

# Conception d'un robot parallèle à câbles pour la fabrication additive

présentée par Damien GUENERS dans le cadre du projet CABFAB



# Sommaire

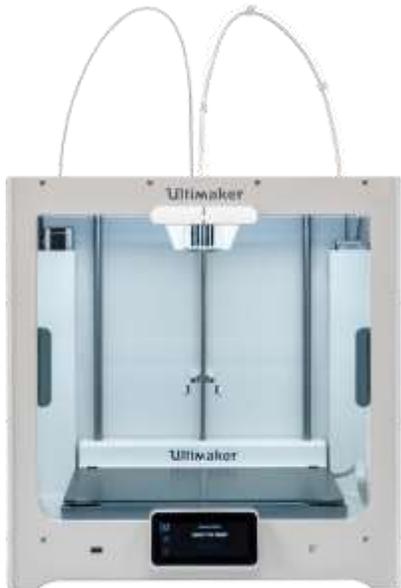
1. Contexte et introduction du projet
2. Optimisation de la conception
3. La conception du prototype
4. Trajectoire et performance du robot

# Contexte et introduction du projet

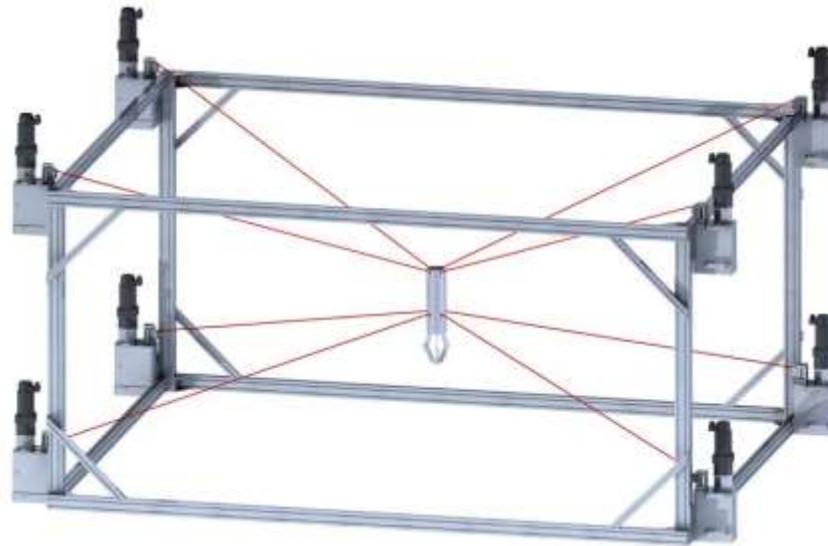
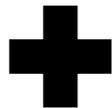
Première partie

## Contexte

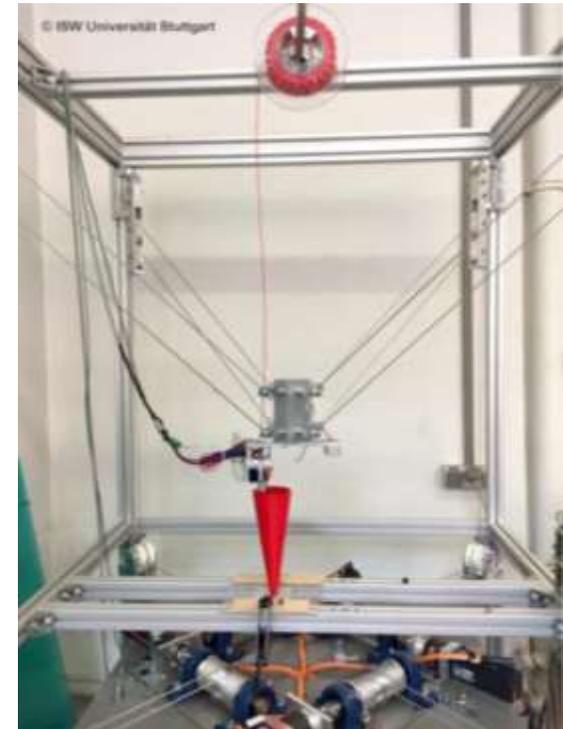
- 2 technologies actuelles.



Impression 3D



Robot Parallèle à Câbles (RPC)



[Pott (2019)]

Erreur d'impression maximale 0,11 mm

Taille de la pièce: 6 cm de diamètre et 11 cm de hauteur

## Constat

- Avantages des RPCs pour la Fabrication Additive:
  - Réduction des masses en mouvement entraînant une grande capacité d'accélération de la plateforme.
  - Reconfigurabilité et modularité.
  - Grand espace de travail pour un faible encombrement.
  - Réduction des coûts de production.
- Inconvénients des RPCs pour la Fabrication Additive:
  - Faible rigidité statique et dynamique.
  - Flexibilité des câbles.

## Le projet CABFAB

- Financements:
  - Région AURA par le pack ambition recherche 2017.
  - S.mart
- Objectif du projet CABFAB:
  - Développement d'un RPC pour la FA par dépôt de matières plastiques.
  - Précision espérée: 100  $\mu\text{m}$
  - Vitesse d'impression: 100 mm/s
  - Impression de pièces de taille moyenne: 0,5 m x 0,5 m x 0,5 m
- Problématique de la thèse:

Optimisation de la rigidité d'un RPC totalement contraint à 8 câbles pour maîtriser l'erreur de suivi de trajectoire liée au comportement élasto-statique et dynamique du robot.



