

MASTER SAR 1^{ÈRE} ANNÉE

2024 - 2025

Rapport de projet :

Conception et dimensionnement d'une pince robotique à trois
doigts flexibles

Auteurs :

Julien SAGNES

Minh NHUT NGUYEN

Responsable :

Faiz BEN AMAR

6 juin 2025

Résumé

Ce document présente la conception et le dimensionnement d'une pince robotique à trois doigts flexibles. Blablabla...

Table des matières

Résumé	1
I Introduction	3
I.1 Motivations et principes fondamentaux	3
I.2 Comportement et structure de la pince	3
I.3 Choix de l'actionneur et des câbles	4
II État de l'art	5
II.1 Préhenseurs souples	5
II.2 Actionnement par câbles	6
III Conception de la pince	9
III.1 Considérations mathématiques	9
III.2 Dessin sur SolidWorks	12

I Introduction

Dans l'industrialisation, la robotique collaborative, ou cobotique, est omniprésente. Elle vise à soulager l'être humain en prenant en charge les tâches pénibles, notamment à l'aide de préhenseurs conçus spécifiquement pour manipuler des charges de tailles et de poids variables, souvent associées à des tâches répétitives. [1]

Ce projet consiste à concevoir et dimensionner une pince robotique à trois doigts flexibles, conçue pour s'ouvrir et se refermer en s'adaptant à l'objet saisi. L'objectif est de réussir à attraper des fruits et légumes relativement légers, comme un poivron. Nous utiliserons *SolidWorks* pour modéliser le robot, et étudierons son élasticité par éléments finis via *SolidWorks Simulation*.

Elle sera ensuite fixé au bras robotique...

I.1 Motivations et principes fondamentaux

Dans notre cas, et comme souvent en robotique, les objets à manipuler ont une forme ou une position mal connue, et contrairement à une main humaine, les pinces robotiques manquent de retour tactile fiable. Pour cette raison, nous n'allons pas utiliser de retour haptique, mais plutôt de préhenseurs souples. Nous nous inspirons de la flexibilité des tentacules de pieuvre (voir figure I.1), ce qui permettra à la pince de s'adapter naturellement à la forme de divers fruits et légumes, sans nécessiter de capteurs ni de système de contrôle complexe, simplement grâce à la compliance mécanique.

La compliance désigne la capacité d'un robot à adapter la rigidité de ses mouvements en fonction des forces extérieures. Autrement dit, il ajuste naturellement sa posture pour bien épouser l'objet qu'il manipule. Dans ce projet, nous nous concentrons sur la compliance passive, où la structure mécanique du robot est suffisamment flexible pour se déformer sous l'effet d'une contrainte externe. Cette approche permet une préhension polyvalente et adaptable. [3]

Malgré ses avantages, cette flexibilité favorise le flambage sous de grandes forces d'actionnement et limite donc la charge maximale. Il faut donc établir un compromis sur la souplesse, afin d'assurer la flexibilité et la capacité à soutenir des charges raisonnables. [2]

I.2 Comportement et structure de la pince

La pince pourra adopter deux configurations distinctes : ouverte ou fermée. Elle sera haute de 10 cm en position ouverte et composée de 3 doigts identiques soumis à un encastrement rigide sur une base. Les doigts seront positionnés symétriquement autour du centre de la base, chacun séparé par un angle de 120° . Des câbles passeront de chaque côté des doigts et permettront de les contrôler. L'actionnement à câbles peut être localisé sur la base ou déporté à l'extérieur du système, il sera question d'effectuer une étude comparative des différentes solutions possibles.

La flexion de chaque doigt sera assurée par une force appliquée sur le câble situé du côté fléchisseur par l'utilisation d'un moteur, tandis que le retour à la position initiale se fera naturellement, cette dernière devant être la position d'équilibre lorsque le moteur n'exerce plus de couple. Il est donc crucial de dimensionner correctement les doigts et les câbles afin qu'ils conservent un comportement élastique et réversible, sans déformation permanente. C'est pourquoi nous utiliserons un matériau souple qui puisse se plier sans se casser, le TPU. Par la suite,



FIGURE I.1 – Inspiration du SpiRob pour les 3 doigts de notre pince [2]

nous étudierons les flexions, les contraintes maximales et le retour élastique afin de s'assurer de ne pas rentrer dans le modèle plastique.

