



# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace

---

**Présentée et soutenue par :**

**Thomas SOLATGES**

le jeudi 12 juillet 2018

**Titre :**

Modélisation, conception et commande de robots manipulateurs flexibles.  
Application au lancement et à la récupération de drones à voilure fixe depuis  
un navire faisant route

---

**École doctorale et discipline ou spécialité :**

EDSYS : Robotique

**Unité de recherche :**

Équipe d'accueil ISAE-ONERA CSDV

**Directeur(s) de Thèse :**

M. Philippe BIDAUD (directeur de thèse)  
M. Mathieu ROGNANT (co-directeur de thèse)

**Jury :**

M. Philippe POIGNET, Directeur de Recherche LIRMM - Président  
M. Philippe BIDAUD, Directeur de Recherche ONERA - Directeur de thèse  
M. Stéphane CARO, Chargé de Recherche LS2N - Rapporteur  
M. Vincent PADOIS, Maître de Conférences Sorbonne Université - Rapporteur  
M. Gérard POISSON, Professeur Université d'Orléans  
M. Pierre RENAUD, Professeur INSA Strasbourg  
M. Mathieu ROGNANT, Ingénieur de Recherche ONERA - Co-directeur de thèse  
M. Sébastien RUBRECHT, Ingénieur SITIA



# Avant propos

## Disponibilité du document et des fichiers attachés

Ce document et les contenus multimédia sont disponibles au format numérique aux adresses suivantes :

- <https://hal.archives-ouvertes.fr/>
- <http://these.solatges.fr/>

Des liens vers les illustrations multimédia sont proposés au fil du document, sous la forme : [vidéo : test.mp4](#). Ils indiquent le nom du fichier correspondant et pointent directement vers ceux-ci si ils sont disposés dans le même dossier que le fichier au format numérique.

Les annexes contiennent notamment une liste des symboles et une liste des acronymes auxquelles le document fait référence avec des liens colorés.

## Remerciements

La thèse est un exercice particulier, pour lequel le soutien des collègues, encadrants, parents et amis a une importance vitale. Je profite donc de cet espace pour remercier tous ceux qui ont tous contribué, à leur manière, à l'existence du présent document et à la conservation de la santé mentale de son auteur.

Je commence par exprimer ma gratitude à mes encadrants, Mathieu Rognant, Sébastien Rubrecht et Philippe Bidaud qui m'ont épaulé, guidé et surtout subi (parfois, paraît-il). Une mention spéciale doit être accordée à Sébastien, qui, par sa proximité géographique et son engagement sans faille, a été un support considérable sur une base quotidienne.

Merci aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux et pour l'avoir manifesté au travers de leurs questions et de leurs remarques. Je remercie en particulier les rapporteurs, Stéphane Caro et Vincent Padois, pour leur investissement important dans la lecture et l'analyse de ce document.

Je remercie l'ensemble du personnel (présent et passé) de SITIA pour m'avoir offert une ambiance de travail agréable et leur soutien, malgré l'originalité du projet YAKA et ses enjeux difficiles à appréhender, surtout au début. Je remercie en particulier tous ceux qui ont participé au projet YAKA : David S, Matthieu P, Mickaël D, Laurent G, Jean-Pierre P, Jérôme P, Yannick C, Pascal C, Fabrice A, Christophe S, Gérald S. Merci à Fabien Arignon pour m'avoir fait confiance et donné les moyens d'arriver à nos fins.

Je n'y ai passé que peu de temps durant ma thèse, mais je garde un très bon souvenir de mes passages à l'ONERA à Toulouse et en particulier grâce aux doctorants du DCSD, notamment Mathieu B, Emmanuel C, Pauline K, Adèle B et Hélène E, que je remercie pour leur accueil.

Merci à Éric Courteille pour son aide précieuse à l'analyse vibratoire du robot YAKA, son soutien et ses encouragements.

Merci à mes anciens collègues de l'ISIR, en particulier Pascal M, Olivier G et Tiago G de m'avoir donné envie de m'intéresser aux drones et pour leurs encouragements avant et pendant la thèse.

Pour m'avoir donné l'opportunité de participer à l'aventure inoubliable du vol Zéro G pendant ma thèse et pour l'intérêt technique du projet, je remercie Hélène E, Antoine B et le reste de l'équipe des Flying Squirrels : Adrien D, Jean M, Alain P, Daniel A et Viktor V.

Merci à mes amis Nantais : Viktor V, Kévin G (Gammy), Émilie W, Clément H, Adrien H, Caroline G (Caro), Vincent J et Claire S, pour leur participation active au maintien de ma motivation, en particulier pendant la période de rédaction. Merci à Marion G, Éléonore A, Guillaume G et tous les autres Gadz, Roboticiens, Vélocipèdes, Navigateurs, Corses et Européens que cet espace ne pourrait contenir.

Merci au lycée Lætitia Bonaparte et à tout son personnel, en particulier aux professeurs de prépa. Merci en particulier au club *astronomie et philosophie*, à Josette C, Jean-Laurent L, Guillaume C, Odile C, Pascal H, Jean-Pierre R et Ivan M pour m'avoir donné (et surtout pour continuer de donner à d'autres) l'opportunité de m'intéresser à des sujets aussi variés que fascinants, allant de la cosmologie à l'usinage en passant par l'optique et l'astrophysique.

Merci au logiciel libre et à ceux qui y contribuent. Merci à Linux pour son taux de disponibilité inégalable et pour avoir toujours poliment demandé ma permission avant de faire des mises à jour, contrairement à d'autres, moins délicats... Merci à Inkscape, Gimp et Latex, pour m'avoir permis de valoriser mes travaux.

Puisque cette dernière thématique nous rassemble (et surtout, pour m'avoir beau-

coup appris), je remercie Susana (susy) et Benoit (costud) pour tous ces moments partagés. Pour n'en citer que quelques-uns : l'étude de la rupture des spaghettis (spaghettini n.7), la fonderie au grenier, la découpe laser dans la cuisine, l'impression 3D dans la salle de bain, l'usinage dans le grenier, les bateaux pop-pop dans la douche, les essais de drones dans le salon, la soudure de contrôleurs de vol au grille pain. Merci d'avoir rendu ces activités incongrues à la fois habituelles et productives.

Merci à mes parents et à ma grand-mère pour leur soutien inconditionnel. Merci à ma famille et en particulier à Lionel, pour son aide au moment du passage dans l'enseignement supérieur. Cette thèse vous est dédiée.



# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>vii</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>ix</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Introduction générale	2
1.2 Contexte de la thèse : lancement et récupération d'un drone à partir d'un navire	4
<b>2 État de l'art et réalisation</b>	<b>11</b>
2.1 Modélisation de robots manipulateurs flexibles	12
2.2 Identification et recalage expérimental de robots manipulateurs flexibles	18
2.3 Réduction de modèle de robots manipulateurs flexibles	21
2.4 Commande de robots manipulateurs flexibles	22
2.5 Conception de robots manipulateurs flexibles	28
2.6 Présentation du robot YAKA	34
2.7 Conclusion	38
2.8 Références	39
<b>3 Modélisation et recalage expérimental de robots flexibles</b>	<b>45</b>
3.1 Modélisation de robots flexibles	46
3.2 Recalage et validation expérimentale	56
3.3 Réduction de modèle	71
3.4 Conclusion	78
3.5 Références	78
<b>4 Commande de robots flexibles</b>	<b>81</b>
4.1 Cadre de l'étude	82
4.2 Conception d'un Input Shaper multi-mode, multi-actionneur	88
4.3 Input Shaping adaptatif	95
4.4 Conclusion et perspectives	99
4.5 Références	101
<b>5 Conception de robots flexibles</b>	<b>103</b>
5.1 Cadre de conception	104
5.2 Modélisation des systèmes candidats	108
5.3 Simulation et architecture de commande de référence	109
5.4 Mesure de performance	110
5.5 Analyse de la solution	119

5.6	Fabrication et validation expérimentale . . . . .	121
5.7	Illustration sur le cas du projet YAKA . . . . .	122
5.8	Synthèse de l'utilisation des indicateurs de performance . . . . .	124
5.9	Limites et perspectives . . . . .	126
5.10	Conclusion . . . . .	126
5.11	Références . . . . .	127
<b>6</b>	<b>Résultats, conclusion et perspectives générales</b>	<b>129</b>
6.1	Résultats du projet YAKA . . . . .	130
6.2	Conclusion générale . . . . .	139
<b>A</b>	<b>Publications personnelles</b>	<b>I</b>
<b>B</b>	<b>Liste des acronymes</b>	<b>III</b>
<b>C</b>	<b>Liste des symboles</b>	<b>V</b>

# Liste des figures

1.1	Lancement d'un UAV à la main. Source : Business Wire. . . . .	5
1.2	Système de catapultage classique. Source : Boeing Defence UK. . . . .	5
1.3	Récupération d'un UAV dans un filet. Source : Business Wire. . . . .	5
1.4	Système de récupération Boeing Scaneagle. Source : U.S. Navy. . . . .	5
1.5	Concept de système actif de récupération de drones lourds proposé par la société Aurora, doté d'une compensation de houle et d'un rail de décélération. Source : Aurora. . . . .	6
1.6	Principe du projet YAKA : le bras robot manipulateur est placé sur le côté du navire pour effectuer les opérations de lancement et de récupération. . . . .	7
1.7	Phases de récupération d'un UAV avec le robot YAKA : accélération (vert), capture (orange) et décélération (bleu). . . . .	8
1.8	Exemple de projet de capture d'un satellite en orbite, dont les problématiques présentent des similarités avec le projet YAKA. Source : ESA. . . . .	9
1.9	Chronologie du projet YAKA et de la thèse (en mois). . . . .	9
2.1	Présentation du modèle rigide équivalent ERLS : l'état d'un robot flexible est décomposé en une configuration rigide équivalente (en traits pleins) et les déplacements élastiques (translation et rotation) pour décrire son état déformé complet (en pointillés). . . . .	18
2.2	Analyse vibratoire du robot YAKA assemblé : l'expérimentateur réalise un impact au bout du bras avec un marteau instrumenté, les vibrations résultantes sont mesurées par des accéléromètres répartis en différents points de la structure. Un système d'acquisition exploite les données du marteau d'impact et des accéléromètres pour déduire le comportement vibratoire du système (fonctions de transfert). . . . .	21
2.3	Exemple de chaîne de commande typique d'un robot. Un contrôleur haut niveau définit les trajectoires opérationnelles permettant de réaliser les tâches désirées. Elles sont transmises à un contrôleur bas niveau chargé de produire des commandes actionneurs permettant de les suivre, compte tenu de l'état courant du système (mesures robot). . . . .	23
2.4	Architecture de commande proposée : Linéarisation de la dynamique rigide avec un contrôleur par inversion de modèle NDI (asservissement en boucle fermée au niveau articulaire). L'Input Shaper développé prend en charge la maîtrise des vibrations de la structure flexible. Les matrices $\hat{\mathbf{M}}(\mathbf{q})$ et $\hat{\mathbf{H}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ sont les estimations respectives de $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ et $\mathbf{F}\mathbf{c}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{F}\mathbf{g}(\mathbf{q})$ , dans l'équation (2.1). . . . .	28
2.5	Présentation des principales étapes d'un projet, de l'identification du besoin à l'utilisation et la maintenance d'un produit (extrait de FANCHON [2008]).	29

2.6	Robot manipulateur flexible à deux degrés de liberté, mais ayant un seul segment flexible <i>IST</i> , conçu pour expérimenter des asservissements en effort TOKHI et AZAD [2017]. . . . .	32
2.7	Robot manipulateur flexible à un degré de liberté <i>Sheffield</i> , utilisé pour la modélisation ZAIN et collab. [2009]. . . . .	32
2.8	Robot manipulateur flexible d'inspection nucléaire <i>AIA</i> GARGIULO et collab. [2008]. Ce robot mesure 8 mètres de long et possède 8 degrés de liberté pour une masse de 150kg. . . . .	33
2.9	Robot manipulateur spatial <i>Remote Manipulator System (RMS)</i> équipé de l'extension <i>Orbiter Boom Sensor System</i> . Ce système mesure 30 mètres, possède 6 degrés de liberté et pèse environ 500kg. Source : NASA (STS114-E-5330). . . . .	33
2.10	Robot manipulateur gonflable de recherche et sauvetage <i>Giacometti</i> TAKEICHI et collab. [2017]. Ce robot mesure 20 mètres de long, possède 20 degrés de liberté et pèse 940g. . . . .	34
2.11	Présentation du robot YAKA et de sa cinématique, à côté du robot <i>NAO</i> (Soft-Bank Robotics), haut de 60cm. R1, R2 et R3 désignent les trois rotations actionnées. vidéo : <a href="#">robot_yaka.mp4</a> . . . . .	35
2.12	Déformée modale et fréquence propre des quatre premiers modes de vibration du robot YAKA, représentées en configuration centrale. vidéo : <a href="#">modes_yaka.mp4</a> . . . . .	36
2.13	Présentation du dispositif expérimental de test en intérieur : la catapulte (à gauche) lance un UAV (au centre) vers le robot YAKA (à droite) afin de recréer les conditions d'une récupération. . . . .	37
2.14	Présentation du dispositif expérimental pour les essais opérationnels : le robot YAKA monté sur camion, capable de fonctionner en mouvement ou à l'arrêt. . . . .	37
3.1	Représentation générique d'un robot, décomposé en trois principaux composants : son contrôleur, ses actionneurs et sa mécanique flexible. . . . .	47
3.2	Processus de modélisation systématique d'un système, permettant de produire un modèle complet (fidèle) et un modèle réduit (léger) à partir d'une table de paramètres le décrivant. . . . .	49
3.3	Exemple de maillage du robot YAKA : seul le plus grand des trois segments du robot est divisé en deux poutres distinctes pour pouvoir prendre en compte son deuxième mode de vibration. . . . .	51
3.4	Représentation de l'état d'un système 2R-plan flexible à partir de son vecteur d'état. Les variables articulaires issues du vecteur d'état $\mathbf{q}$ décrivent le modèle rigide équivalent (ERLS), le vecteur d'état flexible $\mathbf{u}$ représentant le déplacement cartésien de chaque nœud du robot flexible, relativement à son équivalent rigide. . . . .	53
3.5	Modèle d'actionneur électromécanique classique. . . . .	55
3.6	Influence du paramètre $\lambda$ sur la sigmoïde $2\left(\frac{1}{1+e^{-\lambda q}}\right) - 1$ . La sigmoïde s'apparente d'autant plus à une discontinuité que le paramètre $\lambda$ est grand. . . . .	56
3.7	Analyse vibratoire expérimentale d'un segment isolé. . . . .	58
3.8	Résultat d'identification d'un segment isolé du robot YAKA. . . . .	58

3.9	Chargement statique d'un segment du robot YAKA pour le recalage de ses paramètres de raideur : le segment est placé sur deux appuis, un comparateur relève la valeur de déformation en son milieu, sous un chargement statique connu (dispositif d'application de l'effort non présent sur la photographie). . . . .	59
3.10	Identification du frottement sec d'un actionneur du robot YAKA : l'actionneur est mis en mouvement à vitesse très faible pour isoler le frottement sec du frottement visqueux. L'opération est répétée dans les deux sens de rotation pour identifier une éventuelle asymétrie. . . . .	61
3.11	Dispositif d'identification d'un actionneur du robot YAKA : une charge de masse et d'inertie connue (de l'ordre de grandeur de l'inertie des segments du robot) est placée en sortie d'un actionneur pour permettre une identification dynamique représentative, sans subir l'effet des flexibilités des segments. . . . .	62
3.12	Résultats d'identification à faible dynamique : on observe une bonne corrélation du modèle. . . . .	63
3.13	Résultats d'identification à forte dynamique : les résultats temporels sont satisfaisants, mais la courbe de droite permet d'identifier une imperfection du modèle au voisinage de $\dot{q} = 0$ . . . . .	64
3.14	Résultats d'identification sur toute la plage de fonctionnement avec la méthode de la pseudo-inverse. À gauche, les résultats obtenus en considérant pour chaque trajectoire le jeu de paramètres optimaux correspondants. À droite, on compare toutes les trajectoires avec le modèle obtenu avec les paramètres moyens. . . . .	64
3.15	Résultats d'identification sur toute la plage de fonctionnement avec la méthode d'optimisation incluant l'identification du paramètre $\lambda$ . À gauche, les résultats obtenus en considérant pour chaque trajectoire le jeu de paramètres optimaux correspondants. À droite, on compare toutes les trajectoires avec le modèle obtenu avec les paramètres moyens. . . . .	66
3.16	Interpolation du paramètre $\lambda$ en fonction de la dynamique (représentée par la variable $I_{eq}\ddot{q}_{max}$ ). . . . .	67
3.17	Analyse vibratoire expérimentale du système complet assemblé (ici en configuration 2). . . . .	68
3.18	Recalage du module de Young d'un segment du robot YAKA, sur le modèle complet. Évolution du modèle en fonction du paramètre réglé (courbes colorées) confronté aux mesures expérimentales (pointillés), dans deux configurations différentes. . . . .	69
3.19	Comparaison des fonctions de transfert mesurées et celles prédites par le modèle dans deux configurations différentes. . . . .	70
3.20	Modes propres obtenus à partir des vecteurs propres et valeurs propres de la matrice $\mathbf{M}_{uu}^{-1}\mathbf{K}_{uu}$ . Les déformées modales sont représentées en rouge, le modèle rigide équivalent en noir. <a href="#">vidéo : modes_yaka.mp4</a> . . . . .	71
3.21	Illustration des informations pouvant être issues du modèle : évolution de la fréquence propre du 4 <sup>ième</sup> mode propre du robot YAKA. . . . .	73
3.22	Illustration des informations pouvant être issues du modèle : évolution du vecteur propre du 3 <sup>ième</sup> mode propre du robot YAKA (seule la composante de déplacement cartésien en bout de bras est représentée). . . . .	73

3.23	Évolution des quatre premiers modes propres du robot YAKA : les deux premiers modes de vibration se croisent aux extrémités dans l'espace de travail du robot, ce qui rend leur distinction ambiguë et problématique pour la réduction de modèle. . . . .	74
3.24	Illustration de l'effet d'un mauvais appairage de modes : on observe une discontinuité des vecteurs propres des deux premiers modes de vibration. .	75
3.25	Évolution de la somme des valeurs singulières en fonction du nombre de modes considérés. L'atteinte d'une asymptote permet de choisir le nombre de valeurs singulières à conserver. . . . .	76
3.26	Confrontation du modèle réduit au modèle de référence : comme désiré, les quatre premiers vecteurs propres sont correctement représentés, les artefacts sont repoussés à plus haute fréquence, hors du domaine utile du modèle.	77
4.1	Exemple de chaîne de commande typique d'un robot. Notre étude se limite au contrôleur bas niveau, qui est chargé de produire des commandes actionneurs à partir de consignes articulaires désirées et de mesures articulaires (mesures robot). Les mesures opérationnelles représentées sont des informations utiles à la génération de trajectoire (par le contrôleur haut niveau). . . . .	82
4.2	Principe de l'Input Shaping illustré sur un système oscillant simple (adapté de SINGHOSE [2009]). Le filtre de convolution présenté fait apparaître deux impulsions séparées d'un délai T (demi-période propre d'oscillation du système). Une première impulsion d'amplitude $A_1$ sollicite la structure et crée une oscillation qui est compensée par une deuxième impulsion d'amplitude $A_2$ . vidéo : <a href="#">input_shaping.mp4</a> . . . . .	83
4.3	Illustration de l'effet d'un Input Shaper simple, appliqué à une trajectoire articulaire (adapté de SINGHOSE [2009]). La trajectoire modifiée qui est transmise au contrôleur bas niveau est modifiée de manière à annuler les vibrations résiduelles créées par le mouvement. . . . .	84
4.4	Robustesse de différents Input Shaper aux erreurs de modélisation : évolution du pourcentage de vibrations résiduelles en fonction du type d'Input Shaper et de l'erreur relative sur la pulsation propre $\omega_i$ du mode $i$ considéré (adapté de SINGH et SINGHOSE [2002]). . . . .	84
4.5	Architecture de commande proposée : Linéarisation de la dynamique rigide avec un contrôleur par inversion de modèle NDI (asservissement en boucle fermée au niveau articulaire). L'Input Shaper développé prend en charge la maîtrise des vibrations de la structure flexible. . . . .	85
4.6	Architecture d'un Input Shaper multi-axes et multi-modes générique : un nombre quelconque de modes de vibration peut être traité par chaque actionneur en plaçant en série différents blocs d'Input Shaping. . . . .	86
4.7	Commandabilité des modes propres du robot YAKA : mise en évidence des couples actionneur/mode présentant la plus grande criticité. Indicateur exprimé en radians (en mètre pour les liaisons prismatiques), représentant la contribution de chaque liaison actionnée dans la déformée modale donnée pour chaque mode par le vecteur propre $Vp_i$ . . . . .	90
4.8	Déformée modale et fréquence propre des quatre premiers modes de vibration du robot YAKA, représentées en configuration centrale (configuration 1). vidéo : <a href="#">modes_yaka.mp4</a> . . . . .	91

4.9	Indicateur global normalisé $\text{Perf}_{a,i}$ utilisé pour la conception d'un Input Shaper pour le bras YAKA : il indique la criticité de chaque couple actionneur/mode dans le comportement vibratoire du robot YAKA. Cet indicateur met en évidence que parmi les douze couples actionneur/mode considérés, seulement cinq ont une influence significative, avec deux couples ( $a = 1/i = 1$ et $a = 3/i = 2$ ) largement prépondérants. . . . .	92
4.10	Comparaison des mesures d'accélération lors d'une trajectoire de lancement : on observe une réduction très significative des vibrations de la structure en cours de mouvement et après le mouvement avec les différentes approches proposées (en rouge, bleu et vert), en comparaison avec le comportement sans Input Shaping (en noir) et l'accélération théorique en bout de bras (en pointillés). vidéo : <a href="#">input_shaping_lancement.mp4</a> . . . . .	94
4.11	Appréciation qualitative de l'amélioration de la précision en suivi de trajectoire apportée par l'approche d'Input Shaping proposée. Ces clichés sont obtenus avec une méthode de <i>light painting</i> (photographie à long temps de pause, avec un dispositif lumineux attaché à l'organe terminal du robot YAKA). . . . .	95
4.12	Schéma d'Input Shaping adaptatif proposé : les fréquences propres sont calculées à partir de la trajectoire entrante et d'un modèle d'interpolation pour régler en temps réel les paramètres des différents blocs d'Input Shaping adaptatif. . . . .	96
4.13	Configurations de test considérées, réparties sur l'espace de travail du robot.	97
4.14	Résultats expérimentaux évaluant l'efficacité du schéma adaptatif sur des trajectoires locales. Comme prévu, les deux approches ont un comportement identique dans la configuration 1 où elles utilisent le même réglage. L'approche adaptative (AMMIS) apporte une réduction de vibrations résiduelles de 30% dans la configuration 5, par rapport à l'approche classique (MMIS) qui y utilise un réglage moins adapté. vidéo : <a href="#">input_shaping_traj_locale.mp4</a> . . . . .	98
4.15	Résultats comparatifs évaluant l'efficacité du schéma adaptatif sur une trajectoire globale : la version adaptative (AMMIS) montre une réduction de vibrations résiduelles de 40% par rapport à l'approche à paramètres fixes (MMIS). . . . .	99
5.1	Périmètre considéré pour les travaux de conception : Le processus détermine le système flexible et ses actionneurs, une architecture de référence est figée pour une évaluation de performances impartiale des différentes solutions. . . . .	105
5.2	Exemples de conceptions préliminaires d'un robot flexible, à l'origine du processus de conception. À gauche, une morphologie de type série, avec une chaîne cinématique fermée pour déporter l'actionnement (solution retenue). À droite, une autre solution envisagée à l'origine du projet, exclue pour des raisons d'encombrement. . . . .	106
5.3	Processus de conception d'un robot flexible associé aux différents outils proposés dans ce chapitre. Chaque étape de ce processus est l'objet d'une partie de ce chapitre. . . . .	107
5.4	Trajectoire type de lancement d'un UAV, considérée pour le processus de conception du robot YAKA : un UAV de 5Kg est lancé à une vitesse de 10m/s.	109

