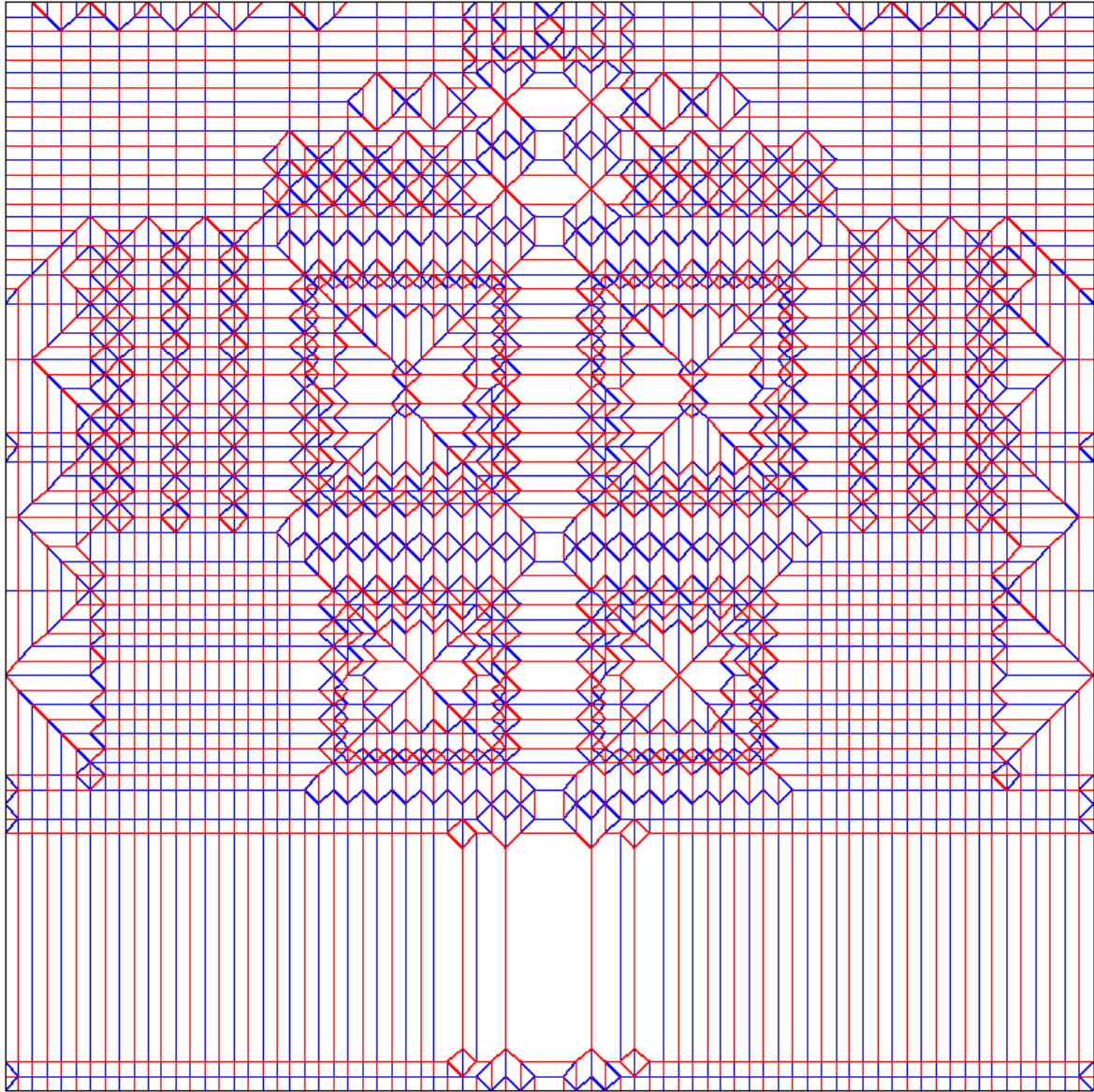


16 DÉCEMBRE 2025



PLIER LE MONDE AUTOUR DE NOUS

LA RÉALISATION DE NOUVEAUX MODÈLES D'ORIGAMI

IAN PLISKA

TRAVAIL DE MATURITÉ ACCOMPAGNÉ PAR ANNE BOVET
Kantonsschule Enge – A4a

Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benützung anderer als der angegebenen Quellen oder Hilfsmittel verfasst bzw. gestaltet habe.

Ort und Datum:

Unterschrift:

Tableau des matières

1	Préface	4
2	Introduction	5
3	Principes fondamentaux du pliage de papier	10
3.1	Plis de montagne et de vallée	10
3.2	Règles de pliabilité à plat.....	10
3.2.1	Condition de Kawasaki-Justin	11
3.2.2	Condition de Maekawa-Justin.....	11
3.2.3	Test de pliabilité à plat d'un sommet unique	12
4	Processus de la création d'un modèle d'origami	13
4.1	Figure de bâton	13
4.2	Base d'un modèle d'origami	14
4.2.1	Rabats et rivières et leur disposition sur une feuille de papier	14
4.2.2	Création d'un canevas de plis dans le cadre du <i>box pleating</i>	22
4.3	Plis de détail	27
5	Anatomie d'une abeille	28
6	Description du projet de création d'un propre modèle d'origami	29
6.1	Oriedita – un logiciel de design d'origami	29
7	Création d'une abeille en papier.....	31
7.1	Première conception.....	31
7.1.1	Défis de la première conception	31
7.1.2	Figure de bâton	31
7.1.3	Disposition des éléments	32
7.1.4	Canevas de plis.....	33
7.1.5	Modèle plié.....	34
7.2	Deuxième conception	35
7.2.1	Défis de la deuxième conception	35
7.2.2	Canevas de plis.....	36
7.2.3	Modèle plié.....	36
7.3	Troisième conception.....	38
7.3.1	Défis de la troisième conception.....	38
7.3.2	Élargissement de l'abdomen, du thorax et de la tête	38
7.3.3	Disposition des éléments	44
7.3.4	Canevas de plis.....	46
7.3.5	Modèle plié.....	49
7.4	Quatrième conception	50

7.4.1	Défis de la quatrième conception	50
7.4.2	Élargissement des ailes	50
7.4.3	Segmentation de l'abdomen	56
7.4.4	Éléments sur la tête de l'abeille	57
7.4.5	Disposition des éléments	58
7.4.6	Canevas de plis.....	62
7.4.7	Modèle plié.....	62
8	Conclusion	65
9	Bibliographie.....	66
10	Bibliographie d'images.....	68
11	Réflexion	70
12	Annexe	71

1 Préface

Dans le présent travail de maturité, je traiterai le sujet de l'origami, l'art du pliage de papier, et je créerai mon propre modèle d'origami d'une abeille. L'idée de faire cela comme travail de maturité m'est venue déjà il y a quelques années, autour de ma première année au lycée d'Enge. Cependant, je connaissais l'origami déjà bien avant d'avoir décidé de faire cela comme travail de maturité. Je me souviens d'un moment qui représente un de mes premiers contacts avec l'origami et qui se passait environ entre mes cinq et huit ans : durant une soirée de visite de mes grands-parents paternels, mon grand-père m'a instruit comment plier un bateau à vapeur. Cela est un souvenir que j'ai précieusement gardé en tête et depuis ce moment, j'ai toujours eu un certain intérêt envers cette forme d'art, temporairement un peu plus ou un peu moins. Le sujet précis du présent travail a été élaboré après quelques conversations avec mes parents, il restait surtout à prendre une décision sur la quantité d'éléments théoriques et pratiques. Finalement, j'ai décidé de mettre l'aspect pratique au premier plan, car j'ai remarqué que c'est l'origami comme forme d'art qui m'intéresse le plus. Je trouve très fascinant comment une simple feuille de papier peut se transformer en tout ce qu'on désire simplement en la pliant.

Une multitude de personnes m'a soutenu pendant la création de ce travail. J'aimerais bien remercier ma professeure accompagnante, Mme Bovet, pour toutes les suggestions et idées qu'elle m'a données et pour la lecture et la correction de la version préliminaire du travail. Également, j'aimerais bien la remercier d'avoir toujours écouté attentivement et avec beaucoup d'intérêt pendant nos conversations et d'avoir toujours été disponible pour des questions ou des rendez-vous. En outre, j'aimerais bien mentionner ma mère, Anne-Claire Pliska, qui a lu et vérifié le travail, qui a révisé la réflexion en détail avec moi, et qui a contribué des suggestions et des idées ensemble avec mon père. J'aimerais bien les remercier tous les deux ! Par ailleurs, je voudrais remercier mes grands-parents maternels d'avoir lu et revu le travail avec beaucoup d'intérêt.

L'intelligence artificielle (IA) a été utilisée dans le présent travail pour la correction de l'orthographe et de la grammaire. Pour cela, les logiciels d'IA « LanguageTool »¹ et « QuillBot »² ont été utilisés. L'IA a également été utilisée pour la traduction de certains mots ou de certaines expressions de l'anglais au français ou de l'allemand au français. Pour cela, l'IA « DeepL »³ a été utilisée. À part des traductions de certaines citations directes, aucune phrase entière dans le présent travail n'a été écrite ou reformulée par une IA. Il est toujours indiqué dans les notes de bas de page quand une telle citation a été traduite par une IA. Toutes les citations directes ou indirectes dans le présent travail proviennent des sources indiquées et n'ont pas été reprises d'une IA.

¹ Référence : <https://languagetool.org/editor/new>

² Référence : <https://quillbot.com>

³ Référence : www.deepl.com/en/translator

2 Introduction

Le mot « origami » a sa racine dans la langue japonaise, le mot « ori » signifiant « plier » et le mot « kami », qui s'est converti en « gami », signifiant « papier ». Cela fait que l'origami, c'est l'art du pliage de papier.⁴

Les modèles d'origami traditionnels suivent deux règles :

1. Le modèle doit être plié d'une seule feuille de papier.
2. Il est interdit de couper dans celle-ci.

Jusqu'à la première moitié du XX^e siècle, entre deux cents et trois cents modèles différents ont été créés. Le niveau de complexité et de détail de ces modèles était assez bas : ils ne nécessitaient qu'une trentaine de plis au maximum. Dès la deuxième moitié du XX^e siècle, l'origami a drastiquement évolué en raison du développement de nouvelles méthodes de design. Aujourd'hui, des modèles avec des centaines de plis, nécessitant plusieurs heures de travail, ont été développés.⁵

L'histoire du pliage de papier commence avec l'invention de la feuille de papier autour de l'an 105 après J.-C. en Chine. Cependant, il n'existe aucune preuve tangible d'origami d'avant 1600. Le premier livre d'instruction pour créer des modèles d'origami date de l'année 1797, écrit par Akisato Rito et appelé *Sembazuru orikata*. Avec l'aide de Friedrich Fröbel (1782-1852), le créateur et le diffuseur du concept de l'école maternelle⁶, l'origami devient connu dans le monde entier. Fröbel était persuadé des applications pédagogiques du pliage de papier.⁷

Avec Akira Yoshizawa (1911-2005), souvent considéré comme « père de l'origami moderne »⁸, l'intérêt pour l'origami grandit au Japon et aussi à l'étranger⁹. Il développe une notation d'instructions d'origami qui est reprise par des auteurs occidentaux d'origami dans les années 1960 et qui est la notation standard des instructions d'origami d'aujourd'hui. Akira Yoshizawa est également à l'origine de dizaines de milliers de propres modèles d'origami.¹⁰



Figure 1. Akira Yoshizawa.¹¹

Dans les années 1960 jusqu'aux années 1980, des artistes d'origami comme Fred Rohm, Neal Elias, Jun Maekawa, Robert Lang, John Montroll et plusieurs autres développent des nouvelles techniques de pliage de papier, ce qui mène à des modèles plus complexes et plus détaillés, par exemple des insectes avec plusieurs pattes et antennes¹². Voici deux exemples de modèles d'origami créés pendant cette époque :

⁴ Aperture, 2021

⁵ Lang, 2011b, p. 3

⁶ Wikipedia, 2025a

⁷ Robinson, 2025

⁸ Lang, 2011a. La traduction de la citation de l'anglais au français a été effectuée par l'auteur le 11.11.2025.

⁹ Robert C. Williams Museum of Papermaking, s.d.

¹⁰ Lang, 2011a

¹¹ Lagos, 2012

¹² Robinson, 2025



Figure 2. Neal Elias : « The Last Waltz ». ¹³



Figure 3. Robert J. Lang : « Black Forest Cuckoo Clock, Opus 182 ». ¹⁴

Durant les dernières années, l'origami est devenu plus qu'une forme d'art : des techniques de pliage sont utilisées comme méthode d'ingénierie, car elles permettent de réduire et d'ensuite d'agrandir des structures. En raison de cette propriété de l'origami, ces techniques de pliage sont appliquées notamment dans le domaine spatial : pour transporter des parties d'un vaisseau spatial qui sont larges et plates, par exemple des télescopes ou des panneaux solaires, elles doivent être réduites, car la place dans le véhicule de transport est limitée. Une fois arrivé à la destination dans l'espace, ces parties doivent être élargies de manière contrôlée. Pour faire cela, des techniques d'origami sont appliquées, comme montré dans **Figure 4**. ¹⁵



Figure 4. Le modèle d'un panneau solaire qui est envoyé dans l'espace. ¹⁶

¹³ Shannon, s.d.

¹⁴ Lang, s.d.

¹⁵ Zapfl, 2023 ; WIRED, 2021

¹⁶ Sandhana, 2013

Des techniques de pliage sont aussi utilisées dans le domaine de l'ingénierie médicale pour créer des stents. Des stents sont utilisés dans les cas de rétrécissements et d'obstructions de vaisseaux sanguins et doivent être placés par une dilatation par ballonnet, une procédure aussi appelée « angioplastie ». En utilisant des techniques de pliage, un nouveau type de stent a été développé qui ne nécessite pas cette procédure pour son placement dans les vaisseaux. Le stent parcourt son chemin par les vaisseaux en forme pliée, se déploie par la température corporelle et dilate le vaisseau au bon endroit.¹⁷



Figure 5. Modèle d'un stent d'origami coronaire dans sa forme pliée et déployée, développé par Zhong You et Kaori Kuribayashi-Shigetomi.¹⁸

Cependant, les humains ne sont pas les seuls qui savent appliquer des techniques de pliage, car l'origami est aussi présent dans la nature. Que ce soit une feuille d'un charme qui utilise des techniques de pliage pour se déplier facilement¹⁹ et pour rester simultanément flexible et rigide²⁰ ou que ce soit un perce-oreille qui peut déployer ses ailes par une structure de plis se trouvant dans les ailes elles-mêmes²¹ : « toute la vie sur terre s'appuie sur des processus de pliage ... »²².

¹⁷ UZ Brussel, 2024 ; SRF Wissen, 2020

¹⁸ Ward, 2017

¹⁹ Ball, 2013

²⁰ Ralevski, 2020

²¹ DeFranco, 2022

²² Hunter, 2015. La traduction de la citation de l'anglais au français a été effectuée par l'auteur en consultant www.deepl.com le 09.11.2025.



Figure 6. Le processus de dépliage d'une feuille d'un charme de la feuille pliée en bourgeon (a) jusqu'à la feuille dépliée (d).²³



Figure 7. Un perce-oreille (forficule) avec ses ailes dépliées.²⁴

Le présent travail de maturité se focalisera sur l'origami comme forme d'art. Au début de l'introduction, il est mentionné que l'origami avait drastiquement évolué en raison du développement de nouvelles méthodes de design. Ici se pose la question centrale de ce travail :

Comment peut-on réaliser le design de nouveaux modèles d'origami en créant une base²⁵ qui est pliable à plat²⁶ ?

²³ Ralevski, 2020

²⁴ Rüegg, 2018

²⁵ Plus sur le terme « base » dans le chapitre 4.2, p. 14.

²⁶ Plus sur la pliabilité à plat dans le chapitre 3.2, p. 10.

L'expression « nouveaux modèles d'origami » signifie que les modèles n'existent pas encore. Ce travail traite le sujet des méthodes de design de modèles d'origami, pas celui de la réplique de modèles déjà existants.

Le présent travail de maturité contient une partie théorique et une partie pratique. La première partie du travail théorique se focalisera sur deux principes fondamentaux de l'origami : les deux types de plis et le pliage à plat. Dans une deuxième partie, le sujet du design de modèles d'origami sera traité plus concrètement. Bien que toutes les étapes nécessaires pour le design soient mentionnées, la focalisation sera sur une méthode de design spécifique : le *box pleating*. La partie théorique sera basée sur des sources internet, par exemple sur le blog Abrashi²⁷, des vidéos, par exemple sur quatre vidéos de la série de vidéos appelée « Origami Design Class » de la chaîne YouTube « The Plant Psychologist »²⁸ ou sur le livre « Origami Design Secrets. Mathematical Methods for an Ancient Art. 2nd ed. »²⁹, écrit par Robert J. Lang, un des artistes et théoriciens d'origami les plus importants du monde³⁰.

Le but de la partie pratique de ce travail de maturité sera de créer des designs de modèles d'origami d'une abeille, partant d'une feuille de papier carrée et sans couper dans le papier, et ensuite de plier ceux-ci. En tout, quatre bases²⁵ d'une abeille seront créées en montant en complexité avec chacune. Pendant que les trois premières bases ne seront pas transformées en modèle terminé, des plis de détail³¹ seront ajoutés à la quatrième pour qu'elle ressemble plus à une abeille. La création des bases s'appuiera sur la théorie décrite dans la partie théorique, cependant, il sera nécessaire d'introduire plus de théorie, par exemple celle des *level shifters*³², afin de créer une abeille plus réaliste. Les bases seront créées dans l'application Oriedita³³. Outre les photos des modèles pliés ou sauf indication contraire, toutes les figures présentées dans le présent travail seront réalisées dans cette application.

²⁷ Référence : www.abrashiorigami.com

²⁸ The Plant Psychologist, 2021a ; The Plant Psychologist, 2021b ; The Plant Psychologist, 2021c ; The Plant Psychologist, 2021d

²⁹ Lang, 2011b

³⁰ Wikipedia, 2025b

³¹ Plus sur le terme « plis de détail » dans le chapitre 4.3, p. 27.

³² Voir chapitre 7.3.2, p. 38.

³³ L'application est téléchargeable sur oriedita.github.io. Plus sur cette application dans le chapitre 6.1, p. 29.

3 Principes fondamentaux du pliage de papier

3.1 Plis de montagne et de vallée

Pour créer un modèle d'origami, il faut plier le papier dans deux directions. Les termes « pli de montagne³⁴ » et « pli de vallée³⁵ » font référence à ces deux directions dans lesquelles on peut plier le papier. En faisant un pli de montagne, le papier autour de ce pli forme une crête (comme montré par le pli marqué en rouge dans **Figure 8**). Quand on plie le papier dans l'autre direction, on crée un pli de vallée et le papier autour de ce pli forme un fossé (comme montré par le pli marqué en bleu dans **Figure 8**).³⁶

Quand on tourne la feuille de papier, l'orientation des plis change : les plis de vallée deviennent des plis de montagne et ceux-ci deviennent des plis de vallée.³⁷

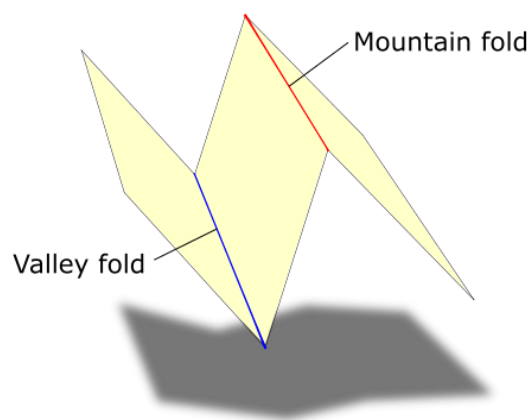


Figure 8. Le pli de vallée en bleu et le pli de montagne en rouge.³⁸

Pour représenter ces plis dans un canevas de plis, on peut utiliser la couleur rouge pour les plis de montagne et la couleur bleue pour les plis de vallée.³⁹ Ce système de marquage sera repris dans les canevas de plis montrés dans le présent travail.

3.2 Règles de pliabilité à plat

Afin qu'un canevas de plis, la constellation visible sur la feuille de papier créée par les plis après avoir déplié un modèle d'origami⁴⁰, soit pliable à plat, il doit « pouvoir être aplati en un seul plan sans obtenir des plis additionnels ou pire devenir froissé »⁴¹. Pour qu'un sommet dans un canevas de plis soit pliable à plat, il doit respecter trois conditions : celle de Kawasaki-Justin, celle de Maekawa-Justin et le test de pliabilité à plat d'un sommet⁴² unique⁴³.

³⁴ Terme traduit de l'anglais : mountain fold.

³⁵ Terme traduit de l'anglais : valley fold.

³⁶ Abrashi6, s.d.

³⁷ Abrashi6, s.d.

³⁸ Abrashi11, s.d.

³⁹ Abrashi6, s.d.

⁴⁰ Lang, 2011b, p. 744

⁴¹ Abrashi4, s.d. La traduction de la citation de l'anglais au français a été effectuée par l'auteur en consultant www.deepl.com le 19.10.2025.

⁴² Terme traduit de l'anglais par dictionary.cambridge.org : vertex.

⁴³ Witham, 2022

3.2.1 Condition de Kawasaki-Justin

La condition de Kawasaki-Justin déclare pour les angles θ_1 à θ_n autour d'un sommet créé par les plis convergeant dans celui-ci :⁴⁴

$$\theta_1 - \theta_2 + \theta_3 - \theta_4 + \dots - \theta_{n-1} + \theta_n = 0^\circ$$

Le nombre de plis convergeant dans un sommet doit être pair. La condition de Kawasaki-Justin déclare également que la somme des angles θ impairs et la somme des angles θ pairs est égale à 180° :⁴⁵

$$\theta_1 + \theta_3 + \dots + \theta_{n-1} = \theta_2 + \theta_4 + \dots + \theta_n = 180^\circ$$

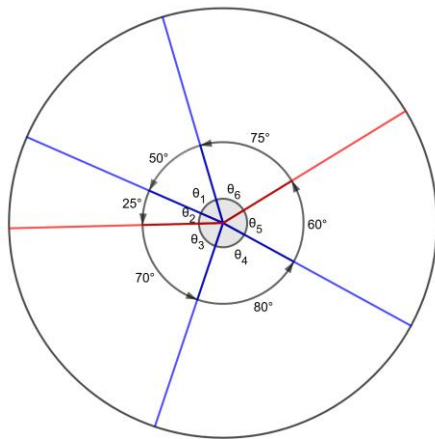


Figure 9. Un sommet dont les angles créés par les plis respectent la condition de Kawasaki-Justin : $50^\circ - 25^\circ + 70^\circ - 80^\circ + 60^\circ - 75^\circ = 0^\circ$ et $50^\circ + 70^\circ + 60^\circ = 25^\circ + 80^\circ + 75^\circ = 180^\circ$. Figure réalisée par l'auteur.⁴⁶

3.2.2 Condition de Maekawa-Justin

La condition de Maekawa-Justin déclare pour les plis convergeant dans un sommet⁴⁷ :⁴⁸

$$M - V = \pm 2$$

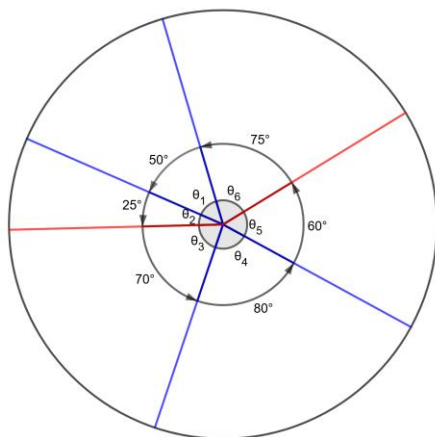


Figure 10. Sommet de **Figure 9**. Il respecte la condition de Maekawa-Justin : $2 - 4 = -2$. Figure réalisée par l'auteur.⁴⁹

⁴⁴ Source de la formule : Witham, 2022

⁴⁵ Source de la formule : Witham, 2022

⁴⁶ Figure créée sur www.geogebra.org/calculator.

⁴⁷ M : pli de montagne, V : pli de vallée.

⁴⁸ Witham, 2022

⁴⁹ Figure créée sur www.geogebra.org/calculator.

3.2.3 Test de pliabilité à plat d'un sommet unique

Quand l'angle d'un secteur créé par deux plis convergeant dans le même sommet est plus petit que les angles des secteurs sur les deux côtés du premier, les deux plis créant le secteur de l'angle inférieur doivent avoir des orientations différentes⁵⁰.