Enfin, il sera essentiel de garantir autant que possible la répétabilité, un aspect souvent problématique dans le domaine de la robotique flexible, car la souplesse peut introduire des incertitudes sur la position exacte des doigts.

I.3 Choix de l'actionneur et des câbles

Nous devons choisir entre un moteur rotatif actionnant un tambour et un moteur linéaire. Si nous optons pour un moteur rotatif avec un tambour, il est crucial d'éviter que le câble ne s'enroule sur lui-même. Étant donné que la course du câble est calculée en fonction de la rotation du moteur, il est essentiel que le câble ne tourne pas sur lui-même pour éviter de fausser les résultats. Nous pourrions envisager une glissière pour guider l'enroulement du fil le long d'un axe, ou un mécanisme utilisant des engrenages et une vis sans fin pour maintenir la tension.

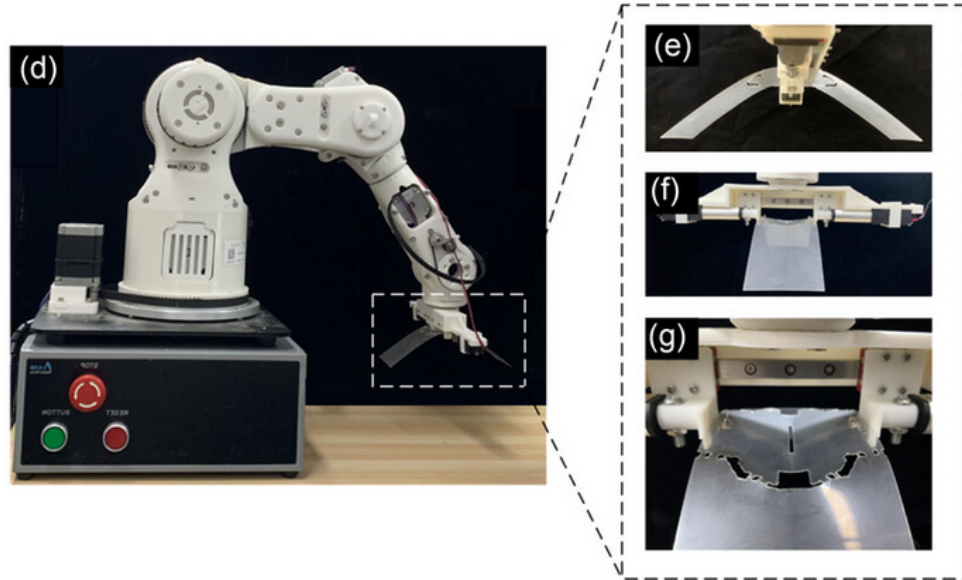
Dans les systèmes mécaniques utilisant des câbles ou des tendons, la tension est essentielle pour assurer une transmission efficace de la force ou du mouvement. Une tension insuffisante peut entraîner un glissement, un flambage et une perte de performance. Idéalement, la tension dans le câble doit être directement liée à la force produite par le moteur. Ainsi, la force appliquée par le moteur doit être transmise directement et efficacement au câble sans perte significative. C'est pourquoi nous étudierons l'idée d'utiliser des réducteurs d'engrenage avec un rapport de réduction de 6 à 10 pour éviter les pertes, de sorte que la tension dans le câble reflète celle du moteur.

Il est également question de choisir des fils optimaux pour la conception du robot. Si nous utilisons des fils de pêche, nous devons résoudre le problème de la souplesse du fil qui peut flamber lorsque le robot revient à sa position d'équilibre. Une solution pourrait être d'accompagner le mouvement avec le moteur pour limiter sa vitesse et contrôler en permanence la tension du câble. Nous pourrions également utiliser des câbles en acier pour éviter ce phénomène de flambage, mais dans ce cas, la solution du tambour serait inopérante.

