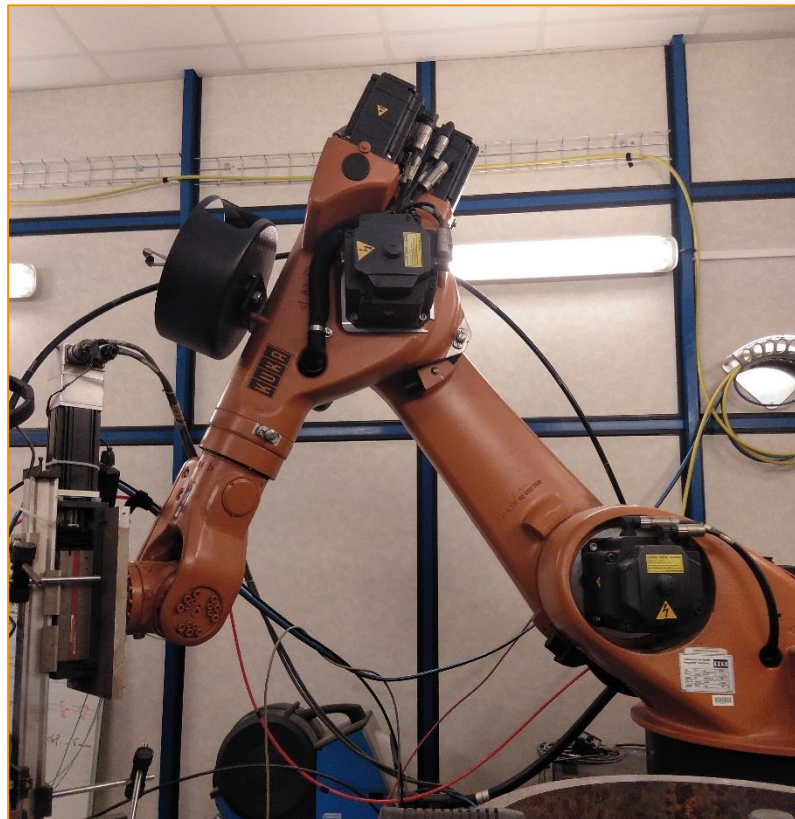


**Arts et Métiers ParisTech
2019**

Conception d'une cellule robotique pour l'usinage

Rapport de projet:
Master Mechanical, Energy & Industrial
Engineering (M1)



Étudiant : PERNÍA FERNÁNDEZ, Manuel
Tuteur : GUSKOV, Mikhail

Laboratoire PIMM



ANNEE : 2019

N° :

CAMPUS DE RATTACHEMENT PE : Arts et Métiers ParisTech, Paris

AUTEUR : Manuel PERNIA FERNANDEZ

TITRE : Conception d'une cellule robotique pour l'usinage

ENCADREMENT : Mikhail GUSKOV

ENTREPRISE PARTENAIRE : -

NOMBRES DE PAGES : 23 NOMBRE DE REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES : 9

RESUME : Ce projet a pour mission la conception d'une cellule robotique pour des processus d'usinage – perçage et fraisage – dans le laboratoire PIMM. Les travaux suivants seront présentés avec détail dans ce rapport: la sélection d'un bras robotique, l'étude des paramètres du perçage, la sélection d'une broche moteur, la modélisation du système mécanique, l'identification des paramètres du système et la validation expérimentale des hypothèses.

MOTS CLES : robot, usinage, broches, vibrations, résonance, modélisation

PARTIE A REMPLIR PAR LE PROFESSEUR RESPONSABLE DU PROJET

ACCESSIBILITE DE CE RAPPORT (entourer la mention choisie) :

Classe 0 = accès libre

Classe 1 = Confidentiel jusqu'au _____

Classe 2 = Hautement confidentiel

Date :

Nom du signataire :

Signature :

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier M. Mikhail Guskov, maître de conférences chez Arts et Métiers et mon tuteur du projet, pour sa confiance, sa disponibilité et toutes les connaissances qu'il m'a appris pendant ce temps.

Je voudrais également remercier M. Frédéric Coste, ingénieur de recherche chez PIMM, pour son aide lors des expériences au laboratoire.

Enfin, je voudrais remercier ma professeure de français aux Arts et Métiers, Mme Julia Camarero, pour son enseignement cette année et ses conseils concernant la rédaction du rapport.

Sommaire

1.- Introduction	Page 3
1.1.- Le laboratoire PIMM	Page 3
1.2.- Objectifs	Page 3
1.3.- Compétences nécessaires	Page 4
1.4.- Pourquoi ce projet	Page 4
2.- Travaux réalisés	Page 4
2.1.- Planification	Page 4
2.2.- Sélection d'un robot.....	Page 4
2.2.1.- Recherche sur des catalogues.....	Page 5
2.2.2.- Choix finale.....	Page 5
2.3.- Sélection d'une broche	Page 6
2.3.1.- Paramètres du perçage.....	Page 6
2.3.2.- Recherche sur des catalogues.....	Page 6
2.3.3.- Broches proposées	Page 7
2.4.- Modélisation du système mécanique du robot.....	Page 7
2.4.1.- Formules et hypothèses.....	Page 7
2.4.2.- Implémentation sur Python.....	Page 9
2.4.3.- Résultats et analyse	Page 10
2.4.4.- Réalisation d'un modèle plus complexe.....	Page 13
2.5.- Identification des paramètres du système.....	Page 13
2.5.1.- Démarche d'identification des paramètres.....	Page 13
2.5.2.- Analyse de la démarche.....	Page 14
2.5.3.- Modification de la démarche	Page 15
2.6.- Analyse modal.....	Page 16
2.6.1.- Recherche bibliographique.....	Page 16
2.6.2.- Hammer Impact Test.....	Page 16
2.6.3.- Essais vibratoires avec des excitations forcées.....	Page 17
2.6.4.- Post-traitement et résultats	Page 17
2.6.5.- Paramètres du KUKA KR30 HA-C	Page 18
3.- Conclusions	Page 19
3.1.- Objectifs atteints.....	Page 19
3.2.- Points critiques et difficultés	Page 19
3.3.- Compétences acquises	Page 19
4.- Bibliographie	Page 20
5.- Annexes	Page 21

1.- Introduction

Aujourd'hui, l'emploi de robots est devenu très habituel dans l'industrie, et ils sont utilisés dans une large gamme de processus de fabrication, en raison de leur polyvalence et de leur efficacité. Cependant, dans les procédés d'usinage, comme le perçage ou le fraisage, ils présentent un désavantage par rapport aux machines traditionnelles : ils sont moins rigides, de manière à ce que les vibrations dans le bras robotisé permettent au processus d'usinage d'attendre la tolérance requise.

Afin d'étudier cette question, le laboratoire PIMM (Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux) envisage d'acquérir un robot qui aura pour but de réaliser des expériences de perçage et de fraisage.

Le but de ce projet, qui s'est déroulé au sein de l'équipe DYSCO du laboratoire PIMM, est de concevoir la cellule robotique pour réaliser ces expériences.

1.1.- Le laboratoire PIMM

Le laboratoire PIMM (Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux) axe ses recherches sur les conséquences des procédés sur les propriétés d'emploi des matériaux, via les défauts et les modifications de microstructures engendrées. Il a été créé en 2009, et depuis 2014, il est sous la tutelle de trois entités : Arts et Métiers ParisTech, le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) et le CNAM (Conservatoire National des Arts et Métiers). Les activités développées en dynamique des structures et en commande et surveillance des systèmes permettent d'apporter de nombreuses contributions à la compréhension et à la simulation des procédés.

L'équipe DYSCO (DYnamique Structures Systèmes et Contrôle) appartient au laboratoire PIMM, et travaille sur la modélisation numérique des structures, des systèmes et des procédés avec un accent mis sur les aspects dynamiques (vibrations notamment), sur les phénomènes non-linéaires, sur la commande et la surveillance.

Le 18 de mars 2019, le laboratoire comptait 37 enseignants-chercheurs, 2 chercheurs associés, 24 personnels techniques et administratifs., 13 post-doctorats, ingénieurs CDD, et 57 doctorants. Par ailleurs, 4 équipes de recherche (dont DYSCO), 4 structures de recherche associées et 8 centres de ressources font partie du laboratoire.

Le laboratoire a de fortes relations industrielles avec des entreprises nationales et internationales reconnues, ainsi qu'avec des partenaires régionaux. Grâce à cela, le montant des contrats directs avec des partenaires industriels s'élève en moyenne à 1 million d'euros par an depuis 2010. Aussi, le PIMM est membre de l'Institut Carnot ARTS et participe, à ce titre, à des projets collaboratifs avec d'autres laboratoires de l'Institut.