Le test de pliabilité à plat d'un sommet unique⁵¹ (TPPSU) est une manière de réduire ces secteurs inférieurs en pliant les deux plis desquels ils sont créés. En faisant ceci, un cône est créé et les secteurs sur les deux côtés du secteur inférieur sont réunis, ce qui crée un nouveau secteur avec l'angle $\theta_{i+1} - \theta_i + \theta_{i-1}$, en prenant θ_i comme angle du secteur inférieur. Ce processus est répété jusqu'à ce que les secteurs autour du sommet soient réduits à deux avec le même angle. Si cette réduction n'est pas possible, le vertex n'est pas pliable à plat.⁵²

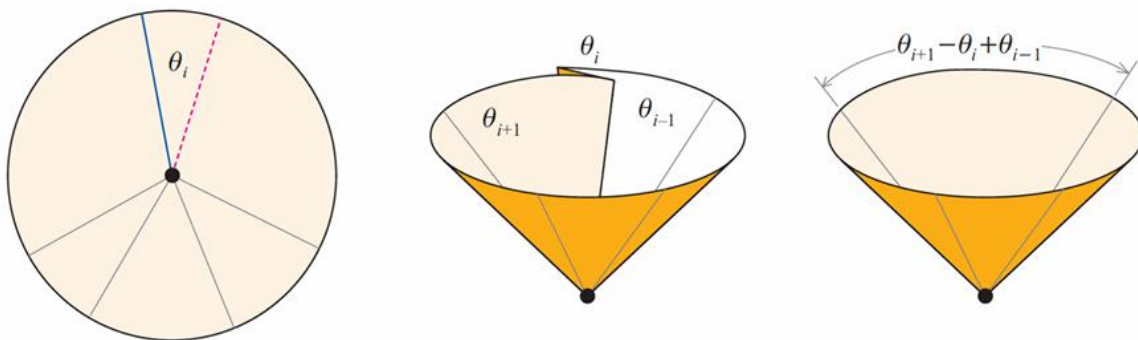


Figure 11. Réduction de secteurs dans le cadre du TPPSU.⁵³

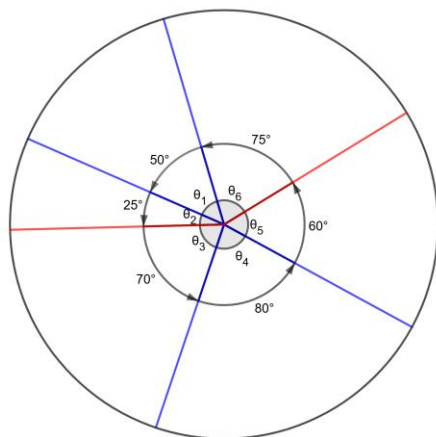


Figure 12. Sommet de **Figure 9**. Il satisfait la condition du TPPSU. Figure réalisée par l'auteur.⁵⁴

Un sommet qui satisfait les conditions de Kawasaki-Justin, de Maekawa-Justin et celle du TPPSU est certainement pliable à plat. Cependant, ces conditions ne garantissent pas la pliabilité à plat d'une disposition de plusieurs sommets respectant ces conditions dans un canevas de plis, car dans une disposition, il est possible qu'une couche de papier s'intersecte elle-même.⁵⁵

⁵⁰ Witham, 2022

⁵¹ Expression traduite en consultant www.deepl.com : single vertex flat-foldability test.

⁵² Witham, 2022

⁵³ Witham, 2022

⁵⁴ Figure créée sur www.geogebra.org/calculator.

⁵⁵ Witham, 2022

4 Processus de la création d'un modèle d'origami

Le processus de création d'un modèle d'origami contient typiquement les étapes suivantes : la création de la figure de bâton, la création de la base et l'ajout de plis de détail. La création de la base contient les étapes suivantes : la création de la disposition des éléments et le développement de cette disposition en canevas de plis.⁵⁶

4.1 Figure de bâton

La figure de bâton⁵⁷ est une représentation picturale des rivières et rabats (voir chapitre 4.2.1) et agit en tant que dessin schématique de canevas de plis.⁵⁸

La figure de bâton contient tous les rabats et rivières qui se trouvent dans la base d'un modèle d'origami et on y trouve aussi des informations sur les relations entre ceux-ci. Si deux éléments se touchent dans la base du modèle, ils se toucheront aussi dans la figure de bâton. En outre, la figure de bâton contient aussi des informations sur la longueur des rabats et la largeur des rivières. En revanche, dans la figure de bâton, les angles entre les branches des éléments n'ont pas d'importance.⁵⁹

Pour résumer, « la figure de bâton sert de courte description des longueurs des rabats et de la manière dont ils sont liés les uns avec les autres. »⁶⁰

La figure ci-dessous montre un exemple de figure de bâton. Dans celle-ci, trois rabats d'une longueur d'une unité sont liés à deux autres de trois unités de longueur par une rivière de deux unités de largeur.

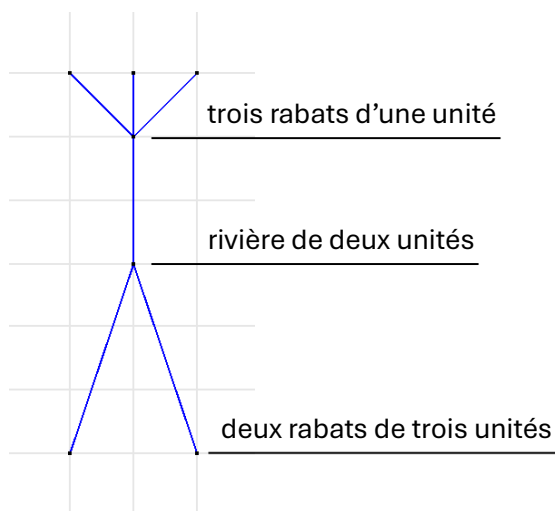


Figure 13. Exemple d'une figure de bâton. Figure réalisée par l'auteur.

⁵⁶ Robert J. Lang, un des artistes d'origami les plus notables, parle de ces étapes dans son discours TED du février 2008 (TED, 2008).

⁵⁷ Terme traduit de l'anglais par www.deepl.com : stick figure.

⁵⁸ Lang, 2011b, p. 266-269

⁵⁹ Lang, 2011b, p. 266-269

⁶⁰ Lang, 2011b, p. 269. La traduction de la citation de l'anglais au français a été effectuée par l'auteur le 15.10.2025.

4.2 Base d'un modèle d'origami

« La base [d'un modèle d'origami] est une forme géométrique régulière qui a une structure similaire à celle du sujet [l'animal ou l'objet réel qui est plié], bien qu'elle puisse paraître avoir peu de ressemblance avec le sujet. »⁶¹

La base d'un modèle d'origami contient des rabats pour tous les appendices⁶² du sujet plié. Elle est nécessaire pour la dernière partie du processus de design qui est l'ajout de plis de détail, dans laquelle elle est transformée en modèle final.⁶³

Ce chapitre se focalise sur les bases qui sont pliables à plat. Ceci est le cas pour la plus grande partie des bases de modèles d'origami⁶⁴.

4.2.1 Rabats et rivières et leur disposition sur une feuille de papier

À partir de la figure de bâton, il faut disposer ses éléments sur une surface qui représente la feuille de papier. Dans cette étape, les appendices qui sont liés l'un à l'autre (par exemple les pattes, ailes, etc.) deviennent des rabats⁶⁵, autrement dit « une région dans le papier qui peut être manipulée relativement indépendamment des autres parties du modèle »⁶⁶. Les éléments entre les rabats deviennent des rivières⁶⁷, « des régions de largeur constante qui serpentent entre les cercles⁶⁸ comme une rivière serpentant entre des collines »⁶⁹. Les rivières fonctionnent comme éléments de séparation : tous les éléments qui se trouvent au-dessus d'une rivière dans la figure de bâton se trouveront sur une autre rive de la rivière dans la disposition des éléments qui se trouvent en dessous de celle-ci dans la figure de bâton. Les rivières servent d'éléments de séparation entre deux ou plusieurs éléments qui ne se trouvent pas sur le même côté de la rivière dans la figure de bâton.⁷⁰

Il est important que toute la surface de la disposition soit remplie soit de rabats soit de rivières. En créant la disposition des éléments, il est interdit de laisser des espaces libres qui ne sont remplis ni de rabat ni de rivière, car ceci induirait la création d'un canevas de plis impossible.⁷¹

4.2.1.1 Disposition des rabats

Au total, il y a trois différents types de rabats : des rabats de coin, des rabats de bord et des rabats de milieu⁷². Il est important de distinguer entre ces trois types, car pour créer un appendice de la même longueur, chacun nécessite une quantité de papier différente.⁷³

Le papier entrant dans un rabat peut être représenté par un (secteur de) cercle avec le radius L qui représente aussi la longueur de l'appendice provenant de ce rabat. Pour qu'un canevas de

⁶¹ Lang, 2011b, p. 53. La traduction de la citation de l'anglais au français a été effectuée par l'auteur en consultant www.deepl.com le 19.10.2025.

⁶² Exemples d'appendices : des pattes, des ailes, un bec, une tête etc.

⁶³ TED, 2008

⁶⁴ Abrashi4, s.d.

⁶⁵ Terme traduit de l'anglais par www.deepl.com : flap.

⁶⁶ Lang, 2011b, p. 54. La traduction de la citation de l'anglais au français a été effectuée par l'auteur le 15.10.2025.

⁶⁷ Terme traduit de l'anglais : river.

⁶⁸ Plus sur le terme « cercle » dans chapitre 4.2.1.1

⁶⁹ Lang, 2011b, p. 258. La traduction de la citation de l'anglais au français a été effectuée par l'auteur en consultant www.deepl.com le 15.10.2025.

⁷⁰ The Plant Psychologist, 2021a

⁷¹ The Plant Psychologist, 2021b

⁷² Termes traduits de l'anglais en consultant deepl.com : corner flap, edge flap, middle flap.

⁷³ Lang, 2011b, p. 292

plis résultant d'une disposition soit pliable, tous les cercles se trouvant dans la disposition doivent avoir leur centre sur la feuille de papier. Si le centre de ce cercle se trouve dans un coin, le rabat qui proviendra de ce cercle sera un rabat de coin. La même chose est valable pour les autres types : si le centre du cercle se trouve sur le bord, son rabat sera un rabat de bord et si le centre se trouve à l'intérieur du papier, le rabat sera un rabat de milieu.⁷⁴

Voici une visualisation de ce phénomène :

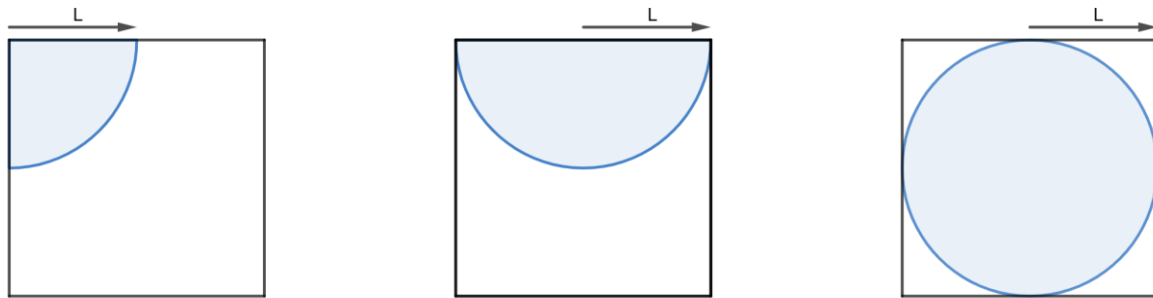


Figure 14. Les différents types de rabats représentés par des (secteurs de) cercles. De gauche à droite : le rabat de coin, le rabat de bord et le rabat de milieu. Figure réalisée par l'auteur.⁷⁵

Comme mentionné au début de ce sous-chapitre, **Figure 14** montre que les différents types de rabats ont besoin d'une quantité de papier différente pour créer un appendice de la même longueur. Pendant que les rabats de coin nécessitent seulement la surface d'un quart de cercle pour créer un appendice avec la longueur L (le chiffre qui représente aussi le rayon du cercle duquel ce quart provient), les rabats de bord eux ont besoin de la surface d'un demi-cercle pour créer le même appendice avec la longueur L . Les rabats de milieu nécessitent la plus grande quantité de papier : pour créer l'appendice de la longueur L , la surface d'un cercle entier est nécessaire, ce qui représente quatre fois plus de papier que si cet appendice provenait d'un rabat de coin. Ceci veut dire qu'il y a deux facteurs qui influencent la quantité de papier nécessaire pour créer un rabat quelconque : la longueur de l'appendice et l'endroit auquel son rabat se trouve sur la feuille de papier.⁷⁶

Pour la disposition des rabats, il existe une autre règle : un point sur la feuille de papier ne peut se trouver que dans un seul rabat, et non dans deux ou plus. De ceci, on peut déduire la chose suivante : « Dans tous les motifs de cercle correspondant à une base d'origami, les cercles correspondant à deux rabats distincts n'ont pas le droit de se superposer.⁷⁷ »

⁷⁴ Lang, 2011b, p. 293-295

⁷⁵ D'après Figure 9.6 dans Lang, 2011, p. 295, adaptation par l'auteur. Figure créée sur www.geogebra.org/calculator.

⁷⁶ Lang, 2011b, p. 291-294

⁷⁷ Lang, 2011b, p. 296. La traduction de la citation de l'anglais au français a été effectuée par l'auteur en consultant www.deepl.com le 16.10.2025.

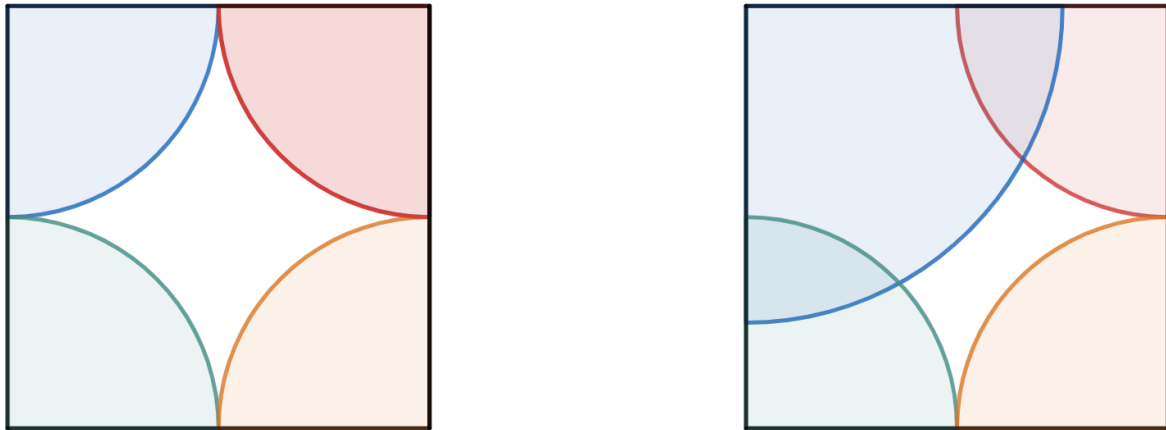


Figure 15. Visualisation de la citation ci-dessus. Tandis qu'à gauche, les quatre cercles correspondant à quatre rabats différents respectent tous les règles concernant leur placement, ce n'est pas le cas à droite : le cercle bleu se superpose sur le cercle vert et rouge, ce qu'il n'a pas le droit de faire. Figure réalisée par l'auteur.⁷⁸

En respectant les règles ci-dessus, il est possible d'implémenter N rabats dans une base d'un modèle d'origami juste en assemblant N cercles sur la feuille de papier. Les radius des cercles peuvent varier et le centre d'un cercle représentera la pointe de son rabat correspondant. Le processus d'assemblage des cercles sur la feuille de papier est appelé *circle packing*^{79, 80}.

⁷⁸ Figure créée sur www.geogebra.org/calculator.

⁷⁹ Ceci est un terme technique spécifiquement utilisé dans le domaine de l'origami. Comme ces termes sont utilisés plus couramment en anglais qu'en français, sa version anglaise a été gardée.

⁸⁰ Lang, 2011b, p. 296

4.2.1.2 Disposition des rivières

Pour la disposition des rivières, il faut faire en sorte qu'elles aillent d'un bord de la disposition à un autre bord ou qu'elles créent une boucle⁸¹. Les différentes possibilités de la disposition d'une rivière sont montrées ci-dessous :

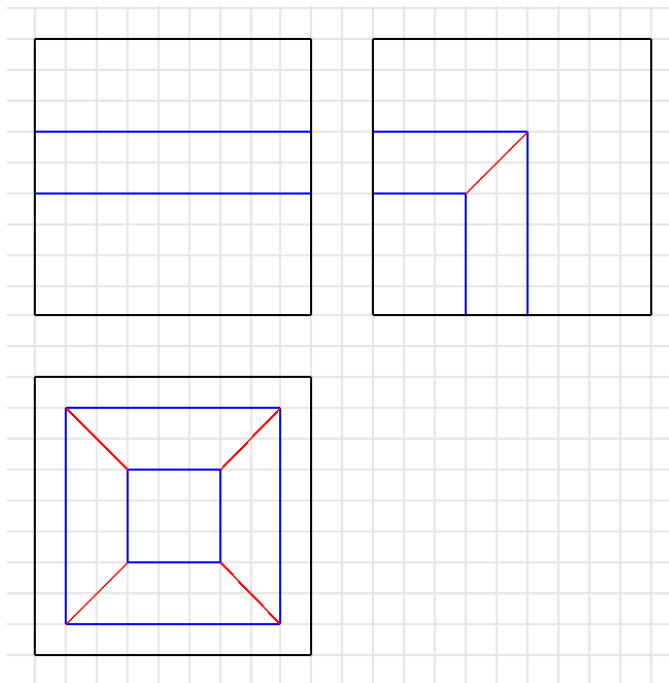


Figure 16. Les différentes possibilités de la disposition d'une rivière. En haut : la rivière connecte deux bords de la disposition l'un avec l'autre. En bas : la rivière crée une boucle. Les lignes rouges représentent les plis de crête (voir chapitre 4.2.1.3). Figure réalisée par l'auteur.

Pour la disposition des rivières, il existe une autre règle : les rivières n'ont pas le droit de changer leur largeur. Comme visible dans **Figure 16**, la rivière doit toujours garder sa largeur tout le long de son parcours par la disposition.⁸²

4.2.1.3 Disposition des éléments dans le cadre du *box pleating*

Dans un canevas de plis créé en utilisant la technique du *box pleating*⁸³ (*BP*), une grande majorité des plis sont placés dans des angles de 0° ou 90° avec quelques plis traversant le papier dans un angle de 45° en rapport avec les bords du papier⁸⁴. Il peut aussi y avoir des plis positionnés dans des angles n'étant pas un multiple de 45, mais ceux-ci sont des exceptions comparées à tous les autres plis dans un canevas créé dans le cadre du *BP*⁸⁵. Tous les plis dans un modèle de *BP* sont placés sur une grille régulière⁸⁶.

Pour créer la disposition d'un modèle de *BP*, la méthode du *polygon packing*⁸⁷ est appliquée au lieu de la méthode du *circle packing* (voir chapitre 4.2.1.1, p. 14). Les rabats ne sont plus

⁸¹ The Plant Psychologist, 2021b

⁸² The Plant Psychologist, 2021b

⁸³ Ceci est un terme technique spécifiquement utilisé dans le domaine de l'origami. Comme ces termes sont utilisés plus couramment en anglais qu'en français, sa version anglaise a été gardée.

⁸⁴ Lang, 2011b, p. 744

⁸⁵ The Plant Psychologist, 2021a

⁸⁶ Lang, 2011b, p. 744

⁸⁷ Ceci est un terme technique spécifiquement utilisé dans le domaine de l'origami. Comme ces termes sont utilisés plus couramment en anglais qu'en français, sa version anglaise a été gardée.

représentés par des cercles, mais par des polygones, tout comme les rivières. Dans ces polygones représentant les rabats, il est possible d'inscrire des cercles. Pour le plus grand cercle qui peut être inscrit dans un polygone représentant un rabat, les mêmes règles s'appliquent que celles pour le *circle packing* montrées dans le chapitre 4.2.1.1 (p. 14).⁸⁸

En faisant une disposition utilisant le polygone packing, deux types de plis sont appliqués (la distinction entre ces deux types n'est pas liée à leur orientation de vallée ou de montagne). Le premier de ces types s'appelle « plis de charnière »⁸⁹. Dans une disposition, ce pli est représenté par une ligne bleue qui marque la frontière d'un polygone (d'un rabat ou d'une rivière) et qui démarque la fin d'un polygone ou le début d'un autre. C'est le long de cette ligne qu'un rabat ou une rivière peuvent être tournés dans une base pliée, comme s'il ou elle se trouvait sur une charnière.⁹⁰

Le deuxième type de pli rencontré dans une telle disposition est celui des « plis de crête »⁹¹, qui sont représentés par des ligne rouges dans les dispositions des éléments montrées dans le présent travail. Voici sa définition : « Un pli de crête est un pli ou une rainure qui s'étend d'un coin d'un polygone à l'intérieur de celui-ci et qui agit en même temps en tant que bissectrice d'angle de ce coin. »⁹² Le pli de crête est le pli central dans le rabat. Pour un modèle de *BP*, il se trouve souvent dans un angle de 45° et traverse le rabat entier.⁹³

Pour placer tous les plis de crête dans un polygone d'un rabat, il faut qu'ils commencent dans un coin du polygone en divisant ce coin en deux. En faisant ceci, il faut être prudent : il est possible que seulement une partie de ce polygone se trouve sur la feuille de papier. Ceci est notamment possible si le polygone représente un rabat de coin ou de bord :

⁸⁸ Lang, 2011b, p. 574-575

⁸⁹ Terme traduit de l'anglais par www.deepl.com : hinge crease.

⁹⁰ The Plant Psychologist, 2021a

⁹¹ Terme traduit de l'anglais par www.deepl.com : ridge crease.

⁹² Abrashi5, s.d. La traduction de la citation de l'anglais au français a été effectuée par l'auteur en consultant www.deepl.com le 17.10.2025.

⁹³ Abrashi5, s.d.

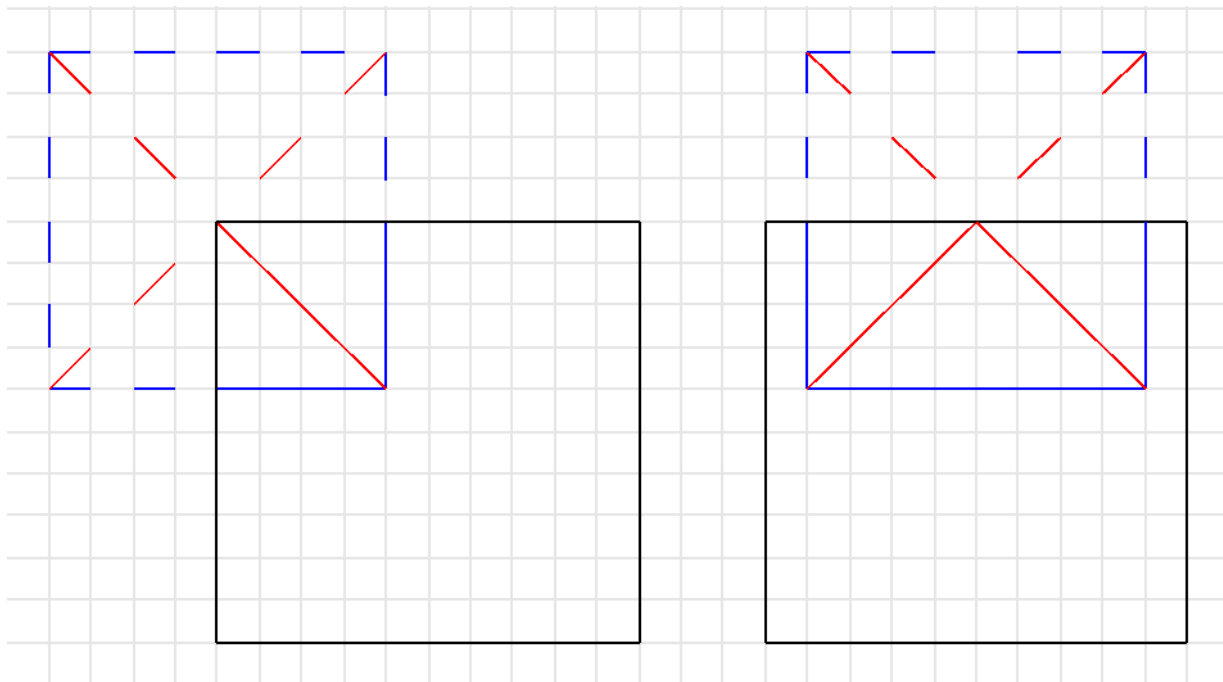


Figure 17. Illustration d'un rabat de coin (gauche) et d'un rabat de bord (droite) avec leurs polygones (lignes bleues) sortant de la feuille de papier. Les lignes rouges montrent les plis de crête. Figure réalisée par l'auteur.⁹⁴

Comme visible dans **Figure 17**, les polygones des rabats de coin et de bord s'étendent en dehors de la feuille de papier. Ceci fait qu'il existe des points où le bord du papier se croise avec une frontière du polygone et que dans un rabat de coin, le coin du papier représente le point central du polygone. Il faut faire attention de ne pas prendre ces points pour des coins du polygone, car ceci n'est pas le cas.⁹⁵

En respectant cela, le positionnement des plis de crête devient clair. La figure ci-dessous montre un rabat de coin, de bord et de milieu avec leurs plis de crête correspondants.

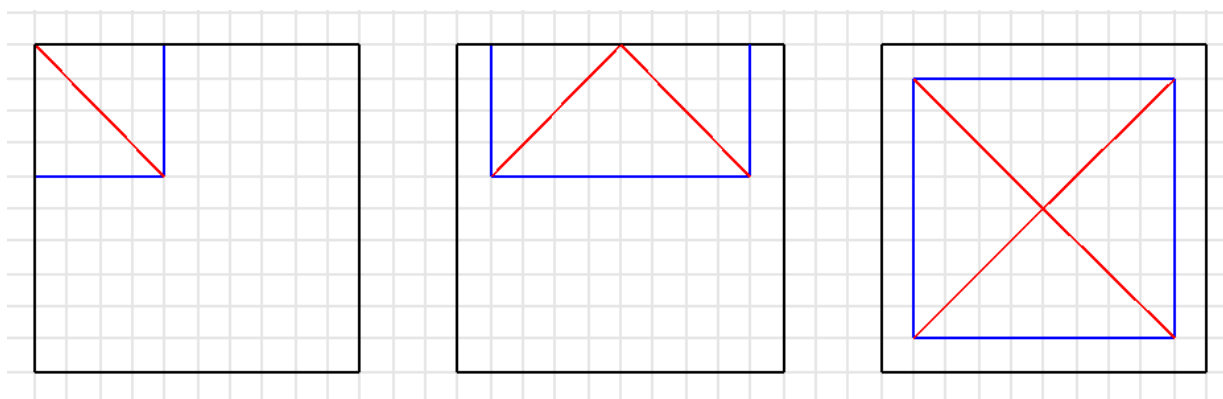


Figure 18. De gauche à droite : un rabat de coin, de bord et de milieu avec leurs plis de crête correspondants. Figure réalisée par l'auteur.

Afin de placer un pli de crête dans une rivière, il faut toujours en ajouter aux endroits auxquels la rivière change de direction. Grâce au changement de direction de la rivière, deux coins sont

⁹⁴ D'après Figure 3 dans Abrashi5, s.d., adaptation par l'auteur. Figure créée sur www.geogebra.org/calculator.

⁹⁵ Abrashi5, s.d.