5.5	Architecture de commande de référence choisie pour la conception : Linéarisation de la dynamique rigide avec un contrôleur par inversion de modèle NDI (asservissement en boucle fermée au niveau articulaire). Un Input Shaper prend en charge la maîtrise des vibrations de la structure flexible. . . . .	110
5.6	Évolution de l'énergie impliquée dans les modes de vibration pour une simulation temporelle de trajectoire de lancement d'un UAV avec le bras YAKA en composite, en fonction de la capacité de régénération du système (efficacité ( $\mathcal{A}$ ), en %). . . . .	116
5.7	Déplacement cartésien et erreur de suivi en bout de bras pour une simulation temporelle de trajectoire de lancement d'un UAV avec le bras YAKA en composite. . . . .	118
5.8	Comparaison des performances de deux solutions en cours de conception : mise en évidence de l'intérêt de l'utilisation de matériaux composites dans le cadre du projet YAKA. . . . .	123
5.9	Évaluation de la sensibilité aux paramètres incertains : comparaison des performances calculées avant et après recalage expérimental des paramètres mécaniques des liaisons. . . . .	124
6.1	Vue du robot pendant sa mise au point lors de la campagne d'essais sur le site de l'ONERA à Esperces. . . . .	131
6.2	Récupération d'un UAV non actionné lancé par une catapulte. <a href="#">vidéo : recuperation_indoor.mp4</a> . . . . .	132
6.3	Démonstration de lancement d'un UAV par le bras YAKA. <a href="#">vidéo : lancement.mp4</a>	133
6.4	Évaluation du comportement du bras YAKA sur un camion mobile. . . . .	134
6.5	Essais de récupération d'un UAV par le bras YAKA, depuis un camion mobile.	135
6.6	Présentation du dispositif de perception utilisé pour les démonstrations de récupération. L'UAV arrive et est perçu successivement par des capteurs LIDAR (2D) verticaux. La trajectoire de l'UAV est extrapolée à partir de ces deux mesures pour calculer les conditions de rendez-vous. Le bras YAKA effectue alors une trajectoire d'interception adaptée. . . . .	136
6.7	Démonstration de récupération d'un UAV par le bras YAKA, depuis un camion fixe. <a href="#">vidéo : recuperation.mp4</a> . . . . .	137

# Liste des tableaux

3.1	Table de paramètres de Khalil et Kleinfinger : représentation standardisée d'un robot manipulateur. . . . .	50
3.2	Comparaison du module de Young théorique (donnée constructeur) $E$ du grand segment du robot YAKA avec celui identifié par chargement statique et analyse vibratoire. . . . .	60
3.3	Table des paramètres identifiés avec méthode de la pseudo-inverse de Moore-Penrose. . . . .	63
3.4	Table des paramètres identifiés avec la méthode d'optimisation incluant l'identification du paramètre $\lambda$ . . . . .	65
3.5	Table comparative des valeurs de fréquences propres prédites par le modèle obtenu et celles mesurées expérimentalement. Les résultats sont satisfaisants (erreur inférieure à 5%). Une validation est effectuée en retirant le préhenseur de 1 kg du bout de bras, avec des données expérimentales qui ne sont pas utilisées pour le recalage. . . . .	69
4.1	Valeurs de densité spectrale d'énergie des trajectoires types du projet YAKA, données pour la fréquence propre de chaque mode $i$ (identiques pour les trois actionneurs $a$ ). . . . .	89
4.2	Valeurs des indicateurs d'amortissement $\mathbf{Damp}_i$ (temps de stabilisation) calculés pour le robot YAKA. . . . .	90
4.3	Valeurs des indicateurs de déplacement élastique $\mathbf{Eoa}_i$ pour le robot YAKA. . . . .	91
4.4	Présentation des configurations d'Input Shaper retenues pour l'expérimentation : blocs d'Input Shaping à mis en place sur chaque actionneur pour prendre en compte le(s) mode(s) $i$ . . . . .	93
4.5	Variations de fréquences propres de chaque mode de vibration données pour différentes configurations articulaires du robot YAKA, données par rapport à sa configuration centrale (configuration 1 sur la figure 4.13). . . . .	96
4.6	Description de la trajectoire globale réalisée pour comparer l'efficacité du schéma adaptatif ( <i>AMMIS</i> ) à sa version classique ( <i>MMIS</i> ). . . . .	97
5.1	Paramètres considérés lors de l'étude de l'influence du choix du matériau sur les performances atteintes par le robot YAKA. . . . .	122
5.2	Tableau de synthèse des indicateurs de performance (flexible) présentés. Pour chaque indicateur, l'usage dans le cas général et dans le cas particulier du projet YAKA sont décrits. . . . .	125



# Chapitre 1

## Introduction

### Sommaire

---

<b>1.1 Introduction générale</b> . . . . .	<b>2</b>
<b>1.2 Contexte de la thèse : lancement et récupération d'un drone à partir d'un navire</b> . . . . .	<b>4</b>
1.2.1 Problématiques et systèmes existants . . . . .	4
1.2.2 Le projet YAKA . . . . .	6
1.2.3 Spécificités de l'application et perspectives . . . . .	6
1.2.4 Interactions entre la thèse et le projet . . . . .	8

---

## 1.1 Introduction générale

Les robots manipulateurs sont utilisés dans de nombreux contextes et continuent de se démocratiser. Leur intérêt réside dans leur capacité à effectuer des tâches complexes de manière précise et répétable, y compris à haute vitesse ou sous l'effet de chargements importants. La spécificité et la diversité des besoins ont pour effet que ces systèmes prennent des formes très variées, résultant le plus souvent d'un compromis entre leurs capacités géométriques (taille de leur espace de travail), dynamiques (vitesse, accélération) et de transmission d'efforts.

L'immense majorité de ces systèmes est conçue de manière à ce que la flexibilité de leurs composants mécaniques n'ait pas d'influence sur leurs performances, notamment en termes de précision et de stabilité. En particulier pour les bras manipulateurs séries, cette contrainte implique l'emploi de composants massifs, très rigides et d'inertie importante. Or, l'inertie d'un système s'oppose par définition à son accélération, et donc à son efficacité et l'atteinte de performances dynamiques importantes.

Certaines applications nécessitent à la fois de couvrir de grands espaces de travail avec des dynamiques importantes. Face à ce type de cahiers des charges, les systèmes rigides s'avèrent peu efficaces car trop lourds, dangereux et coûteux, voire incapables d'atteindre les performances requises. Cette impasse est atteinte dans de nombreux domaines d'application tels que le spatial, la maintenance nucléaire, le bâtiment, la recherche et le sauvetage, etc.

Ce constat met en évidence les enjeux de la démocratisation de robots plus légers, qui suppose de maîtriser les effets des flexibilités qui résultent inévitablement de la réduction des masses. La capacité à mettre en œuvre des robots plus légers laisse espérer des performances inédites, élargissant le champ d'application des robots manipulateurs. De plus, les applications tirant d'ores et déjà parti des robots rigides classiques bénéficieraient elles aussi de cette avancée. En effet, pour des performances cinématiques et dynamiques données, réduire la masse d'un système permet de réduire sa consommation énergétique et son coût. Enfin, son énergie cinétique est aussi réduite, ce qui constitue un critère décisif dans la sécurité de la collaboration homme-robot.

Malgré les très nombreux avantages qu'ils semblent présenter, les robots flexibles sont extrêmement peu représentés, sinon inexistant dans le paysage des applications robotisées. En effet, la flexibilité d'un système induit des degrés de liberté non désirés qui rendent les développements (modélisation, conception et commande) nettement plus complexes que lorsque ces effets peuvent être négligés.

Cette thèse propose des outils pour répondre aux problématiques spécifiques de modélisation, de conception et de commande de robots flexibles, dans le but de contribuer à rendre accessibles les avantages majeurs qu'ils présentent. Elle est motivée et illustrée par l'application de lancement et de récupération de drones à voilure fixe depuis un navire pour laquelle aucun robot rigide existant n'est apte à répondre. Les résultats expérimentaux obtenus permettent de valider la pertinence de la démarche dans un contexte opérationnel, avec un robot flexible de grandes dimensions et à forte dynamique.

Ce mémoire présente le travail effectué ainsi que les résultats obtenus au cours de la thèse. Il est organisé de la façon suivante :

- **Chapitre 1 - Introduction** - Cette introduction présente le contexte de l'étude et l'application visée. Les principaux dispositifs de Lancement et de Récupération existants sont rapidement présentés. Enfin le projet YAKA et ses interactions avec cette thèse sont décrits.
- **Chapitre 2 - État de l'art et réalisation** - Ce chapitre présente dans un premier temps les principaux travaux antérieurs en relation avec le sujet de notre étude ainsi que quelques robots flexibles existants. Ensuite, il présente le robot YAKA tel qu'il a été conçu dans le cadre du projet.
- **Chapitre 3 - Modélisation et recalage expérimental de robots flexibles** - Les outils et méthodes développés pour réaliser la modélisation, le recalage expérimental et la réduction de modèle mécanique d'un robot flexible sont présentés dans ce chapitre. Ils permettent d'obtenir un modèle analytique, de l'ajuster en le confrontant à des mesures sur le système réel et enfin de le simplifier pour pouvoir être exploité, notamment en commande et en simulation.
- **Chapitre 4 - Commande de robots flexibles** - Ce chapitre présente une approche de commande adaptée à une implémentation rapide sur un robot flexible industriel. La méthode proposée prend en compte le comportement flexible du système à l'aide du modèle obtenu dans le chapitre 3, tout en conservant une implémentation peu gourmande en temps de calcul, adaptée aux contraintes opérationnelles.
- **Chapitre 5 - Conception de robots flexibles** - La conception d'un système complet est une tâche pluridisciplinaire dont les fondements sont communs à tout type de système. Ce chapitre se focalise sur les spécificités liées à la prise en compte des flexibilités durant l'étape de conception d'un robot manipulateur. Ces outils sont présentés dans une démarche de conception générique et sont illustrés avec le robot YAKA.
- **Chapitre 6 - Résultats, conclusion et perspectives générales** - Ce dernier chapitre présente les conclusions et perspectives générales de cette thèse ainsi que les résultats du projet YAKA.

## 1.2 Contexte de la thèse : lancement et récupération d'un drone à partir d'un navire.

L'utilisation d'**UAV** à voilure tournante pour diverses applications s'est très largement démocratisée dans les années passées, et ce pour diverses applications. Cependant, leur champ d'action étant limité, il est souvent nécessaire de travailler avec des **UAV** à voilure fixe qui offrent un périmètre opérationnel plus important. Les problématiques liées à l'utilisation de ces **UAV** apparaissent principalement lors du décollage et de l'atterrissage, car ces opérations nécessitent une infrastructure permettant d'effectuer la transition entre l'état statique et le vol. Ces inconvénients deviennent critiques pour des applications embarquées (véhicule terrestre ou naval). En particulier, le lancement et la récupération d'un **UAV** depuis un navire sont utiles à de nombreuses missions d'exploration ou de surveillance en mer.

Le projet YAKA dans lequel la thèse s'inscrit consiste en l'étude et la réalisation d'un moyen léger pour lancer et récupérer de façon automatisée un **UAV** à voilure fixe depuis un navire faisant route. La thèse est effectuée au sein de l'entreprise SITIA, en collaboration avec l'ONERA.

### 1.2.1 Problématiques et systèmes existants

Le lancement et la récupération d'un **UAV** en mer sont des opérations complexes, soumises aux contraintes liées à l'**UAV** et au véhicule porteur :

- Les contraintes physiques liées à l'**UAV**, par exemple le maintien d'une vitesse suffisante pour éviter le décrochage. La mise en mouvement ou l'arrêt de l'**UAV** impliquent de lui infliger une accélération importante, dont l'amplitude et l'application doivent être maîtrisées pour éviter d'endommager sa structure.
- Les contraintes opérationnelles liées aux missions et aux besoins respectifs du navire et de l'**UAV**, qui imposent des conditions de récupération (vitesse différentielle, notamment).
- Les perturbations telles que la houle, le vent, et les turbulences aérodynamiques dans le sillage du navire.

Les parties suivantes présentent les problématiques spécifiques aux opérations de lancement et de récupération, quelques systèmes existants et le projet YAKA qui propose une nouvelle solution de **L&R**.

#### 1.2.1.1 Moyens de lancement

L'opération de lancement a pour objectif de donner à l'**UAV** les conditions requises pour le vol. Son attitude et sa vitesse (vitesse air) initiales doivent être contenues dans les limites admissibles par le système au décollage.

Comme illustré sur la figure 1.1, la stratégie la plus simple consiste à lancer l'**UAV** à la main. Cependant, elle est réservée aux **UAV** de faible masse ayant une faible vitesse de décrochage. De plus, le respect et la répétabilité des conditions de vol initiales dépendent fortement de l'opérateur.

Des systèmes de catapultage comme celui présenté sur la figure 1.2 sont le plus souvent utilisés, pour tous types de drones à voilure fixe. Le lancement d'un **UAV** avec une catapulte est une solution simple, mais massive et encombrante.



FIGURE 1.1 – Lancement d'un UAV à la main.  
Source : Business Wire.



FIGURE 1.2 – Système de catapultage classique. Source : Boeing Defence UK.

### 1.2.1.2 Moyens de récupération

La récupération d'un UAV depuis un navire est une opération délicate, car elle est soumise aux perturbations du mouvement du navire et de l'UAV.

La majeure partie des systèmes de récupération existants sont passifs, positionnés sur le pont du navire pour réceptionner l'UAV. Il peut s'agir d'un filet (figure 1.3) ou d'un câble (figure 1.4) que l'UAV doit intercepter pour apponter. Les mouvements du navire dus à la houle n'étant pas compensés, le succès de l'opération dépend de la capacité de l'UAV à atteindre un point de rendez-vous mobile, dans l'environnement perturbé par le sillage aérodynamique du navire.

L'UAV Boeing Scaneagle visible sur la figure 1.4 est le plus massif (environ 22Kg) pouvant être récupéré avec des moyens purement passifs de ce type. Ces approches passives sont d'autant plus risquées que la mer est agitée (risque de collision entre l'UAV et le navire).



FIGURE 1.3 – Récupération d'un UAV dans un filet. Source : Business Wire.



FIGURE 1.4 – Système de récupération Boeing Scaneagle. Source : U.S. Navy.

Des investissements significatifs tels que le programme TERN de la DARPA ont pour objectif de permettre la récupération d'un UAV plus lourd (type MALE. Dans cette optique, des acteurs comme l'entreprise Aurora envisagent le développement de dispositifs tels que celui présenté sur la figure 1.5.

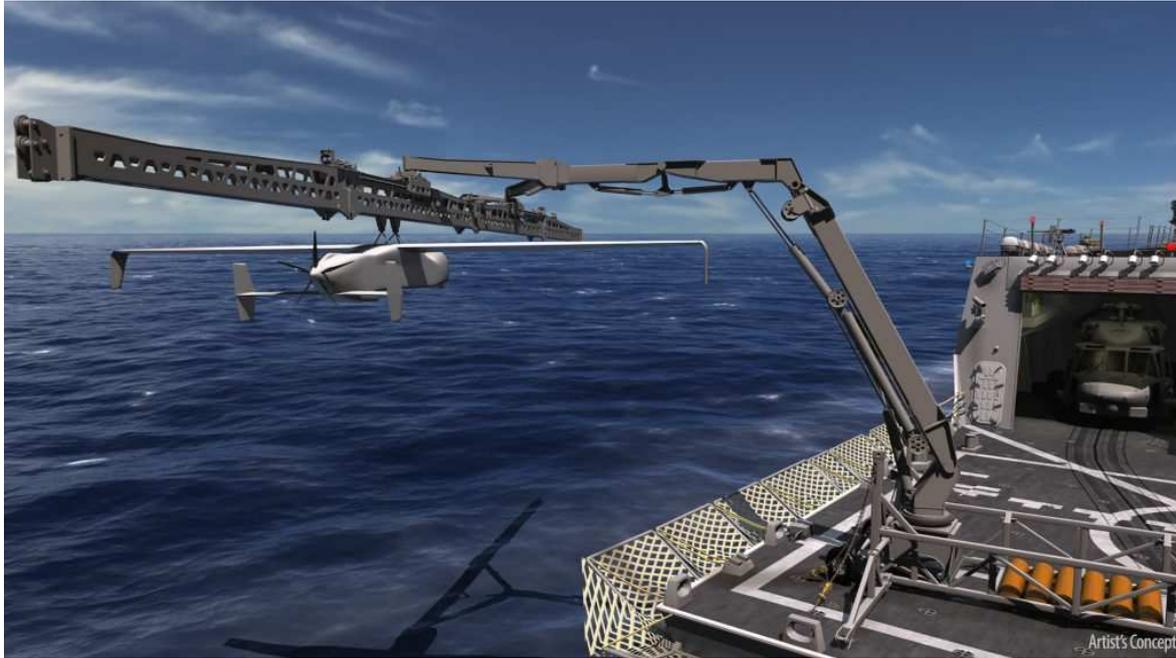


FIGURE 1.5 – Concept de système actif de récupération de drones lourds proposé par la société Aurora, doté d'une compensation de houle et d'un rail de décélération. Source : Aurora.

### 1.2.2 Le projet YAKA

Le projet YAKA dans lequel la thèse s'inscrit a pour objectif d'étudier la faisabilité d'opérations de lancement et de récupération d'UAV légers (5 – 10Kg) depuis un navire faisant route, à l'aide d'un robot. Les faisabilités sont établies via des démonstrations à terre. Ces travaux sont partiellement financés par le Ministère de l'Industrie, via le projet DGA RAPID L&R YAKA (subvention 132906095).

La solution proposée (robot YAKA) est présentée sur la figure 1.6, ses principales spécificités sont les suivantes :

- Le robot YAKA est actif, il est donc capable de compenser les mouvements de la houle, de générer une trajectoire d'interception et de décélérer progressivement l'UAV.
- La récupération s'effectue sur le côté du navire, ce qui permet d'éloigner la trajectoire de l'UAV de la zone perturbée par le sillage aérodynamique du navire, d'annuler l'opération si les conditions ne sont pas favorables et de minimiser le risque de collision entre le navire et l'UAV en cas d'échec de récupération.
- Le robot YAKA est capable d'effectuer à la fois les opérations de lancement et de récupération, pour un encombrement sur le pont du navire très réduit.
- Le robot YAKA a un volume de récupération utile de  $4m \times 2m \times 2m$ , permettant de compenser les imprécisions sur la trajectoire de l'UAV et les mouvements du navire dus à la houle par mer agitée.

### 1.2.3 Spécificités de l'application et perspectives

L'application visée présente un caractère original, par rapport aux usages courants de robots manipulateurs. En effet, les contraintes auxquelles elle est soumise sont très spécifiques et différentes pour chaque phase de la récupération d'un UAV. De plus, les caractéristiques du problème mènent à envisager un système hors normes. En effet, le

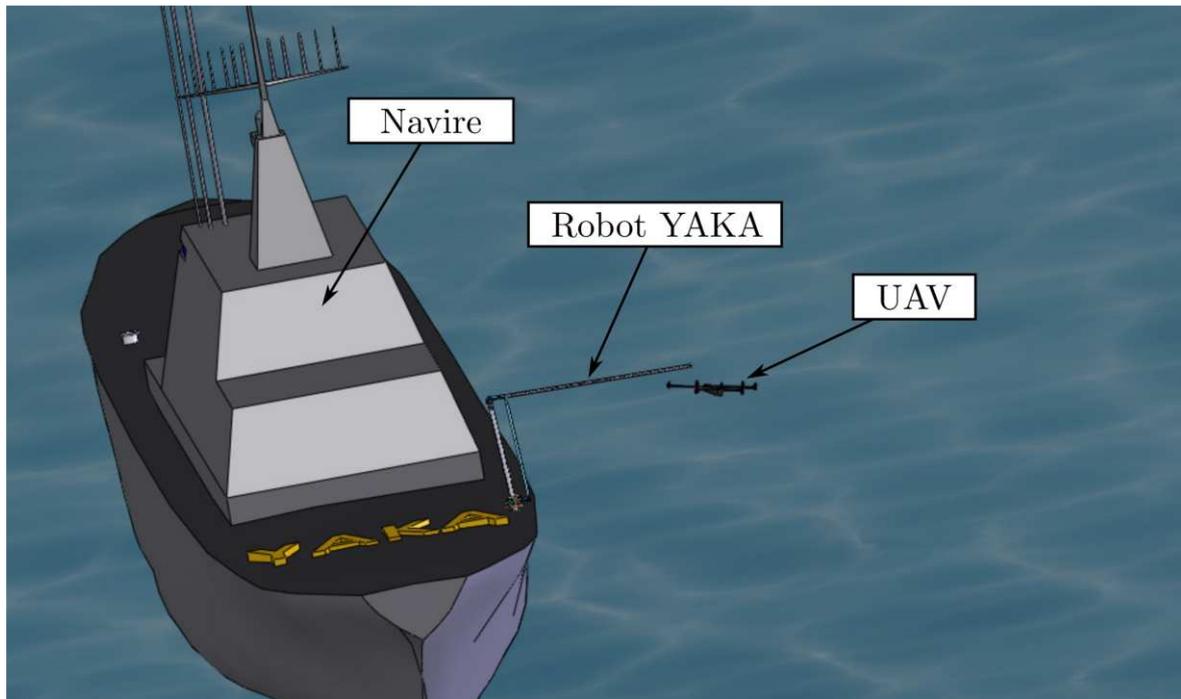


FIGURE 1.6 – Principe du projet YAKA : le bras robot manipulateur est placé sur le côté du navire pour effectuer les opérations de lancement et de récupération.

cahier des charges exige un système de grandes dimensions (rayon d'action approximatif de 7 mètres), et capable d'atteindre une vitesse maximale de  $15\text{m/s}$  en bout de bras en un temps très court (environ 1s). L'atteinte de telles caractéristiques impose l'utilisation d'une structure très légère, donc très flexible. Ces spécifications étant au-delà des performances offertes par les robots manipulateurs classiques, elles motivent le travail de recherche présenté dans ce mémoire.

La figure 1.7 décompose une opération de récupération d'un UAV en trois phases distinctes :

- Une première phase d'accélération (en vert) a pour objectif d'atteindre la zone de récupération en un temps minimal, pour profiter d'une estimation de position de l'UAV au point de rendez-vous la plus récente (et précise) possible. Durant cette phase, on cherche à atteindre une position et une vitesse cartésiennes précises, mais la trajectoire permettant de rejoindre ce point de rendez-vous est peu contrainte en matière de précision.
- La phase de capture (en orange) s'apparente à une trajectoire rectiligne uniforme, permettant de conserver une vitesse différentielle propice à la capture, entre l'UAV et le préhenseur du robot. Contrairement à la phase précédente, celle-ci met en jeu une dynamique bien moins importante mais exige un suivi de trajectoire précis.
- Une fois l'UAV agrippé par le préhenseur, les contraintes sur la trajectoire suivie se relâchent, mais le robot doit stopper le mouvement sur une distance limitée par son espace de travail, tout en respectant l'accélération maximale admissible par l'UAV.

Il est important de noter que du point de vue du robot manipulateur, l'arrimage de l'UAV constitue une modification majeure de la dynamique globale. En effet, l'UAV d'une masse maximale de 10Kg arrivant avec une vitesse différentielle de  $10\text{m/s}$  possède une énergie cinétique propre, qui vient s'ajouter à celle du robot manipulateur en mouvement. Une telle masse ajoutée en bout de bras affecte aussi de manière importante le

comportement dynamique flexible du système, notamment en diminuant la valeur de ses fréquences propres de vibration. Dans le cadre du projet YAKA, cette problématique n'est pas identifiée comme critique, dans la mesure où les perturbations de la trajectoire ne sont pas pénalisantes une fois que l'UAV a été saisi.

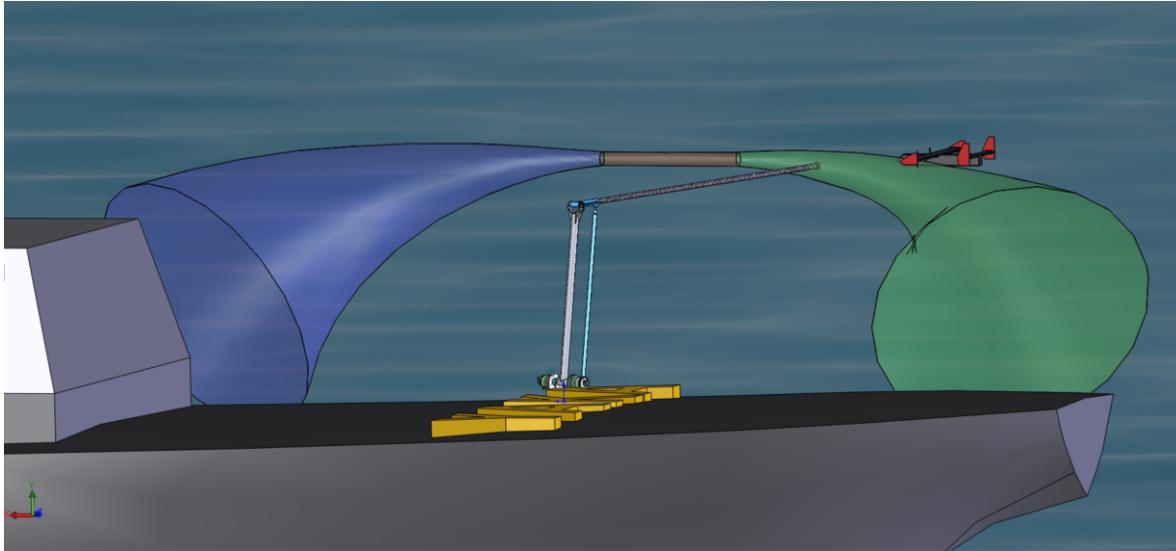


FIGURE 1.7 – Phases de récupération d'un UAV avec le robot YAKA : accélération (vert), capture (orange) et décélération (bleu).

