POLYPUBLIE

Procédure assistée par robot de caractérisation structurelle et compensation de la déformation d'un outillage aérospatial

Matis Audart

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

Date	2025
Type	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis Mémoire de maîtrise/Master's thesis
URL de PolyPublie PolyPublie URL	https://publications.polymtl.ca/68483/
Conditions d'utilisation Terms of use	© Tous droits réservés / All rights reserved
Référence Citation	Audart, M. (2025). Procédure assistée par robot de caractérisation structurelle et compensation de la déformation d'un outillage aérospatial [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/68483/

Détails de la thèse
Thesis details

Directeurs de recherche Advisors	Jérôme Vétel
Programme Program	Génie mécanique

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal
https://publications.polymtl.ca

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
affiliée à l'Université de Montréal

Procédure assistée par robot de caractérisation structurelle et compensation de la déformation d'un outillage aérospatial

MATIS AUDART
Département de génie mécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise en sciences appliquées*
Génie mécanique

Août 2025

© Matis Audart, 2025.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Procédure assistée par robot de caractérisation structurelle et compensation de la déformation d'un outillage aérospatial

présenté par **Matis AUDART**
en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise en sciences appliquées*
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Aurelian VADEAN, président
Jérôme VETEL, membre et directeur de recherche
Abolfazl MOHEBBI, membre

DÉDICACE

Je me souviens : Live Free or Die
Les parties de UNO vont me manquer
Et à tous ceux sans qui, tout reste possible

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier chaleureusement le CNRC pour le soutien financier et technique apporté tout au long de la réalisation du projet. Cet appui a été déterminant, tant pour la création du projet, que pour la mise en œuvre concrète des différentes étapes et que pour l'accès aux ressources et équipements nécessaires. Votre engagement a permis de mener ce projet dans les meilleures conditions possibles.

Je tiens également à remercier ceux dont l'accompagnement constant, l'implication et les conseils avisés m'ont permis de surmonter les obstacles et de conclure le projet.

RÉSUMÉ

L'utilisation de robots dans les domaines de l'usinage et de la fabrication est en expansion : les robots ont une grande flexibilité et leur grand nombre de degrés de liberté autorise la fabrication de pièces complexes. Cependant, les robots sont moins rigides que les machines-outils à commande numérique traditionnelles et ont donc tendance à se déformer. Cela entraîne des erreurs de positionnement par rapport à la trajectoire planifiée. La calibration robot, c'est-à-dire l'ensemble des processus permettant d'améliorer la précision des robots, constitue donc un problème d'intérêt pour les chercheurs.

Les procédures de calibration sont orientées pour compenser les déformations du robot. Mais la pièce usinée ou manipulée peut également subir des déformations provoquées par les efforts mis en jeu dans le procédé considéré. Dans le secteur aéronautique où les tolérances sont serrées, ces déformations peuvent entraîner la non-conformité des pièces. C'est le cas par exemple lors de l'assemblage des ailes d'avion où les différents éléments peuvent se déformer, ce qui peut nuire à la qualité finale de l'assemblage.

Le procédé de placement de fibres automatisé pour la fabrication de pièces composites aéronautiques nécessite des outillages, dont la production représente une part majeure du coût pour ce procédé. Ces outillages doivent présenter une bonne qualité de surface et des propriétés mécaniques adaptées, tout en restant légers pour faciliter leur manipulation. Caractériser le comportement mécanique de ces outillages peut permettre d'en optimiser la conception, d'en réduire le poids et par conséquent d'en diminuer le coût de fabrication.

Ces deux exemples montrent la pertinence d'étendre les processus de calibration à la compensation des déformations, non seulement des robots, mais aussi des pièces impliquées dans les procédés étudiés.

L'objectif de ce mémoire est de développer une procédure robotisée de caractérisation structurelle et de compensation de la déformation d'un outillage aérospatial. Cette procédure nécessite un outil de mesure de déplacements, dont les choix de conception sont présentés et justifiés. Cet outil est capable d'appliquer un effort tridimensionnel et il intègre la métrologie laser pour déterminer le déplacement induit par cet effort. Il est utilisable directement sur site industriel et permet de caractériser la déformation sans modifier structurellement la pièce étudiée. Son fonctionnement est validé sur un outillage de placement de fibres automatisé spécialement conçu à des fins de recherche. Il est montré que les déplacements générés avec le dispositif expérimental ne sont pas assez significatifs sur les axes transversaux pour conclure sur le fonctionnement du système. En revanche, on montre qu'on est capable de mesurer les déplacements sur l'axe vertical avec une erreur moyenne globale de 7 % par rapport aux

valeurs prévues par la simulation par éléments finis prises comme référence.
Les données efforts-déplacements générées sont ensuite utilisées pour prédire le comportement mécanique de l'outillage. 6 modèles sont comparés et finalement la méthode par interpolation des coefficients est retenue, car elle permet de prédire les déplacements selon l'axe Z avec une erreur moyenne de 4 %. Un protocole est finalement énoncé et propose une méthode pour générer expérimentalement des mesures de déplacements avec l'outil conçu, les utiliser pour entraîner le modèle de prédiction de comportement retenu, et ainsi être capable de caractériser structurellement l'outillage étudié.

ABSTRACT

The use of robots in machining and manufacturing is steadily increasing. Thanks to their flexibility and numerous degrees of freedom, robots are well-suited for producing complex parts. However, unlike traditional CNC machines, robots lack rigidity and are more prone to deformation, which can lead to positioning errors relative to their planned trajectories. This makes robot calibration—a set of methods aimed at improving robotic accuracy—a topic of significant interest for researchers.

Calibration procedures traditionally focus on compensating for the robot's own deformations. Yet, during machining or handling, the workpieces themselves can also deform due to process-induced forces. In the aerospace sector, where precision tolerances are particularly tight, such deformations can result in non-compliant parts. For instance, during the assembly of aircraft wings, slight deformations of individual components can affect the final quality of the assembly.

In automated fiber placement processes for manufacturing composite aerospace components, specialized tooling is required. The cost of producing this tooling represents a major share of the total process cost. These tools must offer high surface quality and appropriate mechanical properties, while remaining lightweight for easier handling. Understanding and characterizing the mechanical behavior of such tools makes it possible to optimize their design, reduce weight, and lower production costs.

These two examples highlight the relevance of expanding calibration processes beyond the robot itself to include compensation for deformations in the workpieces and tooling involved. The objective of this thesis is to develop a robotic procedure for structural characterization and deformation compensation of aerospace tooling. This involves designing a displacement measurement device. The design choices are justified. The device is capable of applying three-dimensional forces and integrates laser metrology to measure the resulting displacements. It can be used directly in industrial settings and enables structural analysis without altering the part under study. Its performance is validated on a research-grade fiber placement tool. While the displacements generated by the system in the transverse directions were not significant enough to draw firm conclusions, vertical displacements were successfully measured with a global average error of 7 % compared to finite element simulation results taken as reference. The collected force-displacement data is then used to model the mechanical behavior of the tooling. Six predictive models are compared, and the coefficient interpolation method is ultimately selected, as it predicts vertical displacements with an average error of just 4 %. A complete protocol is finally proposed to experimentally measure displacements using

the developed tool, train the predictive model, and ultimately provide a reliable structural characterization method for the considered tooling.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE iii

REMERCIEMENTS iv

RÉSUMÉ v

ABSTRACT vii

TABLE DES MATIÈRES ix

LISTE DES TABLEAUX xi

LISTE DES FIGURES xii

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS xiii

LISTE DES ANNEXES xiv

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1
1.1 Contexte 1
1.2 Objectifs et plan de ce mémoire 2

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE 3
2.1 La calibration des systèmes robotisés 3
2.2 Caractériser la déformation d'une pièce mécanique 7
2.3 Prédire le comportement mécanique par l'approche des données 10
2.4 Synthèse de la revue de littérature, objectifs et méthodologie 16
2.4.1 Synthèse de la revue de littérature 16
2.4.2 Objectifs 17
2.4.3 Méthodologie 17

CHAPITRE 3 CONCEPTION DU SYSTÈME DE MESURE DES DÉPLACEMENTS 20
3.1 Principe et idées 20
3.2 Conception et fonctionnement du système 21
3.3 Validation de la résistance de la cloche 24
3.4 Choix de l'arrangement des ressorts 26

3.4.1 Procédé expérimental 26
3.4.2 Résultats 30

CHAPITRE 4 VALIDATION DU FONCTIONNEMENT DU SYSTÈME DE MESURE DES DÉPLACEMENTS 36
4.1 Protocole expérimental 36
4.2 Résultats 40
4.3 Discussions 45

CHAPITRE 5 MODELISATION DU COMPORTEMENT DE L'OUTILLAGE BASEE SUR LES DONNEES COLLECTEES 47
5.1 Objectifs et cadre de l'analyse 47
5.2 Les données utilisées 47
5.3 Comparaison de différents modèles de prédiction 48
5.4 Interpolation pour prédire le déplacement 50
5.5 Protocole décrivant les mesures de déplacements à réaliser afin d'obtenir un modèle de comportement de l'outillage 52

CHAPITRE 6 CONCLUSION 55
6.1 Discussion générale 55
6.2 Synthèse des travaux 57

RÉFÉRENCES 58

ANNEXES 63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Cahier des charges du système de mesure des déplacements	20
Tableau 3.2	Les différents ressorts testés	27
Tableau 3.3	Déplacement maximal horizontal dans le plan de contact avant perte de contact du bouchon	31
Tableau 4.1	Cas de charges sélectionnés pour les tests	37
Tableau 5.1	Performance des modèles testés	50
Tableau 5.2	Performances des différents modèles	52
Tableau 5.3	Performances obtenues par le modèle d'interpolation sur chaque position de test	53
Tableau B.1	Déplacements en X mesurés par la cible collée et le système conçu (outil).	67
Tableau B.2	Déplacements en Y mesurés par la cible collée et le système conçu (outil).	68
Tableau B.3	Déplacements en Z mesurés par la cible collée et le système conçu (outil).	68
Tableau C.1	Comparaison des déplacements sur l'axe X mesurés et simulés par éléments finis (EF).	69
Tableau C.2	Comparaison des déplacements sur l'axe Y mesurés et simulés par éléments finis (EF).	70
Tableau C.3	Comparaison des déplacements sur l'axe Z mesurés et simulés par éléments finis (EF).	70
Tableau D.1	Valeurs des efforts pour les données d'entraînement des modèles . . .	72
Tableau E.1	Hyperparamètres testés via GridSearch pour les différents modèles. .	73

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Classification des méthodes de calibration	5
Figure 2.2	Système de calibration permettant d'appliquer la procédure IREC	6
Figure 2.3	Principe de fonctionnement de la corrélation d'images numériques	10
Figure 2.4	Géométrie de la pièce fabriquée	18
Figure 2.5	Représentation des objectifs et de la méthodologie	19
Figure 3.1	Inspirations pour le système de mesure	21
Figure 3.2	Modèle CAO de l'assemblage	23
Figure 3.3	Vue en coupe du système	24
Figure 3.4	Schéma de l'analyse éléments finis réalisée pour valider la résistance de la cloche	25
Figure 3.5	Convergence du maillage et analyse des résultats	25
Figure 3.6	Vue de dessus du bouchon pour décrire l'arrangement spatial des ressorts	27
Figure 3.7	Dispositif expérimental pour le choix des ressorts	29
Figure 3.8	Illustration de la méthodologie appliquée	30
Figure 3.9	Courbes caractéristiques pour les 3 arrangements de ressorts à compression nominale et pour l'inclinaison 0°	33
Figure 3.10	Courbes caractéristiques pour les 3 arrangements de ressorts à compression nominale et pour l'inclinaison 90°	34
Figure 3.11	Courbes caractéristiques du ressort 4 et sous compression et sur compression	35
Figure 4.1	Zone d'application des efforts sur l'outillage	37
Figure 4.2	Dispositif expérimental	38
Figure 4.3	Protocole d'obtention des 3 séries de données.	40
Figure 4.4	Déplacements obtenus pour la position 2.	42
Figure 4.5	Déplacements obtenus pour la position 3.	43
Figure 4.6	Déplacements obtenus pour la position 6.	44
Figure 5.1	Zones choisies pour l'application des efforts sur l'outillage	48
Figure 5.2	Distribution des erreurs résiduelles pour le modèle d'interpolation	51
Figure 5.3	Répartition spatiale des erreurs commises par le modèle d'interpolation	52
Figure 5.4	Chaîne complète des tâches de ce mémoire.	54

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

IREC	In-situ Robot Elastic Calibration
REQM	Racine de l'Erreur Quadratique Moyenne
PINN	Physics Informed Neural Network
LOGO	Leave One Group Out
DIC	Digital Image Correlation
SVR	Support Vector Regression
k-nn	k nearest-neighbors

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Dessins de définition	63
Annexe B	Déplacements mesurés avec une cible collée et le système conçu . . .	67
Annexe C	Déplacements mesurés avec le système conçu et obtenus par simulation sur les 6 positions.	69
Annexe D	Valeurs des efforts pour les données d'entraînement des modèles . . .	71
Annexe E	Hyperparamètres testés via GridSearch pour les différents modèles. .	73

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

La Fédération Internationale de Robotique annonçait l'année dernière que l'année 2023 a marqué la deuxième plus forte vague d'installations de robots industriels dans le monde [1]. Les projections annoncent une accélération de la croissance à partir de 2025, qui devrait même se prolonger sur les années suivantes. Les États-Unis et le Canada font d'ailleurs partie des 15 plus gros marchés robotiques du monde [1].

Dans le domaine de l'aéronautique, le marché robotique est également en expansion. La particularité de ce secteur est de fabriquer et d'assembler de très grandes et de très nombreuses pièces. À titre d'exemple, un Boeing 747 est composé d'environ 6 millions d'éléments, dont la moitié sont des pièces de fixation [2].

De par leur grande flexibilité, les robots sont de plus en plus utilisés en aéronautique : perçage, rivetage, peinture et revêtement, fabrication de grandes pièces en matériaux composites etc. [3]. Robotiser ces tâches permet d'éviter la réalisation de travaux répétitifs ou dangereux pour des ouvriers, et évidemment d'augmenter l'efficacité de production.

Certains procédés en aéronautique amènent leurs propres défis. Par exemple, des pièces peuvent se déformer lors de l'usinage sous l'effet des efforts de coupe, ce qui peut induire des erreurs de fabrication [4]. Lors de l'assemblage des ailes d'un avion, les différents éléments peuvent se déformer et donc créer des désalignements influant sur la qualité de l'assemblage final [5].

Les matériaux composites sont très largement utilisés en aéronautique pour leurs propriétés de légèreté et de résistance. Les procédés de fabrication de pièces en composite ont donc une grande importance dans ce secteur. Le placement de fibres automatisé, qui permet de fabriquer des pièces en matériau composite, nécessite l'utilisation d'outillages, sur lesquels les pièces sont formées. Cependant, ces outillages coûtent chers à fabriquer car ils doivent respecter une bonne qualité de surface. Ces outillages doivent également être déplacés, et donc nécessitent d'être les plus légers possible [6]. Caractériser les propriétés mécaniques de ces outillages peut permettre d'en optimiser la conception, de les alléger et donc de réduire leur coût de fabrication.

Finalement, ces différents exemples montrent l'importance de développer des procédures de caractérisation mécanique de pièces, afin d'améliorer l'automatisation des procédés de fabrication et d'assemblage.

1.2 Objectifs et plan de ce mémoire

Ce mémoire s'intéresse au développement d'une procédure robotisée de caractérisation structurelle et de compensation de la déformation d'un outillage aérospatial. L'outillage considéré est une réplique d'un outillage pour le procédé de placement de fibres automatisé, spécialement conçu à des fins de recherche.
La procédure développée nécessite la conception d'un outil de mesure de déplacements, et à l'utilisation de ces mesures pour prédire le comportement mécanique de l'outillage. Cet outil doit être capable d'appliquer un effort tridimensionnel sur la pièce étudiée, et d'intégrer la métrologie pour déterminer les déplacements induits par cet effort. Ensuite, les données efforts-déplacements collectées peuvent être utilisées pour entraîner un modèle de prédiction des déplacements, afin de caractériser le comportement de l'outillage.

Le chapitre 2 présente une revue de littérature sur les thèmes traités : la calibration robot, la caractérisation du comportement mécanique de pièces et l'utilisation du Machine Learning pour la prédiction du comportement mécanique. Les objectifs de ce mémoire et la méthodologie pour les atteindre sont ensuite décrits.
Le chapitre 3 présente les choix de conception du système de mesure des déplacements, ainsi que les tests préliminaires réalisés sur un prototype pour valider ces choix.
Le chapitre 4 présente les essais expérimentaux réalisés afin de valider le fonctionnement du système conçu sur l'outillage.
Le chapitre 5 présente la comparaison de 6 modèles de Machine Learning, utilisant les données efforts-déplacements collectées afin de caractériser le comportement mécanique de l'outillage.
Le chapitre 6 permet de conclure.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 La calibration des systèmes robotisés

L'utilisation de robots dans les domaines de l'usinage et de la fabrication est en expansion. Les robots permettent en effet la fabrication de pièces complexes, grâce à leur grand nombre de degrés de liberté [7].

Cependant les robots souffrent encore de leur faible précision d'usinage due à des erreurs de positionnement importantes pouvant être classées en deux catégories [7] :

- les erreurs géométriques provenant principalement des écarts entre les valeurs nominales et réelles des paramètres cinématiques du robot (longueurs des liens, angles d'assemblage ...)
- les erreurs non géométriques causées principalement par la relativement faible rigidité des différents axes des robots.

Les erreurs géométriques pourraient représenter jusqu'à 90 % des erreurs de positionnement [8].

À ces deux sources principales peuvent s'ajouter des erreurs externes (température ambiante, méthode de fixation du robot ...), des erreurs de système (mesures de capteur, arrondissement numérique de valeurs ...) et des erreurs dépendantes du procédé robotisé (forces de coupe ...) [9].

La calibration, c'est-à-dire l'ensemble des processus visant à augmenter la précision d'un robot, est donc un problème d'intérêt pour les chercheurs. Elle permet d'améliorer la précision en agissant sur le logiciel de positionnement plutôt que sur la conception du robot, et peut généralement être résumée en 4 étapes [10] : choisir une relation fonctionnelle théorique entre les paramètres du robot à calibrer (la modélisation), collecter des données réelles sur le robot pour obtenir un lien entre l'entrée et la sortie du modèle (les mesures), déterminer la valeur des coefficients du modèle s'appliquant aux données réelles (l'identification) et implémenter le modèle calibré pour contrôler le robot (la correction).

Pour les erreurs géométriques, différentes relations peuvent être utilisées pour l'étape de modélisation, comme le modèle fondé sur les paramètres cinématiques Denavit-Hartenberg [7]. Il s'agit d'une convention permettant de représenter la position relative de deux repères avec seulement 4 paramètres. Un modèle d'erreur utilisant une relation exponentielle entre les variables de joints et les matrices de transformation entre les repères (*Screw-theory-based*) est également utilisé et peut permettre d'éviter la singularité apparaissant dans le modèle Denavit-Hartenberg [7]. Des modèles permettant d'incorporer des paramètres cinématiques

et non cinématiques ont aussi été développés [7].
Pour modéliser les erreurs non géométriques (faible rigidité du robot), deux méthodes principales sont utilisées : la méthode des joints virtuels ou l'utilisation des éléments finis [7]. La méthode des joints virtuels consiste à imaginer des joints virtuels placés à l'extrémité de chaque lien du robot et à modéliser la raideur de chaque lien par des ressorts. Chaque joint virtuel possède alors une matrice raideur 6x6 [11]. La méthode des éléments finis est plus précise que la méthode des joints virtuels mais nécessite des calculs plus lourds [7] [11].
Un paramètre important à considérer est la facilité d'intégration des méthodes de calibration dans un contexte industriel. Une classification des méthodes de calibration existantes en fonction de leur invasivité (espace nécessaire et complexité des installations) et de la complexité des cas de charge applicables lors du protocole de calibration est proposée en [12] (figure 2.1). Par exemple, utiliser simplement une masse accrochée à l'effecteur du robot est très peu invasif, mais ne permet d'appliquer qu'une force unidirectionnelle. Utiliser une plate-forme hexapode permet d'appliquer sur le robot à la fois des forces et des couples multidirectionnels (haute complexité de cas de charge) mais l'invasivité est très grande puisqu'il est nécessaire d'installer et manipuler la plate-forme (figure 2.1).
D'autres systèmes auxiliaires moins invasifs qu'un hexapode peuvent également être utilisés afin de réduire les erreurs non géométriques. Par exemple, une solution intégrant un actionneur piézoélectrique est proposée en [13]. Le robot positionne la pièce par rapport à l'outil monté sur l'actionneur. L'actionneur peut repositionner l'outil grâce à des mesures de la position du robot effectuées par un système optique externe. Cependant, cette méthode n'est utilisable que pour des procédés où le robot déplace la pièce par rapport à un outil fixe. Mais pour de nombreux procédés, cette configuration n'est pas envisageable.
À partir de la classification présentée en figure 2.1, les auteurs de [12] proposent la méthode In-situ Robot Elastic Calibration (IREC). Il s'agit d'une méthode de calibration complètement automatisée et qui permet de concilier les requis d'invasivité minimale, de déploiement industriel, et de complexité des cas de charge applicables. La figure 2.2 montre l'appareil de calibration proposé monté sur un effecteur de procédé de placement de fibres pour la fabrication d'une pièce composite. La procédure IREC est appliquée à une cellule automatisée de placement de fibres et à une cellule robotisée d'usinage et il est montré que dans ces deux cas la calibration réalisée permet d'atteindre les tolérances souhaitées pour ces opérations d'usinage [12].

Des solutions pour la calibration robot ont été développées afin de capturer le comportement structurel du robot et de compenser les erreurs de trajectoire et de positionnement. Mais la pièce usinée ou manipulée peut également subir des déformations provoquées par les efforts mis en jeu dans le procédé étudié, et donc être une source importante d'erreur pour le cal-

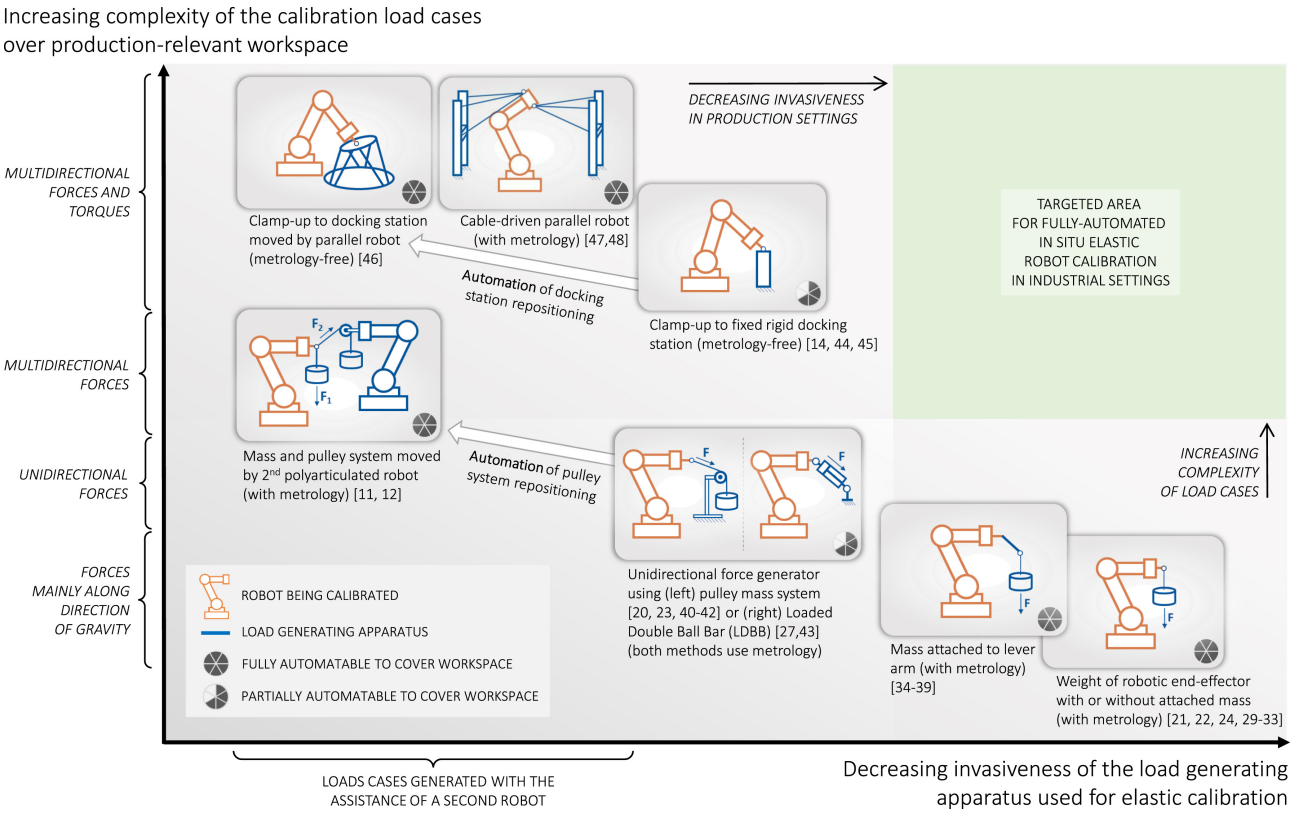


FIGURE 2.1 Classification des méthodes de calibration en fonction de la complexité des cas de charges applicables et de l'invasivité [12] (Sous licence Creative Commons)

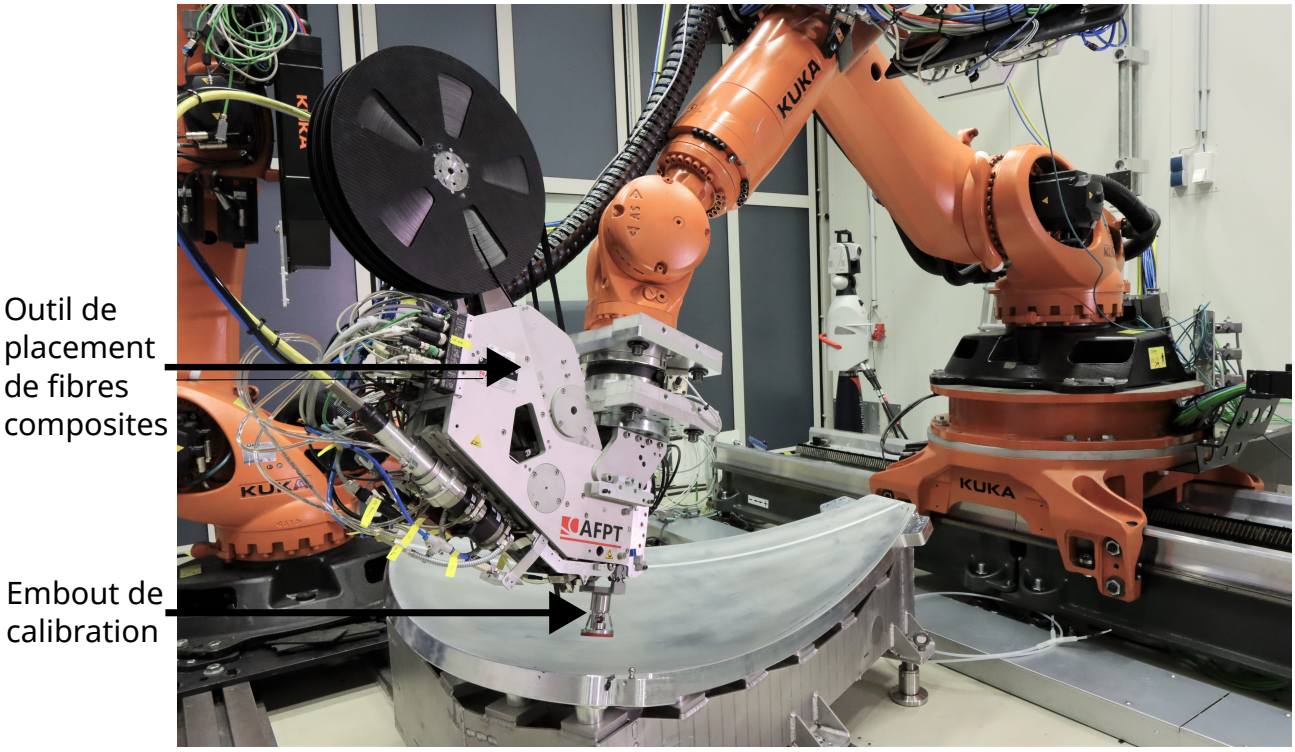


FIGURE 2.2 Système de calibration permettant d'appliquer la procédure IREC [12] (Sous licence Creative Commons)

cul de la trajectoire du robot. Par exemple, la déformation causée par l'usinage est parfois considérée comme un des problèmes les plus importants dans la fabrication de pièces en aéronautique, car cela peut amener des erreurs géométriques et des pièces non valides [4].
Toujours dans le secteur aéronautique, l'assemblage des ailes d'avion est également soumis à ce défi [5]. En effet, les grandes pièces sont plus sujettes à des variations de forme et de dimensions. Ces variations proviennent principalement des différents procédés de fabrication utilisés comme le forgeage, l'usinage, le rivetage etc. Cela peut causer des problèmes dans la fabrication des avions (et notamment pour l'assemblage des ailes), car malgré la taille des pièces impliquées, les tolérances de fabrication et d'assemblage restent serrées. Ces écarts avec les dimensions spécifiées doivent donc être quantifiés précisément, afin d'obtenir des modèles de prédiction, permettant par la suite l'automatisation de ces procédés de fabrication et d'assemblage. Une méthode de mesure pour caractériser ces déformations à l'aide de la métrologie laser est décrite en [14].
Le procédé de placement de fibres automatisé, qui permet de fabriquer des pièces en matériau composite, nécessite l'utilisation d'outillages, sur lesquels les pièces sont formées. Ces outillages doivent présenter une bonne qualité de surface et des propriétés mécaniques adaptées, tout en restant légers pour faciliter leur manipulation [6]. Caractériser le comportement mécanique de ces outillages peut permettre d'en optimiser la conception, d'en réduire le poids et par conséquent d'en diminuer le coût de fabrication. Cette réduction de coût est d'autant plus intéressante que l'industrie aéronautique utilise de plus en plus de matériaux composites pour leurs propriétés de légèreté et de résistance. Un Boeing 747 est par exemple constitué à 50 % de matériaux composites.
Finalement, il semble crucial de se pencher sur les méthodes permettant de caractériser la déformation d'une pièce lors de processus automatisés de fabrication. Ces méthodes pourraient s'inscrire dans une démarche de calibration plus large, qui ne vise plus seulement à compenser les déformations des robots, mais aussi les déformations des pièces manipulées ou usinées.