Une possibilité de disposition de la figure de bâton dans **Figure 13** (p. 13) est la suivante :

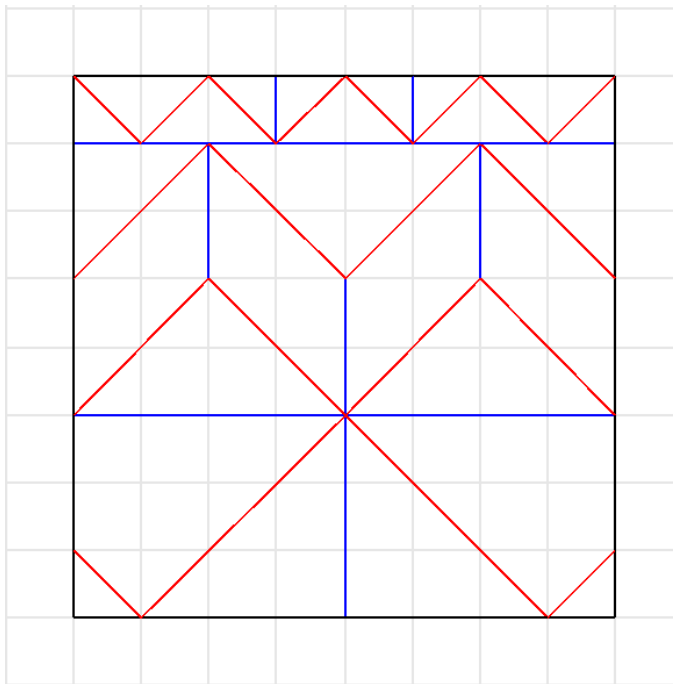


Figure 20. Exemple d'une disposition des éléments avec les plis de charnière en bleu et les plis de crête en rouge⁹⁷ qui a été faite en utilisant le box pleating. Cette figure montre une possibilité de disposer la figure de bâton dans **Figure 13**. (p. 13). Figure réalisée par l'auteur.

⁹⁷ Dans les dispositions des conceptions de l'abeille, les mêmes couleurs seront utilisées pour les plis de charnière et les plis de crête. Comme ces conceptions seront réalisées en appliquant le BP, elles seront faites en utilisant le *polygon packing*.

4.2.2 Création d'un canevas de plis dans le cadre du *box pleating*

Depuis la disposition des éléments, il faut créer le canevas de plis. La première étape pour faire cela est de supprimer tous les plis de charnière dans la disposition⁹⁸. Ce qui reste, ce sont les plis de crête. Pour **Figure 20**, ceci est visualisé ci-dessous :

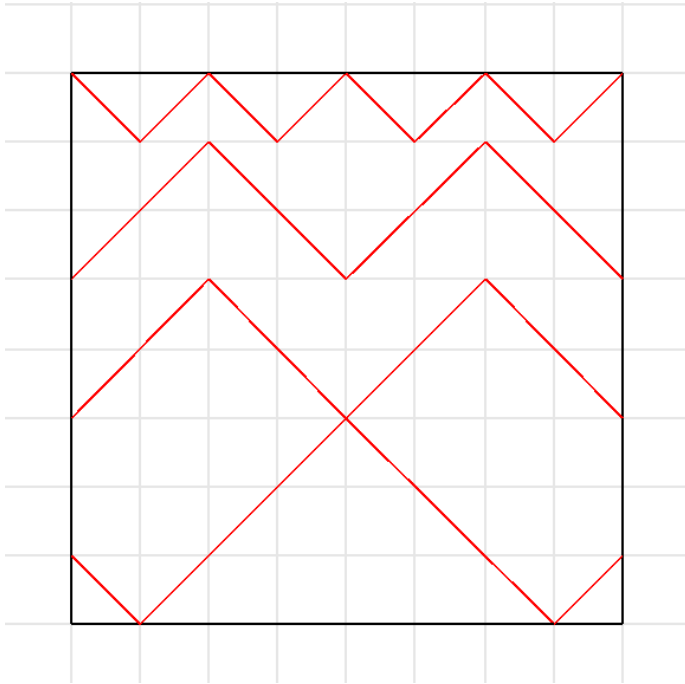


Figure 21. La disposition de **Figure 20** sans les plis de charnière. Figure réalisée par l'auteur.

Dans la deuxième étape, il faut ajouter les plis axiaux⁹⁹ qui sont le troisième type de pli du groupe avec les plis de charnière et les plis de crête¹⁰⁰. Par définition, les plis axiaux sont les plis qui longent l'axe dans la base pliée d'un modèle d'origami uniaxial¹⁰¹. Le terme « uniaxial » signifie que dans une base d'un modèle d'origami, tous les rabats sont placés le long d'un seul axe et que dans cette base, la direction des plis de charnière est pivotée de 90° comparé à cet axe¹⁰². En définissant les plis axiaux, il faut aussi définir le terme « pli axial + N », qui sera utilisé dans certains chapitres suivants de ce travail. Un pli axial + N est un pli axial qui se trouve à une élévation de N unités comparée à l'axe d'un modèle d'origami plié¹⁰³. **Figure 22** aide à visualiser ce concept :

⁹⁸ The Plant Psychologist, 2021c

⁹⁹ The Plant Psychologist, 2021c. Terme traduit de l'anglais : axial crease.

¹⁰⁰ Abrashi1, s.d.

¹⁰¹ Lang, 2011b, p. 743

¹⁰² Lang, 2011b, p. 743 & 750

¹⁰³ Lang, 2011b, p. 743

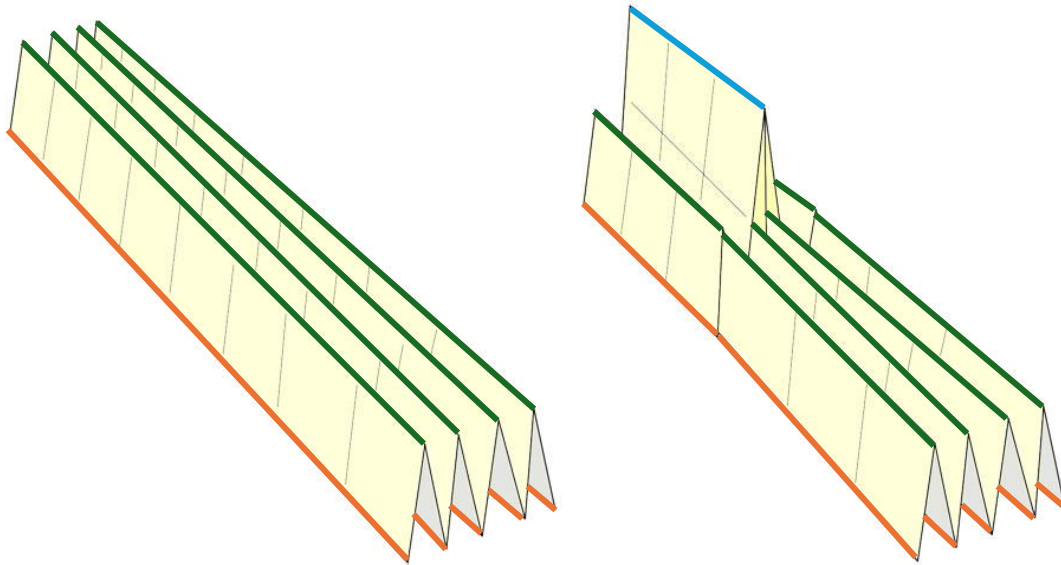


Figure 22. Visualisation du concept de plis axiaux + N. L'axe du modèle d'origami de cette figure se trouve sur le niveau des plis orange. Les plis orange sont alors axiaux + 0, les plis verts axiaux + 1 et le pli bleu axial + 2.¹⁰⁴

Dans les deux modèles pliés de **Figure 22**, l'axe se trouve le long des plis marqués en orange. Comme ces plis sont sur le même niveau que cet axe, ce sont des plis axiaux + 0, car il n'y a pas d'élévation entre eux et l'axe. Les plis verts sont des plis axiaux + 1, car ils se trouvent une unité au-dessus de l'axe et le pli bleu est axial + 2, car entre lui et l'axe, il y a une élévation de deux unités.

Pour ajouter les plis axiaux dans un polygone d'un canevas de plis simple (sans structures spéciales), il faut les ajouter sur les lignes de la grille de manière perpendiculaire aux plis de charnière.¹⁰⁵

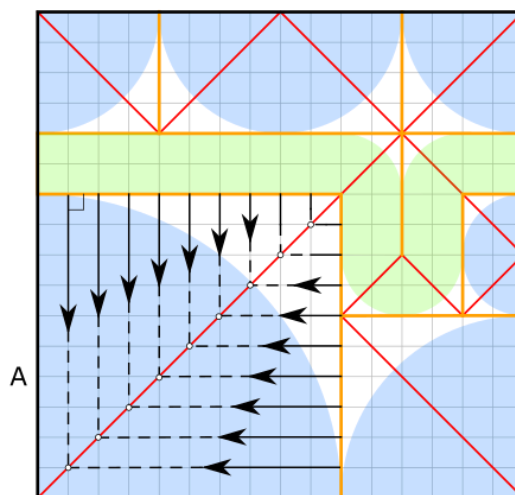


Figure 23. La manière dont les plis axiaux (les plis en noir) doivent être placés en rapport avec les plis de charnière et la grille.¹⁰⁶

¹⁰⁴ Abrashi10, s.d., adaptation par l'auteur.

¹⁰⁵ Abrashi1, s.d.

¹⁰⁶ Abrashi8, s.d.

Les plis axiaux doivent interagir avec les plis de crête qui coupent leur chemin : quand un pli axial rencontre un pli de crête, ce pli de crête agit comme miroir. Le pli axial repart du pli de crête dans le même angle qu'il a rencontré :¹⁰⁷

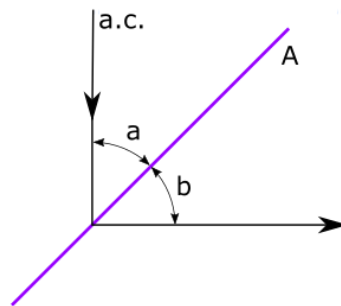


Figure 24. Un pli axial (a.c.) rencontre un pli de crête (A). Les angles a et b sont les mêmes.¹⁰⁸

Les plis axiaux se terminent quand ils rentrent dans le bord du papier de manière perpendiculaire ou quand ils se reflètent sur eux-mêmes¹⁰⁹.

En respectant ces règles, il est possible d'ajouter les plis axiaux dans **Figure 21** (p. 22) :

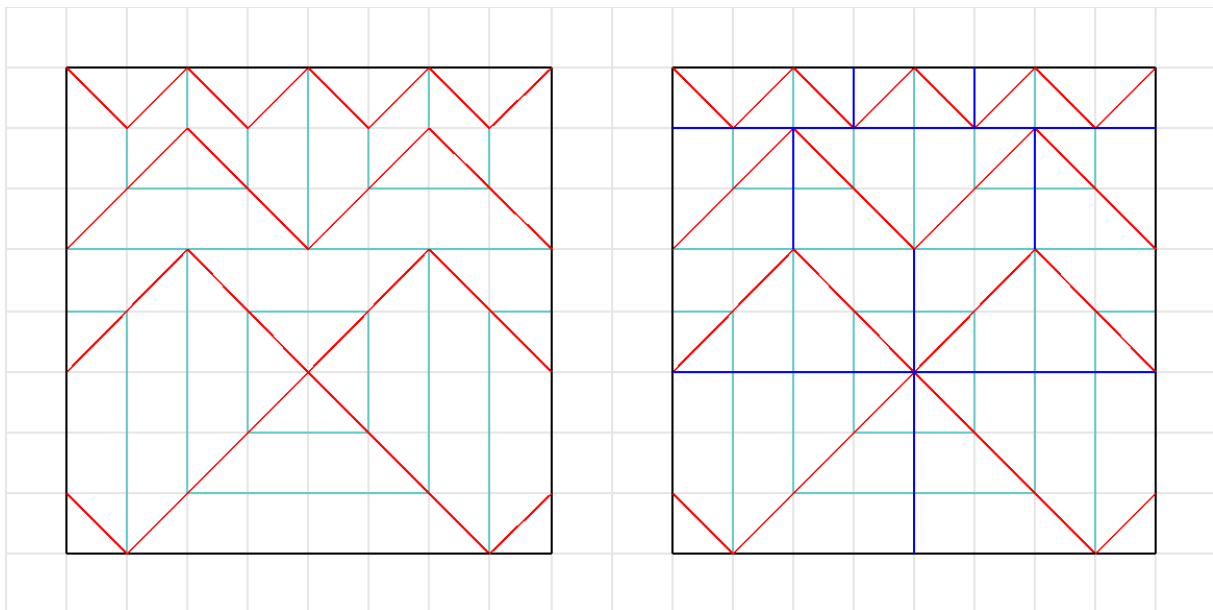


Figure 25. Ajout des plis axiaux dans **Figure 21** (p. 22) avec les plis axiaux en bleu clair et les plis de crête en rouge. Dans cette figure, aucune orientation n'a été assignée aux plis. À droite, les plis de charnière ont aussi été ajoutés pour montrer que les plis axiaux vont dans la direction perpendiculaire à eux. Figure réalisée par l'auteur.

Pour que le canevas de plis soit pliable à plat, il faut assigner une orientation spécifique aux plis axiaux et aux plis de crête. Il faut donc déterminer si un pli est un pli de montagne ou de vallée.¹¹⁰

Pour commencer, il faut assigner une orientation aux plis axiaux. Ceci peut être fait en déclarant que le bord du canevas soit un pli de vallée. Cela est une convention, le canevas sera toujours pliable si on considère le bord comme pli de montagne. Un pli axial a toujours une orientation

¹⁰⁷ Abrashi1, s.d.

¹⁰⁸ Abrashi9, s.d.

¹⁰⁹ Lang, 2011b, p. 595

¹¹⁰ AbrashiOrigami, 2020

différente en rapport avec les plis axiaux qui l'entourent. Comme le bord est considéré comme pli de vallée, le premier pli axial après le bord sera un pli de montagne, et le pli axial après celui-ci un pli de vallée. En plus, un pli axial garde son orientation après avoir changé sa direction en rencontrant un pli de crête.¹¹¹

Après avoir assigné une orientation spécifique à chaque pli axial, il faut faire la même chose pour les plis de crête : après avoir reflété un pli axial, le pli de crête change son orientation. Ceci veut dire que sur un côté du pli axial, le pli de crête doit avoir l'autre orientation que sur l'autre côté. Quand on observe un pli axial qui est reflété par un pli de crête, les deux parties de ce pli axial forment deux angles entre eux, un angle inférieur à 180° et le deuxième supérieur à 180° . Le pli de crête passe par le point auquel ces angles sont formés. La partie du pli de crête qui se trouve sur le côté de l'angle supérieur à 180° aura la même orientation que le pli axial, tandis que la partie qui se trouve sur l'autre côté changera son orientation et n'aura pas la même que le pli axial. En faisant ceci, un pli de crête alterne toujours son orientation quand il rencontre un pli axial. Il reste à mentionner que cette manière d'assigner les deux orientations aux plis de crête n'est pas la seule possible. Il existe des cas qui permettent d'autres possibilités d'assignation d'orientation.¹¹²

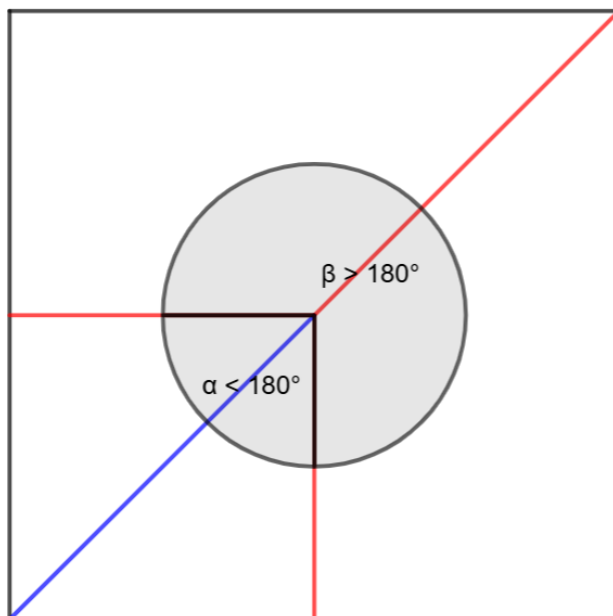


Figure 26. Changement de l'orientation du pli de crête en rencontrant un pli axial. Sur le côté sur lequel l'angle formé par le reflet du pli axial est supérieur à 180° , le pli de crête aura la même orientation que le pli axial (ici montré par les plis de montagne). Il change son orientation sur le côté avec l'angle inférieur à 180° (ici montré par le pli de vallée). Figure réalisée par l'auteur.¹¹³

¹¹¹ AbrashiOrigami, 2021

¹¹² AbrashiOrigami, 2021

¹¹³ Figure créée sur www.geogebra.org/calculator.

En respectant les directives ci-dessus, nous pouvons implémenter l'orientation des plis axiaux et des plis de crête dans notre canevas de **Figure 25** :

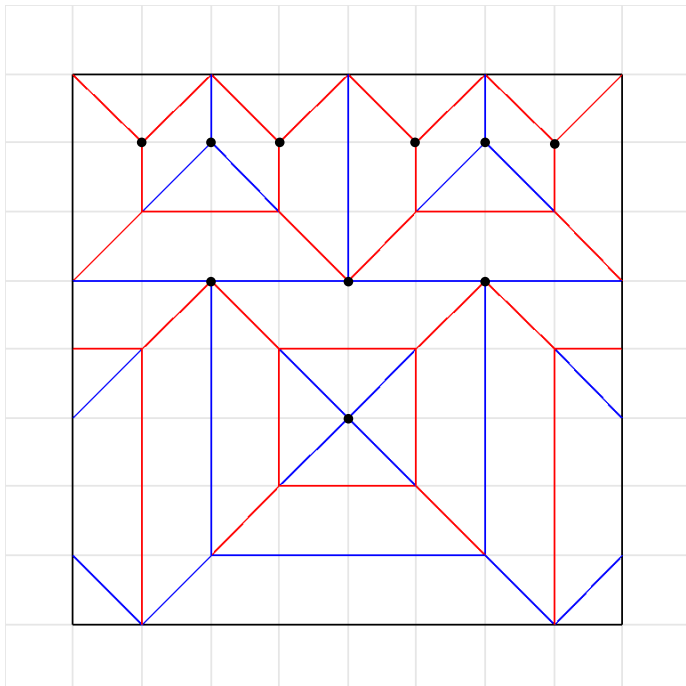


Figure 27. L'orientation des plis de crête et des plis axiaux ajoutée au canevas de **Figure 25** (p. 24). Les points marqués en noir sont ceux auxquels les conditions de pliabilité à plat ne sont pas encore satisfaites. Figure réalisée par l'auteur.

Comme dernière étape, il faut ajouter certains plis de charnière. Un canevas de plis ne serait pas pliable si on y ajoutait tous les plis de charnière. À cause de ceci, seulement une partie des plis de charnière sera visible dans un canevas. Comme visible aux points noirs dans **Figure 27**, les conditions de pliabilité à plat ne sont pas encore satisfaites simplement en orientant les plis axiaux et les plis de crête. Pour résoudre ce problème, il faut ajouter des plis de charnière depuis les points qui n'obéissent pas encore aux règles de pliabilité à plat. Deux possibilités existent pour le parcours des plis de charnière par la feuille de papier et leur terminaison :

1. Le pli de charnière se dirige vers un autre point auquel les conditions de pliabilité à plat ne sont pas encore respectées.
2. Le pli de charnière se dirige vers le bord de la feuille. Souvent, l'option la plus simple pour le parcours d'un pli de charnière est de le laisser prendre le chemin le plus court vers le bord du papier.

En ajoutant les plis de charnière, il faut faire attention qu'à tous les points auxquels les plis rencontrent d'autres plis (axiaux ou plis de crête), les conditions de pliabilité à plat soient satisfaites.¹¹⁴

¹¹⁴ AbrashiOrigami, 2021

En respectant ces règles, nous pouvons ajouter les plis de charnière dans notre canevas de **Figure 27** et compléter le canevas de plis :

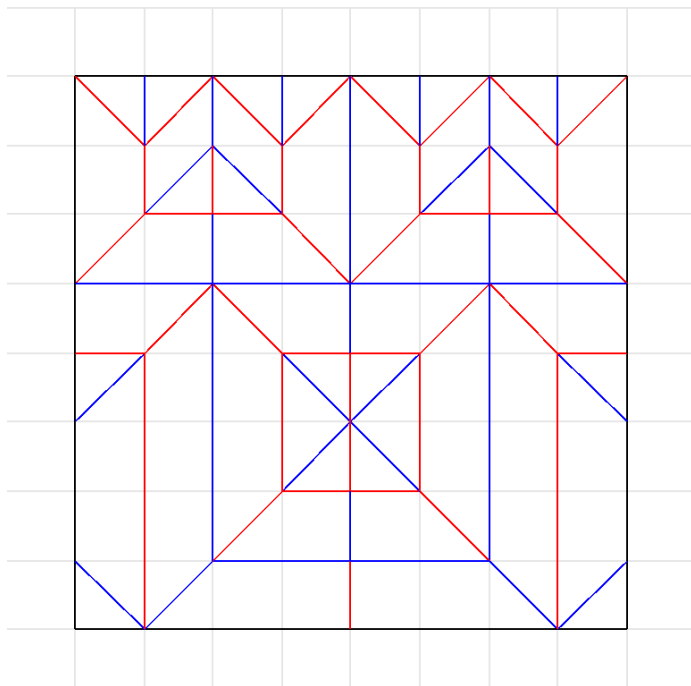


Figure 28. Le canevas de plis terminé pour la figure de bâton dans **Figure 13** (p. 13). Figure réalisée par l'auteur.

Il reste à préciser que la procédure décrite dans ce chapitre ne s'applique qu'à la création de canevas de plis de *box pleating*. La création de canevas de plis de *circle packing*, dont la disposition est faite sur la base de cercles et non pas de polygones, nécessite d'autres techniques¹¹⁵. Celles-ci ne sont pas décrites dans ce texte, car tous les canevas de plis créés dans le cadre de la partie pratique du présent travail de maturité seront basés sur le *box pleating*.

4.3 Plis de détail

« Les plis de détail¹¹⁶ sont les plis qui transforment l'apparence d'une base [d'un modèle d'origami] en modèle final. »¹¹⁷

Comme la base peut avoir une apparence qui ne ressemble pas à celle du sujet, les plis de détail sont nécessaires pour que cette base reçoive une plus haute ressemblance au sujet. Pendant qu'un changement dans la base a des effets sur la base entière, ceci n'est pas le cas pour l'ajout des plis de détail : cela ne concerne typiquement que la région du papier à laquelle le pli de détail est ajouté. Les plis de détail sont les plis par lesquels les différents rabats se transforment en différentes appendices du sujet, comme en pattes, en tête ou en ailes.¹¹⁸

¹¹⁵ Ces techniques sont notamment décrites dans « Chapter 9: Circle Packing » et « Chapter 10: Molecules » dans Lang, 2011b, p. 291-334 & p. 345-384.

¹¹⁶ Terme traduit de l'anglais : detail folds.

¹¹⁷ Lang, 2011b, p. 53. La traduction de la citation de l'anglais au français a été effectuée par l'auteur en consultant www.deepl.com le 22.10.2025.

¹¹⁸ Lang, 2011b, p. 53

5 Anatomie d'une abeille

Le corps d'une abeille peut être réparti en trois parties : l'abdomen, le thorax et la tête. L'abdomen de l'abeille contient les segments abdominaux, six chez les femelles et sept chez les mâles. Sur le haut du thorax, on trouve les points d'attache des paires d'ailes et sur le bas du thorax, les trois paires de pattes sont attachées. Sur les ailes des abeilles se trouvent des nervures contenant un liquide sans couleur, l'hémolymphe. La tête de l'abeille contient plusieurs organes sensoriels : deux antennes, trois ocelles, deux yeux composés et pièces bucales.¹¹⁹

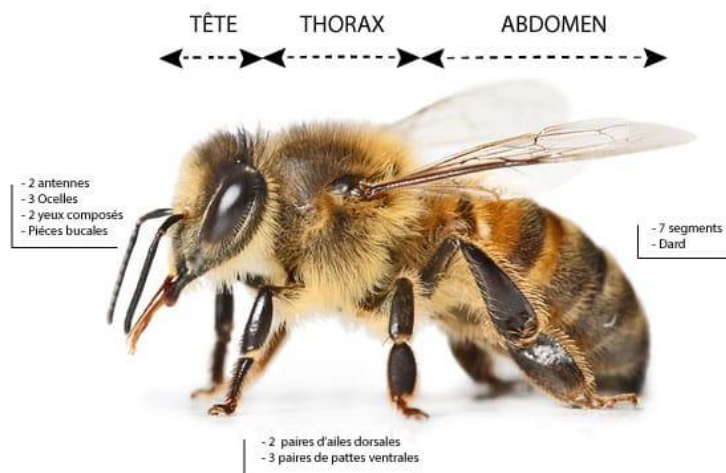


Figure 29. Image d'une abeille avec une description de son anatomie.¹²⁰

¹¹⁹ Les Dorloteurs d'Abeilles, 2022

¹²⁰ Mes Abeilles, s.d.

6 Description du projet de création d'un propre modèle d'origami

Dans la partie pratique de ce travail, quatre conceptions d'un modèle d'origami d'une abeille seront créées. Chaque conception s'appuiera sur la précédente et avec chaque conception, le niveau de complexité du design montera. Toutes les conceptions seront créées à partir d'une feuille de papier carrée sans coupure dans celle-ci. De la colle sera utilisée pour la quatrième conception après avoir plié sa base afin que l'abeille pliée soit plus réaliste.

Dans la première jusqu'à la troisième conception, les éléments suivants feront partie du design : l'abdomen, le thorax, la tête, deux pattes arrière, deux pattes du milieu, deux pattes avant, deux grandes ailes, deux petites ailes, deux yeux et deux antennes. Aux modèles pliés de ces conceptions, aucun pli de détail ne sera ajouté, la création de la base sera au centre de ces conceptions. Dans la quatrième conception, les éléments suivants seront ajoutés aux autres : les segments de l'abdomen, les ocelles et les mandibules. Même si la focalisation de cette conception restera sur la création de la base, des plis de détail y seront ajoutés pour que l'abeille pliée ressemble au sujet.