Si l'application et le cahier des charges considérés pour ce projet sont très spécifiques, un système capable d'y répondre présente des caractéristiques hors norme qui peuvent être exploitées pour des applications très diverses (toute application nécessitant des manipulations à haute cadence de charges modérées sur un grand espace de travail).

La problématique de capture d'un UAV depuis un navire mobile fait aussi écho aux opérations de service en orbite, telles que la maintenance ou de désorbitation, comme illustré par la figure 1.8. En effet, elles ont en commun les problématiques liées à la dynamique relative (estimation, génération de trajectoire et dissipation d'énergie).

#### 1.2.4 Interactions entre la thèse et le projet

La thèse porte sur la modélisation, la conception et la commande du robot YAKA et de robots flexibles en général. Elle est en forte interaction avec le projet, mais les développements qu'elle présente se veulent génériques. La chronologie du projet YAKA et de la thèse est donnée sur la figure 1.9. Les contraintes de délais liées au projet impliquent que la réalisation du robot YAKA en termes de modélisation, de conception et de commande n'a pas pu bénéficier de la totalité des travaux présentés dans ce document. En revanche, le projet YAKA et la thèse ont fortement interagi, dans la mesure où certains développements ont été motivés par des besoins spécifiques du projet, alors que d'autres s'appuient sur l'expérience acquise pendant le projet (et sur le robot YAKA pour les travaux expérimentaux).

Les problématiques liées au pilotage de l'UAV, à sa localisation et à la prédiction de sa trajectoire ne sont donc pas décrites dans le présent document, bien qu'elles fassent partie du projet YAKA.



FIGURE 1.8 – Exemple de projet de capture d'un satellite en orbite, dont les problématiques présentent des similarités avec le projet YAKA. Source : ESA.

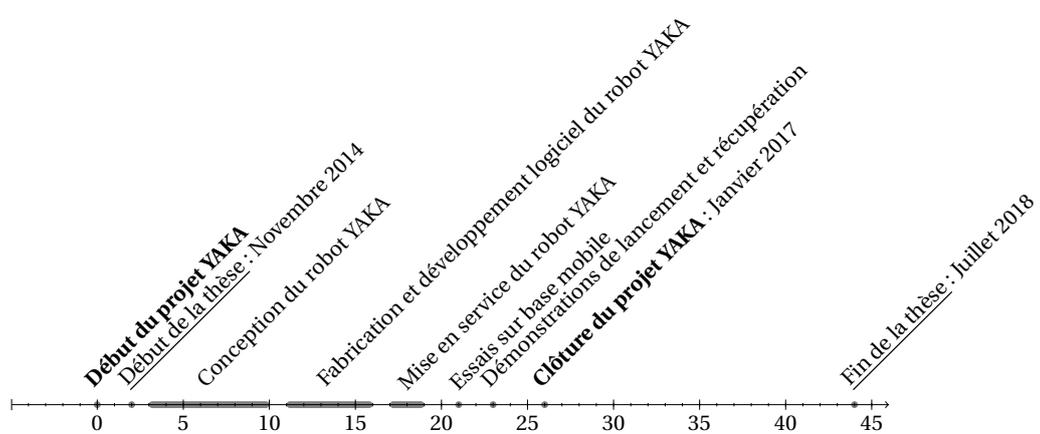


FIGURE 1.9 – Chronologie du projet YAKA et de la thèse (en mois).



# Chapitre 2

## État de l'art et réalisation

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Modélisation de robots manipulateurs flexibles</b>	<b>12</b>
2.1.1	Besoins de modélisation	12
2.1.2	Limites des modèles de robots rigides	14
2.1.3	Méthodes de modélisation des systèmes flexibles	14
2.1.4	Paramétrisation et obtention du modèle	17
<b>2.2</b>	<b>Identification et recalage expérimental de robots manipulateurs flexibles</b>	<b>18</b>
2.2.1	Identification géométrique et dynamique du modèle rigide	19
2.2.2	Analyse vibratoire expérimentale	20
<b>2.3</b>	<b>Réduction de modèle de robots manipulateurs flexibles</b>	<b>21</b>
2.3.1	Réduction de modèle des sous-systèmes	22
2.3.2	Troncature modale et interpolation	22
<b>2.4</b>	<b>Commande de robots manipulateurs flexibles</b>	<b>22</b>
2.4.1	Caractéristiques du problème considéré	23
2.4.2	Commande de robots manipulateurs rigides	24
2.4.3	Commande de robots manipulateurs flexibles	25
2.4.4	Approche proposée	27
<b>2.5</b>	<b>Conception de robots manipulateurs flexibles</b>	<b>28</b>
2.5.1	Conception de robots manipulateurs	29
2.5.2	Conception de robots flexibles	31
2.5.3	Robots flexibles existants	32
<b>2.6</b>	<b>Présentation du robot YAKA</b>	<b>34</b>
2.6.1	Configuration expérimentale de recherche et développement	34
2.6.2	Configuration pour les essais opérationnels	36
<b>2.7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>38</b>
<b>2.8</b>	<b>Références</b>	<b>39</b>

---

Ce chapitre dresse a pour objectif de lister les principaux travaux en concernant la modélisation, conception et la commande de robots manipulateurs flexibles, dans le cadre défini par le projet YAKA décrit dans le chapitre précédent.

Il s'intéresse donc en particulier à l'étude de systèmes dont les flexibilités se manifestent de manière dynamique et impliquent des déplacements importants devant la précision en suivi de trajectoire requise. Le contexte de l'étude impose de considérer les flexibilités des liaisons et des articulations, pour un système non plan, possédant au moins trois degrés de liberté.

La mise en œuvre dans un contexte industriel incite à choisir des méthodes offrant le meilleur compromis efficacité/complexité. En ce sens, à efficacité comparable, les approches ne nécessitant pas de ressources particulières sont préférées à celles qui requièrent des temps de développement longs, des capacités de calcul importantes ou l'emploi de nombreux capteurs et actionneurs.

Les principales problématiques liées au développement d'un système peuvent être séparées en trois disciplines. L'état de l'art portant sur la modélisation, la conception et la commande de robots manipulateurs flexibles est donc abordé séparément dans les parties 2.1, 2.5 et 2.4. La réduction de modèle et le recalage expérimental sont des disciplines connexes à la modélisation, elles sont traitées dans les parties 2.3 et 2.2.

## 2.1 Modélisation de robots manipulateurs flexibles

Un modèle est une représentation permettant de décrire le comportement d'un système, il rend compte de la relation physique entre ses différentes variables d'état. Il fait le lien entre le monde réel dans lequel évolue un système et l'univers mathématique qui permet de l'étudier. Dans une première partie, nous décrivons les différents besoins de modélisation (partie 2.1.1). Nous exposons ensuite les méthodes de modélisation spécifiques aux systèmes flexibles (partie 2.1.3) pour enfin décrire les méthodes de paramétrisation et d'obtention du modèle (partie 2.1.4).

### 2.1.1 Besoins de modélisation

Un modèle de comportement est requis à différentes étapes de la vie d'un système, de son étude théorique à son utilisation pratique. Ces différents usages sont décrits ci-dessous, afin d'identifier les besoins de modélisation :

- La *simulation* prédit l'évolution temporelle du comportement d'un système effectuant une tâche donnée. Elle permet d'apporter des informations cruciales pour la conception, pour déterminer des trajectoires à réaliser, ou encore mettre au point des lois de commande.

Effectuer une simulation temporelle implique un grand nombre de résolutions du modèle à chaque pas de temps, ce qui doit être compatible avec les capacités de calcul disponibles et les méthodes numériques utilisées. Elle impose donc des contraintes fortes sur la dimension, la complexité et le conditionnement numérique du modèle.

- La *commande* d'un système peut utiliser la connaissance du comportement du système pour en déduire des consignes pertinentes, permettant d'effectuer un mouvement désiré. Dans ce cas, elle nécessite de calculer une nouvelle consigne en temps réel à une fréquence importante, le modèle utilisé doit donc être compatible avec les capacités de calcul disponibles.

Quelle que soit la stratégie de commande utilisée (basée modèle ou non), le prototypage et le réglage de lois de commande nécessitent une validation en simulation, avant implémentation sur le système réel.

- *L'analyse* d'un système flexible vise à évaluer ses performances (cinématiques, géométriques et dynamiques) et son comportement vibratoire (modes de vibration). Ces informations peuvent guider des choix techniques durant la conception d'un système, ou aider à comprendre le comportement d'un système existant (rétro-ingénierie).

Afin de permettre une analyse fine du système, y compris au niveau du comportement de chacun de ses composants mécaniques, il est nécessaire que le modèle soit doté de sens physique, représentatif de son comportement à la fois global (trajectoire en bout de bras) et local (comportement de chaque composant, dynamiques internes, etc.).

- *L'identification* permet de déterminer les valeurs numériques des paramètres d'un modèle analytique, de façon à maximiser sa représentativité. Cette étape est nécessaire pour l'analyse d'un système existant.

De même que l'analyse, l'identification d'un système nécessite un modèle fin, représentatif du système et de ses composants. Elle requiert aussi que le modèle expose des variables d'état représentant des grandeurs physiques mesurables (sens physique du modèle), pour permettre l'exploitation de données expérimentales.

Deux besoins distincts apparaissent à la vue de ces différentes applications. Les contraintes de calcul pour la simulation et la commande font apparaître le besoin d'un modèle simplifié, adapté à une résolution numérique. En revanche, un modèle très fidèle (quitte à être complexe) semble adapté aux applications nécessitant un niveau de détail élevé, mais ne nécessitant pas une résolution numérique rapide (*identification* et *analyse*). Dans le cas des manipulateurs rigides ou à articulations flexibles, un seul et même modèle peut être suffisamment léger et fidèle pour répondre à tous les besoins **KHALIL et DOMBRE [2004]**.

En présence de flexibilités de segments, la complexité du comportement rend indispensable d'obtenir des modèles différents pour chaque besoin. En effet, le grand nombre de variables d'état et les problématiques de conditionnement numérique (voir chapitre 3) ont pour conséquence qu'il n'est pas envisageable d'utiliser le même modèle pour répondre tous les besoins. Un modèle de robot à segments flexibles très fidèle est par nature incompatible avec les besoins de simulation et de commande. La complexité numérique et la fidélité du modèle sont deux considérations intimement liées, un compromis entre fidélité et simplicité du modèle est donc inévitable.

Les parties suivantes proposent différentes approches de modélisation qui permettent d'obtenir différents modèles, plus ou moins fidèles et complexes, dont la capacité à répondre aux différents besoins est discutée. Une approche possible (retenue dans le chapitre 3) consiste à obtenir dans un premier temps un modèle très fidèle, qui est ensuite simplifié à l'aide de méthodes de réduction telles que celles présentées dans la partie 2.3.

Il apparaît, en pratique, que pour un système flexible complexe, il est difficilement envisageable d'obtenir un modèle à la fois compatible avec une implémentation en temps réel et représentatif pour permettre la mise en place d'une commande basée modèle, prenant en compte finement le comportement flexible du système (voir partie 2.4).

## 2.1.2 Limites des modèles de robots rigides

La modélisation géométrique, cinématique et dynamique de robots rigides a été largement traitée au cours des dernières décennies. De nombreux travaux de référence tels que [KHALIL et DOMBRE \[2004\]](#); [SICILIANO et KHATIB \[2016\]](#); [SICILIANO et collab. \[2010\]](#) les décrivent. Des outils informatiques tels que [KHALIL et collab. \[2014\]](#) permettent d'obtenir ces modèles de manière systématique et standardisée. Par exemple, le modèle dynamique d'un robot manipulateur rigide est le plus souvent présenté sous la forme :

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}_c(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{F}_g(\mathbf{q}) = \mathbf{I} \quad (2.1)$$

avec :

- $\mathbf{M}$  la matrice de masse du système (dépend de  $\mathbf{q}$ ).
- $\mathbf{I}$  le vecteur de l'action mécanique des actionneurs.
- $\mathbf{F}_c$  le vecteur des actions centrifuges et Coriolis (dépend de  $\mathbf{q}$  et  $\dot{\mathbf{q}}$ ).
- $\mathbf{F}_g$  les actions gravitaires (dépend de  $\mathbf{q}$ ).

Tout système mécanique est par nature flexible, du fait de l'élasticité de la matière qui compose ses éléments. De ce fait, l'hypothèse de rigidité reste dans tous les cas une approximation. En pratique, négliger les flexibilités d'un système revient à considérer que :

- Sa déformation sous un chargement statique maximal (selon l'application) est négligeable.
- Ses vibrations, causées par ses propres mouvements ou par des sollicitations extérieures, donnent lieu à des effets négligeables (accélérations, déplacements, bruit, fatigue des matériaux)

Les robots industriels classiques sont très massifs et très rigides, leur flexibilité est donc négligée dans leurs conditions normales d'utilisation. Il est en revanche évident que certaines structures de grandes dimensions comme le robot YAKA ont une flexibilité importante qui ne peut être négligée. De même, la flexibilité des robots industriels classiques devient non négligeable sous l'effet de chargements mécaniques extrêmes (manipulation de charges lourdes) ou de sollicitations vibratoires extérieures (applications d'usinage robotisé, par exemple).

Pour déterminer si le comportement flexible doit être considéré, une règle empirique consiste à comparer la fréquence propre des modes de vibration à la bande passante du système [DE LUCA et BOOK \[2016\]](#). Le comportement vibratoire au-delà de trois fois la bande passante attendue du système peut alors être négligé. Physiquement, cette règle permet de s'assurer que les mouvements du robot ne vont pas solliciter les modes de vibration du système.

À défaut d'une étude spécifique au cas par cas, cette règle permet de déterminer rapidement à partir de quelle limite fréquentielle la flexibilité d'un système peut être négligée. Le plus souvent, elle sert à concevoir les robots manipulateurs de manière à ce qu'ils puissent être considérés rigides. Pour les robots flexibles, ce critère permet de déterminer la plage de fréquence sur laquelle le comportement flexible du système doit être considéré, en particulier pour sa modélisation.

## 2.1.3 Méthodes de modélisation des systèmes flexibles

### 2.1.3.1 Modèles de liaisons flexibles

L'approche la plus basique pour modéliser la flexibilité d'un robot est de considérer que les segments sont rigides et que l'intégralité de la flexibilité est localisée dans les liai-

sons **DE LUCA et BOOK** [2016]. Elle est particulièrement adaptée aux robots manipulateurs comme le DLR LWR-III ou le KUKA IIWA dont la flexibilité articulaire prédomine devant celle des segments. Les actionneurs à câble, transmissions par courroies ou réducteurs de type Harmonic Drive<sup>®</sup> sont des exemples d'éléments souples qui jouent souvent un rôle dominant dans la flexibilité globale d'un système.

De manière plus générale, si les segments ont une raideur importante devant celle des liaisons, on peut calculer des raideurs articulaires équivalentes qui donnent un modèle simple, mais malgré tout représentatif de la dynamique réelle du robot.

Cette approche a l'avantage de n'introduire qu'un seul degré de liberté supplémentaire par articulation, ce qui limite la dimension du modèle obtenu (nombre de variables et dimension des matrices) et permet en général de répondre à tous les besoins, y compris de simulation et de commande.

Ce modèle s'avère en revanche trop limité pour pouvoir représenter le comportement complexe d'un robot à segments très souples comme le robot YAKA. Le modèle d'articulations souples est généralement conservé pour représenter le comportement des liaisons, mais il doit être associé à un modèle de comportement des segments flexibles.

### 2.1.3.2 Modèle de liaisons et segments flexibles "lumped model"

Pour pallier les limitations de l'approche précédente, il est possible de représenter la flexibilité distribuée le long des segments par un assemblage de plusieurs segments rigides reliés par des raideurs localisées **KHALIL et GAUTIER** [2000]; **KIM et UCHIYAMA** [2003]; **ZHU et collab.** [1999].

Cette approche introduit des degrés de liberté supplémentaires qui permettent d'aller plus loin que le modèle considérant uniquement des articulations flexibles 2.1.3.1. Elle reste cependant une approximation grossière de la flexibilité réelle distribuée des segments et nécessite pour autant d'introduire de nombreuses variables d'état supplémentaires.

### 2.1.3.3 Méthode des modes supposés

La méthode des modes supposés consiste en l'approximation du comportement de chaque segment par le comportement supposé de ses premiers modes de vibration **BOOK** [1984]; **CHEN** [2001]; **DE LUCA et SICILIANO** [1991]; **HASTINGS et BOOK** [1986]; **LI et SANKAR** [1993]. Cette approche permet de représenter le comportement flexible des segments de manière plus fidèle que les méthodes précédentes, tout en introduisant un nombre limité de variables d'état supplémentaires. Cette approche est donc intéressante pour obtenir un modèle relativement simple, notamment adapté à l'utilisation pour la simulation.

En revanche, **THEODORE et GHOSAL** [1995] met en évidence les limites de cette méthode et préconise de limiter son utilisation à des systèmes avec un seul segment flexible de section uniforme. Cette même étude montre qu'une modélisation par éléments finis (voir partie suivante) est plus efficace pour des systèmes avec plusieurs segments flexibles.

Une autre limitation qui exclut cette méthode dans le cas du robot YAKA est que le comportement supposé des segments considère des conditions aux limites encastrees-libres. Cette approximation est particulièrement limitante en présence d'une chaîne cinématique fermée.

#### 2.1.3.4 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis peut se substituer avantageusement à celle des modes supposés pour des robots manipulateurs avec plusieurs segments flexibles **THEODORE et GHOSAL [1995]**, malgré le fait qu'elle engendre un modèle complexe, peu adapté en l'état aux besoins de simulation et de commande.

Comme présenté par **BAYO [1987]**; **GASPARETTO [2004]**; **PIRAS et collab. [2005]**; **ROGNANT et collab. [2010]**; **SUNADA et DUBOWSKY [1983]**, il s'agit de subdiviser chaque segment en plusieurs éléments flexibles. Chaque élément de segment est représenté par un modèle de poutre flexible, comme le modèle de Euler Bernoulli ou de Timoshenko.

Le modèle de poutres d'Euler Bernoulli fait l'hypothèse que les sections de poutres restent perpendiculaires à la ligne de déformation, alors que les poutres de Timoshenko permettent une rotation des sections, qui permet une modélisation plus fine. On préfère le modèle d'Euler Bernoulli, moins complexe, lorsque les hypothèses qu'il prend sont respectées, c'est-à-dire pour des poutres élancées, soumises à des déformations modérées. Les structures constituées de poutres peu élancées et/ou très flexibles ne respectent pas cette hypothèse d'Euler Bernoulli et nécessitent donc l'emploi du modèle de Timoshenko.

La méthode des éléments finis est particulièrement adaptée à la modélisation de robots à plusieurs segments flexibles **THEODORE et GHOSAL [1995]**, et elle s'avère efficace en pratique, y compris pour des systèmes contenant des chaînes cinématiques fermées **ROGNANT et collab. [2010]**.

#### 2.1.3.5 Modèles de composants

La principale complexité liée à la modélisation des robots flexibles réside dans le modèle de la structure mécanique, traitée par les parties précédentes. Cependant, il est primordial de prendre en compte tous les composants qui jouent un rôle important dans le comportement global du système, notamment les actionneurs et le système de commande.

En effet, le comportement des moteurs, des transmissions mécaniques et du contrôleur ne peut pas être négligé. Ces éléments induisent divers effets comme des dissipations d'énergie, des flexibilités localisées, du retard, des hystérésis, etc. **SICILIANO et collab. [2010]** propose différents modèles d'actionneurs, capteurs et éléments d'électronique de puissance qui peuvent être associés à un modèle dynamique de la structure mécanique.

Pour des études plus spécifiques, les modèles génériques peuvent être remplacés par des modèles spécifiques, adaptés à chaque de technologie d'actionneur **PREISSNER et collab. [2012]**; **THUBE et BOBAK [2012]**.

#### 2.1.3.6 Logiciels de simulation multi-physique

Certains logiciels commerciaux tels que *MATLAB*, *LMS Imagine.Lab Amesim* ou *MSC ADAMS* proposent des environnements de simulation multi-physique construits à l'aide de bibliothèques de composants. Ils présentent l'avantage de permettre la modélisation de systèmes complexes sans la connaissance fine des méthodes de modélisation et de résolution numérique sous-jacentes.

Ces outils peuvent alors être intéressants dans certains contextes, ils permettent par exemple d'obtenir rapidement des résultats de pré dimensionnement lors du développement du robot YAKA. Ces logiciels sont cependant assez peu flexibles, puisque leur bibliothèque de composants restreint les possibilités de modélisation. Ils offrent parfois des possibilités d'interfaces avec des environnements de développement plus flexibles (des programmes

en C par exemple), mais le développement de ce type de solutions devient lourd, et difficile à maîtriser dans son ensemble.

Ces outils se focalisent essentiellement sur la simulation, ils ne fournissent donc pas de modèle analytique exploitable comme les méthodes précédentes [KHALIL et CREUSOT \[1997\]](#); [KHALIL et collab. \[2014\]](#) et [ROGNANT et collab. \[2010\]](#). Cette dernière limitation est la plus critique pour notre étude, puisqu'elle ne répond pas aux besoins d'analyse ni de commande cités précédemment.

#### 2.1.4 Paramétrisation et obtention du modèle

Les modèles basés sur des raideurs localisées comme le modèle à liaisons flexibles [2.1.3.1](#) ou l'approche "lumped model" font simplement apparaître des variables articulaires supplémentaires et se paramètrent alors de manière similaire aux robots rigides. Des matrices de transformation permettent de déterminer la position relative des différents éléments rigides, en fonction des variables associées aux articulations et aux jonctions flexibles.

En revanche, pour la méthode des modes supposés ou des éléments finis, la représentation de l'état flexible du système ne peut être dérivée de ces outils de modélisation classiques. Un modèle équivalent rigide [ERLS CHANG et HAMILTON \[1991\]](#) est une des méthodes utilisées pour représenter l'état du système flexible relativement à un système rigide équivalent. La dynamique rigide du système définit alors la configuration mécanique non déformée sur laquelle se superpose le déplacement élastique pour obtenir l'état déformé. La figure [2.1](#) illustre comment l'état flexible d'un robot est obtenu à partir du modèle équivalent rigide et des déplacements élastiques.

Le modèle équivalent rigide [ERLS](#) est préconisé car il présente de nombreux avantages, puisqu'il permet de prendre en compte finement les couplages entre la dynamique rigide et la dynamique flexible, tout en proposant une formulation qui permet de séparer ces deux dynamiques et de simplifier l'obtention du modèle [VIDONI et collab. \[2014\]](#). En revanche, cette approche prend pour hypothèse que les déplacements élastiques sont faibles, elle ne permet donc pas de traiter les systèmes soumis à de grandes déformations élastiques. L'approche [ANCF](#) permet de pallier cette limitation et de traiter des systèmes soumis à des déformations importantes, mais elle implique une formulation plus complexe du modèle [SHABANA et YAKOUB \[2001\]](#).

Le modèle dynamique est généralement obtenu en utilisant le formalisme de Lagrange, comme présenté par [ROGNANT et collab. \[2010\]](#) qui propose une approche systématique permettant l'obtention d'un modèle à partir d'une table de paramètres mécaniques, de manière analogue aux méthodes implémentées par le logiciel SYMORO [KHALIL et CREUSOT \[1997\]](#); [KHALIL et collab. \[2014\]](#) pour les robots rigides. Cette approche complète donc les travaux portant sur la modélisation de robots rigides [KHALIL et DOMBRE \[2004\]](#) en y ajoutant les paramètres de flexibilité, le calcul du modèle dynamique flexible ainsi que les couplages entre la dynamique rigide et la dynamique flexible.