1.2.- Objectifs de ma mission

Le projet a deux principaux objectifs. Le premier est la sélection des éléments qui font partie de la cellule, c'est-à-dire le bras robotique ou la broche, ainsi que sa distribution dans l'espace de la cellule.

Le deuxième est la création d'un modèle du système mécanique du robot, afin d'analyser son comportement dans différentes situations. Ce qui inclut également, la réalisation d'une

démarche d'identification des paramètres du système mécanique à partir des données expérimentales comme les fréquences de résonance et la validation des hypothèses faites. Il est important de remarquer que ces différentes parties du travail ne sont pas totalement indépendantes, ainsi les résultats obtenus dans une partie peuvent affecter la démarche dans une autre.

1.3.- Compétences nécessaires

D'abord, il faut avoir des connaissances en mécanique des solides et vibrations, notamment pour des systèmes de plusieurs degrés de liberté, ainsi que des notions de *fonctions de transfert et transformée de Fourier*.

Ensuite, la maîtrise des langages de programmation, tels que Python et Matlab, est indispensable.

Enfin, des connaissances basiques sur l'usinage et les moteurs électriques sont requises pour la bonne réalisation du projet.

1.4.- Pourquoi ce projet

Une des raisons pour laquelle j'ai choisi ce projet est que la robotique est un domaine de l'ingénierie innovant et en plein développement, et qu'il serait intéressant d'étudier l'utilisation des robots dans la recherche et l'industrie.

De plus, c'était une opportunité d'appliquer mes connaissances en mécanique et vibrations, tout en améliorant mes capacités de programmation.

Enfin, le projet inclut une partie académique et théorique ainsi qu'un aspect pratique lié, de manière directe, avec un problème identifié et réel.

2.- Travaux réalisés

J'ai réalisé mes différentes missions sous la direction de M. Guskov.

2.1.- Planification

La durée du projet a été de 16 semaines, entre mars et juin. Les sept premières semaines ont été dédiées à la conception d'un modèle mécanique simple du robot et à la sélection d'une broche et d'un robot.

Ensuite, on a développé un modèle mécanique plus complexe en deux semaines, et travaillé pendant 6 semaines sur la conception et l'analyse d'une démarche d'identification des paramètres du système mécanique.

Les 5 dernières semaines ont été consacrées à l'analyse modale d'un robot du laboratoire, en faisant des Hammer Impact Tests, des essais vibratoires avec excitations forcées et le post-traitement des données. Enfin, on a testé la démarche d'identification dans un cas réel.

2.2.- Sélection d'un robot

On a cherché des robots pour deux assemblages : un plus léger pour l'usinage de plastiques et un autre plus lourd pour l'usinage d'aluminium.

Les paramètres techniques les plus importants sont la portée, la capacité de charge et le nombre d'axes, qui doit être 6 ou 7. Le critère du poids était important car le robot ne doit pas être trop lourd. Cependant, le prix des robots a été la contrainte la plus importante à respecter.

2.2.1.- Recherche des catalogues

La recherche des bras robotiques a été effectuée sur les catalogues KUKA, ABB, FANUC, Universal Robotics, Franka Emika Panda et Motoman, étant les entreprises les plus importantes dans ce domaine.

Dans le cas de la configuration légère, la recherche inclut des robots présentant les caractéristiques suivantes :

- Capacité de charge jusqu'à 10 kg
- Portée jusqu'à 1500 mm
- 6 ou 7 axes

Une première pré-sélection de robots a été alors créée, dans laquelle on a noté la portée et la capacité de charge de chacun (cf. annexe A). Aussi, on a noté autres caractéristiques telles que le prix estimé ou le poids.

A l'aide de l'étude comparative faite sur les différents robots, nous avons pu identifier les meilleures solutions selon nos critères techniques et économiques :

- KUKA KR10 R1100
- KUKA KR10 R1420
- Franka Emika Panda.

Pour la configuration plus lourde, la recherche de robots a été orientée par rapport aux caractéristiques suivantes :

- Capacité de charge entre 20 et 30 kg
- Portée jusqu'à 2000 mm
- 6 ou 7 axes

Encore une fois, un graphique est créé pour classer la première sélection de robots par capacité de charge et portée (cf. annexe A).

Après un contact direct avec les distributeurs, notre sélection s'est portée sur le KUKA KR20 et le KUKA KR22 étant ceux qui répondaient le mieux à nos besoins.

2.2.2.- Choix finale

La décision du laboratoire a été de faire l'assemblage lourd pour l'usinage d'aluminium, pour cela, on a proposé le KUKA KR20. Néanmoins, un robot KUKA KR30 HA-C [9], appartenant au laboratoire, qui répondait également aux contraintes techniques a été choisi pour réaliser les expériences. De cette façon, il ne sera pas nécessaire d'investir dans un nouveau robot.

2.3.- Sélection d'une broche

Afin de réaliser des processus d'usinage avec notre robot, on doit y attacher une broche pour le perçage ou le fraisage. La sélection d'un modèle de broche dépend de nombreux facteurs, donc il faut comprendre, dans un premier temps, les processus d'usinage prévus et ses exigences.

2.3.1. Paramètres du perçage

D'après les hypothèses, on percerait un trou de 10mm de diamètre (D) avec une vitesse d'avance (f) de 0.3mm/rev. Le matériau usiné serait du plastique ou de l'aluminium, et on utiliserait un outil standard avec deux dents (Z) et un angle de pointe (Kr) de 118°.

Dans ces conditions, on a procédé à une recherche des paramètres du perçage recommandés. À partir des vitesses de coupe conseillées par des fabricants [1,2] et des valeurs du taux d'enlèvement de matière spécifique [3], on a déterminé les vitesses de broche et les puissances requises par l'usinage de l'aluminium et du plastique.

Aussi, d'autres paramètres ont été calculés, comme la vitesse d'avance, la force de coupe, la force d'avance, la force de coupe spécifique et le couple.

Tous ces calculs ont été notés dans des tableaux (cf. annexes B et C).

2.3.2.- Recherche sur des catalogues

Lors de la sélection de la broche, trois contraintes majeures ont été relevées. L'une est le poids et la taille, parce que le robot doit être capable de la tenir. La seconde, est d'être capable d'atteindre la vitesse, la puissance et le couple indiqués pour chaque matériau. Enfin, elle doit être adaptée pour le fraisage, c'est à dire, être capable de supporter des forces axiales et radiales.

- Broche pour l'usinage de plastiques :

Le poids devrait être le minimum possible, et inférieur à la capacité de charge du robot utilisé. Par exemple moins de 10 kg, avec une marge de sécurité, dans le cas d'un robot KUKA KR10.

Compte tenu des valeurs de vitesse de coupe recommandées pour les plastiques, la vitesse de la broche devrait passer de 900 tr/min à 3000 tr/min, dans un cas idéal. Au moins, il devrait être capable de fonctionner à une vitesse entre ces valeurs.

La puissance de coupe devrait être plus de 0.7 kW dans le cas le plus restrictif, et le couple 2.25 Nm. Cependant, ces deux variables ne sont pas des contraintes très limitantes. On pourrait faire du pré-forage, une procédure qui consiste à faire d'abord un trou d'un diamètre plus petit que nécessaire, puis, percer le trou final. Ça réduit la puissance requise et améliore la tolérance.

- Broche pour l'usinage d'aluminium:

Dans ce cas, le poids n'est pas une contrainte majeure, car les robots ont une capacité de charge supérieure à 20 kg. En outre, la limite de vitesse minimale de broche devrait être d'environ 3000 tr/min.

Dans le cas le plus restrictif, la puissance de coupe devrait être d'environ 3.6 kW, mais selon certaines références, il ne serait que plus de 1.4 kW. En outre, comme déjà mentionné, le pré-perçage réduit la puissance de coupe requise.

2.3.3.- Broches proposées

Après la recherche sur le marché, et l'étude d'une présélection de broches, on a proposé celles qu'on a considérées plus adaptées aux besoins techniques.

Pour la configuration d'usinage en plastique, on a décidé que la meilleure broche serait la Proxxon 20 165 [4], qui a 300W et atteint vitesses de 900 tr/min à 3000 tr/min. Pourtant, finalement on ne va pas réaliser cette configuration.

La broche proposée, pour l'usinage d'aluminium, est le modèle C41/47-C-3822-200 [5]. Cette broche a 1.6 kW, une vitesse maximale de 12000 tr/min et 8,5 kg de poids

2.4.- Modélisation du système mécanique du robot

Les travaux présentés ci-dessous concernent la conception d'un modèle mécanique du robot, notamment pour analyser ses vibrations dans plusieurs situations.