Une partie centrale de la troisième et quatrième conception sera l'implémentation des *level shifters*, qui seront ajoutés pour la représentation de l'abdomen, du thorax, de la tête et, dans la quatrième conception, des ailes.

6.1 Oriedita – un logiciel de design d'origami

L'application Oriedita¹²¹ permet de créer des canevas de plis. Elle sait également calculer la version pliée des canevas et les visualise sur demande. En plus, l'application est capable de détecter des erreurs de pliabilité à plat et elle montre comment les résoudre. Voici un exemple : pour un sommet avec trois plis de montagne, Oriedita détecte qu'il n'est pas pliable à plat et elle montre que ce sommet a besoin d'un pli de vallée pour qu'il le soit.¹²²

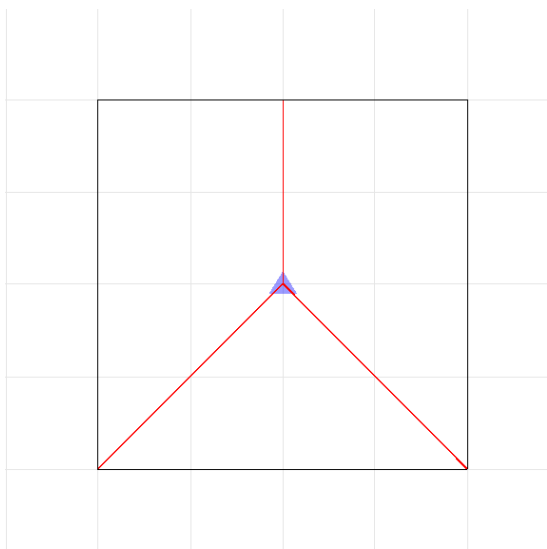


Figure 30. Un sommet avec trois plis de montagne dans l'application Oriedita. Le petit triangle bleu montre que le sommet n'est pas pliable à plat et qu'il nécessite un pli de vallée¹²³. Figure réalisée par l'auteur.

¹²¹ L'application est téléchargeable sur oriedita.github.io.

¹²² The Plant Psychologist, 2023

¹²³ The Plant Psychologist, 2023

Oriedita est basée sur le logiciel d'une autre application de design d'origami, appelée Orihime¹²⁴.

Outre les photos des modèles pliés ou sauf indication contraire, toutes les figures dans le présent travail de maturité sont créées sur Oriedita.

¹²⁴ Oriedita, s.d.

7 Création d'une abeille en papier

7.1 Première conception

7.1.1 Défis de la première conception

Dans la première version d'une abeille en papier, les rabats des éléments suivants seront implémentés : l'abdomen, le thorax, la tête, deux pattes arrière, deux pattes du milieu, deux pattes avant, deux grandes ailes, deux petites ailes, deux yeux et deux antennes. Le processus de la création de la première conception se tiendra aux étapes présentées dans le chapitre 4 (p. 13). Les plis de détail ne seront pas ajoutés.

7.1.2 Figure de bâton

Figure 31 montre une simplification d'une abeille avec les éléments mentionnés au début de ce chapitre.

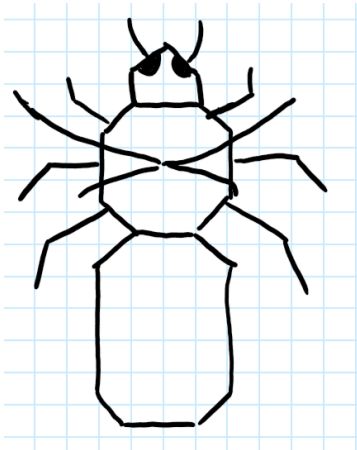


Figure 31. Simplification d'une abeille qui contient les éléments suivants : abdomen, thorax, tête, deux pattes arrière, deux pattes du milieu, deux pattes avant, deux grandes ailes, deux petites ailes, deux yeux et deux antennes. Figure réalisée par l'auteur.¹²⁵

¹²⁵ Figure dessinée à la main dans l'application OneNote.

Pour la première conception, la figure de bâton suivante a été créée :

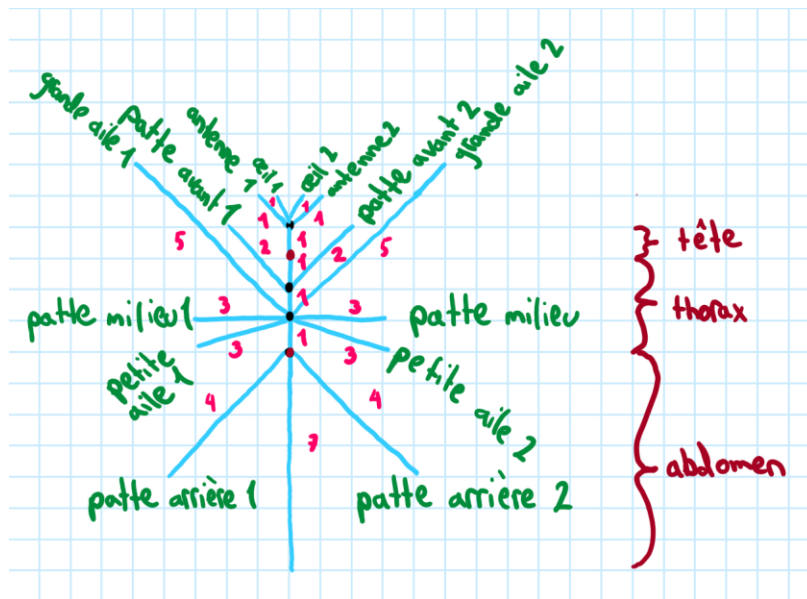


Figure 32. Figure de bâton de l'abeille avec tous les éléments mentionnés dans **Figure 31**. Ces éléments avec leurs longueurs spécifiques (en unités de carrés qui seront visibles par les plis formant la grille sur le modèle en papier) sont décrits sur le dessin ci-dessus. Dans cette simplification, une unité diagonale entre deux points de la grille est égale à une unité verticale ou horizontale entre deux points de cette grille. Figure réalisée par l'auteur.¹²⁶

7.1.3 Disposition des éléments

Partant de la figure de bâton dans **Figure 32**, la disposition suivante a été créée à base d'une grille de 24 × 24 unités avec l'étiquetage des éléments :

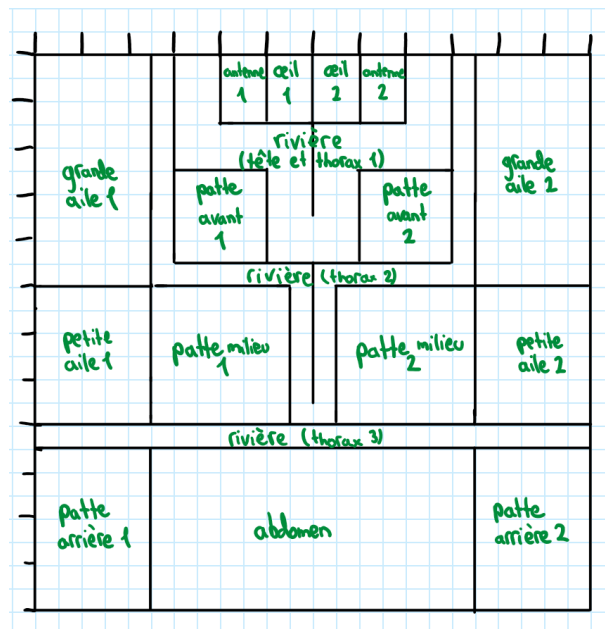


Figure 33. Disposition des éléments sans les plis de crête. Figure réalisée par l'auteur.¹²⁷

¹²⁶ Figure dessinée à la main dans l'application OneNote.

¹²⁷ Figure dessinée à la main dans l'application OneNote.

Dans la disposition des éléments de **Figure 33**, les plis de crête doivent être ajoutés :

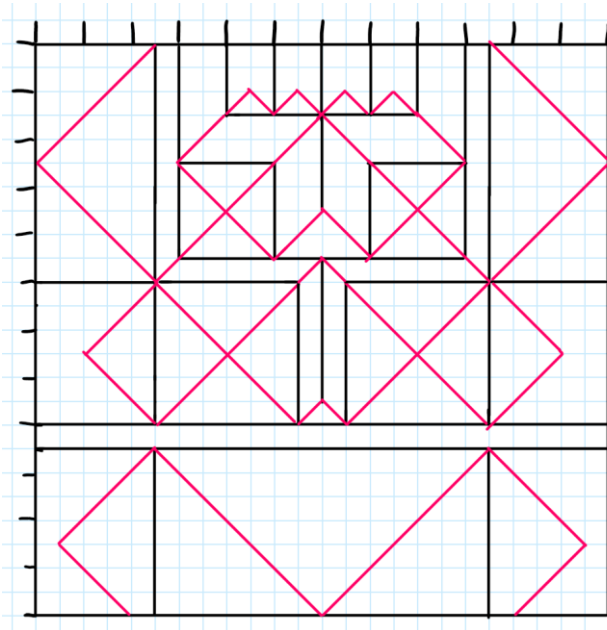


Figure 34. Les plis de crête ajoutés à la même disposition des éléments. Figure réalisée par l'auteur.¹²⁸

7.1.4 Canevas de plis

Partant de la disposition des éléments dans **Figure 34**, le canevas de plis de la première conception a été créé :

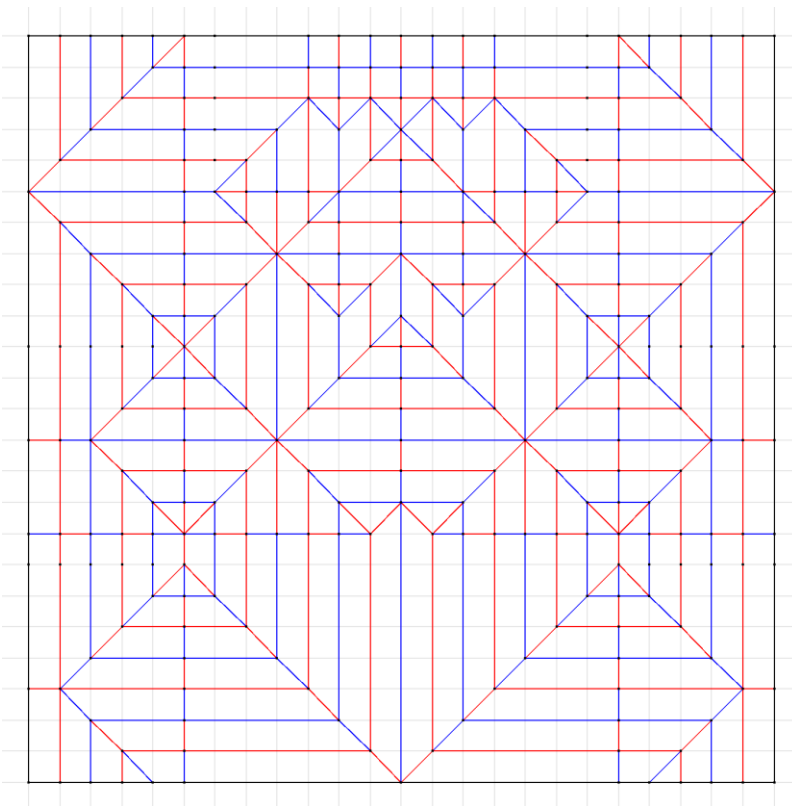


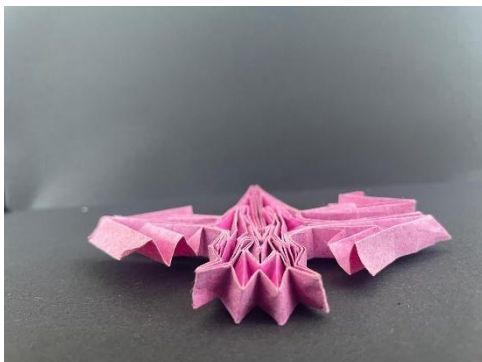
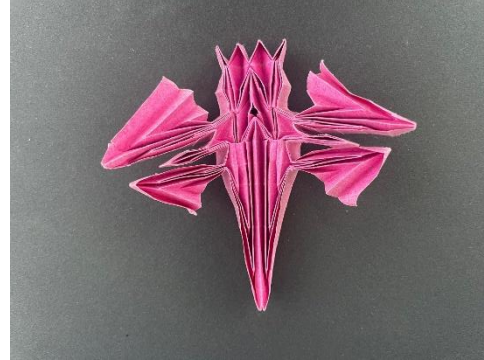
Figure 35. Canevas de plis de la première conception. Figure réalisée par l'auteur.

¹²⁸ Figure dessinée à la main dans l'application OneNote.

7.1.5 Modèle plié

Voici le modèle plié de la première conception :

Tableau 1. La première conception pliée par l'auteur avec du papier de la taille de 20 cm x 20 cm. Le tableau continue sur la prochaine page. Photos réalisées par l'auteur.



7.2 Deuxième conception

7.2.1 Défis de la deuxième conception

Comme visible dans **Figure 33**, les pattes avant et les pattes du milieu viennent de l'intérieur du papier. Ceci peut poser des problèmes, car les éléments qui viennent de l'intérieur du papier sont souvent enfermés dans d'autres éléments et ne peuvent pas être utilisés pour représenter une partie du modèle final¹²⁹.

Cependant, il est possible de libérer les éléments de l'intérieur du papier. Cela signifie de faire en sorte qu'ils puissent être tournés dans toutes les directions. Pour atteindre ceci, il faut supprimer le pli central du modèle. Cette action a comme conséquence l'élargissement du modèle, ce qui est favorable pour le modèle présenté dans ce travail de maturité, car cela rend l'abdomen, le thorax et la tête visibles et leur donne une largeur de deux unités. Cependant, comme le pli central n'est pas un pli axial tout le long du pli (des plis de charnières font aussi partie de ce pli central), cette action a d'autres conséquences : elle raccourcit quelques éléments le long de ce pli d'une unité. Pour le modèle présenté dans ce travail, cela n'a pas d'importance, car aussi par cette action les unités perdues sont remplacées par des rivières et la taille du modèle final reste la même. Supprimer le pli central permet de libérer les éléments venant de l'intérieur du papier et se situant le long de ce pli. Même si ces éléments sont toujours cachés dans d'autres éléments (comme visible par les flèches dans

Tableau 2), ils peuvent être tournés dans toutes les directions nécessaires pour une éventuelle transformation de la base en modèle terminé.¹³⁰

¹²⁹ Abrashi2, s.d.

¹³⁰ Abrashi7, s.d.

7.2.2 Canevas de plis

Voici le canevas de plis de la deuxième conception avec le pli central supprimé :

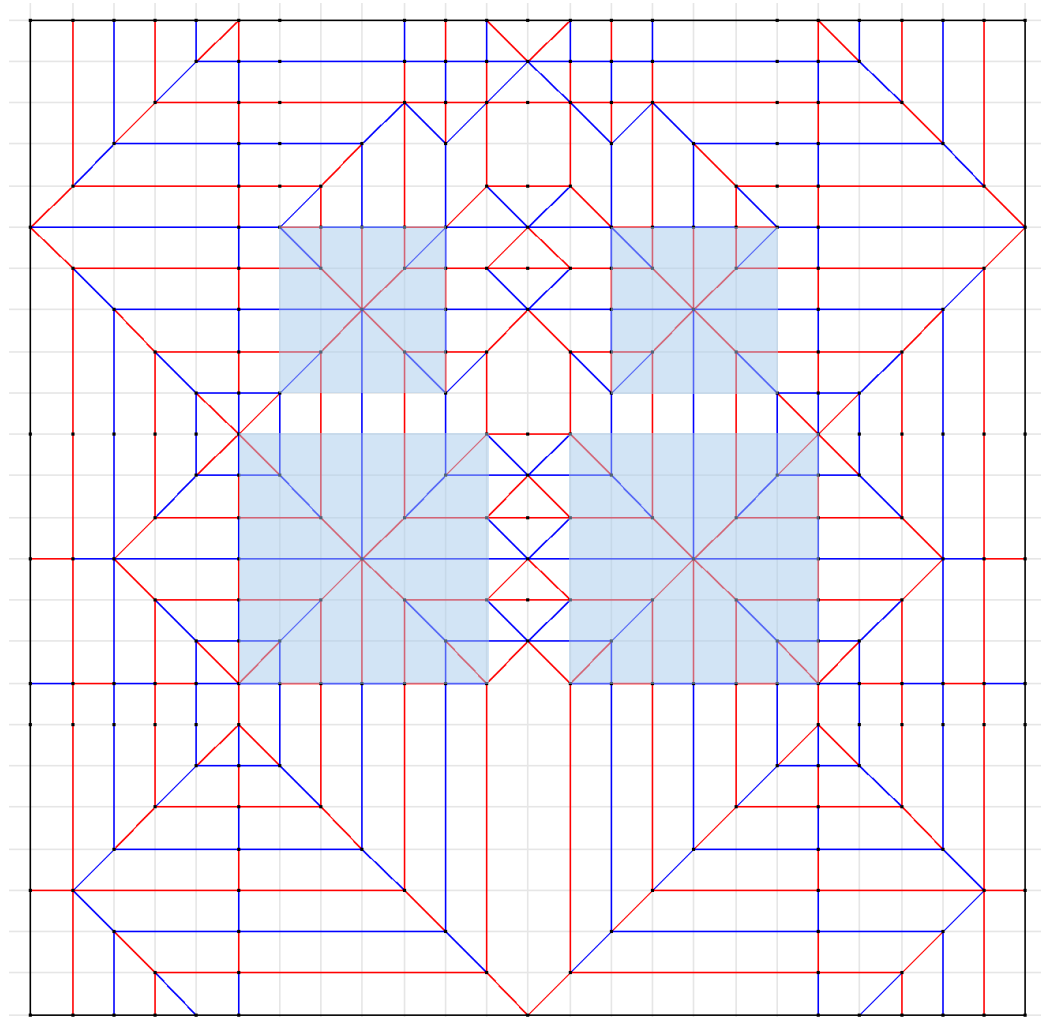
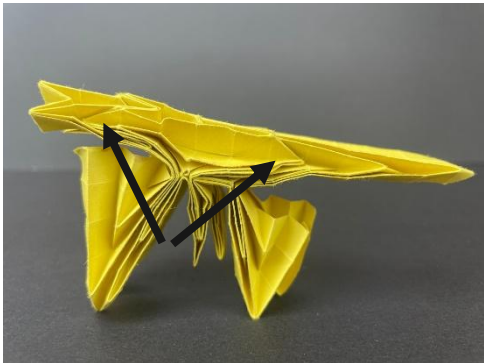
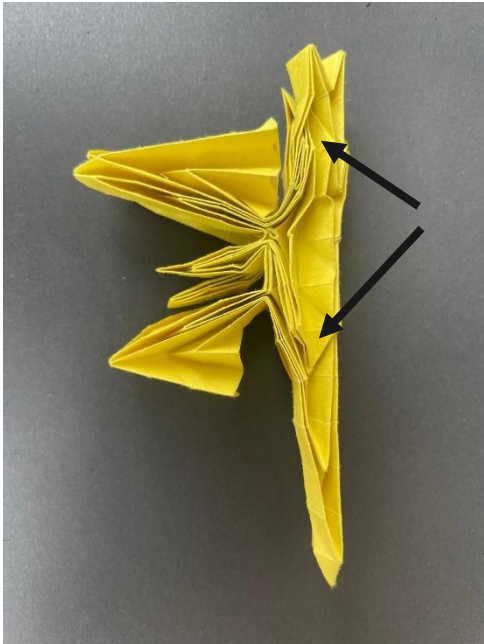
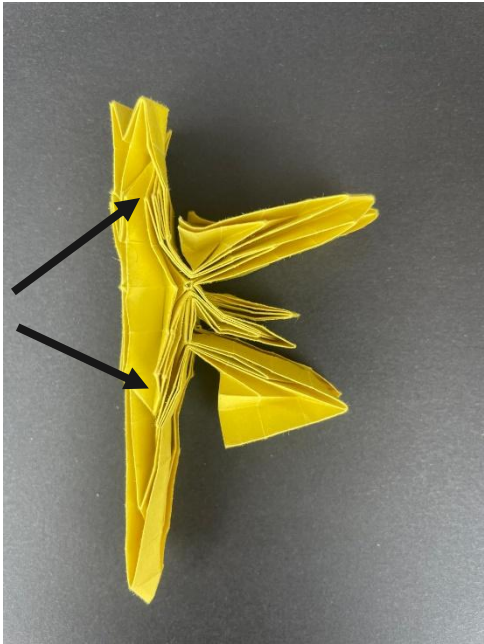
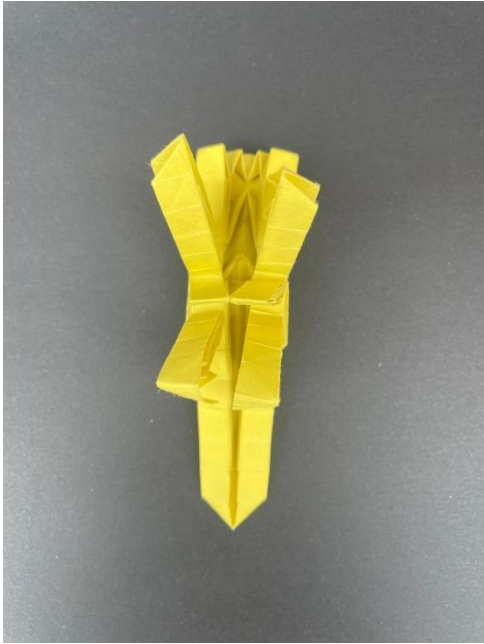
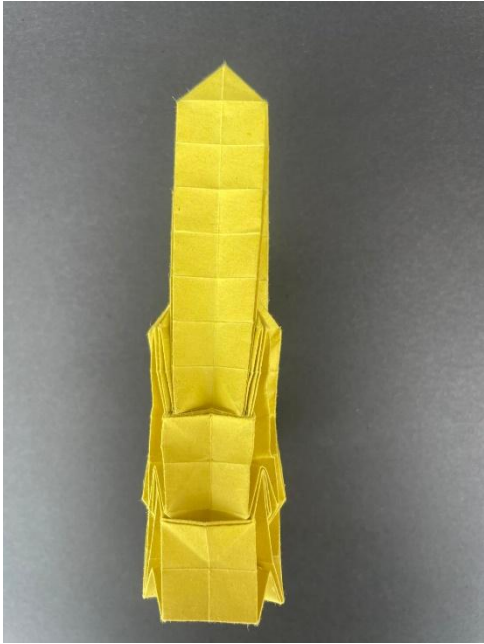


Figure 36. Canevas de plis de la deuxième conception. Marqués en bleu dans ce canevas sont les quatre éléments venant de l'intérieur du papier, cachés dans d'autres éléments autour. Il est visible que la ligne verticale centrale manque. Figure réalisée par l'auteur.

7.2.3 Modèle plié

Sur la prochaine page se trouve le modèle plié de la deuxième conception.

Tableau 2. La deuxième conception pliée par l'auteur avec du papier de la taille de 20 cm x 20 cm. Les flèches montrent les éléments de l'intérieur du papier qui sont cachés dans d'autres éléments autour. Photos réalisées par l'auteur.



7.3 Troisième conception

7.3.1 Défis de la troisième conception

En analysant le modèle plié de la deuxième conception, un problème est apparu : comme les éléments de l'intérieur du papier (les pattes du milieu et les pattes avant) sont cachés dans d'autres éléments, il faut les sortir des éléments qui les entourent pour continuer à les manipuler. En faisant ceci, au moins une unité de l'élément de l'intérieur est perdue. Pour garder la longueur originale, il faut agrandir les éléments de l'intérieur d'une unité. Cette unité supplémentaire peut être utilisée pour rendre l'élément accessible.

La largeur de l'abdomen, du thorax et de la tête est un défi à résoudre. Les rabats dans un modèle d'origami conçu à base d'une grille de carrés ont tendance à être assez étroits¹³¹. Ce phénomène facilite la conception des pattes et des éléments sur la tête (les yeux et les antennes), car ceux-ci sont plutôt étroits dans une abeille. Cependant, ce phénomène devient un problème pour le reste du corps (l'abdomen, le thorax, la tête et les ailes), car celui-ci est bien plus large comparé aux autres éléments.

7.3.2 Élargissement de l'abdomen, du thorax et de la tête

Pour résoudre le problème de la largeur de l'abdomen, du thorax et de la tête, une structure appelée *level shifter* sera utilisée. Cette structure nous permet d'élargir le modèle d'un ou plusieurs axes, ce qui mène à la disposition de plis axiaux + 2, 3, 4 et plus loin (voir chapitre 4.2.2, p. 22 pour l'explication de cette notation)¹³².

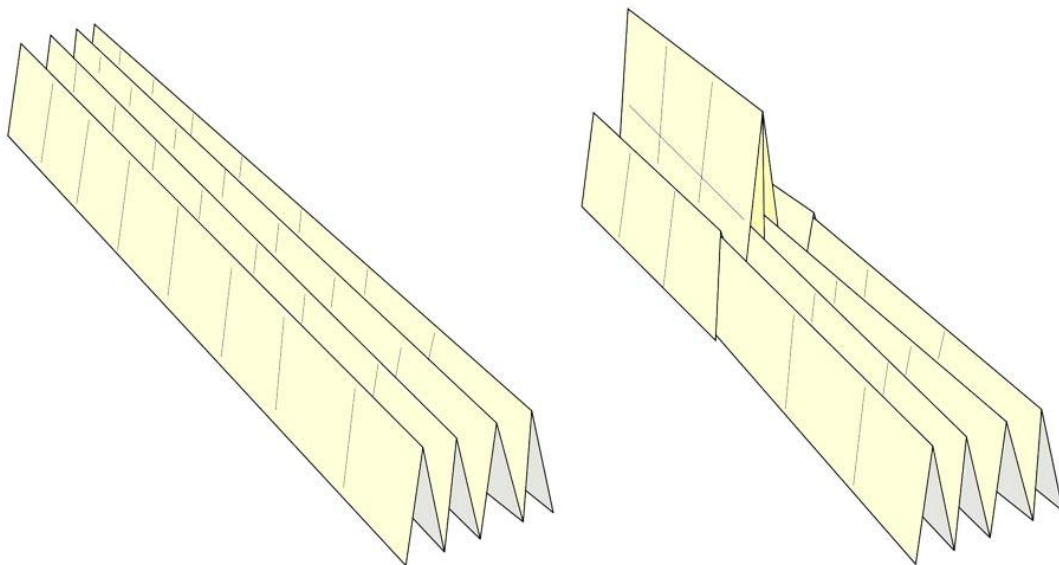


Figure 37. Les effets d'un *level shifter*. À gauche, une structure sans *level shifter* est visible. Les plis de vallée se trouvent sur le niveau axial + 0 et les plis de montagne sur le niveau axial + 1. À droite, on peut voir une structure avec un *level shifter*. Celui-ci permet une redistribution du papier qui mène à un pli axial + 2.¹³³

Pour la troisième conception, les *level shifters* utilisés offriront des plis axiaux sur le niveau axial + 3. Cela signifie que l'abdomen, le thorax et la tête auront une largeur de trois unités sur

¹³¹ Lang, 2011b, p. 626

¹³² Abrashi3, s.d.