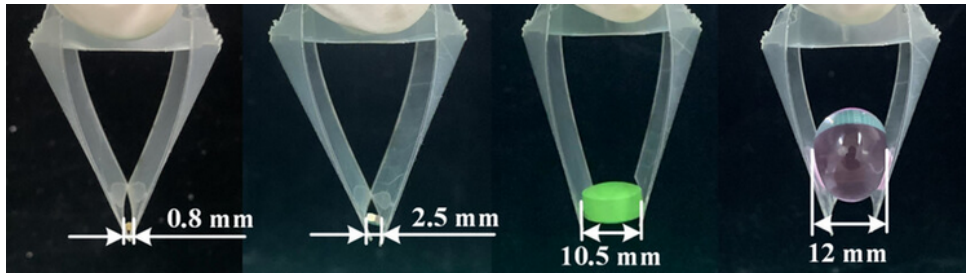
II État de l'art

II.1 Préhenseurs souples

Étude d'une pince en PVC



(a) Robot Anno V6-PLUS qui porte la pince [4]



(b) Exemples d'utilisation de la pince souple [4]

FIGURE II.1 – Illustration de l'étude sur la pince souple

Une étude a été menée afin de concevoir des préhenseurs souples en origami, permettant une adaptabilité de préhension pour de nombreux objets. La pince, qui n'est qu'une simple feuille de PVC (voir figure II.1.a.(e)), est commandée grâce à un moteur linéaire. Le moteur linéaire est fixé au bras robotique via un support (bracket). Ce moteur est relié à un poussoir qui coulisse sur une glissière. Lorsqu'on alimente le moteur linéaire, il pousse ou tire le poussoir de manière rectiligne. Le mouvement du poussoir est ainsi transmis à la pince flexible, qui s'ouvre ou se ferme selon la direction du mouvement. Afin de garantir la stabilité, un cadre de limitation empêche le poussoir de dépasser certaines positions, et le système de guidage symétrique (les deux extrémités du poussoir étant à la même hauteur) empêche la pince de se déformer de manière asymétrique, ce qui garantit une prise stable (voir figure II.1.a.(g)). [4].

Cette étude nous permet de voir l'adaptabilité remarquable que permettent les préhenseurs souples. En effet, comme nous pouvons le remarquer sur la figure II.1.b, la pince souple s'adapte parfaitement à chaque taille d'objet pour le même effort à son extrémité.

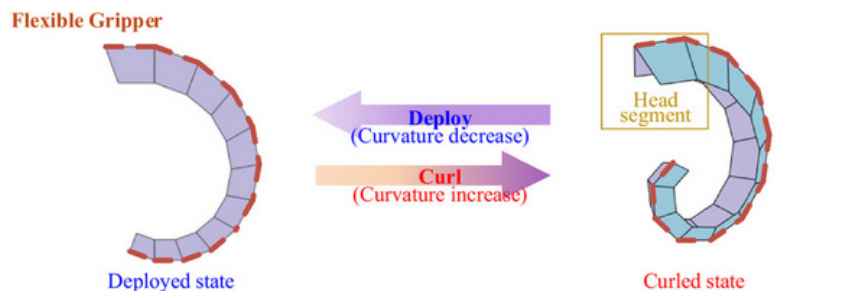


FIGURE II.2 – Pince à plusieurs positions stables [5]

Étude d'une pince flexible multi-stable à l'aide du kirigami

Cette étude [5] explore la conception d'une pince souple en s'appuyant sur les principes du kirigami, une technique dérivée de l'origami. Cette approche permet de générer des structures à multi-stabilité passive, c'est-à-dire capables de maintenir plusieurs configurations d'équilibre, notamment une configuration pince fermée et une autre pince ouverte (voir figure II.2). Ce changement de configuration s'opère grâce à une structure "trigger" (déclencheuse) capable de convertir une force longitudinale appliquée en un mouvement de déformation latérale des bras de la pince.

Néanmoins, l'approche présente aussi des limites, notamment en termes de force de préhension. La pince kirigami décrite utilise des actionneurs diélectriques ou des forces manuelles pour effectuer la transition de forme, ce qui restreint sa capacité à soulever des charges importantes. Cela la rend peu adaptée aux applications où une capacité de charge élevée est requise — comme c'est le cas dans notre projet où l'objectif est de manipuler des objets jusqu'à 5 kg. Enfin, bien que le système ne repose pas sur une action par câble comme notre pince inspirée du SpiRob, cette étude permet de souligner que les principes de déformation géométrique contrôlée et de multi-stabilité passive constituent une piste intéressante pour notre pince.

II.2 Actionnement par câbles

Étude de la spirale logarithmique avec le SpiRob

Les câbles sont utilisés pour activer le mouvement de curling (enroulement) et uncurling (déroulement) des SpiRobs, des robots souples en forme de spirale logarithmique inspirés des appendices biologiques (bras d'octopus, trompe d'éléphant).

