



HAL
open science

Robot parallèle à 4 câbles ludique pour les activités pédagogiques

Vianney Papot, David Mawunyo Amedonouh, Jean-François Antoine, Gabriel Abba, Thibaut Raharijaona

► **To cite this version:**

Vianney Papot, David Mawunyo Amedonouh, Jean-François Antoine, Gabriel Abba, Thibaut Raharijaona. Robot parallèle à 4 câbles ludique pour les activités pédagogiques. 6èmes journées des Démonstrateurs en Automatique, Jun 2022, Angers, France. hal-03757305

HAL Id: hal-03757305

<https://hal.science/hal-03757305>

Submitted on 23 Aug 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Robot parallèle à 4 câbles ludique pour les activités pédagogiques

Vianney Papot¹, David Mawunyo Amedonouh¹, Jean-François Antoine¹, Gabriel Abba¹,
Thibaut Raharijaona¹

¹ Université de Lorraine, Arts et Metiers Institute of Technology, LCFC, HESAM Université, F-57070 Metz, France

vianney.papot@univ-lorraine.fr
david-mawunyo.amedonouh5@etu.univ-lorraine.fr
jean-francois.antoine@univ-lorraine.fr
gabriel.abba@univ-lorraine.fr
thibaut.raharijaona@univ-lorraine.fr

Résumé – Les robots parallèles à câbles (RPC) sont peu représentés dans l’enseignement supérieur contrairement aux robots sériels. Nous avons conçu un prototype de RPC dédié aux activités pédagogiques. Nous disposons actuellement d’une maquette de RPC manuel pour la découverte ludique de la robotique destinée aux collégiens et lycéens (Ludot1). Dans cette contribution, nous présentons la construction complète d’un prototype de RPC de faible dimension (1m³) actionné par quatre câbles (Ludot2). Ce robot sera utilisé dans les enseignements de la robotique sous forme de projets et de travaux pratiques.

Mots clés – robot parallèle à câbles, système mécatronique, modélisation et commande, système reconfigurable, suivi de trajectoire.

1. Introduction

La majorité des robots déployés dans l’industrie sont des robots sériels polyarticulés et parfois des robots parallèles tels que les robots Delta et positionneurs hexapodes. Les formations intégrant de la robotique favorisent l’apprentissage sur ces mêmes types de robots afin que les compétences des diplômés correspondent aux besoins du marché de l’emploi.

Nous pensons que le spectre des robots d’apprentissage devrait être plus large. D’abord, l’application de nouvelles connaissances sur des cas variés permet de renforcer les compétences en robotique. Aussi cela élargit la culture des étudiants en matière de solutions robotisées et incite à penser à des solutions moins conventionnelles. Par exemple, les RPC peuvent être une alternative aux ponts roulants. A notre connaissance, il n’existe pas de démonstrateurs de RPC de faible dimension (1m³) adaptés aux enseignements niveau licence-master. Les RPC commercialisés sont encombrants, coûteux et requiert un espace adapté pour être déployés. Des démonstrateurs moins contraignants sont utilisés en recherche [1] ou pour des activités pédagogiques tel que le robot à quatre câbles RC4 didastel qui permet de déplacer un mobile dans un plan vertical [2].

Dans cet article, nous proposons de détailler la construction d’un RPC de faible dimension. Nous souhaitons que le robot soit utilisé par des étudiants de niveau licence et master.

Les RPC sont une sous-catégorie des robots parallèles. Ils comportent au moins deux corps, le bâti et l’effecteur final, reliés par plusieurs chaînes cinématiques. Les premiers concepts sont énoncés dans les années 80 par Samuel Ernest LANDSBERG [3]. La possibilité de fixer les actionneurs sur le bâti fixe et l’utilisation de câble pour faire les liaisons entre ce dernier et la plateforme mobile permet d’avoir un système au poids et à l’encombrement réduit pour un grand volume de travail. Les skycams sont aujourd’hui l’une des utilisations les plus répandues et connues des RPC. Les applications sont repensées pour profiter de leurs avantages, dans

l'industrie et dans d'autres secteurs comme le médical [4]. De nombreux travaux rassemblent les bases de la modélisation et de la commande des RPC [5], [6] ainsi que leur conception [7].

Dans le cadre du projet INTERREG V Robotix Academy (2014-2020), le laboratoire Conception Fabrication et Commande à Metz a développé un RPC avec la thèse d'Atal Anil KUMAR [8]. Cette thèse porte sur la conception et la commande d'un robot parallèle à 4 câbles (voir Figure 1).