2.2 Caractériser la déformation d'une pièce mécanique

La méthode des éléments finis permet de résoudre les équations de comportement mécanique d'un solide ou d'une structure, les problèmes de transfert de chaleur ou de mécanique des fluides. Plus largement, elle permet de résoudre des problèmes physiques et peut être appliquée dans n'importe quel domaine de l'ingénierie [15]. Cette méthode étant numérique, elle permet aux industriels et ingénieurs de concevoir des pièces en réduisant le recours excessif de prototypes et de tests. Elle permet également de comparer rapidement différents choix

de design et de matériaux. Tout ceci permet de réduire les coûts à plusieurs étapes du cycle de vie du produit, et explique le fait que les éléments finis soient aussi largement utilisés aujourd'hui.

Cependant, cette méthode a aussi des inconvénients [16]. En effet, elle nécessite parfois de simplifier la réalité, en faisant des hypothèses fortes sur les phénomènes physiques pris en compte, sur la modélisation de la pièce, de son environnement et des chargements appliqués. Ces suppositions réduisent sa précision. Pour des pièces ou des scénarios de contraintes complexes, le temps et les ressources nécessaires pour les calculs augmentent très vite, ce qui complique son utilisation pour des systèmes nécessitant une prédiction en temps réel. De plus, la modélisation du problème et l'interprétation des résultats nécessitent une grande expertise en la matière, c'est pourquoi il peut être intéressant parfois de s'affranchir des éléments finis et de trouver d'autres méthodes de caractérisation du comportement mécanique.

Le problème de la caractérisation de la déformation de pièces lors de procédés robotisés intervient dans le domaine de la fabrication. En effet, la déformation d'une pièce peut être un problème critique en usinage, notamment lorsque les pièces usinées ont des parois fines soumises à de grandes forces de coupe et il y a parfois un besoin de prédire ces déformations pour les compenser [17]. Là encore, la méthode des éléments finis peut être employée et couplée à des modèles mathématiques afin de prédire les erreurs géométriques d'usinage et ainsi permettre d'améliorer la trajectoire outil et les paramètres de coupe du processus : un environnement de simulation pour le tournage de cylindres creux a par exemple été élaboré en [18]. Cette méthode est rendue possible car le comportement en tournage dans ce cas précis est connu.

Les opérations d'usinage les plus courantes (perçage, surfaçage, etc.) nécessitent au moins une phase d'ébauche et une phase de finition, pour lesquelles les paramètres de coupe sont différents, ce qui permet d'atteindre les tolérances souhaitées sans avoir besoin de travailler 100 % du temps au maximum des capacités de la machine (gain de temps et d'argent). Il est alors possible de mesurer la pièce par métrologie après la phase d'ébauche afin de calculer une valeur de compensation à appliquer lors de la phase de finition [19]. Cela permet de prendre en compte les erreurs accumulées pendant l'ébauche et qui n'auraient pas été prévues lors de la planification des opérations d'usinage. Cette méthode nécessite donc un modèle de calcul des compensations à appliquer, la possibilité d'incorporer la métrologie, et la possibilité de stopper le processus de fabrication entre l'ébauche et la finition.

La Digital Image Correlation (DIC) est également très utilisée dans le domaine de la mécanique du solide : il s'agit d'une méthode numérique pour déterminer le champ de déplacement d'une surface ou d'un volume soumis à des contraintes, grâce à l'acquisition d'images à différents stades du chargement [20]. Le principe de fonctionnement est décrit sur la figure 2.3.

Une image de référence et une image cible sont prises à différents stades du chargement, et l'image de référence est découpée en sous-ensembles (régions d'intérêt). Les sous-ensembles de référence sont retrouvés dans l'image cible grâce à l'application d'une fonction de corrélation. La comparaison des sous-ensembles de référence avec les sous-ensembles cibles permet de déterminer un vecteur déplacement. Les différents algorithmes existants découlent du choix de la fonction de corrélation, de la famille de déformations considérée et de l'algorithme d'optimisation utilisé [20].

Une méthode expérimentale pour étudier le comportement mécanique de grandes pièces aéronautiques pendant l'usinage, fondée sur la corrélation d'images numériques a été mise en place en [22] et permet d'étudier différents phénomènes comme l'expansion thermique, la présence de contraintes résiduelles ou la déformation de la pièce due aux forces de coupe ; des solutions à des problèmes spécifiques à l'usinage comme le déplacement involontaire des caméras ou la présence de copeaux pouvant altérer les images sont également présentées.
La corrélation d'images numériques, bien que sujette à de nombreuses recherches et ayant déjà des applications, a encore des inconvénients [23] : le calcul de corrélation peut encore être amélioré et accéléré, les méthodes de calibration des caméras sont encore onéreuses et donc difficilement accessibles, comprendre plus précisément l'impact de certains facteurs sur les résultats (altération des lentilles, angles des caméras, conditions de l'environnement ...) reste un challenge, la mesure de déformation pour des surfaces 3D n'est pas encore complètement maîtrisée.
Une autre approche consisterait à utiliser un robot pour effectuer des mesures et obtenir un modèle de comportement sous charge d'une pièce. Pour la première fois, un hexapode (plate-forme Stewart) est utilisé pour appliquer une charge multi-axiale et effectuer un test de cisaillement par traction sur un échantillon [24]. La corrélation d'images numériques est utilisée pour mesurer la déformation de l'échantillon et observer le processus de propagation de fissure. Cette solution peut être intéressante pour étudier des échantillons ou des petites pièces, mais n'est pas envisageable pour des grandes pièces, car la taille de l'hexapode est limitante et l'amplitude des déplacements est également limitée [25] [26]. Cette méthode est de plus soumise aux challenges de la corrélation d'images numériques présentés plus haut.
L'utilisation de robots industriels pour réaliser des tests mécaniques sur des pièces est également étudiée. Une méthode complète et la réalisation d'un banc d'essais pour effectuer des tests mécaniques destructifs sur des composants variés, et de manière automatisée, sont présentées dans la thèse [26]. Quatre études de cas sont établies. La première consiste à réaliser un test de traction et à comparer les résultats avec une machine de test conventionnelle. Les auteurs concluent qu'en principe, utiliser un robot pour un test mécanique est réalisable. Trois autres études de cas permettent d'aller plus loin et des tests sont effectués sur un cadre

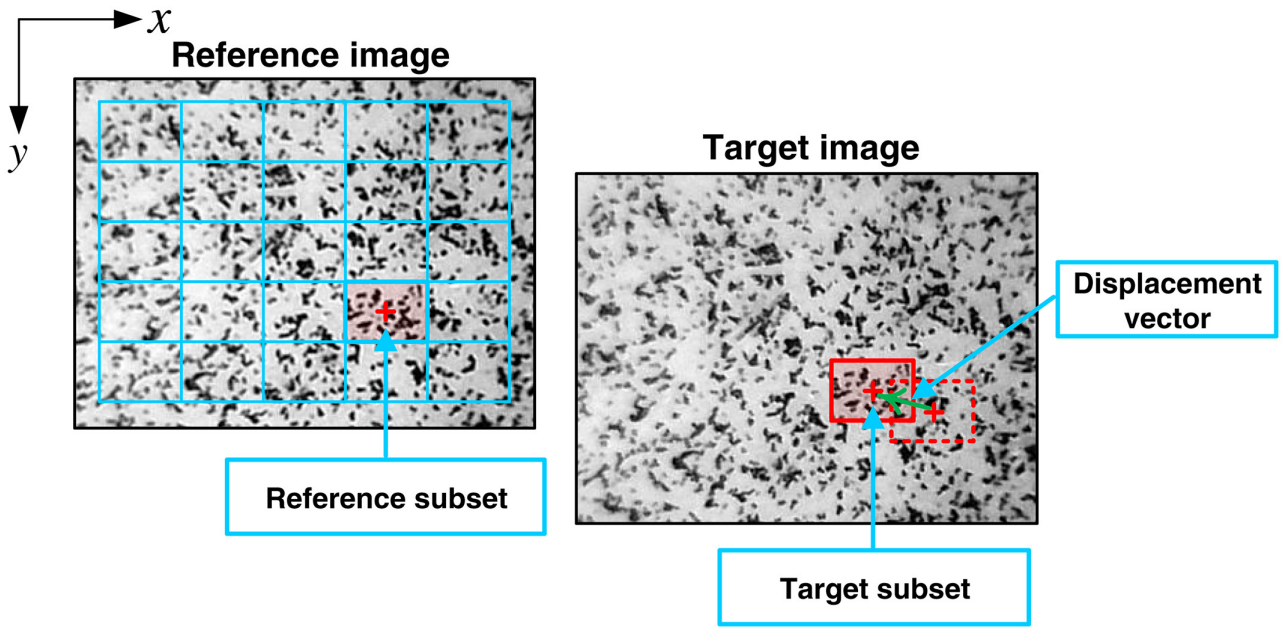


FIGURE 2.3 Principe de fonctionnement de la corrélation d'images numériques [21] (Sous licence Creative Commons)

de vélo, un snowboard et un composant automobile. Le banc d'essais est constitué d'une table pour fixer le composant à tester, et de deux robots KUKA Titan pour appliquer les charges. Les robots sont équipés d'un capteur de force/couple 6 axes, à la fois pour la caractérisation mécanique mais aussi pour l'ajustement du mouvement des robots. De plus, pour obtenir d'autres informations lors de la caractérisation mécanique, une caméra et un système de DIC sont inclus. Les auteurs montrent le potentiel des tests mécaniques assistés par robot, et ce pour des cas concrets d'application. De plus, le banc d'essais et la méthode proposés sont flexibles et permettent de tester des composants mécaniques complexes et variés, contrairement aux méthodes déjà industrialisées, notamment dans le secteur automobile, et qui sont spécifiques à une tâche en particulier [26].

2.3 Prédire le comportement mécanique par l'approche des données

L'explosion du domaine de l'apprentissage profond durant la dernière décennie grâce à l'arrivée d'ordinateurs plus puissants et l'augmentation du nombre de données disponibles a permis des avancées majeures dans tous les domaines, y compris en mécanique du solide et notamment pour la découverte de nouveaux matériaux ou la prédiction des propriétés mécaniques [27], ainsi que pour établir des modèles de comportement de substitution, résoudre les équations aux dérivées partielles décrivant le comportement mécanique, et même pour la

découverte de potentielles nouvelles lois facilement interprétables [28].
De plus, l'essor de la fabrication additive permet l'élaboration de matériaux avec de hautes performances mécaniques, mais dont le comportement est de plus en plus compliqué à prédire avec les méthodes traditionnelles (calculs analytiques, méthode des éléments finis etc.) ; l'apprentissage automatique semble vouloir s'imposer car il permet d'avoir de meilleures performances de prédiction [29].
Les méthodes d'apprentissage automatique pour modéliser le comportement mécanique peuvent être divisées en 2 catégories [30] :

— les méthodes non interprétables (black-box) : la relation obtenue n'a pas d'interprétation physique
— les méthodes interprétables : les relations peuvent être expliquées physiquement

Parmi les méthodes non interprétables, on retrouve beaucoup de méthodes employant des réseaux de neurones avec différentes architectures.
Dès 1991, une architecture relativement simple de réseau de neurones (2 couches cachées de 40 nœuds) est proposée [31], pour apprendre un modèle de matériau soumis à une charge bi-axiale ou à une charge uni-axiale cyclique.
Plus récemment, d'autres méthodes ont été mises en place. Une approche utilisant deux réseaux de neurones a été élaborée pour modéliser la loi de Hooke généralisée pour un comportement mécanique non linéaire (les composantes du tenseur de rigidité dépendent de la déformation) [32]. Le premier réseau permet de prédire à partir de coordonnées spatiales le vecteur déplacement associé ; le champ de déformation est ensuite calculé (approximation des petites déformations). Le deuxième réseau utilise le champ de déformation pour prédire les composantes du tenseur de rigidité (la loi de Hooke est alors apprise). Cette méthode est appliquée sur un modèle de disque de turbine basse pression en superalliage de nickel. Les données d'entraînement sont générées par éléments finis : les déplacements aux nœuds et les valeurs moyennes des contraintes au centre d'un élément sont collectées. Les auteurs calculent la Racine de l'Erreur Quadratique Moyenne (REQM) sur un ensemble de test, pour les valeurs de déplacement et de contraintes. La valeur obtenue pour le déplacement est de 0.5 % et la valeur pour la contrainte est de 8 %. Les auteurs pensent pouvoir encore améliorer la performance de cette méthode en augmentant la taille de l'ensemble d'entraînement et en travaillant sur l'architecture des réseaux de neurones. Ils souhaiteraient également tester sa performance sur un modèle de disque de turbine en 3D [32].
Dans [33], les auteurs s'intéressent à la prédiction des courbes contraintes-déformations dans un scénario de chargement inverse : le matériau est soumis à une déformation dont l'amplitude maximale reste comprise dans un intervalle défini, puis il est déchargé jusqu'à retrouver son état initial. Ce type de comportement est particulièrement non linéaire. Les données ex-

ploitées sont donc des courbes contraintes-déformations correspondant à différentes valeurs de l'amplitude maximale de déformation imposée. Pour limiter la taille du modèle, les auteurs proposent une méthode d'échantillonnage des points de la courbe — aussi bien pour les déformations que pour les contraintes associées — de manière à réduire la dimension des entrées et sorties du réseau. Le modèle est donc entraîné sur ces données échantillonnées. La reconstruction de la courbe complète de contraintes est ensuite assurée par une interpolation polynomiale de degré 3. Trois architectures de réseaux de neurones séquentiels sont évaluées pour accomplir cette tâche, afin de déterminer celle avec la meilleure performance.

D'autres méthodes de modélisation plus complexes peuvent exister, comme l'utilisation d'un système encodeur/décodeur, qui est également composé de deux réseaux de neurones. L'entrée de ce réseau est de haute dimension, comprenant beaucoup de paramètres comme l'historique de chargement du matériau, les conditions aux limites, ou des informations générales sur les propriétés du matériau. L'encodeur projette ces données dans un espace de plus faible dimension, et le décodeur associe ces données transformées à la contrainte que l'on souhaite prédire [34]. Ce modèle est appliqué sur deux ensembles de données, un contenant des courbes contrainte/déformation (cas 1D) avec des cycles chargement/déchargement et un deuxième construit avec le modèle Johnson-Cook pour inclure des conditions de chargement complexes. Différentes architectures d'encodeur sont testées et elles sont comparées en calculant la REQM obtenue sur la prédiction de la contrainte. Les REQM optimales obtenues sont inférieures à 1 MPa [34].

Pour prédire le comportement des matériaux composites, une des approches consiste à utiliser comme entrées du modèle non pas des valeurs numériques de contraintes et déformations, mais une représentation géométrique matricielle du composite (sous forme d'image), couplée aux conditions limites et de chargement. Cela nécessite alors le recours à des architectures de réseaux de neurones plus complexes. Dans [35], les auteurs proposent l'architecture MNet : un réseau de neurones convolutif conçu pour prédire une composante de déformation à partir d'une matrice 2D représentant le matériau composite. Cette architecture permet de réduire l'erreur moyenne absolue en pourcentage de 50 % par rapport à UNet, une autre architecture convolutive de référence utilisée pour ce type de tâche. Une alternative à l'architecture MNet peut également être utilisée pour ce type d'application. Dans [36], les auteurs proposent un réseau génératif adversarial conditionnel, dans lequel les données sont labellisées. Les représentations matricielles du matériau servent d'entrées au Générateur, qui produit des images de champs (contraintes ou déformations) contenant du bruit. Le Discriminateur évalue ces images en les comparant aux champs réels à prédire. Une fois le modèle entraîné, il devient possible de générer de nouveaux champs à partir des nouvelles données d'entrées. Les mêmes auteurs ont également employé cette architecture non pas pour prédire les champs de défor-

mation ou contraintes, mais directement les tenseurs de contraintes ou de déformation dans la configuration considérée [37].

La plupart des méthodes basées sur les données nécessitent un grand nombre de simulations ou d'expérimentations afin de collecter suffisamment de données pour entraîner les modèles de prédiction [38]. Les approches mentionnées ci-dessus nécessitent également d'avoir des ensembles de données de haute dimension incluant des mesures de contraintes. Ces ensembles peuvent provenir de mesures expérimentales, ou être générés par simulation. Générer les données par simulation coûte très cher en temps de calcul, et les réseaux de neurones deviennent alors obsolètes en pratique, puisqu'ils ne permettent donc pas de s'affranchir de ces méthodes de simulation [39]. Malgré le développement de techniques expérimentales qui ont pour objectif de mieux caractériser les matériaux, cela reste très compliqué de collecter toutes les données nécessaires, surtout dans le cas de chargements complexes. Les méthodes d'apprentissage sont donc confrontées au problème des petits ensembles de données : il faut tenter de travailler avec des ensembles de mesures incomplets [40].

Afin réduire la quantité de données requises pour l'apprentissage, plusieurs solutions sont envisagées.

Le Transfer Learning est une approche qui consiste à réutiliser un modèle pré-entraîné sur une tâche source afin d'améliorer l'apprentissage d'une tâche cible proche. Dans [38], les auteurs appliquent cette méthode pour prédire les courbes déformation-contraintes de deux composites : un nylon renforcé de fibres de carbone continues, et un autre composé de nylon renforcé de fibres courtes de verre et de carbone. Le modèle initialement entraîné sur des courbes provenant d'un composite à fibres courtes de carbone est ensuite entraîné à nouveau sur le domaine cible avec seulement 27 échantillons, contre 162 pour l'entraînement dans le domaine source. Malgré cette réduction, l'erreur absolue moyenne en pourcentage obtenue sur l'ensemble de test reste inférieure à 10 %.

Une approche fondée sur l'intégration neuronale a été développée pour la découverte de lois de comportement à partir d'ensembles de données partielles et clairsemées [40]. L'intégration neuronale mélange les réseaux de neurones avec l'intégration temporelle et permet d'apprendre des solutions de dynamiques continues uniquement à partir d'observations discrètes. Couplée avec l'idée des réseaux de neurones entraînés sur les lois de la thermodynamique, cette méthode permet de construire des relations cohérentes avec les lois de la physique. Les données d'entraînement sont générées à l'aide de modèles analytiques, et du bruit est rajouté. L'erreur moyenne absolue commise sur la prédiction de la contrainte est toujours inférieure à la valeur moyenne du bruit considérée et atteint 8 % pour pour la valeur maximale moyenne de bruit considérée de 20 %. Cette méthode doit encore être appliquée avec des données réelles mesurées, et non plus calculées [40].

Une approche utilisant des réseaux de neurones de graphes (les données d'entrée sont des graphes) permet de prédire le champs de contraintes ou de déformations dans un matériau composite, à partir d'un petit ensemble de données [29]. Le réseau de neurones est entraîné avec seulement quelques centaines de données et permet de modéliser des comportements relativement complexes comme la plasticité de composites ou le flambage de la matrice de certains matériaux composites. Un graphe est construit à partir du matériau considéré maillé : les nœuds et les arêtes contiennent les informations sur le système (position du nœud, déplacement du nœud etc.). Ces informations sont d'abord encodées dans un espace de dimension supérieure. Le graphe est ensuite parcouru : chaque nœud obtient de l'information de ses voisins pour apprendre les relations entre les éléments du système. Le graphe est ensuite décodé pour produire des quantités physiques comme le champ de déformations ou de contraintes. Cependant, les réseaux de graphes demandent beaucoup de mémoire pour être entraînés, et même si un faible nombre de données d'entraînement est nécessaire, la généralisation du modèle n'est pas comparable à celle des solveurs numériques classiques.

Ces méthodes non interprétables ont plusieurs inconvénients. Les relations trouvées n'ont pas de signification physique à cause de leur trop grand nombre de paramètres. Ces méthodes nécessitent généralement un grand nombre de données, même si certaines approches tentent de réduire ce besoin.

Les méthodes d'apprentissage dites interprétables, sont quant à elles construites pour intégrer les équations de la physique lors de l'apprentissage. Deux stratégies principales ont émergé : les Physics Informed Neural Network (PINN), qui incorporent la physique directement dans la fonction coût du réseau, et les Réseau de Neurones Constitutif (RNC), qui modifient les entrées, les sorties et parfois l'architecture du réseau afin d'imposer des contraintes physiques. Les PINN sont particulièrement adaptés à la résolution d'équations aux dérivées partielles, tandis que les RNC ont été développés spécifiquement pour modéliser des lois de comportement [41]. Dans [41], les auteurs proposent une architecture de RNC qu'ils comparent à un réseau de neurones séquentiel classique pour la prédiction du comportement élastique de caoutchoucs. Ils montrent que le RNC permet non seulement de limiter le surapprentissage, mais aussi de généraliser certains modèles analytiques de comportement, voire de découvrir automatiquement de nouvelles lois constitutives.

Les PINN constituent quant à eux une méthode hybride. Un domaine spatial est défini et détermine des points de collocation : le coût relatif aux équations incorporées est optimisé sur ces points de colocation. Un autre terme dans la fonction coût permet d'optimiser le modèle vis-à-vis des données d'entraînement. Un exemple a été appliqué à l'étude des plaques ; les équations incorporées sont celles de la théorie de Naghdi [42]. L'erreur absolue de ce modèle pour prédire les déplacements, par rapport au modèle éléments finis, est de l'ordre de 10^{-2}

à 10^{-3} en fonction des formes différentes de plaques et des conditions aux limites différentes testées. Cependant des améliorations sont encore nécessaires pour augmenter l'efficacité et la rapidité de la méthode et ainsi être plus compétitif face à l'utilisation des éléments finis [42]. Actuellement, les *PINN* sont limités à l'étude de cas très simples (modèle où l'on connaît déjà la forme analytique), et seules des équations aux dérivées partielles très simples sont incorporées à la fonction coût [39] [42].

Une méthode souhaitant résoudre les problèmes des PINN a été proposée en [39]. Cette méthode a l'avantage d'être également interprétable et est qualifiée de non-supervisée : les données d'entrées sont seulement des données mesurables expérimentalement comme par exemple le champ de déplacements via corrélation d'images numériques. Il s'agit d'une méthode de régression parcimonieuse (*sparse regression*), qui se base sur un catalogue de caractéristiques non linéaires pour effectuer la prédiction. La méthode est appliquée pour modéliser le comportement hyper-élastique d'une plaque carrée avec un trou, soumise à des déplacements contrôlés selon deux axes. Cette approche obtient de bonnes performances (voir Tableau 1 en [39]), mais n'est pour l'instant appliquée qu'à un cas simple, avec des données simulées et non mesurées. Il reste encore à appliquer cette méthode en 3 dimensions et à des cas plus complexes.

Cette méthode se rapproche du système EUCLID [43], qui repose également uniquement sur des données mesurables expérimentalement, comme le champ de déplacement par corrélation d'images numériques par exemple. EUCLID permet de sélectionner automatiquement un modèle qui correspond aux données parmi un ensemble de candidats. Les dernières avancées ont permis à EUCLID de sélectionner à partir des données une classe de modèles (élastoplastique, viscoélastique, hyperplasique) et de calibrer correctement le modèle une fois la classe choisie. Une fois de plus, ce système n'a pas été testé avec des données réelles.

Le principal problème des méthodes interprétables est qu'elles nécessitent une connaissance physique préalable pour savoir quelles équations aux dérivées partielles résoudre, ou quelles fonctions ou caractéristiques linéaires intégrer dans la régression parcimonieuse. Cela peut expliquer pourquoi les PINN par exemple ne sont utilisées que pour des cas relativement simples.

Finalement, la majorité des modèles présentés ici sont entraînés avec des données simulées. Il serait intéressant d'incorporer plus de données réelles mesurées afin de tester leur généralisation.

De plus, on peut remarquer que les méthodes proposées sont toutes relativement complexes, et donc plus coûteuses à entraîner. Or, des modèles moins complexes (comportant moins de paramètres), faciles à entraîner et nécessitant moins de données pourraient peut-être être suffisants pour certaines tâches. Par exemple, le modèle Support Vector Regression (SVR)

est très souvent utilisé dans le domaine de l'apprentissage pour l'estimation de fonctions réelles. Cette approche est robuste face aux données aberrantes, facile à implémenter, peu gourmande en temps de calcul, et présente souvent une bonne capacité de généralisation. Pourtant, cette méthode est très peu utilisée dans le domaine de la mécanique du solide [30].