Un ou plusieurs câbles (2 pour les robots 2D, 3 pour les robots 3D) passent à travers des trous percés dans les unités du robot. Une extrémité est fixée à l'unité la plus distale (pointe du robot) par un nœud de pêcheur, et l'autre est connectée à un moteur (voir figure II.3). La contraction des câbles enroule le robot en une spirale logarithmique, tandis que leur relâchement le ramène à sa position d'équilibre grâce à son élasticité. En effet, le TPU que constitue le robot permet ce comportement.

Les auteurs ajoutent également un amortissement pour limiter la vitesse du mouvement et assurer le contrôle de la tension des câbles. Une règle linéaire ($F_1^0 = -c_1 p + c_2 \alpha + c_0$) ajuste la force antagoniste au mouvement en fonction de la position de l'objet (p, α) en coordonnées polaires par rapport à la position de l'extrémité du robot, avec des coefficients expérimentaux

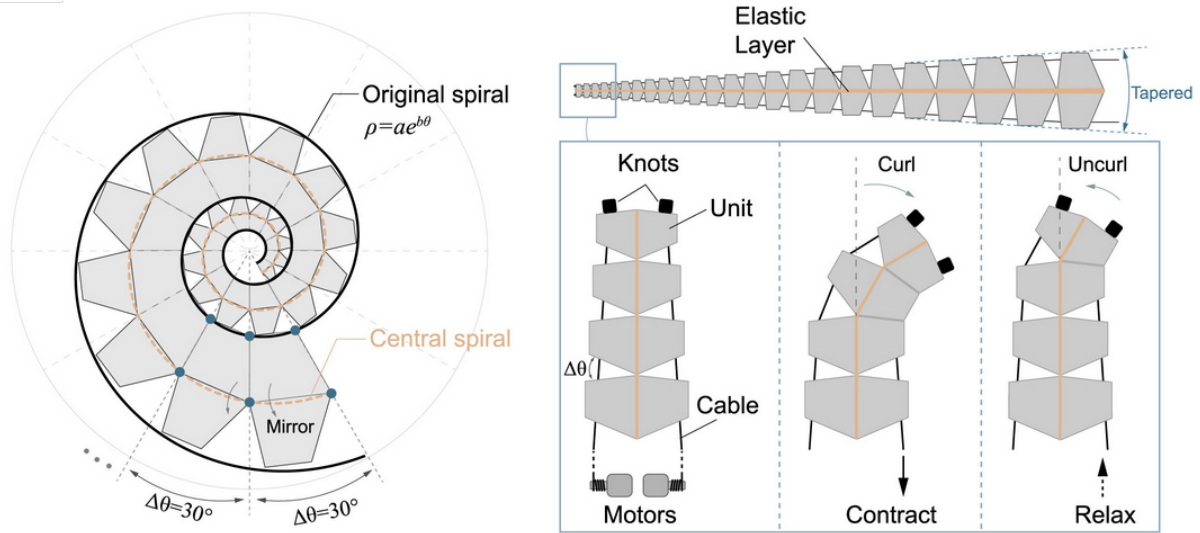


FIGURE II.3 – Spiral logarithmique du préhenseur [2]

($c_0 = 14, c_1 = 13, c_2 = 5$). Cela permet une saisie automatique avec un taux de succès de 94,4 %. En somme, Plus l'objet est éloigné, plus la force antagoniste à laquelle le robot est soumis est faible. [2]

On observe alors plusieurs problèmes rencontrés auxquels il faudra penser lors de la conception. Il s'agit de limiter les frottements entre les câbles et le corps du robot (une friction élevée peut causer des pertes d'énergie, des déformations non uniformes, ou un phénomène de flambage des fils), mais il faut aussi éviter d'avoir une couche élastique trop épaisse (au centre du robot), car cela augmenterait la force nécessaire pour enrouler le robot, rendant l'actionnement par câbles plus exigeant pour les moteurs qui utiliseraient alors davantage d'énergie.

Pour régler la friction des câbles, nous pouvons utiliser des câbles UHMWPE pour leur faible coefficient de frottement et leur résistance à l'usure. Quant à l'optimisation de la couche élastique, une épaisseur de couche élastique de 5 % est optimale d'après les tests effectués, assurant une bonne élasticité sans nécessiter une force excessive pour l'enroulement [2].