Figure 1 : RPC (5mx5mx3m) développé dans le cadre du projet Robotix Academy au cours de la Thèse de Atal Kumar soutenue en 2020. Le robot est composé de 4 câbles et les 4 moteurs sont embarqués sur la plateforme mobile. La plateforme pèse 24kg.

2. Conception du robot à câbles ludique

Rester sur un format de robot à 4 câbles permet de simplifier la phase de conception et de ne pas surcharger le système que l'on veut peu encombrant et léger. Il y a aussi un intérêt pédagogique lié à la modélisation puisqu'avec 4 câbles le système est sous-actionné. Pour des raisons de maintenance et de budget nous avons favorisé la fabrication des pièces en interne, en impression 3D principalement.

2.1 Maquette ludique Ludot1

Dans un premier temps nous avons conçu une maquette actionnée manuellement. L'un des objectifs du projet INTERREG V Robotix Academy était de proposer des activités ludiques liées à la robotique à un public jeune (collège/lycée). Nous avons donc décidé de faire un premier démonstrateur simplifié. La plateforme du robot est déplacée manuellement à l'aide de quatre poignées disposées sur des glissières verticales (voir Figure 2).

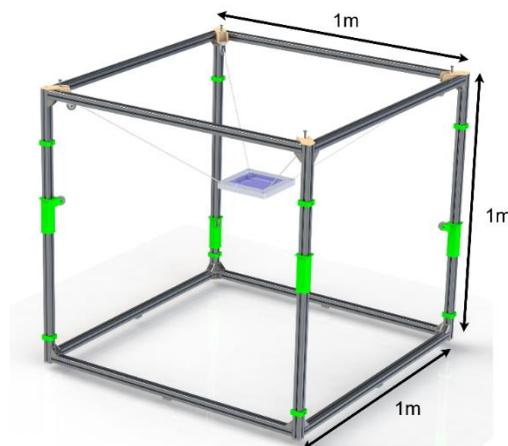


Figure 2 : CAO du démonstrateur Ludot1 manuel.
Des poignées sont en glissière sur les profilés verticaux et permettent d'actionner les câbles.

Depuis maintenant 1 an, nous animons un atelier pédagogique à l'occasion des visites de collèges et lycées à l'ENIM (voir Figure 3). L'objectif des activités autour de cette maquette est d'illustrer par des jeux la problématique des RPC et initier à la robotique plus globalement. Les jeux tournent autour du déplacement de la plateforme dans l'espace de travail. Elles permettent de souligner l'influence de la longueur de chaque câble sur le comportement en position et en orientation de la plateforme mobile. La difficulté est de synchroniser l'actionnement des câbles.



Figure 3 : Lycéens mosellans en activité sur le RPC manuel.

Le but de l'activité est de déplacer une charge d'un point A à un point B. L'activité permet d'illustrer l'influence de la longueur de chaque câbles sur la position et l'orientation de la plateforme et l'importance de synchroniser les mouvements des câbles.

Les activités pédagogiques consistent à déplacer des charges d'une zone à une autre avec différentes contraintes sur le temps, l'encombrement de la zone de travail ou encore la position des points d'attaches sur la plateforme. Nous sommes satisfaits des activités autour de ce démonstrateur car il génère toujours un engouement auprès du public.

2.2 Maquette pédagogique Ludot2

2.2.1 Modélisation et simulation

La condition de fermeture géométrique sur les câbles reliant la structure à l'effecteur terminal (voir Figure 4) permet d'obtenir l'expression du vecteur unitaire \mathbf{e}_i . On définit deux repères : l'un lié à la structure R_b et le deuxième lié à la plateforme R_p dont le centre coïncide avec le centre de gravité de la plateforme. Pour i allant de 1 à 4, l_i est le vecteur lié au $i^{\text{ème}}$ câble exprimé dans le repère R_b . Les points de connexion des câbles et de la structure sont nommés A_i . Les points de connexion des câbles à la plateforme sont nommés B_i .