# Optimisation de la conception

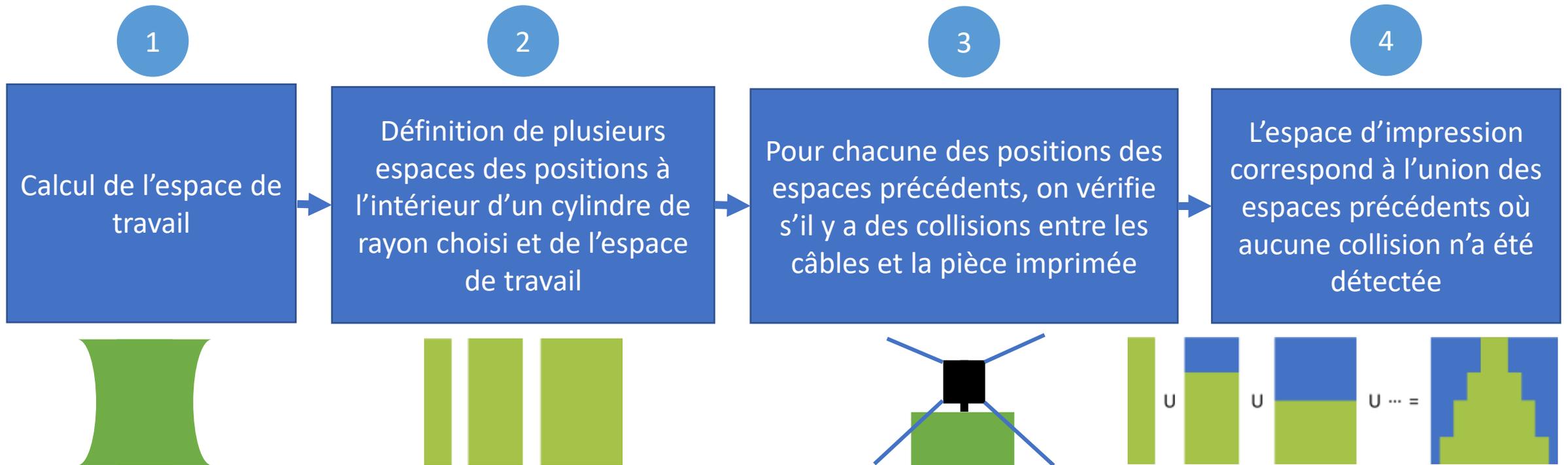
Deuxième partie

# Optimisation des points d'ancrage

- Problématique: Déterminer la position des points d'ancrage pour garantir une rigidité suffisante à l'intérieur de l'espace d'impression.
- Modèle utilisé:
  - Espace de travail  $\leftarrow$  Espace d'impression pour notre application
  - Eviter les collisions entre les câbles et la pièce imprimée
  - Maximiser la rigidité de la plateforme dans l'espace d'impression
- Résolution: développement d'une méthode d'optimisation des points d'ancrage en fonction de l'espace d'impression et de la rigidité de la plateforme.

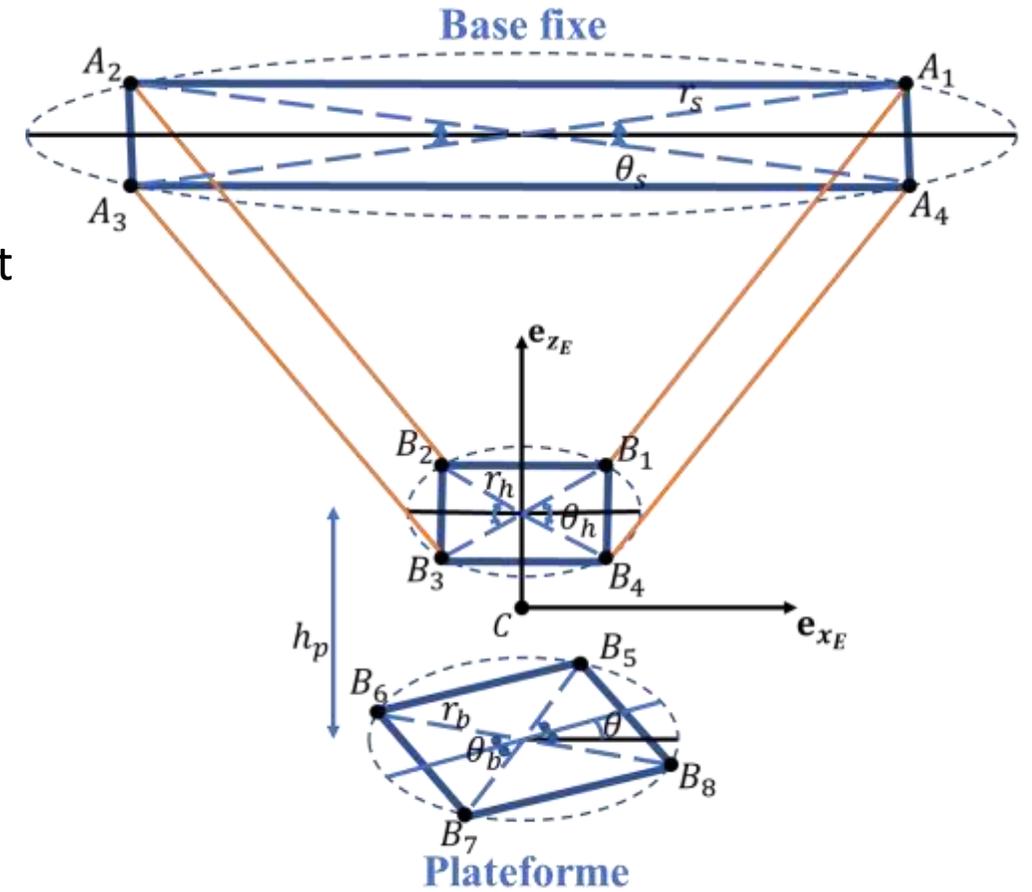
## Détermination de l'espace d'impression