Étude des systèmes de transmissions et d'actionnements par câble pour des exosuits

L'étude [6] se concentre sur la conception d'exosuits à actionnement par câble pour l'assistance à la marche, une alternative aux exosquelettes rigides traditionnels. Les exosuits offrent une meilleure compatibilité cinématique avec les mouvements naturels de l'utilisateur, et sont moins chers, car ils utilisent moins d'actionneurs, notamment grâce à l'ACP (Analyse en Composantes Principales), méthode permettant d'effectuer uniquement les mouvements les plus importants.

Cette étude est intéressante pour le rôle que jouent les poulies. Ces dernières transmettent le mouvement et la force d'un actionneur (moteur dans le sac à dos) aux câbles connectés à des points d'ancrage près des articulations (hanche, genou, cheville). Leur fonction principale est de contrôler l'extension des câbles pour générer les mouvements nécessaires à l'assistance de la marche. En d'autres termes, les poulies convertissent la rotation du moteur en un déplacement linéaire des câbles, qui appliquent des forces aux points d'ancrage pour produire un couple d'assistance sur les articulations (voir figure II.4).

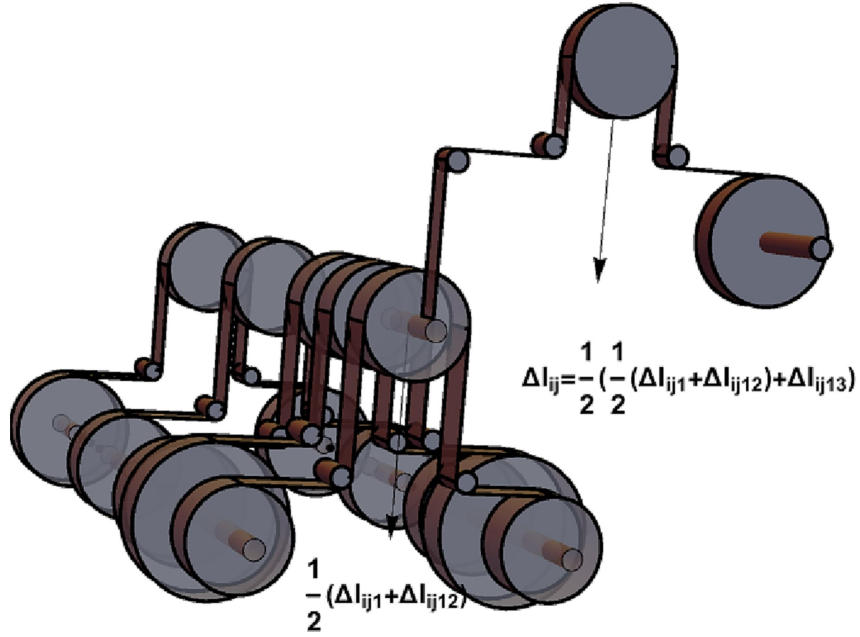


FIGURE II.4 – Système de poulies pour contrôler l'exosuit. Δl_{ijk} désigne la variation de longueur à l'instant i du câble qui, provenant de l'actionneur k , contribue au mouvement agissant sur l'articulation j [6]

Le principal inconvénient est que, si un seul actionneur ne suffit pas (par exemple, pour une précision accrue ou des besoins spécifiques), le système de transmission peut devenir très complexe et augmenter grandement les coûts de fabrication [6].

Dans notre cas, nous n'aurons bien qu'un seul moteur, donc nous pouvons considérer les poulies comme une solution fiable et réaliste.

III Conception de la pince

III.1 Considérations mathématiques

Spirale centrale

Sur la figure II.3, la spirale centrale (en orange) qui définit notre robot vérifie la relation :

$$r_c(\theta) = \frac{r(\theta) + r(\theta + 2\pi)}{2}, \quad \forall \theta \quad (1)$$

Cela signifie qu'on prend le rayon de la spirale du robot (en noire) au point θ ($r(\theta)$), et au point $\theta + 2\pi$ ($r(\theta + 2\pi)$), et on calcule leur moyenne. Cela donne un point « central » pour chaque angle θ , et en les reliant, on forme la spirale centrale. [2]

Choix et détermination des coefficients

Dans [2], les auteurs expliquent comment dessiner le SpiRob. Nous nous inspirons de sa forme pour concevoir nos doigts.