L'approche proposée par [ROGNANT et collab. \[2010\]](#) est retenue pour la modélisation du robot YAKA et est présentée plus en détail dans le chapitre [3](#). Elle est adaptée aux systèmes étudiés dans la thèse (bras manipulateurs flexibles à multiples segments flexibles soumis à des déformations modérées) et propose une méthode systématique qui permet d'obtenir rapidement un modèle de robot.

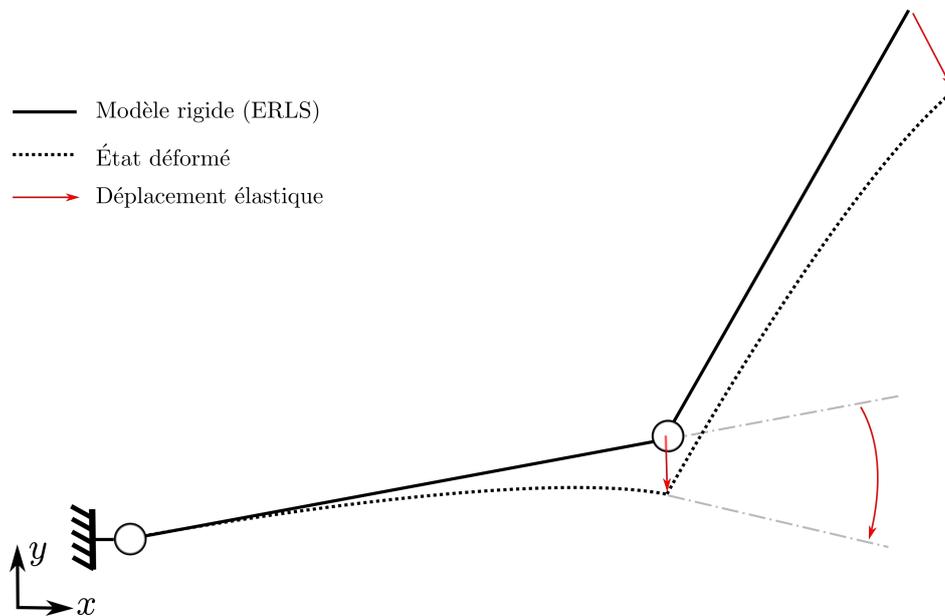


FIGURE 2.1 – Présentation du modèle rigide équivalent ERLS : l'état d'un robot flexible est décomposé en une configuration rigide équivalente (en traits pleins) et les déplacements élastiques (translation et rotation) pour décrire son état déformé complet (en pointillés).

## 2.2 Identification et recalage expérimental de robots manipulateurs flexibles

L'identification d'un modèle a pour but de déterminer les valeurs de paramètres non mesurés à partir de mesures d'autres grandeurs physiques. Un robot est doté de capteurs nécessaires à son fonctionnement (capteurs de position et couple articulaire, par exemple), et peut être instrumenté avec des capteurs supplémentaires pour les besoins de l'identification. Un jeu de données expérimentales est obtenu lors d'une campagne d'essais sur le système à identifier, il est alors confronté à un modèle dont les paramètres doivent être recalés [KEESMAN \[2011\]](#).

Diverses méthodes mathématiques permettent d'identifier un système, elles cherchent à minimiser l'écart (au sens des moindres carrés par exemple) entre les mesures et les prédictions faites par le modèle et les paramètres en cours de recalage.

Pour mener à bien cette tâche, il est nécessaire de considérer les problématiques suivantes :

- L'expérimentation réalisée doit maximiser l'implication des grandeurs à identifier et leur observabilité. Dans le cas de l'identification d'un robot, il est par exemple nécessaire de déterminer des trajectoires ou états articulaires spécifiques pour lesquelles il est le plus pertinent d'effectuer des mesures [KHALIL et DOMBRE \[2004\]](#). Pour les méthodes impliquant l'ajout de capteurs, le choix de leur localisation joue un rôle important dans l'observabilité de l'état, et donc dans la qualité de l'identification.
- Le processus d'identification assure le plus souvent une minimisation de l'écart entre un modèle et des mesures. Cependant, si la structure du modèle n'est pas fidèle au système réel, l'identification fournit un jeu de paramètres optimal compte tenu du problème posé, mais ne donne pas pour autant de résultats satisfaisants.
- Pour les systèmes complexes tels que les robots flexibles, certains paramètres peuvent influencer le comportement global de manière conjointe, sans qu'il soit possible de

discerner la contribution de chacun (il est par exemple impossible de déterminer la raideur individuelle de deux ressorts assemblés en série en mesurant uniquement leur comportement une fois assemblés). Il est important d'être attentif à cette problématique lorsque l'objectif de l'identification n'est pas uniquement de représenter fidèlement le comportement global du système, mais aussi la contribution de chaque composant séparé.

L'identification peut s'appuyer sur des données temporelles, comme c'est le cas de l'identification des paramètres d'inertie évoquée dans la partie 2.2.1. Cette méthode est largement utilisée pour traiter les phénomènes intervenant à basse fréquence. Le modèle dynamique peut alors être recalé en considérant l'état du robot à chaque instant, ou alors son comportement sur une période temporelle donnée, comparé à un comportement prédit par simulation.

Afin d'observer des phénomènes vibratoires comme les modes propres d'un robot flexible, l'identification dans le domaine fréquentiel est une alternative intéressante, car elle permet de recaler les paramètres avec des capteurs et des sollicitations mécaniques différents. L'analyse modale expérimentale **SCHWARZ et RICHARDSON [1999]** décrite dans la partie 2.2.2 est très couramment utilisée en mécanique et permet d'identifier les modes de vibration d'un système à l'aide d'un dispositif expérimental relativement simple.

Pour mesurer directement des paramètres physiques d'un composant mécanique isolé, il est généralement nécessaire d'avoir recours à un banc d'essai spécifique, par exemple pour identifier la raideur en torsion ou les paramètres de frottement d'une transmission. Cette approche d'identification reste marginale en pratique, pour des raisons de coûts.

### 2.2.1 Identification géométrique et dynamique du modèle rigide

Le recalage géométrique concerne tous les paramètres liés au modèle géométrique rigide du robot, c'est-à-dire les valeurs numériques de chaque paramètre de la table de paramètres de Khalil et Kleinfinger **KHALIL et DOMBRE [2004]** (voir table 3.1). Il s'agit d'identifier la géométrie du système réel, c'est-à-dire les longueurs de ses segments et l'orientation relative de ses articulations. Ces grandeurs sont toutes spécifiées lors de la conception du système, mais leurs valeurs réelles sont sujettes à des erreurs liées à la fabrication des composants.

Dans un premier temps, les moyens de métrologie classiques permettent de mesurer les dimensions exactes de chaque composant pris séparément. Une fois le système monté, les incertitudes liées aux différents assemblages engendrent des déviations par rapport au modèle qui peuvent être critiques suivant l'application.

Pour les applications qui requièrent une importante précision de mouvements, il est nécessaire de recaler les paramètres géométriques du système assemblé. Pour se faire, la position de l'organe terminal et celle de chaque articulation doivent être mesurées pour confronter le modèle géométrique direct aux mesures expérimentales. Les travaux présentés par **KHALIL et DOMBRE [2004]** proposent une méthode pour identifier les paramètres géométriques d'un robot en déterminant un lot de configurations articulaires pertinentes qui permet de maximiser la qualité de l'identification avec un nombre de mesures réduit.

Cette méthode donne des résultats convaincants pour les robots rigides. En revanche, elle s'applique difficilement en pratique sur un robot respectivement flexible ou de grandes dimensions, car elle est perturbée par la déformation statique de la structure, ou implique de mesurer précisément une position cartésienne dans un grand espace de travail.

Une fois les paramètres géométriques identifiés, des inconnues demeurent concernant les propriétés inertielles du système. De manière analogue au recalage géométrique, une première étape de pesée de chaque composant pris séparément fournit un point de départ intéressant concernant les propriétés de masse du robot. Il n'est pas trivial de déterminer expérimentalement les inerties de chaque composant séparé sans dispositif expérimental spécifique. Cependant, le modèle numérique des composants utilisés donne une bonne estimation des masses et inerties, puisque les propriétés de masse des matériaux sont généralement connues précisément.

La réalisation de trajectoires avec le robot et la mesure des variables dynamiques du système (positions, vitesses, accélérations et couples articulaires) permettent d'identifier les paramètres du modèle dynamique rigide 2.1 GASPARETTO [2004]; WU et collab. [2008]. Cette approche ainsi que les stratégies de choix des trajectoires les plus adaptées sont présentées par KHALIL et DOMBRE [2004], en complément de la méthode de recalage géométrique.

Ces méthodes permettent l'identification d'un robot rigide, elles peuvent aussi être utiles à l'identification d'un système flexible, à condition que la dynamique flexible ne soit pas prédominante sur la dynamique rigide. Si la déflexion statique du système sous l'effet de la gravité est modérée, le choix de trajectoires peu dynamiques permet d'éviter les effets de la dynamique flexible pouvant perturber l'identification du système.

### 2.2.2 Analyse vibratoire expérimentale

Les méthodes présentées précédemment ne prennent pas en compte la flexibilité du système. L'identification du modèle dynamique flexible complet peut difficilement être conduite de manière similaire, sur la base de mesures expérimentales obtenues lors du suivi de trajectoires excitantes. En effet, cela supposerait de mesurer la dynamique de déformation du robot en différents points et à tout instant, ce qui nécessite des moyens expérimentaux considérables. Une analyse vibratoire du système à l'arrêt est alors préférable, le matériel et les méthodes expérimentales étant nettement plus accessibles, puisque cette approche est très répandue dans l'industrie (en particulier pour l'étude de structures fixes).

L'analyse vibratoire expérimentale consiste à mesurer les fonctions de transfert entre différents points du système. Un marteau d'impact équipé d'un capteur permet d'exciter le système en mesurant la densité spectrale d'énergie injectée. Des accéléromètres de précision positionnés en différents points du maillage permettent de mesurer les vibrations induites dans la structure afin d'en déduire les fonctions de transfert entre le point d'impact et les points de mesure. Cette analyse permet non seulement d'identifier la valeur des fréquences propres du système, mais aussi de déterminer la déformée et l'amortissement de chaque mode CESCONE et collab. [2009]; ROGNANT et collab. [2010]; WANG et collab. [2009]; WIENS et HARDAGE [2006]; ZHOU et collab. [2006].

Ces informations obtenues expérimentalement peuvent être confrontées aux fonctions de transfert calculées à partir du modèle théorique. On s'intéresse notamment à l'erreur sur la valeur des fréquences propres des modes qui sont dans la bande passante utile du modèle. L'indice de MAC (Modal Assurance Criterion) présenté dans l'équation (2.2) permet d'évaluer la corrélation entre les vecteurs propres mesurés et théoriques. Les notations  $\Phi_{theo}$  et  $\Phi_{mes}$  désignent respectivement les vecteurs propres théoriques et mesurés expérimentalement.

$$\text{MAC} = \frac{|\Phi_{theo}^T \Phi_{mes}|^2}{(\Phi_{theo}^T \Phi_{theo})(\Phi_{mes}^T \Phi_{mes})} \quad (2.2)$$

La figure 2.2 montre le dispositif expérimental utilisé pour l'analyse vibratoire du robot YAKA.

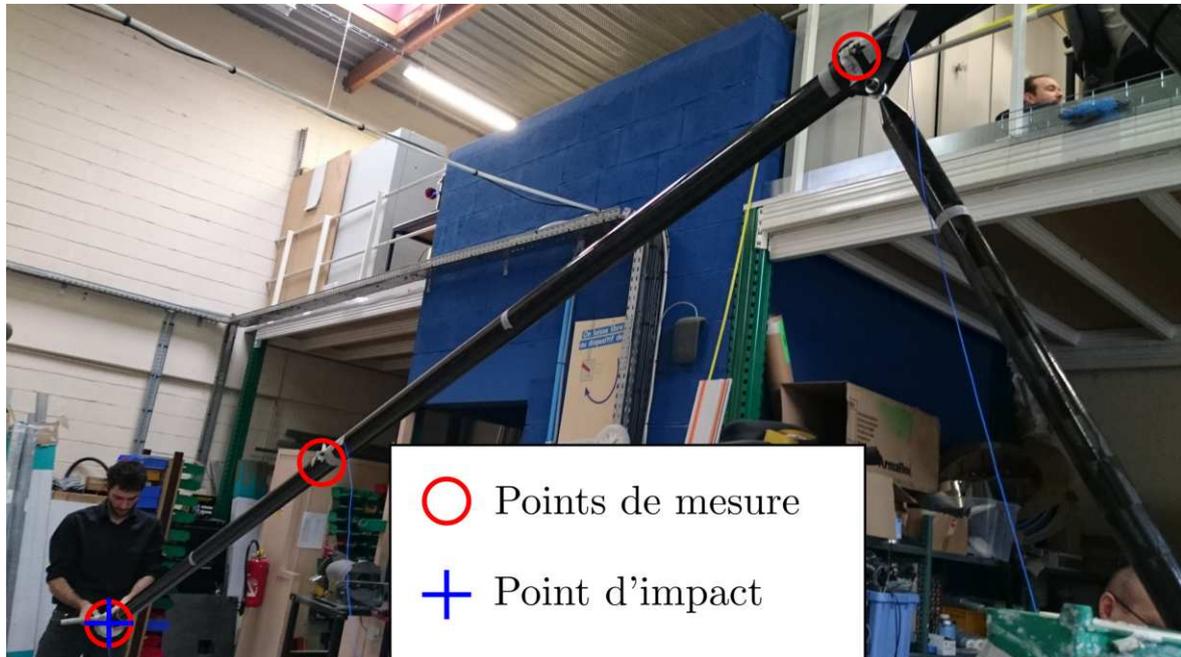


FIGURE 2.2 – Analyse vibratoire du robot YAKA assemblé : l'expérimentateur réalise un impact au bout du bras avec un marteau instrumenté, les vibrations résultantes sont mesurées par des accéléromètres répartis en différents points de la structure. Un système d'acquisition exploite les données du marteau d'impact et des accéléromètres pour déduire le comportement vibratoire du système (fonctions de transfert).

L'approche expérimentale est directement tirée des méthodes d'analyse vibratoire industrielles classiques. Cependant, le comportement vibratoire d'un robot dépend de sa configuration articulaire, il est donc nécessaire de faire plusieurs mesures dans des configurations variées pour maximiser l'efficacité du recalage. La partie 3.2 propose une méthodologie de recalage dédiée aux robots flexibles, sur la base des outils d'analyse vibratoire existants [SCHWARZ et RICHARDSON \[1999\]](#).

## 2.3 Réduction de modèle de robots manipulateurs flexibles

Le grand nombre de degrés de liberté d'un système flexible engendre des modèles de très grandes dimensions. Comme indiqué dans la partie 2.1.2, la bande de fréquence utile du modèle est généralement déterminée par la bande passante du système.

Le choix de la modélisation permet d'obtenir un modèle analytique plus ou moins complexe, en fonction de la taille du vecteur d'état considéré. Les différentes méthodes de modélisation présentées précédemment considèrent la représentation de chaque segment flexible par un certain nombre d'éléments (méthode par éléments finis ou *lumped model*) ou de modes propres (méthode des modes supposés). Ce choix a une influence majeure dans la dimension du modèle obtenu, et il est possible dans certains cas (mé-

thode des modes supposés ou *lumped model*, appliquées à des systèmes simples) d'obtenir un modèle analytique de taille modérée, en choisissant une représentation simplifiée.

Face à des systèmes complexes (multiples segments flexibles), la dimension du modèle ne peut pas toujours être réduite par le simple choix de la formulation analytique, en particulier pour la méthode des éléments finis qui introduit un nombre important de variables d'état. En effet, même si les différents éléments flexibles du système sont représentés par un nombre limité de modes propres, le modèle du robot complet représente couramment un grand nombre de modes de vibration, dont la plupart ont une fréquence propre au-delà de la bande de fréquence utile du modèle. C'est par exemple le cas du modèle du bras YAKA qui est de dimension 75 avant réduction, alors qu'une dizaine de modes propres (et donc un modèle de dimension 10) suffirait amplement à décrire son comportement dans son contexte d'utilisation.

Réduire la complexité d'un modèle tout en conservant sa représentativité sur un domaine donné est une problématique commune à de nombreux domaines scientifiques. Cette partie présente les travaux traitant de la réduction de modèles de systèmes mécaniques flexibles.

### 2.3.1 Réduction de modèle des sous-systèmes

Une première approche propose de réduire la complexité d'un modèle dynamique flexible est la méthode de Craig-Bampton, comme proposé par [WANG et MILLS \[2006\]](#). Elle emploie une matrice de passage qui permet d'ignorer un certain nombre de modes propres, pour obtenir un modèle de dimension réduite qui ne considère que certains modes de vibration.

Elle permet de réduire la complexité du modèle de comportement d'un sous-système flexible comme un segment isolé, dont les modes de vibration ne varient pas. Elle est donc très utilisée pour la réduction de modèle de structures mécaniques non articulées.

Une structure articulée comme un robot flexible a un comportement vibratoire qui varie en fonction de sa configuration articulaire, il n'est alors pas possible d'appliquer la méthode de Craig-Bampton.

### 2.3.2 Troncature modale et interpolation

Une approche plus globale que celle présentée dans la partie précédente consiste à analyser les modes propres du système complet et de ne conserver que les premiers modes propres du modèle. Cependant, une particularité des systèmes articulés par rapport aux structures mécaniques fixes est que les modes propres évoluent en fonction de la configuration des articulations.

Des méthodes d'interpolation de matrices réduites [AMSALLEM et collab. \[2009\]](#); [DE-GROOTE et collab. \[2010\]](#); [GEUSS et collab. \[2013\]](#); [PANZER et collab. \[2010\]](#) permettent alors d'obtenir un modèle réduit utilisable, quelle que soit la configuration articulaire. La réduction de modèle de systèmes flexibles dont les modes propres varient est un problème ouvert et les différentes méthodes font l'objet d'études comparatives [BENNER et collab. \[2013\]](#).

## 2.4 Commande de robots manipulateurs flexibles

La commande regroupe des méthodes visant à régir le comportement d'un système en transmettant des consignes à ses actionneurs.

Il existe de très nombreuses méthodes de commande de systèmes, adaptées à différents systèmes et cas d'application. Afin d'orienter le choix des méthodes étudiées, les caractéristiques du problème considéré sont présentées dans la partie 2.4.1.

Les systèmes de contrôle sont généralement décomposés en deux niveaux (voir figure 2.3) :

- Le contrôleur haut niveau assure le guidage du système, il a pour rôle de transmettre au contrôleur bas niveau des consignes qui correspondent aux tâches à réaliser. Il peut être plus ou moins complexe en fonction du degré d'autonomie du système. Il peut être très simple dans le cas d'un robot effectuant une tâche répétitive pré-enregistrée ou plus complexe si l'application est variable et nécessite une prise de décision autonome du robot (tâches non répétitives, travail dans un environnement changeant, etc.).
- Le contrôleur bas niveau d'un robot est en charge d'envoyer des consignes aux actionneurs pour effectuer un mouvement désiré. Il reçoit des consignes correspondant à l'état désiré du robot, ainsi que des mesures de l'état courant. Une loi de pilotage traite ces deux entrées pour calculer à chaque instant les commandes envoyées aux actionneurs.

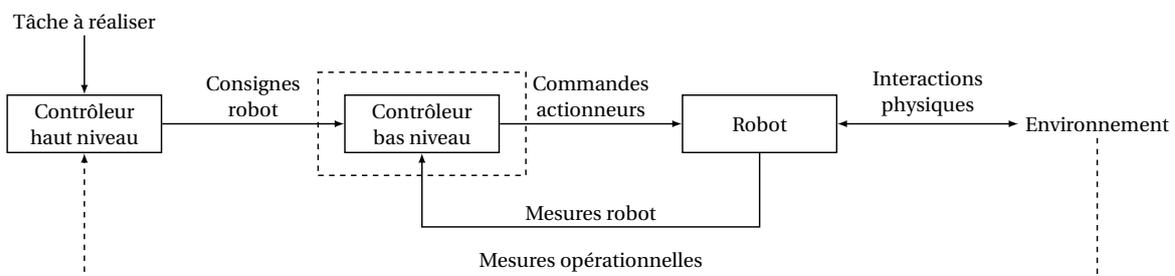


FIGURE 2.3 – Exemple de chaîne de commande typique d'un robot. Un contrôleur haut niveau définit les trajectoires opérationnelles permettant de réaliser les tâches désirées. Elles sont transmises à un contrôleur bas niveau chargé de produire des commandes actionneurs permettant de les suivre, compte tenu de l'état courant du système (mesures robot).

Cet état de l'art et le chapitre 4 traitent essentiellement de la problématique de contrôle bas niveau. La problématique de génération de trajectoire est évoquée dans le cadre de l'application YAKA, mais n'est pas l'objet des travaux présentés dans la thèse. On s'intéresse principalement à la commande dans l'espace articulaire, qui suppose uniquement une mesure des positions de chaque articulation active.

Du fait des nouvelles problématiques induites par la flexibilité, les travaux portant sur la commande de robots rigides ne sont pas suffisants pour piloter un robot flexible. Ils sont cependant utiles au développement d'approches spécifiques qui prennent en compte la flexibilité, la partie 2.4.2 présente donc les méthodes les plus courantes utilisées pour le contrôle de robots rigides.

Un état de l'art des méthodes spécifiques au contrôle de robots flexibles est proposé dans la partie 2.4.3. L'approche proposée dans la thèse est enfin présentée dans la partie 2.4.4.

### 2.4.1 Caractéristiques du problème considéré

Les travaux présentés dans la thèse ont pour objectif de répondre à une problématique définie (le lancement et la récupération d'un UAV à voilure fixe), dans l'environnement

industriel du projet YAKA. Ce contexte implique de nombreuses contraintes qui sont décrites ci-dessous. Elles sont pour la plupart communes à tous les projets industriels, les travaux présentés dans la thèse restent donc généralisables.

Dans le contexte d'un projet industriel comme le projet YAKA, des critères de faisabilité, de coût, de qualité et de délais induisent de nombreuses contraintes techniques :

- Les calculateurs industriels sont spécifiquement conçus pour être compatibles avec leur environnement d'utilisation (température, tension d'alimentation, encombrement, normes, etc.). Par conséquent, leurs capacités de calcul sont limitées (à coût égal) en comparaison avec celles d'un ordinateur classique. Le besoin en termes de ressources de calcul est donc un critère primordial qui exclut certaines approches trop gourmandes (faisabilité) et favorise l'emploi de méthodes légères, nécessitant des ressources limitées (coût).
- Pour satisfaire les exigences industrielles (coût, qualité, délais), on cherche généralement à concevoir des systèmes les plus simples possible, constitués de peu d'éléments. Les actionneurs et les capteurs sont les éléments les plus coûteux, on cherche donc à limiter leur emploi, au détriment de l'observabilité et de la commandabilité du système.

Chaque application induit des contraintes différentes, dépendant notamment des performances attendues du système. Par exemple, dans le cas du projet YAKA, la dimension de l'espace de travail et les capacités dynamiques (vitesses et accélérations maximales) requises sont particulièrement importantes et posent d'importants problèmes, notamment de sécurité. En revanche, les attentes en termes de qualité de suivi de trajectoire sont moins importantes que pour un robot industriel classique. Ces spécificités propres au cahier des charges de chaque application jouent un rôle important dans le choix d'une stratégie de commande.

Les flexibilités des segments et des articulations du robot YAKA sont importantes, il n'est donc pas possible de les négliger ou de se ramener à un problème de commande de robot à articulations flexibles seules. Le système possède trois degrés de liberté, trois segments flexibles, six articulations flexibles et une chaîne cinématique fermée. De plus, il est nécessaire de considérer plusieurs modes de vibration de la structure assemblée.

Par conséquent, il n'est pas possible de restreindre l'étude à un problème simplifié (considérant un seul mode de vibration, un seul segment flexible, un système plan, etc.), ce qui, dans la majorité des cas, ne permet pas de satisfaire toutes les hypothèses nécessaires à l'application des travaux existants (présentés ci-dessous).

## 2.4.2 Commande de robots manipulateurs rigides

Cette partie présente les principales méthodes utilisées pour la commande de robots manipulateurs rigides. Ces méthodes bénéficient de plusieurs décennies de développement, elles sont largement utilisées sur de nombreux systèmes industriels. Elles ne sont pas adaptées aux robots flexibles en l'état, mais leur maturité en fait une base solide pour le développement d'autres travaux. Ces méthodes sont décrites largement par **KHALIL et DOMBRE [2004]** et sont résumées ci-dessous.