¹³³ Abrashi10, s.d.

chaque côté de la ligne verticale centrale du corps de l'abeille. Comme ces éléments s'étendront sur les deux côtés de cette ligne (ils se trouveront exactement au milieu du corps), ils auront une largeur totale de six unités.

La structure de plis d'un *level shifter* axial + 3 est la suivante :

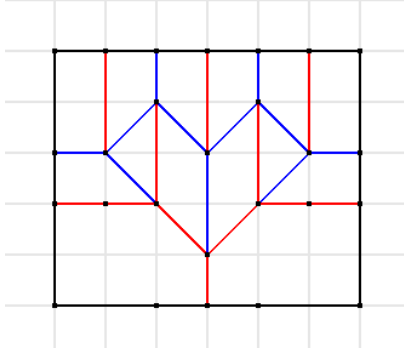


Figure 38. Structure de plis d'un *level shifter* axial +3. Figure réalisée par l'auteur.¹³⁴

Pour pouvoir implémenter cette structure dans le reste du canevas de plis, il faut lui donner ces propres rabats et rivières qui doivent respecter les règles décrites dans le chapitre 4.2.1 (p. 14). Pour pouvoir le faire, il faut analyser la figure de bâton du modèle entier et créer une propre figure de bâton pour les *level shifters* avec ses rabats et rivières. En analysant la figure de bâton du modèle entier, on remarque qu'il faut un *level shifter* de sept unités de longueur pour l'abdomen, un de trois unités de longueur pour le thorax et un de deux unités de longueur pour la tête. Comme les *level shifters* utilisés dans la troisième conception sont assez petits et vont élargir les parties seulement de deux unités sur chaque côté de la ligne verticale centrale, il faudra implémenter un seul rabat en haut et en bas d'un *level shifter* (voir **Figure 40**). Pour séparer les *level shifters* l'un de l'autre, il faudra positionner une rivière d'au moins une unité de largeur au-dessus du rabat supérieur du *level shifter* et une en dessous du rabat inférieur.¹³⁵

Comme mentionné au-dessus, il est nécessaire de positionner deux rabats (un rabat supérieur et un inférieur) pour créer un *level shifter* et ces deux rabats doivent être accompagnés d'une rivière respectivement. Pour rallonger le *level shifter*, il est possible de rallonger l'espace entre les deux rabats de celui-ci. Pour remplir l'espace créé en ayant fait cela, il faut placer une autre rivière entre les deux rabats de ce *level shifter* qui doit s'étendre sur toute cette nouvelle surface créée.¹³⁶

¹³⁴ D'après Stephan, s.d., adaptation par l'auteur.

¹³⁵ Dédit de The Plant Psychologist, 2021d

¹³⁶ Dédit de The Plant Psychologist, 2021d

En respectant les règles mentionnées ci-dessus, on reçoit la figure de bâton des *level shifters* pour la troisième conception :

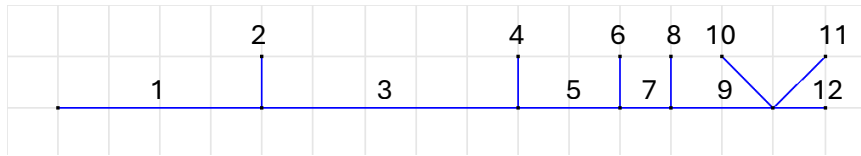


Figure 39. La figure de bâton des *level shifters*. La ligne horizontale représente les rivières entre les rabats qui sont eux-mêmes représentés par les lignes verticales. Figure réalisée par l'auteur.

En allant de gauche à droite, on voit les rabats et rivières suivants (pour pouvoir simplifier la légende ci-dessous, l'expression « le rabat supérieur / inférieur du *level shifter* de l'abdomen / du thorax / de la tête » sera réduite en « le rabat supérieur / inférieur de l'abdomen / du thorax / de la tête ») :

1. Une rivière de quatre unités qui contient la rivière du rabat inférieur de l'abdomen¹³⁷.
2. Le rabat inférieur de l'abdomen.
3. Une rivière de cinq unités qui remplit l'espace entre les deux rabats de l'abdomen.
4. Le rabat supérieur de l'abdomen.
5. Une rivière de deux unités, qui est techniquement deux rivières d'une unité, car elle contient la rivière du rabat supérieur de l'abdomen et celle du rabat inférieur du thorax.
6. Le rabat inférieur du thorax.
7. Une rivière d'une unité qui remplit l'espace entre les deux rabats du thorax.
8. Le rabat supérieur du thorax.
9. Une rivière de deux unités qui remplit la même fonction que la rivière no. 5 pour le rabat supérieur du thorax et celui inférieur de la tête.
10. Le rabat inférieur de la tête.
11. Le rabat supérieur de la tête.
12. Une rivière d'une unité qui contient la rivière du rabat supérieur de la tête.

¹³⁷ Pour l'implémentation des *level shifters*, une rivière d'une unité suffirait, mais comme les rabats et rivières doivent remplir la surface entière de la feuille de papier, cette rivière a été agrandie pour qu'aucune surface reste non utilisée.

Voici la disposition des éléments pour la figure de bâton de **Figure 39** :

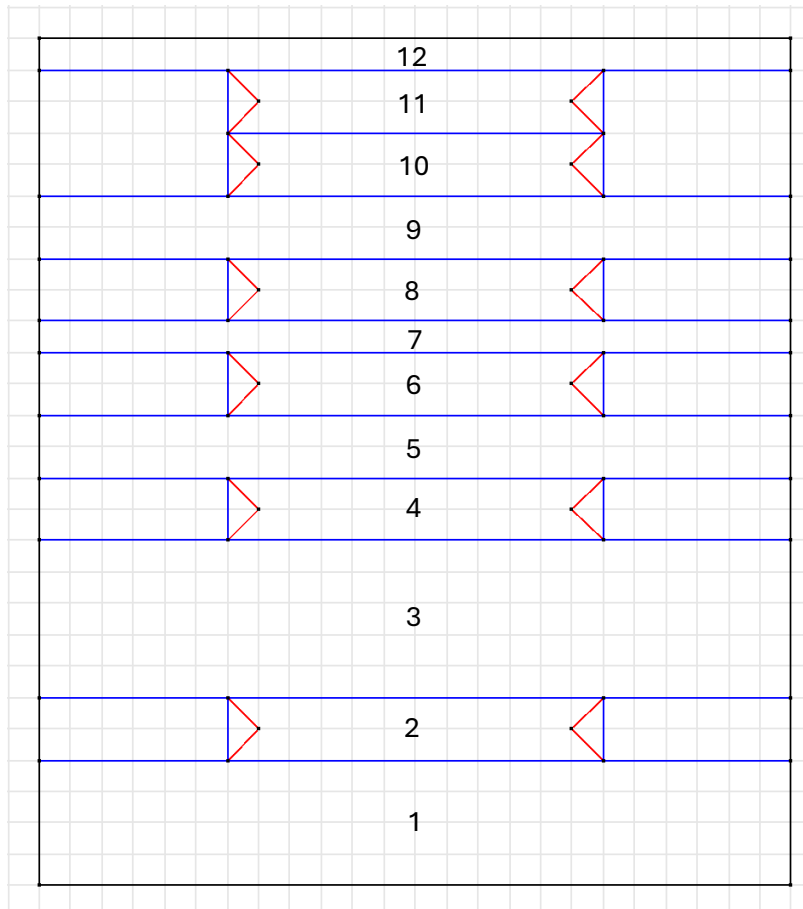


Figure 40. La disposition des rabats et rivières pour les *level shifters*. Les numéros correspondent à la légende de **Figure 39**. Figure réalisée par l'auteur.

Après avoir créé la disposition des *level shifters* de la troisième conception (**Figure 40**), il reste juste à implémenter la structure de **Figure 38** dans les rabats et rivières pour créer le canevas de plis des *level shifters*. Il faudra implémenter deux de ces structures par rabat (douze au total) en faisant attention à les placer correctement : les deux structures doivent être placées entre les points auxquels les deux lignes rouges sur un côté d'un rabat se touchent (les lignes bleues ne se trouveront plus dans les canevas de plis des *level shifters*). En plus, il faut faire attention que la ligne en zigzag dans la structure visible dans **Figure 38**, composée entièrement de plis de vallée, se trouve dans la rivière au-dessus d'un rabat supérieur ou en dessous d'un rabat inférieur (visibles dans **Figure 40**).¹³⁸

Pour pouvoir visualiser ce qui précède, **Figure 41** montre le placement d'une partie de la structure des *level shifters*¹³⁹ dans la disposition :

¹³⁸ Dédit de The Plant Psychologist, 2021d

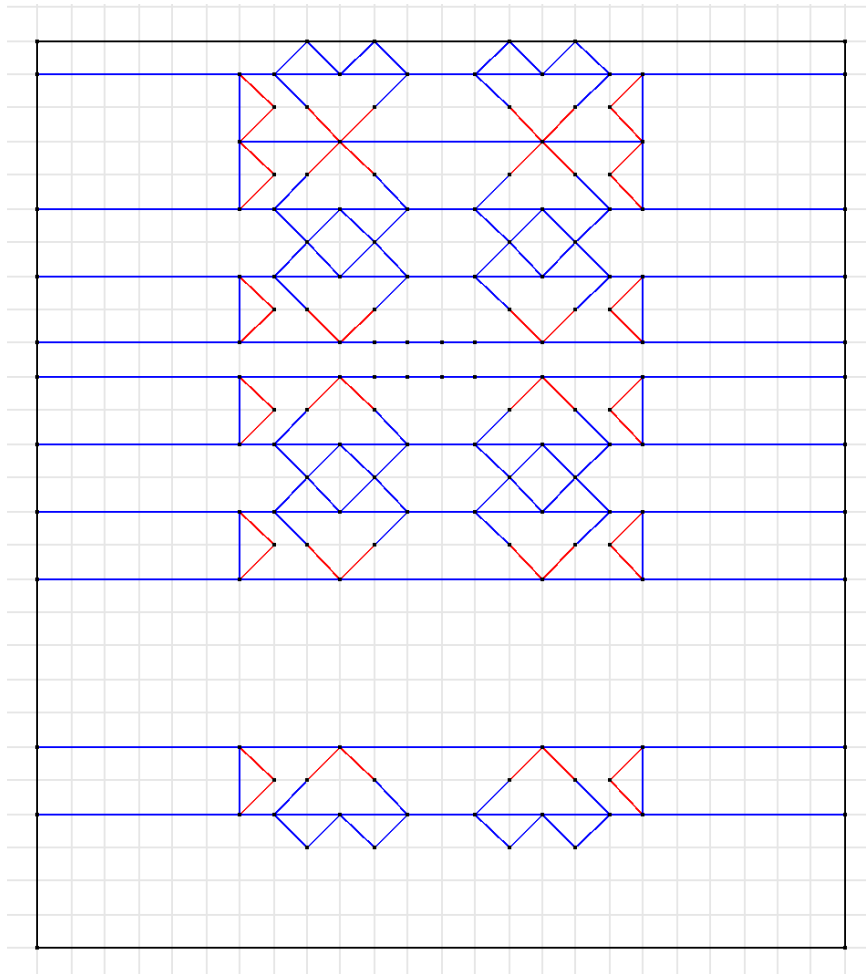


Figure 41. Illustration du placement d'une partie de la structure des *level shifters*¹³⁹ dans la disposition des *level shifters* de la troisième conception. Figure réalisée par l'auteur.

Après avoir placé les *level shifters* dans la disposition des *level shifters* correctement, elle est transformée en canevas de plis en respectant la même procédure nécessaire pour faire ceci pour un modèle d'origami entier (voir chapitre 4.2.2, p. 22)¹⁴⁰.

¹³⁹ Dans **Figure 41**, les plis horizontaux et verticaux nécessaires pour le pliage des *level shifters* manquent pour garder la vue d'ensemble.

¹⁴⁰ The Plant Psychologist, 2021d

Voici le canevas de plis des *level shifters* de la troisième conception et sa version pliée :

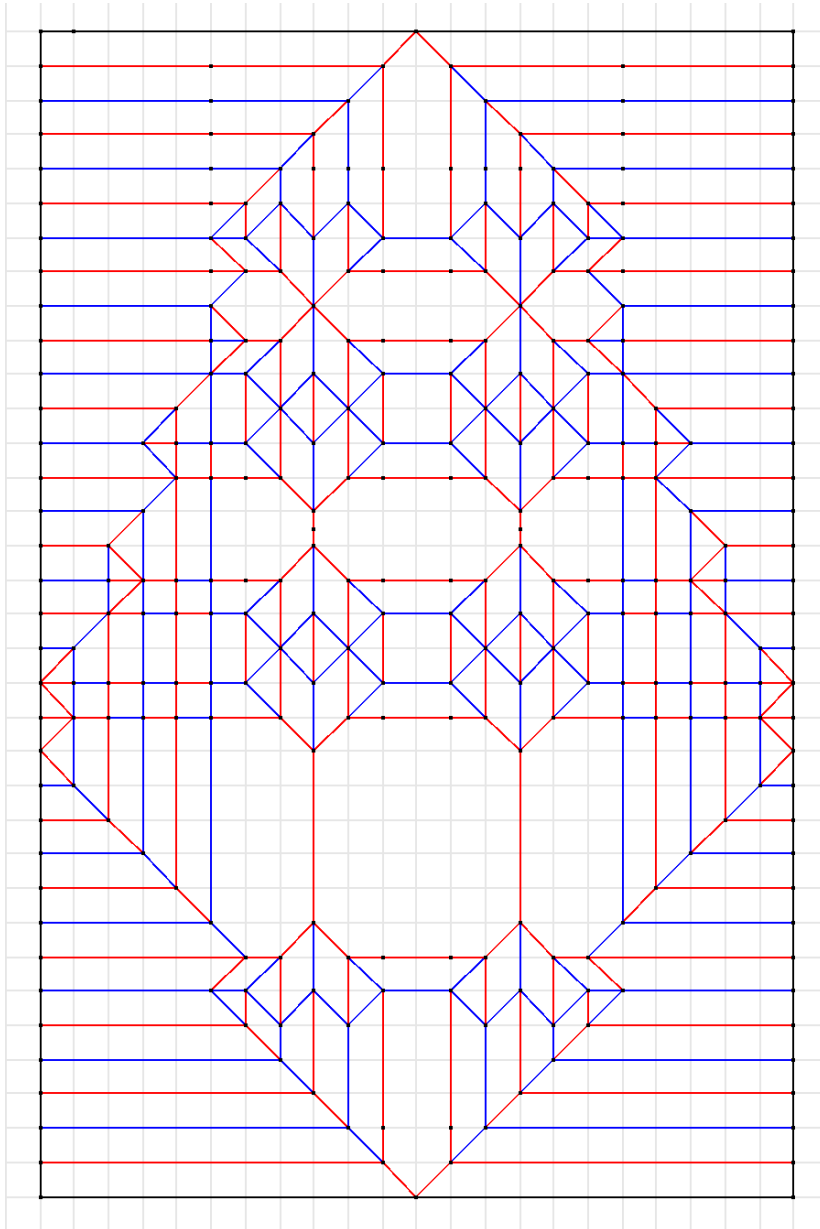


Figure 42. Canevas de plis des *level shifters* de la troisième conception. Figure réalisée par l'auteur.

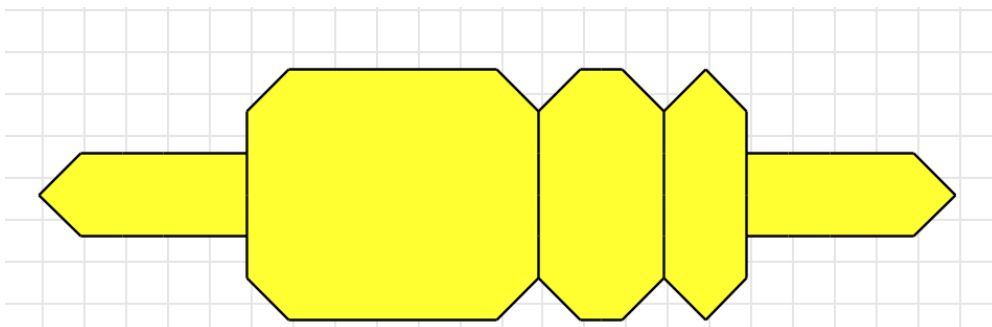


Figure 43. Version pliée des *level shifters* de la troisième conception. De gauche à droite : les trois grandes structures visibles sont l'abdomen, le thorax et la tête. Figure réalisée par l'auteur.

En analysant la version pliée, on peut voir que l'abdomen, le thorax et la tête ont pu être élevés d'un niveau axial + 1 dans la deuxième conception à un niveau axial + 3 dans la troisième

conception sur chaque côté de l'axe de miroir. Ceci veut dire que ces trois parties ont été élargies avec succès d'une unité à trois unités de largeur sur chaque côté de l'axe de miroir (respectivement de deux unités à six unités de largeur totales).

7.3.3 Disposition des éléments

Après s'être occupé des *level shifters*, il faut disposer les autres éléments (les ailes, les pattes, les antennes et les yeux) autour de ces *level shifters*, en faisant attention à l'endroit auquel ils seront placés.

Pour cela, la disposition suivante a été créée. Elle montre les points auxquels les pattes, ailes, yeux et antennes doivent être attachés au reste du corps :

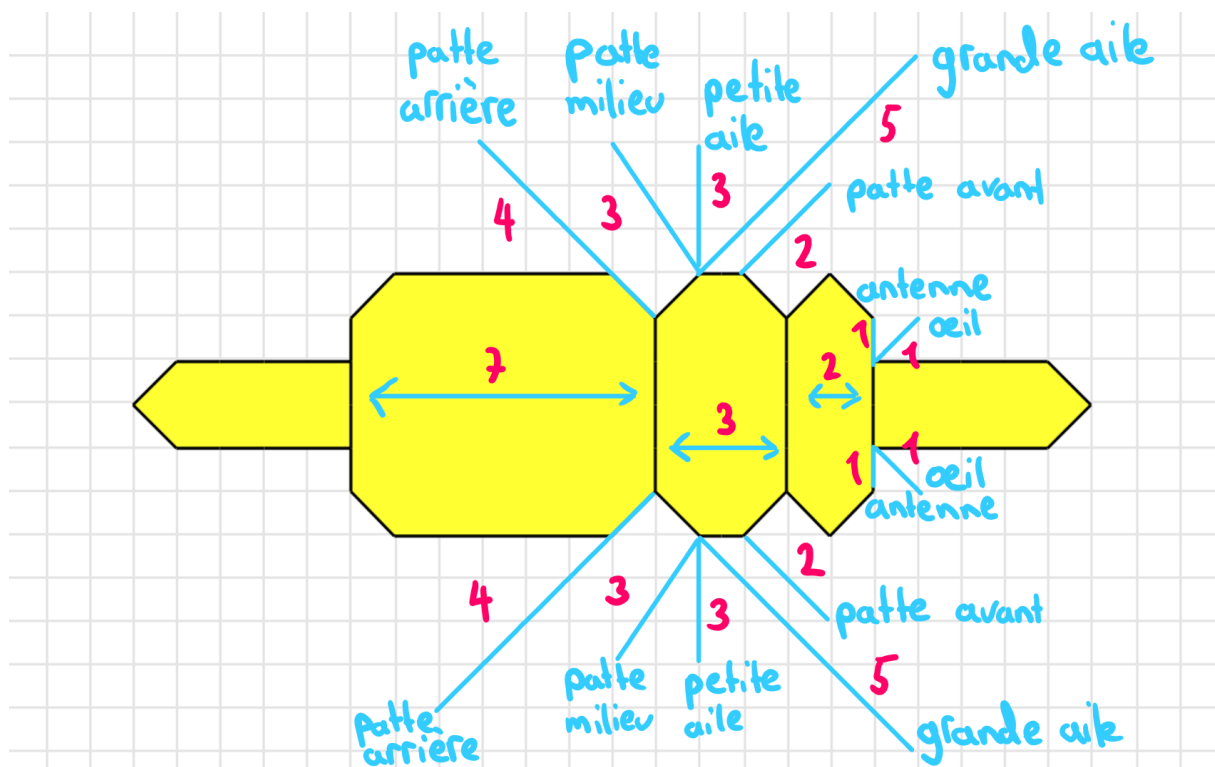


Figure 44. Disposition des pattes, des ailes, des yeux et des antennes attachés au reste du corps de l'abeille. Les chiffres montrent les longueurs de leurs rabats. Figure réalisée par l'auteur.¹⁴¹

Pour atteindre ce placement exact des éléments au reste du corps, il faut les placer entre deux rivières. Tous les points sur la grille le long d'un *level shifter* se trouvent précisément entre deux rivières de celui-ci, et quand on veut attacher un élément à un point spécifique le long du *level shifter*, il faut également placer cet élément entre les deux rivières qui définissent ce point spécifique.¹⁴²

Prenons comme exemple une patte arrière : il faut placer celle-ci entre l'abdomen et le thorax. Pour atteindre ceci, il faut placer le rabat de la patte arrière entre la rivière du rabat supérieur de l'abdomen et celle du rabat inférieur du thorax. **Figure 45** montre que le placement des pattes arrière a en effet eu lieu de cette manière (les pattes arrière sont les surfaces marquées en rouge).

¹⁴¹ Étiquetage écrit à la main dans l'application OneNote.

¹⁴² The Plant Psychologist, 2021d

La prochaine étape à clarifier est celle de la taille des éléments de l'intérieur du papier. Comme décrit dans le chapitre 7.3.1, une unité de longueur des rabats de l'intérieur du papier est perdue en libérant ces éléments de ceux qui les entourent pour pouvoir continuer de les manipuler. En conséquence, il est favorable d'ajouter une unité de longueur à ces éléments qui peut être utilisée pour les rendre accessibles. Dans **Figure 45**, les éléments de l'intérieur du papier sont représentés par les rabats carrés marqués en bleu. Les quatre rabats de 4×4 unités représentent les yeux et les antennes et les deux rabats de 6×6 unités représentent les pattes avant. Quand on compare ces longueurs de rabat à **Figure 44**, il est visible que dans **Figure 45** cette unité de longueur supplémentaire a déjà été ajoutée : **Figure 44** montre que les yeux et antennes doivent être longs d'une unité. De ce fait, il suffirait de lui donner une taille de 2×2 unités (voir chapitre 4.2.1.1, p. 14 pour l'explication de la disposition des rabats). Cependant, comme une unité supplémentaire est nécessaire pour libérer le rabat de ceux qui l'entourent, les rabats des yeux et antennes doivent avoir une longueur totale de deux unités, ce qui veut dire que le rabat doit avoir une taille de 4×4 unités, comme visible dans **Figure 45**. La même chose compte pour les pattes avant qui sont représentées par les rabats de 6×6 unités. Ceux-ci doivent avoir une longueur de deux unités, mais comme une unité supplémentaire est nécessaire pour les libérer des éléments qui les entourent, ils doivent avoir une longueur totale de trois unités. Ceci signifie que les rabats doivent avoir une taille de 6×6 unités (voir chapitre 4.2.1.1, p. 14).

Pour la disposition finale, il est important de mentionner que les rabats des *level shifter* ont le droit de changer leur longueur en direction horizontale dans la disposition¹⁴³. Ceci peut être utile pour remplir des espaces vides éventuels, car toute la surface de la disposition doit être remplie avec soit un rabat, soit une rivière¹⁴⁴.