La spirale logarithmique est d'équation en coordonnées polaires (r, θ) :

$$r = ae^{b\theta}, \quad \text{avec } a > 0 \quad (2)$$

Sachant que a est un paramètre d'échelle (elle détermine la taille globale de la spirale). Tandis que b est un autre paramètre d'échelle qui détermine à quel point la spirale s'enroule (plus b est grand, plus la spirale est "serrée"), comme l'illustre la figure III.1.

Idéalement, nous aurons besoin que la spirale s'enroule complètement autour de l'objet pour le saisir, donc nous utiliserons un b relativement petit, a sera choisi de telle sorte que la spirale déroulée mesurera 10 cm, tandis que la spirale parcourra 1 tour complet.

Pour déterminer la valeur de a dans l'équation de la spirale logarithmique $r = a \cdot e^{b\theta}$, où la longueur totale déroulée L doit être égale à 100 mm, nous procédons comme suit :

La longueur totale L d'une spirale logarithmique est donnée par l'intégrale de l'arc de 0 à 2π :

$$L = \int_0^{\theta_0} \sqrt{r^2 + \left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2} d\theta, \text{ pour } \theta_0 = 2\pi \text{ (1 tour complet)}$$

Calculons la dérivée de r par rapport à θ :

$$\frac{dr}{d\theta} = \frac{d}{d\theta} (a \cdot e^{b\theta}) = a \cdot b \cdot e^{b\theta}$$

Substituons dans l'expression sous la racine :

$$r^2 = (a \cdot e^{b\theta})^2 = a^2 \cdot e^{2b\theta}$$

$$\left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2 = (a \cdot b \cdot e^{b\theta})^2 = a^2 \cdot b^2 \cdot e^{2b\theta}$$

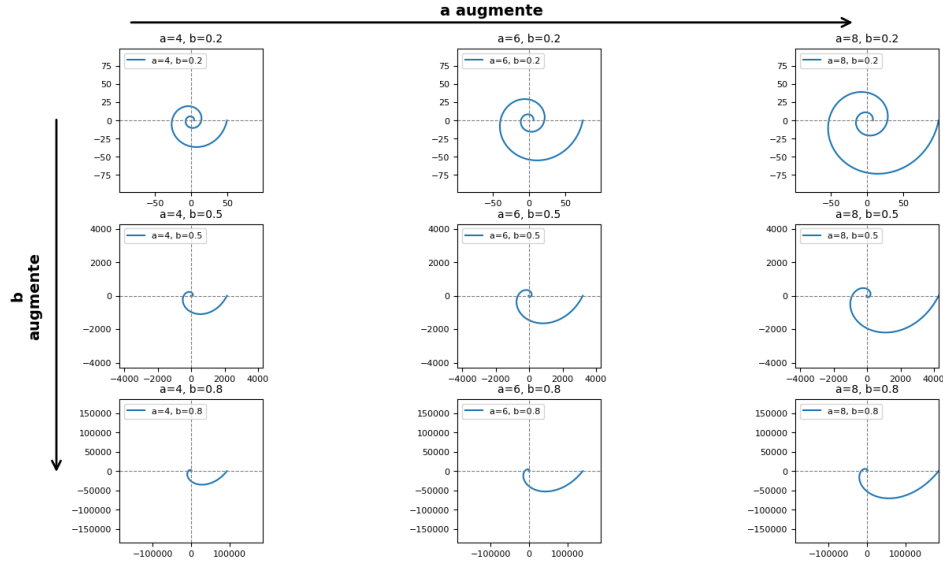


FIGURE III.1 – Influence des coefficients a et b sur le tracé de la spirale logarithmique

$$r^2 + \left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2 = a^2 e^{2b\theta} + a^2 b^2 e^{2b\theta} = a^2 e^{2b\theta} (1 + b^2)$$

Prenons la racine carrée :

$$\sqrt{r^2 + \left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2} = \sqrt{a^2 e^{2b\theta} (1 + b^2)} = a e^{b\theta} \sqrt{1 + b^2}$$

La longueur totale devient :

$$L = \int_0^{4\pi} a e^{b\theta} \sqrt{1 + b^2} d\theta = a \sqrt{1 + b^2} \int_0^{4\pi} e^{b\theta} d\theta$$