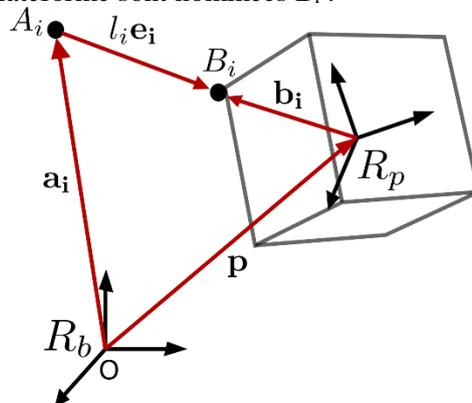


Figure 4 : Schéma de la fermeture de boucle i pour le robot à câbles

Le vecteur \mathbf{P} est le vecteur position du centre de gravité de la plateforme dans le repère R_b . On obtient ainsi l'équation (1) :

$$l_i \mathbf{e}_i = \mathbf{p} + Q\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i \quad (1)$$

$$l_i = \|\mathbf{p} + Q\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i\|_2 \quad (2)$$

Pour $i \in [1,4]$, \mathbf{a}_i désigne le vecteur position du point d'attache A_i dans R_b .

\mathbf{b}_i désigne le vecteur position du point d'attache B_i dans R_p . $\|\cdot\|_2$ est la norme euclidienne.

Q désigne la matrice de rotation donnant l'orientation du repère R_p lié à la plateforme par rapport au repère R_b de la structure. Pour un robot spatial à trois DDL grâce aux angles φ , θ et ψ qui sont les trois angles d'Euler successifs issus de la convention X-Y-Z des angles d'Euler, Q a pour expression :

$$Q(\varphi, \theta, \psi) = R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\varphi)$$

Pour retrouver le modèle géométrique directe il faut résoudre l'équation de fermeture géométrique. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel MATLAB. La fonction `fsolve` est utilisée pour la résolution numérique du problème. Il faut optimiser les longueurs de câbles pour une position donnée du centre de la plateforme étant donné que plusieurs poses sont possibles pour une seule position. La figure 5 montre un exemple de simulation :

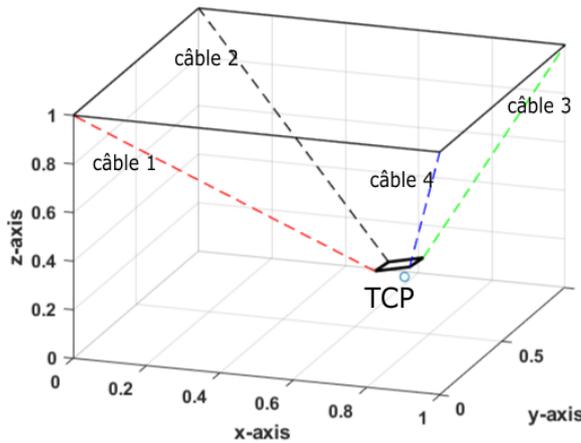


Figure 5 : Simulation réalisée sous MATLAB avec une structure de dimensions $1m \times 1m \times 1m$, Une plateforme de dimension $0.1m \times 0.1m \times 0.1m$ avec une masse de $0.5kg$. Le centre est positionné à $[0.75 ; 0.45 ; 0.25]$ dans R_b

Câble N°	Tension (N)	Longueur (m)
1	2.05	1.07
2	1.67	1.11
3	4.24	0.87
4	4.85	0.82

Tableau 1 : Valeurs numériques de la simulation effectuée

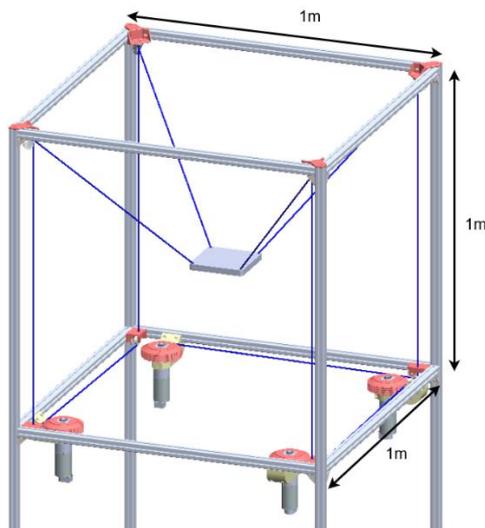
2.2.2 Description du dispositif

La structure de base (voir Figure 6A) est montée avec des profilés aluminium pour une dimension de $1m \times 1m \times 2m$. Elle est séparée en 2 espaces. Le 1er espace est la zone de travail de la plateforme et fait environ $1m \times 1m \times 1m$. Le deuxième espace, sous le premier, sert de logement