¹⁴³ The Plant Psychologist, 2021d

¹⁴⁴ The Plant Psychologist, 2021b

En disposant les rabats et rivières de manière que toute la surface de la disposition soit remplie de rabats ou de rivières, la disposition finale de la troisième conception a été créée :

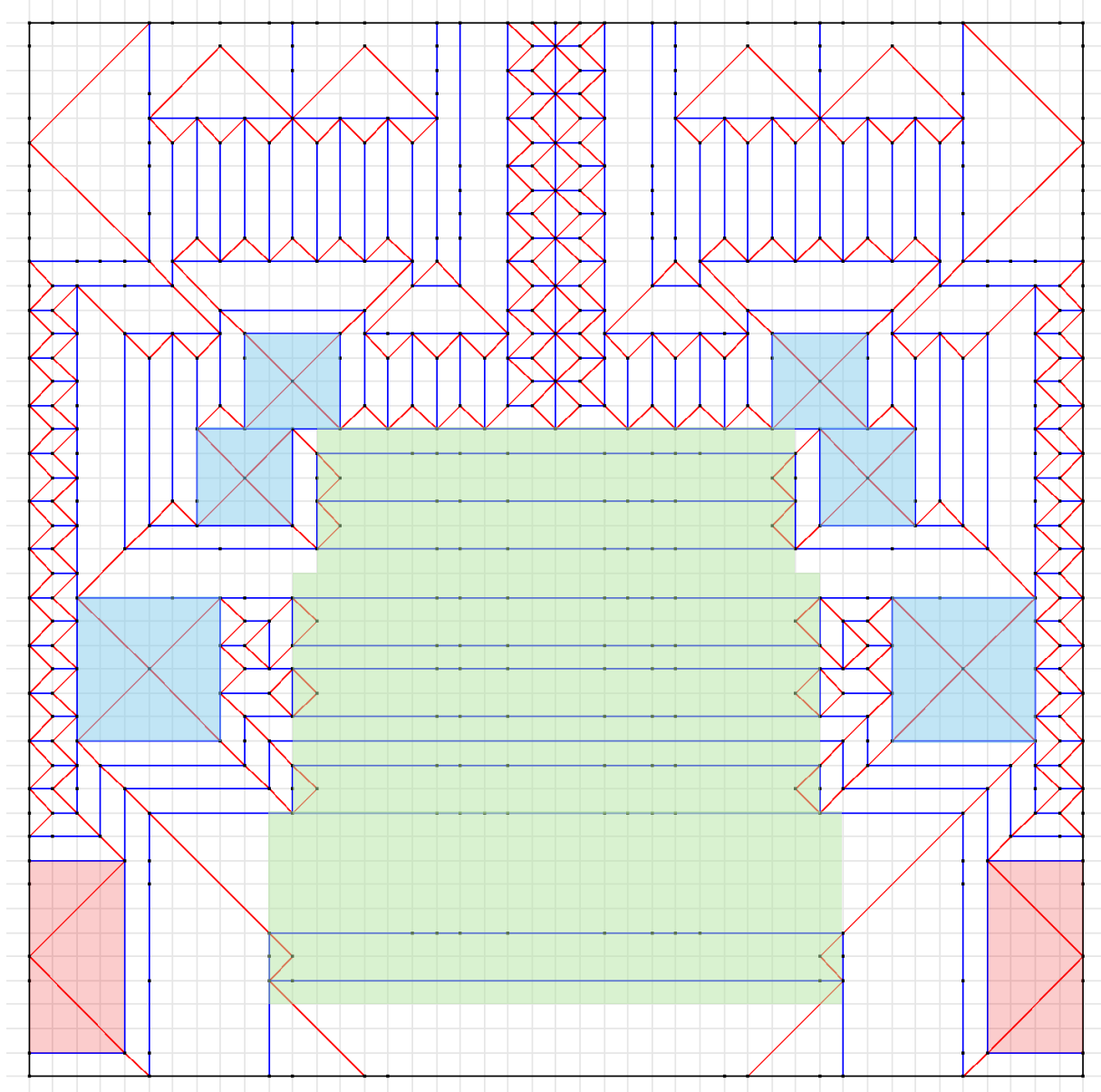


Figure 45. Disposition des éléments de la troisième conception avec les plis de crête en rouge. Les surfaces bleues claires montrent les éléments de l'intérieur du papier, la surface verte représente la partie du papier qui est utilisée pour les trois level shifters et les surfaces rouges représentent les rabats des pattes arrière. Figure réalisée par l'auteur.

7.3.4 Canevas de plis

En plus d'avoir respecté les règles pour la création d'un canevas de plis (voir chapitre 4.2.2, p. 22), d'autres points ont été concrétisés pour le canevas de plis de la troisième conception :

Comme pour la deuxième conception, le pli central vertical a été supprimé, comme marqué par les surfaces violettes dans **Figure 46**. Pour pouvoir le faire, une structure plus complexe que dans la deuxième conception est nécessaire dans la partie supérieure du canevas de plis (voir **Figure 36**, p. 36). Dans la partie inférieure du canevas de plis, le pli de crête de la rivière du rabat inférieur du *level shifter* de l'abdomen (le pli de crête de quatre unités tout en bas près de la ligne verticale centrale de la disposition dans **Figure 45**) a été redirigé à l'horizontale vers le

centre du canevas pour mettre la structure qui permet de supprimer le pli central vertical en place. Cette action a été effectuée afin de cacher une partie du papier en dessous du *level shifter* qui n'est pas désirée, car dans la version pliée, le *level shifter* devrait représenter la partie la plus inférieure du modèle. Malheureusement, cette action ne permet pas de cacher tout le papier non désiré et une bande de papier d'une unité de largeur reste visible sur le côté inférieur du *level shifter* (voir **Figure 47**, cette bande de papier est représentée par les deux unités visibles à gauche de l'abdomen). Cette bande de papier pourrait être cachée pendant l'ajout de plis de détail (voir chapitre 4.3, p. 27 pour la définition des plis de détail).

Un dernier point à respecter est celui de l'absence de plis par les *level shifters* (surfaces colorées en vert dans **Figure 46**). En créant le canevas de plis de la troisième conception, il faut faire attention qu'aucun pli ne passe par les *level shifters*, car cela les déformerait et le résultat ne ressemblerait pas au *level shifter* désiré.

En ayant respecté toutes ces exigences, le canevas de plis de la troisième conception a été créé :

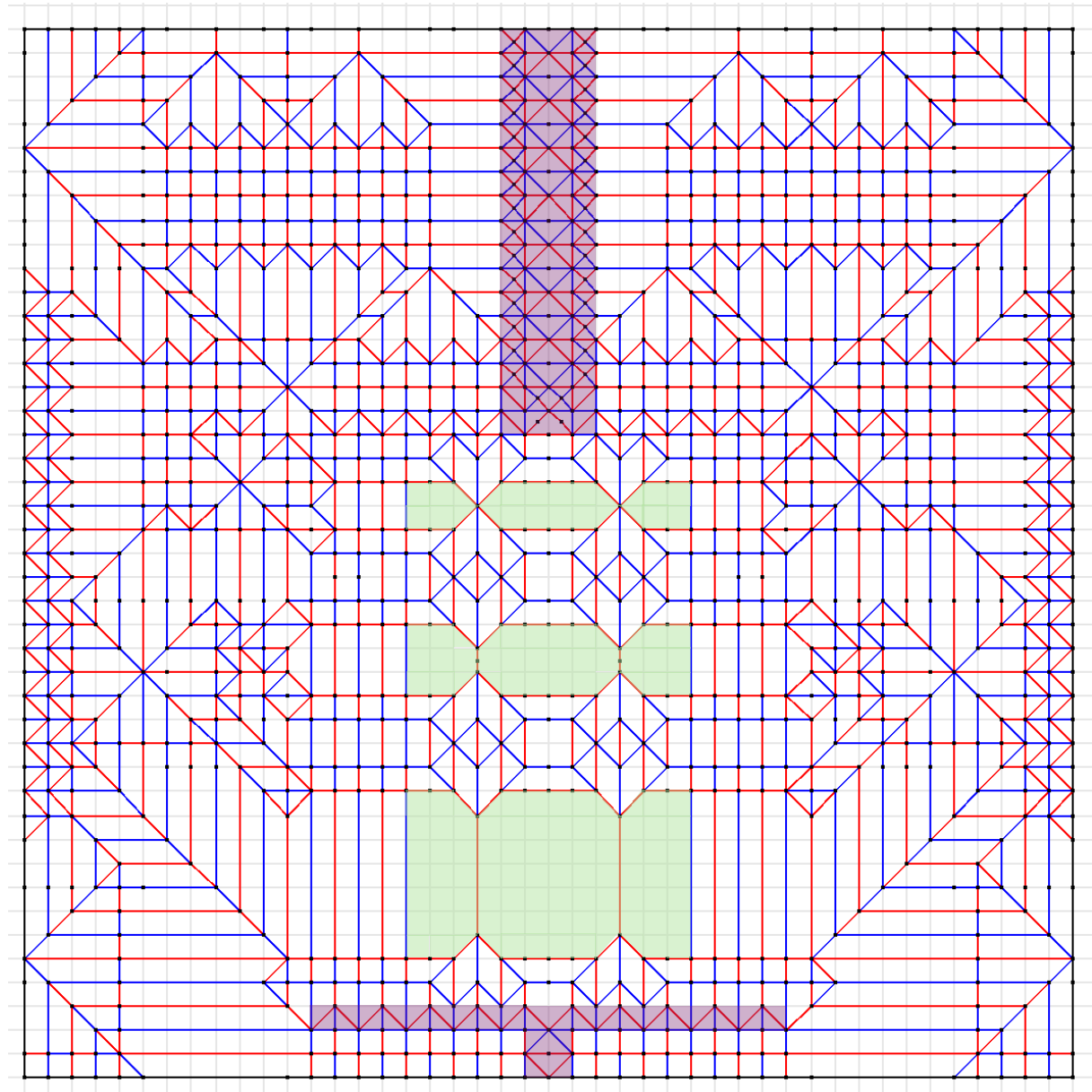


Figure 46. Canevas de plis de la troisième conception. Les surfaces vertes sont celles visibles dans la structure des level shifters (aussi les surfaces tournées vers le bas) et les surfaces violettes sont utilisées pour supprimer le pli central vertical. Figure réalisée par l'auteur.

Figure 47 montre la version pliée du canevas de plis de la troisième conception (**Figure 46**), calculée par l'application Oriedita :

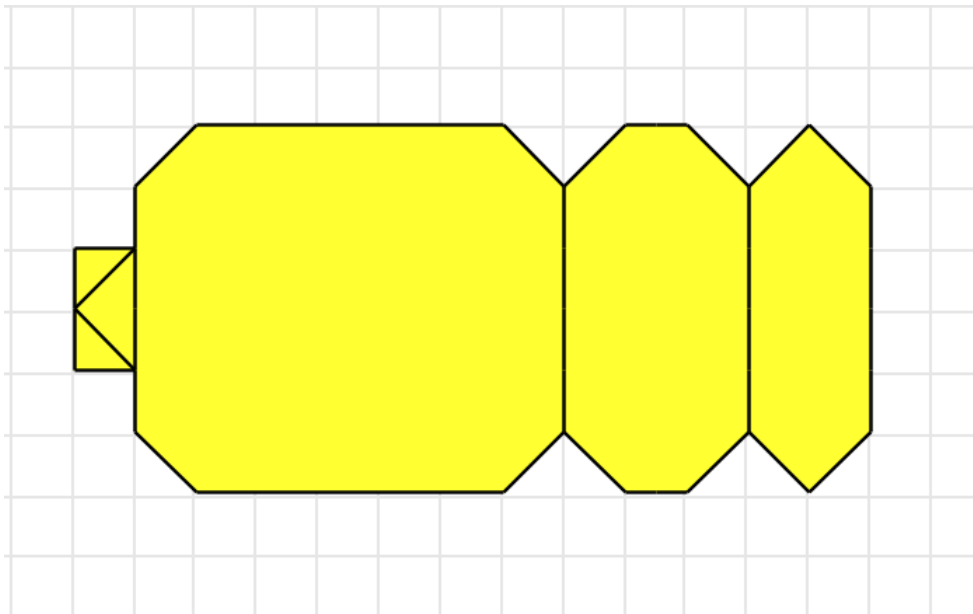


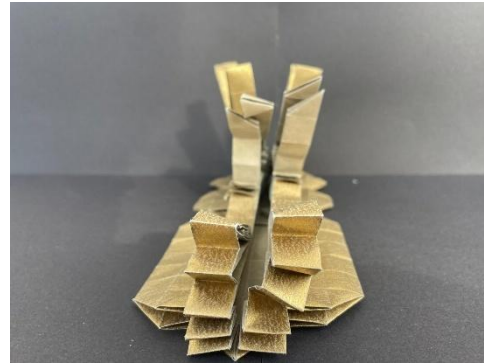
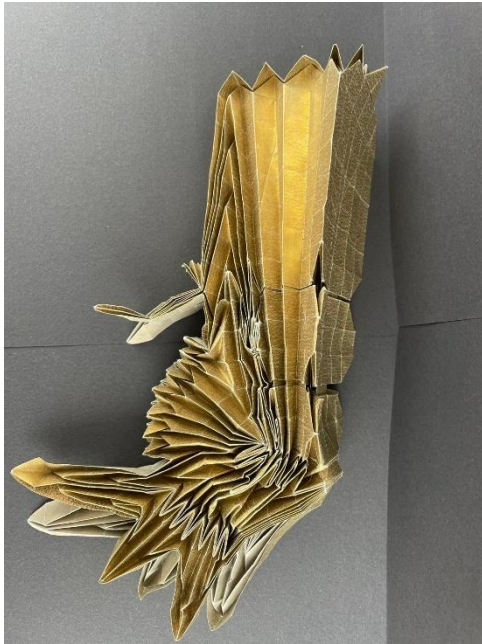
Figure 47. Version pliée du canevas de plis dans **Figure 46**. Figure réalisée par l'auteur.

7.3.5 Modèle plié

Voici le modèle plié de la troisième conception :

Tableau 3. La troisième conception pliée par l'auteur avec du papier de la taille de 60 cm x 60 cm. Il est à noter que ce modèle plié ne correspond pas complètement au canevas de plis de **Figure 46**, car une méthode moins complexe a été trouvée pour plier les plis en dessous de la tête pendant le processus du pliage. Cependant, cela ne change rien à la forme du modèle reçue. Le tableau continue sur la prochaine page. Photos réalisées par l'auteur.





7.4 Quatrième conception

7.4.1 Défis de la quatrième conception

En analysant la troisième conception, on peut remarquer que les rabats pour les ailes sont (comme tous les autres rabats, sauf les *level shifters*) très étroits et ont une largeur d'une seule unité. Ceci peut poser un problème pour les ailes qui sont très visibles sur le corps de l'abeille.

Comme décrit dans le chapitre 5 (p. 28), les segments de l'abdomen, les ocelles et les mandibules font aussi partie du corps de l'abeille. Dans la quatrième conception, ces éléments seront ajoutés aux autres.

Les éléments qui se trouvent sur la tête de l'abeille posent un autre défi. Comme ces éléments se trouvent sur la surface tournée vers le bas sur le *level shifter* de la tête dans le modèle plié de la troisième conception, ils ne sont pas visibles dans son modèle plié.

7.4.2 Élargissement des ailes

Pour élargir les ailes, de nouveau des *level shifters* seront utilisés. Pour simplifier cette étape, le *level shifter* du thorax (sur lequel les ailes se trouvent) sera supprimé et remplacé par les *level shifters* des ailes. Comme il y a quatre ailes accrochées au corps de l'abeille, il faudra implémenter deux *level shifters* : chaque *level shifter* contiendra une paire d'ailes, le premier les grandes ailes qui se trouvent plus proches de la tête et le deuxième les petites ailes qui se

trouvent plus proches de l'abdomen. Un dessin du corps de l'abeille avec les ailes comme level shifters se trouve ci-dessous :

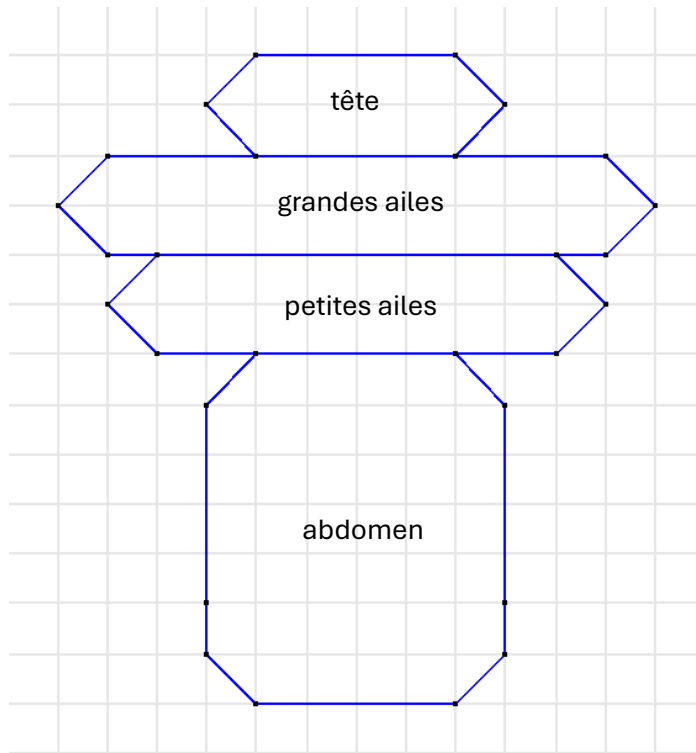


Figure 48. Dessin du corps de l'abeille pour visualiser celui-ci avec les ailes comme level shifters¹⁴⁵. Figure réalisée par l'auteur.

En créant ces *level shifters* pour les ailes, un nouveau problème apparaît : si on observe le corps d'une abeille précisément, on peut remarquer que la surface d'une aile d'abeille à l'endroit où cette aile s'accroche au corps est minimale (voir **Figure 29**, p. 28). L'aile ne touche le corps de l'abeille qu'avec une petite surface qui ressemble juste à un point. Ceci est un détail important à implémenter, car sans celui-ci l'abeille pliée perdrait en réalisme. **Figure 49** montre un dessin plus précis des ailes de l'abeille pliée :

¹⁴⁵ Les longueurs des différentes parties du corps sont précises et seront reprises pour le design de la quatrième conception.

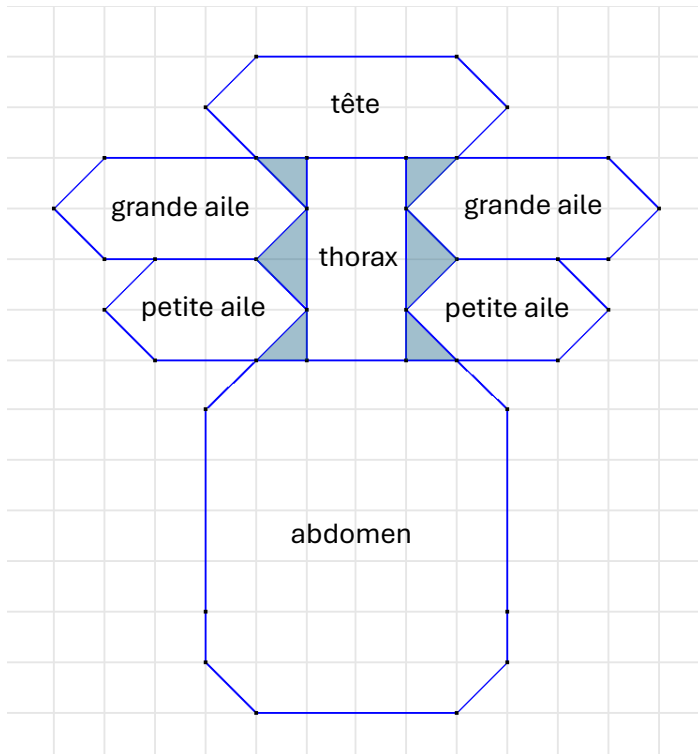


Figure 49. Dessin du corps de l'abeille pour visualiser celui-ci avec les ailes comme *level shifters* qui s'accrochent au corps juste en un point, sans grande surface¹⁴⁶. Les surfaces bleues marquent les surfaces sans papier. Figure réalisée par l'auteur.

Pour créer le canevas de plis des ailes avec le point à l'endroit où elles sont attachées au corps, il faut partir d'un *level shifter* axial + 10 pour les grandes ailes et d'un *level shifter* axial + 9 pour les petites ailes (voir chapitre 4.2.2, p. 22, pour l'explication de cette notation). Le canevas de plis de ceux-ci est visualisé ci-dessous :

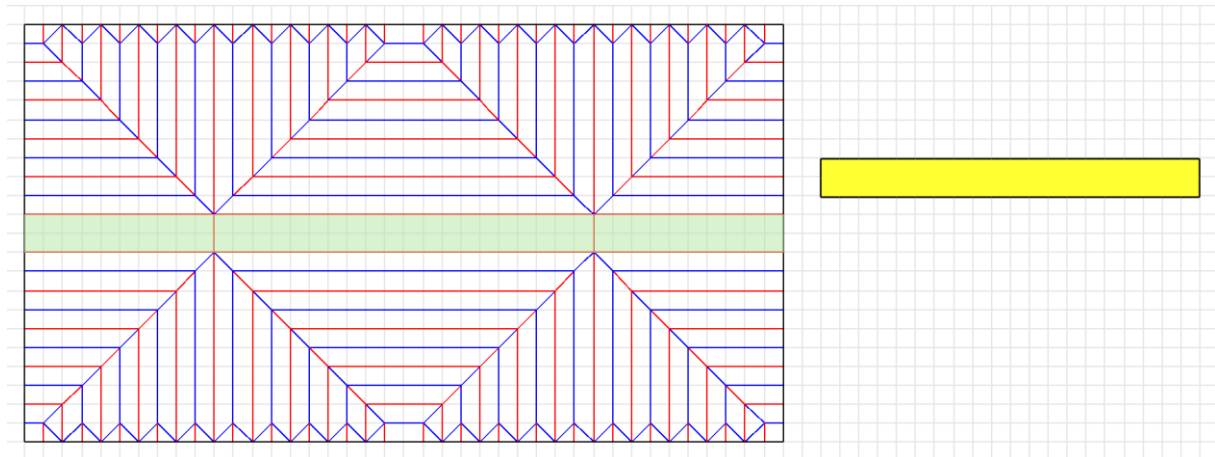


Figure 50. Canevas de plis du *level shifter* des grandes ailes. La structure pour le point à l'endroit de l'accroche de l'aile au corps n'est pas montrée. À droite, la version pliée de ce *level shifter* est visualisée. La surface verte est la surface visible dans la version pliée (avec les surfaces qui tournent vers le bas). Figure réalisée par l'auteur.

¹⁴⁶ Les longueurs des différentes parties du corps sont précises et seront reprises pour le design de la quatrième conception.

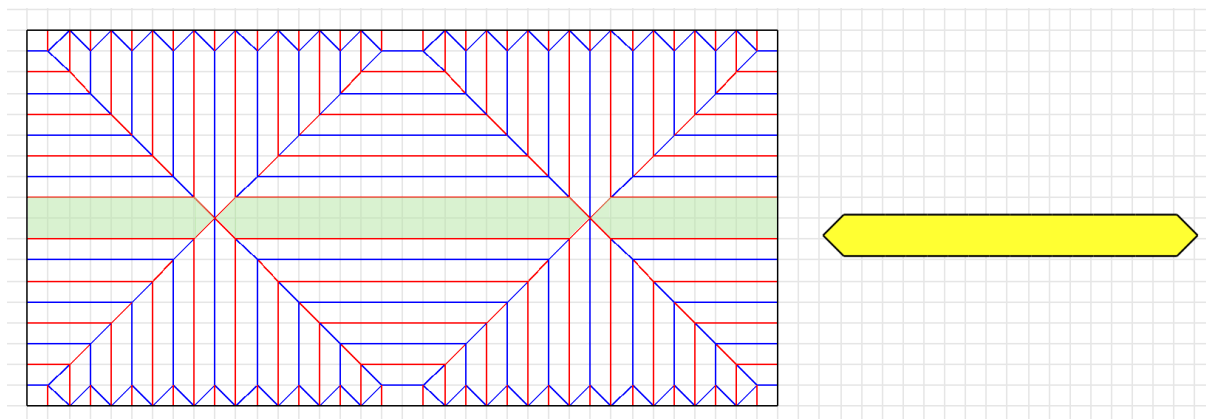


Figure 51. Canevas de plis du level shifter des petites ailes. La structure pour le point à l'endroit de l'accroche de l'aile au corps n'est pas montrée. À droite, la version pliée de ce level shifter est visualisée. La surface verte est la surface visible dans la version pliée (avec les surfaces qui tournent vers le bas). Figure réalisée par l'auteur.

Après avoir créé ces canevas de plis, il faut implémenter la structure pour le point à l'endroit de l'attache des ailes au corps dans les canevas de plis des *level shifters*. Pour simplifier la création de cette structure, on prétendra dans une première étape que les *level shifters* ne contenaient qu'une couche de papier (ce qui est évidemment simplifié). Les figures ci-dessous illustrent la structure nécessaire pour ajouter la pointe supplémentaire sur ce *level shifter* imaginaire d'une seule couche :

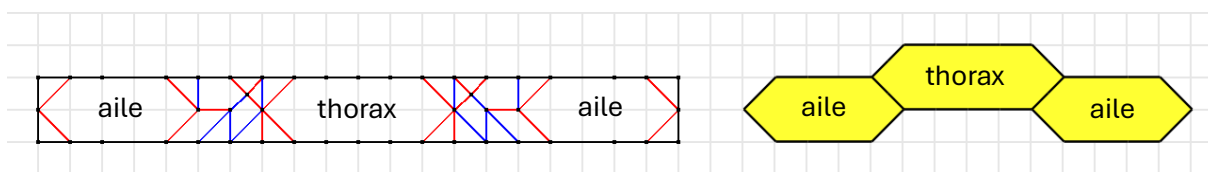


Figure 52. Illustration de la structure nécessaire pour implémenter la pointe supplémentaire sur les grandes ailes. À droite se trouve l'illustration de la version pliée de cette structure. Figure réalisée par l'auteur.

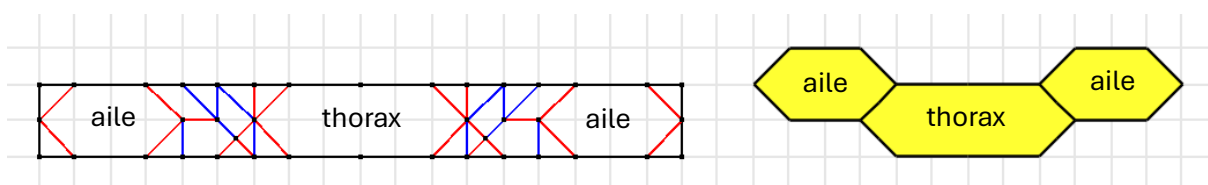


Figure 53. Illustration de la structure nécessaire pour implémenter la pointe supplémentaire sur les petites ailes. À droite se trouve l'illustration de la version pliée de cette structure. Figure réalisée par l'auteur.