2.4.1.- Formules et hypothèses

On a considéré le robot comme un système de deux degrés de liberté formé par deux barres avec les paramètres suivants:

- Longueurs $L1$ et $L2$
- Masses $M1$ et $m2$
- Moments d'inertie $I1$ et $I2$
- Raideurs $K1$ et $K2$, dans les articulations
- Les centres de masses $lg1$ et $lg2$
- Angles $\theta1$ et $\theta2$. L'angle $\theta3$ dépend des autres.

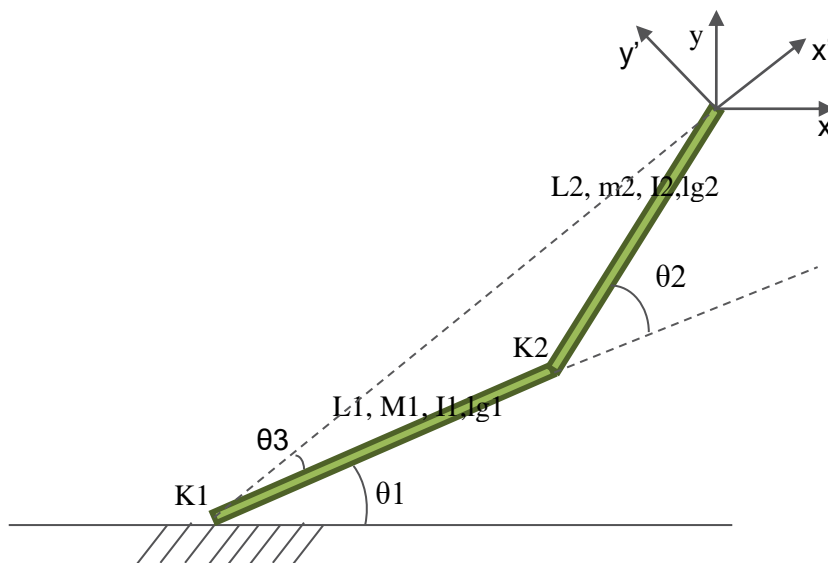


Figure 1. Schéma du système mécanique

En théorie, on peut résoudre les équations de ce système. Malheureusement, dans la pratique, des valeurs comme la masse, la constante de ressort, l'amortissement ou le moment d'inertie restent inconnus très souvent.

D'abord on a supposé qu'on connaissait les longueurs et la masse de chaque barre. Pour obtenir les moments d'inertie, on a supposé que les barres étaient uniformes, avec les centres des masses au milieu de chacun d'eux.

Pour obtenir les raideurs K_1 et K_2 , on a supposé qu'on connaissait les fréquences de résonance pour un angle θ_2 déterminé. Les formules utilisées pour cela seront affichées et expliquées dans la section suivante.

Une autre supposition qu'on a faite est que l'amortissement est proportionnel à la raideur, avec un coefficient d'amortissement $\varepsilon = 10\%$ pour la première fréquence propre. Il en résulte un coefficient de proportionnalité de la matrice de rigidité K , β .

Le système cinétique a deux degrés de liberté, θ_1 et θ_2 . Lors de l'analyse des vibrations libres, il y a trois degrés de liberté : l'angle θ_2 , et les déplacements angulaires $d\theta_1$ et $d\theta_2$. L'angle θ_1 n'a aucune influence sur les caractéristiques du système.

L'équation du mouvement est :

$$M \cdot d\ddot{\theta} + C \cdot d\dot{\theta} + K \cdot d\theta = M_{ext}$$

Où :

M est la matrice de masse/inertie

C est la matrice d'amortissement

K est la matrice de rigidité

M_{ext} est le vecteur de couple appliqué par des forces extérieures

$d\theta$ est le vecteur de déplacement angulaire

$$d\theta = \begin{pmatrix} d\theta_1 \\ d\theta_2 \end{pmatrix}$$

- Matrice de masse : on a trouvé la matrice de masse à partir de l'énergie cinétique du système. Cette matrice dépend de l'angle θ_2 , mais pas de θ_1 .

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{12} & m_{22} \end{bmatrix}$$

- Matrice de raideur : on a calculé l'énergie de déformation pour l'obtenir. Ainsi la matrice de raideur K est,

$$K = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix}$$

Connaissant ces deux matrices, on peut identifier les fréquences de résonance et modes du système :

$$\det(-M \cdot \omega^2 + K) = 0$$

On résout le déterminant et met dans l'équation les fréquences propres connues pour une valeur donnée de θ_2 pour obtenir K_1 et K_2 .

Une fois qu'on connaît la matrice de rigidité, on peut obtenir les fréquences propres pour chaque valeur de θ_2 . Et pour chaque paire de fréquences propres il y a deux modes propres, qui sont normalisés avec la matrice de masse.

$$(-\omega^2 \cdot M + K) \cdot \varphi = 0 ;$$

$$\varphi_k = \begin{pmatrix} \varphi_{1k} \\ \varphi_{2k} \end{pmatrix}; \text{ vector du mode propre}$$

Ensuite, on a fait l'analyse des vibrations forcées. On devait obtenir la matrice des fonctions de transfert et le déplacement provoqué par les forces extérieures.

- Matrice de fonction de transfert : comme on a supposé amortissement proportionnel et les modes sont normalisés, on a utilisé les formules suivantes pour obtenir la matrice de fonction de transfert, élément par élément.

$$h_{ij}(\omega) = \sum_{k=1}^2 \varphi_{ik} \cdot \varphi_{jk} \cdot h_k(\omega)$$

$$h_k = \frac{1}{\omega_k^2 - \omega^2 + 2j \cdot \varepsilon_k \cdot \omega_k \cdot \omega}; \quad \varepsilon_k = \frac{1}{2} \cdot \beta \cdot \omega_k$$

- Forces externes/vecteur de couple : on a supposé une force appliquée à l'extrême du bras robotique. Pour introduire cette force dans l'équation, on a calculé la puissance fait par la force et la comparé avec une puissance causée par des couples, puis, obtenu le vecteur de couple.
- Déplacement de l'extrémité du bras : la première étape pour calculer le déplacement a consisté à multiplier le vecteur de couple et la matrice de fonction de transfert pour obtenir le déplacement angulaire provoqué par la force externe.

Puis, on a traduit ce déplacement en coordonnées cartésiennes et obtenu le déplacement total, qui est égal à la racine carrée de $dx^2 + dy^2$ (déplacements en x et y). Ce déplacement ne dépend que des variables $d\theta_1, d\theta_2$ et θ_2 .

Aussi, on calcule les composants du déplacement dans les axes x' (axial) et y' (radial).

2.4.2.- Implémentation sur Python

Le logiciel utilisé pour implémenter le système dans l'ordinateur est Python, dans lequel deux scripts ont été créés.

Le premier obtient les valeurs de raideur, comme discuté antérieurement. Les entrées sont des longueurs, des masses, θ_2 l'angle, et les fréquences propres supposées pour ces conditions. Les équations sont résolues avec une méthode de moindres carrés, qui procède d'une manière itérative.

Après avoir calculé K1 et K2, on a utilisé ces raideurs pour obtenir les fréquences propres avec la fonction de valeurs propres de Python Scipy pour vérifier si notre résultat est correct.

Le deuxième script est plus complexe. Les entrées principales sont les masses, la rigidité, le coefficient d'amortissement proportionnel et les longueurs. Les sorties sont les suivantes :

1. Fréquences propres en fonction de θ_2 : on obtient un graphique des fréquences propres du système pour un ensemble de θ_2 de 0° à 360° . Les matrices de masse et de rigidité sont définies et introduites dans une fonction de valeurs propres de Python pour trouver les fréquences propres à chaque position.
2. Modes propres en fonction de θ_2 : on obtient deux graphiques des modes M normés en fonction θ_2 , un pour chaque fréquence propre. Les équations des modes sont résolues avec une fonction de Python. Cette fonction étant itérative, les résultats des itérations

précédentes sont utilisés comme points initiaux pour réduire le temps de résolution et assurer la continuité des résultats.

3. Fonctions de transfert en fonction de θ_2 et la fréquence du système : un graphique 3D pour chaque composant de la matrice de fonction de transfert (4 au total). Le gain des fonctions de transfert est exprimé en décibels.
4. Le déplacement total en fonction de θ_2 et θ_F (angle entre la force et la barre L1): déplacement total produit par une force unitaire à une fréquence $\omega=400$ rad/s. Cette fréquence a été choisie, car elle est dans la gamme de fréquences à laquelle on pourrait usiner une pièce, comme il est étudié à la section 2.3.1.

2.2.4. Résultats et analyse

On a utilisé les scripts pour simuler le comportement mécanique d'un système mécanique de caractéristiques similaires à celles du KUKA KR22 R1610.