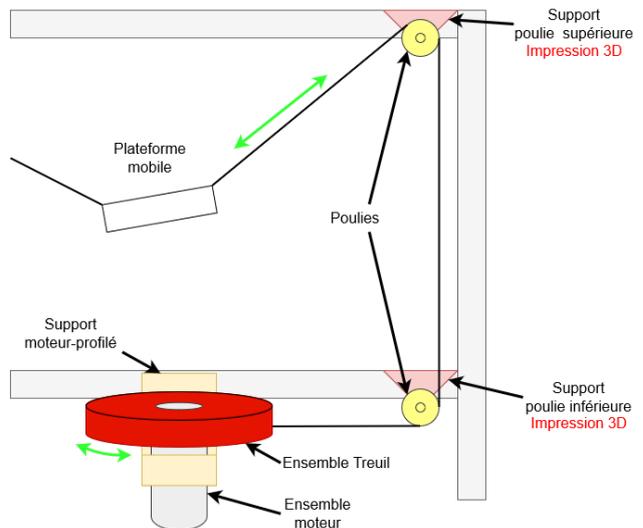
aux moteurs, à une partie du système d'entraînement, à l'alimentation pour encombrer le moins possible.

Pour l'entraînement des câbles, nous avons retenu un système de treuil entraîné par un moteur électrique (voir Figure 6B). Les moteurs sont fixés à la structure grâce à des supports adaptés aux profilés faits en impression 3D.

La transmission du mouvement de l'axe moteur au câble est assurée par un treuil sur lequel le câble s'enroule et se déroule. Le câble est ensuite guidé par 2 poulies jusqu'à son point connexion sur la plateforme. Une première poulie est montée sur un support fixe imprimé en 3D fixé à la structure dans le coin inférieur de l'espace de travail et il renvoie le câble vers le coin supérieur. La deuxième poulie est montée sur un support de roulette pivotante détournée lui-même monté sur un support en impression 3D dans le coin supérieur. Rajouter une mobilité à la poulie supérieure permet au câble d'être toujours dirigé directement vers son point d'attache sur la plateforme et simplifie la modélisation.



6A : CAO du RPC pédagogique



6B : Schéma actionnement des câbles

Figure 6 : Montage de l'ensemble treuil-moteur vue en perspective et en coupe. Pour l'actionnement des câbles, nous avons retenu une solution treuil et poulies.

Le choix des moteurs et le dimensionnement des treuils est une étape importante de la conception. Nous avons besoin d'estimer la tension maximum potentielle dans les câbles. A partir de la modélisation présentée dans la partie précédente, on estime que la tension maximale possible est 160 N pour lever une masse de 5 kg (plateforme + charge) à une hauteur de 0.9 mètre.

Nous avons arbitrairement défini le rayon du treuil à 62.5 mm. Cela revient à un couple utile d'au moins 10 N.m au niveau du moteur entraînant le treuil. La liaison entre l'axe du moteur et le treuil est assurée par un moyeu de serrage. Les treuils sont réalisés en impression 3D et pour éviter que les efforts appliqués sur le plastique ne soient trop grand, nous avons ajouté 2 renforts de serrage fait à partir d'une tôle d'acier découpée au jet d'eau et monté sur le treuil par 4 vis (voir Figure 7).

Le moyeu de serrage transmet la majorité du couple aux renforts qui eux le transmette au treuil par les vis et l'empreinte carré dans lesquelles ils sont logés. Le treuil est aussi doté d'une gorge dans laquelle le câble se loge pour éviter les problèmes d'enroulement et contrôler au mieux la variation de sa longueur.