2.4 Synthèse de la revue de littérature, objectifs et méthodologie

2.4.1 Synthèse de la revue de littérature

La littérature propose des solutions pour la calibration de robots industriels afin de compenser les erreurs de trajectoire et de positionnement dues à leur faible rigidité. La pièce usinée, manipulée ou servant d'outillage peut également se déformer et donc induire des erreurs de positionnement. De plus, certains outillages fabriqués sur mesure pour des procédés coûtent très chers (par exemple un moule pour fabriquer une pièce en composite via un procédé de placement de fibres automatisé). Caractériser ces outillages pourrait permettre de les alléger et donc de faire des économies. Cependant, les méthodes proposées pour mesurer la déformation d'une pièce et la compenser lors de processus automatisés présentent encore des inconvénients importants :

- la méthode des éléments finis est coûteuse en temps, nécessite une grande expertise et des simplifications,
- les méthodes employées en usinage sont à l'heure actuelle appliquée à des opérations d'usinage simples pour lesquelles des modèles de comportement sont connus, et dans des environnements ou la métrologie est facilement intégrable,
- la corrélation d'images numériques est très utilisée pour l'obtention de champs de déformations, mais elle a encore un inconvénient majeur : la calibration des caméras qui est complexe et très onéreuse ce qui rend cette méthode difficilement industrialisable,
- les méthodes employant des robots ne sont pas encore adaptées à l'étude de grandes pièces ou ne sont généralement pas très flexibles, c'est dire seulement adaptées pour des tests mécaniques très spécifiques.

Il semble donc finalement manquer une solution permettant d'obtenir la déformation d'une pièce, tout en s'affranchissant des éléments finis ou d'autres modèles physiques, et des contraintes d'invasivité.

De plus, après avoir obtenu les mesures de déformations, il faut être capable de les utiliser pour prédire le comportement mécanique de la pièce étudiée. De nombreuses méthodes d'apprentissage automatique ont été développées dans les dernières années, mais elles comportent encore des inconvénients. En effet, les données d'entraînement ne sont pas toujours des grandeurs mesurables expérimentalement, et certaines sont encore coûteuses à entraî-

ner. Les modèles intégrant des équations physiques restent utilisables seulement dans des cas simples ; ils sont récents et restent au stade de la recherche, et les modèles sont entraînés avec des données simulées et non des données mesurées. Ces méthodes nécessitent donc encore du développement avant de pouvoir être applicables en situation réelle.

2.4.2 Objectifs

Basé sur les constats établis dans la revue de littérature présentée dans les sections précédentes, ce mémoire s'intéresse à la conception d'un système de mesure de déplacements, et à l'utilisation de ces mesures pour prédire le comportement mécanique d'un outillage aérospatial. Ces tâches permettent de remplir l'objectif de ce mémoire :

Objectif : Développer une procédure robotisée de caractérisation structurelle et de compensation de la déformation d'un outillage

Pour y parvenir, les sous-objectifs suivants sont proposés :

SOB 1 : Concevoir un système de mesure des déplacements.
SOB 2 : Valider le fonctionnement du système de mesure des déplacements.
SOB 3 : Modéliser le comportement de l'outillage avec les données collectées.

2.4.3 Méthodologie

La méthodologie appliquée est décrite. pour chacun des sous-objectifs énoncés dans la section 2.4.2

SOB 1 : Concevoir un système de mesure des déplacements.
Le système conçu s'inspire et est adapté d'un embout de calibration robotique, présenté et utilisé pour la procédure IREC [12] (voir chapitre 3 pour les détails).
Pour valider les choix de conception, une étude d'éléments finis pourra être menée pour confirmer la résistance du système conçu. Des essais pourront être réalisés sur un prototype imprimé en 3D afin de valider expérimentalement une partie du fonctionnement du système, afin de gagner du temps par rapport à une modélisation physique plus poussée. Ce mémoire s'intéresse à valider une preuve de concept : dans ce cas il est possible de conserver une solution technique fonctionnelle même si les essais mis en œuvre ne prouvent pas l'optimalité de cette solution.

De plus puisqu'il s'agit d'une preuve de concept, seule une solution finale est présentée.

SOB 2 : Valider le fonctionnement du système de mesure des déplacements.
Le fonctionnement de l'outil conçu pour le SOB 1 est validé en collectant des données sur un outillage en particulier, déjà existant, et spécialement fabriqué à des fins de recherche. Il s'agit d'une réplique d'un outillage pour le procédé de placement de fibre automatisé. Cet outillage est en alliage d'aluminium 5083, dont la géométrie est représentée sur la figure 2.4. Il s'agit d'une géométrie coque, avec un rayon de courbure constant, comportant une zone où l'épaisseur de la plaque est constante et une autre zone où l'épaisseur varie de 8 mm à 14 mm.
Les valeurs de déplacement collectées sur l'outillage seront comparées à celles obtenues par un modèle d'éléments finis, considérées ici comme valeurs de référence, afin de conclure sur le fonctionnement du système conçu.

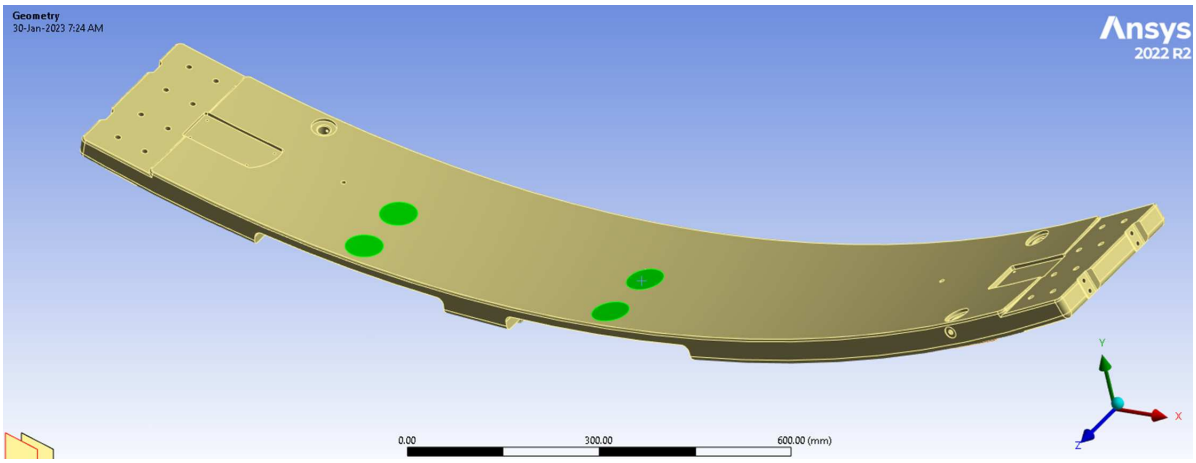


FIGURE 2.4 Géométrie de la pièce fabriquée - La zone de gauche correspond à la zone d'épaisseur constante de la plaque et la zone de droite correspond à la zone d'épaisseur variable. Cette plaque est fixée sur un support en acier structurel non représenté ici

Pour collecter des données efforts/déplacements sur l'outillage, les critères suivants sont respectés :
- contrainte subie par l'outillage inférieure à la moitié de la limite élastique du matériau de l'outillage, i.e. on reste dans le domaine élastique ;
- effort vertical maximal de 3000 N et effort horizontal maximal de 1000 N pour respecter le critère ci-dessus et les efforts admissibles par le dispositif expérimental (robot, outil etc.) ;
- effort combiné sur deux axes : Z/X ou Z/Y ;
- le système conçu s'inspirant de [12], il faut veiller à ce que le contact tribologique entre lui et l'outillage reste correct, et qu'il n'y ait pas de glissement. Ainsi nous veillerons à respec-

ter que l'effort horizontal appliqué soit inférieur à un tiers de l'effort vertical, pour éviter le glissement.
Idéalement, ces données seront collectées en utilisant le système de mesure conçu. S'il y a un manque de temps, ces données pourront à la place être générées par éléments finis, en veillant à simuler un ensemble de données crédibles, i.e. qui aurait pu être obtenu par le système conçu. Par ailleurs, utiliser dans un premier temps des données éléments finis peut permettre une première étude des modèles de prédiction, afin de n'utiliser à la fin que le meilleur modèle sur les données réelles.

SOB 3 : Modéliser le comportement de l'outillage avec les données collectées.
6 modèles différents sont testés et comparés afin de conclure sur la meilleure solution pour prédire le comportement mécanique de l'outillage. Un protocole est ensuite proposé, pour collecter expérimentalement des données, les utiliser pour entraîner le modèle retenu et ainsi être capable de caractériser le comportement mécanique de l'outillage.

La figure 2.5 permet de représenter schématiquement les objectifs et la méthodologie de ce projet.

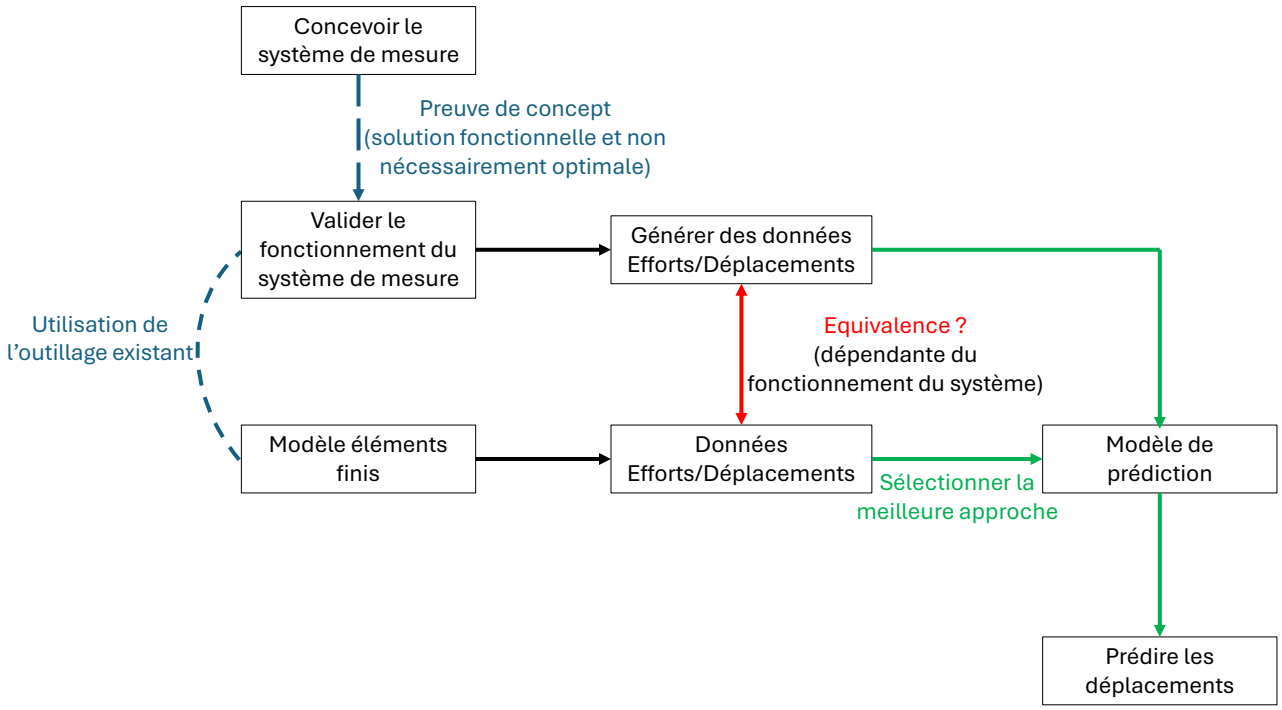


FIGURE 2.5 Représentation des objectifs et de la méthodologie

CHAPITRE 3 CONCEPTION DU SYSTÈME DE MESURE DES DÉPLACEMENTS

3.1 Principe et idées

D'après l'expérience de l'équipe de recherche et de l'analyse des besoins des différents collaborateurs, le système de mesure des déplacements à concevoir doit respecter un certain nombre de contraintes :

- le système doit être utilisable directement sur site, et donc facilement industrialisable ;
- le système doit être non invasif, c'est à dire que le fonctionnement ne doit pas nécessiter de modifier structurellement la pièce à mesurer ;
- le système est un effecteur monté sur un robot, permettant de transmettre un effort tridimensionnel et de mesurer le déplacement induit par cet effort ;
- pour des contraintes de matériel disponible au laboratoire, la métrologie intégrée pour la mesure des déplacements sera la métrologie laser.

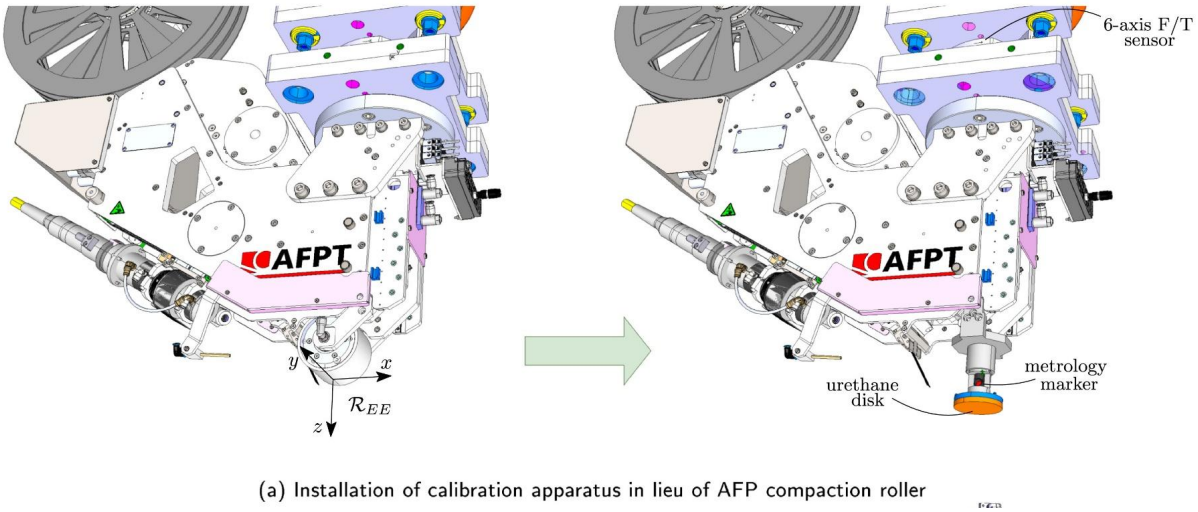
Après discussion avec les différents acteurs, et en prenant en compte les contraintes énoncées ci-dessus, le cahier des charges pour le système de mesure est établi (Tableau 3.1).

Tableau 3.1 Cahier des charges du système de mesure des déplacements

	Fonction	Critère	Valeur
F1	Préserver l'intégrité de la pièce étudiée	La pièce ne doit subir aucune altération physique ou mécanique	-Aucune modification mécanique de la pièce étudiée -Absence de marquage ou d'altération de surface
F2	Assurer une utilisation en environnement opérationnel	Système facilement déployable sur site	-Ne nécessite pas d'installation complexe (industriabilité assurée) -Encombrement réduit
F3	Transmettre et résister à un effort tridimensionnel	Assurer la transmission et la résistance aux efforts appliqués	Capacité de transmettre un effort maximal de 3kN en direction verticale et 1kN en direction horizontale
F4	Mesurer avec précision le déplacement induit par l'effort	Intégration d'un système de métrologie adapté	Compatibilité avec la métrologie laser

Le système proposé s'inspire de l'appareil de calibration utilisé pour la procédure IREC [12]. La figure 3.1 en montre un exemple une fois monté sur un effecteur de procédé automatisé de placement de fibres. L'ensemble est monté sur un robot asservi en force, et l'idée est de

mesurer la variation de position du robot pendant qu'une contrainte est appliquée sur l'outillage (moule utilisé pour placer les fibres d'une pièce en composite dans le cas présent) [12]. Pour notre application, deux grandes idées de cet appareil sont réemployées : l'utilisation d'un disque uréthane pour améliorer le contact et éviter de marquer la pièce étudiée, et l'incorporation d'une cible laser proche du contact pour capturer les phénomènes de déplacements. Cependant, nous voulons rendre la cible laser solidaire de la surface de l'outillage étudié et indépendante des mouvements du robot appliquant l'effort sur l'outillage, afin de mesurer le déplacement local de la surface de l'outillage et non la déformation du robot. Le système conçu est décrit dans la section 3.2.



(a) Installation of calibration apparatus in lieu of AFP compaction roller

FIGURE 3.1 Inspirations pour le système de mesure [12] - L'appareil de calibration est ici installé sur un rouleau de placement de fibres automatisé

3.2 Conception et fonctionnement du système

Par manque de temps pour la réalisation de ce travail de recherche, il n'y a pas eu la possibilité de tester le système et de reboucler sur la conception pour l'améliorer. De plus, le but de ce projet est d'effectuer une preuve de concept, et de montrer que cette idée peut fonctionner, c'est pourquoi seule la solution finale est présentée ici.
Les dessins de définition du système conçu sont disponibles en Annexe A.
Les figures 3.2 et 3.3 repèrent les différentes pièces décrites et permettent de comprendre le

fonctionnement de la solution proposée.

Le système est composé d'une cloche montée sur le robot par l'intermédiaire d'une bride de montage adaptée. La cloche est vissée à la bride de montage par 6 vis M6. La bride de montage est obtenue à partir d'un brut HSK63 (fonction F2) : la partie interface avec l'électrobroche fait partie du brut et seule la partie du bouchon supérieur est usinée. La cloche permet d'appliquer un effort sur la pièce étudiée (fonction F3). Le contact entre la cloche et la pièce se fait via un disque en uréthane collé sur la cloche, ce qui permet de maintenir un bon contact tribologique avec la pièce (limiter les glissements et permettre la fonction F3) et de ne pas altérer sa surface (fonction F1).

À l'intérieur de cette cloche est logé le bouchon. Le bouchon est la pièce permettant de supporter la cible laser (fonction F4), de la rendre solidaire de la surface de l'outillage et indépendante du mouvement de la cloche appliquant les efforts. Le bouchon est relié à la bride de montage par l'intermédiaire de ressorts (figure 3.3). Au repos, les ressorts compriment légèrement le bouchon dans un logement en surface conique prévu sur la cloche, pour qu'il soit maintenu en position lorsque le robot se déplace. Lors d'un chargement, le bouchon rentre en contact avec la pièce et les ressorts sont comprimés jusqu'à ce que le disque en uréthane vienne au contact pour transmettre l'effort souhaité à la pièce. À partir de cet instant, le bouchon est maintenu au contact de la pièce grâce aux ressorts et le bouchon est indépendant des mouvements de la cloche. Le bouchon est solidaire de la pièce et peut se déplacer en suivant sa déformation provoquée par l'action de la cloche. Une pastille en uréthane est également collée sur le bouchon pour assurer un bon contact tribologique avec la pièce et ne pas marquer sa surface (fonction F1).

Une cible laser est logée dans le bouchon et en traquant cette cible, on mesure le déplacement du bouchon solidaire du contact et donc on obtient la déformation locale de la surface de la pièce (fonction F4). La cible laser est une sphère, qui vient s'aimanter sur une embase. L'embase de la cible est ici logée dans le bouchon et fixée grâce à une vis de maintien M3. Le traqueur laser est un système optique de haute précision utilisé pour suivre en temps réel le déplacement de la cible. Il fonctionne en émettant un faisceau laser qui balaie l'espace et se réfléchit sur la cible. Le système capte ensuite le retour du faisceau pour calculer la position exacte de la cible à chaque instant, en tenant compte de sa distance, sa vitesse et sa trajectoire. Sa précision atteint un ordre de ± 10 µm.

Cette configuration permet de respecter les fonctions du cahier des charges 3.1. Il est relativement aisé de monter la cloche sur différents systèmes grâce à l'interface HSK63, interface classique normalisée d'électrobroche (fonction F2). Le fonctionnement décrit n'implique pas de modifier la pièce étudiée et les disques en uréthane permettent d'éviter de marquer la pièce (fonction F1). Le bouchon permet de loger une cible laser et donc la métrologie est

incorporée (fonction F4).
Lors de l'application d'un effort, les ressorts seront comprimés de la valeur de la compression nominale. Cette valeur prend en compte la précontrainte du ressort pour maintenir le bouchon en place au repos (1 mm), la protubérance du bouchon (8.4 mm) et la valeur de déformation de l'uréthanne (0.6 mm) pour l'effort maximal de 3000 N qui sera appliqué verticalement. Cette compression nominale vaut donc 10 mm (figure 3.3).
Un choix critique est celui des ressorts à utiliser pour maintenir le contact, ainsi que leur nombre et leur arrangement spatial. Ce choix est fondé sur des tests expérimentaux décrits dans la partie 3.4.

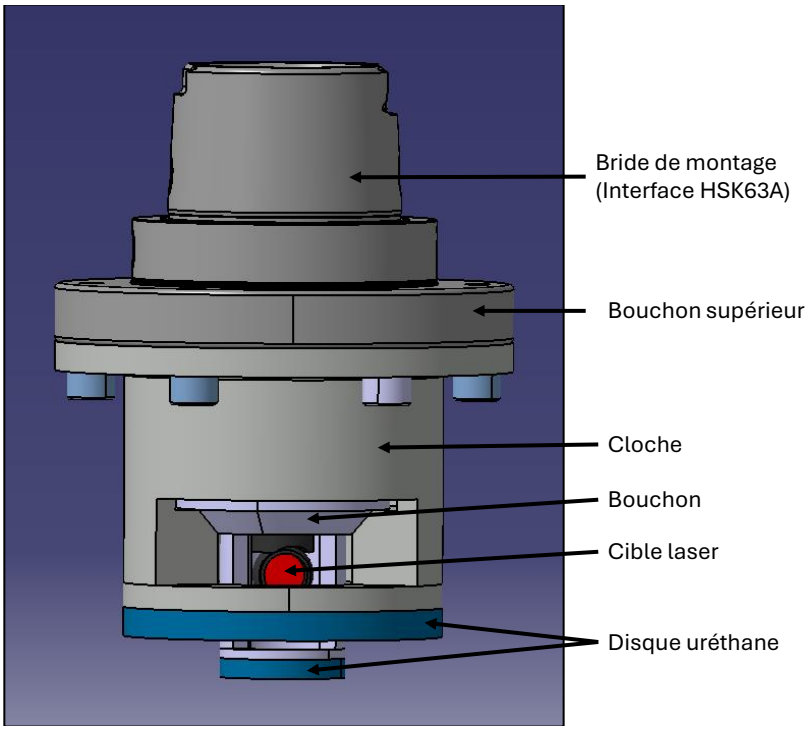


FIGURE 3.2 Modèle CAO de l'assemblage

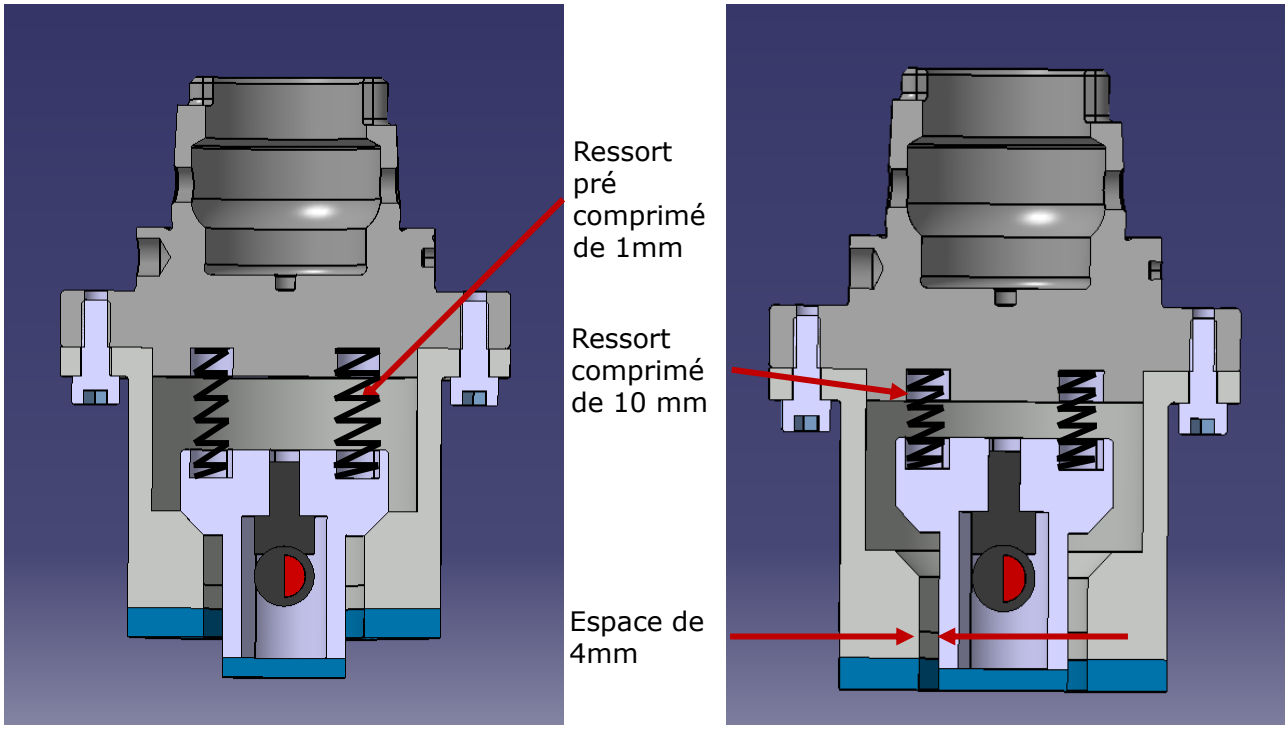


FIGURE 3.3 Vue en coupe du système - Deux ressorts sont représentés sur ces vues en coupe pour simplifier la représentation. La figure de gauche représente le système au repos. La figure de droite représente le système lors d'un chargement. Le déplacement possible correspond à la déformation latérale maximale que peut mesurer le système avant que la cloche rentre en contact avec le bouchon. La valeur de 10 mm correspond à la compression nominale. Les dessins de définition du système conçu sont disponibles en Annexe A pour plus de détails

3.3 Validation de la résistance de la cloche

La cloche transmet les efforts du robot vers la pièce. Une analyse statique par éléments finis est donc menée pour valider sa conception. La cloche est considérée encastrée sur sa face supérieure (liaison avec le robot) et subit un effort combiné sur sa face inférieure de 3000 N dans la direction verticale et de 1000 N dans une direction latérale. En effet, cet effort sera l'effort maximal appliqué pour cette étude (cf Fonction F3 du cahier des charges 3.1). On se place donc dans le cas où l'outillage subissant l'effort serait infiniment rigide et son effort de réaction égalerait l'effort transmis i.e. : pire cas de figure.
Une analyse de convergence du maillage est réalisée. La zone de concentration de contraintes se situe dans les angles supérieurs (gauche ou droit) de l'ouverture de la cloche (figure 3.4) donc la contrainte maximale de Von Mises est prise à ce point pour l'analyse de convergence. La zone de déplacement maximale est également représentée sur la figure 3.4. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 3.5.