Premièrement, on a trouvé les constantes de raideur pour les données suivantes, en utilisant le premier script :

- $L1 = 1$ m, $L2 = 0,6$ m
- $M1 = 150$ kg, $M2 = 100$ kg
- $\theta_2 = 45^\circ$

Le résultat a été:

```
Least squares solution:
k1 = 27266938.850645103 and k2 = 2250157.384181619
Checking if we obtain the supposed eigen frequencies with this k values:
(49.9999999999999+0j) (100.00000000000003+0j)
With the Scipy Eigenvalues method
```

Figure 2. Détermination des K1 et K2

Après vérification, on a observé que les valeurs K1 et K2 étaient assez précises, et on leur a introduit dans le deuxième script, obtenant les résultats suivants:

- Fréquences propres:

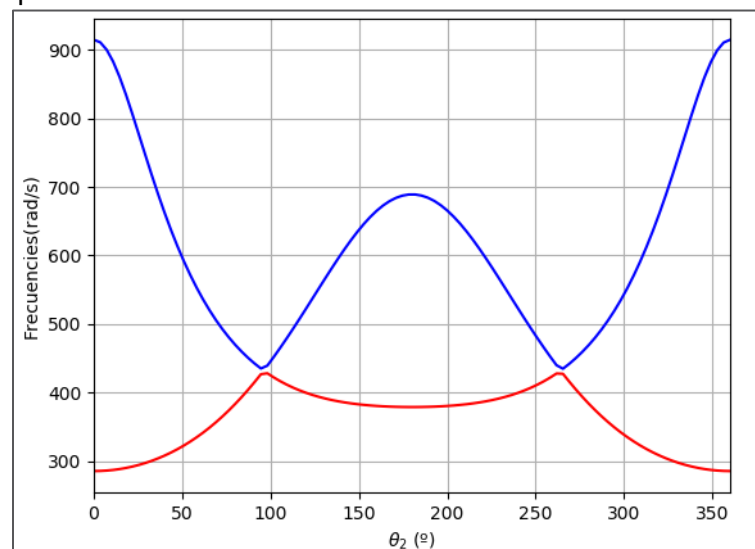


Figure 3. Fréquences propres en fonction de θ_2

- Modes propres:

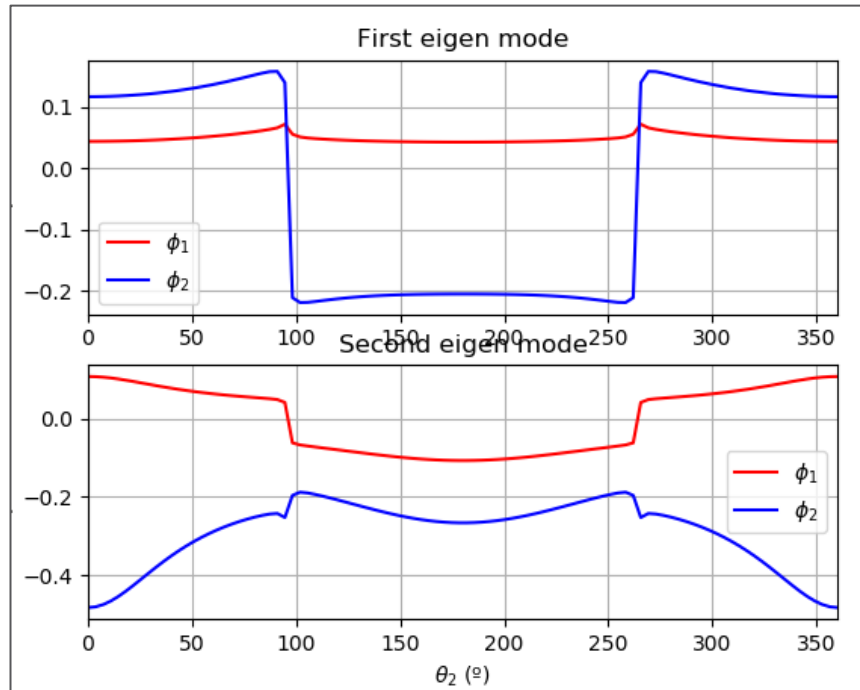


Figure 4. Modes propres (premier et second) en fonction de θ_2

- Gain des fonctions de transfert:

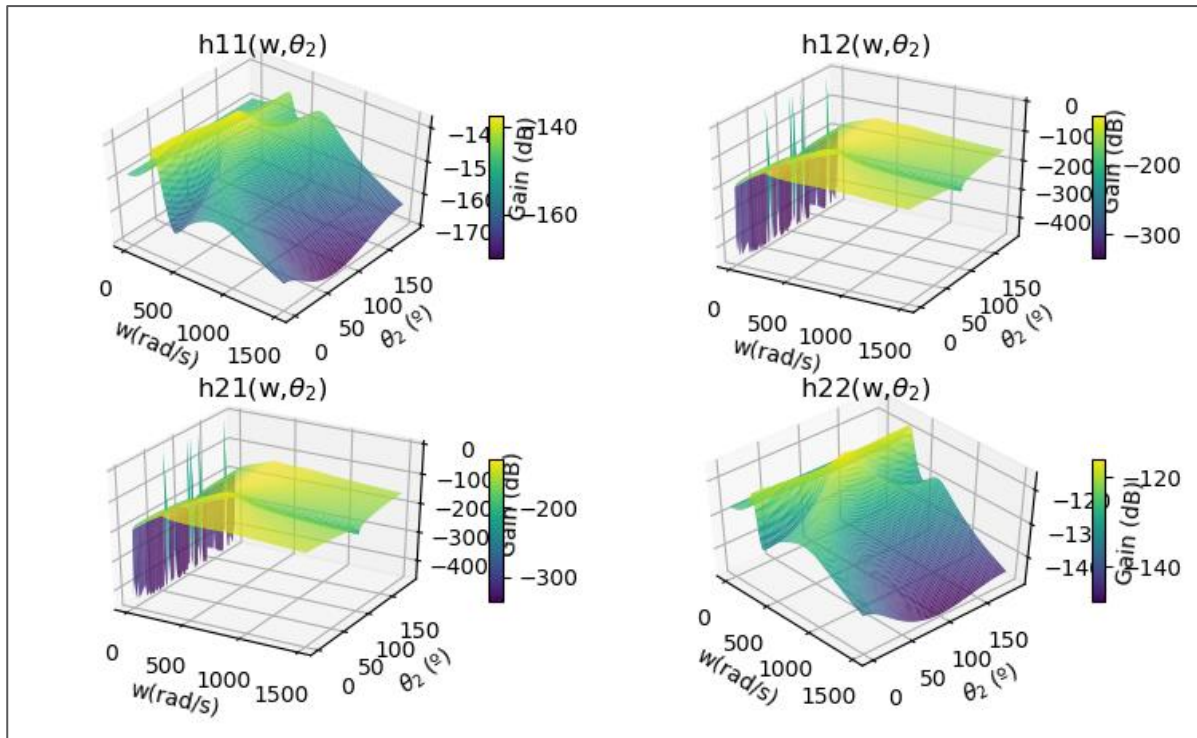


Figure 5. Gain des fonctions de transfert

- Déplacement produit par une force unitaire:

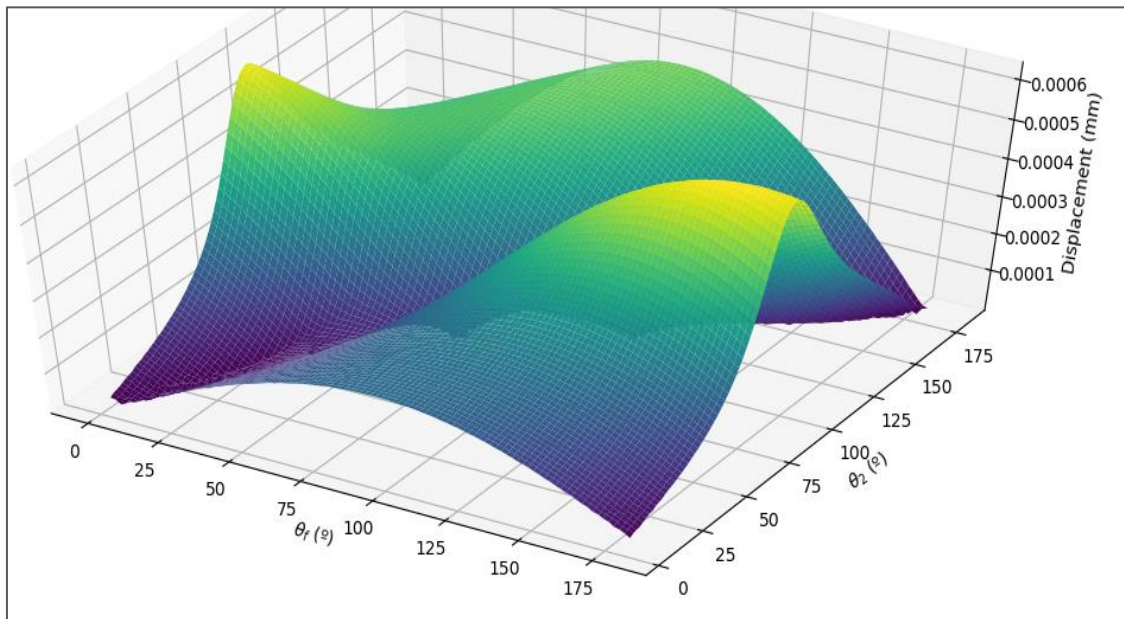


Figure 6. Déplacement produit par une force unitaire de 400 rad/s

- Déplacement dans les directions x' et y' :