Un simple correcteur PID permet de contrôler l'état articulaire  $\mathbf{q}$  d'un robot manipulateur rigide, à partir de mesures de la position de ses articulations. Les correcteurs PID offrent de très bonnes performances pour la commande de systèmes linéaires. Cependant, un robot manipulateur présente de nombreux effets non linéaires tels que la variation de l'inertie, de la composante de gravité et des forces inertielles qui dépendent

de l'état du robot. Les performances d'un bras manipulateur asservi par un simple correcteur PID sont donc limitées par le manque de prise en compte de ces phénomènes.

Si l'on suppose que les effets non linéaires sont connus, il est possible de les compenser sur la base du modèle dynamique du robot qui apporte une connaissance a priori de son comportement 2.1. L'inversion de modèle dynamique permet de calculer directement les couples  $\Gamma$  qui doivent être fournis par les actionneurs pour générer une accélération du robot, à l'aide de son modèle dynamique. Le système obtenu est linéarisé, une boucle fermée avec un correcteur PID classique permet alors de stabiliser le système en présence de perturbations extérieures et de compenser les erreurs de modélisation. Cette approche est efficace et éprouvée, ses performances dépendent cependant de la qualité du modèle dynamique sur lequel elle se base, dont l'obtention et le recalage sont traités dans le chapitre 3.

### 2.4.3 Commande de robots manipulateurs flexibles

La présence de flexibilités dans la structure d'un robot introduit de nombreuses problématiques liées à sa commande. Les déformations élastiques induisent des déplacements non désirés du bout du bras et des phénomènes de vibration apparaissent sous l'effet des sollicitations des actionneurs et des efforts extérieurs.

#### 2.4.3.1 Éloigner les problématiques liées aux flexibilités

Une première approche consiste à réduire les effets de la flexibilité afin de pouvoir la négliger et ainsi utiliser les lois de commande éprouvées pour les robots rigides. Dans un premier temps, il est possible de travailler à une dynamique très faible afin de ne pas solliciter les modes de vibration (voir 2.1.2), et de corriger uniquement la déflexion statique du système sous l'effet de la gravité. Cette approche est adaptée pour des systèmes de manipulation très lente elle ne correspond pas aux systèmes devant atteindre des dynamiques importantes comme le bras YAKA.

Les dégradations dues aux flexibilités étant d'autant moins critiques que les modes propres de la structure sont amortis, il est envisageable de modifier l'amortissement de la structure de manière passive lors de la conception BOOK et collab. [1986] (voir partie 2.5) ou alors de manière active, en ajoutant des actionneurs et des lois de commande associées PREUMONT [2011]. Cependant, ces approches sont efficaces pour des systèmes soumis à des vibrations de faible énergie, du fait de la faible quantité d'énergie impliquée dans l'amortissement structural (passif) ou l'action de systèmes actifs (actionneurs piézoélectriques notamment). Pour les systèmes considérés dans cette étude, la dynamique attendue implique des sollicitations importantes de la structure qui ne peuvent pas être compensées avec ce type d'approches.

#### 2.4.3.2 Robots à articulations flexibles

On distingue le cas particulier des robots à articulations flexibles et segments rigides, dont la flexibilité introduit un seul degré de liberté supplémentaire par liaison. Comme évoqué dans la partie 2.1, ces systèmes peuvent être modélisés de manière similaire aux robots rigides, ce qui simplifie leur étude. Leur commande est aussi simplifiée par le fait que leur état peut être facilement observé, en comparaison avec des robots à segments flexibles. En effet, il est possible de synthétiser une loi de commande par inversion de modèle flexible, de manière similaire aux méthodes éprouvées pour les robots rigides KHALIL et DOMBRE [2004]. Un aperçu des différentes méthodes de commande de ces systèmes

est proposé par DE LUCA et BOOK [2016]; OZGOLI et TAGHIRAD [2006]; DE WIT et collab. [1996].

### 2.4.3.3 Robots à segments flexibles

En présence de segments flexibles, de nouveaux problèmes de commande apparaissent DE LUCA et BOOK [2016] :

- Les flexibilités distribuées introduisent des nouveaux degrés de liberté qui ne sont pas co-localisés avec les actionneurs, le robot possède donc davantage de degrés de liberté que d'actionneurs, dont certains ne sont pas directement contrôlés.
- L'observation de l'état du robot est complexe, puisque des capteurs situés dans les articulations ne suffisent pas à l'observation des déplacements élastiques dans les segments. Des jauges de contraintes permettent de mesurer localement la déformation d'un segment, mais cette information ne suffit pas à estimer l'état complet du robot, qui dépend aussi d'autres grandeurs non mesurables (déformation de pièces de liaison, roulements, etc.). De la même façon, il est possible d'intégrer des capteurs piézoélectriques, des accéléromètres ou tout autre capteur proprioceptif et extéroceptif. Il est en général nécessaire de mettre en place plusieurs capteurs de types différents ainsi qu'un estimateur adapté pour obtenir une estimation de l'état flexible satisfaisante BASCETTA et ROCCO [2006a], ce qui constitue une complexité et un coût considérables.
- Si l'on observe une partie du système flexible, des dynamiques internes non observées peuvent être présentes et engendrer des instabilités. Par exemple, un robot flexible dont on mesure la position cartésienne ou l'accélération du bout du bras peut comporter des modes de vibration internes qui n'affectent pas les grandeurs mesurées, mais peuvent être destructifs pour la structure.

Ces différentes problématiques font de la commande de systèmes flexibles une discipline particulièrement complexe, notamment du fait de la complexité de leur comportement non linéaire. Ceci explique que malgré l'intérêt opérationnel qu'ils suscitent, les robots manipulateurs flexibles sont très peu présents dans un contexte industriel. Un large état de l'art des méthodes commande de robots flexibles est proposé par KIANG et collab. [2015] et BENOSMAN et LE VEY [2004], qui comparent de très nombreuses méthodes. Ces deux études font un constat similaire à une décennie d'intervalle : de nombreuses approches sont performantes et donnent des résultats satisfaisants sur des systèmes simples, mais elles ne permettent pas de traiter le cas général, car elles se limitent à des systèmes plans, rarement constitués de plus de deux segments flexibles et ne présentant pas à la fois de flexibilité de segments et d'articulations.

Ce constat s'explique notamment par le fait que beaucoup de méthodes sont basées sur un modèle dynamique flexible, et que la plupart des méthodes de modélisation présentées dans la partie 2.1 imposent des hypothèses restrictives qui limitent par conséquent la portée des approches de commande qui les exploitent.

**2.4.3.3.1 Approches par retour d'état flexible** Les approches les plus prometteuses en termes de performances supposent la mesure de l'état flexible du robot, ce qui en pratique n'est pas trivial pour un système complexe, qu'il s'agisse de mesures de déformation locale FELIU et RAMOS [2005]; MOHAMED et collab. [2005], d'accélération en bout de bras QIU et collab. [2009] ou de position, par le biais de caméras BASCETTA et ROCCO [2006b]; DUBUS et collab. [2010]; JIANG et collab. [2008] et d'autres dispositifs de suivi optique

MAHMOOD et collab. [2008]; WANG et LI [2004]. Ces exemples sont généralement appliqués à des cas simplifiés (1 ou 2 degrés de liberté, systèmes plans, avec un seul segment flexible, etc.), mais en pratique, l'intégration de capteurs et l'estimation de l'état flexible d'un robot flexible comme le robot YAKA sont coûteuses et complexes, en particulier dans un contexte industriel en environnement difficile (environnement marin, de jour comme de nuit, par toutes conditions météorologiques, etc.).

**2.4.3.3.2 Approches en boucle ouverte sur l'état flexible** Pour éviter les problématiques liées à la commande en boucle fermée des flexibilités d'un robot (difficultés à observer l'état de déformation, problématiques de stabilité et de capacités de calcul), d'autres approches proposent d'utiliser un contrôleur articulaire bas niveau classique (ne prenant pas en compte les flexibilités, voir partie 2.4.2), pour intervenir au niveau des trajectoires de consigne qui lui sont transmises.

En effet, la connaissance du comportement flexible d'un système peut permettre de générer des trajectoires articulaires qui ne génèrent pas de vibrations non désirées de sa structure.

Si une tâche à réaliser est définie et connue, il est possible de calculer une trajectoire adaptée (hors ligne, sans problématiques de temps de calcul), qui lorsqu'elle est envoyée au système, permet de réaliser le mouvement désiré tout en évitant de solliciter les modes de vibration de la structure ABE [2009]; PARK [2004].

En revanche, si la trajectoire à suivre n'est pas connue a priori, il est possible de la modifier légèrement au cours du mouvement afin d'annuler les vibrations résiduelles induites par le mouvement, à l'aide de méthodes d'Input Shaping SINGH et SINGHOSE [2002]. Cette approche (détaillée dans le chapitre 4) s'assure que chaque sollicitation infligée au système est compensée par une perturbation similaire, dont le déphasage permet d'annuler les vibrations résiduelles de la structure flexible. Elle présente l'avantage de se reposer uniquement sur une connaissance a priori des modes propres du système et des ressources de calcul très réduites. Elle fait cependant apparaître un retard en suivi de trajectoire, dont la valeur dépend des fréquences propres du système et d'un compromis entre temps de réponse et robustesse aux erreurs de modélisation SINGHOSE et collab. [1996].

Ces approches en boucle ouverte (commande en boucle fermée des articulations uniquement, sans mesure des déformations du système) sont intéressantes, car elles permettent de limiter les vibrations dues aux mouvements propres du robot, sans nécessiter de capteurs ou d'actionneurs spécifiques. Cependant, elles ne permettent pas d'amortir les vibrations dues aux perturbations extérieures (mouvements du véhicule porteur, vent, contacts, etc.). Cette limitation est acceptable dans le contexte de notre étude, compte tenu de l'ordre de grandeur des perturbations extérieures qui est très faible devant les sollicitations dues à la dynamique propre du système (période de mouvements de pont proche de 10s, traînée aérodynamique des segments négligeable).

## 2.4.4 Approche proposée

Parmi les différentes méthodes présentées ci-dessus, le principe de l'Input Shaping semble être particulièrement adapté au contexte de notre étude. En effet, il permet de minimiser les vibrations induites par le mouvement du robot en boucle ouverte, ce qui écarte de nombreux problèmes de stabilité et d'observabilité.

L'Input Shaping modifie les trajectoires de consigne ( $\mathbf{q}^d, \dot{\mathbf{q}}^d, \ddot{\mathbf{q}}^d$ ) et transmet au contrôleur des trajectoires filtrées ( $\tilde{\mathbf{q}}^d, \tilde{\dot{\mathbf{q}}}^d, \tilde{\ddot{\mathbf{q}}}^d$ ), pour qu'il assure l'asservissement en position, vi-

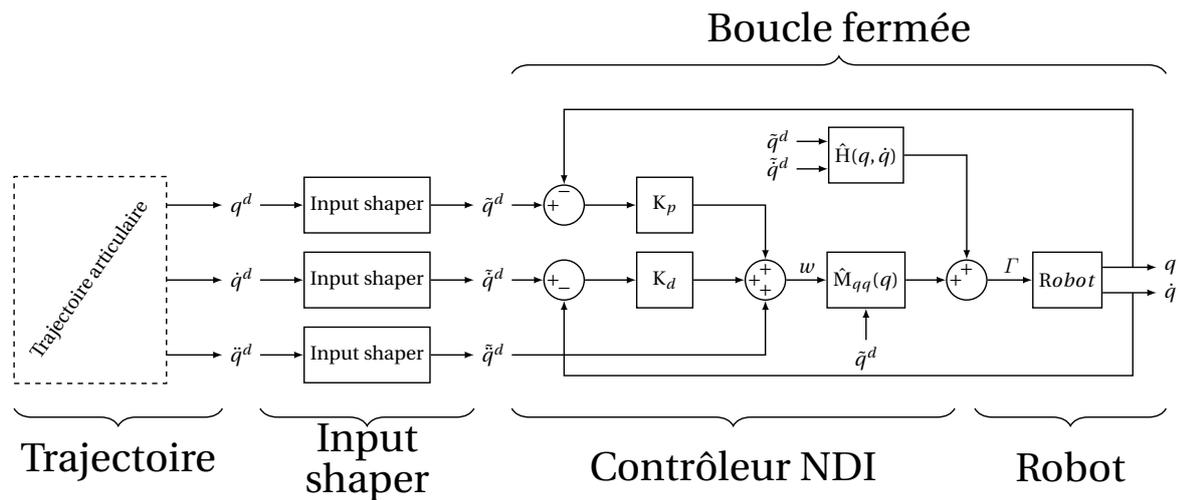


FIGURE 2.4 – Architecture de commande proposée : Linéarisation de la dynamique rigide avec un contrôleur par inversion de modèle NDI (asservissement en boucle fermée au niveau articulaire). L'Input Shaper développé prend en charge la maîtrise des vibrations de la structure flexible. Les matrices  $\hat{\mathbf{M}}(\mathbf{q})$  et  $\hat{\mathbf{H}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  sont les estimations respectives de  $\mathbf{M}(\mathbf{q})$  et  $\mathbf{F}\mathbf{c}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{F}\mathbf{g}(\mathbf{q})$ , dans l'équation (2.1).

tesse et accélération articulaire. Cependant, cette méthode est initialement développée pour des systèmes présentant un seul mode de vibration dont les propriétés n'évoluent pas. Les bras manipulateurs flexibles comme le robot YAKA nécessitent de prendre en compte plusieurs modes de vibration dont les propriétés varient en fonction de la position dans l'espace de travail. Des adaptations du principe de l'Input Shaping sont donc nécessaires pour traiter ces spécificités, elles sont l'objet de nos contributions. Le principe de l'Input Shaping, son état de l'art et les contributions sont détaillés dans le chapitre 4.

Afin d'exploiter au mieux la connaissance du système dans la loi de commande bas niveau (traitant les consignes issues de l'Input Shaper), on propose de mettre en place une commande par inversion de modèle rigide [KHALIL et DOMBRE \[2004\]](#) pour effectuer cet asservissement.

La figure 2.4 présente l'architecture de commande proposée.

## 2.5 Conception de robots manipulateurs flexibles

La conception d'un système est l'étape qui précède sa réalisation réelle, durant laquelle l'architecture globale et chaque composant sont définis. Elle est dirigée par le cahier des charges fonctionnel qui contractualise les différentes attentes concernant le produit fini. De nombreux outils d'organisation et d'analyse fonctionnelle tels que ceux présentés par [FANCHON \[2008\]](#) permettent de structurer le problème en différentes étapes et sous problèmes techniques.

La figure 2.5 montre les principales étapes d'un projet, notamment les étapes intitulées "conceptualisation", "avant-projet" et "projet", qui sont celles durant lesquelles les travaux présentés dans la thèse prennent place.

Les méthodes d'analyse fonctionnelle et d'analyse de la valeur offrent une méthodologie qui structure la démarche de conception, elles sont classiquement utilisées pour tout type de système. Pour la plupart des produits, le problème peut être scindé en sous-problèmes ce qui permet d'aboutir rapidement à une solution technique satisfaisante, à

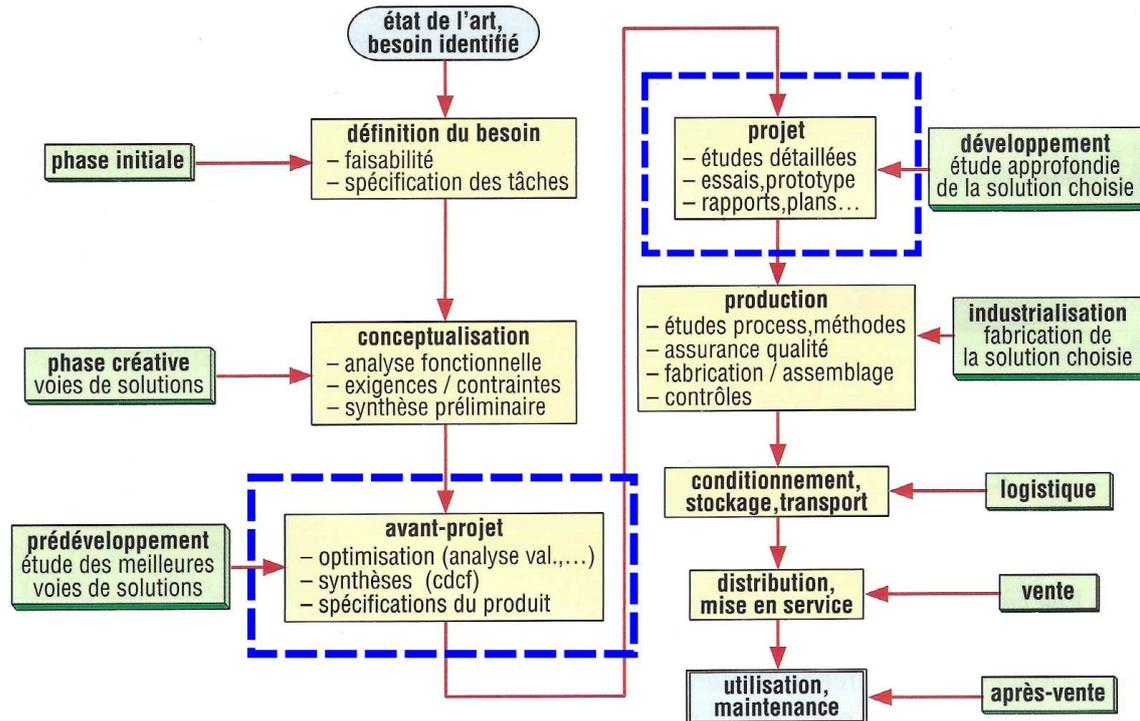


FIGURE 2.5 – Présentation des principales étapes d'un projet, de l'identification du besoin à l'utilisation et la maintenance d'un produit (extrait de FANCHON [2008]).

l'aide d'outils spécialisés. De nombreux outils d'ingénierie sont alors utiles à l'étape de conception, comme ceux présentés par CHEVALIER [2003]; FANCHON [2008]; GROTE et ANTONSSON [2009]. Chacun de ces outils est spécifique à une problématique technique donnée, dans des domaines comme la mécanique, l'électronique, l'électrotechnique, la thermique, l'hydraulique, etc.

### 2.5.1 Conception de robots manipulateurs

Les machines complexes telles que les robots manipulateurs présentent un grand nombre de degrés de liberté, d'actionneurs et de capteurs. Leur complexité nécessite le développement de nouveaux outils, notamment pour leur conception. Par exemple, la complexité de la cinématique d'un bras manipulateur a pour effet qu'il n'est pas aisé de déterminer les sollicitations mécaniques des différents éléments du robot, à partir de la seule connaissance des chargements maximaux au niveau de l'effecteur, spécifiés par le cahier des charges.

Une des premières étapes de la conception d'un robot manipulateur est de définir son architecture (choix et disposition des liaisons, longueur des segments), puisqu'elle détermine ses capacités en matière de manipulation (espace de travail, manipulabilité, transmission d'efforts, etc.). Il existe de nombreuses morphologies classiques, comme les robots manipulateurs série, massivement utilisés dans l'industrie automobile pour des opérations de manipulation, de peinture ou de soudage. D'autres applications de manipulation très rapide comme le *pick and place* favorisent l'utilisation de chaînes cinématiques fermées comme les robots *delta*. La définition (ou le choix) d'une cinématique idéale pour une application donnée est un exemple de tâche qui nécessite le développement d'outils spécifiques aux robots. Les constructeurs de robots proposent par exemple

des outils de simulation permettant de choisir une cinématique parmi le catalogue proposé.

L'émergence des robots nécessite le développement d'outils de base, traitant notamment de la modélisation de robots manipulateurs rigides [KHALIL et DOMBRE \[2004\]](#). Les outils de modélisation géométrique et cinématique [WALDRON et SCHMIEDELER \[2016\]](#) permettent d'appréhender les capacités du robot à atteindre des positions dans l'espace, générer des vitesses et appliquer des efforts et le modèle dynamique [FEATHERSTONE et ORIN \[2016\]](#) permet de lier l'accélération du système aux actions de ses moteurs et aux efforts extérieurs (gravité, interactions avec l'environnement, etc.).

La conception d'un système suppose d'être capable d'évaluer ses performances, afin de vérifier si elles sont conformes au cahier des charges et de les optimiser. Des indicateurs de performance adaptés aux robots manipulateurs sont alors développés sur la base des travaux de modélisation. Les indicateurs le plus souvent utilisés pour la conception de robots manipulateurs rigides sont présentés par [ANGELES et PARK \[2016\]](#); [PHOLSIRI \[2004\]](#) et dans le chapitre 5. Ils permettent par exemple de déterminer les capacités opérationnelles d'un robot manipulateur (position, vitesse, accélération et application d'efforts cartésiens en bout de bras), à partir de la connaissance de la cinématique et des propriétés des actionneurs (couple et vitesse max).

Ces outils de modélisation et d'évaluation de performance enrichissent fortement les outils d'ingénierie plus généraux. Les robots manipulateurs doivent souvent effectuer des tâches impliquant des trajectoires complexes, et des interactions avec l'environnement qui en dépendent. Il est alors intéressant de baser le processus de conception sur une simulation réaliste de l'application visée, ce qui permet de définir les points de fonctionnement du système et de chaque sous-système. La conception de systèmes complexes (pas uniquement de robots) fait souvent appel à la simulation, le plus couramment pour l'optimisation de la résistance de pièces mécaniques ou l'étude du comportement aérodynamique d'un système. Des processus de conception basés sur des simulations de comportement dynamique sont notamment utilisés dans le domaine de la robotique et des transports.

L'utilisation conjointe d'algorithmes d'optimisation et des outils cités précédemment permettent de résoudre des problèmes de conception complexes [LARA-MOLINA et collab. \[2011\]](#); [ROUT et MITTAL \[2010\]](#); [RUBRECHT et collab. \[2011\]](#). Cette approche peut être associée aux connaissances apportées par d'autres domaines comme la biomécanique, par exemple pour optimiser l'ergonomie d'un robot destiné à travailler conjointement avec un humain [MAURICE \[2015\]](#).

Les outils présentés dans cette partie interviennent à l'étape d'avant-projet, qui permet de définir l'architecture globale et les caractéristiques clés du système. C'est à cette étape que sont définis la cinématique et les principaux éléments (matériaux, section et longueur des segments, actionneurs et liaisons passives). Les principaux problèmes techniques spécifiques au domaine de la robotique sont alors traités lors de cette phase.

Les étapes de conception qui succèdent l'avant-projet (projet et production, voir figure 2.5) portent notamment sur le dimensionnement de chaque sous-système (pièces de liaison, interfaces, etc.), la conception détaillée de chaque pièce mécanique ou encore la conception des systèmes électriques et de commande. Certains composants et techniques sont particulièrement adaptés à la robotique [SCHEINMAN et collab. \[2016\]](#), mais la conception détaillée d'un robot reste principalement basée sur des outils d'ingénierie classiques.

## 2.5.2 Conception de robots flexibles

Comme évoqué dans les parties précédentes, la flexibilité d'un robot manipulateur n'est pas toujours négligeable. Il est alors nécessaire de la considérer dès l'étape de conception afin de maîtriser les performances réelles du système. La flexibilité dégrade les performances d'un système, en particulier en ce qui concerne le comportement dynamique et la qualité de suivi de trajectoire, on peut alors utiliser le modèle du système supposé rigide et les indicateurs de performances de robots rigides pour déterminer un majorant des performances effectivement atteignables par le robot flexible. Cette évaluation de performances majorée permet dans un premier temps d'éliminer les solutions qui ne satisfont pas les exigences, malgré l'approximation à un robot rigide.

De nombreux travaux abordent la problématique de conception d'un robot flexible en cherchant à maximiser leur raideur et/ou la valeur de la fréquence propre du premier mode de vibration [ALESSANDRO et ROSARIO \[2014\]](#); [BRIOT et collab. \[2009\]](#); [COURTEILLE et collab. \[2009\]](#); [LI et collab. \[2009\]](#). Ces approches apportent des méthodes et des outils performants pour assister la conception d'un robot, mais elles ne prennent généralement pas en compte le comportement du contrôleur du robot ni la connaissance des tâches à réaliser.

Une autre façon d'aborder la conception d'un robot flexible, notamment proposée par [BOOK et collab. \[1986\]](#), est de minimiser les effets de la flexibilité du système en augmentant de manière active ou passive l'amortissement des modes de vibration, à l'aide de matériaux intelligents (dissipation passive) ou d'actionneurs supplémentaires (amortissement actif). [PREUMONT \[2011\]](#) et [MOHEIMANI \[2003\]](#) proposent un aperçu des différentes approches de contrôle actif de vibrations de structures flexibles, et mises en pratique par [BAILEY et UBBARD \[1985\]](#), qui place des actionneurs piézoélectriques sur une poutre flexible. Cette approche tente d'écarter la problématique de la flexibilité en l'inhibant localement, ce qui suffit à satisfaire les exigences de certaines applications.