- Impression de la pièce toujours à la verticale, la hauteur de la buse d'impression est supposée au-dessus du plan supérieur de la pièce imprimée.



## Les paramètres d'optimisation

- 6 Paramètres d'optimisation de la plateforme:
  - $h_p$ : hauteur entre le plan supérieur et inférieur
  - $r_h$ : rayon de la face supérieure
  - $r_b$ : rayon de la face inférieure
  - $\theta$ : angle entre le repère de la face supérieure et inférieure
  - $\theta_h$ : angle entre les points d'ancrage de la face supérieure
  - $\theta_b$ : angle entre les points d'ancrage de la face inférieure
- 2 Paramètres d'optimisation du bâti:
  - $r_s$ : rayon de la face supérieure
  - $\theta_s$ : angle entre les points d'ancrage de la face supérieure



Paramétrage d'optimisation

## Fonctions de coûts et contraintes d'optimisation

- La fréquence du premier mode doit être maximisée. Elle maximise la rigidité de la plateforme.
- Optimisation en deux étapes:

1

$$\begin{cases} f_{cost} = V_{workspace}/V_{printing\_space} \\ f_{constriant} > f1_{min} \end{cases}$$

Elle permet d'augmenter l'espace  
d'impression

2

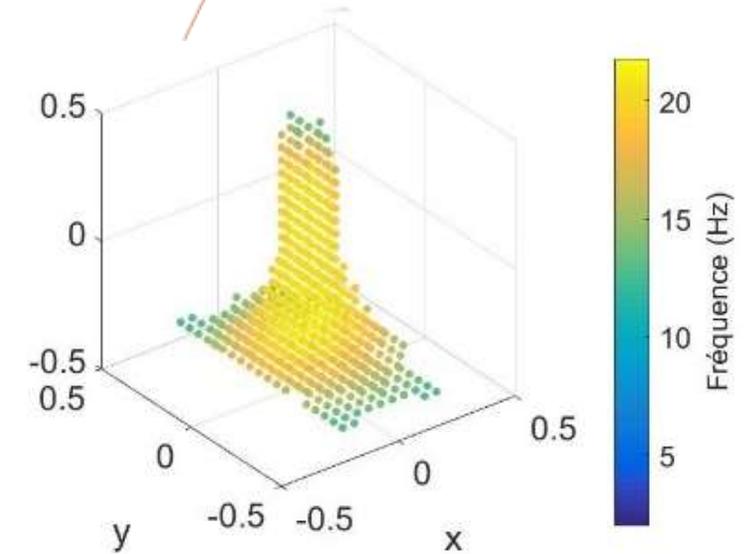
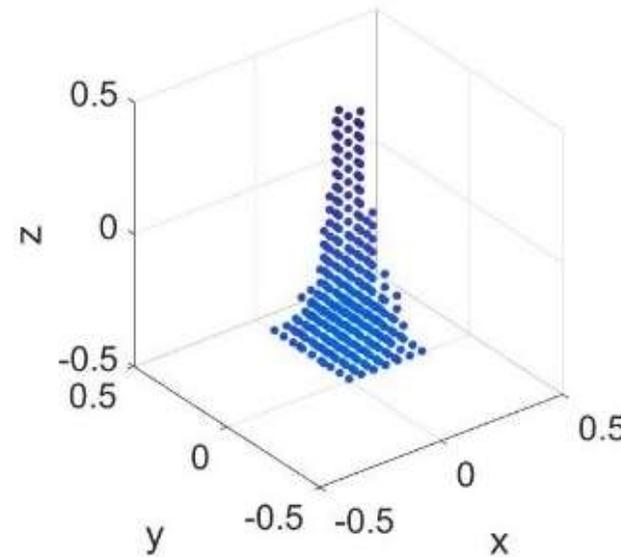
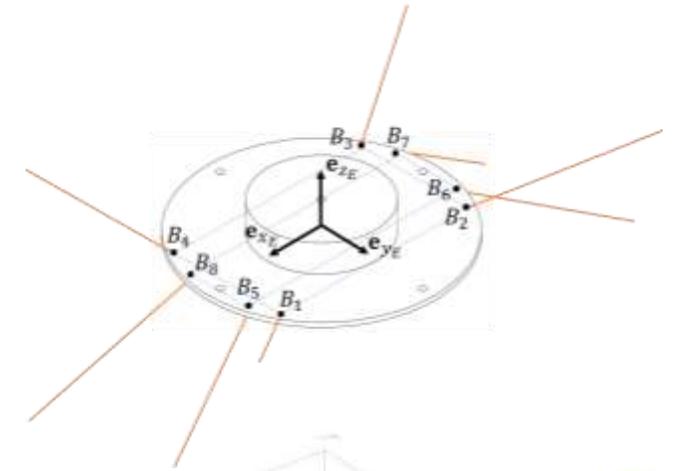
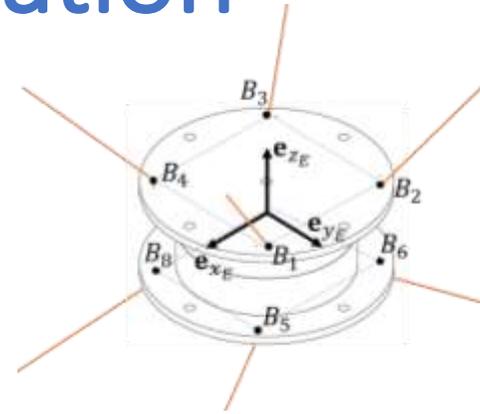
$$\begin{cases} f_{cost} = f1_{min} \\ f_{constriant} > V_{print\_min} \end{cases}$$