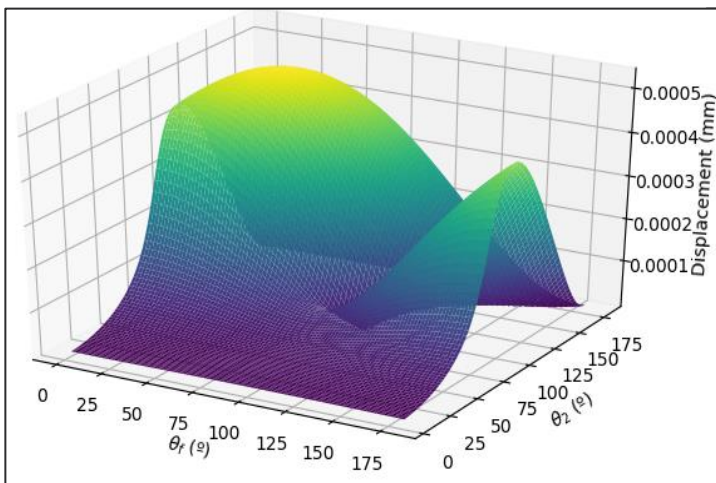


Figure 7. Déplacement produit par une force unitaire de 400 rad/s dans la direction y'

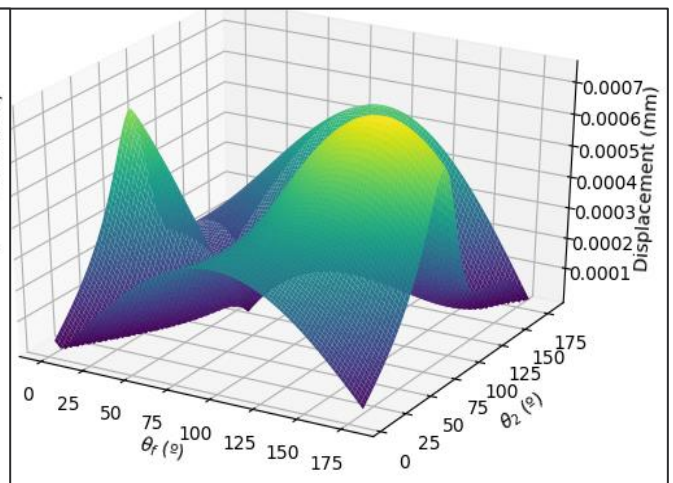


Figure 8. Déplacement produit par une force unitaire de 400 rad/s dans la direction x'

Dans le graphique du gain on a observé que le gain se réduit à partir de fréquences supérieures aux fréquences de résonance. Par ailleurs, le graphique du déplacement montre qu'il faut éviter valeurs de θ_2 autour de 90° quand la force est parallèle à la barre 1. En revanche, il est mieux d'utiliser une position où la force soit parallèle à la barre 2.

2.4.4.- Réalisation d'un modèle plus complexe

Le modèle mécanique montré ci-dessus part d'hypothèses trop simples. En conséquence, on a conçu un modèle où les masses, les centres de masse et les inerties des barres sont indépendants entre eux.

Toutes les équations sont les mêmes que dans le modèle plus simple, sauf la matrice de masses. On la trouve en calculant l'énergie cinétique, comme avant, mais avec des formules plus complexes.

Finalement, on a écrit un programme en Python, égal au précédent, mais en utilisant la nouvelle matrice de masses.

2.5.- Identification des paramètres du système

Afin d'améliorer la précision du modèle mécanique il faut connaître des valeurs telles que les masses, les raideurs, les positions des centres de masse ou les inerties. Pourtant, ces magnitudes ne sont pas généralement données par le fabricant

2.5.1.- Démarche d'identification des paramètres

On a développé sur Python une démarche d'identification des paramètres du modèle mécanique à partir des fréquences de résonance. Les données d'entrée sont :

- Les fréquences de résonance dans plusieurs positions (θ_2), obtenues expérimentalement : $\omega_{exp,i,j}$
- Les longueurs des barres L1 et L2
- Le vecteur de paramètres pour la première itération (supposition initiale) :

$$x_0 = \{m1, m2, k1, k2, l_{g1}, l_{g2}, I1, I2\}$$

Avec ces données on calcule les fréquences de résonance selon notre modèle $\omega_{i,j}$, et leur compare avec les fréquences réelles. On calcule l'erreur carrée totale :

$$F(\omega_{exp}, \omega) = \sum_{i=1}^n [(\omega_{exp,i,1} - \omega_{i,1})^2 + (\omega_{exp,i,2} - \omega_{i,2})^2]$$

Où n est le nombre de positions pour lesquelles on connaît les fréquences.

Ensuite, une fonction de moindres carrées est implémentée pour trouver un vecteur de paramètres qui réduise le plus possible l'erreur carrée totale.

- Supposition initiale : on utilise le vecteur x_0
- Équations : on a 2 équations pour chaque position θ_2

$$eq(i,j) = (\omega_{exp,i,j} - \omega_{i,j})^2$$
- Conditions : afin que la solution soit physiquement possible on a implémenté certaines restrictions. La première est que toutes les valeurs doivent être positives. La seconde est que les centres de masse doivent rester dans les barres. En dernier lieu, les inerties ne peuvent pas être plus grandes que $\frac{1}{4} \cdot m1 \cdot L1^2$.

Cependant, des autres conditions ou équations pourraient être ajoutées pour améliorer la démarche. Par exemple, la masse totale du robot.

La solution est un nouveau vecteur de paramètres x_{id} à partir duquel on calcule des nouvelles fréquences de résonance ω_{id} . L'erreur carrée entre ω_{id} et ω_{exp} doit être minimum.

2.5.2.- Analyse de la démarche

On a testé la démarche dans plusieurs conditions. Les objectifs principaux sont d'étudier la convergence de la démarche vers une solution, l'erreur de cette solution et le nombre d'itérations nécessaires. La méthode suivie dans les tests a été la suivante :

1. On a obtenu les fréquences de résonance dans plusieurs positions, pour un certain vecteur de paramètres, avec le modèle mécanique déjà développé. Ce vecteur et fréquences ont été considérées comme réelles.
2. Ensuite, on a fait des déviations sur le vecteur de paramètres original. En premier lieu, des déviations dans un seul composant du vecteur, c'est-à-dire une masse ou une inertie. Par exemple :

$$m1^* = m1 * d$$

$$x_1 = \{m1^*, m2, k1, k2, l_{g1}, l_{g2}, I1, I2\}$$

En second lieu, on a fait des déviations aléatoires sur le vecteur original, telles que :

$$x_1 = x_0 + (d - 1) \cdot rand(8,1) \cdot x_0$$

3. Puis, on a analysé l'erreur dans les fréquences de résonance produite par ces déviations. On a utilisé l'erreur RMSE (Root Mean Square Error) :

$$\varepsilon_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 \left(\frac{\omega_{i,j} - \omega_{exp,i,j}}{\omega_{exp,i,j}} \right)^2}{2 * n}}$$

4. Finalement, on a exécuté la démarche d'identification à partir du nouveau vecteur, et ensuite analysé l'erreur dans les fréquences de résonance, le vecteur identifié x_{id} et le nombre d'itérations.

On a testé la démarche avec des ensembles de fréquences de résonance obtenues pour angles θ_2 de 40° jusqu'à 140°, auxquelles il est plus possible qu'on utilise un robot. On a commencé avec 4 positions et continué jusqu'à 17.

Pourtant, on a observé qu'il n'y a pas de la convergence vers une unique solution, et que la différence entre x_{id} et le vecteur original est proportionnelle à la déviation appliquée.

Mais, au même temps, ces solutions trouvées pourraient être correctes parce que l'erreur dans les fréquences de résonance est réduite.