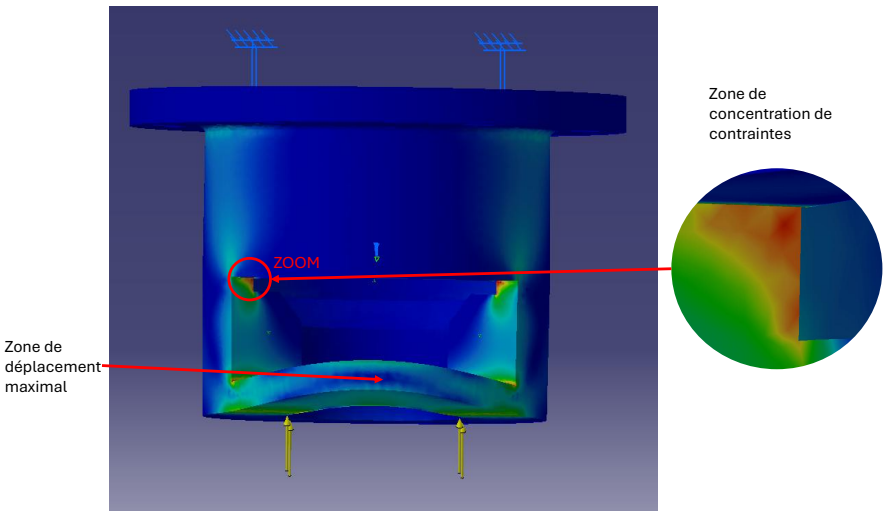


FIGURE 3.4 Schéma de l'analyse éléments finis réalisée pour valider la résistance de la cloche

Taille du maillage (mm)	3	2	1	1--0,6	1--0,2	1--0,1	1-0,05
Nombre de nœuds	9682	15283	72933	88577	137979	436149	1474143
Temps calcul (s)	0,6	0,8	10	10	30	100	600
Contrainte Von Mises max (MPa)	62,7	78	76,4	81	105	110	110
Deplacememt max (µm)	25	30	34	34	34	36	36

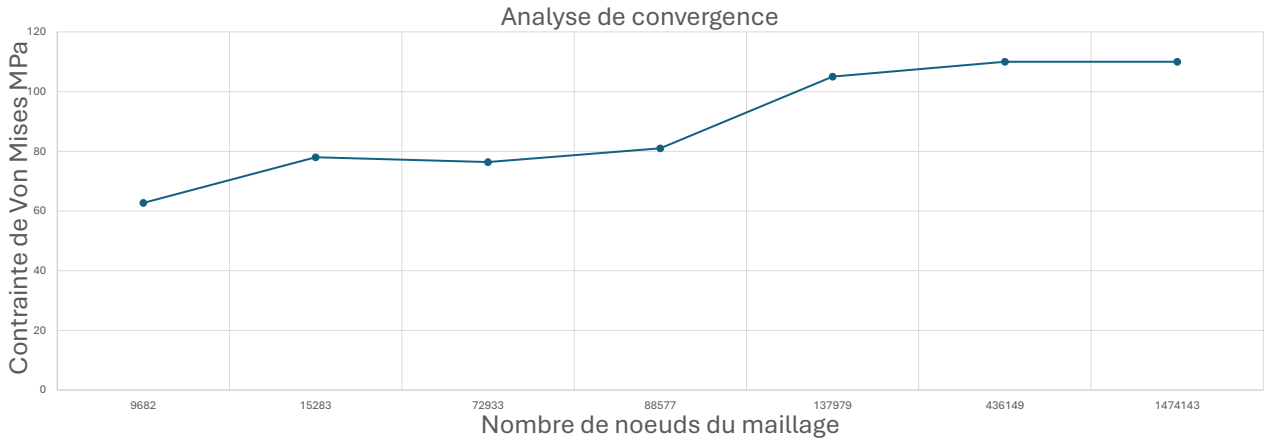


FIGURE 3.5 Convergence du maillage et analyse des résultats - Dans la taille du maillage, la deuxième valeur correspond à la taille d'un maillage local ajouté sur les quatre faces de l'ouverture de la cloche, pour considérer la zone de concentration de contraintes

La contrainte de Von Mises maximale est de 110 MPa. Le matériau choisi pour la cloche est un acier d'usage général S235 ayant donc une limite élastique d'environ 235 MPa, la

conception est donc validée d'un point de vue résistance de la cloche avec un coefficient de sécurité d'environ 2 (fonction F3 du cahier des charges 3.1).

3.4 Choix de l'arrangement des ressorts

3.4.1 Procédé expérimental

Un choix important pour le fonctionnement du système de mesure est celui de l'arrangement des ressorts, du modèle de ressort et du nombre de ressorts à utiliser pour réaliser le lien entre la bride de montage et le bouchon. Pour ce projet, il serait trop coûteux en temps d'élaborer une simulation permettant de faire le meilleur choix, c'est pourquoi il est décidé à la place de réaliser des essais expérimentaux pour trouver une solution. La solution trouvée ne sera pas nécessairement optimale compte tenu de l'espace restreint des possibilités testées, mais elle sera fonctionnelle (cf méthodologie présentée en section 1.4.3).
Quatre arrangements spatiaux de ressorts sont testés (Figure 3.6). Il y a une configuration 1 ressort, 3 ressorts, 4 ressorts et 5 ressorts. La configuration 1 ressort est celle avec un ressort au milieu du bouchon. La configuration 2 ressorts n'est pas testée car elle permettrait une mauvaise répartition des efforts. Le choix de ces arrangements est basé sur le critère de simplicité de conception : ressorts parallèles dans la position verticale, et placés de manière symétrique autour du bouchon pour une meilleure répartition des efforts. Les différents ressorts testés sont présentés dans le tableau 3.2. Ces ressorts sont choisis pour couvrir différents diamètres ni trop petits pour un meilleur montage (>= 9 mm) ni trop grands pour limiter l'encombrement (<= 14 mm), puisque le diamètre du bouchon impose une taille maximale de ressorts que l'on peut monter. Les ressorts doivent pouvoir atteindre au minimum la compression nominale de 10 mm (cf fonctionnement du système) ce qui contraint les choix en termes de longueur à vide et de chargement maximal à atteindre. Enfin la raideur du ressort doit permettre de ne pas appliquer une charge trop grande sur le bouchon pour que l'effort du bouchon sur la pièce étudiée soit négligeable par rapport à l'effort de la cloche (typiquement ici on prendra un chargement max d'environ 2 kg pour la compression de 10 mm).

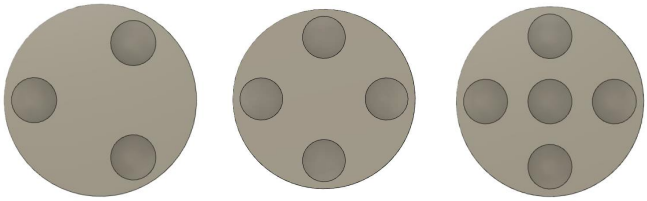


FIGURE 3.6 Vue de dessus du bouchon pour décrire l'arrangement spatial des ressorts - Configuration 3 ressorts à gauche, 4 ressort au milieu et 5 ressorts ou 1 ressort à droite

TABLEAU 3.2 Les différents ressorts testés

Ressort	Diamètre (mm)	Longueur à vide (mm)	Raideur (kg/mm)
1	11.00	39.00	0.12
2	11.25	64.00	0.20
3	13.75	41.50	0.24
4	9.00	28.50	0.24
5	13.75	62.50	0.15
6	56.00	11.00	0.10

Afin de sélectionner le meilleur arrangement de ressorts, des tests sont effectués sur un prototype du système conçu imprimé en 3D. Les critères de sélection sont :

Critère 1 - Contact maintenu entre le bouchon et l'outillage sans décollement du bouchon pour un déplacement de plusieurs millimètres de la cloche,

Critère 2- Observer le moins de micro-glissements possible entre le bouchon et la pièce pendant un déplacement de la cloche.

Le premier objectif des tests est donc de déterminer pour chaque arrangement, la valeur de déplacement maximale de la cloche dans une direction parallèle au plan de contact, avant d'observer un décollement du bouchon de la surface de travail. Le second objectif est de caractériser les micro-glissements entre le bouchon et la surface de travail, lors du déplacement de la cloche.

La surface de travail présente deux inclinaisons, 0° et 90° par rapport au sol afin de comparer la robustesse des arrangements face à un changement d'inclinaison. Une cible laser logée dans le bouchon est traquée pour permettre de rendre compte d'éventuels micro-glissements du bouchon sur la surface de travail. En effet même si le critère 1 est respecté, des micro-glissements pourraient se produire entre le bouchon et la surface de travail, et seraient détectés par des mouvements de la cible laser.

L'ensemble de ces tests devrait permettre de sélectionner un arrangement de ressorts parmi les différents testés, et donc de déterminer lequel sera utilisé sur le système réel. Pour rap-

pel, le but est avant tout d'obtenir une solution fonctionnelle, et non nécessairement optimale.

Un prototype du système de mesure présenté a été réalisé en impression 3D (Figure 3.7). Les pièces ont été réalisées sur une Bambu Lab X1-Carbon en PLA. Des cloches, des bouchons et une bride de montage ont été conçus. La bride permet le montage sur un robot UR10 (utilisé ici pour ces tests). Les bouchons permettent le logement de la cible laser et le montage des différents ressorts sélectionnés. Les cloches sont imprimées en plusieurs hauteurs pour s'adapter aux longueurs à vide des ressorts. Une pastille uréthane est collée sur le bouchon et la surface de travail a un revêtement en aluminium pour simuler au mieux le contact aluminium/uréthane du système réel.

La procédure expérimentale mise en place est la suivante (Figure 3.7) :

Choix d'une configuration : montage d'un arrangement de ressorts ; choix d'un ressort et de l'arrangement 1, 3, 4 ou 5 ressorts. Tous les ressorts présentés sont testés dans chaque configuration.

Mise en contact : contrôle du robot et mise en contact du bouchon sur la surface de travail, ce qui implique le choix de l'inclinaison 0° ou 90°. Toutes les configurations sont testées sur les deux inclinaisons. Après la mise en contact : compression des ressorts de la valeur souhaitée. 3 valeurs sont possibles : compression nominale, sur compression ou sous compression. On entend par valeur de compression nominale la valeur qui sera effective sur le système réel (cf partie précédente). Des essais en modifiant la valeur de compression nominale (sur compression de 12 mm et sous compression de 8 mm) sont également effectués pour déterminer son impact sur le contact entre le bouchon et la surface de travail.

Déclenchement de la mesure laser : mesure en temps continu.

Déplacement de la cloche : contrôle du robot dans une direction parallèle à la surface de contact. Le déplacement est effectué par incrément de 1mm jusqu'à observer un décollement du bouchon par rapport à la surface de contact.

Arrêt de la mesure laser

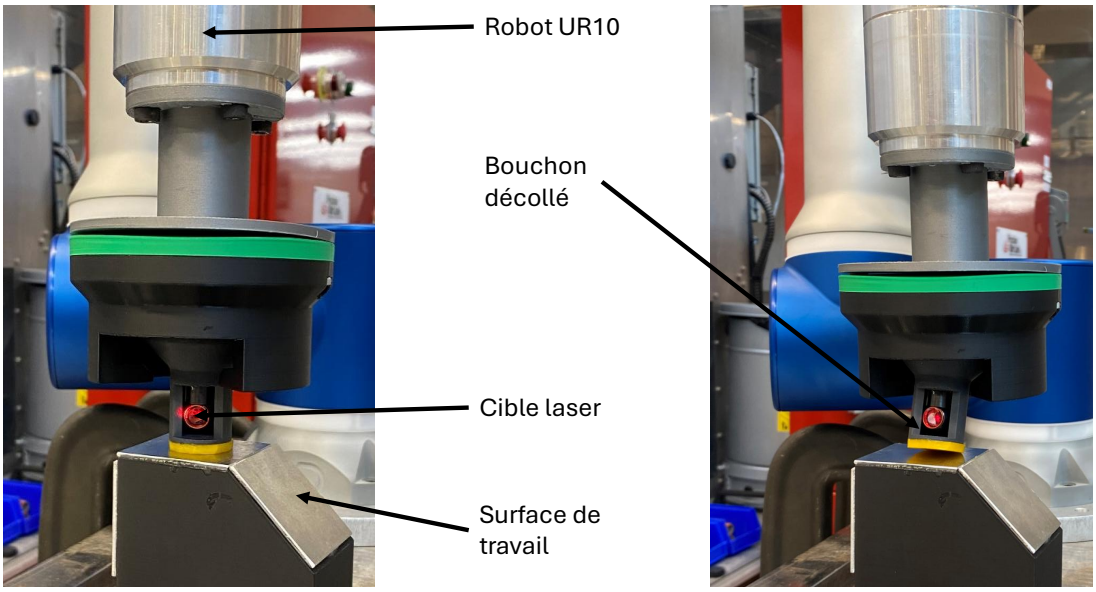


FIGURE 3.7 Dispositif expérimental pour le choix des ressorts - Photo de gauche : le choix de la configuration et la mise en contact sont effectués (l'inclinaison 0° et la compression nominale sont choisies dans cet exemple) ; la mesure laser peut être déclenchée. Sur la photo de droite, la cloche a été déplacée par incréments de 1 mm jusqu'à décollement du bouchon, ce qui symbolise l'arrêt de la mesure laser

Afin de comparer les données laser obtenues et évaluer la performance vis-à-vis du **critère 2** pour les différents ressorts, une courbe caractéristique est tracée pour chaque configuration. Cette courbe caractéristique représente l'évolution de la norme du vecteur déplacement du bouchon entre le début et la fin des mesures laser. Les étapes pour obtenir ces courbes caractéristiques sont :

Tracer la norme du vecteur position sur toute la durée de l'essai : ce graphe permet de repérer l'instant à partir duquel le décollement du bouchon devient très important. L'analyse des micro glissements est effectuée sur la partie des essais précédant le décollement du bouchon.

Tracer la norme du vecteur position et le déplacement selon les 3 axes : Tracé effectué sur la période précédant le décollement du bouchon. L'objectif est d'identifier les instants de forte variation de la norme du vecteur position. Ces instants sont appelés impulsion. Le premier point de mesure est considéré comme le point origine

(norme = 0mm).

Tracer la courbe caractéristique : Représenté la norme du vecteur position en fonction du numéro de l'impulsion.

Une illustration d'un résultat de l'application de cette méthodologie est présentée figure 3.8. La figure 3.8 a) repère l'instant où le décollement du bouchon devient important. La figure 3.8 b) permet de repérer les impulsions. La figure 3.8 c) représente la courbe caractéristique de l'arrangement en µm.

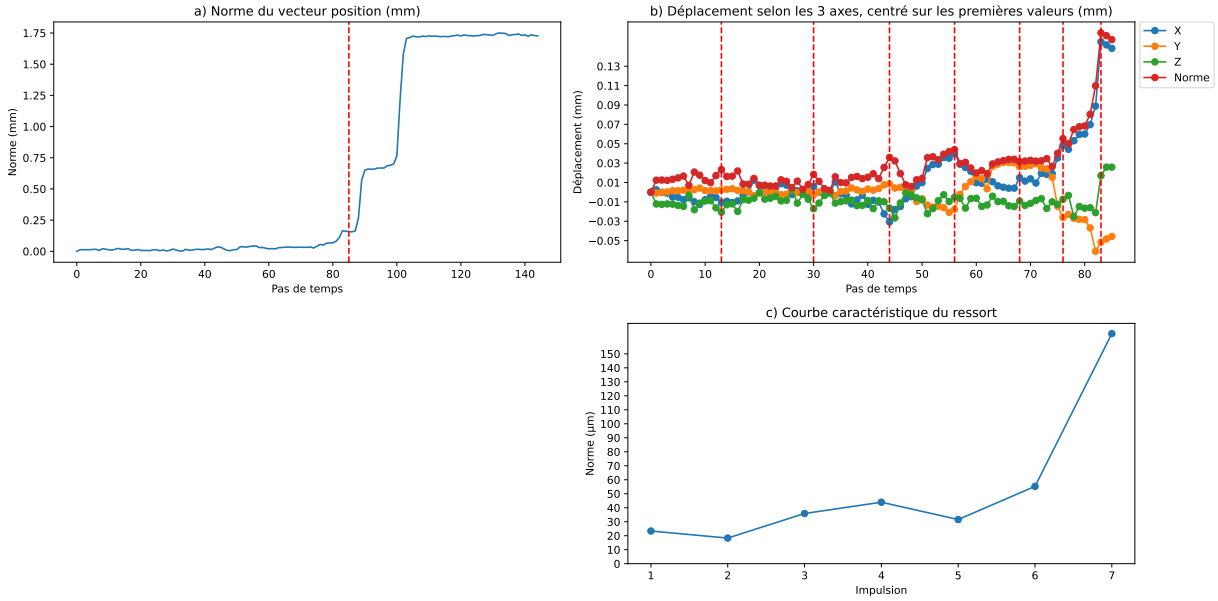


FIGURE 3.8 Illustration de la méthodologie appliquée - La méthodologie est appliquée ici sur la configuration 3 ressorts à une inclinaison de 0°, à la compression nominale de 10 mm pour le premier ressort du tableau 3.3. Sur la figure c), les impulsions sont les instants de fortes variations repérés sur la figure b)

3.4.2 Résultats

Le tableau 3.3 consigne les déplacements maximums de la cloche avant décollement du bouchon obtenus pour les différentes configurations d'essais. Il s'agit donc des performances des configurations vis-à-vis du **critère 1**.

Les essais ont montré que la configuration à 1 ressort n'est pas satisfaisante car elle ne permet pas une bonne remise en position du bouchon après un cycle chargement/déchargement. En effet le bouchon a tendance à tourner autour du ressort. C'est pourquoi certaines données sont manquantes dans le tableau 3.3 et la configuration à 1 ressort ne sera pas prise en compte dans la suite de l'analyse.

TABLEAU 3.3 Déplacement maximal horizontal dans le plan de contact avant perte de contact du bouchon en fonction de l'arrangement des ressorts, de l'inclinaison au contact et de la compression - L représente la longueur à vide et Φ le diamètre des ressorts

Ressort		Compression nominale (10mm)			"Sur-compression" (12mm)			"Sous-compression" (8mm)		
L (mm)	Φ(*mm*)	Arrangement ressorts	Inclinaison au contact		Arrangement ressorts	Inclinaison au contact		Arrangement ressorts	Inclinaison au contact	
			0°	90°		0°	90°		0°	90°
		1	7mm	/	1	/	/	1	6mm	/
39	11	3	6mm	7mm	3	7mm	8mm	3	6mm	7mm
		4	6mm	7mm	4	7mm	7mm	4	5mm	7mm
		5	7mm	9mm	5	7mm	9mm	5	7mm	7mm
			0°	90°		0°	90°		0°	90°
		1	/	/	1	/	/	1	/	/
64	11.25	3	10mm	6mm	3	11mm	8mm	3	9mm	5mm
		4	9mm	7mm	4	10mm	8mm	4	8mm	6mm
		5	10mm	7mm	5	10mm	8mm	5	8mm	6mm
			0°	90°		0°	90°		0°	90°
		1	6mm	5mm	1	8mm	5mm	1	5mm	4mm
41.5	13.75	3	3mm	5mm	3	6mm	7mm	3	3mm	4mm
		4	6mm	5mm	4	7mm	8mm	4	5mm	4mm
		5	7mm	5mm	5	7mm	5mm	5	6mm	3mm
			0°	90°		0°	90°		0°	90°
		1	/	/	1	/	/	1	/	/
28.5	9	3	4mm	3mm	3	5mm	4mm	3	3mm	3mm
		4	4mm	5mm	4	5mm	5mm	4	3mm	4mm
		5	5mm	4mm	5	5mm	5mm	5	3mm	3mm
			0°	90°		0°	90°		0°	90°
		1	/	/	1	/	/	1	/	/
62.5	13.75	3	8mm	6mm	3	9mm	7mm	3	8mm	6mm
		4	6mm	6mm	4	9mm	7mm	4	6mm	5mm
		5	7mm	8mm	5	9mm	9mm	5	7mm	7mm

Toutes les configurations testées autorisent un déplacement de la cloche de plusieurs millimètres avant le décollement du bouchon. Le **critère 1** est donc vérifié. En effet, les efforts mis en jeu sur le système réel (3 kN en vertical et 1 kN en horizontal) ne provoqueront que quelques centaines de micromètres de déplacement de la cloche et non plusieurs millimètres comme ici pour ces tests. Pour choisir le meilleur arrangement, il reste à analyser lequel permet le moins de micro-glissements entre le bouchon et la surface de travail (**critère 2**). Pour ce faire, il faut analyser les données laser enregistrées pendant les essais et les courbes caractéristiques obtenues.

Les courbes caractéristiques pour les différents ressorts et les différents arrangements sont obtenues pour la compression nominale, pour l'inclinaison 0° (Figure 3.9) et 90° (Figure 3.10).

Ce que l'on souhaite obtenir, c'est une courbe caractéristique la plus constante possible sur la plage la plus grande possible, car cela montre alors un contact plus stable entre le bouchon et la surface de travail. Ces courbes montrent alors que le ressort 4 (longueur à vide 28.5 mm et diamètre 9 mm) permet un contact plus stable pour les 3 arrangements et les deux inclinaisons (courbes rouges sur les graphes). En effet, la norme du vecteur position reste décalée de moins de 10 µm par rapport au point d'origine des mesures, et ces courbes ne

présentent pas de forte variation de la norme du vecteur position. Ce ressort semble donc tout à fait satisfaisant pour notre système, vis-à-vis des conditions des expériences.
De plus, à 0° et pour ce ressort 4, c'est la configuration 4 ressorts qui semble la plus efficace, alors que la configuration 5 ressorts permet un meilleur contact à 90°.
L'analyse des arrangements en sous-compression et en sur-compression pour le ressort 4 permet d'arriver aux mêmes conclusions (figure 3.11).

Finalement, c'est le ressort 4 (diamètre 9 mm et longueur 28.5 mm) dans la configuration 4 ressorts qui est retenu. En effet cette configuration permet le respect du **critère 1** (déplacement maximal de la cloche autorisé) et surtout du **critère 2** (présence de micro glissements) puisqu'il semble permettre de maintenir un contact stable, et ce pour l'orientation de la surface de travail de 0° (cas général le plus simple).

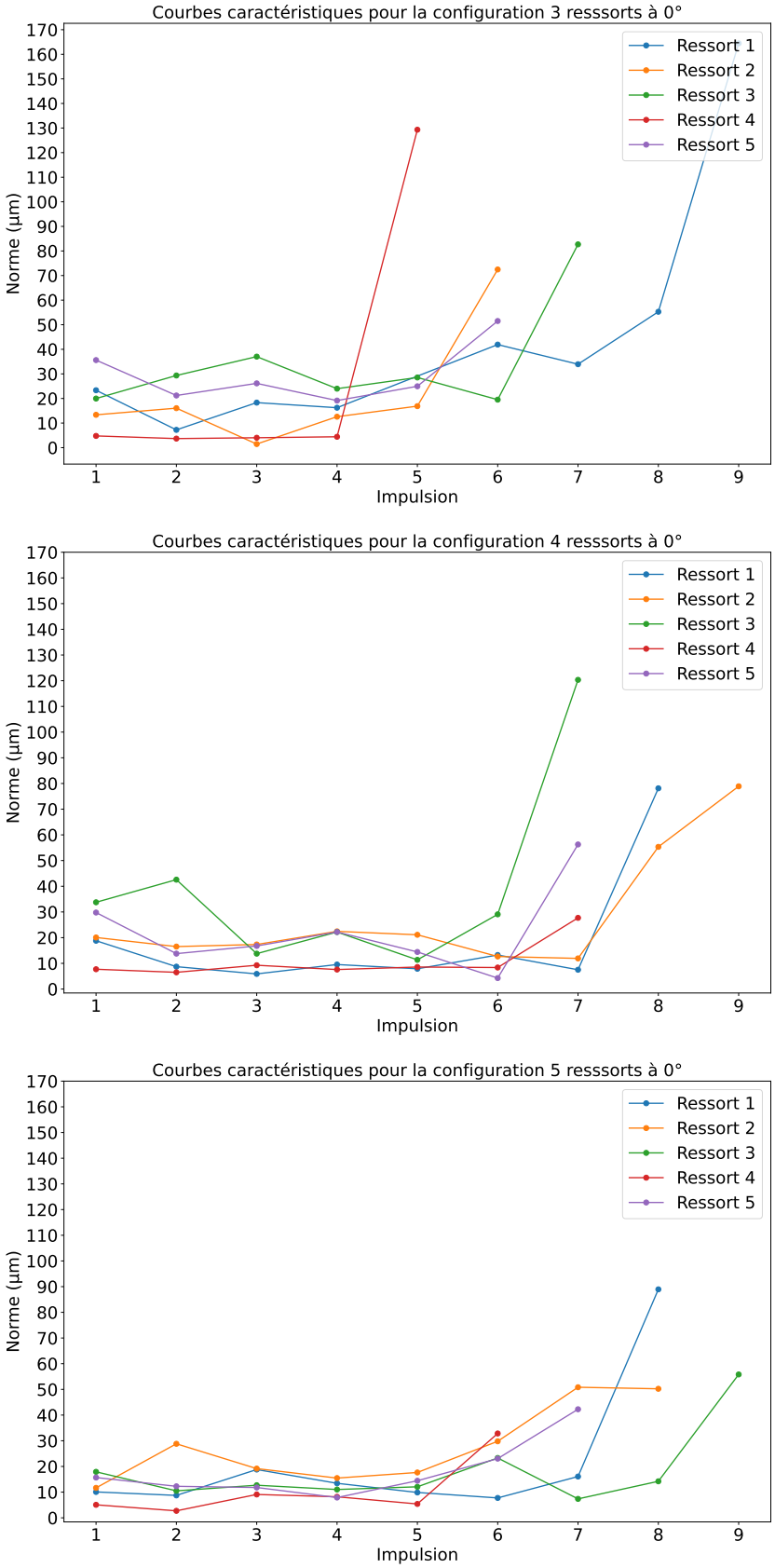


FIGURE 3.9 Courbes caractéristiques pour les 3 arrangements de ressorts à compression nominale et pour l'inclinaison 0° - La numérotation des ressorts correspond à l'ordre dans le Tableau 3.3. Voir méthodologie présentée en 2.4.1 pour l'obtention des courbes