Elle permet d'augmenter la rigidité  
dans l'espace d'impression

## Résultats de l'optimisation

- L'optimisation a mis les points dans le même plan.
- Le premier mode de la plateforme optimisée a une fréquence de vibration supérieure à celle des plateformes initiale.
- Espace d'impression augmenté de 4,65%.

Paramètres	Configuration initiale	Configuration optimale
$h_p$ [-0,1 m; 0,1 m]	0,05 m	0,005 m
$r_h$ [0 m; 0,1 m]	0,0623 m	0,1 m
$r_b$ [0 m; 0,1 m]	0,0623 m	0,1 m
$\theta$ [0° ; 45°]	0°	0°
$\theta_h$ [0° ; 45°]	45°	29,98°
$\theta_b$ [0° ; 45°]	40,2°	15,87°

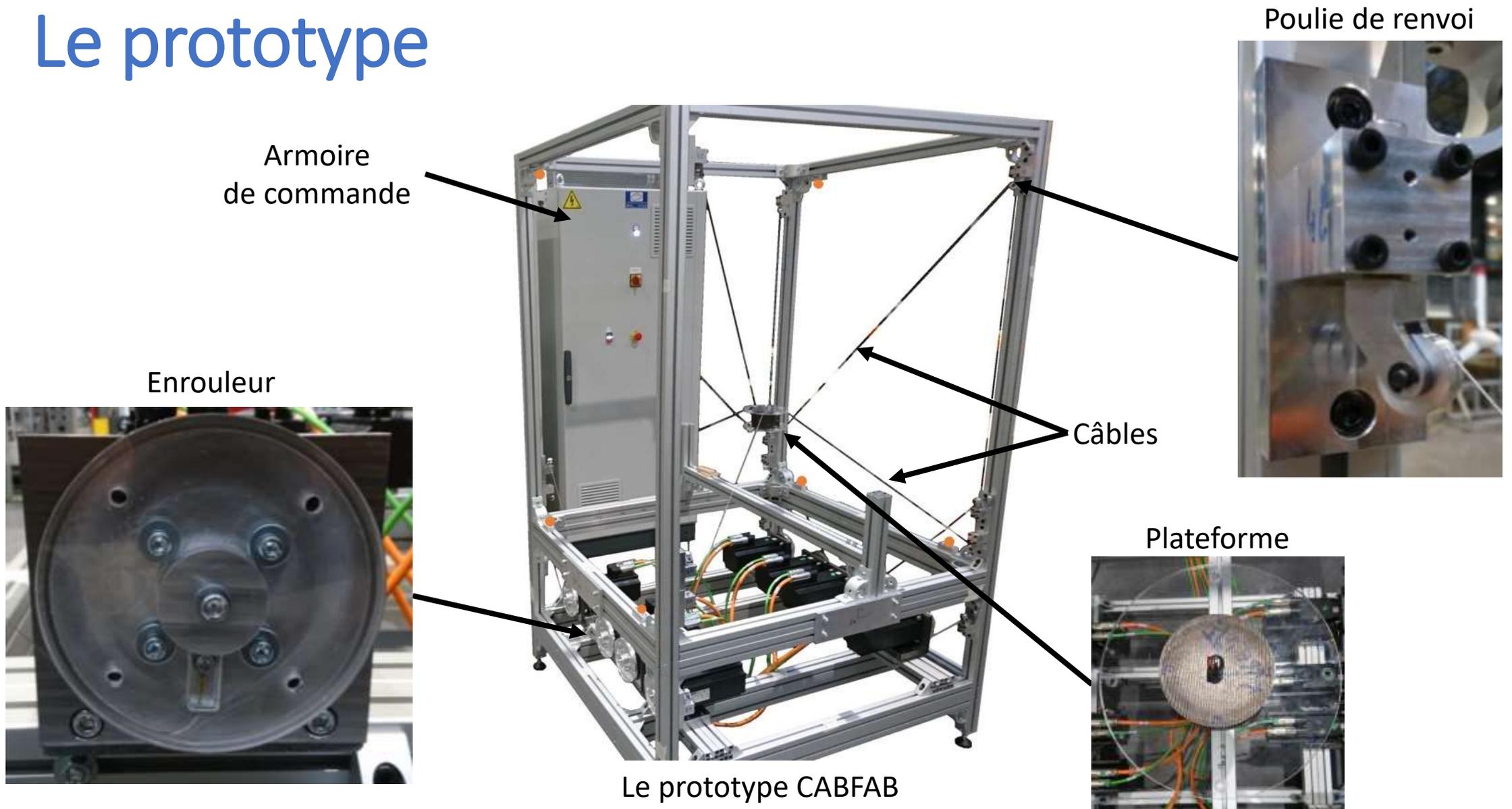


Fréquence du premier mode à l'intérieur de l'espace d'impression

# La conception du prototype

Troisième partie

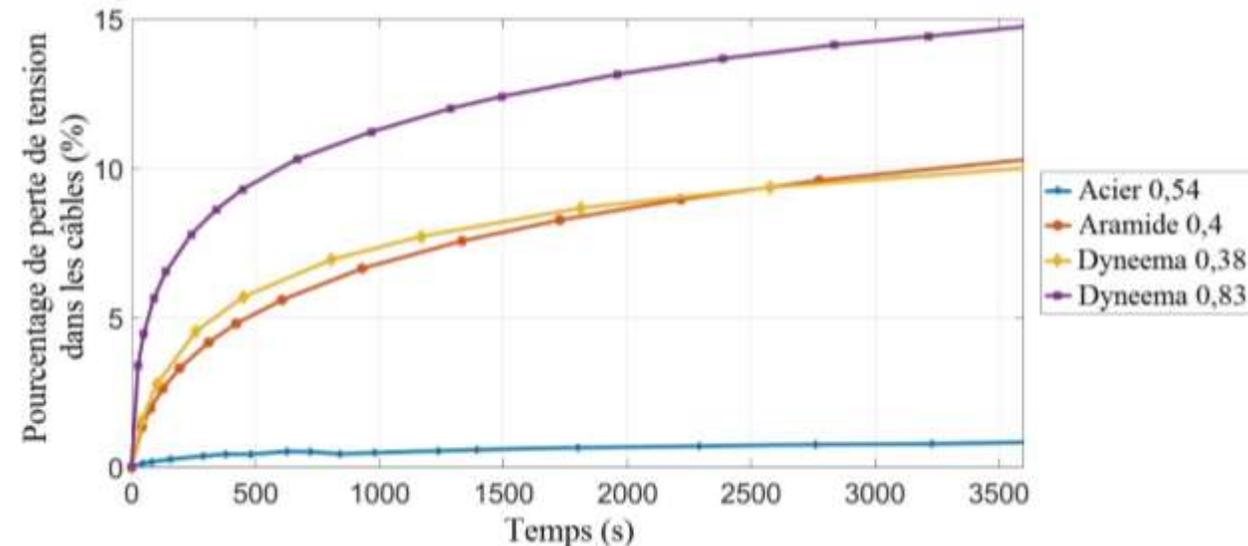
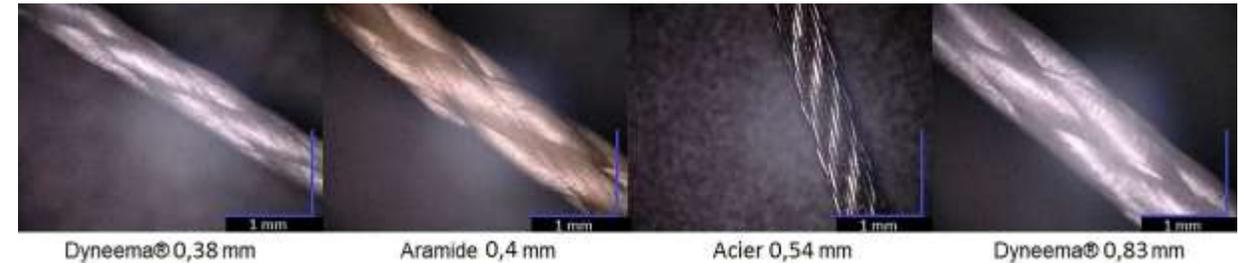
## Le prototype



## Les câbles

- Un câble d'un diamètre inférieur à 1 mm pouvant supporter 100 N est suffisant pour notre application.
- Plusieurs types de câbles ont été caractérisés:
  - Acier inoxydable tressé à 7 torons d'un diamètre de 0,54 mm
  - Dyneema® SK99 DC Pro tressé d'un diamètre de 0,83 mm
  - Dyneema® SK75 DC tressé d'un diamètre de 0,38 mm
  - Aramide tressé de 6 fuseaux d'un diamètre de 0,4 mm

Finalement, le câble en acier est plus adapté à l'application.



Perte de tension dans les câbles causée par le fluage.

## L'enrouleur

- Enroulement radial du câble:
  - Solution mécanique simple, mais précise;
  - Adapter pour des câbles de faible diamètre et de longueur à enrouler faible, moins de 2m dans notre cas.
- 8 servomoteurs SMHA100 de Parker équipés de codeurs absolus avec une précision de  $0,09^\circ$ .
- Sans réducteur pour diminuer les frottements et s'abstenir de capteurs de forces.
- Possibilité d'estimer la précharge des câbles directement à l'aide des couples moteurs.
- La force de tension maximale des câbles est de 100 N.
- La vitesse d'enroulement du câble maximale est de 0,6 m/s.



