuvre ou en cours d'études ; seules deux applications mettant en avant certains principes de l'origami ont été cités ici. Sans être exhaustifs, on peut citer les ponts déployables, les toits amovibles mais également dans d'autres domaines avec des satellites, des dispositifs biomédicaux pour des opérations, des bras robotisés, etc.

5 - Lexique

- **Crease** : Pli ;
- **Valley crease** : pli en « vallée » ;
- **Mountain crease** : pli en « montagne » ;
- **Flat-foldable** : pliable à plat (i.e. dans le plan R2) ;
- **Vertices** : sommets ;
- **Synelastic** : synclastique ;
- **Anitclastic** : anticlastique ;
- **Platen** : plateau.

Références :

- [1]: M. Meloni, J. Cai, Q. Zhang, D. Sang-Hoon Lee, M. Li, R. Ma, T. E. Parashkevov, and J. Feng, "Engineering origami: A comprehensive review of recent applications, design methods, and tools," vol. 8, no. 13, p. 2000636, 2021, eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/advs.202000636> [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/advs.202000636>
- [2]: Wikipedia, "Friedrich Fröbel," Wikipedia, 07 2024, page Version ID : 216844034. [Online]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Friedrich_Fr%C3%B6bel
- [3]: T. Jules, "Géométrie et mécanique des origamis."
- [4]: A. Rousse\ Redacxelle. De l'origami. [Online]. Available: <https://www.culture-generale.fr/divers/19097-de-lorigami>
- [5]: Rédaction. Former des ingénieurs à l'origami pour construire les bâtiments de demain. [Online]. Available: <https://journalmetro.com/actualites/2356024/former-des-ingenieurs-a-lorigami-pour-construire-les-batiments-de-demain/>
- [6]: Les tours al-bahr | continuum numérique - modélisation et fabrication. [Online]. Available: <https://sapi.paris-lavillette.archi.fr/CTID924/?p=12397>
- [7]: Wikipédia, "Moucharabieh," Wikipédia, 07 2023, page Version ID : 206288879. [Online]. Available: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Moucharabieh&oldid=206288879>
- [8]: Rhino Grasshopper, "Kinetic architecture - al bahar towers," YouTube video, February 2019, [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=ZKkgsiEYiYM>
- [9]: T. Tachi, "Geometric considerations for the design of rigid origami structures," 2010.
- [10]: Wikipedia, "Tomohiro Tachi," Wikipedia, 10 2024, page Version ID : 1253812837. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Tomohiro_Tachi
- [11]: Software. [Online]. Available: <https://www.tsg.ne.jp/TT/software/#ffo>
- [12]: R. Foschi, T. C. Hull, and J. S. Ku, "Explicit kinematic equations for degree-4 rigid origami vertices, euclidean and non-euclidean," vol. 106, no. 5, p. 055001. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2206.12691>
- [13]: T. Tachi and T. C. Hull, "Self-foldability of rigid origami," vol. 9, no. 2, p. 021008. [Online]. Available: <https://asmedigitalcollection.asme.org/mechanismsrobotics/article/doi/10.1115/1.4035558/473062/SelfFoldability-of-Rigid-Origami>
- [14]: S. Liu, G. Lu, Y. Chen, and Y. W. Leong, "Deformation of the miura-ori patterned sheet," vol. 99, pp. 130-142. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740315001897>
- [15]: D. Melançon, B. Gorissen, C. J. García-Mora, C. Hoberman, and K. Bertoldi, "Multistable inflatable origami structures at the metre scale," vol. 592, no. 7855, pp. 545-550, publisher: Nature Publishing Group. [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03407-4>
- [16]: David, Mélançon, Polytechnique Montréal, <https://www.polymtl.ca/expertises/melancon-david>
- [17]: M. Matheou, A. Couvelas, and M. C. Phocas, "Transformable building envelope design in architectural education," vol. 44, pp.