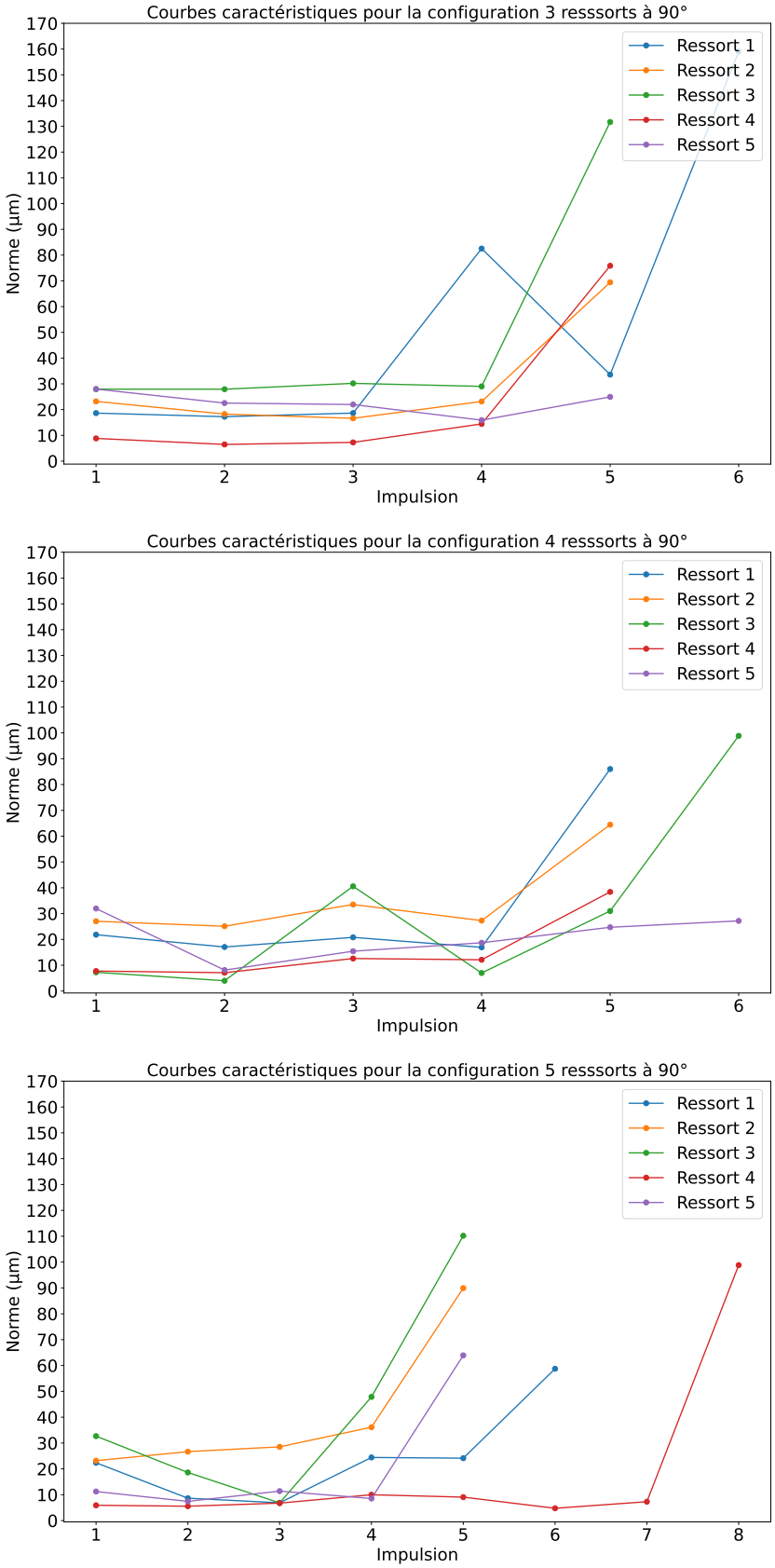


FIGURE 3.10 Courbes caractéristiques pour les 3 arrangements de ressorts à compression nominale et pour l'inclinaison 90° - La numérotation des ressorts correspond à l'ordre dans le Tableau 3.3. Voir méthodologie présentée en 2.4.1 pour l'obtention des courbes

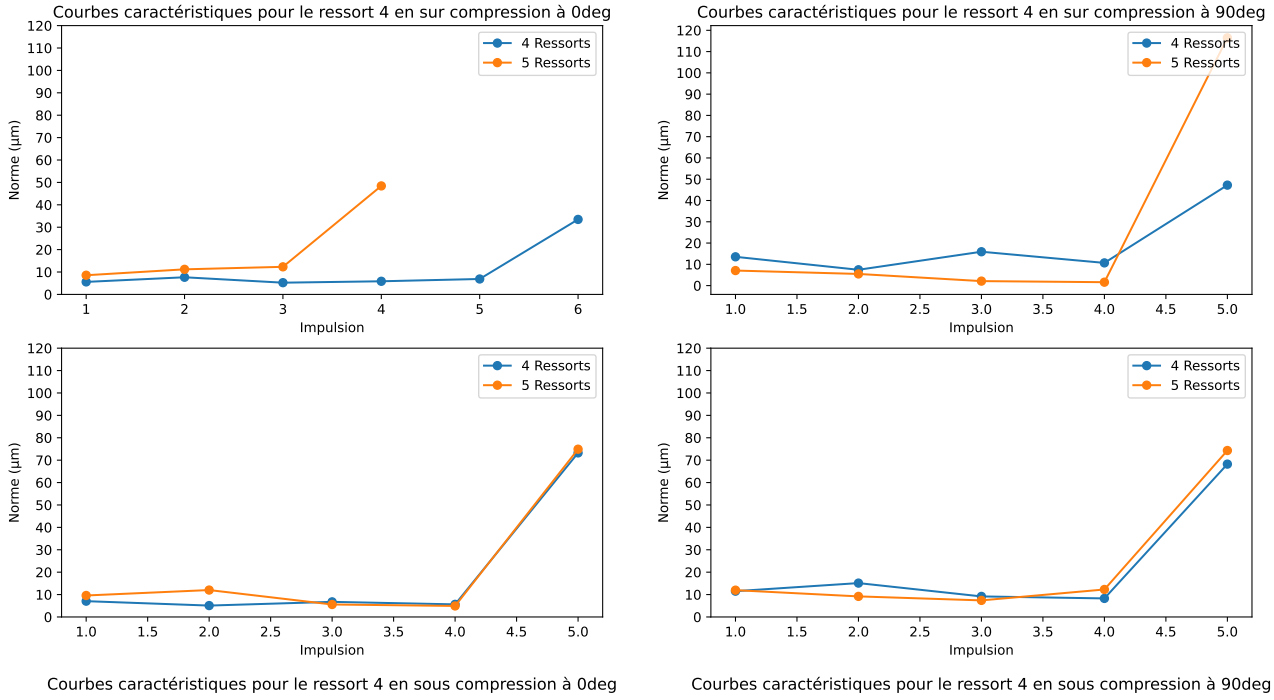


FIGURE 3.11 Courbes caractéristiques du ressort 4 et sous compression et sur compression - La configuration 4 ressorts semble plus intéressante à 0° et la configuration 5 ressorts meilleure à 90°. Le ressort 4 a toujours des bonnes performances de maintient de contact pour des compressions différentes de la compression nominale

CHAPITRE 4 VALIDATION DU FONCTIONNEMENT DU SYSTÈME DE MESURE DES DÉPLACEMENTS

4.1 Protocole expérimental

Afin de valider le fonctionnement du système de mesure de déplacements, des essais sont effectués. Le but est d'obtenir des données avec le système conçu et de comparer les valeurs de déplacements obtenues avec le modèle éléments finis existant pour l'outillage.
Cette simulation éléments finis est réalisée sur Ansys. Le modèle comporte des données pour 6 positions différentes (figure 4.1). Ces positions sont choisies pour être au centre des deux différentes zones : la zone d'épaisseur constante et la zone d'épaisseur variable (cf description de l'outillage dans la Méthodologie). La taille des éléments du maillage est de 6 mm sur l'outillage, et de 3 mm sur les zones d'applications des efforts. La seule condition aux limites est l'encastrement de l'outillage. Les chargements sont des efforts répartis sur chaque zone d'application.
Les valeurs des chargements appliqués à chaque position sont choisies afin de couvrir la plage des valeurs du cahier des charges : 3000 N au maximum pour la force verticale et 1000 N au maximum pour la force horizontale. De plus, pour assurer un bon contact tribologique entre l'outillage et le système conçu, la norme de la force horizontale est toujours inférieure à 0.3 fois la norme de la force verticale (cf Méthodologie). Les valeurs des chargements appliqués sont consignées dans le tableau 4.1.
Les efforts sont appliqués dans un repère local à chaque position (figure 4.1). Ces repères sont définis pour que l'axe Z corresponde à la normale à la surface de l'outillage au centre de la zone d'application de l'effort ; les axes X et Y sont tangents à la surface en ce même point. Les directions de ces repères locaux correspondent aux directions du repère du Point Central Outil du robot, c'est-à-dire les directions d'application des efforts avec le système de mesure réel.

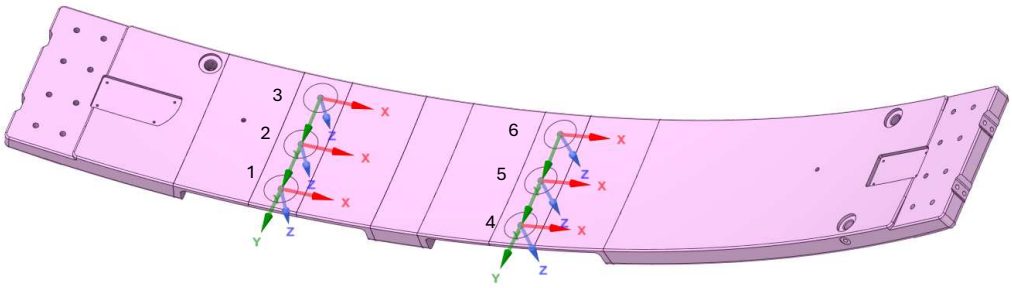


FIGURE 4.1 Zone d'application des efforts sur l'outillage - Les 6 zones d'applications des efforts numérotées de 1 à 6 sont des disques de diamètres 60 mm. Les repères représentés définissent les directions d'application des efforts ainsi que les directions de mesure des déplacements dans le modèle éléments finis

TABLEAU 4.1 Cas de charges sélectionnés pour les tests

Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
0	0	1000
0	0	2000
0	0	3000
0	500	2000
0	500	3000
0	1000	3000
500	0	2000
500	0	3000
1000	0	3000

Pour ces essais, le système est monté sur un outil existant comportant une électrobroche compatible avec l'interface HSK63A. Le robot utilisé est un Comau. La disposition des différents éléments dans la cellule du robot est explicitée sur la figure 4.2 .

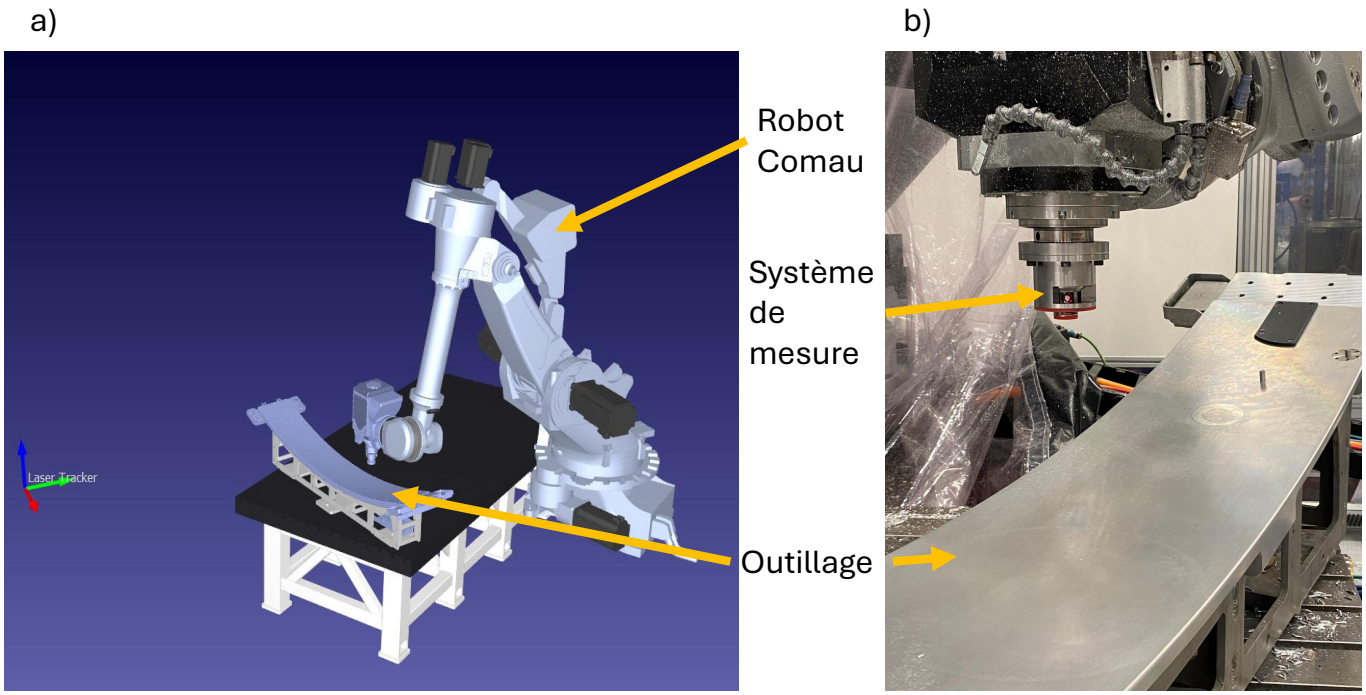


FIGURE 4.2 Dispositif expérimental - a) Cellule RoboDK représentant le robot, l'outillage, le système de mesure ; le repère représente la position du traqueur laser. b) Zoom : photo de l'outillage et du système de mesure

Pour générer les cas de charges et collecter les valeurs de déplacements, une procédure de commande du robot déjà existante est utilisée. Cet algorithme de commande est celui de la procédure IREC [12] (cf Procedure 1 dans [12]). Cette procédure est adaptée pour notre application et décrite dans l'algorithme 1.

3 séries de données différentes sont finalement collectées. La première est la série de données générée par la simulation éléments finis. Les deux autres séries sont collectées expérimentalement avec la procédure décrite ci-dessus.
Une série est mesurée en utilisant le système conçu pour les 6 positions définies sur la figure 4.1.
La deuxième série expérimentale est obtenue pour les positions 2, 3 et 6 (figure 4.1) de la manière suivante : une cible laser est collée à la colle chaude sur la position considérée. Les efforts sont appliqués en utilisant l'outil conçu (cloche seulement, pas de bouchon ni cible laser) et les déplacements mesurés par le traqueur sont donc ceux de la cible laser collée. La cible collée permet d'obtenir des mesures de déplacement avec un accommodement quasi par-

Algorithme 1 Procédure de contrôle du robot

Etape préliminaire : Calibration de la position de l'outillage. 3 positions sur l'outillage sont enregistrées avec le traqueur laser, et un repère (repère A) est défini pour la mesure des positions de la cible laser. La position de l'outillage et ce repère sont récupérés dans la simulation RoboDK et utilisés pour la commande du robot.

Entrées : — Ensemble des positions d'application des cas de charge (6 positions de la simulation éléments finis),
— Positions et orientations du robot relatives aux cas de charges (défini par la simulation RoboDK)
— Valeurs des cas de charge (forces dans les 3 directions).

Sorties : Vecteurs de déplacement dans le repère souhaité

1: **Pour chaque** position
2: Approcher le robot de la position et l'orienter (contrôle du robot en position)
3: Passage du robot en mode "contrôle par force"
4: Établir le contact et appliquer un effort jusqu'à la valeur seuil de 60N (valeur de l'effort développés par les ressorts)
5: Enregistrer la position de la cible laser (valeur de référence)
6: **Pour chaque** cas de charge
7: Appliquer le cas de charge (contrôle du robot en force)
8: Enregistrer la position de la cible laser (valeur cible) une fois l'effort atteint.
9: **fin pour**
10: Passage du robot en mode contrôle par position et retour à la position HOME.
11: **fin pour**
12: Comparer les valeurs laser avant/après application des efforts pour calculer les vecteurs de déplacement dans le repère du traqueur (repère A).
13: Appliquer la formule de changement de repère pour obtenir les déplacements dans le repère souhaité (repère du point d'application des efforts).

fait entre la cible laser et l'outillage. Ainsi, il est possible de comparer avec les déplacements obtenus avec le système conçu et son accommodement mécanique (action des ressorts).
La figure 4.3 représente schématiquement l'application du protocole proposé pour obtenir les 3 séries de données.

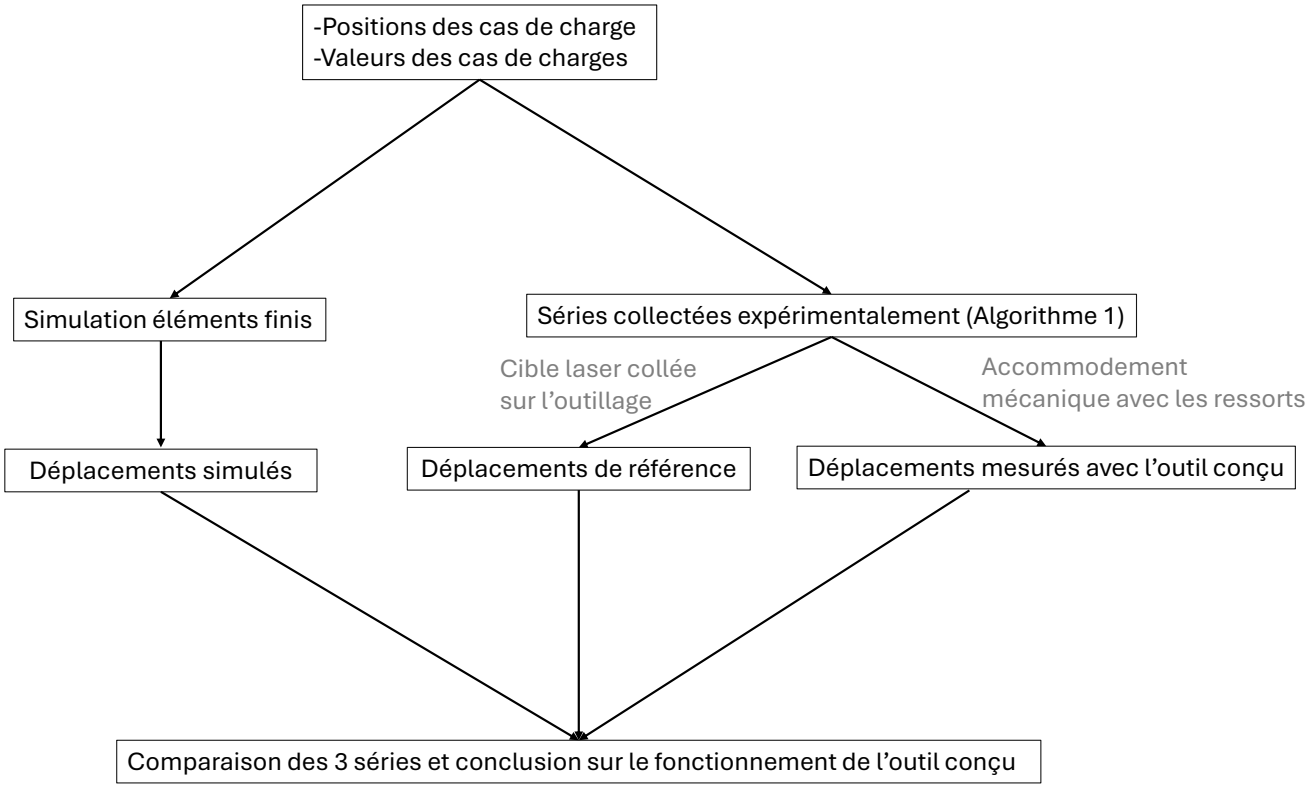


FIGURE 4.3 Protocole d'obtention des 3 séries de données

4.2 Résultats

Pour rappel, ce projet s'inscrit dans le contexte de la calibration robot. De manière générale, la précision admissible des processus étudiés par l'équipe de recherche et ses collaborateurs est de l'ordre de 500 µm. Par conséquent, les valeurs de déplacement qui seraient inférieures à un dixième de cette tolérance, soit 50 µm, sont considérées comme non significatives (valeur validée et prise en compte par l'équipe de recherche et ses collaborateurs). Ces faibles valeurs de déviations ne constituent pas une modification pertinente du comportement étudié. Ainsi, pour assurer l'analyse des résultats, seules les valeurs de déplacement supérieures à ce seuil de 50 µm sont considérées significatives.

Les données obtenues sont disponibles en Annexe B et C. Les déplacements mesurés sont

transformés dans le repère lié au Point Central de l'Outil, car il correspond au repère d'application des efforts du système de mesure et au repère utilisé pour générer les efforts et mesurer les déplacements dans le modèle éléments finis.
Les figures 4.4, 4.5, 4.6 représentent graphiquement les déplacements obtenus pour les positions 2, 3 et 6 respectivement ; positions pour lesquelles les 3 séries de données sont disponibles (éléments finis, cible collée, système conçu).
Même si le chargement appliqué est bidimensionnel, il a été choisi de représenter le déplacement selon Z en fonction de l'effort Z, le déplacement selon X en fonction de l'effort X, et le déplacement selon Y en fonction de l'effort Y. Ce choix s'explique par le fait que, pour chaque direction, l'effort correspondant est celui qui influence le plus significativement le déplacement observé.
Pour les déplacements en Z, on remarque peu d'erreur entre les 3 séries, pour les 3 positions (figures 4.4 a), 4.5 a), 4.6 a)). On observe en effet entre les déplacements mesurés avec la cible collée et avec le système conçu environ 4 % d'erreur en moyenne pour la position 2, 1 % d'erreur en moyenne pour la position 3 et 2 % d'erreur en moyenne pour la position 6 (tableau B.3). Entre les déplacements simulés par éléments finis et mesurés par le système conçu, on trouve environ 7 % d'erreur en moyenne pour la position 2, 9 % d'erreur en moyenne pour la position 3 et 5 % d'erreur en moyenne pour la position 6 (tableau C.3).
Pour les données en X (figures 4.4 b), 4.5 b), 4.6 b)), les déplacements obtenus par éléments finis et mesurés par la cible collée sont toujours non significatifs. En revanche, pour certains chargements, les données mesurées par le système conçu deviennent significatives.
Pour les données en Y (figures 4.4 c), 4.5 c), 4.6 c)) , les éléments finis ne prévoient pas de valeurs significatives. En revanche, les mesures avec la cible collée et avec le système de mesure montrent des déplacements significatifs pour les cas de charge où un effort en Y est appliqué. Pour ces cas de déplacements significatifs, on observe moins de 10 % d'erreur en moyenne entre les déplacements mesurés par le système conçu et ceux mesurés par la cible collée (tableau B.2).
Les données avec cible collée ont des valeurs généralement légèrement supérieures aux données éléments finis : entre 1 % et 10 % d'écart pour les valeurs en Z, entre 2 % et 5 % d'écart pour les valeurs en X et entre 2 % et 9 % d'écart pour les valeurs en Y. Ceci peut s'expliquer par le fait que le système réel prend en compte plus de phénomènes physiques que la simulation qui fait des simplifications. Par exemple, la liaison encastrement entre l'outillage et sa structure n'est en réalité pas parfaite. De plus, le modèle éléments finis ne prend en compte que l'outillage alors que sur le système réel, la structure supportant l'outillage ainsi que la table où elle est posée sont présents et pourraient se déformer. Sur l'axe Y, ces phénomènes semblent importants puisqu'ils peuvent amener des déplacements significatifs non prévus par

la simulation : ces déplacements sont retranscrits à la fois par la cible collée et par le système de mesure.

Les données mesurées par le système conçu ont des valeurs généralement supérieures à celles mesurées avec la cible collée. Sur l'axe X notamment, les déplacements mesurés par le système conçu peuvent être 3 à 8 fois plus importants que les déplacements mesurés par la cible collée, ce qui amène à obtenir des déplacements significatifs non prévus par les éléments finis et les mesures par la cible collée. Cela pourrait s'expliquer par le fait que le système conçu, de par l'action des ressorts, induit lui-même un déplacement non désiré.

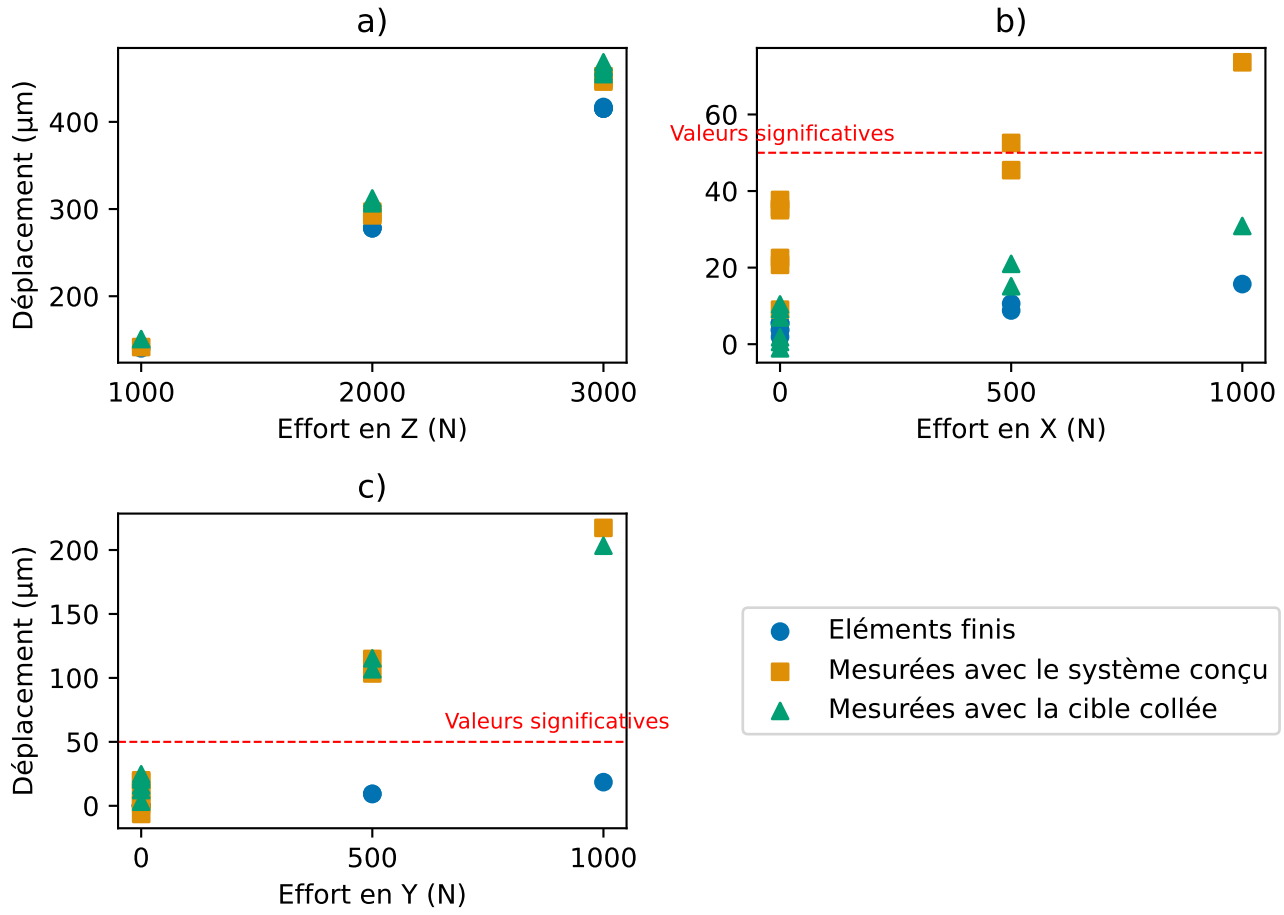


FIGURE 4.4 Déplacements obtenus pour la position 2 - a) Déplacement en Z en fonction de l'effort en Z, b) Déplacement en X en fonction de l'effort en X, c) Déplacement en Y en fonction de l'effort en Y