Calculons l'intégrale :

$$\int_0^{2\pi} e^{b\theta} d\theta = \left[\frac{1}{b} e^{b\theta} \right]_0^{2\pi} = \frac{1}{b} (e^{b \cdot 2\pi} - e^{b \cdot 0}) = \frac{1}{b} (e^{b \cdot 2\pi} - 1)$$

Ainsi, la longueur totale est :

$$L = a \sqrt{1 + b^2} \cdot \frac{1}{b} (e^{b \cdot 2\pi} - 1)$$

En isolant a :

$$a = \frac{L}{\sqrt{1 + b^2} \cdot \frac{1}{b} (e^{b \cdot 2\pi} - 1)} = \frac{Lb}{\sqrt{1 + b^2} (e^{b \cdot 2\pi} - 1)}$$

Applications numériques avec $b \in \{0.1, 0.2, 0.3, \dots, 1.0\}$ et $L = 100$ mm :

b	a [mm]
0.1	3.9557
0.2	1.7272
0.3	0.6783
0.4	0.2460
0.5	0.0837
0.6	0.0273
0.7	0.0087
0.8	0.0027
0.9	0.0008
1.0	0.0002

TABLE 1 – Valeurs de a calculées pour différentes valeurs de b avec $L = 100$ mm.

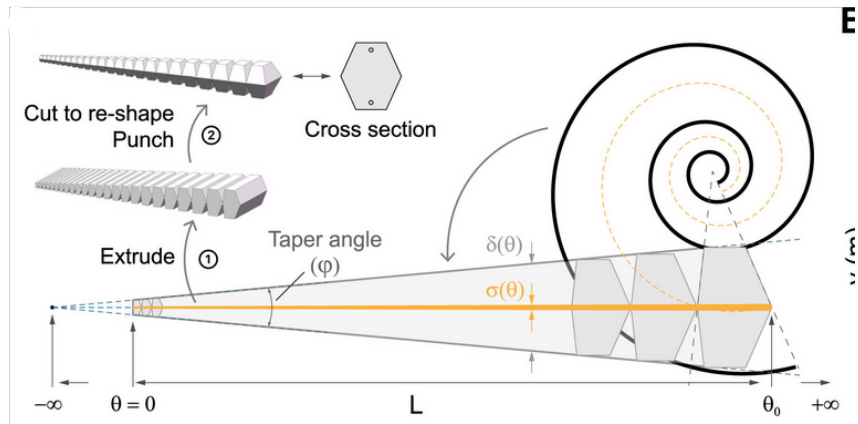


FIGURE III.2 – Construction du doigt en "dépliant" la spirale logarithmique [2]

Espacement

Enfin, il reste l'espace $\Delta\theta$ à choisir entre les unités de la figure II.3 pour définir entièrement la forme et la taille du doigt. [2] Or, si θ va de 0 à 2π , le nombre de segments est :

$$\text{Nombre de rainures} = N = \frac{\text{Angle total}}{\Delta\theta} = \frac{2\pi}{\Delta\theta} \quad (3)$$

Spirale déroulée

Pour dessiner le doigt sur SolidWorks, nous prenons exemple sur la figure III.2. Nous optons néanmoins pour un bossage extrudé à la place de la révolution. Il est désormais question de traduire le formalisme mathématique de la spirale logarithmique en côte des différentes rainures qui composent le doigt.

On donne l'angle de conicité :

$$\phi = 2 \arctan \left(\frac{\frac{1}{2}\delta(\theta)}{L(-\infty, \theta)} \right) = 2 \arctan \left(\frac{b(e^{2\pi b} - 1)}{\sqrt{b^2 + 1}(e^{2\pi b} + 1)} \right) \quad (4)$$

Avec :

- l'épaisseur du robot à l'angle θ : $\delta(\theta) = ae^{(b\theta+2\pi)} - ae^{b\theta}$
- la longueur du robot entre $[-\infty, \theta]$: $L(-\infty, \theta) = \int_{-\infty}^{\theta} \sqrt{r_c^2 + \left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2} d\theta = \frac{r_c(\theta)}{b}$.

Le fait que ϕ soit indépendant de θ signifie que la forme est effilée [2].