À raison de cela, on a décidé d'analyser en détail le système d'équations utilisé. Les fréquences dépendent des composants de la matrice de masse et des raideurs. Simultanément, les composants de la matrice de masse dépendent de certaines valeurs constantes et de l'angle θ_2 :

$$\begin{cases} m11 = a \cdot \cos^2(\theta_2) + 2b \cdot \cos(\theta_2) + c \\ m12 = a \cdot \cos^2(\theta_2) + b \cdot \cos(\theta_2) + d \\ m22 = a + d \end{cases}$$

$$\text{Où ces constantes sont } \begin{cases} a = m2 \cdot l_{g2}^2 \\ b = m2 \cdot L1 \cdot l_{g1} \\ c = I1 + I2 + m2 \cdot L1^2 + m1 \cdot l_{g1}^2 \\ d = I2 \end{cases}$$

Même si on peut obtenir les valeurs des constantes à partir de la démarche, il faudrait résoudre un système de 4 équations avec 6 inconnus pour avoir tous les paramètres. Dans ce cas, il est

impossible d'avoir solution unique au problème. Si on veut résoudre ce système d'équations il faut connaître au moins deux de ces variables : l_1 , m_1 et lg_1 .

Après, on a essayé la démarche en faisant la supposition de que les valeurs m_1 et lg_1 sont constantes. Cependant, il n'y a pas de la convergence vers une unique solution encore, quelle que soit la longueur de ω_{exp} .

Dans ces conditions, l'erreur dans les fréquences de résonance après l'identification est minime quelque soit la supposition initiale.

Alors, on a déduit qu'il faudrait ajouter d'autres conditions pour avoir une solution unique. Par exemple, si on suppose que m_1 , m_2 et lg_1 sont connus.

D'un autre côté, le nombre d'itérations requis est normalement autour de 20 quand il n'y a pas une solution unique. Quand la solution est unique, le nombre d'itérations est souvent entre 40 et 70. En tout cas, la fonction de moindre carrés est limité par défaut à un maximum de 250 itérations.

2.5.3.- Modification de la démarche

Après ces conclusions, on a créé un autre script avec une démarche qui identifie les raideurs, et les variables a , b , c et d . Les données d'entrée sont les mêmes que dans la démarche antérieure, mais les résultats sont les raideurs, les constants et les nouvelles fréquences de résonance selon le modèle. Dans ce cas, l'erreur est aussi minime.

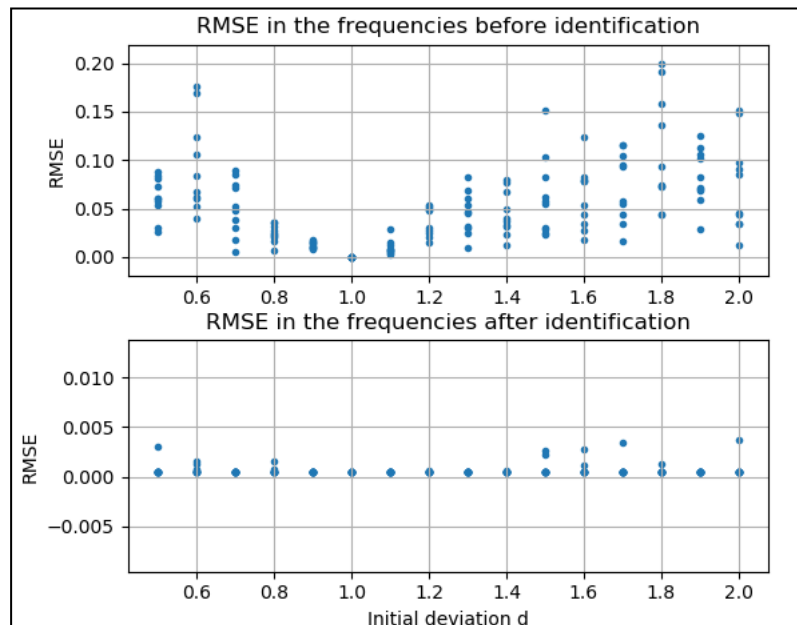


Figure 9. RMSE avant et après l'identification, en fonction de la déviation initiale, avec 4 positions.

Cette démarche ne donne pas une solution encore, mais peut être utile pour une première estimation. Afin d'avoir une solution unique il faudrait connaître ou soupçonner la valeur de a , b , c , d ou d'un raideur.

2.6.- Analyse modale

Le but de l'analyse modale du robot est de trouver ses fréquences de résonance et ses modes dans certaines positions, ainsi que de vérifier la plausibilité du modèle mécanique proposé et la validité des hypothèses faites. Le robot analysé a été le KUKA KR30 HA-C.

2.6.1.- Recherche bibliographique

Les études qu'on a lues [6,7,8] montrent que dans robots industriels il y a souvent une première fréquence de résonance autour de 13-20Hz, une deuxième autour de 50Hz et une autre à 100Hz environ. Pourtant, ce sont seulement des références.

2.6.2.- Hammer Impact Test

Le Hammer Test est une méthode expérimentale de calculer les fréquences de résonance et les modes d'une structure, ainsi que sa fonction de transfert. La procédure consiste à faire des impacts avec un marteau dans la structure, sur laquelle il y a des accéléromètres. Les mesures des vibrations et de la force d'impact sont sauvegardées dans un ordinateur, puis analysées.

Les matériaux utilisés sont trois accéléromètres, un marteau et un module d'acquisition, tous connectés à un ordinateur avec Matlab.



Figure 10. Disposition des éléments pendant les tests.

On a fait trois tests. Pendant les deux premiers tests, le robot avait un outil de soudage laser d'un poids considérable, attaché à l'extrémité, qui a été retiré pour le troisième test. Les accéléromètres ont été placés sur le poignet du robot le premier test, puis sur le milieu du bras et orientés dans les directions de l'espace : X (parallèle au bras), Y (perpendiculaire au bras, dans le plan du robot) et Z (perpendiculaire au plan du robot).

La procédure a consisté en initialiser un script de Matlab pour l'acquisition des données et faire entre 4 et 6 coups avec le marteau dans un point du robot. Tous ces données ont été enregistrées dans un fichier, pour son analyse postérieure. Par ailleurs, on a noté les conditions de l'expérience, l'heure et le fichier créé. Ensuite, on a répété le même procédé plusieurs fois, dans toutes les directions et pour différentes positions du robot.

2.6.3- Essais vibratoires avec excitations forcées

Les mesures faites avec le Hammer Impact Test n'ont été suffisamment précises. À raison de cela, une autre méthode d'analyse modal a été utilisée de façon complémentaire, dans les mesures faites sur le robot sans outil.

Le procédé consiste à faire vibrer le robot avec un moteur linéal situé à l'extrémité du bras, à une fréquence déterminée. Les vibrations sont enregistrées par 4 accéléromètres, placées sur le moteur, sur l'extrémité du bras et deux dans les directions X, Y ou Z du Hammer Impact Test.

Pour chaque configuration du robot, on a délimité des intervalles dans lesquels on pouvait trouver une fréquence de résonance (avec le Hammer Impact Test), puis on a fait un balayage fréquentiel dans ces intervalles avec une précision de 0.25 Hz.

Le moteur ne pouvait pas aller au-dessus de 50 Hz, donc on a réalisé ces essais seulement autour des deux premières fréquences de résonance. L'ensemble de fréquences analysées n'est pas grand en comparaison avec les Hammer Tests, mais la précision est bien plus haute.

2.6.4- Post-traitement et résultats

Le post-traitement des données expérimentales a été réalisé avec scripts de Matlab, dont une partie déjà conçue au laboratoire.

Pour le Hammer Impact Test on a vérifié que les coups avec le marteau soient propres (sans rebond), puis on a analysé des graphiques qui montraient le module et la phase des fonctions de transfert du robot dans chaque direction. Les points où il y a des pics prononcés peuvent être des fréquences de résonance. Un autre graphique montre la cohérence des mesures, entre 0 et 1. Habituellement, si la cohérence est supérieure à 0.8, les mesures sont considérées plausibles.

Dans le cas des vibrations forcées, on a fait la transformée de Fourier des fonctions de transfert et noté le module et la phase à la fréquence d'excitation.

- Configuration avec l'outil de soudage : dans ce cas on a trouvé de fréquences de résonance autour de 12, 67, 84 et 104 Hz. Cependant, les résultats n'ont pas été précis et la cohérence est basse, notamment dans les directions X et Z. Alors, on n'a pas pu trouver les modes avec exactitude.
- Configuration sans l'outil de soudage : en cette occasion, les essais avec vibrations forcées ont permis de trouver les modes et les fréquences avec précision, pour chaque configuration. Ci-dessous un tableau qui montre les fréquences de résonance, et les fonctions de transfert (module et phase) entre le moteur (M) et les directions X, Y, Z.