En plus de l'implémentation de la pointe supplémentaire sur l'aile, les structures montrées dans **Figure 52** et **Figure 53** ont d'autres avantages : en premier, grâce à elles, les grandes ailes (**Figure 52**) se déplacent d'une unité vers le bas, ce qui positionne la pointe ajoutée à l'extrémité inférieure de la moitié supérieure du thorax. Pour les petites ailes (**Figure 53**), exactement le contraire a été atteint en reflétant la structure des grandes ailes le long d'un axe horizontal. En faisant ceci, les petites ailes ont été déplacées vers l'extrémité supérieure de la moitié inférieure du thorax. Ce déplacement des ailes contribue à l'authenticité de l'abeille : comme visible dans **Figure 29** (p. 28), les deux paires d'ailes (grande et petite aile sur chaque côté du corps) s'attachent au même endroit sur le thorax sur leur côté correspondant du corps. Comme la partie du thorax visible en **Figure 52** se trouvera juste au-dessus de la partie visible en **Figure 53**, les grandes et petites ailes se superposeront. Ceci a comme conséquence que les pointes ajoutées sur les grandes et petites ailes (là où elles s'attachent au corps) se trouveront

exactement l'une au-dessus de l'autre. La visualisation de ce phénomène est montrée ci-dessous :

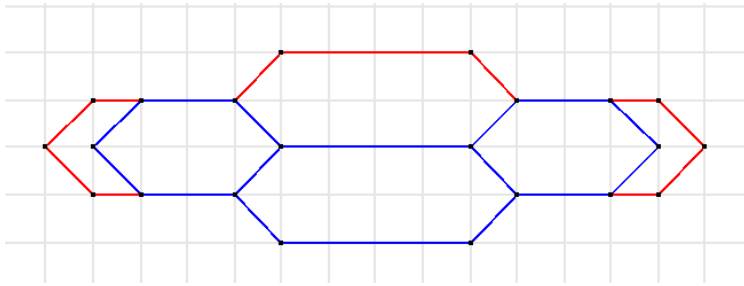


Figure 54. Visualisation de la superposition des ailes et de leurs pointes ajoutées. En rouge : la partie supérieure du thorax de laquelle les grandes ailes proviennent et la partie des grandes ailes qui n'est pas recouverte des petites ailes. En bleu : la partie inférieure du thorax de laquelle les petites ailes proviennent et les petites ailes elles-mêmes. Pour mieux visualiser la superposition des ailes, les petites ailes ont été posées sur les grandes, cependant, le contraire est aussi possible. Figure réalisée par l'auteur.

Comme dernière étape du design du canevas de plis des ailes, ces structures, qui n'ont jusqu'à présent existé que sur un *level shifter* d'une seule couche de papier, doivent être implémentées dans les *level shifters* montrés en **Figure 50** pour les grandes ailes et en **Figure 51** pour les petites. Dans cette étape, il faut s'imaginer que les mêmes plis vont être pliés qu'en **Figure 52** et **Figure 53**, avec la seule différence de plier ces plis par plusieurs couches de papier en une fois.

Dans cette étape, la structure de **Figure 52** sera posée au milieu du *level shifter* de **Figure 50** et la même chose se passera pour celle de **Figure 53** au milieu du *level shifter* de **Figure 51**. Ceci est montré ci-dessous :

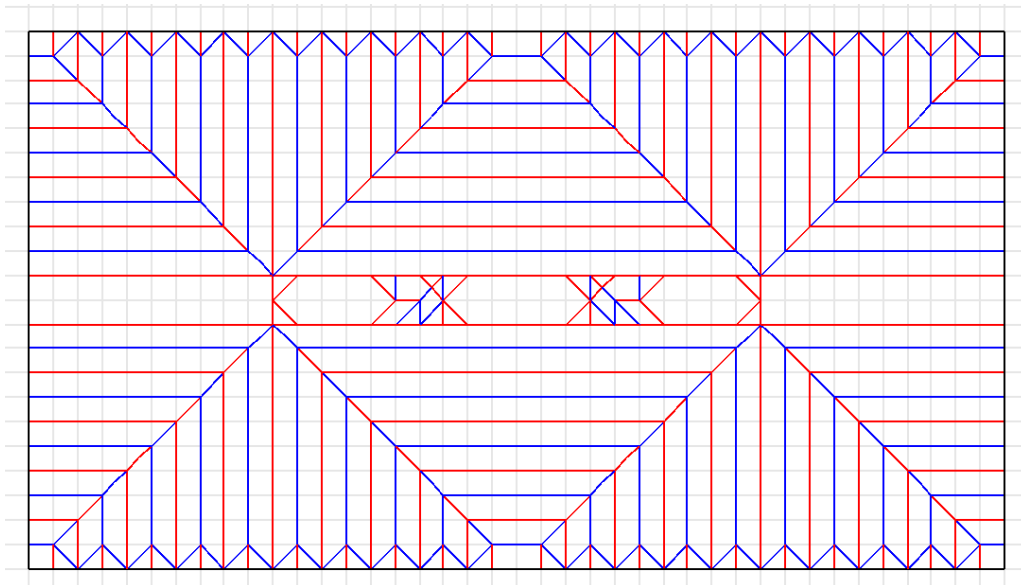


Figure 55. La structure de **Figure 52** posée dans le *level shifter* de **Figure 50**. Figure réalisée par l'auteur.

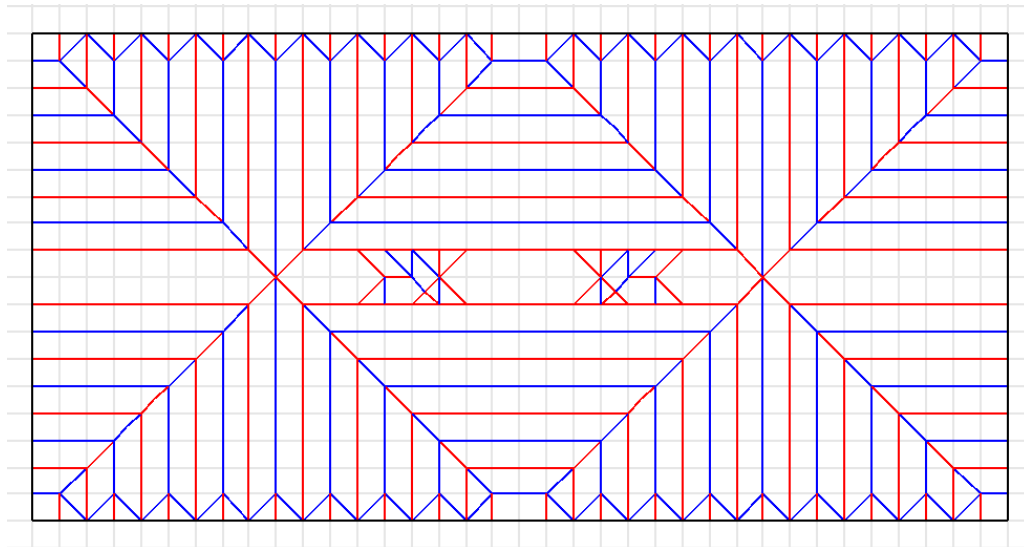


Figure 56. La structure de **Figure 53** posée dans le level shifter de **Figure 51**. Figure réalisée par l'auteur.

Après avoir fait ceci, il faut ajouter les plis par les autres couches du *level shifter*. Pour cette action, il y a une règle à respecter : après tous les plis horizontaux ou verticaux qui coupent la trajectoire des plis à ajouter, ces plis repartent dans la direction inversée, comme si on posait un miroir le long des plis coupants qui refléterait les plis à ajouter. De plus, après avoir reflété un pli existant, il faut changer l'orientation du pli ajouté après le pli existant : si le pli existant est un pli de montagne, le pli repartant est un pli de vallée. Si c'est l'inverse, le pli repartant est un pli de montagne. Les plis diagonaux coupant la trajectoire des plis à ajouter représentent un cas spécial : dans ce cas, il n'y a pas de réflexion du pli existant. Il continue sa trajectoire initiale. Cependant, lorsque ce pli croise le pli diagonal qui le coupe, il change aussi son orientation.

Les canevas de plis finaux des ailes sont montrés ci-dessous :

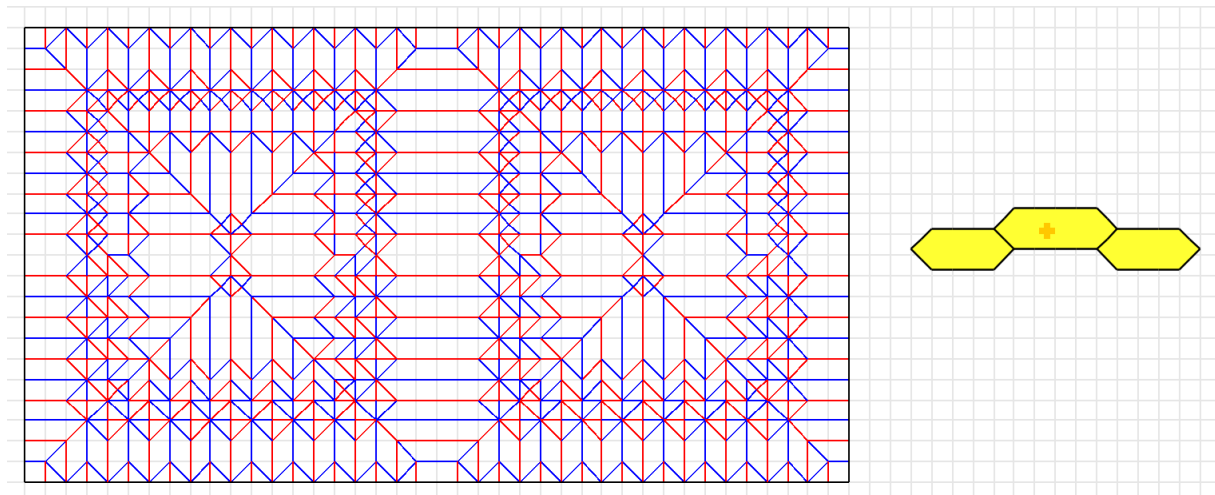


Figure 57. Canevas de plis final pour les grandes ailes. À droite, la version pliée de ce canevas de plis est montrée¹⁴⁷. Figure réalisée par l'auteur.

¹⁴⁷ Le fait que la version pliée de **Figure 57** montre la même chose que celle de **Figure 52** prouve que le transfert de la structure d'un level shifter d'une seule couche sur un level shifter de dix couches a bien fonctionné.

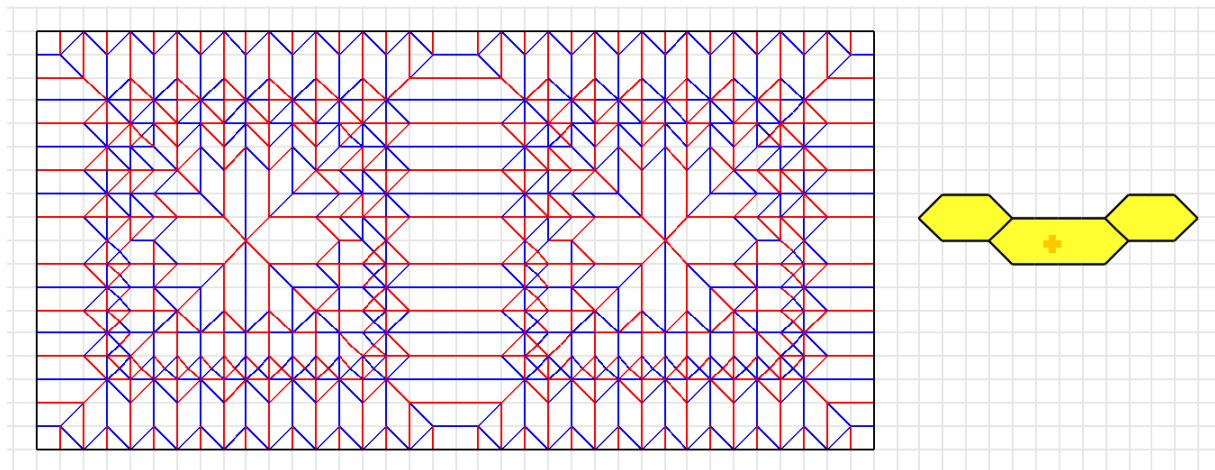


Figure 58. Canevas de plis final pour les petites ailes. À droite, la version pliée de ce canevas de plis est montrée¹⁴⁸. Figure réalisée par l'auteur.

7.4.3 Segmentation de l'abdomen

Dans **Figure 29** (p. 28), plusieurs segments abdominaux sont visibles, qui seront implémentés dans l'abeille pliée. Celle-ci doit avoir six segments abdominaux pour une abeille femelle. Pour implémenter ces segments, il faut agrandir l'abdomen à une longueur de 16 unités. La figure ci-dessous montre comment ce chiffre a été déterminé :

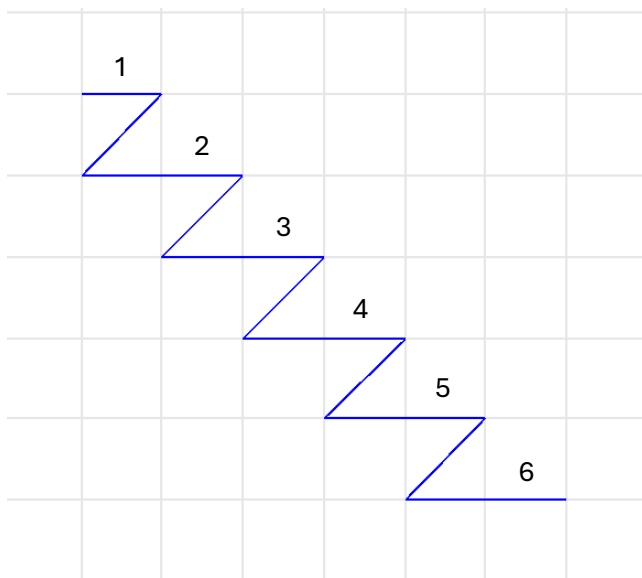


Figure 59. Visualisation pour déterminer le nombre d'unités abdominales nécessaires pour l'implémentation des segments. Une coupe transversale de l'abdomen segmenté est illustrée avec la numérotation des segments visibles dans l'abeille pliée. Toutes les unités avec un numéro seront visibles dans la base de l'abeille pliée et représenteront un segment, tandis que les unités sans numéro ne seront pas visibles, mais seront néanmoins nécessaires pour ajouter les segments. Figure réalisée par l'auteur.

En comptant toutes les unités dans **Figure 59** marquées par une ligne bleue, on arrive à un nombre de 16 unités. Ce chiffre représente la longueur de l'abdomen dans la base de l'abeille pliée.

¹⁴⁸ Le fait que la version pliée de **Figure 58** montre la même chose que celle de **Figure 53** prouve que le transfert de la structure d'un level shifter d'une seule couche sur un level shifter de huit couches a bien fonctionné.

Comme l'abdomen est agrandi, il faut agrandir le *level shifter* de celui-ci. Le nouveau *level shifter* abdominal sera celui montré ci-dessous :

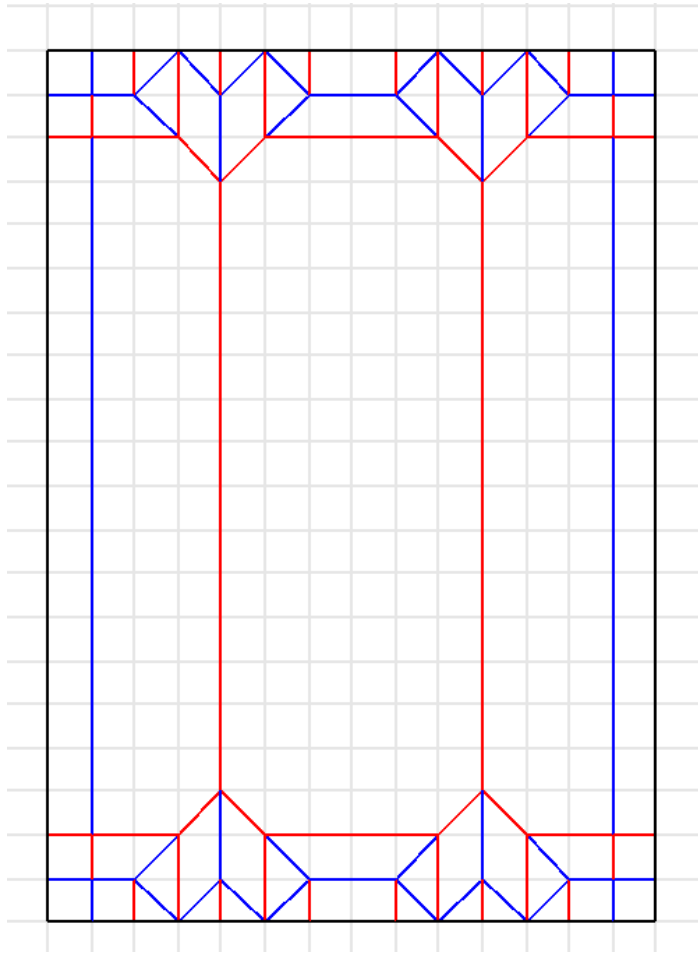


Figure 60. Le *level shifter* abdominal de la quatrième conception. Comparé au reste de la base, l'abdomen aura l'air disproportionné. Cependant, ceci est complètement plausible, car les segments n'y seront pas encore ajoutés. Figure réalisée par l'auteur.

7.4.4 Éléments sur la tête de l'abeille

L'abeille de la quatrième conception disposera de sept rabats sur la tête : deux yeux, deux antennes, deux mandibules et un ocelle. Ceci ne représente pas la réalité exacte, car une abeille possède trois ocelles (voir chapitre 5, p. 28). Comme les ocelles sont très petits, ils ne recevront qu'un seul rabat.

Cependant, en implémentant ces rabats, un problème apparaît : ces rabats se trouvent sur la surface de la tête tournée vers le bas. Ceci conduit à ce que les rabats ne soient pas visibles dans l'abeille pliée, car cette surface ne le sera pas non plus.

Pour résoudre ce problème, il existe une solution simple : ajouter un deuxième *level shifter* de tête, le long duquel les rabats des éléments de la tête seront implémentés.

Cette action nous donne le canevas de plis suivant pour les *level shifters* de la tête :

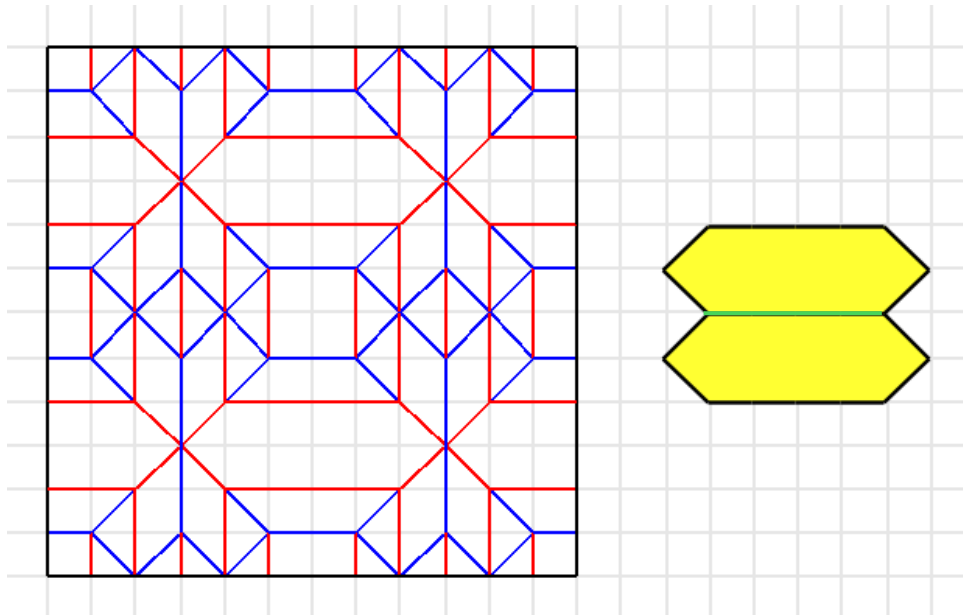


Figure 61. Structure des *level shifters* de la tête avec deux *level shifters* ajoutés l'un sur l'autre. Les rabats ajoutés à la tête seront implémentés à l'extrémité supérieure de cette structure. La ligne verte dans la version pliée montre l'endroit auquel il faut ajouter un pli de vallée¹⁴⁹. Figure réalisée par l'auteur.

En ajoutant un pli de vallée le long de la ligne verte dans la version pliée dans **Figure 61**¹⁴⁹, les deux *level shifters* se superposeront et les rabats des éléments de la tête, qui seront ajoutés à l'extrémité supérieure du canevas de plis dans **Figure 61**, se trouveront sur la surface tournée vers le haut. Ceci signifie qu'elles seront visibles dans la version pliée de l'abeille.

7.4.5 Disposition des éléments

Dans le but de rendre l'abeille pliée plus réaliste, une figure de bâton adaptée a été créée, dans laquelle quelques modifications ont été effectuées. Comparé à celle montrée dans **Figure 32** (p. 32), les actions suivantes ont été effectuées :

- L'ajout des rabats des mandibules et de celui des ocelles.
- Agrandissement de la tête d'une à quatre unités, comme un deuxième *level shifter* a été ajouté (qui sera plié sur le premier).
- Agrandissement du thorax de trois à quatre unités de longueur. Ceci est nécessaire pour l'implémentation des deux *level shifters* des ailes, dont chacun de ceux-ci possède une largeur de deux unités.
- Agrandissement de l'abdomen de sept à seize unités de longueur pour l'implémentation des segments abdominaux.
- Élongation des rabats suivants :
 - Petites ailes de trois à quatre unités.
 - Pattes avant de deux à quatre unités.
 - Pattes du milieu de trois à quatre unités.
 - Pattes arrière de quatre à six unités.

¹⁴⁹ Comme ce pli passera par plusieurs couches de papier, il faudra ajouter plusieurs plis pour avoir un pli de vallée le long de cette ligne.

Après avoir effectué les modifications listées ci-dessus, la figure de bâton adaptée est créée :

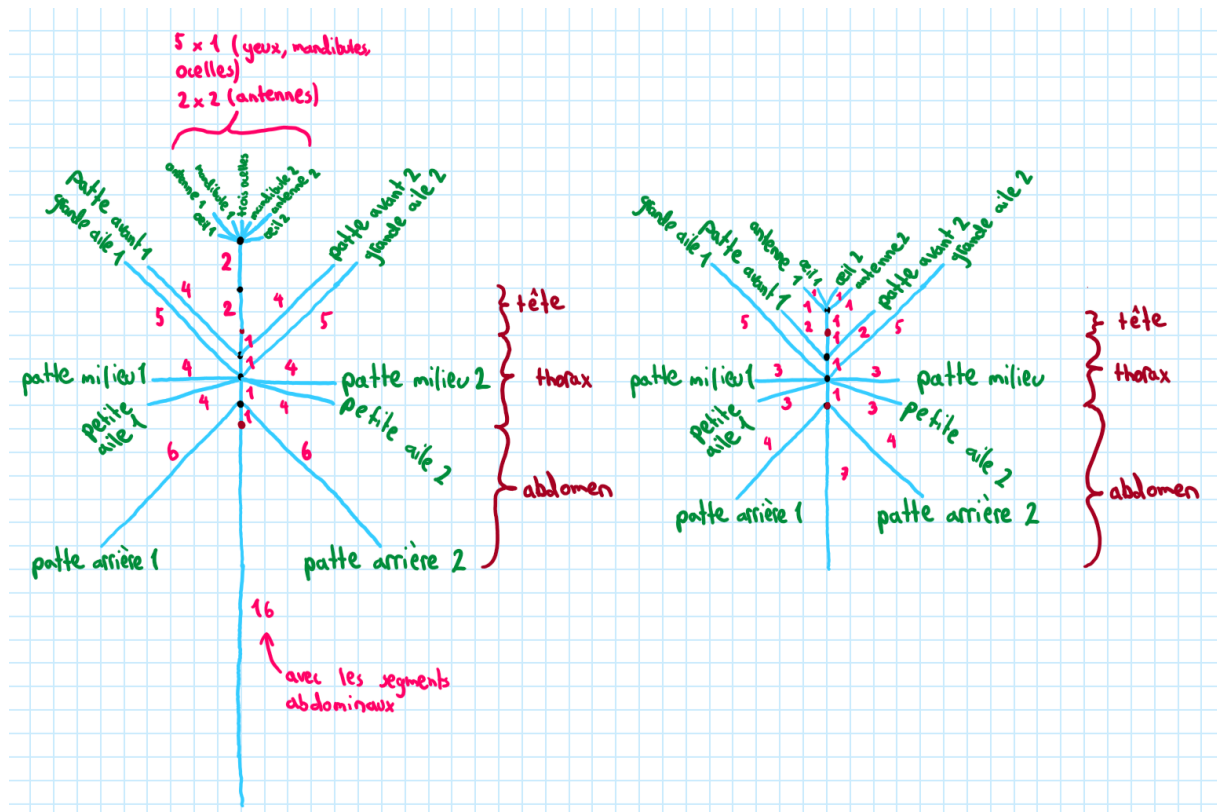


Figure 62. À gauche : figure de bâton adaptée. À droite : figure de bâton de la première conception (Figure 32, p. 32) pour comparer les deux. Figure réalisée par l'auteur.¹⁵⁰

¹⁵⁰ Figure dessinée à la main dans l'application OneNote.