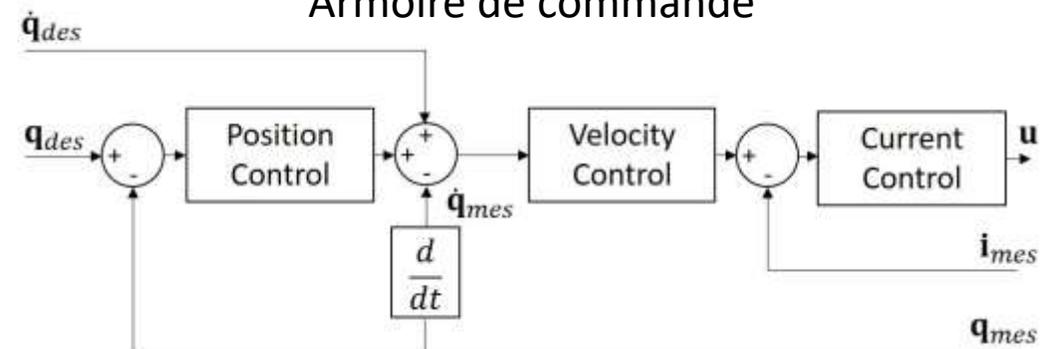
Systeme d'enroulement

## L'électronique

- L'armoire de commande est composée d'un PC Beckhoff CX5140 avec un processeur Intel Atom E3845 (1,91 GHz, 4 cœurs) et de 4 servo-contrôleurs AX5206.
- La programmation s'effectue à l'aide du logiciel TwinCAT 3 en langage PLC.
- L'armoire est alimentée en 400 VAC et 80 A maximum.
- Contrôleur classique de machine-outil en position/vitesse/courant .



Armoire de commande



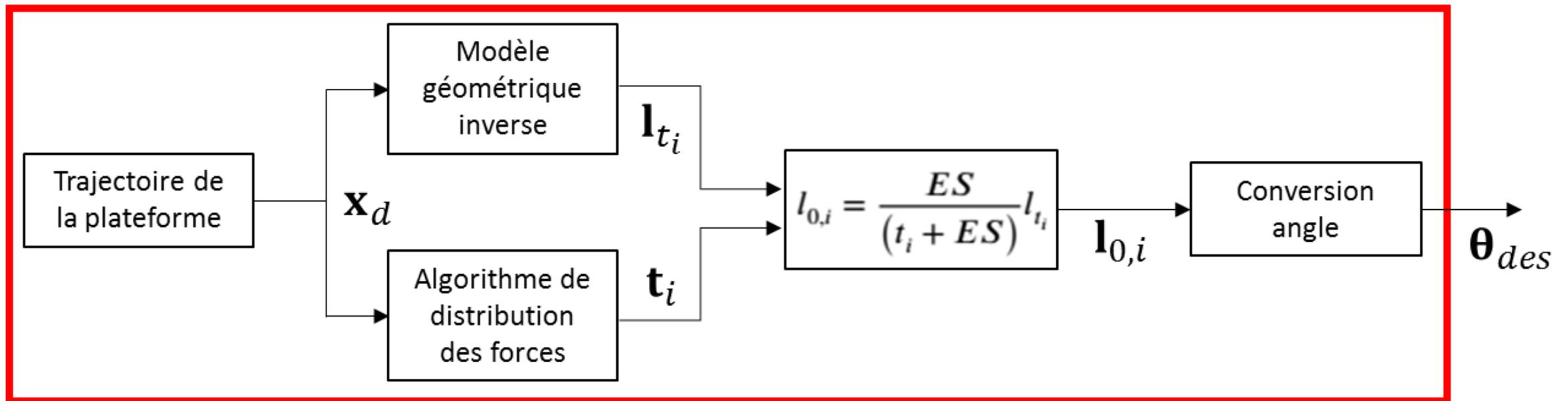
Contrôleur de machine-outil

# Trajectoire et performance du robot

Quatrième partie

## La planification de trajectoire

- Trajectoire polynomiale de degrés 5.
- Modèle géométrique prenant en compte les poulies de renvoi et les enrouleurs.
- Prise en compte de l'élasticité des câbles.



Génération de la trajectoire

## Mise en place

- Trajectoire circulaire de 0,1 m de rayon à une vitesse de 100 mm/s.
- Mesure à l'aide du laser tracker à une fréquence de 200 Hz et d'une précision de 21  $\mu\text{m}$  à 1 m.
- La calibration des éléments mécanique est réalisée à l'aide du laser tracker.
- Initialisation de la précharge:



La mesure à l'aide d'un laser tracker

Mesure de la position de la plateforme et de la tension des câbles initiales à l'aide des couples moteurs.

Calcule de la longueur à enrouler/dérouler pour la force initiale de l'algorithme de distribution des forces.