Angle du coude (°)	Fréquence (Hz)	Module			Phase (°)		
		MX	MY	MZ	MX	MY	MZ
128.6	12.75	0.6762	0.1319	0.159	104	99	-43
	28.75	0.3057	0.6936	0.092	72	-102	98
91.7	12.25	1.002	0.2478	0.081	47	-129	-130
	27.5	0.0628	0.7082	0.038	64	-82	134
41.1	12	0.6848	0.6466	0.123	55	-124	-122
	27	0.2972	0.1529	0.044	-70	-84	118

Par ailleurs, on peut afficher les graphiques des fonctions de transfert autour des fréquences de résonance. Par exemple :

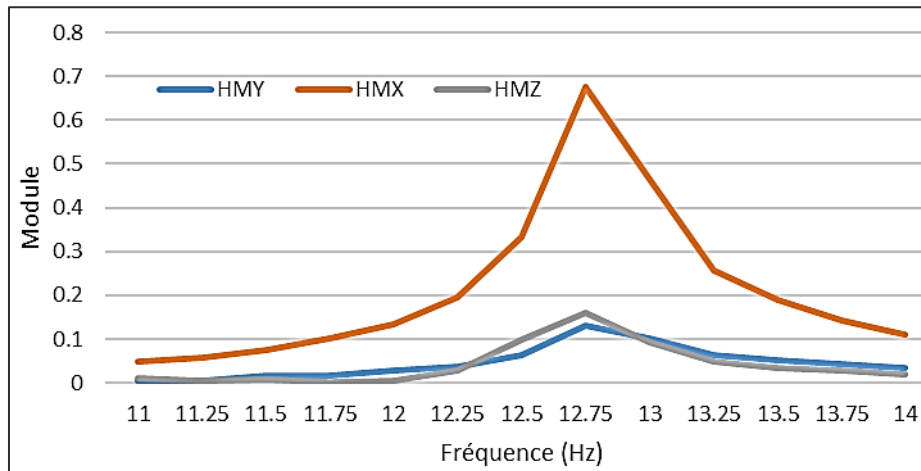


Figure 11. Module des fonctions de transfert autour de 12.75 Hz, avec un angle du coude de 128.6°

Ces résultats montrent aussi, que l'influence de la direction Z (hors plan) est réduite en comparaison avec X et Y, donc modéliser le robot comme un système plan ne causerai pas beaucoup d'erreur, au moins dans la configuration sans outil.

2.6.5.- Paramètres du KUKA KR30 HA-C

Une fois que les fréquences de résonance ont été obtenues, la démarche d'identification déjà conçue peut être utilisée pour trouver les paramètres du KUKA KR30 HA-C.

Afin d'avoir une solution unique on a supposé que la barre 1 (avant-bras) avait le centre de masses au milieu, sa densité était constante et la masse était connue. Le poids total du robot est de 665 kg, donc on a supposé que $m_1=275$ kg (près de la moitié du poids total). Les longueurs des barres seraient $L_1=0.85$ m et $L_2=0.99$ m [9].

On a exécuté la démarche avec différents vecteurs initiales x_0 . Cependant, elle n'est pas arrivée à trouver des résultats physiquement possibles, même avec d'autres valeurs de masse, inertie ou position du centre de masses de l'avant-bras. En analysant le modèle, on a observé que les fréquences de résonance devaient changer d'une façon différente à celle qu'on a observée expérimentalement.

Ainsi, il y a quelques possibilités à prendre en compte : que le modèle conçu soit insuffisant pour modéliser le robot, qu'on n'ait pas trouvé les fréquences et modes de résonance corrects ou, encore, que le modèle ait des erreurs (ce qui est improbable). Dans les prochaines investigations, il faudrait faire des essais statiques et d'autres essais avec vibrations forcées afin de compléter la recherche.

3.- Conclusions

3.1.- Objectifs atteintes

La plupart des objectifs du projet ont été accomplis : la modélisation du système mécanique, la sélection d'un robot, la proposition des broches pour l'usinage, la conception de la démarche d'identification des paramètres du système et trouver les fréquences de résonance du robot.

Malheureusement, on a failli trouver les paramètres du KUKA KR30 HA-C de façon exacte avec la démarche d'identification, et la validité du modèle n'a pu être vérifiée expérimentalement. Afin de résoudre ces questions, plus d'essais vibratoires avec excitations forcées et des tests statiques seront réalisés pendant les recherches suivantes.

En conclusion, ce projet a donné les fondements théoriques, les modèles, les informations et les résultats des expériences à partir desquels des prochaines études peuvent continuer la recherche.

3.2.- Points critiques et difficultés

Une des tâches plus difficiles a été la recherche des broches et des paramètres du perçage. D'un côté, l'offre de broches est très limitée et par ailleurs, des caractéristiques importantes comme la vitesse minimale n'apparaissent pas normalement dans les catalogues.

De plus, l'impossibilité de trouver une solution unique avec la démarche d'identification a été une complication qu'on n'attendait pas, ainsi que ne pas obtenir les paramètres du robot à partir des fréquences trouvées par des expériences.

Enfin, les Hammer Impact Tests n'ont pas donné les fréquences et modes de résonance avec précision. Cependant, cette difficulté a été résolue avec succès en réalisant les essais vibratoires avec excitations forcées, qui ont donné des résultats bien plus précis.

3.3.- Compétences acquises

D'abord, grâce à ce projet j'ai pu me familiariser avec le travail de la recherche scientifique et, notamment, faire partie de la réalisation des expériences au laboratoire.