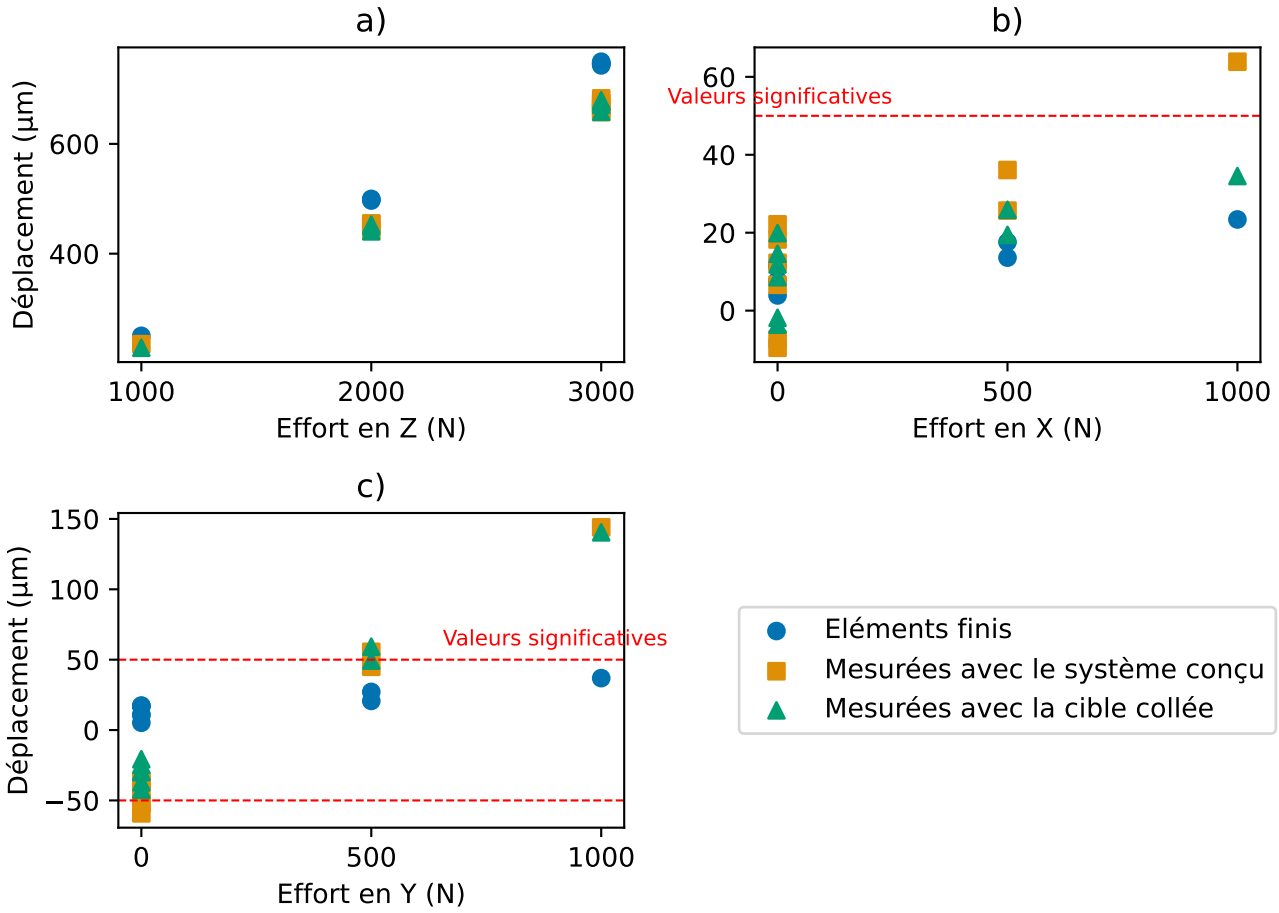


FIGURE 4.5 Déplacements obtenus pour la position 3 - a) Déplacement en Z en fonction de l'effort en Z, b) Déplacement en X en fonction de l'effort en X, c) Déplacement en Y en fonction de l'effort en Y

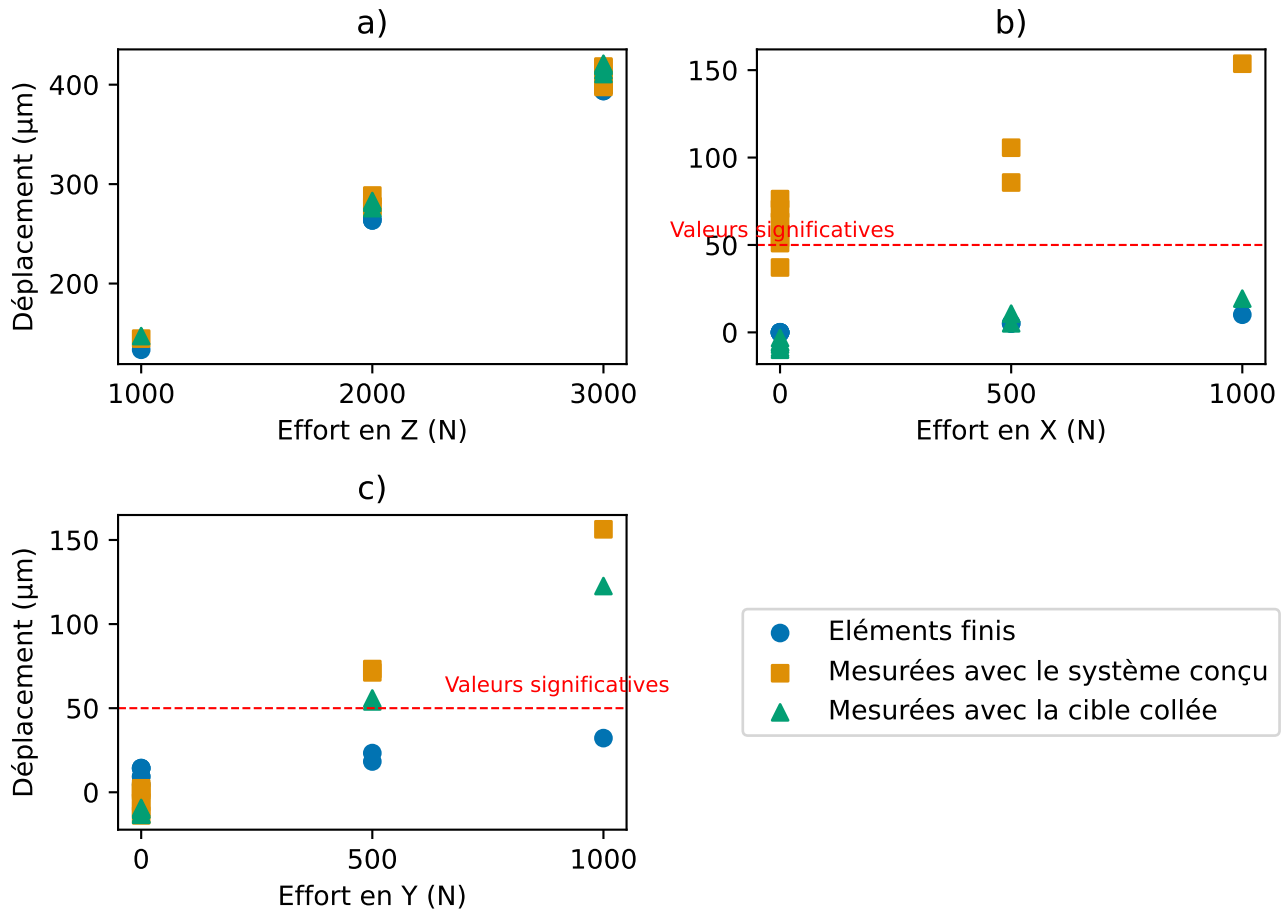


FIGURE 4.6 Déplacements obtenus pour la position 6 - a) Déplacement en Z en fonction de l'effort en Z, b) Déplacement en X en fonction de l'effort en X, c) Déplacement en Y en fonction de l'effort en Y

Pour les autres positions (1, 4, 5), seules des données mesurées avec le système de mesure sont disponibles. Pour la position 1, aucune donnée n'est disponible. En effet, pour cette position, le traqueur laser a perdu la visibilité de la cible car l'ouverture prévue sur le système de mesure n'est pas assez importante.

L'analyse de ces données (Annexe C) montre des résultats similaires à ceux énoncés précédemment. On observe peu d'erreur entre les déplacements expérimentaux obtenus sur l'axe Z et ceux issus de la simulation : l'erreur moyenne globale est d'environ 7 %, tandis que l'erreur locale varie entre 2 % et 15 %, selon la position de mesure (tableau C.3). Les valeurs mesurées sont légèrement supérieures à celles simulées, ce qui est cohérent avec les attentes. Une source d'écarts entre les résultats expérimentaux et simulés pourrait résider dans la modélisation du chargement. Dans la simulation, la charge est répartie sur un disque plein, tandis que dans

le montage expérimental, l'effort est appliqué sur un anneau. La pression exercée n'est donc pas identique pour ces deux séries de données.
Concernant les axes transversaux X et Y, les déplacements simulés sont très faibles, de l'ordre de 20 µm maximum, et donc inférieurs au seuil de 50 µm considéré. Ils sont également proches de la valeur de précision du traqueur laser (5-10 µm). L'incertitude pour les déplacements sur les axes X et Y est donc grande et ces données sont peu interprétables. Les valeurs mesurées avec le système conçu sur les axes X et Y sont en général plus élevées que celles simulées (tableaux C.1 et C.2), et atteignent parfois des valeurs supérieures à 50 µm. Cela pourrait s'expliquer par le problème mécanique induisant des déplacements additionnels identifiés précédemment.

4.3 Discussions

Les tests avec les mesures prises par la cible collée ont permis de montrer que le système de mesure est capable de déterminer le déplacement selon l'axe Z avec une erreur de 2-3 % seulement. Sur l'axe Y, les déplacements obtenus avec la cible collée montrent des déplacements significatifs non prévus par la simulation. Le système conçu retranscrit également ces déplacements avec fiabilité (moins de 10 % d'erreur avec les données par cible collée). Il est vraisemblable que des phénomènes physiques non pris en compte dans la simulation induisent ces déplacements non significatifs. Sur l'axe X, la simulation et les données par cible collée ne montrent pas de déplacements significatifs. Cependant le système de mesure en détecte pour certains cas de charge. Il serait possible que la conception du système de mesure (action des ressorts) induise des déplacements non désirés. Il s'agirait là d'une première limite au système conçu.
L'analyse comparative entre les résultats expérimentaux et les données simulées par éléments finis montre peu d'erreur pour les déplacements sur l'axe Z : l'erreur moyenne globale est d'environ 7 %. Ce résultat confirme la pertinence du système de mesure pour obtenir le comportement de l'outillage sur l'axe Z. En revanche, sur les axes transversaux X et Y, les très faibles déplacements attendus inférieurs au seuil de 50 µm, ne permettent pas une conclusion fiable sur l'efficacité du système de mesure. Ainsi, seules les données de déplacement sur l'axe Z peuvent être considérées comme représentatives pour évaluer l'efficacité du système de mesure.
Des pistes d'amélioration peuvent être envisagées pour la suite de ce travail. Sur le plan de la conception, il serait pertinent d'optimiser la géométrie du système afin d'améliorer la visibilité du laser, par exemple en agrandissant l'ouverture sur le système de mesures. Par ailleurs, concernant l'évaluation du comportement du système sur les axes transversaux X

et Y, une solution consisterait à appliquer des cas de charge plus importants, de manière à générer des déplacements suffisamment significatifs. Toutefois, le dispositif expérimental actuellement utilisé ne permet pas d'atteindre de tels niveaux d'effort, ce qui constitue une limitation pour l'exploration du comportement le long de ces axes.

CHAPITRE 5 MODELISATION DU COMPORTEMENT DE L'OUTILLAGE BASEE SUR LES DONNEES COLLECTEES

5.1 Objectifs et cadre de l'analyse

L'objectif de cette partie est de développer un modèle de prédiction du comportement mécanique de l'outillage (Sous-objectif 3). Étant donné que, pour l'instant, seules les mesures de déplacement selon l'axe Z fournies par le système expérimental sont jugées fiables, l'étude se focalise sur la prédiction dans cette direction.
Idéalement, le modèle de prédiction serait entraîné à partir des données expérimentales issues du système développé. Toutefois, en raison de contraintes temporelles, l'entraînement sera ici réalisé à partir de données obtenues par éléments finis (cf. méthodologie pour le Sous-objectif 2). Bien que simulées, ces données sont générées de manière à rester représentatives de ce que le système réel pourrait produire. Concrètement, seules certaines positions discrètes de l'outillage et un nombre limité de configurations de chargement sont considérées.

5.2 Les données utilisées

Dans un premier temps, les méthodes testées pour prédire le comportement de l'outillage sont mises en œuvre sur des données générées par éléments finis. 31 zones d'application d'efforts sont choisies et seront utilisées pour observer les déplacements (figure 5.1). Ces zones sont placées dans la région de l'outillage où l'épaisseur varie pour obtenir des données plus complexes. 21 des zones sont placées en grille et sont régulièrement espacées ; les 10 autres sont placées aléatoirement. Cela permettra de voir si une structure spatiale particulière dans les données améliore la prédiction ou non.
L'outillage est considéré encastré au même endroit que sur l'outillage réel. Le déplacement est observé au centre de chaque zone d'application, comme sur le système réel. Les valeurs des efforts appliqués à chaque zone sont répertoriées dans le tableau en Annexe D. Ces valeurs sont choisies par un échantillonnage en grille. Les valeurs des efforts sont choisies pour couvrir au mieux l'étendue des données en respectant les contraintes du cahier des charges : de 0 à 3000 N en vertical, de 0 à +- 1000 N en horizontal, un chargement combiné seulement sur X/Z ou Y/Z, et la valeur de l'effort horizontal doit toujours être inférieure à un tiers de l'effort vertical. Les efforts sont appliqués dans un repère local à chaque position, correspondant au repère du Point Central Outil du robot, c'est-à-dire le repère d'application des efforts et de mesure des déplacements avec le système conçu.

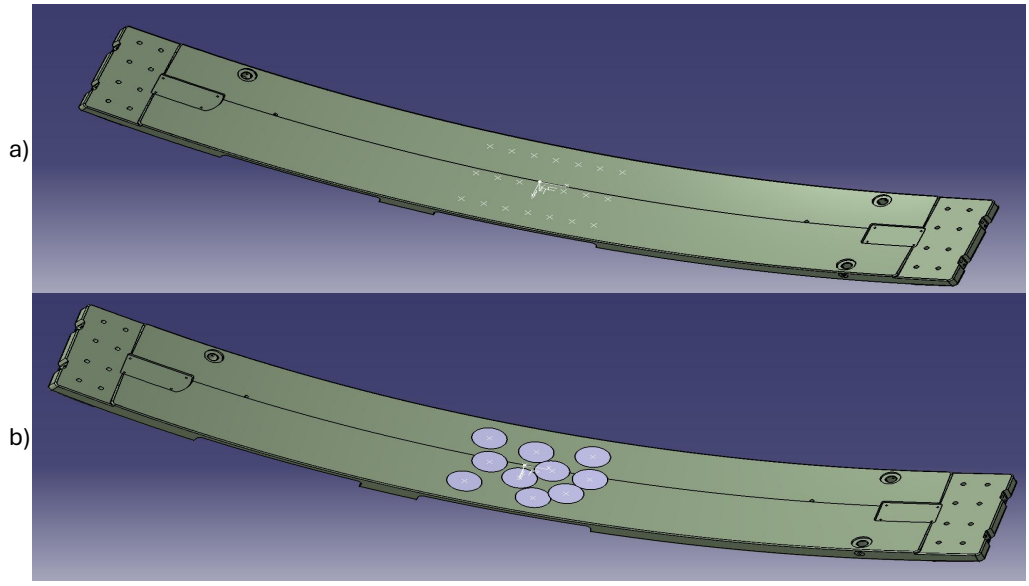


FIGURE 5.1 Zones choisies pour l'application des efforts sur l'outillage - a)21 zones régulièrement espacées disposées en grille. b)10 zones disposées aléatoirement.
Les 31 zones sont des disques de diamètre 60mm pour représenter la manière dont le système réel pourra appliquer un effort. Le repère au centre de l'outillage permet de définir les coordonnées des centres des zones d'application des efforts

Les données obtenues par éléments finis sont un tableau dont chaque ligne contient : le numéro d'identification de la zone (nombre entier de 1 à 31), les coordonnées du centre de la zone où est appliqué l'effort (3 valeurs, en mm) dans le repère au centre de l'outillage, l'effort tridimensionnel appliqué (3 valeurs, en N) dans le repère local de chaque zone d'application, le déplacement selon l'axe Z mesuré en ces coordonnées (1 valeur, en µm).

5.3 Comparaison de différents modèles de prédiction

Les méthodes d'apprentissage automatique appliquées à la prédiction du comportement mécanique présentées dans la revue de littérature présentent l'inconvénient d'utiliser des modèles généralement complexes, avec beaucoup de paramètres, lourds à entraîner et nécessitant beaucoup de données. Or, dans ce travail, le comportement mécanique étudié est relativement simple (outillage sollicité dans le domaine linéaire), et le jeu de données est petit et comporte peu de caractéristiques, c'est pourquoi il est choisi ici de s'éloigner de la revue de littérature en proposant l'application de modèles avec une complexité inférieure.
L'approche consiste à choisir un modèle ayant comme entrée les 3 coordonnées d'application de l'effort ainsi que l'effort appliqué, et ayant comme sortie le déplacement selon l'axe Z local en ce point. L'objectif est d'obtenir un modèle permettant de prédire le comportement sur

des positions non vues pendant l'entraînement. L'ensemble de données utilisé est de taille relativement modeste (1674 entrées) et se compose exclusivement de variables numériques. Parmi les variables explicatives, certaines représentent les coordonnées spatiales des points d'application des efforts, ce qui confère aux données une structure spatiale implicite. Pour modéliser la relation entre les variables explicatives et la variable cible, plusieurs algorithmes de régression ont été sélectionnés en fonction de leurs caractéristiques et de leur pertinence vis-à-vis de la structure des données.

La régression polynomiale a été sélectionnée pour sa faible complexité.

Le modèle SVR a été choisi pour sa capacité à modéliser des relations complexes sur de petits ensembles de données. De plus, son application est suggérée en [30].

Le modèle k nearest-neighbors (k-nn) a été retenu pour sa simplicité et son aptitude à capturer des variations locales, ce qui pourrait être pertinent dans un contexte avec des données spatiales.

Les modèles d'ensemble Random Forest et XGBoost, ont été sélectionnés pour leur robustesse face au surapprentissage (critère important avec des petits jeux de données) et leur capacité à gérer des relations complexes.

Puisque l'ensemble de données disponible est petit, le choix est fait d'entraîner les modèles avec une procédure de Leave One Group Out (LOGO). Chaque modèle est alors entraîné 31 fois (1 fois par position), et pour chaque entraînement, les données sont séparées en deux ensembles : une position est conservée pour tester le modèle et les 30 autres permettent l'entraînement. Ainsi, la performance d'un modèle est la moyenne des performances obtenues sur les 31 entraînements.

Pour évaluer la performance des modèles, l'Erreur Quadratique Moyenne et la REQM sont observées. En effet, l'erreur quadratique moyenne est un des indicateurs les plus populaires pour les tâches de régression, et la REQM permet d'obtenir une erreur homogène à la valeur prédite (ici déplacement en µm). De plus, le rapport entre la REQM et la moyenne des valeurs prédites, appelé REQM%, est calculée afin de vérifier que la valeur de REQM obtenue est cohérente par rapport à l'étendue des données (on obtient une erreur en pourcentage). En principe, une REQM% inférieure à 10 % indique un modèle performant, et inférieure à 5 % un modèle très performant.

Pour chacun des modèles, une petite recherche par grille (GridSearch) est réalisée pour définir certains hyperparamètres (Annexe E). La performance de chaque modèle est ensuite établie dans le tableau 5.1.

C'est le modèle XGBoost qui obtient de loin la meilleure performance avec une REQM% d'environ 35 %. C'est donc cette valeur qui sera prise en compte comme valeur de référence de performance pour comparer à d'autres modèles dans la suite.

Tableau 5.1 Performance des modèles testés - Puisque les modèles sont entraînés par la procédure LOGO, les performances indiquées sont les moyennes des performances obtenues pour chaque entraînement

	Erreur Quadratique Moyenne	REQM%
XGBoost	1,57E+05	3,49E+01
PolyReg	3,84E+05	1,04E+02
SVR	1,38E+06	2,29E+02
KNN	2,26E+05	1,00E+02
RF	1,81E+05	5,14E+01

5.4 Interpolation pour prédire le déplacement

Les modèles testés précédemment ont été entraînés sur les données brutes : on renseigne la position et l'effort en entrée et on prédit le déplacement en Z. Cependant, on peut se rappeler que dans cette étude, l'outillage est sollicité dans son domaine élastique. On s'attend donc à ce que le déplacement soit plus ou moins linéaire en fonction des chargements appliqués. Une autre méthode de prédiction est alors testée. Il est proposé de faire l'hypothèse que le déplacement en Z soit purement linéaire par rapport au chargement appliqué. Il est alors possible de déterminer les 3 coefficients de régression associés aux trois valeurs d'efforts (X,Y,Z). Le modèle pourrait alors être entraîné à prédire ces coefficients plutôt que de prédire directement les déplacements.

Concrètement, l'idée suivante est testée : les coefficients de régression linéaire sont calculés pour un ensemble d'entraînement et on cherche à les prédire pour l'ensemble de test.

L'ensemble de données est alors drastiquement réduit. On passe de 1674 entrées avec les différents chargements appliqués sur chaque position à seulement 31 entrées représentant les valeurs des coefficients de régression de chaque position. Pour prendre en compte la structure spatiale des données, où les positions considérées sont disposées sur une grille, et la réduction drastique du nombre d'entrées, le modèle choisi est une interpolation avec fonction à base radiale. Les données d'entraînement sont donc utilisées pour interpoler les coefficients de l'ensemble de test, en se basant sur les coordonnées des points où l'on veut prédire le déplacement. Une fois les coefficients de régression obtenus, on peut déduire les déplacements (relation linéaire).

Ce modèle d'interpolation des coefficients est entraîné par la procédure LOGO. La fonction radiale obtenant la meilleure performance est une fonction cubique, et alors la REQM% vaut 38 %. La figure 5.2 représente la distribution des erreurs résiduelles.

Ce modèle semble donc performer un tout petit peu moins bien que XGBoost. Cependant, il s'agit d'une méthode d'interpolation. On s'attend donc à ce que les prédictions soient moins

bonnes sur les extrémités du domaine considéré pour prédire les coefficients. La figure 5.3 représente en 2D la répartition spatiale des erreurs commises par le modèle. On remarque en effet que l'erreur est importante (>10 %) sur les frontières du domaine mais plus faible (<10 %) à l'intérieur du domaine. Afin d'analyser la performance du modèle par interpolation, la REQM% moyenne obtenue est recalculée en prenant en compte seulement les points intérieurs au domaine, et comparée à cette même valeur pour les modèles testés dans la section précédente (tableau 5.2). On remarque alors que tous les modèles obtiennent une meilleure performance, mais le modèle par interpolation est de loin le meilleur avec une erreur moyenne inférieure à 5 %. Ce modèle par interpolation semble donc être le plus intéressant pour prédire les déplacements de l'outillage, mais ce modèle comporte une limite : il faut faire attention à prédire pour des positions à l'intérieur du domaine d'entraînement pour éviter de dégrader fortement la performance.

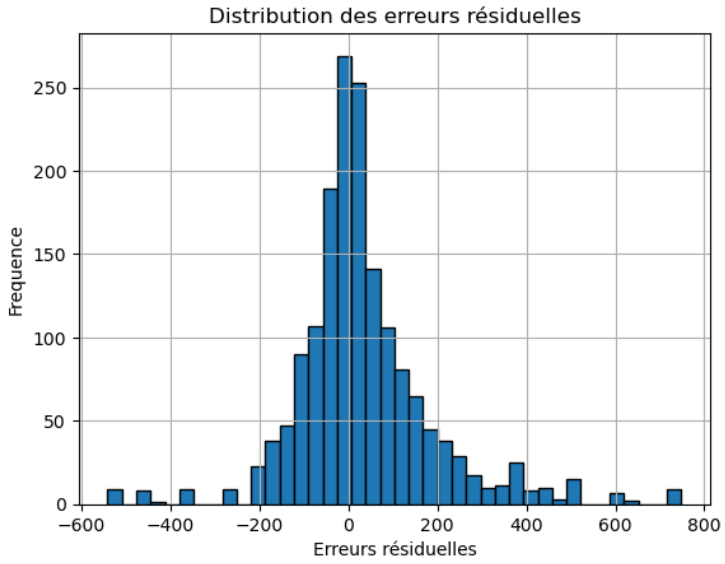


FIGURE 5.2 Distribution des erreurs résiduelles pour le modèle d'interpolation

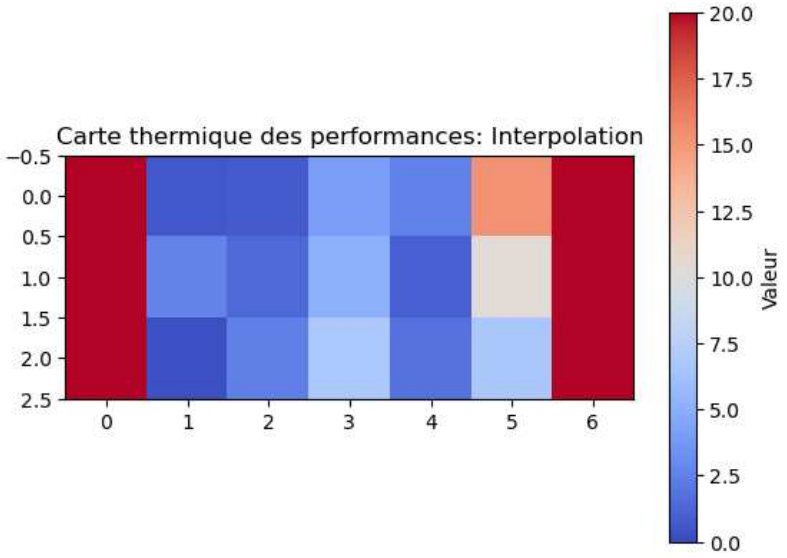


FIGURE 5.3 Répartition spatiale des erreurs commises par le modèle d'interpolation - Chaque case correspond à une des 21 positions de la grille. Les 6 positions aux extrémités ont une erreur plus importante

TABLEAU 5.2 Performances des différents modèles

	Erreur Quadratique Moyenne	REQM%	REQM% sans les positions frontières
XGBoost	1,57E+05	3,49E+01	2,06E+01
PolyReg	3,84E+05	1,04E+02	2,30E+01
SVR	1,38E+06	2,29E+02	4,80E+01
KNN	2,26E+05	1,00E+02	1,50E+01
RF	1,81E+05	5,14E+01	2,31E+01
Interpolation	2,57E+04	3,78E+01	4,10E+00

5.5 Protocole décrivant les mesures de déplacements à réaliser afin d'obtenir un modèle de comportement de l'outillage

Le sous-objectif 3 est d'obtenir un protocole expérimental de collecte de données de déplacement sur l'outillage afin d'en obtenir un modèle de comportement.
Une idée de protocole pourrait être de venir collecter sur l'outillage des données sur un nombre discret de positions disposées en grille, et de chercher à prédire les déplacements pour des positions tests disposées n'importe où à l'intérieur de la grille balayée. Ainsi le protocole expérimental serait simple à mettre en place et à automatiser.

Les données d'entraînement utilisées ici peuvent être séparées en deux ensembles : un avec les données des 21 positions disposées en grille et l'autre avec les 10 positions disposées aléatoirement. Si on utilise les données en grille comme ensemble d'entraînement et les positions aléatoires comme ensemble de test pour entraîner le modèle par interpolation, on obtient les performances présentées dans le tableau 5.3. La performance obtenue est une REQM% moyennée sur toutes les positions de 7.4 %, ce qui est très satisfaisant. Avec les données simulées, on semble donc pouvoir proposer un protocole pour obtenir un modèle de comportement satisfaisant sur l'axe Z de l'outillage. .