De cette figure de bâton, la disposition des éléments est créée :

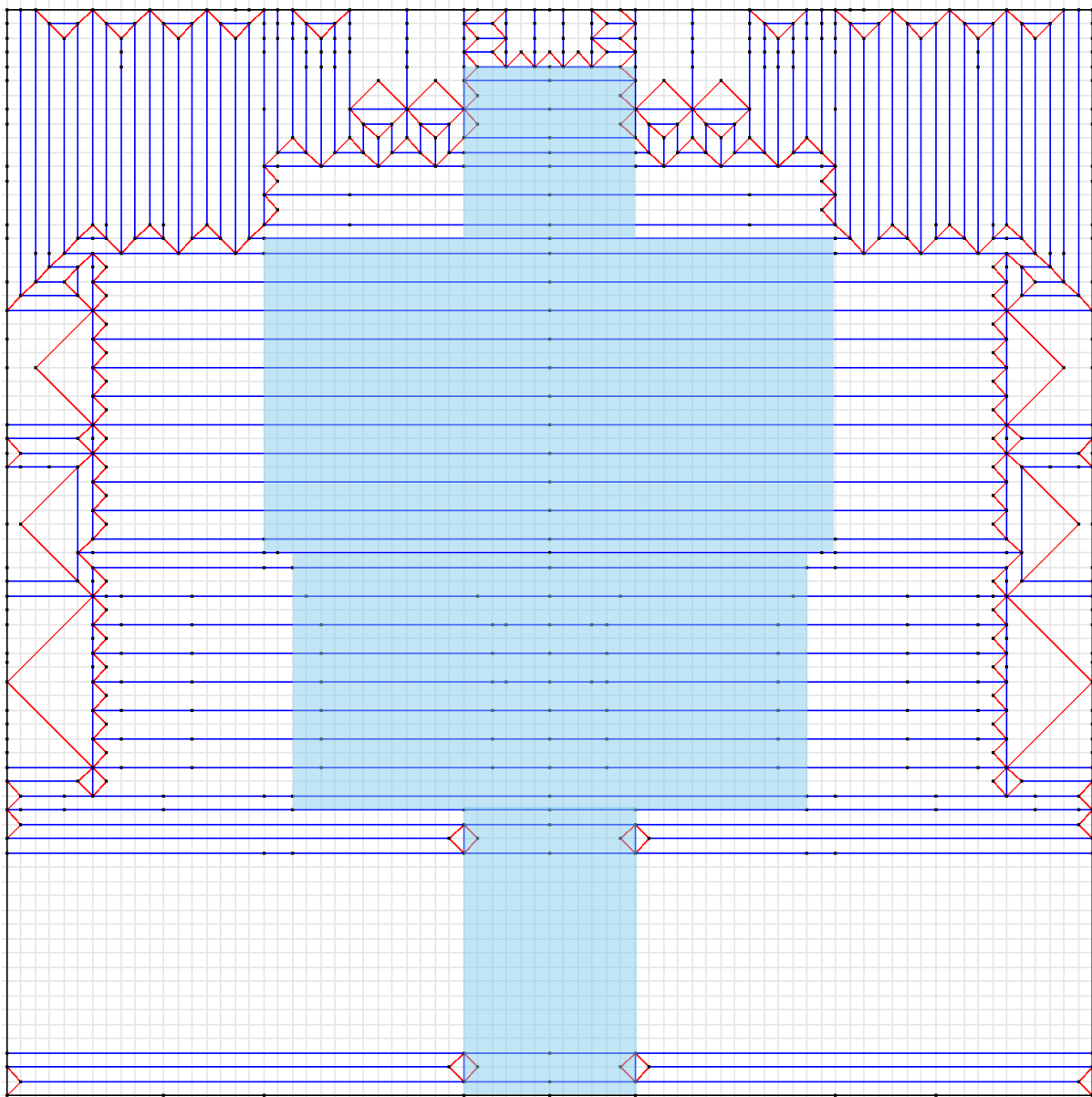


Figure 63. Disposition des éléments de la quatrième conception. La surface marquée en bleu représente les parties des rabats et rivières entre les rabats qui sont impérativement nécessaires pour implémenter les level shifters dans le canevas de plis. Figure réalisée par l'auteur.

La manière de disposer les éléments montrés dans **Figure 63** implique des désavantages : la surface marquée en bleu dans **Figure 63** est impérativement nécessaire dans la manière dont elle est montrée pour la séquence des *level shifters*. Comme cette surface a une longueur de 72 unités du côté supérieur au côté inférieur et comme l'abeille pliée doit avoir son origine dans une feuille de papier carrée, la grille, sur laquelle la disposition et le canevas de plis de la quatrième conception sont basés, doit avoir une taille d'au moins 72 × 72 unités. En plus, comme le nombre d'éléments implémentés sur la tête est impair (sept éléments), au moins un de ces éléments doit être implémenté au-dessus du *level shifter* supérieur de la tête sur l'axe de miroir pour garder la symétrie de la disposition entière. Ceci ajoute des unités supplémentaires et la grille minimale nécessaire s'agrandit encore plus.

Tout cela mène au fait que la disposition des éléments de la quatrième conception est peu efficace. Pour la quantité de rabats à implémenter, une grille d'une taille de plus de 70 × 70

unités ne serait pas nécessaire, mais l'ajout de longs *level shifters* pour l'abdomen et pour les ailes nécessite une grille plus longue. Comme la disposition doit s'effectuer sur une feuille de papier carré, elle devient aussi plus large. Ceci à l'effet qu'il y a plus d'espace vide à remplir par les rivières, comme c'est visible par le serpentement de celles-ci dans les quatre coins de la disposition dans **Figure 63**. **Figure 63** montre aussi que beaucoup de rabats des *level shifters* prennent plus de surface que nécessaire pour l'implémentation des *level shifters*. Ceci est fait pour remplir les surfaces vides dans l'intérieur du papier. Comme le serpentement des rivières ajoute des plis de crête supplémentaires, c'est préférable d'agrandir la surface des rabats des *level shifters* si cette possibilité existe, afin de ne pas complexifier le canevas de plis plus que nécessaire. Agrandir les rabats des *level shifters* n'exerce aucune influence sur les *level shifters* eux-mêmes.

La manière de disposer les éléments montrés dans **Figure 63** implique aussi un avantage : comme la largeur de la grille s'oriente à la longueur requise pour disposer les rabats et rivières des *level shifters* (afin d'obtenir une disposition carrée), il y a assez de place pour disposer les autres rabats autour de ceux des *level shifters*. Cela signifie qu'aucun rabat des pattes ou d'un élément sur la tête ne doit être implémenté à l'intérieur du papier, car il y a assez de place au bord de la disposition.

7.4.6 Canevas de plis

À base de la disposition des éléments, le canevas de plis de la quatrième conception est créé :

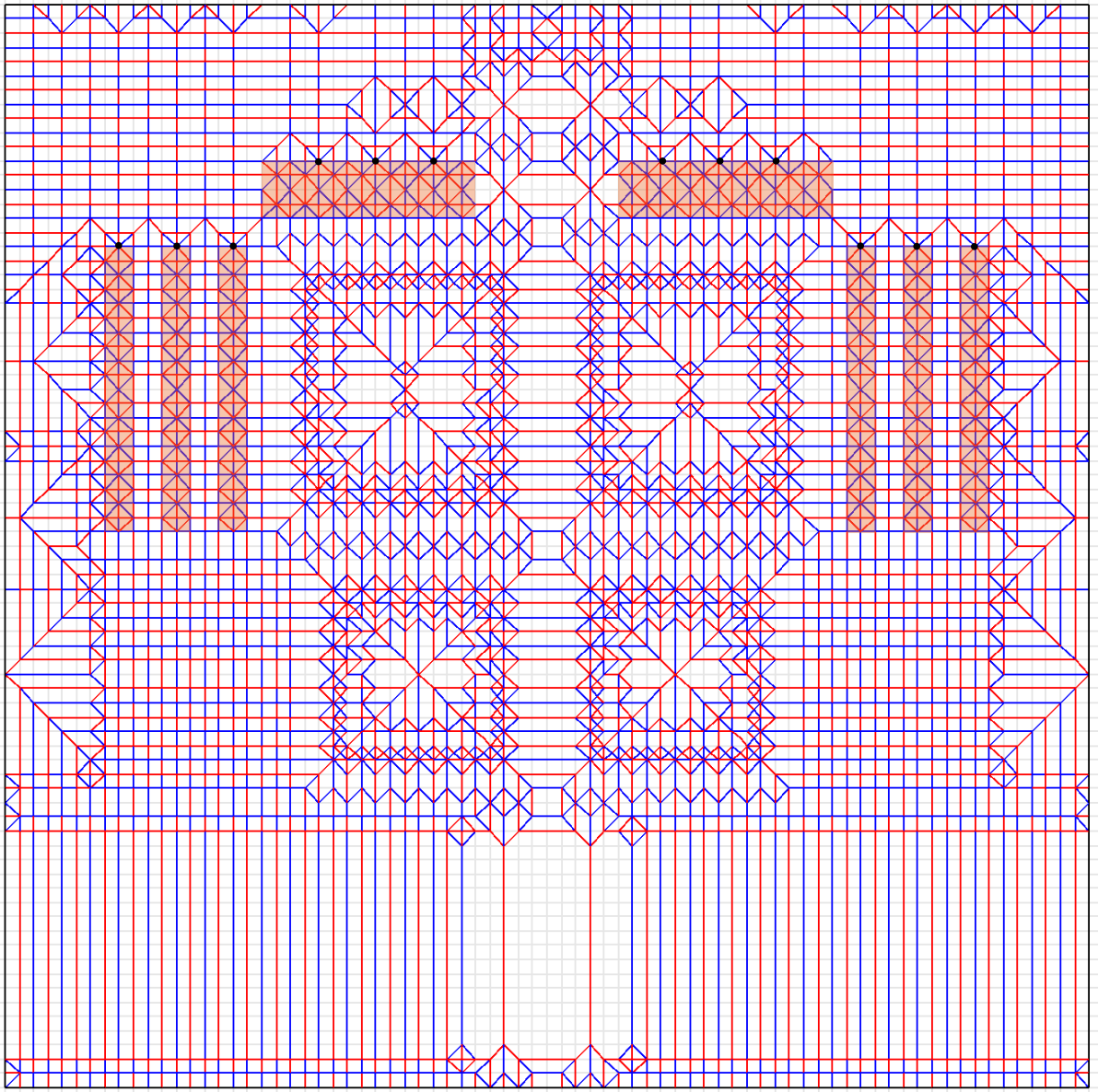


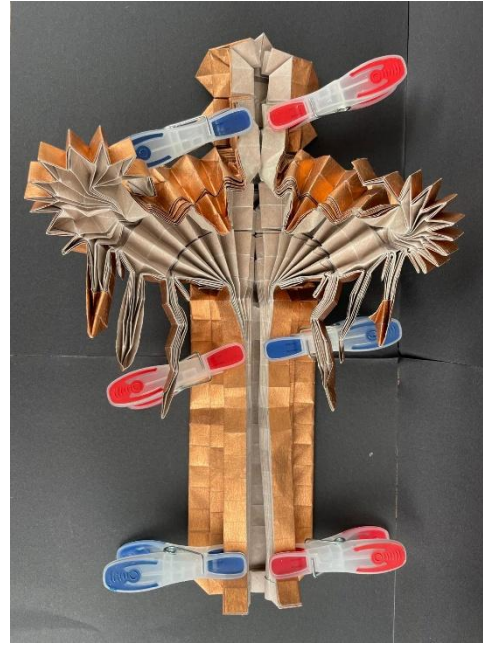
Figure 64. Canevas de plis de la quatrième conception. Figure réalisée par l'auteur.

Les plis dans les surfaces marquées en orange sont nécessaires pour que le modèle puisse être plié à plat. Sans ces plis additionnels, les sommets marqués en noir ne seraient pas pliables à plat (voir chapitre 3.2, p. 10).

7.4.7 Modèle plié

Sur les prochaines pages se trouve la version pliée de la quatrième conception.

Tableau 4. La quatrième conception pliée par l'auteur avec du papier de la taille d'environ 85 cm x 85 cm. La première ligne du tableau montre la base pliée et les autres lignes montrent l'abeille finale avec l'ajout des plis de détail et l'application de colle. Il est à noter que la base ne correspond pas entièrement au canevas de plis de **Figure 64**, car du papier a dû être redistribué afin de relocaliser des couches de papier d'endroits visibles au niveau de la tête vers des endroits moins visibles à l'intérieur du corps de l'abeille. Cependant, cela ne change rien à la forme du modèle reçue. Il est également à noter que malgré l'implémentation des rabats des mandibules, celles-ci ne sont pas visibles dans l'abeille finale. Comme la tête était plutôt compliquée à modeler, la décision a été prise de ne pas montrer les mandibules pour que la tête entière soit plus reconnaissable. Le tableau continue sur la prochaine page. Photos créées par l'auteur.





8 Conclusion

Le présent travail montre qu'avec assez de temps à disposition et avec un plan détaillé, il est possible de créer une multitude de modèles d'origami, partant d'une seule feuille de papier et sans couper dans celle-ci. Peu de limitations existent concernant le réalisme d'un modèle d'origami.

Cela ne veut pas dire qu'on ne rencontrait aucun problème en créant des nouveaux modèles d'origami. Dans la partie pratique du présent travail, plusieurs défis ont dû être résolus et cela n'était parfois que possible en trouvant des compromis. Un exemple d'un tel compromis est la grande quantité de papier cachée à l'intérieur de l'abeille de la quatrième conception, causée par l'inefficacité de sa disposition des éléments.

Bien que des méthodes mathématiques et précises aient été appliquées pour la création des conceptions présentées dans ce travail, notons que ces conceptions contiennent toujours des aspects subjectifs et approximatifs. A titre d'exemple, citons les longueurs des différents rabats de l'abeille pliée. Ces longueurs, qui restent approximatifs, dépendent de la perception entièrement subjective du créateur concernant le corps d'une abeille. Les proportions, calquées sur une grille prédéfinie, contribuent également à l'impossibilité d'un modèle d'origami de reprendre les longueurs exactes.

9 Bibliographie

- Abrashi1, A. (s.d.). *Axial creases*. abrashiorigami.com. <https://abrashiorigami.com/axial-creases/>. Consulté le 12.12.2025
- Abrashi2, A. (s.d.). *Can central flaps be free?*. abrashiorigami.com. <https://abrashiorigami.com/can-central-flaps-be-free/>. Consulté le 12.12.2025
- Abrashi3, A. (s.d.). *Level shifters*. abrashiorigami.com. <https://abrashiorigami.com/level-shifters/>. Consulté le 12.12.2025
- Abrashi4, A. (s.d.). *Maekawa-Justin and Kawasaki-Justin theorems*. abrashiorigami.com. <https://abrashiorigami.com/maekawa-justin-and-kawasaki-justin-theorems/>. Consulté le 12.12.2025
- Abrashi5, A. (s.d.). *Ridge crease*. abrashiorigami.com. <https://abrashiorigami.com/ridge-crease/>. Consulté le 12.12.2025
- Abrashi6, A. (s.d.). *Valley and mountain fold*. abrashiorigami.com. <https://abrashiorigami.com/valley-and-mountain-fold/>. Consulté le 12.12.2025
- Abrashi7, A. (s.d.). *Why is central fold opening so popular?*. abrashiorigami.com. <https://abrashiorigami.com/why-is-central-fold-opening-so-popular/>. Consulté le 12.12.2025
- AbrashiOrigami. (2020). *Episode 4 – Meakwawa’s and Kawasaki’s theorems (Origami polygon Packing method – box pleating)*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=JQllQuVUkrA>. Consulté le 12.12.2025
- AbrashiOrigami. (2021). *Episode 5 – Hinge crease and flat-foldability (ORIGAMI Polygon Packing method - box pleating)*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=u9rw9hOz2-0>. Consulté le 12.12.2025
- Aperture. (2021). *Origami: The Art of Paper Folding*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=-Q6QZj02dqk>. Consulté le 12.12.2025
- Ball, P. (2013). *Better origami using nature and maths*. BBC. <https://www.bbc.com/future/article/20130510-nature-maths-better-origami>. Consulté le 12.12.2025
- DeFranco, E. (2022). *Earwigs’ Complex Origami Wing-Fold*. asknature.org. <https://asknature.org/strategy/earwigs-complex-origami-wing-fold/>. Consulté le 12.12.2025
- Hunter, P. (2015). *Nature's origami: Understanding folding helps to analyze the self-structuring of molecules, organs and surfaces*. EMBO reports. <https://www.embopress.org/doi/ful/10.15252/embr.201541390>. Consulté le 12.12.2025
- Lang, R. (2011a). *Google’s Doodle: Akira Yoshizawa*. langorigami.com. <https://langorigami.com/article/googles-doodle-akira-yoshizawa/>. Consulté le 12.12.2025
- Lang, R.J. (2011b). *Origami Design Secrets. Mathematical Methods for an Ancient Art. 2nd ed.* CRC Press/Taylor & Francis Group
- Les Dorloteurs d’Abeilles. (2022). *Quelles sont les différentes parties du corps d’une abeille ?*. lesdorloteurs.fr. <https://www.lesdorloteurs.fr/le-corps-de-labeille/>. Consulté le 12.12.2025
- Oriedita. (s.d.). *Orihime*. oriedita.github.io. <https://oriedita.github.io/orihime.html>. Consulté le 12.12.2025

- Ralevski, A. (2020). *Folding Improves Flexibility and Rigidity*. asknature.org. <https://asknature.org/strategy/folding-improves-flexibility-and-rigidity/>. Consulté le 12.12.2025
- Robert C. Williams Museum of Papermaking. (s.d.). *History of Origami*. paper.gatech.edu. <https://paper.gatech.edu/kinetic-joy/history-origami>. Consulté le 12.12.2025
- Robinson, N. (2025). *History of origami*. britannica.com. <https://www.britannica.com/art/origami/History-of-origami>. Consulté le 12.12.2025
- SRF Wissen. (2020). *Origami – die Faltkunst erobert die Forschung für Medizin und Luftfahrt | Einstein | SRF Wissen*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=WSm4b6XTNuQ>. Consulté le 12.12.2025
- TED. (2008). *The math and magic of origami*. YouTube. <https://youtu.be/NYKcOFQCeno>. Consulté le 12.12.2025
- The Plant Psychologist. (2021a). *Origami design class lesson 4.1 | Bp fundamentals*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=PzkAL2Dng20>. Consulté le 12.12.2025
- The Plant Psychologist. (2021b). *Origami Design Class lesson 4.2 | Bp packing walkthrough*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=nulFd4Hzoc8>. Consulté le 12.12.2025
- The Plant Psychologist. (2021c). *Origami Design Class Lesson 4.3 | Converting packing to cp / hw review*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=5pMxh01Dnqc>. Consulté le 12.12.2025
- The Plant Psychologist. (2021d). *Origami design class 5.4 | Incorporating level shifters*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=pNagY0LUGls>. Consulté le 12.12.2025
- The Plant Psychologist. (2023). *Drawing crease patterns made easy*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=Ry06uGeOTsQ>. Consulté le 12.12.2025
- UZ Brussel. (2024). *Dilatation par ballonnet avec pose de stents*. uzbrussel.be. https://www.uzbrussel.be/fr/web/vaatheelkunde/traitements/-/asset_publisher/FZCVAwGnfXks/content/ballondilatatie-met-stentplaatsing. Consulté le 12.12.2025
- Wikipedia. (2025a). *Friedrich Fröbel*. de.wikipedia.org. https://de.wikipedia.org/wiki/Friedrich_Fr%C3%B6bel. Consulté le 12.12.2025
- Wikipedia. (2025b). *Robert J. Lang*. en.wikipedia.org. https://en.wikipedia.org/wiki/Robert_J._Lang. Consulté le 12.12.2025
- WIRED. (2021). *Physicist Teaches Origami in 5 Levels of Difficulty | WIRED*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=boaqgdcMjmA>. Consulté le 12.12.2025
- Witham, S. (2022). *The Mathematics of Flat-Foldable Origami Twist Tessellations*. University of Canterbury. <https://static1.squarespace.com/static/5754f47fcf80a16bffa02c45/t/66836b37ea2b5810b829ca6c/1719888727421/The+Mathematics+of+Flat-Foldable+Origami+Twist+Tessellations.pdf>. Consulté le 12.12.2025
- Zapfl, D. (2023). *Origami Engineering: Die Kunst des Faltens in der Raumfahrt und Robotik*. lead-innovation.com. <https://www.lead-innovation.com/insights/blog/origami-engineering-auf-dem-vormarsch>. Consulté le 12.12.2025

10 Bibliographie d'images

- Abrashi5, A. (s.d.). *Ridge crease. Figure 3.* abrashiorigami.com. <https://abrashiorigami.com/ridge-crease/>. Consulté le 12.12.2025
- Abrashi8, A. (s.d.). *Axial creases. Figure 2.* abrashiorigami.com. <https://abrashiorigami.com/axial-creases/>. Consulté le 12.12.2025
- Abrashi9, A. (s.d.). *Axial creases. Figure 3.* abrashiorigami.com. <https://abrashiorigami.com/axial-creases/>. Consulté le 12.12.2025
- Abrashi10, A. (s.d.). *Level shifters. Figure 1.* abrashiorigami.com. <https://abrashiorigami.com/level-shifters/>. Consulté le 12.12.2025
- Abrashi11, A. (s.d.). *Valley and mountain fold. Figure 1.* abrashiorigami.com <https://abrashiorigami.com/valley-and-mountain-fold/>. Consulté le 12.12.2025
- Lagos, L. (2012). *Akira Yoshizawa maestro del origami japonés.* mundofili.blogspot.com. <https://mundofili.blogspot.com/2012/03/akira-yoshizawa-maestro-del-origami.html>. Consulté le 12.12.2025
- Lang, R. (s.d.). *Black Forest Cuckoo Clock, Opus 182.* langorigami.com. <https://langorigami.com/artwork/black-forest-cuckoo-clock-opus-182/>. Consulté le 12.12.2025
- Lang, R.J. (2011). *Origami Design Secrets. Mathematical Methods for an Ancient Art. 2nd ed.* CRC Press/Taylor & Francis Group
- Mes Abeilles. (s.d.). *Anatomie et biologie d'une abeille.* mesabeilles.fr. <https://mesabeilles.fr/les-abeilles/anatomie-et-biologie-dune-abeille>. Consulté le 12.12.2025
- Ralevski, A. (2020). *Folding Improves Flexibility and Rigidity. Hornbeam leaves folded as a bud, and fully formed showing their corrugated leaves.* asknature.org. <https://asknature.org/strategy/folding-improves-flexibility-and-rigidity/>. Consulté le 12.12.2025
- Rüegg, P. (2018). *Earwigs and the art of origami. The wing of the earwig is an ingenious origami. (Photograph: Jakob Faber / ETH Zurich).* ethz.ch. <https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2018/03/earwigs-and-the-art-of-origami.html>. Consulté le 12.12.2025
- Sandhana, L. (2013). *Engineers create origami-inspired solar array for space deployment. The 25-meter array will be deployed by a perimeter truss (Photo: BYU).* newatlas.com. <https://newatlas.com/origami-inspired-solar-array-space/30016/>. Consulté le 12.12.2025
- Shannon, M. (s.d.). *Neal Elias. The Last Waltz.* cfcorigami.com. <https://cfcorigami.com/creator/nealelias>. Consulté le 12.12.2025
- Stephan, A. (s.d.). *Miscellaneous CP Gadgets. A gadget that can be used on the same flap to introduce axial+3 creases.* Foldigami Studio. <https://aidenstephanorigami.weebly.com/miscellaneous-gadgets.html>. Consulté le 12.12.2025
- Ward, T. (2017). *Arts and Medicine: An Interview With Smithsonian Secretary Dr David Scorton. Origami-inspired coronary stent prototype by Zhong You and Kaori Kuribayashi-Shigetomi.* medscape.com. <https://www.medscape.com/viewarticle/878954>. Consulté le 12.12.2025
- Witham, S. (2022). *The Mathematics of Flat-Foldable Origami Twist Tessellations. Figure 12.* University of Canterbury.

<https://static1.squarespace.com/static/5754f47fcf80a16bffa02c45/t/66836b37ea2b5810b829ca6c/1719888727421/The+Mathematics+of+Flat-Foldable+Origami+Twist+Tessellations.pdf>. Consulté le 12.12.2025

11 Réflexion

Commençons cette réflexion par deux aspects positifs : premièrement, le présent travail de maturité m'a aidé à améliorer ma manière d'appréhender un projet créatif en le divisant en petites étapes. Il s'agissait ici de créer plusieurs conceptions afin de se rapprocher étape par étape de la conception finale, au lieu de commencer directement avec un modèle très complexe. Cette approche m'a permis de comprendre les faiblesses d'une conception et d'apporter des améliorations dans la conception suivante.

En outre, rédiger le présent travail de maturité en français m'a permis d'élargir mes compétences de rédaction dans cette langue, sachant que j'utilise principalement l'allemand dans ma vie quotidienne en dehors d'un contexte familial. Je suis fier d'avoir relevé ce défi !

Parmi les axes d'amélioration, je citerais l'absence de structuration de projet et de planning précis au démarrage de ce projet. Certains objectifs que je m'étais fixés se sont avérés non réalistes ! A titre d'exemple : j'avais prévu de créer une structure sur les ailes de l'abeille, pour bien représenter ses nervures. Une fois que j'ai commencé à planifier la quatrième conception, j'ai remarqué que cet objectif serait difficile à atteindre : je n'avais plus le temps ! Et finalement, j'ai dû me résoudre à ne pas implémenter cette structure. Une meilleure planification du projet m'aurait sans doute permis de définir des objectifs plus réalistes et d'éviter ces déconvenues.

Néanmoins, je tiens également à mentionner que cette souplesse dans la planification du projet m'a permis de m'adapter aux difficultés rencontrées et de revoir « au fil de l'eau » les ambitions du projet. C'était assez difficile pour moi de savoir ce qui était atteignable dans le cadre de ce travail, et c'était donc pratique de pouvoir garder une certaine flexibilité et de ne pas devoir me conformer à un plan rigide. En outre, cette flexibilité n'a pas impacté mon agenda.

Enfin, en créant le design de la troisième et quatrième conception sur Oriedita, je n'ai pas pris en considération certains décalages entre théorie et pratique avec l'outil Oriedita. J'ai dû effectivement changer plusieurs plis dans la version pliée de ces deux conceptions pour relocaliser des couches de papier, afin qu'il n'y ait pas trop de couches à un endroit visible, ou parce que certains plis étaient très compliqués à mettre en œuvre et me faisaient perdre beaucoup de temps. Je crois que cette nécessité de devoir changer des plis aurait pu être anticipée, au moins dans une certaine mesure, en cherchant d'autres solutions conceptionnelles de manière ponctuelle.

12 Annexe

Tableau 5. Nombre de publications par année qui contiennent le mot « origami » dans leur titre entre les années 1957 et 2025. Les publications ont été trouvées sur le site de la Swiss Library Service Platform¹⁵¹ (SLSP) le 10.08.2025. Pas montrées dans le diagramme sont une publication pour chacune des années 1830, 1890 et 1900. Le logiciel Zotero¹⁵² a été utilisé par l'auteur afin de créer la base de données. Une grande partie des doublons trouvés par le logiciel a été fusionnée, cependant, 147 doublons n'ont pas pu être fusionnés. Ces doublons ont été traités comme des valeurs séparées. N = 6976 publications. Diagramme créé par l'auteur.

»

¹⁵¹ Référence : www.swisscovery.slsp.ch

¹⁵² Référence : www.zotero.org