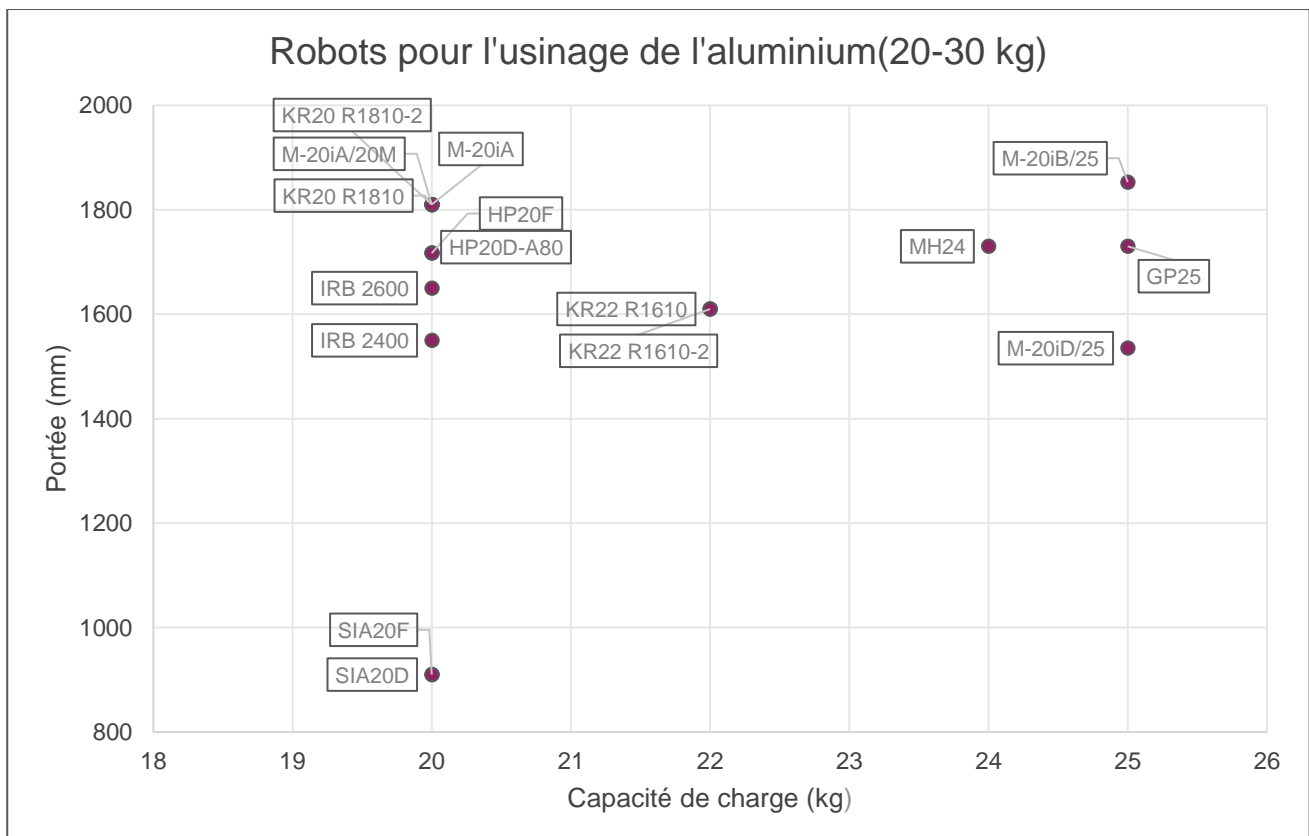
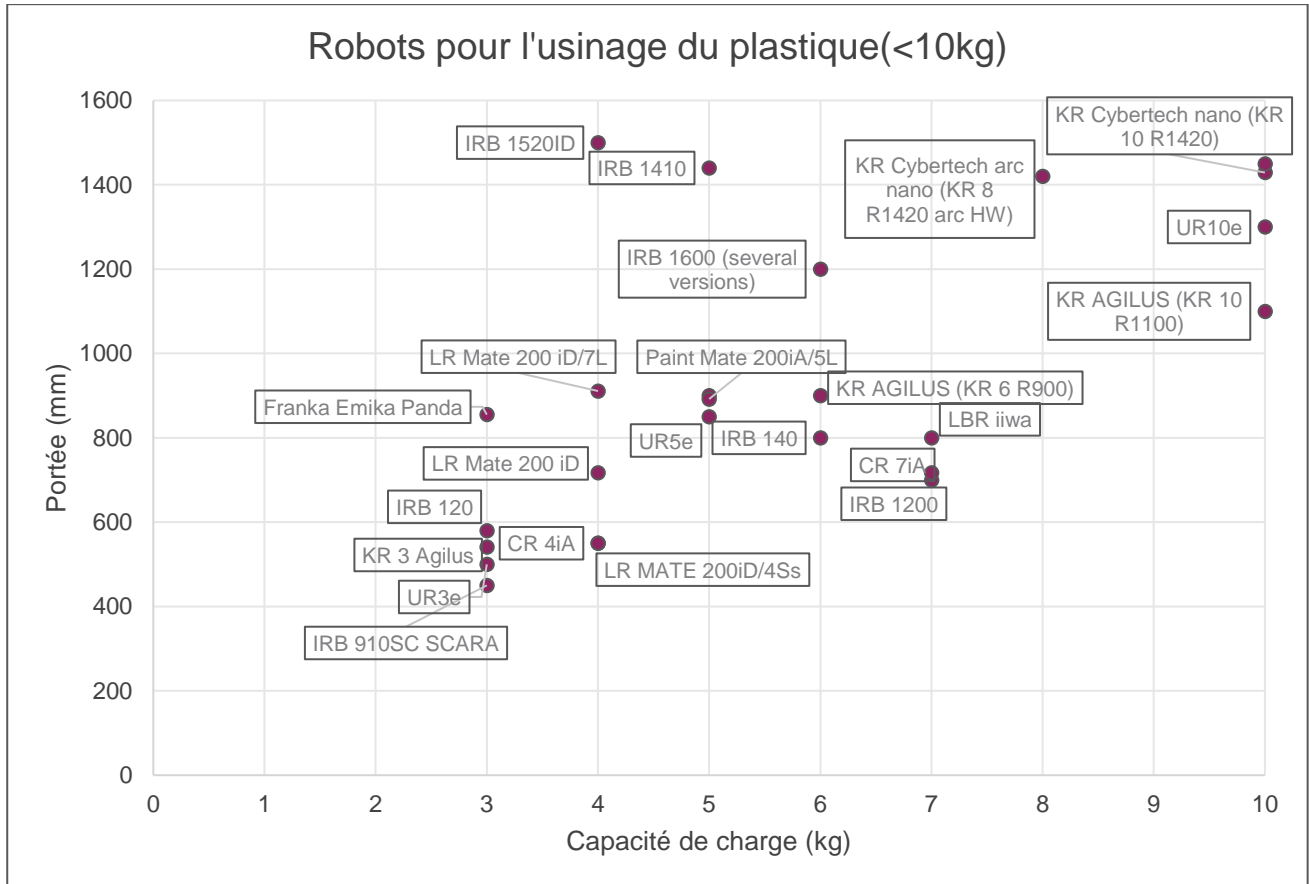
Je me suis familiarisé également avec des logiciels telles que Python et Matlab et j'ai acquis une meilleure connaissance de l'usinage, des robots industriels et des vibrations et tout cela, dans un endroit professionnel et orienté vers le monde réel.

Enfin, lors de la rédaction du rapport et du travail en général j'ai beaucoup amélioré mon français, oral et écrit.

4.- Bibliographie

- [1] Viking Drill, Vitesses de coupe recommandées, <http://www.vikingdrill.com/viking-Drill-FeedandSpeed.php>
- [2] ITC recommended drilling – speeds and feeds, 2019, https://www.itc-ltd.co.uk/wp-content/uploads/2015/11/drilling_speeds_and_feeds.pdf
- [3] Ingersoll Cutting Tools technical guide, 2017, https://www.ingersoll-imc.de/fileadmin/user_upload/user_upload/pdfs/Handbuecher/THB_E_2017.pdf
- [4] Proxxon 20 165, site official, 2019, <https://www.proxxon.com/fr/micromot/20165.php>
- [5] C41/47-C-3822-200 broche moteur, mai 2019, <https://frs-cnc.com/motores/electromandrin/479/nc47dber25c-detail>
- [6] Jacob Huckaby et Henrik I. Christensen, “Dynamic Characterization of KUKA Light-Weight Robot Manipulators”, Technical Report GT-RIM-CR-2012-001
- [7] BISU Claudiu, CHERIF Mehdi, GERARD Alain and K’NEVEZ Jean-Yves, “Dynamic behavior analysis for a six axis industrial machining robot”, 2011
- [8] Leonasio, M., Villagrossi, E., Beschi, M., Marini, A., Bianchi, G., Pedrocchi, N., Isaev, A., “Vibration analysis of robotic milling tasks”, *Procedia CIRP*, 67, 262–267, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.210>
- [9] KUKA KR30 HA-C datasheet, 2019, https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/48ec812b1b2947898ac2598aff70abc0/spez_kr_30_60_ha_en.pdf

Annexe A: Classement des robots par portée et capacité de charge



Annexe B: paramètres du perçage du plastique

Vitesse de coupe, Vc (m/min)	Vitesse de broche, n (rpm)	Vitesse de pénétration, Vf (mm/min)	Taux d'enlèvement de matière, Q (cm ³ /min)	Taux spécifique d'enlèvement de matière, QSP (cm ³ /KWmin)	Force de coupe spécifique, KC (N/mm ²)	Puissance de coupe, PC (kW)	Force de coupe, Fc (N)	Force d'avance, Ff (N)	Couple, T (Nm)
200	6366	1909	150	250	240	0,6	180	158	0,9
91,5	2912	873	68	250	240	0,27	180	158	0,9
61	1941	582	45	250	240	0,18	180	158	0,9
30,5	970	291	22	250	240	0,091	180	158	0,9
200	6366	1909	150	100	600	1,5	450	397	2,25
91,5	2912	873	68	100	600	0,68	450	397	2,25
61	1941	582	45	100	600	0,45	450	397	2,25
30,5	970	291	22	100	600	0,22	450	397	2,25

(*) Paramètres de perçage pour diamètre D = 10mm, z = 2 dents, taux d'avance f = 3mm/rev et angle de point KR = 118 °.

Annexe C : paramètres du perçage de l'aluminium

Vitesse de coupe, Vc (m/min)	Vitesse de broche, n (rpm)	Vitesse de pénétration, Vf (mm/min)	Taux d'enlèvement de matière, Q (cm ³ /min)	Taux spécifique d'enlèvement de matière, QSP (cm ³ /KWmin)	Force de coupe spécifique, KC (N/mm ²)	Puissance de coupe, PC (kW)	Force de coupe, Fc (N)	Force d'avance, Ff (N)	Couple, T (Nm)
91,5	2912	873	68	52	1153	1,32	865	764	4,32
61	1941	582	45	52	1153	0,88	865	764	4,32
250	7957	2387	187	52	1153	3,60	865	764	4,32
70	2228	668	52	52	1153	1,00	865	764	4,32
76	2419	725	57	52	1153	1,09	865	764	4,32
91,5	2912	873	68	70	857	0,98	642	567	3,21
61	1941	582	45	70	857	0,65	642	567	3,21
250	7957	2387	187	70	857	2,67	642	567	3,21
70	2228	668	52	70	857	0,75	642	567	3,21
76	2419	725	57	70	857	0,81	642	567	3,21

(*) Paramètres de perçage pour diamètre D = 10mm, z = 2 dents, taux d'avance f = 3mm/rev et angle de point KR = 118 °.