Tableau 5.3 Performances obtenues par le modèle d'interpolation sur chaque position de test

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Erreur moyenne
REQM%	6,9	1,8	7,8	3,7	1,3	14,8	2,7	11,3	17,7	6,4	7,4

Ce protocole n'a pas pu être testé sur des données expérimentales dans le cadre de ce travail. Ce protocole est proposé pour fermer la boucle du projet (figure 5.4) : le système de mesure a été conçu et fabriqué, et peut permettre de collecter des données efforts-déplacements. Ces valeurs peuvent être obtenues en suivant le protocole présenté, puis utilisées pour entraîner le modèle de prédiction par interpolation avec des données réelles et non plus simulées. On obtient finalement une procédure robotisée de caractérisation structurelle de l'outillage considéré. Une fois le comportement connu, il est possible au besoin de compenser les déformations de l'outillage.

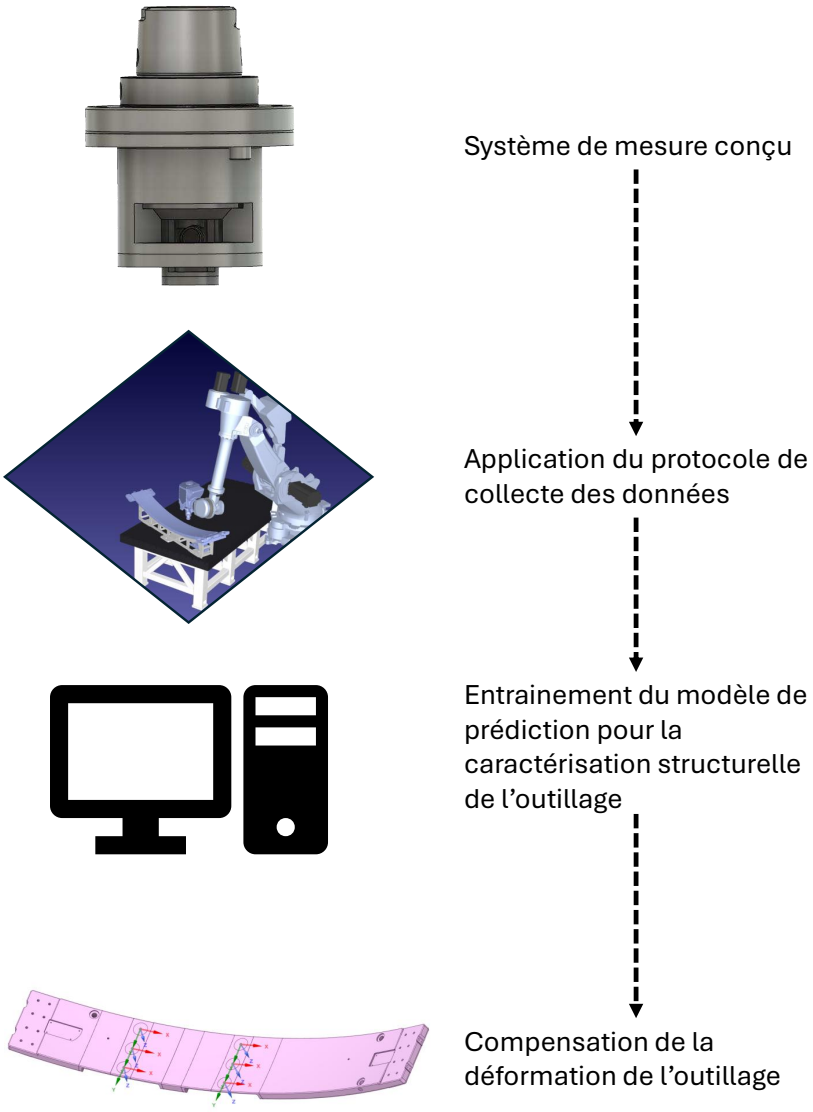


FIGURE 5.4 Chaîne complète des tâches de ce mémoire

CHAPITRE 6 CONCLUSION

6.1 Discussion générale

Ce mémoire présente le développement d'une procédure robotisée de caractérisation structurelle et de compensation de la déformation d'un outillage. Un système de mesure de déplacements est conçu, des données efforts-déplacements sont collectées sur un outillage aérospatial spécifique, et ces données sont utilisées pour entraîner un modèle de prédiction du comportement de cet outillage.
Cette procédure s'inscrit dans un contexte de généralisation de la calibration robot, dans le but de ne plus seulement compenser la déformation du robot, mais aussi la déformation des pièces manipulées ou usinées. Cela pourrait avoir des applications concrètes, notamment dans le secteur de l'aéronautique où les pièces ont de grandes dimensions et ont tendance à se déformer, alors que les tolérances de fabrication sont serrées.
Par ailleurs, ce système peut également servir pour des tests mécaniques automatisés de pièces, qui sont également une application en développement. Les méthodes commercialisées, surtout dans le secteur automobile, sont peu flexibles et ont des tâches spécifiques. La thèse [26] présente un banc d'essais plus flexible permettant de tester des pièces différentes. Le système conçu ici peut permettre de caractériser principalement des pièces plaques et coques, très présentes en aéronautique. Il est donc plus flexible que les méthodes commercialisées (spécifiques à une tâche ou une pièce) mais pas autant que la méthode proposée en ..., qui peut tester des pièces de formes variables.

Les essais menés pour valider le fonctionnement du système conçu ne permettent pas de conclure sur la fiabilité du système à mesurer des déplacements sur les axes transversaux X et Y car les déplacements induits sur ces axes sont inférieurs au seuil de 50 µm considéré comme significatif.
Cependant, les essais offrent des résultats satisfaisants selon l'axe vertical (Z), où une erreur moyenne de 7 % par rapport aux résultats éléments finis est obtenue.
De plus, il est montré que des déplacements significatifs selon l'axe transversal Y ont été détectés par le système conçu et une cible laser directement collée sur l'outillage, pour des cas de charge où un effort sur l'axe Y est appliqué, alors que la simulation ne prévoit pas de déplacements significatifs. Cela pourrait s'expliquer par des simplifications faites dans la simulation par rapport aux mesures réelles, comme la liaison encastrement entre l'outillage et sa structure supposée parfaite, et la non-prise en compte de cette structure et de la table

support dans la simulation.
Des déplacements significatifs sur l'axe X mesurés par le système conçu mais pas par la cible collée montrent que l'action des ressorts pourrait induire un déplacement non désiré lors des mesures, ce qui constituerait alors une limite du système proposé ici.
Pour prédire le déplacement sur l'axe Z de l'outillage à partir des données, plusieurs approches sont testées. Pour une raison de contrainte temporelle, les données d'entraînement utilisées ne sont pas obtenues avec le système de mesure, mais sont simulées par éléments finis. Le modèle retenu consiste à prédire par interpolation les coefficients de régression linéaire en fonction de la position sur l'outillage, afin de déterminer le déplacement Z en fonction de l'effort appliqué. Cette approche atteint une erreur moyenne de 4 % lorsqu'elle est entraînée sur les données avec une procédure LOGO. Ce même modèle entraîné avec des positions disposées en grille pour prédire sur des positions aléatoirement disposées sur l'outillage a une erreur moyenne de prédiction de 7.4 %. Ce résultat permet finalement de proposer un protocole expérimental de collecte de données sur l'outillage, pour en obtenir un modèle de comportement. Ce protocole doit encore être testé avec des données expérimentales pour être validé.

Certaines limitations de conception sont identifiées pour le système présenté ici.
D'une part, la visibilité laser pourrait être améliorée par une optimisation de la géométrie du dispositif, et ainsi résoudre le problème rencontré sur une des positions, où aucune donnée n'a pu être mesurée.
D'autre part, la conception mécanique actuelle du système semble générer des déplacements parasites dus à l'action des ressorts. Une autre solution pour solidariser la cible laser à l'outillage pourrait être envisagée, comme par exemple l'utilisation d'une ventouse pneumatique. Cependant, cette solution complexifierait la conception et l'utilisation du système de mesure.
Il serait également intéressant de changer le dispositif expérimental (robot et montage différents du système de mesure), afin d'être capable de générer des déplacements plus grands sur les axes transversaux X et Y. Cela permettrait d'analyser la performance du système de mesure à obtenir des déplacements sur ces axes.
Enfin, si le modèle de prédiction simple utilisé ici se montre efficace dans le cadre restreint de cette étude, sa généralisation à des géométries et chargements plus complexes reste incertaine. Des approches d'apprentissage plus avancées, comme celles présentées dans la revue de littérature, pourraient offrir une meilleure adaptabilité, mais au prix d'un besoin important en données et d'une expertise algorithmique poussée.

6.2 Synthèse des travaux

Ce travail a permis de concevoir et d'évaluer un système de mesure du déplacement local induit par un effort mécanique, reposant sur un ensemble de ressorts permettant de maintenir une cible laser au contact de la pièce étudiée.
Un prototypage rapide par impression 3D a été réalisé, permettant d'explorer différents montages des ressorts. Les configurations testées étant limitées, une architecture fonctionnelle mais non nécessairement optimale est identifiée : elle est composée de 4 ressorts verticaux parallèles.
Le système de mesure a pu ensuite être fabriqué et testé pour mesurer les déplacements sur un outillage spécifique disponible pour ce projet. Les essais menés ne permettent pas de conclure sur la fiabilité du système à mesurer des déplacements sur les axes transversaux X et Y. Cependant, les essais offrent des résultats satisfaisants selon l'axe vertical (Z).

L'objectif de ce mémoire est de développer une procédure robotisée de caractérisation structurelle et de compensation de la déformation d'un outillage.
Le sous-objectif 1 : Concevoir le système de mesure des déplacements a partiellement été atteint. Le système a en effet été conçu et fabriqué, mais des améliorations de conception peuvent être envisagées. La visibilité laser doit être améliorée, et un autre système d'accommodement de la cible laser que les ressorts pourrait être étudié, comme l'utilisation d'une ventouse, par exemple.
Le sous-objectif 2 : Valider le fonctionnement du système de mesure des déplacements a également partiellement été atteint. Le système a une bonne performance pour mesurer les déplacements sur l'axe vertical Z, mais le dispositif expérimental utilisé ne permet pas de conclure sur l'efficacité du système à mesurer des déplacements sur les axes transversaux. Des essais supplémentaires pourraient cependant facilement être mis en place pour corriger cela.
Enfin, **le sous-objectif 3 : Modéliser le comportement de l'outillage avec les données collectées** semble avoir été complété. Le modèle par interpolation des coefficients permet de prédire les déplacements sur l'axe Z avec une bonne précision. Il faut cependant se rappeler que même si ce modèle fonctionne correctement dans le cadre de ce projet, d'autres méthodes plus complexes pourraient être nécessaires pour d'autres outillages, ou des cas de chargement plus complexes. Il reste également à intégrer la prédiction des déplacements sur les axes transversaux, une fois que leur mesure sera validée.

RÉFÉRENCES

[1] I. F. of Robotics, "World robotics - industrial robots," 2024. [En ligne]. Disponible : https://ifr.org/wr-industrial-robots/

[2] Wikipedia, "Boeing 747," 2011. [En ligne]. Disponible : https://fr.wikipedia.org/wiki/Boeing_747#Quelques_caract%C3%A9ristiques_notables

[3] R. Bogue, "The growing use of robots by the aerospace industry," *Industrial Robot : An International Journal*, vol. 45, 10 2018.

[4] Z. Zhao, Y. Li, Y. M. Goh, C. Liu et P. Kinnell, *A Data-Driven Method for Predicting Deformation of Machined Parts Using Sparse Monitored Deformation Data.* IOS Press, 2021, p. 396–401.

[5] M. Saadat, "Challenges in the assembly of large aerospace components," dans *Integrated Systems, Design and Technology 2010*, M. Fathi, A. Holland, F. Ansari et C. Weber, édit. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2011, p. 37–46.

[6] Y. Li, Y. Xiao, L. Yu, K. Ji et D. Li, "A review on the tooling technologies for composites manufacturing of aerospace structures : materials, structures and processes," *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 154, p. 106762, 2022. [En ligne]. Disponible : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X21004747

[7] S. H. Kim, E. Nam, T. I. Ha, S.-H. Hwang, J. H. Lee, S.-H. Park et B.-K. Min, "Robotic machining : A review of recent progress," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 20, nº. 9, p. 1629–1642, 2019. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1007/s12541-019-00187-w

[8] J. M. Renders, E. Rossignol, M. Becquet et R. Hanus, "Kinematic calibration and geometrical parameter identification for robots," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 7, nº. 6, p. 721–732, 1991.

[9] A. Bârsan, "A brief review of robotic machining," *Acta Universitatis Cibiniensis. Technical Series*, vol. 71, nº. 1, p. 9–13, 2019. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.2478/aucts-2019-0003

[10] Z. Roth, B. Mooring et B. Ravani, "An overview of robot calibration," *IEEE Journal on Robotics and Automation*, vol. 3, nº. 5, p. 377–385, 1987.

[11] Görgülü, G. Carbone et M. C. Dede, "Time efficient stiffness model computation for a parallel haptic mechanism via the virtual joint method," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 143, p. 103614, 2020. [En ligne]. Disponible : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X19316945

[12] B. Monsarrat, J.-M. Audet, Y. Fortin, G. Cote, M. Vistein, L. Brandt, A. Sadek et F. Krebs, “In-situ elastic calibration of robots : Minimally-invasive technology, k-vertex cover pose search and accuracy competency development in aerospace case studies,” 2023. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4598970

[13] C. Lehmann, M. Pellicciari, M. Drust et J. W. Gunnink, “Machining with industrial robots : The comet project approach,” dans *Robotics in Smart Manufacturing*, P. Neto et A. P. Moreira, édit. Springer Berlin Heidelberg, Conference Proceedings, p. 27–36.

[14] M. Saadat et C. Cretin, “Dimensional variations during airbus wing assembly,” *Assembly Automation*, vol. 22, n°. 3, p. 270–276, 2002.

[15] I. D. Erhunmwun et U. Ikponmwosa, “Review on finite element method,” *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, vol. 21, n°. 5, p. 999–1002, 2017.

[16] D. Systemes, “Finite element analysis – what is it and why is it so important to design ?” 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.3ds.com/store/cad/finite-element-analysis

[17] X. Li, T. Huang, H. Zhao, X. Zhang, S. Yan, X. Dai et H. Ding, “A review of recent advances in machining techniques of complex surfaces,” *Science China Technological Sciences*, vol. 65, n°. 9, p. 1915–1939, 2022. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1007/s11431-022-2115-x

[18] H. Manikandan et T. C. Bera, “A turning simulation environment for geometric error estimation of thin-walled parts,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 119, n°. 1-2, p. 789–809, 2022. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1007/s00170-021-08298-3

[19] G. Wang, W. L. Li, G. Tong et C. T. Pang, “Improving the machining accuracy of thin-walled parts by online measuring and allowance compensation,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 92, n°. 5-8, p. 2755–2763, 2017. [En ligne]. Disponible : <GotoISI>://WOS:000408275000096

[20] M. Bornert, F. Hild, J.-J. Orteu et S. Roux, *Digital Image Correlation*, 2013, p. 157–190. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1002/9781118578469.ch6

[21] J. Zhao, Y. Sang et F. Duan, “The state of the art of two-dimensional digital image correlation computational method,” *Engineering Reports*, vol. 1, n°. 2, p. e12038, 2019. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1002/eng2.12038

[22] G. Rebergue, B. Blaysat, H. Chanal et E. Duc, “In-situ measurement of machining part deflection with digital image correlation,” *Measurement*, vol. 187, p. 13, 2022. [En ligne]. Disponible : <GotoISI>://WOS:000713292400004

[23] X. He, R. Zhou, Z. Liu, S. Yang, K. Chen et L. Li, “Review of research progress and development trend of digital image correlation,” *Multidiscipline Modeling in*

Materials and Structures, vol. 20, nº. 1, p. 81–114, 2024. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1108/MMMS-07-2023-0242

[24] M. Nierenberger, M. Poncelet, S. Pattofatto, A. Hamouche, B. Raka et J. Virely, "Multiaxial testing of materials using a stewart platform : Case study of the nooru-mohamed test," *Experimental Techniques*, vol. 38, nº. 2, p. 74–83, 2014. [En ligne]. Disponible : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1747-1567.2012.00807.x

[25] J. Hanke, C. Eymüller, A. Poeppel, J. Reichmann, A. Trauth, M. Sause et W. Reif, "Sensor-guided motions for robot-based component testing," dans *2022 Sixth IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*, Conference Proceedings, p. 81–84.

[26] J. Hanke, "Robot-based component testing on software-defined test benches," 2024.

[27] J. Schmidt, M. R. G. Marques, S. Botti et M. A. L. Marques, "Recent advances and applications of machine learning in solid-state materials science," *npj Computational Materials*, vol. 5, nº. 1, p. 83, 2019. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1038/s41524-019-0221-0

[28] S. Kumar et D. M. Kochmann, *What Machine Learning Can Do for Computational Solid Mechanics*. Cham : Springer International Publishing, 2022, p. 275–285. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1007/978-3-030-87312-7_27

[29] M. Maurizi, C. Gao et F. Berto, "Predicting stress, strain and deformation fields in materials and structures with graph neural networks," *Scientific Reports*, vol. 12, nº. 1, p. 21834, 2022. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1038/s41598-022-26424-3

[30] J. N. Fuhg, G. Anantha Padmanabha, N. Bouklas, B. Bahmani, W. Sun, N. N. Vlassis, M. Flaschel, P. Carrara et L. De Lorenzis, "A review on data-driven constitutive laws for solids," *Archives of Computational Methods in Engineering*, p. 1–43, 2024.

[31] J. Ghaboussi, J. H. Garrett et X. Wu, "Knowledge-based modeling of material behavior with neural networks," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 117, nº. 1, p. 132–153, 1991. [En ligne]. Disponible : https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9399%281991%29117%3A1%28132%29

[32] Y. Jin, W. Li, Z. Yang et O. Jung, "Prediction of non-linear mechanical behavior with deep neural network : Application on low pressure turbine disc," dans *ASME Turbo Expo 2020 : Turbomachinery Technical Conference and Exposition, GT 2020, September 21, 2020 - September 25, 2020*, ser. Proceedings of the ASME Turbo Expo, vol. 2D-2020. American Society of Mechanical Engineers (ASME), Conference Proceedings, p. International Gas Turbine Institute. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1115/GT2020-14382

[33] M. L. du Bos, F. Balabdaoui et J. N. Heidenreich, "Modeling stress-strain curves with neural networks : a scalable alternative to the return mapping

algorithm," *Computational Materials Science*, vol. 178, 2020. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2020.109629

[34] Q.-J. Li, M. N. Cinbiz, Y. Zhang, Q. He, G. Beausoleil et J. Li, "Robust deep learning framework for constitutive relations modeling," *Acta Materialia*, vol. 254, p. 118959, 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645423002902

[35] D. Park, J. Jung, G. X. Gu et S. Ryu, "A generalizable and interpretable deep learning model to improve the prediction accuracy of strain fields in grid composites," *Materials and Design*, vol. 223, 2022. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111192

[36] Z. Yang, C.-H. Yu et M. J. Buehler, "Deep learning model to predict complex stress and strain fields in hierarchical composites," *Science Advances*, vol. 7, n°. 15, 2021. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1126/SCIADV.ABD7416

[37] Z. Yang, C.-H. Yu, K. Guo et M. J. Buehler, "End-to-end deep learning method to predict complete strain and stress tensors for complex hierarchical composite microstructures," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 154, 2021. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1016/j.jmps.2021.104506

[38] Z. Zhang, Q. Liu et D. Wu, "Predicting stressstrain curves using transfer learning : Knowledge transfer across polymer composites," *Materials and Design*, vol. 218, 2022. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110700

[39] M. Flaschel, S. Kumar et L. De Lorenzis, "Unsupervised discovery of interpretable hyperelastic constitutive laws," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 381, 2021. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2021.113852

[40] F. Masi et I. Einav, "Neural integration for constitutive equations using small data," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 420, p. 116698, 2024. [En ligne]. Disponible : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782523008216

[41] K. Linka et E. Kuhl, "A new family of constitutive artificial neural networks towards automated model discovery," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 403, 2023. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2022.115731

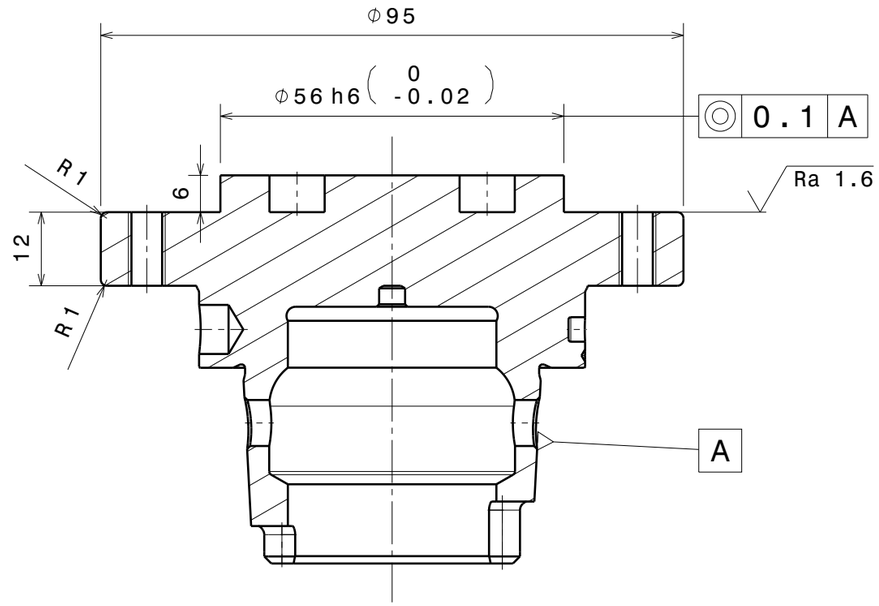
[42] J.-H. Bastek et D. M. Kochmann, "Physics-informed neural networks for shell structures," *European Journal of Mechanics, A/Solids*, vol. 97, 2023. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1016/j.euromechsol.2022.104849

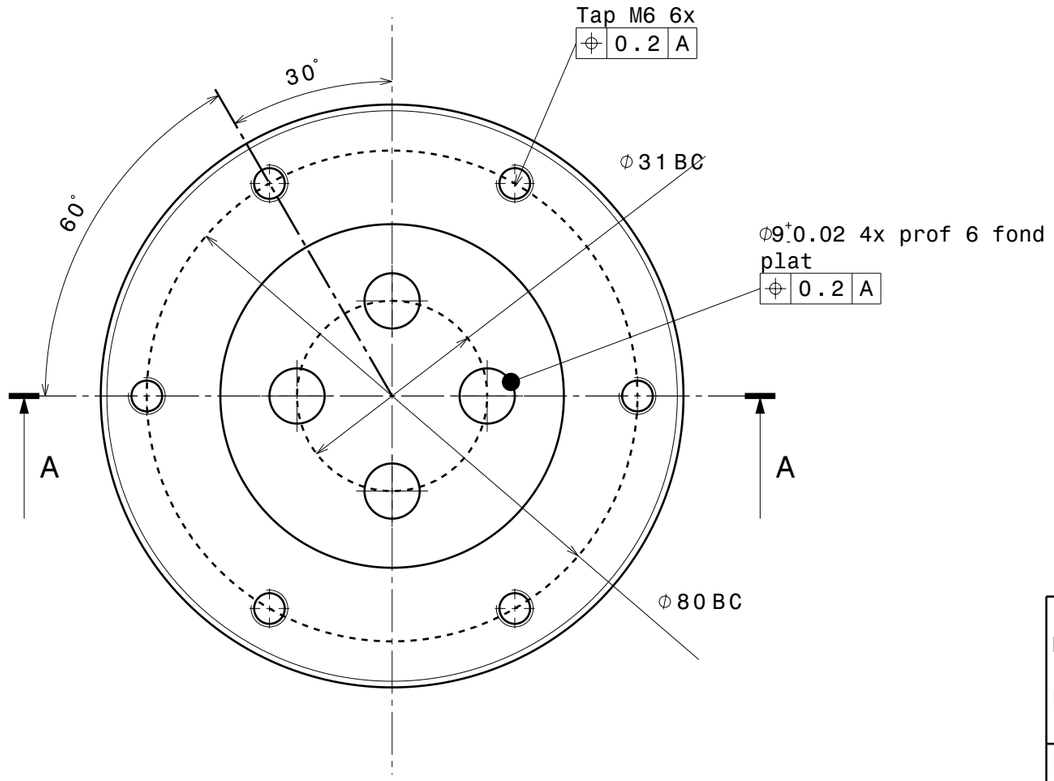
[43] M. Flaschel, S. Kumar et L. De Lorenzis, "Automated discovery of generalized standard material models with euclid," *Computer Methods in Applied Mechanics*

and Engineering, vol. 405, p. 115867, 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782522008234

ANNEXE A DESSINS DE DÉFINITION

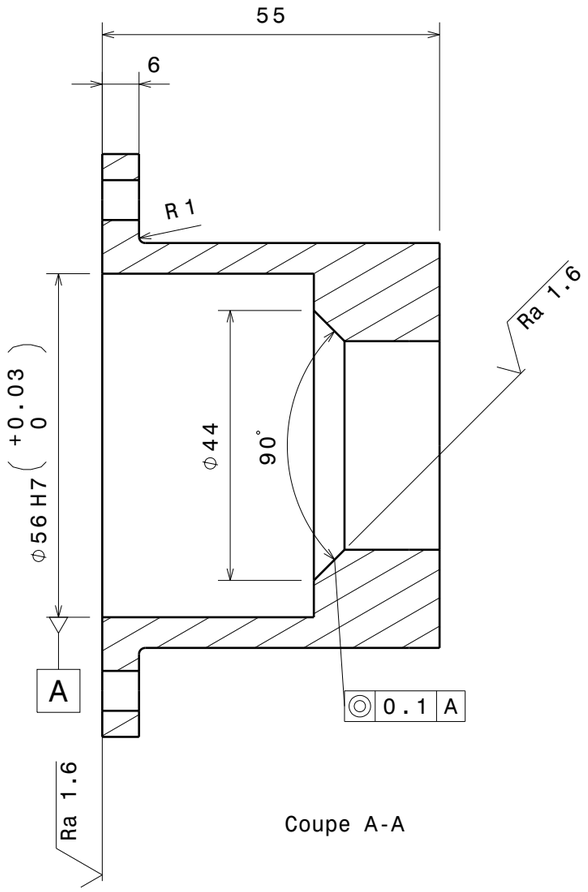
Les pages suivantes contiennent les dessins de définition de la cloche, du bouchon et de la bride de montage constituant le système de mesure. Ces dessins ont été réalisés sur le logiciel Catia V5.