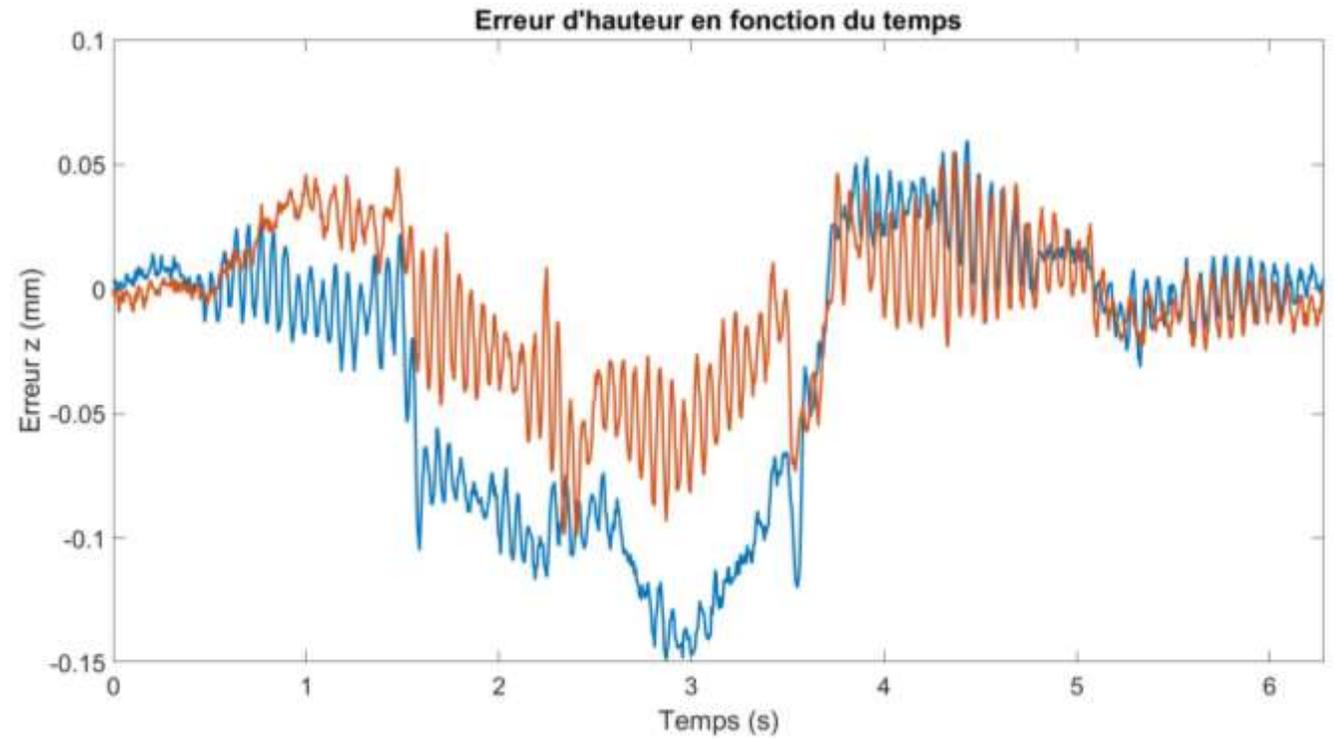
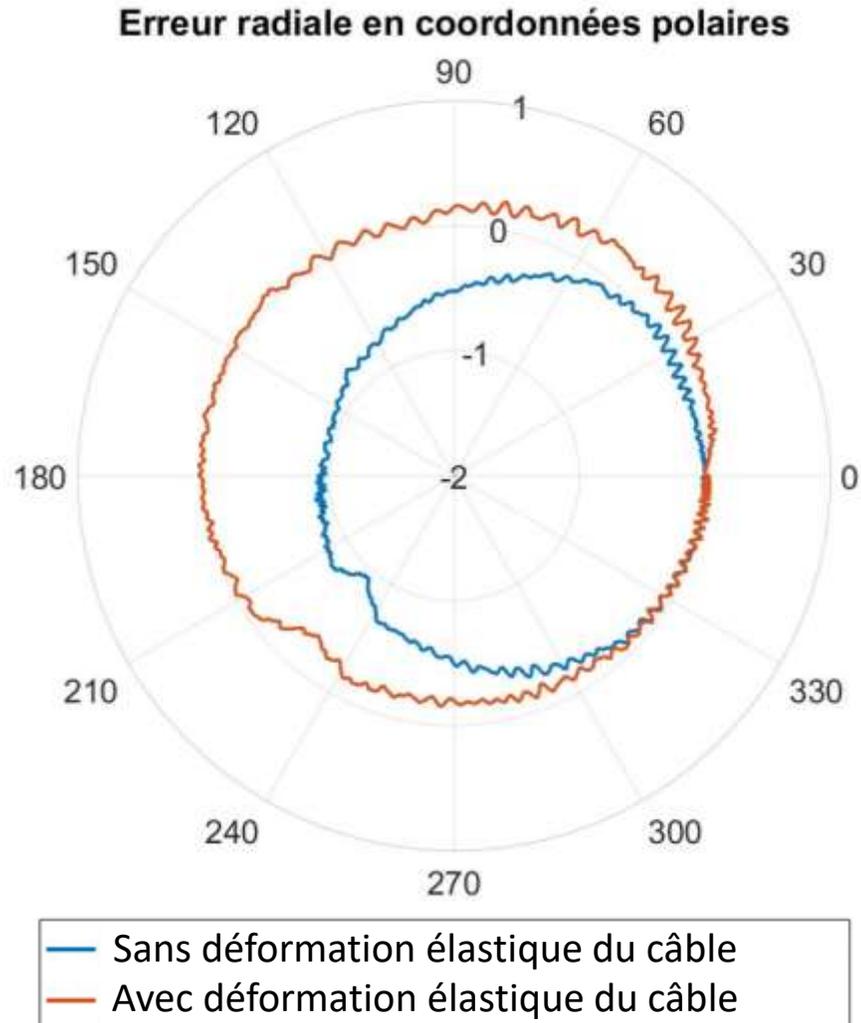
Initialiser la position des enrouleurs.