Les performances d'un robot flexible dépendent fortement de ses caractéristiques mécaniques, mais aussi du comportement de son contrôleur. Dans un contexte comme celui du robot YAKA, de fortes performances dynamiques sont attendues et il n'est pas suffisant d'amortir les vibrations par l'ajout d'actionneurs de faibles capacités (comme les actionneurs piézoélectriques). De nombreux travaux s'intéressent à la commande de systèmes flexibles (voir partie 2.4), et montrent qu'il est possible d'améliorer fortement le comportement d'un robot flexible en concevant un contrôleur adapté. Il est alors nécessaire de considérer non seulement la structure mécanique, mais aussi le comportement des actionneurs et du contrôleur dès l'étape d'avant-projet pour mener à bien la conception d'un robot flexible tel que le robot YAKA.

Des travaux répondent à ce besoin de pluridisciplinarité en proposant de concevoir conjointement le contrôleur et le matériel d'un système (co-conception), afin de maximiser les performances atteignables. Cette approche est notamment présentée par [GONZALEZ et collab. \[2016\]](#) et [HALE et collab. \[1985\]](#), pour la conception de véhicules spatiaux. Cette approche est aussi explorée pour le cas des robots manipulateurs flexibles par [PARK et ASADA \[1992\]](#) et [RAI et ASADA \[1995\]](#). Ces approches sont techniquement séduisantes, puisqu'elles cherchent à obtenir un ensemble contrôle/structure cohérent et efficace. La mise en pratique de ces méthodes reste lourde et complexe, elle est donc réservée à des applications et contextes spécifiques.

L'optimisation de conception multidisciplinaire (Multidisciplinary Design Optimization) permet aussi d'aborder ce type de problème de conception, comme proposé par [PERSON et collab. \[2015\]](#); [ZHANG et collab. \[2017\]](#). Cette approche n'a pas pu être mise en œuvre au cours de cette thèse, mais les critères de performance proposés dans le chapitre

5 sont un pré-requis à sa mise en place.

### 2.5.3 Robots flexibles existants

Les parties précédentes présentent de nombreux travaux portant sur les robots flexibles, qui font état du fort intérêt qu'ils suscitent depuis des décennies. Cependant, comme le soulignent TOKHI et AZAD [2017], les travaux expérimentaux dans ce domaine sont très limités, en particulier sur des systèmes de grande envergure avec plusieurs segments flexibles.

Cette partie donne un aperçu des robots flexibles connus, qu'ils soient fabriqués spécifiquement pour valider des développements théoriques (partie 2.5.3.1), ou pour répondre à des besoins industriels (partie 2.5.3.2). Le robot YAKA est enfin présenté dans la partie 2.6.

#### 2.5.3.1 Plateformes d'expérimentation de robots flexibles

De nombreux systèmes sont conçus pour valider expérimentalement les travaux théoriques portant sur la modélisation, la conception et la commande de robots manipulateurs flexibles. Devant la complexité du sujet, ils sont le plus souvent simplifiés pour isoler une problématique précise. On rencontre ainsi de nombreux robots manipulateurs plans de petite dimension, présentant pour la plupart des flexibilités localisées uniquement dans les liaisons, ou ayant un seul segment flexible. Deux exemples représentatifs de ces dispositifs sont présentés sur les figures 2.6 et 2.7.



FIGURE 2.6 – Robot manipulateur flexible à deux degrés de liberté, mais ayant un seul segment flexible *IST*, conçu pour expérimenter des asservissements en effort TOKHI et AZAD [2017].



FIGURE 2.7 – Robot manipulateur flexible à un degré de liberté *Sheffield*, utilisé pour la modélisation ZAIN et collab. [2009].

#### 2.5.3.2 Robots flexibles dédiés à des applications industrielles

Compte tenu de la complexité des robots flexibles, on favorise l'utilisation de robots rigides classiques pour la majorité des applications industrielles. Certaines exceptions exigent cependant le développement de robots de grandes dimensions, dont la flexibilité est inévitable. C'est par exemple le cas des besoins d'inspection ou de manipulation sur un très grand espace de travail, que l'on retrouve notamment dans le domaine de l'inspection nucléaire GARGIULO et collab. [2008], de la recherche et sauvetage TAKEICHI et collab.

[2017] ou du service en orbite (opérations de manipulation sur la station spatiale internationale SALLABERGER et collab. [1997] ou sur les navettes spatiales GOODMAN [2006]). Les figures 2.8, 2.9 et 2.10 montrent des exemples de systèmes flexibles complexes, développés pour répondre à ces besoins spécifiques.

Ces robots manipulateurs de grande dimension sont intrinsèquement flexibles, mais leurs applications nécessitent des dynamiques et des vitesses d'exécution lentes. Leur conception et les problématiques liées à la flexibilité sont donc très différentes de celles du robot YAKA. Du fait de l'absence de pesanteur, les robots manipulateurs spatiaux présentent des caractéristiques techniques hors norme (espace de travail et charge utile très importants), mais ne sont pas utilisables sous l'effet de la pesanteur.



FIGURE 2.8 – Robot manipulateur flexible d'inspection nucléaire AIA GARGIULO et collab. [2008]. Ce robot mesure 8 mètres de long et possède 8 degrés de liberté pour une masse de 150kg.



FIGURE 2.9 – Robot manipulateur spatial *Remote Manipulator System (RMS)* équipé de l'extension *Orbiter Boom Sensor System*. Ce système mesure 30 mètres, possède 6 degrés de liberté et pèse environ 500kg. Source : NASA (STS114-E-5330).



FIGURE 2.10 – Robot manipulateur gonflable de recherche et sauvetage *Giacometti TAKEICHI et collab.* [2017]. Ce robot mesure 20 mètres de long, possède 20 degrés de liberté et pèse 940g.

## 2.6 Présentation du robot YAKA

Le robot YAKA est un bras manipulateur flexible à très haute dynamique et de grandes dimensions. Il est spécifiquement conçu pour lancer et récupérer un UAV depuis un navire (voir chapitre 1). Il s'agit d'un robot flexible industriel complexe, présentant trois segments flexibles, une chaîne cinématique fermée et des articulations (actives et passives) flexibles. Ces spécificités en font un sujet d'étude intéressant pour l'application des travaux théoriques et expérimentaux proposés dans la thèse. La partie 2.6.1 décrit le dispositif expérimental utilisé dans la thèse, tandis que la partie 2.6.2 décrit les moyens expérimentaux utilisés pour la démonstration de faisabilité de lancement et de récupération.

### 2.6.1 Configuration expérimentale de recherche et développement

La figure 2.11 présente le robot YAKA et son schéma cinématique, à côté du robot humanoïde NAO (SoftBank Robotics), haut de 60cm.

Le robot YAKA possède trois degrés de liberté pilotés par trois actionneurs identiques, déportés à la base du robot. Sa structure mécanique est constituée de segments en matériaux composites (carbone) et de pièces de liaison en aluminium. Les jonctions aluminium-carbone sont réalisées par collage et par adhérence. Le système obtenu est très léger, car pour un rayon d'action d'environ 7.5m, la masse de l'ensemble des composants en mouvement rapide (segments et liaisons) est inférieure à 17kg. De ce fait, sa flexibilité est importante et peut engendrer des déplacements élastiques de plusieurs dizaines de centimètres en bout de bras.

Chaque actionneur peut générer jusqu'à 2000N.m et atteindre 3rad/s, ce qui permet au système d'atteindre des vitesses en bout de bras de 15m/s dans un large volume de travail utile.

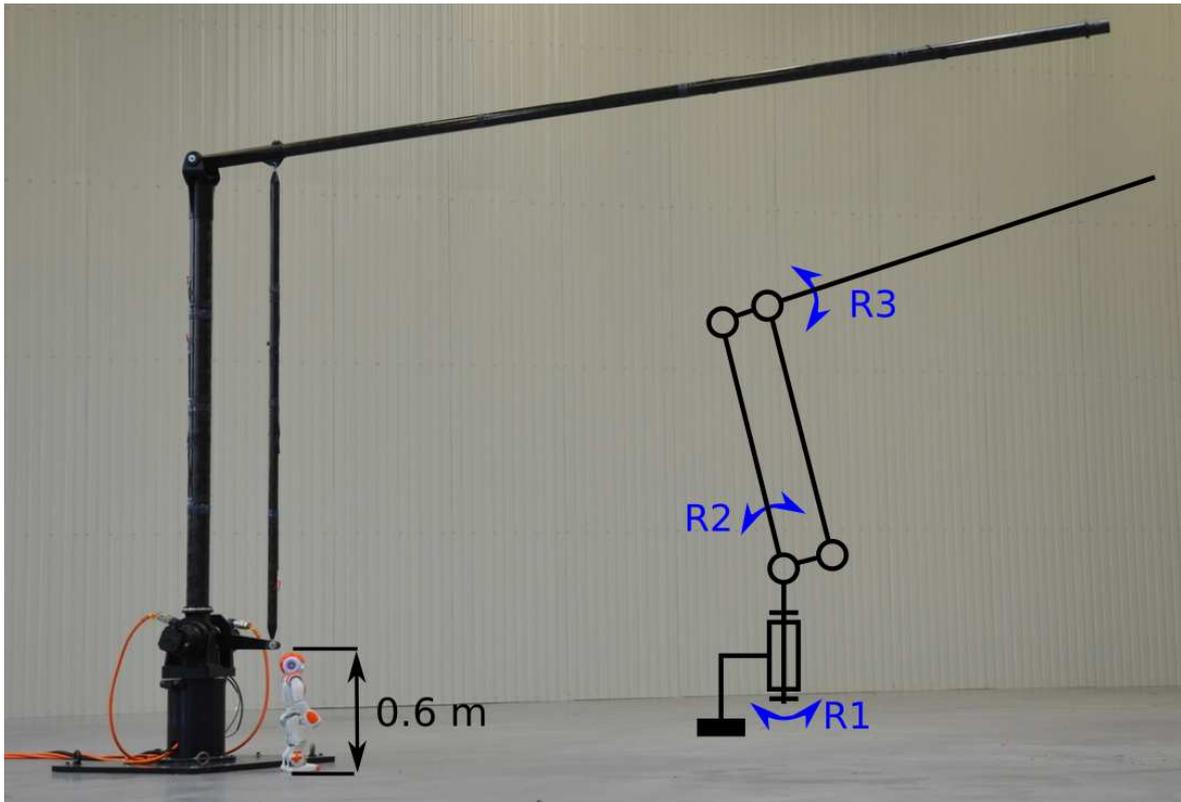


FIGURE 2.11 – Présentation du robot YAKA et de sa cinématique, à côté du robot NAO (SoftBank Robotics), haut de 60cm. R1, R2 et R3 désignent les trois rotations actionnées. [vidéo : robot\\_yaka.mp4](#)

Le robot YAKA possède quatre modes de vibration dont la fréquence propre est inférieure à 10Hz (voir figure 2.12). Cette particularité en fait un robot très souple, parfaitement adapté à la validation expérimentale et à l'illustration des travaux menés dans la thèse.

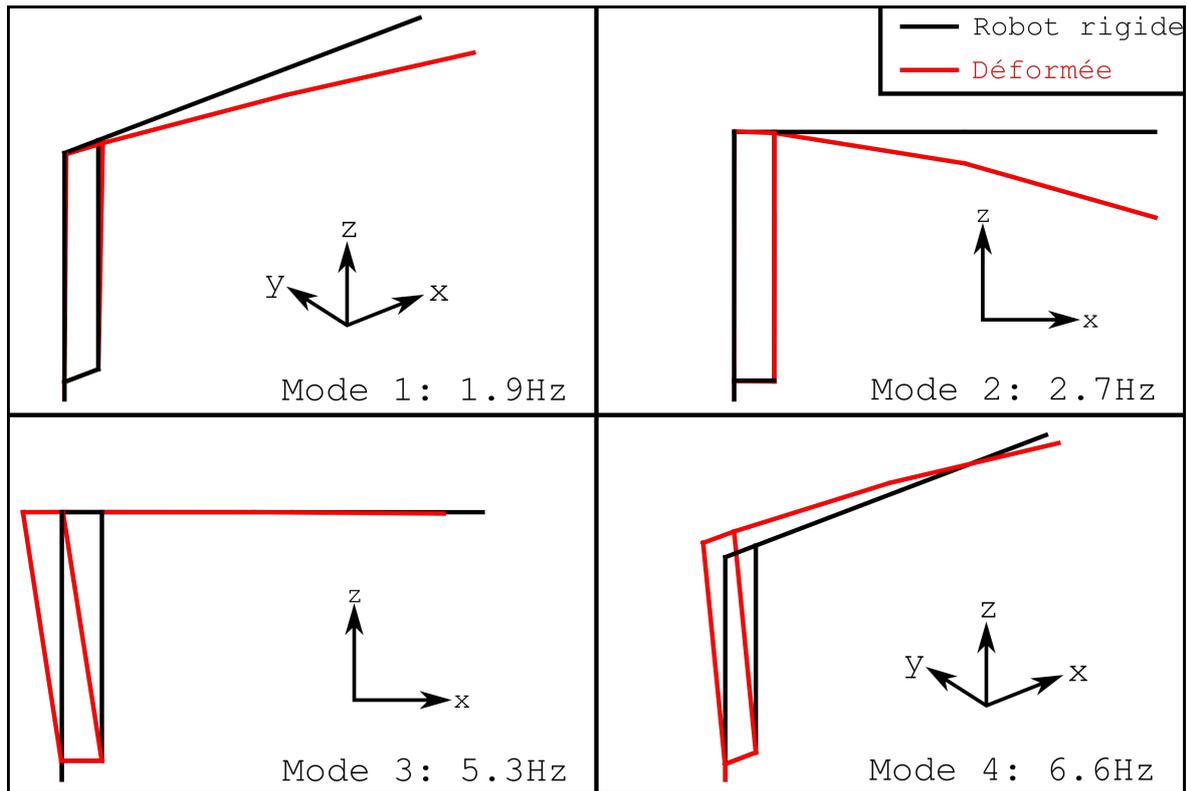


FIGURE 2.12 – Déformée modale et fréquence propre des quatre premiers modes de vibration du robot YAKA, représentées en configuration centrale. [vidéo : modes\\_yaka.mp4](#)

## 2.6.2 Configuration pour les essais opérationnels

Les essais opérationnels ont fait l'objet de validations incrémentales (voir partie 6.1) pour lesquelles des moyens dédiés ont été développés.

Pour la mise au point des opérations de récupération en intérieur, une catapulte est positionnée de façon à lancer des UAV vers le robot YAKA, comme présenté sur la figure 2.13.

Dans le cadre des démonstrations de faisabilité de lancement et de récupération d'un UAV, le robot YAKA est fixé sur un camion, comme illustré par la figure 2.14. Un GPS et une centrale inertielle sont fixés sur la cabine du camion. Le robot YAKA, ses baies de commande et un groupe électrogène sont embarqués à l'arrière de façon à ce que le système soit mobile et autonome en énergie.

L'UAV est équipé d'un dispositif de récupération (type crosse d'appontage), qui est saisi par une série de crochets positionnés au bout du bras.



FIGURE 2.13 – Présentation du dispositif expérimental de test en intérieur : la catapulte (à gauche) lance un UAV (au centre) vers le robot YAKA (à droite) afin de recréer les conditions d'une récupération.



FIGURE 2.14 – Présentation du dispositif expérimental pour les essais opérationnels : le robot YAKA monté sur camion, capable de fonctionner en mouvement ou à l'arrêt.

## 2.7 Conclusion

L'état de l'art présenté dans les parties précédentes montre que de nombreux travaux traitent de la modélisation, la conception et la commande de robots flexibles avec des méthodes très diverses. En revanche, nombreuses d'entre eux présentent des limitations qui ne permettent pas de traiter le cas d'un système tel que le robot YAKA, qui nécessite de prendre en compte :

- Un système non plan, comportant au moins trois degrés de liberté.
- Des flexibilités localisées dans les articulations et les actionneurs (selon les six degrés de liberté).
- Des flexibilités distribuées le long des segments.
- Le comportement dynamique flexible du système complet, assemblé (non limité au quasi statique).

Pour des raisons de coût et de compatibilité avec les contraintes opérationnelles, le contexte nous dissuade d'envisager des méthodes nécessitant :

- L'ajout de capteurs destinés à observer le comportement flexible du système.
- L'ajout d'actionneurs supplémentaires pour amortir ou contrôler les vibrations.
- Des ressources de calcul supérieures à celles offertes par un ordinateur temps réel embarqué classique.

Ces différentes contraintes ont permis de réduire le nombre de méthodes envisagées et d'identifier les approches les mieux adaptées à notre problématique, sur lesquelles se basent les chapitres suivants.

Les parties 2.5.3 et 2.6 mettent en évidence l'originalité du robot YAKA dans le paysage des robots flexibles existants TOKHI et AZAD [2017]. En effet, il présente à la fois une importante flexibilité, un vaste espace de travail et des capacités dynamiques importantes, alors que les systèmes existants peuvent être classés en deux catégories :

- Les systèmes flexibles à forte dynamique, mais de dimensions limitées et évoluant dans le plan (dispositifs de recherche, essentiellement).
- Les systèmes flexibles de grandes dimensions, mais de dynamiques limitées (spatial, maintenance nucléaire, recherche et sauvetage).

Le contexte du projet YAKA implique de mener le processus de conception dans un temps limité et de se restreindre à des technologies industrielles. Les méthodes présentées précédemment sont alors difficilement envisageables, car elles nécessitent le développement de matériaux intelligents, l'ajout de nombreux actionneurs (et capteurs) ou encore la mise en place d'un processus de co-conception long et coûteux.

Les recherches présentées dans la thèse proposent un ensemble d'outils adaptés aux robots manipulateurs flexibles, notamment utiles à leur conception. Les outils de modélisation présentés dans le chapitre 3 permettent d'obtenir de manière systématique un modèle dynamique analytique et un environnement de simulation pour une morphologie de robot donnée. Les travaux portant sur la commande de manipulateurs flexibles présentés dans le chapitre 4 permettent de proposer une architecture de commande de référence adaptée au contexte industriel, dont le comportement peut être pris en compte dès l'étape de conception. Le chapitre 5 présente enfin des indicateurs de performance utiles à la conception et une démarche globale qui permet de mener à bien la conception d'un robot manipulateur flexible, sur la base des différents travaux présentés dans la thèse.

## 2.8 Références

- ABE, A. 2009, «Trajectory planning for residual vibration suppression of a two-link rigid-flexible manipulator considering large deformation», *Mechanism and Machine Theory*, vol. 44, n° 9, p. 1627–1639. [27](#)
- ALESSANDRO, C. et S. ROSARIO. 2014, «Elastodynamic optimization of a 3t1r parallel manipulator», *Mechanism and Machine Theory*, vol. 73, p. 184–196. [31](#)
- AMSALLEM, D., J. CORTIAL, K. CARLBERG et C. FARHAT. 2009, «A method for interpolating on manifolds structural dynamics reduced-order models», *International journal for numerical methods in engineering*, vol. 80, n° 9, p. 1241–1258. [22](#)
- ANGELES, J. et F. C. PARK. 2016, «Design and performance evaluation», dans *Springer Handbook of Robotics*, Springer, p. 399–418. [30](#)
- BAILEY, T. et J. UBBARD. 1985, «Distributed piezoelectric-polymer active vibration control of a cantilever beam», *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 8, n° 5, p. 605–611. [31](#)
- BASCETTA, L. et P. ROCCO. 2006a, «End-point vibration sensing of planar flexible manipulators through visual servoing», *Mechatronics*, vol. 16, n° 3, p. 221–232. [26](#)
- BASCETTA, L. et P. ROCCO. 2006b, «Two-time scale visual servoing of eye-in-hand flexible manipulators», *IEEE transactions on robotics*, vol. 22, n° 4, p. 818–830. [26](#)
- BAYO, E. 1987, «A finite-element approach to control the end-point motion of a single-link flexible robot», *Journal of Field Robotics*, vol. 4, n° 1, p. 63–75. [16](#)
- BENNER, P., S. GUGERCIN et K. WILLCOX. 2013, «A survey of model reduction methods for parametric systems», . [22](#)
- BENOSMAN, M. et G. LE VEY. 2004, «Control of flexible manipulators : A survey», *Robotica*, vol. 22, n° 5, p. 533–545. [26](#)
- BOOK, W. J. 1984, «Recursive lagrangian dynamics of flexible manipulator arms», *The International Journal of Robotics Research*, vol. 3, n° 3, p. 87–101. [15](#)
- BOOK, W. J., G. G. HASTINGS et T. E. ALBERTS. 1986, «Design strategies for high-speed lightweight robots», . [25](#), [31](#)
- BRIOT, S., A. PASHKEVICH et D. CHABLAT. 2009, «On the optimal design of parallel robots taking into account their deformations and natural frequencies», dans *ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers, p. 367–376. [31](#)
- CESCON, M., I. DRESSLER, R. JOHANSSON et A. ROBERTSSON. 2009, «Subspace-based identification of compliance dynamics of parallel kinematic manipulator», dans *Advanced Intelligent Mechatronics, 2009. AIM 2009. IEEE/ASME International Conference on*, IEEE, p. 1028–1033. [20](#)
- CHANG, L.-W. et J. HAMILTON. 1991, «The kinematics of robotic manipulators with flexible links using an equivalent rigid link system (erls) model», *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, vol. 113, n° 1, p. 48–53. [17](#)

- CHEN, W. 2001, «Dynamic modeling of multi-link flexible robotic manipulators», *Computers & Structures*, vol. 79, n° 2, p. 183–195. 15
- CHEVALIER, A. 2003, *Guide du dessinateur industriel : pour maîtriser la communication technique*, Hachette. 29
- COURTEILLE, E., D. DEBLAISE et P. MAURINE. 2009, «Design optimization of a delta-like parallel robot through global stiffness performance evaluation», dans *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*, IEEE, p. 5159–5166. 31
- DE LUCA, A. et W. J. BOOK. 2016, *Robots with Flexible Elements*, Springer International Publishing, Cham, ISBN 978-3-319-32552-1, p. 243–282, doi:10.1007/978-3-319-32552-1\_11. URL [https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1_11). 14, 15, 26
- DE LUCA, A. et B. SICILIANO. 1991, «Closed-form dynamic model of planar multilink light-weight robots», *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 21, n° 4, p. 826–839. 15
- DEGROOTE, J., J. VIERENDEELS et K. WILLCOX. 2010, «Interpolation among reduced-order matrices to obtain parameterized models for design, optimization and probabilistic analysis», *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 63, n° 2, p. 207–230. 22
- DUBUS, G., O. DAVID et Y. MEASSON. 2010, «A vision-based method for estimating vibrations of a flexible arm using on-line sinusoidal regression», dans *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, IEEE, p. 4068–4075. 26
- FANCHON, J.-L. 2008, *Guide de mécanique*, Nathan. ix, 28, 29
- FEATHERSTONE, R. et D. E. ORIN. 2016, «Dynamics», dans *Springer Handbook of Robotics*, Springer, p. 37–66. 30
- FELIU, V. et F. RAMOS. 2005, «Strain gauge based control of single-link flexible very light-weight robots robust to payload changes», *Mechatronics*, vol. 15, n° 5, p. 547–571. 26
- GARGIULO, L., P. BAYETTI, V. BRUNO, J.-J. CORDIER, J.-P. FRICONNEAU, C. GRISOLIA, J.-C. HATCHRESSIAN, M. HOURY, D. KELLER et Y. PERROT. 2008, «Development of an iter relevant inspection robot», *Fusion Engineering and Design*, vol. 83, n° 10-12, p. 1833–1836. x, 32, 33
- GASPARETTO, A. 2004, «On the modeling of flexible-link planar mechanisms : experimental validation of an accurate dynamic model», *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, vol. 126, n° 2, p. 365–375. 16, 20
- GEUSS, M., H. PANZER et B. LOHMANN. 2013, «On parametric model order reduction by matrix interpolation», dans *Control Conference (ECC), 2013 European*, IEEE, p. 3433–3438. 22
- GONZALEZ, J. A. P., C. PITTET, D. ALAZARD et T. LOQUEN. 2016, «Integrated control/structure design of a large space structure using structured hinfinit control», *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, n° 17, p. pp–296. 31