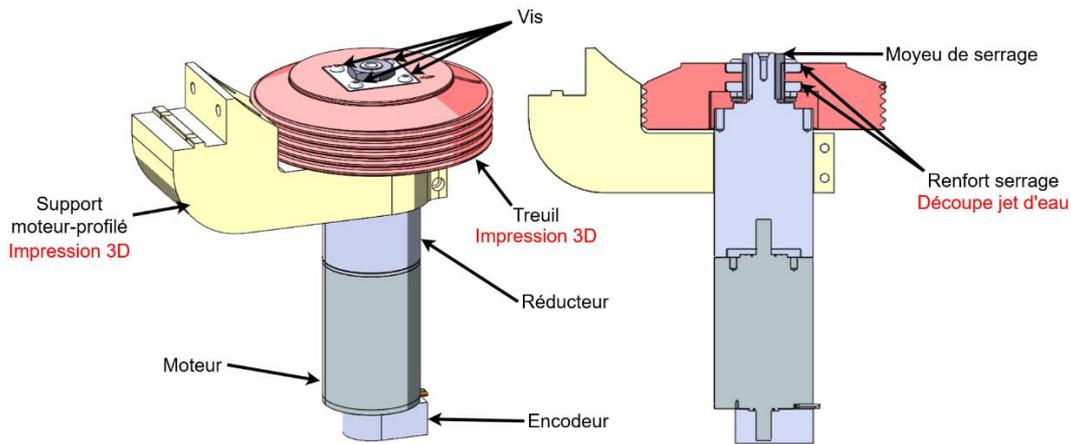


Figure 7 : Montage de l'ensemble treuil-moteur vue en perspective et en coupe
 L'ensemble moteur est fixé au bâti par le support moteur profilé. Le treuil est monté sur l'axe d'entraînement par un moyeu de serrage. Nous avons ajouté 2 plaques de renfort pour diminuer les contraintes directement appliquées au treuil plastique

Concernant le choix de la motorisation, nous avons retenu une combinaison moteur/réducteur/encodeur de chez Maxon Motor (ref. 687439). Cette ensemble fourni un couple de sortie de 13N.m suffisant au regard de nos précédentes estimations. Des cartes de contrôle sont assorties avec l'ensemble. Nous avons retenu les contrôleurs EPOS4 (ref. 520885) compatibles avec nos besoins et le logiciel Matlab.

Chaque moteur et encodeur sont connectés à un contrôleur (voir Figure 8). Les contrôleurs sont connectés entre eux via un bus CAN pour former un réseau CANopen. La commande est générée par un ordinateur sous Windows 10 via le programme MATLAB. Le PC communique avec le réseau d'EPOS en USB via le premier contrôleur du réseau. Une bibliothèque existe pour faire la communication avec les contrôleurs directement depuis MATLAB. D'autres logiciels et langages de programmation étaient possible mais MATLAB nous semblait être la meilleure solution pour la modélisation et la commande tout en étant un outil connu des élèves.

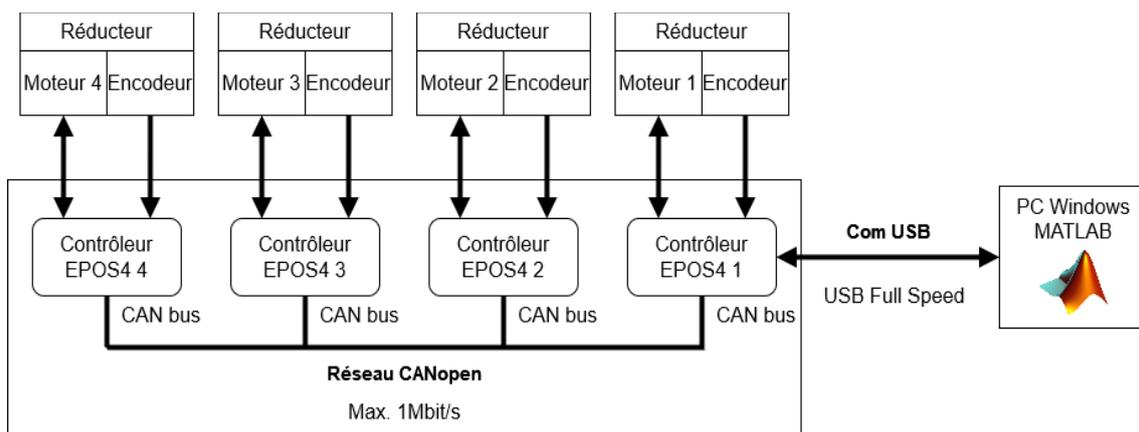


Figure 8 : Schéma de communication entre le PC et les moteurs

Les 4 contrôleurs forment un réseau CANopen et le contrôleur 1 du réseau est relié au PC par USB. La commande est faite avec MATLAB et la communication entre le script et les contrôleurs est assurée par une bibliothèque spécifique.

Nous sommes aujourd'hui en train de construire le premier prototype. Le tableau ci-dessous fournit une liste chiffrée du matériel utilisé pour la construction.