## Résultats



Mouvement circulaire de la plateforme Optimisée

## Résultats



		Sans	Avec
Erreur d'hauteur	Max	59 $\mu\text{m}$	69 $\mu\text{m}$
	Min	-149 $\mu\text{m}$	-100 $\mu\text{m}$
Erreur radiale	Max	53 $\mu\text{m}$	282 $\mu\text{m}$
	Min	-997 $\mu\text{m}$	-334 $\mu\text{m}$

## Conclusion

- Réalisation d'un robot parallèle à câbles fonctionnel.
- Premier résultat encourageant avec une erreur de suivi de trajectoire inférieure à 0,4 mm.
- Il reste encore du travail pour atteindre la précision demandée pour l'impression 3D.



Le prototype CABFAB

# Publications

- **Journaux :**

- Gueners, D., Bouzgarrou, B. C., & Chanal, H. (2021). Cable behavior influence on Cable-Driven Parallel Robots vibrations: experimental characterization and simulation. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 13(4), 041003. DOI: 10.1115/1.4049978 (indexée JCR).
- Gueners, D., Chanal, H., & Bouzgarrou, B. C. (2022). Design and implementation of a cable-driven parallel robot for additive manufacturing applications. *Mechatronics*, 86, 102874. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2022.102874 (indexée JCR).

- **Conférences :**

- Gueners, D., Bouzgarrou, B. C., & Chanal, H. (2019, June). Static and dynamic analysis of a 6 DoF totally constrained cable robot with 8 preloaded cables. In *International Conference on Cable-Driven Parallel Robots* (pp. 307-318). Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-20751-9\_26.
- Gueners, D., Chanal, H., & Bouzgarrou, B. C. (2020, May). Stiffness optimization of a cable driven parallel robot for additive manufacturing. In *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 843-849). IEEE. DOI: 10.1109/ICRA40945.2020.9197368.

## Offre de thèse

# Maîtrise du suivi de trajectoire des robots à câbles pleinement contraints

## Application à l'impression 3D par dépôt de fil fondu

### Contexte et objectif:

Le potentiel de développement de la fabrication additive dans les années à venir est très important dans différentes applications. La maîtrise de ce procédé est au cœur des enjeux de l'Industrie du Futur. La FA est amenée à gagner en productivité et en qualité des pièces réalisées. Les robots parallèles à câbles (CDPRs) peuvent être adaptés à l'impression 3D de pièces de taille moyenne ou grande en l'absence de sollicitations mécaniques fortes comme en usinage. Dans le projet ANR CABTIVE (AAPG 2022 PRC), nous nous mettons au défi d'accroître la précision du suivi de trajectoire des CDPRs pleinement contraints appliqués à l'impression 3D. Notre objectif est de développer des CDPRs ayant un niveau de performances statiques et dynamiques conforme aux exigences d'une impression 3D, par dépôt de fil fondu, de qualité et de productivité élevées. Le projet CABTIVE adopte une approche novatrice en abordant la maîtrise de ce procédé par les CDPRs sous l'angle du contrôle / commande de « structures actives » à géométrie et à rigidités statique et dynamique variables.

### Travaux envisagés:

Afin d'améliorer la précision du suivi de trajectoire des CDPRs dans le contexte de l'impression 3D (FDM), nous proposons d'agir sur trois leviers : la planification, la commande et l'intégration de mesure extéroceptive. En effet, les travaux de thèse se focaliseront sur la planification de trajectoires et le développement de lois de commande permettant de contrôler la rigidité statique et dynamique du robot à travers la pré-charge dans les câbles. Le principal verrou est le contrôle de la rigidité le long d'une trajectoire d'impression pour maintenir une grande précision de suivi de trajectoire inférieure au 1/10 de mm. Une synergie entre identification/calibration, planification de trajectoire, moyens de perception et commande sera en outre nécessaire afin d'atteindre un tel niveau de précision. Ces travaux s'appuieront sur des développements en modélisation : modèles statiques, élasto-cinématiques et dynamiques ainsi qu'une intégration judicieuse d'une perception extéroceptive.

### Compétences:

Être titulaire d'un Master ou d'un diplôme d'ingénieur en lien avec la mécanique, l'automatique, la mécatronique et/ou la robotique. Avoir des compétences en modélisation et en commande des robots. Avoir des bases en programmation informatique (C/C++, Python, ...). Des expériences en fabrication additive (impression 3D) et/ou en langage PLC seront fortement appréciées.

### Encadrement:

Deux laboratoires de recherche, partenaires du projet CABTIVE, participeront à l'encadrement de la thèse :

- LIRMM (UMR 5506), Département Robotique, Equipe DEXTER, Robotique médicale et mécanismes parallèles (Montpellier)
- Institut Pascal (UMR 6602), Axe M3G, Thème MRSI : Machines, Robots et Systèmes Industriels (Clermont-Ferrand)

### Contacts et candidature:

Envoyez votre CV et lettre de motivation par e-mail aux personnes suivantes :

- Chedli Bouzgarrou : [chedli.bouzgarrou@sigma-clermont.fr](mailto:chedli.bouzgarrou@sigma-clermont.fr)
- Hélène Chanal : [helene.chanal@sigma-clermont.fr](mailto:helene.chanal@sigma-clermont.fr)
- Marc Gouttefarde : [marc.gouttefarde@lirmm.fr](mailto:marc.gouttefarde@lirmm.fr)