- GOODMAN, J. L. 2006, «History of space shuttle rendezvous and proximity operations», *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 43, n° 5, p. 944–959. [33](#)
- GROTE, K.-H. et E. K. ANTONSSON. 2009, *Springer handbook of mechanical engineering*, vol. 10, Springer Science & Business Media. [29](#)
- HALE, A. L., W. DAHL et J. LISOWSKI. 1985, «Optimal simultaneous structural and control design of maneuvering flexible spacecraft», *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 8, n° 1, p. 86–93. [31](#)
- HASTINGS, G. et W. BOOK. 1986, «Verification of a linear dynamic model for flexible robotic manipulators», dans *Robotics and Automation. Proceedings. 1986 IEEE International Conference on*, vol. 3, IEEE, p. 1024–1029. [15](#)
- JIANG, X., Y. YABE, A. KONNO et M. UCHIYAMA. 2008, «Vibration suppression control of a flexible arm using image features of unknown objects», dans *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, IEEE, p. 3783–3788. [26](#)
- KEESMAN, K. J. 2011, *System identification : an introduction*, Springer Science & Business Media. [18](#)
- KHALIL, W. et D. CREUSOT. 1997, «Symoro+ : a system for the symbolic modelling of robots», *Robotica*, vol. 15, n° 2, p. 153–161. [17](#)
- KHALIL, W. et E. DOMBRE. 2004, *Modeling, identification and control of robots*, Butterworth-Heinemann. [13](#), [14](#), [17](#), [18](#), [19](#), [20](#), [24](#), [25](#), [28](#), [30](#)
- KHALIL, W. et M. GAUTIER. 2000, «Modeling of mechanical systems with lumped elasticity», dans *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on*, vol. 4, IEEE, p. 3964–3969. [15](#)
- KHALIL, W., A. VIJAYALINGAM, B. KHOMUTENKO, I. MUKHANOV, P. LEMOINE et G. ECORCHARD. 2014, «Opensymoro : An open-source software package for symbolic modelling of robots», dans *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2014 IEEE/ASME International Conference on*, IEEE, p. 1206–1211. [14](#), [17](#)
- KIANG, C. T., A. SPOWAGE et C. K. YOONG. 2015, «Review of control and sensor system of flexible manipulator», *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 77, n° 1, p. 187–213. [26](#)
- KIM, J.-S. et M. UCHIYAMA. 2003, «Vibration mechanism of constrained spatial flexible manipulators», *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, vol. 46, n° 1, p. 123–128. [15](#)
- LARA-MOLINA, F., J. ROSARIO et D. DUMUR. 2011, «Multi-objective optimization of stewart-gough manipulator using global indices», dans *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2011 IEEE/ASME International Conference on*, IEEE, p. 79–85. [30](#)
- LI, C.-J. et T. SANKAR. 1993, «Systematic methods for efficient modeling and dynamics computation of flexible robot manipulators», *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, vol. 23, n° 1, p. 77–95. [15](#)
- LI, H., Z. YANG et T. HUANG. 2009, «Dynamics and elasto-dynamics optimization of a 2-dof planar parallel pick-and-place robot with flexible links», *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 38, n° 2, p. 195–204. [31](#)

- MAHMOOD, I. A., S. R. MOHEIMANI et B. BHIKKAJI. 2008, «Precise tip positioning of a flexible manipulator using resonant control», *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 13, n° 2, p. 180–186. [27](#)
- MAURICE, P. 2015, *Virtual ergonomics for the design of collaborative robots*, thèse de doctorat, Paris 6. [30](#)
- MOHAMED, Z., J. MARTINS, M. TOKHI, J. S. DA COSTA et M. BOTTO. 2005, «Vibration control of a very flexible manipulator system», *Control Engineering Practice*, vol. 13, n° 3, p. 267–277. [26](#)
- MOHEIMANI, S. R. 2003, «A survey of recent innovations in vibration damping and control using shunted piezoelectric transducers», *IEEE transactions on control systems technology*, vol. 11, n° 4, p. 482–494. [31](#)
- OZGOLI, S. et H. TAGHIRAD. 2006, «A survey on the control of flexible joint robots», *Asian Journal of Control*, vol. 8, n° 4, p. 332–344. [26](#)
- PANZER, H., J. MOHRING, R. EID et B. LOHMANN. 2010, «Parametric model order reduction by matrix interpolation», *at-Automatisierungstechnik Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs-und Informationstechnik*, vol. 58, n° 8, p. 475–484. [22](#)
- PARK, J.-H. et H. ASADA. 1992, «Integrated structure/control design of a two-link nonrigid robot arm for high-speed positioning», dans *Robotics and Automation, 1992. Proceedings., 1992 IEEE International Conference on*, IEEE, p. 735–741. [31](#)
- PARK, K.-J. 2004, «Flexible robot manipulator path design to reduce the endpoint residual vibration under torque constraints», *Journal of Sound and Vibration*, vol. 275, n° 3, p. 1051–1068. [27](#)
- PERSSON, J. A., X. FENG, D. WAPPLING et J. ÖLVANDER. 2015, «A framework for multidisciplinary optimization of a balancing mechanism for an industrial robot», *Journal of Robotics*, vol. 2015, p. 7. [31](#)
- PHOLSIRI, C. 2004, *Task-based decision making and control of robotic manipulators*, thèse de doctorat. [30](#)
- PIRAS, G., W. CLEGHORN et J. MILLS. 2005, «Dynamic finite-element analysis of a planar high-speed, high-precision parallel manipulator with flexible links», *Mechanism and machine theory*, vol. 40, n° 7, p. 849–862. [16](#)
- PREISSNER, C., T. J. ROYSTON et D. SHU. 2012, «A high-fidelity harmonic drive model», *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 134, n° 1, p. 011 002. [16](#)
- PREUMONT, A. 2011, *Vibration control of active structures : an introduction*, vol. 179, Springer Science & Business Media. [25](#), [31](#)
- QIU, Z.-C., X.-M. ZHANG, Y.-C. WANG, Z.-W. WU et collab.. 2009, «Active vibration control of a flexible beam using a non-collocated acceleration sensor and piezoelectric patch actuator», *Journal of sound and vibration*, vol. 326, n° 3, p. 438–455. [26](#)
- RAI, S. et H. ASADA. 1995, «Integrated structure/control design of high speed flexible robots based on time optimal control», *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, vol. 117, n° 4, p. 503–512. [31](#)

- ROGNANT, M., E. COURTEILLE et P. MAURINE. 2010, «A systematic procedure for the elastodynamic modeling and identification of robot manipulators», *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 26, n° 6, p. 1085–1093. [16](#), [17](#), [20](#)
- ROUT, B. et R. MITTAL. 2010, «Optimal design of manipulator parameter using evolutionary optimization techniques», *Robotica*, vol. 28, n° 03, p. 381–395. [30](#)
- RUBRECHT, S., E. SINGLA, V. PADOIS, P. BIDAUD et M. DE BROISSIA. 2011, «Evolutionary design of a robotic manipulator for a highly constrained environment», *New Horizons in Evolutionary Robotics*, p. 109–121. [30](#)
- SALLABERGER, C., S. P. T. FORCE et collab.. 1997, «Canadian space robotic activities», *Acta astronautica*, vol. 41, n° 4-10, p. 239–246. [33](#)
- SCHEINMAN, V., J. M. MCCARTHY et J.-B. SONG. 2016, «Mechanism and actuation», dans *Springer Handbook of Robotics*, Springer, p. 67–90. [30](#)
- SCHWARZ, B. J. et M. H. RICHARDSON. 1999, «Experimental modal analysis», *CSI Reliability week*, vol. 35, n° 1, p. 1–12. [19](#), [21](#)
- SHABANA, A. A. et R. Y. YAKOUB. 2001, «Three dimensional absolute nodal coordinate formulation for beam elements : theory», *coordinates*, vol. 8, p. 9. [17](#)
- SICILIANO, B. et O. KHATIB. 2016, *Springer handbook of robotics*, Springer. [14](#)
- SICILIANO, B., L. SCIavicco, L. VILLANI et G. ORIOLO. 2010, *Robotics : modelling, planning and control*, Springer Science & Business Media. [14](#), [16](#)
- SINGH, T. et W. SINGHOSE. 2002, «Input shaping/time delay control of maneuvering flexible structures», dans *American Control Conference, 2002. Proceedings of the 2002*, vol. 3, IEEE, p. 1717–1731. [27](#)
- SINGHOSE, W. E., W. P. SEERING et N. C. SINGER. 1996, «Input shaping for vibration reduction with specified insensitivity to modeling errors», *Japan-USA Sym. on Flexible Automation*, vol. 1, p. 307–13. [27](#)
- SUNADA, W. et S. DUBOWSKY. 1983, «On the dynamic analysis and behavior of industrial robotic manipulators with elastic members», *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, vol. 105, n° 1, p. 42–51. [16](#)
- TAKEICHI, M., K. SUZUMORI, G. ENDO et H. NABAE. 2017, «Development of a 20-m-long giacometti arm with balloon body based on kinematic model with air resistance», dans *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2017 IEEE/RSJ International Conference on*, IEEE, p. 2710–2716. [x](#), [32](#), [34](#)
- THEODORE, R. J. et A. GHOSAL. 1995, «Comparison of the assumed modes and finite element models for flexible multilink manipulators», *The International journal of robotics research*, vol. 14, n° 2, p. 91–111. [15](#), [16](#)
- THUBE, S. V. et T. R. BOBAK. 2012, «Dynamic analysis of a cycloidal gearbox using finite element method», *AGMA Technical Paper*, p. 1–13. [16](#)
- TOKHI, M. O. et AZAD. 2017, *Flexible robot manipulators : modelling, simulation and control, 2nd Edition*, vol. 86, Iet. [x](#), [32](#), [38](#)

- VIDONI, R., A. GASPARETTO et M. GIOVAGNONI. 2014, «A method for modeling three-dimensional flexible mechanisms based on an equivalent rigid-link system», *Journal of Vibration and Control*, vol. 20, n° 4, p. 483–500. [17](#)
- WALDRON, K. J. et J. SCHMIEDELER. 2016, «Kinematics», dans *Springer Handbook of Robotics*, Springer, p. 11–36. [30](#)
- WANG, G. et Y. LI. 2004, «Integrated sensing and filter design for a single-link flexible manipulator», *IEEE transactions on robotics and automation*, vol. 20, n° 3, p. 559–564. [27](#)
- WANG, X. et J. K. MILLS. 2006, «Dynamic modeling of a flexible-link planar parallel platform using a substructuring approach», *Mechanism and machine theory*, vol. 41, n° 6, p. 671–687. [22](#)
- WANG, X., J. K. MILLS et S. GUO. 2009, «Experimental identification and active control of configuration dependent linkage vibration in a planar parallel robot», *IEEE transactions on control systems technology*, vol. 17, n° 4, p. 960–969. [20](#)
- WIENS, G. J. et D. S. HARDAGE. 2006, «Structural dynamics and system identification of parallel kinematic machines», *Proceedings of the IDETC/CIE, Philadelphia, PA*, p. 749–758. [20](#)
- DE WIT, C. C., B. SICILIANO et G. BASTIN. 1996, «Elastic joints», dans *Theory of robot control*, Springer, p. 179–217. [26](#)
- WU, J., J. WANG et L. WANG. 2008, «Identification of dynamic parameter of a 3dof parallel manipulator with actuation redundancy», *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 130, n° 4, p. 041 012. [20](#)
- ZAIN, B. A. M., M. O. TOKHI et S. M. SALLEH. 2009, «Dynamic modelling of a single-link flexible manipulator using parametric techniques with genetic algorithms», dans *Computer Modeling and Simulation, 2009. EMS'09. Third UKSim European Symposium on*, IEEE, p. 373–378. [x](#), [32](#)
- ZHANG, J., J. LIU, C. WANG, Y. SONG et B. LI. 2017, «Study on multidisciplinary design optimization of a 2-degree-of-freedom robot based on sensitivity analysis and structural analysis», *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 9, n° 4, p. 1687814017696 656. [31](#)
- ZHOU, Z., J. XI et C. K. MECHEFSKE. 2006, «Modeling of a fully flexible 3prs manipulator for vibration analysis», *Journal of Mechanical Design*, vol. 128, n° 2, p. 403–412. [20](#)
- ZHU, G., S. S. GE et T. H. LEE. 1999, «Simulation studies of tip tracking control of a single-link flexible robot based on a lumped model», *Robotica*, vol. 17, n° 1, p. 71–78. [15](#)

# Chapitre 3

## Modélisation et recalage expérimental de robots flexibles

### Sommaire

---

<b>3.1 Modélisation de robots flexibles</b> . . . . .	<b>46</b>
3.1.1 Approche proposée . . . . .	46
3.1.2 Modèle mécanique . . . . .	49
3.1.3 Modèle d'actionneurs . . . . .	54
3.1.4 Limites du modèle . . . . .	55
<b>3.2 Recalage et validation expérimentale</b> . . . . .	<b>56</b>
3.2.1 Méthodologie . . . . .	57
3.2.2 Recalage expérimental des segments . . . . .	58
3.2.3 Identification dynamique des actionneurs . . . . .	60
3.2.4 Recalage expérimental du système assemblé . . . . .	67
3.2.5 Modèle obtenu après recalage . . . . .	69
3.2.6 Conclusion et perspectives pour le recalage expérimental . . . . .	70
<b>3.3 Réduction de modèle</b> . . . . .	<b>71</b>
3.3.1 Analyse modale . . . . .	72
3.3.2 Discrétisation . . . . .	72
3.3.3 Appairage de modes . . . . .	74
3.3.4 Réduction . . . . .	75
3.3.5 Modèle réduit . . . . .	77
3.3.6 Limites et perspectives pour la réduction . . . . .	78
<b>3.4 Conclusion</b> . . . . .	<b>78</b>
<b>3.5 Références</b> . . . . .	<b>78</b>

---

Ce chapitre traite de la problématique de modélisation des robots flexibles. Comme présenté dans la partie 2.1, deux types de modèles différents sont nécessaires pour répondre aux divers besoins (analyse, conception, commande, etc.) :

- Un modèle très fidèle pour appréhender le comportement vibratoire complexe d'une structure flexible et d'en analyser en détail ses caractéristiques. Compte tenu de la complexité du comportement d'un robot flexible, un modèle le représentant finement est nécessairement complexe, et son exploitation requiert d'importants temps de calcul.
- Un modèle plus léger pour répondre aux besoins de simulation et de commande doit être obtenu pour respecter les contraintes d'implémentation et de résolution numérique.

Les travaux présentés ici ont pour objectif de mettre en place des outils qui permettent d'obtenir ces modèles pour un robot manipulateur flexible, dans le cas général (liaisons et segments flexibles, sans restriction sur la cinématique ou le nombre de segments, en présence ou non de chaîne cinématique fermée).

La paramétrisation, le choix de la modélisation et l'obtention du modèle sont détaillés dans la partie 3.1. La partie 3.2 apporte une méthodologie qui permet de mener à bien le recalage d'un système complexe, en cherchant à conserver le sens physique des paramètres mécaniques de chaque composant. La partie 3.3 se focalise sur la réduction du modèle recalé.

Les travaux théoriques génériques présentés dans ce chapitre sont illustrés sur le cas particulier du projet YAKA qui permet de valider leur pertinence sur un cas pratique.

## 3.1 Modélisation de robots flexibles

Comme présenté dans le chapitre 2, la mécanique d'un robot flexible a un comportement très complexe dont la modélisation nécessite des outils spécifiques.

Malgré le fait que la complexité de la modélisation réside dans le comportement flexible de la structure mécanique, se limiter à son étude n'est pas suffisant pour appréhender le comportement global du système. En effet, les actionneurs, les liaisons et la chaîne de commande introduisent des effets qui ont une influence majeure. Il est donc nécessaire de considérer chaque élément qui intervient dans le comportement du système :

- Sa structure mécanique flexible, constituée de segments et d'articulations.
- Ses actionneurs, associés à leurs sources de puissance et contrôleurs bas niveau.
- Son système de pilotage constitué des capteurs, cartes de conditionnement, unité de calcul et lois de commande.
- Son environnement, qui définit toutes les interactions avec les autres objets. Un système est le plus souvent fixé au sol, soumis à la gravité et aux actions mécaniques liées à la tâche qu'il réalise. D'autres cas induisent des interactions supplémentaires, comme dans le cas de systèmes embarqués sur un porteur mobile ou soumis à des forces de frottement fluide.

### 3.1.1 Approche proposée

Comme proposé sur la figure 3.1, un robot flexible peut être décomposé en trois principaux éléments : sa structure mécanique, ses actionneurs et son système de commande.

L'approche proposée se concentre principalement sur la modélisation de la structure mécanique flexible (problématiques spécifiques). Elle traite séparément le comportement des actionneurs et du contrôleur (outils classiques). Cette décomposition est notamment motivée par le fait que les méthodes de modélisation de chacun de ces éléments sont de natures différentes. Le fait de scinder le système global en sous-systèmes distincts offre davantage de liberté dans son utilisation, il est par exemple possible d'étudier rapidement l'effet d'une loi de commande ou d'un actionneur différent en remplaçant uniquement la partie du modèle correspondante.

Les travaux présentés ici supposent que le contrôleur et les capteurs sont continus et idéaux, il est cependant possible d'enrichir la démarche en faisant appel à des modèles de contrôleurs et de capteurs plus complexes [SICILIANO et collab. \[2010\]](#). Dans un contexte industriel comme celui du projet YAKA, le respect de ces hypothèses se retranscrit en contraintes sur le dimensionnement de ces éléments (choix de capteurs de résolution suffisante et loi de commande exécutée à fréquence suffisante).

L'étape de réduction détaillée dans la partie 3.3 est intégrée au processus, ce qui permet d'obtenir simultanément deux modèles (un modèle complet et un modèle simplifié). La modélisation de la structure mécanique est présentée dans la partie 3.1.2 et celle des actionneurs dans la partie 3.1.3.

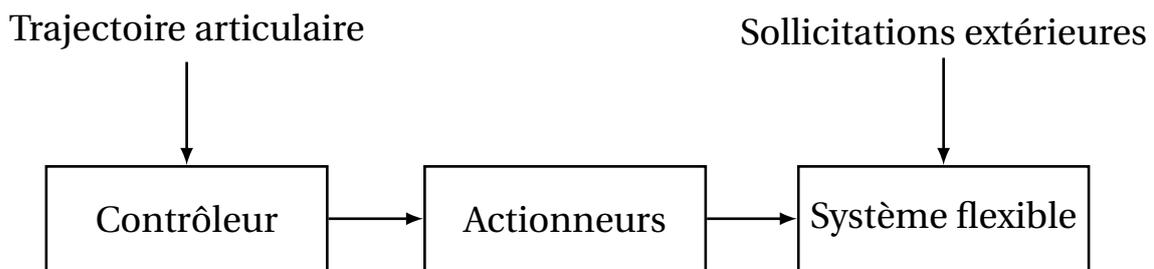


FIGURE 3.1 – Représentation générique d'un robot, décomposé en trois principaux composants : son contrôleur, ses actionneurs et sa mécanique flexible.

### 3.1.1.1 Modélisation mécanique

Il est courant de considérer que les segments d'un robot sont rigides et que la flexibilité est localisée au niveau des liaisons et actionneurs. Cette approximation est acceptable quand la flexibilité des segments est négligeable devant celle des articulations, ce qui est le cas pour de nombreux robots industriels dont les segments sont très rigides (pièces de fonderie massives), mais les transmissions sont flexibles. En effet, les réducteurs de type Harmonic Drive<sup>®</sup> ou les transmissions par courroies sont des éléments flexibles couramment intégrés dans les robots industriels.

Les systèmes constitués de segments très légers et élancés comme le robot YAKA imposent de prendre en compte non seulement les flexibilités localisées dans les liaisons, mais aussi celles distribuées dans les segments.

Parmi les différentes approches de l'état de l'art présentées dans la partie 2.1, celle décrite par [ROGNANT et collab. \[2010\]](#) est retenue pour représenter la mécanique flexible. La représentation des segments flexibles par des poutres d'Euler-Bernoulli permet d'approcher leur comportement avec une meilleure finesse que d'autres méthodes telles que la représentation "lumped model" [KHALIL et GAUTIER \[2000\]](#); [KIM et UCHIYAMA \[2003\]](#);

ZHU et collab. [1999]. Ce choix permet aussi de mieux prendre en compte le comportement des liaisons flexibles que la méthode des modes supposés THEODORE et GHOSAL [1995], qui prend en compte uniquement la flexibilité des segments. La paramétrisation proposée par ROGNANT et collab. [2010] fait apparaître le déplacement élastique cartésien directement dans le vecteur d'état et formule les efforts extérieurs dans le repère cartésien, ce qui facilite notamment le recalage expérimental. Enfin, cette approche est développée pour être systématique, ce qui permet d'obtenir rapidement le modèle dynamique flexible d'un système quelconque à partir d'une description mécanique standardisée (voir partie 3.1.2).

### 3.1.1.2 Réduction du modèle mécanique

La complexité du modèle dynamique d'un système flexible est une problématique majeure qui affecte principalement la simulation et la résolution en temps réel pour l'asservissement. En particulier pour les approches de modélisation par éléments finis comme celle retenue dans ce chapitre, le modèle obtenu est très complexe, mais toute l'information qu'il contient n'est pas utile à toutes les applications.

Si l'on considère la bande passante nécessaire  $\omega$ , les modes de vibration ayant une pulsation propre supérieure à  $3\omega$  ne sont pas sollicités et peuvent être négligés DE LUCA et BOOK [2016]. Il existe de nombreuses approches permettant d'obtenir un modèle réduit, le plus souvent en réduisant la plage fréquentielle utile selon des critères de ce type (voir partie 2.3).

À titre d'exemple, le modèle dynamique flexible du robot YAKA présenté dans la partie 3.1 a un vecteur d'état de dimension **81** (par conséquent autant de modes propres) alors que considérer les dix premiers modes de vibration suffirait amplement pour répondre aux besoins de l'application.

Limiter le modèle aux dix premiers modes de vibration est séduisant dans ce contexte, d'autant que les modes de vibration les plus hautes fréquences ont un sens physique discutable (hypothèses prises lors du choix du maillage).

Un vecteur d'état de dimension **10** semble donc suffisant dans ce cas, mais en pratique, le comportement vibratoire d'un robot varie en fonction de sa position articulaire, l'apparition de dimensions supplémentaires est donc inévitable. Un modèle fidèle sur tout l'espace de travail requiert donc d'être de dimension supérieure au nombre de modes propres qu'il représente physiquement. Ces dimensions supplémentaires font apparaître des modes propres fictifs dans le modèle, qui n'ont pas de signification physique (voir partie 3.3).

Les choix de modélisation ont une influence sur la dimension du modèle obtenu avant réduction et les problématiques associées. Par exemple, le choix de la discrétisation pour une modélisation par éléments finis a une influence directe sur le nombre de variables d'état du modèle, mais il est contraint par les besoins de représentativité et le respect des hypothèses (voir partie 3.1.2.3). Le choix de la méthode des modes supposés permet d'obtenir directement un modèle de dimension plus modeste, mais plus difficilement recalable expérimentalement que le modèle retenu dans nos travaux, dont les variables d'état sont des grandeurs physiques mesurables (vecteur des déplacements élastiques **u**).

La démarche de réduction proposée utilise une méthode de troncature dans la base modale qui conserve la signification physique des premiers modes de vibration.

Comme présenté dans la partie 2.3, les modes propres évoluent en fonction de la position articulaire du robot, ce qui nécessite une démarche d'interpolation adaptée. Une approche de réduction par décomposition en valeurs singulières tronquée BENNER et collab.

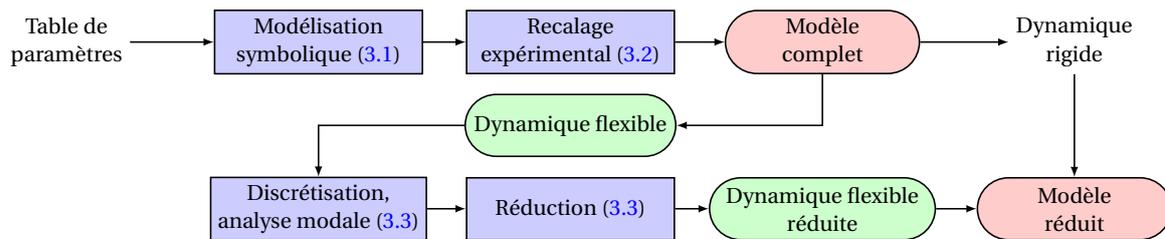


FIGURE 3.2 – Processus de modélisation systématique d'un système, permettant de produire un modèle complet (fidèle) et un modèle réduit (léger) à partir d'une table de paramètres le décrivant.