Combinaison motorisation Maxon Motor		
Moteur EC-I 52 sans balais (4)	Tension Nominale	48 V
	Vitesse Max.	4950 tr/min
	Courant Max.	4.56 A
	Couple Max.	419 mNm
	Rendement	0.9
Réducteur planétaire GP 52 (4)	Rapport de réduction	43 : 1
	Rendement	0.75
Codeur HEDL (4)	Impulsion par tour	500
	Nombre de canaux	3
Contrôleur EPOS4 Compact (4)	Tension de service min/max	10/50 V
	Interfaces	RS232
		USB
		CANopen
Alimentation		
Alimentation 48V	Tension d'entrée	100 à 240 V c.a.
	Tension de sortie	48 V
	Courant de sortie	20 A
Disjoncteur différentiel	Pôles	1P+N
	Gamme de courant	6A
	Sensibilité	30mA
Éléments mécanique		
Profils 1 (12)	Matériau	Aluminium
	Section	30x30 mm
	Longueur	1000 mm
Profils 2 (4)	Matériau	Aluminium
	Section	30x30 mm
	Longueur	2000 mm
Roulettes pivotantes (4)	Capacité de charge	20 kg
Poulies (8)	Matériau	Acétal
	Alésage	6.3 mm
	Diamètre	32 mm
Moyeu de serrage (4)		
Pièces fabriquées		
Supports poulie supérieur (4)	Impression 3D	PLA
Supports poulie inférieur (4)	Impression 3D	PLA
Support moteur-profilé (4)	Impression 3D	PLA
Treuil (4)	Impression 3D	PLA
Plateforme mobile	Impression 3D	PLA
Renfort serrage (8)	Découpe jet d'eau	Acier 3mm
Consommables		
Équerres de fixation		
Vis BHC M6 x 12		
Vis BHC M6 x 25		
Vis BHC M4 x 25		
Écrous en T M6		
Écrous hexagonales M4		
Connecteur IEC Mâle C14		
Blocs de jonctions		
Barrettes de jonction		
Barrette de mise à la terre		

Rail DIN	longueur	1 m
Filament imprimante 3D	Matériau	PLA
Filament imprimante 3D	Matériau	PVA
Coût total	Approx. 7415 € HT	

Tableau 2 : Récapitulatif du matériel et ordre de grandeur du coût global

3. Conclusion

Le démonstrateur pédagogique de robot à 4 câbles, que nous nommons Ludot2, est construit et nous commençons à effectuer des tests expérimentaux. La version entièrement manuelle Ludot1 a fait ses preuves dans l'illustration des problématiques liées aux robots parallèles à câbles. Ludot1 a permis de valider une partie du système d'entraînement.

Au-delà de l'aspect pédagogique, ce démonstrateur pourra être utilisé pour des activités de recherche. Une première phase d'essai de tout le système en action doit être réalisée. Nous mettons à disposition l'ensemble des plans et le matériel nécessaire la duplication de Ludot2 par la communauté qui serait intéressée. La conception devrait permettre de faire évoluer le robot rapidement vers des versions plus complètes ou adaptées à un usage spécifique. Pour connaître la position et l'orientation de référence de la plateforme, nous intégrons une balise de réalité virtuelle.

4. Bibliographie

- [1] Zhang, Z., Shao, Z., & Wang, L. (2020). Optimization and implementation of a high-speed 3-DOFs translational cable-driven parallel robot. *Mechanism and Machine Theory*, 145, 103693.
- [2] RC-4 : Robot à Câbles à 4 x Enrouleurs – (2020, 2 Sept) [Vidéo]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=RpcwZhAvNv0&ab_channel=DIIDASTELPROVENCE-Syst%C3%A8mesP%C3%A9dagogiquespourl%27EnseignementTechnologique
- [3] Landsberger, S. E. (1984). "*Design and construction of a cable-controlled, parallel link manipulator*" (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- [4] Tang, Lewei, and Pengshuai Shi. "*Design and analysis of a gait rehabilitation cable robot with pairwise cable arrangement.*" *Journal of Mechanical Science and Technology* 35.7 (2021): 3161-3170.
- [5] Pott, A. (2013). *Cable-driven parallel robots*. T. Bruckmann (Ed.). Berlin, Heidelberg: Springer.
- [6] Qian, Sen, et al. "A review on cable-driven parallel robots." *Chinese Journal of Mechanical Engineering* 31.1 (2018): 1-11.
- [7] Alp, Abdullah B., and Sunil K. Agrawal. "*Cable suspended robots: design, planning and control.*" *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Cat. No. 02CH37292). Vol. 4. IEEE, 2002.
- [8] Kumar, Atal Anil. *Design and Control of an underactuated cable-driven robot for agile handling of parts in a manufacturing line*. Diss. Université de Lorraine, 2020.