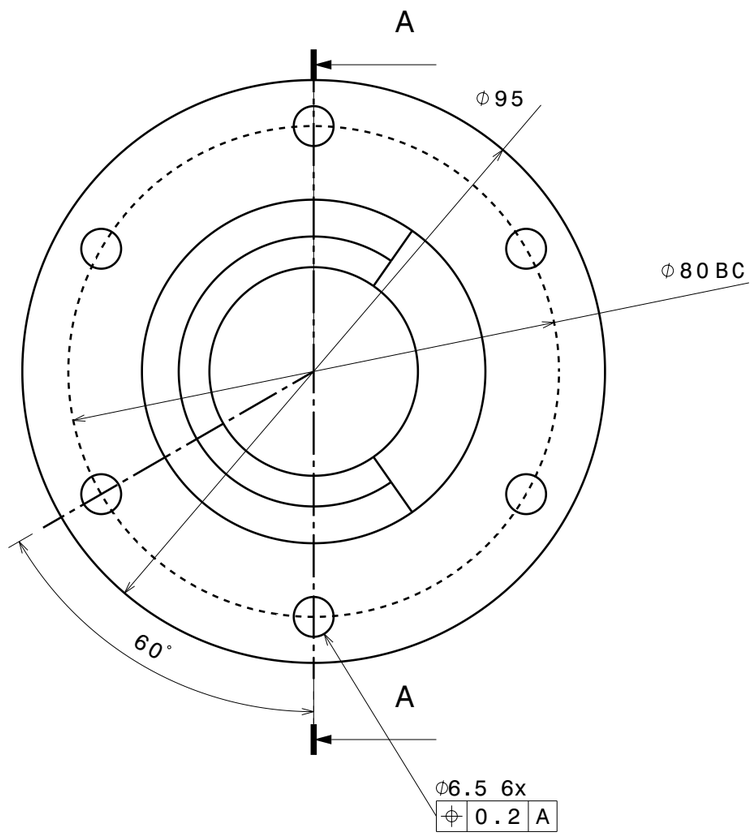


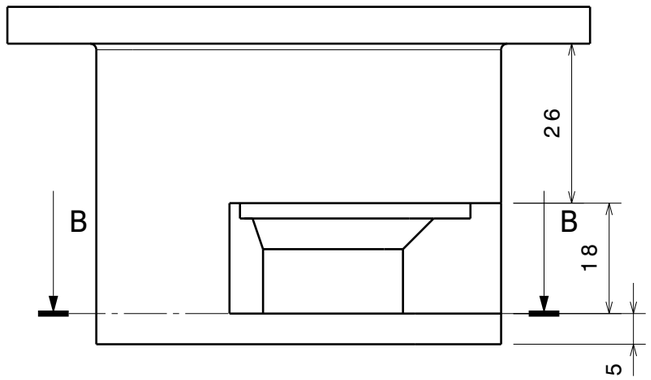
Dimensions en mm
Tol. Générale : ±0.2mm / ±0.2deg
Tolérance de surface générale : 3.2 Ra (μm)
Quantité : 1

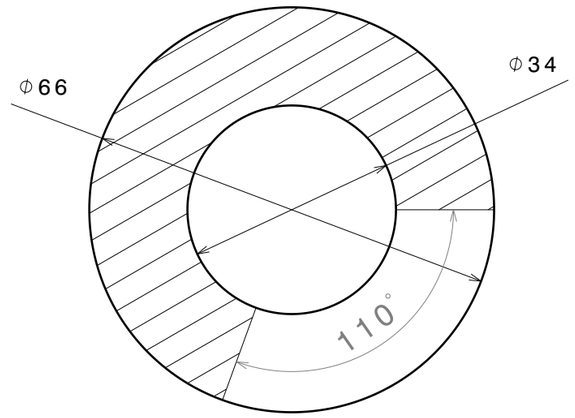
MATÉRIAU Défini par le brut HSK fourni		CNRC-NRC			
DRAWN BY Matis A.	DATE 2024-09-03	DRAWING TITLE Bride HSK63			
CHECKED BY XXX	DATE XXX	SIZE A3	DRAWING NUMBER 052024-01		REV X
DESIGNED BY XXX	DATE XXX	SCALE 1:1	WEIGHT(kg) XX		SHEET 1/1



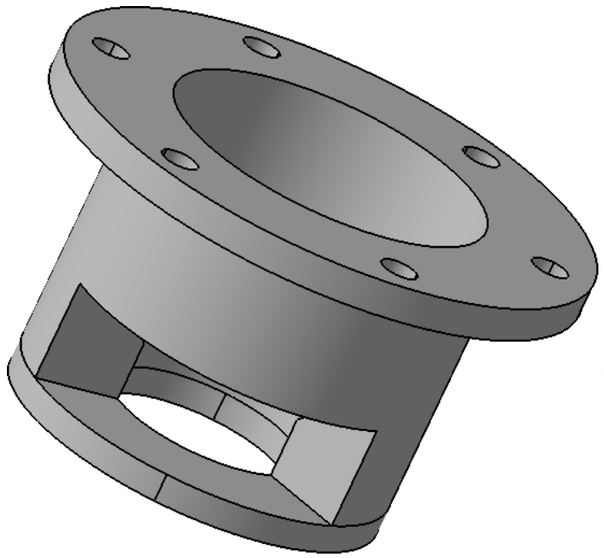
Coupe A-A





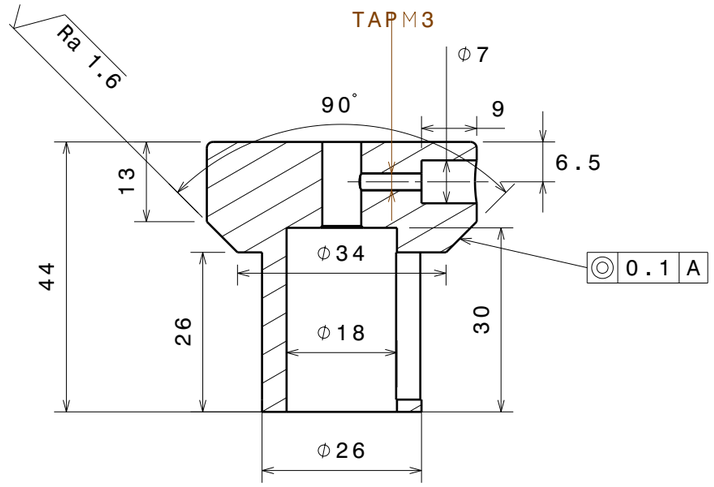


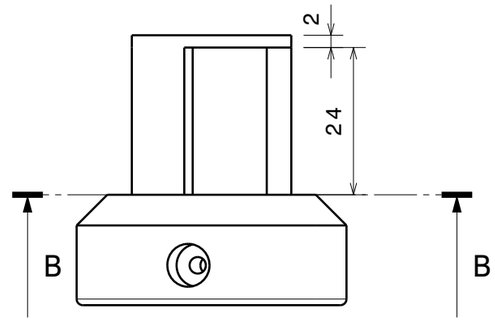
Coupe B-B

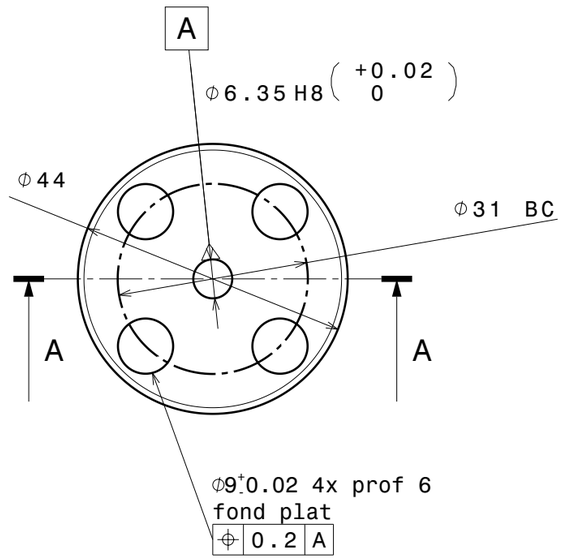


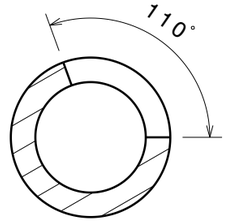
Dimensions en mm
Tol. Générale : ±0.2mm / ±0.2deg
Tolérance de surface générale : 3.2 Ra (μm)
Quantité : 1

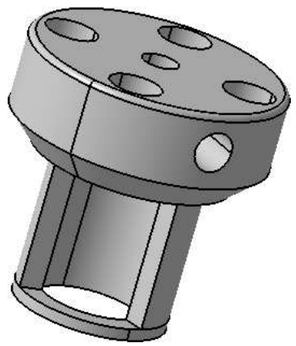
MATÉRIAU: S235		CNRC-NRC	
DRAWN BY: Matis A.	DATE: 2024-09-03	DRAWING TITLE: Cloche	
CHECKED BY: XXX	DATE: XXX	SIZE: A3	DRAWING NUMBER: 052024-02 / REV: X
DESIGNED BY: XXX	DATE: XXX	SCALE: 1:1	WEIGHT(kg): XX / SHEET: 1/1











Dimensions en mm
Tol. Générale : +-0.2mm / +-0.2deg
Tolérance de surface générale : 3.2 Ra (μm)
Quantité : 1

MATÉRIAU S235		CNRC-NRC	
DRAWN BY Matis A.	DATE 2024-09-03	DRAWING TITLE Bouchon	
CHECKED BY XXX	DATE XXX	SIZE A3	DRAWING NUMBER 052024-03 / REV X
DESIGNED BY XXX	DATE XXX	SCALE 1:1	WEIGHT(kg) XX / SHEET 1/1

ANNEXE B DÉPLACEMENTS MESURÉS AVEC UNE CIBLE COLLÉE ET LE SYSTÈME CONÇU

				Position 2			Position 3			Position 6		
Cas	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	X cible collée (µm)	X Outil (µm)	Erreur %	X cible collée (µm)	X Outil (µm)	Erreur %	X cible collée (µm)	X Outil (µm)	Erreur %
1	0	0	1000	-1,09E+00	9,02E+00	-9,30E+02	-3,59E+00	-9,53E+00	-1,65E+02	-5,97E+00	3,71E+01	-7,22E+02
2	0	0	2000	1,79E+00	2,07E+01	1,06E+03	-1,82E+00	-7,33E+00	-3,03E+02	-8,87E+00	5,11E+01	-6,76E+02
3	0	500	2000	5,64E-01	2,25E+01	3,90E+03	1,18E+01	6,63E+00	4,41E+01	-7,02E+00	5,39E+01	-8,68E+02
4	500	0	2000	1,51E+01	4,55E+01	2,00E+02	1,94E+01	2,57E+01	3,20E+01	5,17E+00	8,57E+01	1,56E+03
5	0	0	3000	9,16E+00	3,55E+01	2,88E+02	8,58E+00	1,23E+01	4,31E+01	-9,95E+00	6,34E+01	-7,37E+02
6	0	500	3000	6,95E+00	3,77E+01	4,42E+02	1,46E+01	1,83E+01	2,51E+01	-5,48E+00	7,06E+01	-1,39E+03
7	0	1000	3000	1,04E+01	3,50E+01	2,37E+02	1,99E+01	2,21E+01	1,13E+01	-3,25E+00	7,62E+01	-2,45E+03
8	500	0	3000	2,10E+01	5,26E+01	1,50E+02	2,59E+01	3,61E+01	3,93E+01	1,07E+01	1,06E+02	8,86E+02
9	1000	0	3000	3,09E+01	7,36E+01	1,38E+02	3,45E+01	6,39E+01	8,49E+01	1,93E+01	1,54E+02	6,96E+02
				Erreur moyenne		6,09E+02	Erreur moyenne		-2,09E+01	Erreur moyenne		-4,11E+02

TABLEAU B.1 Déplacements en X mesurés par la cible collée et le système conçu (outil).

				Position 2			Position 3			Position 6		
Cas	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Y cible collée (µm)	Y Outil (µm)	Erreur %	Y cible collée (µm)	Y Outil (µm)	Erreur %	Y cible collée (µm)	Y Outil (µm)	Erreur %
1	0	0	1000	3,22E+00	-6,36E+00	2,98E+02	-2,07E+01	-3,63E+01	-7,52E+01	-1,01E+01	-5,84E+00	-4,25E+01
2	0	0	2000	1,23E+01	1,37E+00	8,89E+01	-2,95E+01	-4,27E+01	-4,50E+01	-1,28E+01	-1,37E+01	-7,19E+00
3	0	500	2000	1,07E+02	1,03E+02	3,06E+00	5,93E+01	5,56E+01	6,18E+00	5,58E+01	7,33E+01	3,13E+01
4	500	0	2000	1,59E+01	5,29E+00	6,67E+01	-2,47E+01	-3,66E+01	-4,83E+01	-9,29E+00	1,07E+00	-1,11E+02
5	0	0	3000	2,06E+01	1,16E+01	4,39E+01	-4,23E+01	-5,92E+01	-3,99E+01	-1,34E+01	-1,00E+01	-2,50E+01
6	0	500	3000	1,15E+02	1,15E+02	3,99E-01	4,93E+01	4,50E+01	8,87E+00	5,40E+01	7,13E+01	3,20E+01
7	0	1000	3000	2,03E+02	2,17E+02	6,86E+00	1,40E+02	1,44E+02	2,54E+00	1,23E+02	1,56E+02	2,75E+01
8	500	0	3000	2,24E+01	2,00E+01	1,09E+01	-3,71E+01	-5,22E+01	-4,05E+01	-1,33E+01	-6,08E-02	-9,95E+01
9	1000	0	3000	2,47E+01	1,91E+01	2,24E+01	-2,99E+01	-5,17E+01	-7,27E+01	-1,05E+01	2,37E+00	-1,23E+02
				Erreur moyenne		6,01E+01	Erreur moyenne		-3,38E+01	Erreur moyenne		-3,53E+01

TABLEAU B.2 Déplacements en Y mesurés par la cible collée et le système conçu (outil).

				Position 2			Position 3			Position 6		
Cas	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Z cible collée (µm)	Z Outil (µm)	Erreur %	Z cible collée (µm)	Z Outil (µm)	Erreur %	Z cible collée (µm)	Z Outil (µm)	Erreur %
1	0	0	1000	1,51E+02	1,42E+02	6,08E+00	2,29E+02	2,35E+02	2,89E+00	1,47E+02	1,45E+02	1,72E+00
2	0	0	2000	3,07E+02	2,93E+02	4,51E+00	4,53E+02	4,55E+02	4,17E-01	2,81E+02	2,89E+02	2,65E+00
3	0	500	2000	3,12E+02	2,94E+02	5,69E+00	4,41E+02	4,42E+02	4,00E-01	2,76E+02	2,78E+02	7,49E-01
4	500	0	2000	3,09E+02	2,97E+02	3,87E+00	4,50E+02	4,55E+02	1,14E+00	2,83E+02	2,77E+02	2,00E+00
5	0	0	3000	4,55E+02	4,46E+02	1,88E+00	6,80E+02	6,70E+02	1,39E+00	4,14E+02	4,18E+02	9,14E-01
6	0	500	3000	4,62E+02	4,48E+02	2,86E+00	6,71E+02	6,62E+02	1,36E+00	4,20E+02	4,17E+02	5,83E-01
7	0	1000	3000	4,68E+02	4,51E+02	3,65E+00	6,58E+02	6,58E+02	5,70E-02	4,11E+02	4,00E+02	2,71E+00
8	500	0	3000	4,64E+02	4,52E+02	2,53E+00	6,76E+02	6,74E+02	3,15E-01	4,19E+02	4,02E+02	4,06E+00
9	1000	0	3000	4,58E+02	4,52E+02	1,15E+00	6,77E+02	6,83E+02	8,91E-01	4,21E+02	3,98E+02	5,55E+00
				Erreur moyenne		3,58E+00	Erreur moyenne		9,85E-01	Erreur moyenne		2,33E+00

TABLEAU B.3 Déplacements en Z mesurés par la cible collée et le système conçu (outil).

ANNEXE C DÉPLACEMENTS MESURÉS AVEC LE SYSTÈME CONÇU ET OBTENUS PAR SIMULATION SUR LES 6 POSITIONS.

				Position 2			Position 3			Position 4		
Cas	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	X EF (µm)	X mesuré (µm)	Erreur %	X EF (µm)	X mesuré (µm)	Erreur %	X EF (µm)	X mesuré (µm)	Erreur %
1	0	0	1000	1,91E+00	9,02E+00	3,71E+02	3,90E+00	-9,53E+00	3,44E+02	7,44E-02	-8,15E+00	1,11E+04
2	0	0	2000	3,67E+00	2,07E+01	4,64E+02	7,77E+00	-7,33E+00	1,94E+02	4,06E-01	1,83E-01	5,49E+01
3	0	500	2000	3,69E+00	2,25E+01	5,11E+02	7,44E+00	6,63E+00	1,09E+01	4,57E-01	6,56E+00	1,34E+03
4	500	0	2000	8,76E+00	4,55E+01	4,19E+02	1,36E+01	2,57E+01	8,94E+01	5,79E+00	3,01E+01	4,20E+02
5	0	0	3000	5,48E+00	3,55E+01	5,48E+02	1,18E+01	1,23E+01	4,16E+00	7,82E-01	2,05E+01	2,52E+03
6	0	500	3000	5,50E+00	3,77E+01	5,85E+02	1,15E+01	1,83E+01	5,92E+01	8,31E-01	2,06E+01	2,38E+03
7	0	1000	3000	5,52E+00	3,50E+01	5,34E+02	1,12E+01	2,21E+01	9,86E+01	8,81E-01	2,51E+01	2,75E+03
8	500	0	3000	1,06E+01	5,26E+01	3,97E+02	1,76E+01	3,61E+01	1,05E+02	6,17E+00	5,14E+01	7,33E+02
9	1000	0	3000	1,57E+01	-7,36E+01	5,70E+02	2,34E+01	6,39E+01	1,73E+02	1,16E+01	7,28E+01	5,29E+02
				Erreur moyenne		4,89E+02	Erreur moyenne		1,20E+02	Erreur moyenne		2,42E+03
				Position 5			Position 6					
Cas	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	X EF (µm)	X mesuré (µm)	Erreur %	X EF (µm)	X mesuré (µm)	Erreur %			
1	0	0	1000	-1,96E-01	1,40E+01	-7,26E+03	-1,36E-01	3,71E+01	-2,74E+04			
2	0	0	2000	-1,54E-01	1,37E+01	-9,01E+03	-2,70E-02	5,11E+01	-1,89E+05			
3	0	500	2000	-1,59E-01	2,41E+01	-1,52E+04	-8,61E-02	5,39E+01	-6,28E+04			
4	500	0	2000	4,57E+00	4,09E+01	7,94E+02	4,96E+00	8,57E+01	1,63E+03			
5	0	0	3000	-1,09E-01	3,14E+01	-2,90E+04	9,34E-02	6,34E+01	6,78E+04			
6	0	500	3000	-1,12E-01	3,40E+01	-3,04E+04	3,30E-02	7,06E+01	2,14E+05			
7	0	1000	3000	-1,16E-01	3,03E+01	-2,63E+04	-2,59E-02	7,62E+01	-2,95E+05			
8	500	0	3000	4,64E+00	4,33E+01	8,33E+02	5,10E+00	1,06E+02	1,97E+03			
9	1000	0	3000	9,38E+00	-6,89E+01	8,34E+02	1,01E+01	1,54E+02	1,42E+03			
				Erreur moyenne		-1,28E+04	Erreur moyenne		-3,19E+04			

TABLEAU C.1 Comparaison des déplacements sur l'axe X mesurés et simulés par éléments finis (EF).

				Position 2			Position 3			Position 4		
Cas	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Y EF (µm)	Y mesuré (µm)	Erreur %	Y EF (µm)	Y mesuré (µm)	Erreur %	Y EF (µm)	Y mesuré (µm)	Erreur %
1	0	0	1000	4,49E-02	-6,36E+00	1,43E+04	5,18E+00	-3,63E+01	8,01E+02	-5,90E+00	1,50E+01	-3,54E+02
2	0	0	2000	9,82E-02	1,37E+00	1,29E+03	1,10E+01	-4,27E+01	4,89E+02	-1,29E+01	3,63E+01	-3,82E+02
3	0	500	2000	9,25E+00	1,03E+02	1,02E+03	2,07E+01	5,56E+01	1,69E+02	-3,87E+00	1,18E+02	-3,14E+03
4	500	0	2000	1,11E-01	5,29E+00	4,67E+03	1,06E+01	-3,66E+01	4,43E+02	-1,28E+01	4,27E+01	-4,33E+02
5	0	0	3000	1,54E-01	1,16E+01	7,40E+03	1,74E+01	-5,92E+01	4,40E+02	-2,09E+01	5,98E+01	-3,87E+02
6	0	500	3000	9,32E+00	1,15E+02	1,13E+03	2,71E+01	4,50E+01	6,56E+01	-1,18E+01	1,43E+02	-1,31E+03
7	0	1000	3000	1,85E+01	2,17E+02	1,07E+03	3,69E+01	1,44E+02	2,90E+02	-2,80E+00	2,25E+02	-8,14E+03
8	500	0	3000	1,69E-01	2,00E+01	1,17E+04	1,71E+01	-5,22E+01	4,06E+02	-2,08E+01	6,62E+01	-4,18E+02
9	1000	0	3000	1,85E-01	1,91E+01	1,03E+04	1,68E+01	-5,17E+01	4,08E+02	-2,08E+01	7,34E+01	-4,54E+02
				Erreur moyenne		5,87E+03	Erreur moyenne		3,90E+02	Erreur moyenne		-1,67E+03
				Position 5			Position 6					
Cas	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Y EF (µm)	Y mesuré (µm)	Erreur %	Y EF (µm)	Y mesuré (µm)	Erreur %			
1	0	0	1000	3,84E-01	-1,74E+00	5,54E+02	4,60E+00	-5,84E+00	2,27E+02			
2	0	0	2000	6,92E-01	5,22E+00	6,53E+02	9,39E+00	-1,37E+01	2,46E+02			
3	0	500	2000	9,11E+00	8,13E+01	7,92E+02	1,83E+01	7,33E+01	3,01E+02			
4	500	0	2000	6,87E-01	1,07E+01	1,46E+03	9,34E+00	1,07E+00	8,86E+01			
5	0	0	3000	9,24E-01	1,23E+01	1,23E+03	1,44E+01	-1,00E+01	1,70E+02			
6	0	500	3000	9,35E+00	9,16E+01	8,79E+02	2,33E+01	7,13E+01	2,06E+02			
7	0	1000	3000	1,78E+01	1,72E+02	8,66E+02	3,22E+01	1,56E+02	3,86E+02			
8	500	0	3000	9,19E-01	2,16E+01	2,25E+03	1,43E+01	6,08E-02	9,96E+01			
9	1000	0	3000	9,16E-01	2,09E+01	2,18E+03	1,43E+01	2,37E+00	8,34E+01			
				Erreur moyenne		1,21E+03	Erreur moyenne		2,01E+02			

TABLEAU C.2 Comparaison des déplacements sur l'axe Y mesurés et simulés par éléments finis (EF).

				Position 2			Position 3			Position 4		
Cas	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Z EF (µm)	Z mesuré (µm)	Erreur %	Z EF (µm)	Z mesuré (µm)	Erreur %	Z EF (µm)	Z mesuré (µm)	Erreur %
1	0	0	1000	140,2	1,417E+02	1,025E+00	250,3	2,352E+02	6,032E+00	286,7	2,931E+02	2,243E+00
2	0	0	2000	277,9	2,928E+02	5,358E+00	496,8	4,549E+02	8,441E+00	568,2	5,707E+02	4,364E-01
3	0	500	2000	278,0	2,944E+02	5,927E+00	499,8	4,424E+02	1,150E+01	564,4	5,846E+02	3,580E+00
4	500	0	2000	278,8	2,970E+02	6,538E+00	498,8	4,549E+02	8,809E+00	568,3	5,770E+02	1,523E+00
5	0	0	3000	415,2	4,462E+02	7,476E+00	743,0	6,701E+02	9,816E+00	847,7	8,446E+02	3,632E-01
6	0	500	3000	415,3	4,484E+02	7,970E+00	746,4	6,621E+02	1,129E+01	843,3	8,596E+02	1,931E+00
7	0	1000	3000	415,3	4,513E+02	8,654E+00	749,7	6,580E+02	1,224E+01	838,8	8,741E+02	4,204E+00
8	500	0	3000	416,1	4,522E+02	8,668E+00	745,1	6,742E+02	9,514E+00	847,7	8,594E+02	1,382E+00
9	1000	0	3000	417,1	4,524E+02	8,470E+00	747,2	6,829E+02	8,595E+00	847,9	8,577E+02	1,156E+00
				Erreur moyenne		6,676E+00	Erreur moyenne		9,582E+00	Erreur moyenne		1,869E+00
				Position 5			Position 6					
Cas	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Z EF (µm)	Z mesuré (µm)	Erreur %	Z EF (µm)	Z mesuré (µm)	Erreur %			
1	0	0	1000	111,0	1,287E+02	1,587E+01	133,4	1,446E+02	8,437E+00			
2	0	0	2000	219,8	2,554E+02	1,618E+01	263,5	2,886E+02	9,507E+00			
3	0	500	2000	219,9	2,603E+02	1,835E+01	266,0	2,779E+02	4,472E+00			
4	500	0	2000	219,8	2,497E+02	1,360E+01	263,5	2,773E+02	5,248E+00			
5	0	0	3000	328,4	3,691E+02	1,239E+01	393,7	4,183E+02	6,239E+00			
6	0	500	3000	328,5	3,790E+02	1,536E+01	396,3	4,173E+02	5,312E+00			
7	0	1000	3000	328,5	3,830E+02	1,657E+01	398,7	3,995E+02	2,065E-01			
8	500	0	3000	328,4	3,732E+02	1,363E+01	393,7	4,016E+02	2,012E+00			
9	1000	0	3000	328,5	3,689E+02	1,229E+01	393,8	3,977E+02	9,983E-01			
				Erreur moyenne		1,492E+01	Erreur moyenne		4,715E+00			

TABLEAU C.3 Comparaison des déplacements sur l'axe Z mesurés et simulés par éléments finis (EF).

ANNEXE D VALEURS DES EFFORTS POUR LES DONNÉES D'ENTRAÎNEMENT DES MODÈLES

Fx (N)	Fy (N)	Fz(N)
1000	0	3000
-1000	0	3000
-833,333	0	2500
-666,667	0	2000
-500	0	1500
-500	0	3000
-416,667	0	2500
-333,333	0	1000
-333,333	0	2000
-250	0	1500
-166,667	0	500
-166,667	0	1000
-83,3333	0	500
0	-1000	3000
0	-833,333	2500
0	-666,667	2000
0	-500	1500
0	-500	3000
0	-416,667	2500
0	-333,333	1000
0	-333,333	2000
0	-250	1500
0	-166,667	500
0	-166,667	1000
0	-83,3333	500
0	0	500
0	0	1000
0	0	1500
0	0	2000
0	0	2500
0	0	3000
0	83,33333	500
0	166,6667	500
0	166,6667	1000
0	250	1500
0	333,3333	1000
0	333,3333	2000
0	416,6667	2500
0	500	1500
0	500	3000
0	666,6667	2000
0	833,3333	2500
0	1000	3000
83,33333	0	500
166,6667	0	500
166,6667	0	1000
250	0	1500
333,3333	0	1000
333,3333	0	2000
416,6667	0	2500
500	0	1500
500	0	3000
666,6667	0	2000
833,3333	0	2500

Tableau D.1 Valeurs des efforts pour les données d'entraînement des modèles

ANNEXE E HYPERPARAMÈTRES TESTÉS VIA GRIDSEARCH POUR LES DIFFÉRENTS MODÈLES.

	Hyperparamètres testés	Valeurs	Hyperparamètres optimaux (GridSearch)
Régression Polynomiale	degré du polynôme	[1 2 3 4 5]	3
SVR	C	[0.1, 1, 10, 100]	10
	gamma	scale, auto	scale
	epsilon	[0.01, 0.1, 0.2]	0,2
k-nn	k	[2, 3, 5, 7]	3
	p	[1, 2]	1
	weights	['uniform', 'distance']	distance
Random Forest	estimators	[100, 300]	100
	max depth	[4, 6, 8]	8
	max features	['log2', 'sqrt']	log2
XGBoost	estimators	[100, 500, 1000]	1000
	learning rate	[0.01, 0.1, 0.2, 0.3]	0,2
	max depth	[1, 2, 4, 6]	2
	sub sample	[0.6, 0.8, 1.0]	1

TABLEAU E.1 Hyperparamètres testés via GridSearch pour les différents modèles.