Enfin, le rapport entre les épaisseurs de deux rainures adjacentes β est donnée par :

$$\beta = \frac{\delta(\theta + \Delta\theta)}{\delta(\theta)} = e^{b\Delta\theta} \quad (5)$$

Cela signifie que la taille ou la géométrie d'une rainures peut être mise à l'échelle (agrandie ou réduite) par un facteur β par rapport à la rainure précédente. Ainsi, il suffit de concevoir une seule rainure de base, puis de l'ajuster avec β pour créer les rainures adjacentes.

III.2 Dessin sur SolidWorks

Dessin du doigt

Pour les raisons spécifiées plus tôt, nous prenons $b = 0.2$. Egalement, nous souhaitons que le nombre de rainures $N = 10$, alors, d'après (3), on a :

$$\Delta\theta = \frac{\text{Angle total}}{N} = \frac{2\pi}{10} \approx 0.628 \text{ rad} \approx 36^\circ$$

On calcule notre angle de conicité grâce à (4) :

$$\phi = 2 \arctan \left(\frac{0.2(e^{2\pi \cdot 0.2} - 1)}{\sqrt{0.2^2 + 1}(e^{2\pi \cdot 0.2} + 1)} \right) = 0.4656 \text{ rad} = 26.13^\circ$$

Cela nous permet de dessiner les lignes de construction de l'enveloppe de notre doigt. On ne dessine que d'un côté dans l'objectif de construire l'autre par symétrie.

Il nous reste maintenant à baisser d'un rapport β la rainure construite pour créer celle d'après... (je te laisse faire).

Calculons β grâce à (5) :

$$\beta = e^{0.2 \cdot 0.628} = 1.134$$

Création d'un matériau TPU

Simulation via *SolidWorks Simulation*

On crée une nouvelle étude statique. **Déplacements imposés** permet de définir les conditions limites (géométrie fixe = encastrement). **Chargements externes** permet d'appliquer des forces. Enfin, il faut créer un maillage puis appuyer sur exécuter.

Pour lancer plusieurs simulation, on utilise étude de conception. On rajoute une variable qu'on lie à la force et que l'on fait varier entre 1 N et 20 N, avant de créer un nouveau capteur sur le maximum de la contrainte de Von-Mises.

Bibliographie

- [1] “Cobotique : quels sont les différents types de préhenseurs utilisés dans l’industrie ?” consulté le 3 juin 2025. [Online]. Available : <https://www.universal-robots.com/fr/blog/cobotique-quels-sont-les-différents-types-de-préhenseurs-utilisés-dans-l-industrie/>
- [2] Z. Wang, N. M. Freris, and X. Wei, “SpiRobs : Logarithmic spiral-shaped robots for versatile grasping across scales,” *Device*, vol. 3, no. 4, Apr. 2025, publisher : Elsevier. [Online]. Available : [https://www.cell.com/device/abstract/S2666-9986\(24\)00603-3](https://www.cell.com/device/abstract/S2666-9986(24)00603-3)
- [3] “Gestion de la compliance (SoftBank Robotics),” Aug. 2016, consulté le 2 juin 2025. [Online]. Available : <https://projetromeo.wordpress.com/interaction-physique/gestion-de-la-compliance/>
- [4] J. Liu, Z. Chen, G. Wen, J. He, H. Wang, L. Xue, K. Long, and Y. M. Xie, “Origami Chomper-Based Flexible Gripper with Superior Gripping Performances,” *Advanced Intelligent Systems*, vol. 5, no. 10, p. 2300238, 2023, _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/aisy.202300238>. [Online]. Available : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aisy.202300238>
- [5] Z. Qi, X. Sun, and J. Xu, “A Kirigami Multi-Stable Flexible Gripper with Energy-Free Configurations Switching,” *Advanced intelligent systems*, vol. 6, no. 8, p. n/a, 2024, place : Weinheim Publisher : John Wiley & Sons, Inc.
- [6] Daniel Rodríguez-Jorge, Francisco Romero-Sánchez, David Rodríguez Salgado, and Alfonso González González, “Transmission and actuation systems in cable-driven, walking-assistance exosuits based on postural and dynamic synergies Transmission and actuation systems in cable-driven, walking-assistance exosuits based on postural and dynamic synergies,” *Alexandria engineering journal*, vol. 77, pp. 383–393, 2023, publisher : Elsevier.