[2013] est proposée dans la section 3.3 pour obtenir un modèle réduit tout en conservant son sens physique.

La figure 3.2 représente la démarche qui permet d'obtenir à la fois le modèle complet et le modèle réduit de manière systématique. Une description générique du robot (tables de paramètres standardisées) permet dans un premier temps d'obtenir le modèle complet sur la base de [ROGNANT et collab. \[2010\]](#). Une étape de recalage expérimental permet d'améliorer la fidélité du modèle en adaptant ses paramètres. La dynamique flexible est alors extraite du modèle complet pour être simplifiée. L'espace articulaire est discrétisé et une analyse modale est pratiquée à chaque configuration pour éliminer les modes de vibration superflus. L'étape de réduction permet alors d'obtenir la dynamique flexible réduite en rassemblant l'ensemble des modèles locaux. L'association du modèle rigide et flexible donne le modèle réduit, adapté aux besoins de calcul en temps réel et de simulation.

Cette démarche simplifie uniquement la partie du modèle relative au comportement flexible dans laquelle réside la complexité. La partie du modèle représentant la dynamique rigide est donc conservée intacte pour que sa fidélité ne soit pas dégradée lors du processus de réduction.

### 3.1.2 Modèle mécanique

Cette section présente la méthode permettant d'obtenir le modèle dynamique du robot flexible à partir d'une description standardisée de sa structure et de ses éléments mécaniques.

#### 3.1.2.1 Hypothèses de modélisation de la structure mécanique

La modélisation retenue [ROGNANT et collab. \[2010\]](#) représente le système par des segments souples de section constante et des articulations flexibles, ce qui permet de représenter un grand nombre de systèmes comme des bras manipulateurs classiques, ainsi que des robots parallèles, structures de type treillis ou tout autre système assimilable à des segments et des jonctions.

Le comportement flexible des segments est représenté par une ou plusieurs poutres d'Euler-Bernoulli, ce qui suppose de respecter les hypothèses d'usage :

- Les segments sont assimilés à des poutres de section constante, de matériau homogène et isotrope. Cette hypothèse est adaptée à la majorité des cas pratiques, les robots manipulateurs flexibles étant généralement constitués de segments métalliques assimilables à des poutres.

- L'hypothèse des petites déformations (et petits déplacements) doit aussi être respectée, ce qui exclut la modélisation de systèmes extrêmement souples soumis à de grandes déformations.
- Les poutres doivent être élancées (dimension transversale petite devant la dimension longitudinale), ce qui implique des contraintes sur la discrétisation de chaque segment (voir section 3.1.2.3).
- Afin de respecter l'hypothèse de Navier-Bernoulli, on suppose que les sections droites restent à la fibre moyenne, ce qui est vérifié dans le cas de petites déformations.

L'amortissement structural dans les segments est défini par les coefficients de Rayleigh  $\alpha$  et  $\beta$ , qui sont une bonne approximation pour les métaux de construction classiques. La représentativité pour des matériaux composites est cependant plus incertaine.

Les liaisons flexibles sont représentées par une raideur localisée associée à un amortissement visqueux (pour chacun des six degrés de liberté de chaque articulation).

Des masses localisées peuvent être ajoutées en tout point du maillage afin de représenter les masses qui ne sont pas distribuées dans les segments comme les jonctions, articulations, actionneurs, capteurs, outils, etc.

### 3.1.2.2 Paramètres géométriques

La cinématique d'un robot manipulateur est décrite par la table de paramètres de Khalil et Kleinfinger [KHALIL et DOMBRE \[2004\]](#). Elle est représentée sous la forme d'un tableau qui contient toutes les informations relatives à sa géométrie et sa cinématique.

Articulation	$a$	$\mu$	$\sigma$	$\alpha$	$d$	$\theta$	$r$
1	$a_1$	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\alpha_1$	$d_1$	$\theta_1$	$r_1$
2	$a_2$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\alpha_2$	$d_2$	$\theta_2$	$r_2$
...	...	...	...	...	...	...	...
$i$	$a_i$	$\mu_i$	$\sigma_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$	$r_i$

TABLEAU 3.1 – Table de paramètres de Khalil et Kleinfinger : représentation standardisée d'un robot manipulateur.

Les paramètres de Khalil et Kleinfinger du tableau 3.1 définissent la position relative et le type de chaque articulation, avec :

- $a$  le numéro du corps précédent.
- $\mu$  le type de liaison :  $\mu = 1$  si l'articulation est actionnée,  $\mu = 0$  pour une articulation passive.
- $\sigma$  définit le type de liaison (0 = liaison pivot, 1 = liaison glissière).
- $\alpha_i$  l'angle entre  $z_{i-1}$  et  $z_i$  autour de  $x_{i-1}$ , en ( $rad$ ).
- $d_i$  la distance entre  $z_{i-1}$  et  $z_i$  selon  $x_{i-1}$ , en ( $m$ ).
- $\theta_i$  l'angle entre  $x_{i-1}$  et  $x_i$  autour de  $z_i$ , en ( $rad$ ).
- $r_i$  la distance entre  $x_{i-1}$  et  $x_i$  selon  $z_i$ , en ( $m$ ).

### 3.1.2.3 Paramètres mécaniques et maillage

La table 3.1 définit la géométrie du système équivalent rigide (ERLS). Pour décrire complètement le système, il reste à définir les paramètres mécaniques de masse, de raideur et d'amortissement de chaque composant.

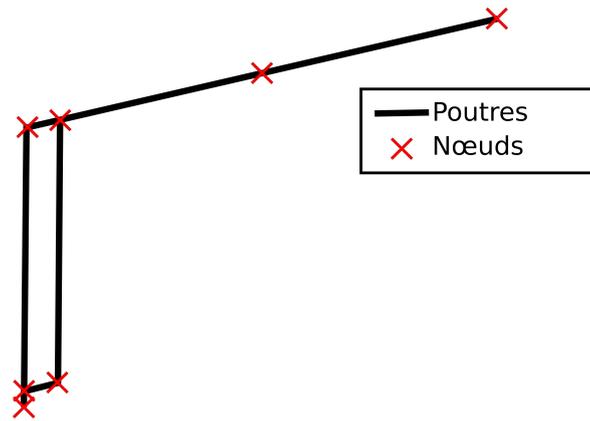


FIGURE 3.3 – Exemple de maillage du robot YAKA : seul le plus grand des trois segments du robot est divisé en deux poutres distinctes pour pouvoir prendre en compte son deuxième mode de vibration.

Chaque liaison est décrite par des paramètres mécaniques décrivant sa raideur et son amortissement pour les six degrés de liberté :

- Trois raideurs en torsion  $K_{rx}$ ,  $K_{ry}$ ,  $K_{rz}$ , associées aux coefficients d'amortissement visqueux  $C_{rx}$ ,  $C_{ry}$ ,  $C_{rz}$ .
- Une raideur en translation axiale  $K_a$  associée à un coefficient d'amortissement visqueux  $C_a$  (un degré de liberté, dans l'axe de la liaison).
- Une raideur en translation radiale  $K_r$  associée à un coefficient d'amortissement visqueux  $C_r$  (deux degrés de liberté orthogonaux à l'axe de la liaison).

Chaque segment flexible est subdivisé en plusieurs poutres de Euler-Bernoulli, il convient donc de choisir un maillage adapté, suivant les critères suivants :

- Afin d'assurer le respect des hypothèses de modélisation, chaque poutre d'Euler-Bernoulli doit être suffisamment longue devant son diamètre. Cette contrainte fixe le nombre maximum de poutres de Euler Bernoulli (et donc de points de maillage) pour chaque segment en fonction de sa section.
- Chaque segment du robot possède en réalité une infinité de modes de vibration, mais le maillage doit contenir autant de poutres que de modes à considérer. Le choix du nombre de modes à représenter se faisant en fonction de la valeur de leurs fréquences propres, on peut déduire un nombre minimum de poutres requis à la représentativité du modèle.
- Les actions extérieures et les masses localisées peuvent être prises en compte uniquement au niveau des nœuds du maillage.
- La complexité du modèle étant directement liée au nombre de nœuds dans le maillage, il est préférable de limiter la finesse au strict minimum nécessaire, en respectant les contraintes précédentes.

La figure 3.3 présente le maillage retenu selon ces critères pour le robot YAKA.

Chaque poutre du maillage est décrite par les paramètres suivants :

- Sa longueur  $L$  ( $m$ ).
- Sa section  $S$  ( $m^2$ ).
- Ses moments quadratiques  $I_x$ ,  $I_y$  et  $I_z$  ( $m^4$ ).
- Son module de Young du matériau  $E$  ( $Pa$ ).

- Le module de Coulomb du matériau  $G$  (Pa).
- La masse volumique du matériau  $\rho$  ( $kg/m^3$ ).
- Des masses localisées aux deux extrémités de la poutre  $M_1$  et  $M_2$  ( $kg$ ).
- Les coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  définissant l'amortissement structural de Rayleigh du matériau.

Certains systèmes comme le robot YAKA comportent une chaîne cinématique fermée. Ce cas est traité en injectant une équation de contrainte reliant les degrés de liberté libres et actionnés dans l'équation 3.1 par le biais des multiplicateurs de Lagrange [ROGNANT et collab. \[2010\]](#).

### 3.1.2.4 Mise en équation

L'équation de Lagrange (3.1) permet d'obtenir le modèle dynamique du système à partir de la description mécanique présentée dans les parties 3.1.2.2 et 3.1.2.3 :

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\mathbf{w}}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{w}} = \mathbf{F}(\mathbf{w}) \quad (3.1)$$

Le Lagrangien du système  $\mathcal{L} = E_c - E_p$  est calculé à partir de l'énergie cinétique  $E_c$  et potentielle  $E_p$  du système, il est déduit de la description mécanique présentée précédemment. Le vecteur  $\mathbf{F}$  caractérise l'application des forces extérieures et non conservatives du système, calculé par différentiation des puissances des forces extérieures. Le vecteur  $\mathbf{w} = \begin{pmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{u} \end{pmatrix}$  regroupe les degrés de liberté rigides  $\mathbf{q}$  et flexibles  $\mathbf{u}$  du système.

### 3.1.2.5 Modèle obtenu

L'équation régissant la dynamique du système mécanique est alors obtenue sous la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{M}_{qq} & \mathbf{M}_{qu} \\ \mathbf{M}_{qu}^T & \mathbf{M}_{uu} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \ddot{\mathbf{u}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{uu} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \dot{\mathbf{u}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{uu} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{u} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{F}\mathbf{c}_q \\ \mathbf{F}\mathbf{c}_u \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{F}\mathbf{g}_q \\ \mathbf{F}\mathbf{g}_u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{\Gamma} \\ \mathbf{F}\mathbf{ext} \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Avec :

- $\mathbf{q}$  le vecteur des positions articulaires.
- $\mathbf{u}$  le vecteur des déplacements élastiques nodaux.
- $\mathbf{M}_{ij}$  les matrices de masse du système, relative aux degrés de liberté rigides ( $\mathbf{M}_{qq}$ ), flexibles ( $\mathbf{M}_{uu}$ ) et les termes de couplage rigide/flexible ( $\mathbf{M}_{qu}$ ) (dépend de  $\mathbf{q}$ ).
- $\mathbf{K}_{uu}$  la matrice de raideur (dépend de  $\mathbf{q}$ ).
- $\mathbf{C}_{uu}$  l'amortissement structural et dans les liaisons (dépend de  $\mathbf{q}$ ).
- $\mathbf{\Gamma}$  le vecteur de l'action mécanique des actionneurs.
- $\mathbf{F}\mathbf{ext}$  les forces extérieures appliquées aux différents nœuds du maillage.
- $\mathbf{F}\mathbf{c}_q$  et  $\mathbf{F}\mathbf{c}_u$  le vecteur des actions centrifuges et Coriolis appliquées respectivement aux degrés de liberté rigides et flexibles (dépend de  $\mathbf{q}$  et  $\dot{\mathbf{q}}$ ).
- $\mathbf{F}\mathbf{g}_q$  et  $\mathbf{F}\mathbf{g}_u$  les actions gravitaires appliquées respectivement aux degrés de liberté rigides et flexibles (dépend de  $\mathbf{q}$ ).

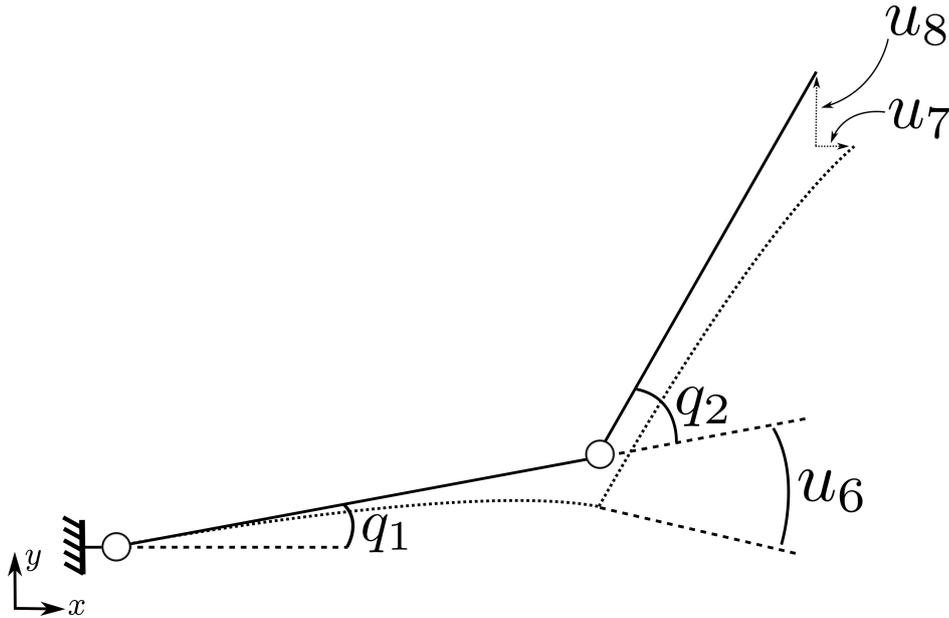


FIGURE 3.4 – Représentation de l'état d'un système 2R-plan flexible à partir de son vecteur d'état. Les variables articulaires issues du vecteur d'état  $\mathbf{q}$  décrivent le modèle rigide équivalent (ERLS), le vecteur d'état flexible  $\mathbf{u}$  représentant le déplacement cartésien de chaque nœud du robot flexible, relativement à son équivalent rigide.

On reconnaît le modèle dynamique rigide du système, tel qu'il est habituellement formulé [KHALIL et DOMBRE \[2004\]](#) :

$$\mathbf{M}_{qq}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}\mathbf{c}_q + \mathbf{F}\mathbf{g}_q = \mathbf{I} \quad (3.3)$$

La figure 3.4 présente un système de type 2R-plan, représenté par son vecteur d'état  $\begin{pmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{u} \end{pmatrix}$ . L'état rigide tracé en traits pleins est défini par le vecteur  $\mathbf{q}$ , c'est la représentation du système rigide équivalent (ERLS). Le système flexible est représenté en pointillés, reconstruit à partir du vecteur d'état flexible  $\mathbf{u}$  qui contient l'information du déplacement cartésien (dans les six degrés de liberté) de chaque nœud maillage du robot déformé, par rapport à la position du nœud correspondant sur le système rigide équivalent ERLS.

Le modèle obtenu permet de décrire la dynamique de la structure flexible (hors actionneurs et système de commande). La paramétrisation des degrés de liberté flexibles dans le repère cartésien facilite l'exploitation du modèle et la compréhension des résultats. Le modèle obtenu est analytique, basé sur des paramètres qui correspondent à des grandeurs physiques du système (raideur, masse, etc.). Une attention particulière est portée pour conserver le sens physique des modèles utilisés dans ce travail, car c'est une notion très importante pour certaines utilisations, notamment le recalage expérimental et la conception.

Si l'on considère une modélisation simple du bras YAKA telle que représentée sur la figure 3.3, il y a trois degrés de liberté rigides ( $dim(\mathbf{q}) = 3$ ) et 13 nœuds dans le maillage (deux nœuds par articulation, non visibles sur la figure), chacun associé à 6 degrés de liberté. Le vecteur d'état flexible  $\mathbf{u}$  est donc de dimension  $dim(\mathbf{u}) = (78 \times 1)$ . Le vecteur  $\begin{pmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{u} \end{pmatrix}$  est donc de dimension  $(81 \times 1)$ . La matrice  $\mathbf{M}_{qq}$  est alors de dimension  $(3 \times 3)$ ,  $\mathbf{M}_{qu}$  de dimension  $(3 \times 78)$  et les matrices  $\mathbf{M}_{uu}$ ,  $\mathbf{K}_{uu}$  et  $\mathbf{C}_{uu}$  de dimension  $(78 \times 78)$ . Enfin, les vecteurs  $\mathbf{I}$ ,  $\mathbf{F}\mathbf{c}_q$  et  $\mathbf{F}\mathbf{g}_q$  sont de dimension  $(3 \times 1)$  et les vecteurs  $\mathbf{F}\mathbf{e}_{ext}$ ,  $\mathbf{F}\mathbf{c}_u$  et  $\mathbf{F}\mathbf{g}_u$  de dimension  $(78 \times 1)$ .

### 3.1.2.6 Modélisation des efforts extérieurs

Les effets inertiels et de la gravité sont les seules actions distribuées de manière continue qui sont considérées dans le processus de modélisation implémenté. Il est cependant possible de modéliser d'autres actions extérieures distribuées comme des frottements visqueux dus au mouvement du système dans un fluide (traînée aérodynamique ou hydrodynamique) en les prenant en compte dans l'évaluation des coefficients énergétiques de l'équation de Lagrange.

Les actions ponctuelles appliquées en un nœud du maillage peuvent en revanche être modélisées sans limitation puisqu'elles font partie du vecteur d'actions extérieures dans le modèle dynamique. Les actions réparties peuvent alors être approximées par des actions ponctuelles, localisées aux différents nœuds du maillage choisi (voir 3.1.2.3).

Le vecteur **Fext** est le torseur de ces actions mécaniques, ses 6 dernières composantes correspondent à celles appliquées en bout de bras, qui représente les interactions avec l'environnement<sup>1</sup>.

### 3.1.3 Modèle d'actionneurs

Le comportement du système mécanique représenté par l'équation (3.2) est notamment régi par les efforts produits par les actionneurs. Dans le cas d'un actionneur idéal, cet effort est égal à la consigne issue du contrôleur. En pratique, le système d'actionnement fait apparaître de nombreuses imperfections dues au comportement des moteurs et éléments de transmission de puissance.

On suppose en général que la rotation des rotors des moteurs est uniquement due à leur rotation propre. Cette hypothèse est acceptable dans la plupart des cas, lorsque les rapports de réduction utilisés sont grands (très courant en robotique) donc la vitesse de rotation propre des moteurs est très grande devant celles des segments qui les embarquent DE LUCA et BOOK [2016].

Les interactions entre les pièces mobiles des actionneurs et le bras comme l'effet gyroscopique sont aussi négligées, en vertu de la faible inertie relative des rotors des moteurs (qui créent donc des couples gyroscopiques très faibles).

Par exemple, le bras YAKA a des actionneurs pouvant atteindre (en amont des réducteurs)  $3000 \text{ tr/min}$ , soit  $\omega_{moteur} = 314 \text{ rad/s}$ , dont l'inertie en rotation est de l'ordre de  $I_{eq} = 7 \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2$  (inertie équivalente du réducteur côté moteur et inertie du rotor compris). Les vitesses de rotation maximales des segments du bras sont de l'ordre de  $\dot{q} = 3 \text{ rad/s}$ , donc un couple gyroscopique maximal de l'ordre de  $I_{eq}\omega\dot{q} \approx 1 \text{ N.m}$ , soit trois ordres de grandeur en dessous du couple opérationnel des moteurs.

Les motoréducteurs électriques à fort rapport de réduction présents dans la plupart des robots manipulateurs présentent une dynamique propre, inhérente à la motorisation électrique et aux transmissions mécaniques (temps de réponse électrique, jeux, frottements, flexibilités, etc.).

Le modèle proposé sur la figure 3.5 fait apparaître les différents paramètres d'un motoréducteur électrique classique.

On opte pour un modèle de moteur électrique parfait, de constantes de courant  $K_i$  et de vitesse  $K_v$  (supposées connues). L'inertie de l'arbre moteur est notée  $I_m$ .

Les réducteurs et transmissions sont représentés par un rapport de transmission idéal  $R$ , un frottement sec  $F_s$  et visqueux  $F_v$  équivalents en sortie de transmission. L'inertie

1. Seules ces composantes ne sont pas nulles, si on considère que le seul contact entre le robot et l'environnement s'effectue au niveau du bout du bras.

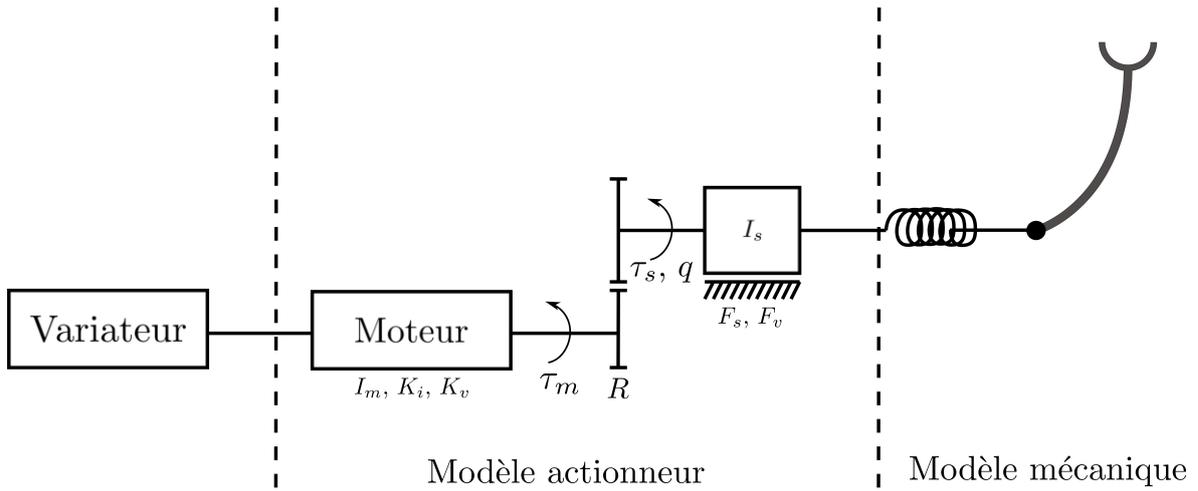


FIGURE 3.5 – Modèle d'actionneur électromécanique classique.

équivalente du réducteur en sortie est notée  $I_s$ . Le couple moteur est noté  $\tau_m$  et le couple de sortie  $\tau_s$ .

La position angulaire en sortie de réducteur est la variable articulaire  $q$ . L'inertie équivalente à  $I_m$  et  $I_s$ , rapportée en sortie de réducteur est notée  $I_{eq}$  et s'écrit :

$$I_{eq} = \frac{I_m}{R^2} + I_s \quad (3.4)$$

Le modèle mécanique de l'actionneur s'écrit donc en sortie de réducteur :

$$I_{eq}\ddot{q} = \tau_s - F_v\dot{q} - F_s \text{sign}(\dot{q}) \quad (3.5)$$

Le frottement sec représenté par la fonction signe notée  $\text{sign}()$  est discontinu au voisinage de zéro, ce qui pose des problèmes de résolution numérique en simulation. De plus, bien que le frottement sec s'apparente à une discontinuité de manière macroscopique, son comportement physique réel est nécessairement continu. Pour pallier à ces limitations, la fonction signe peut être approchée par une fonction sigmoïde continue [SPECKER et collab. \[2014\]](#), comme représentée sur la figure 3.6.

La fonction sigmoïde utilisée s'écrit :

$$\text{sigmoid}(\dot{q}) = 2 \left( \frac{1}{1 + e^{-\lambda\dot{q}}} \right) - 1 \quad (3.6)$$

Le modèle d'actionneur retenu est alors donc le suivant :

$$I_{eq}\ddot{q} = \tau_s - F_v\dot{q} - F_s \left( 2 \left( \frac{1}{1 + e^{-\lambda\dot{q}}} \right) - 1 \right) \quad (3.7)$$

Le paramètre  $\lambda$  définit la pente de la sigmoïde, tel que représenté sur la figure 3.6.

### 3.1.4 Limites du modèle

Compte tenu des hypothèses de modélisation, l'approche n'est pas adaptée à des systèmes sujets à de très grandes déformations, faits de matériaux fortement non homogènes (et/ou anisotropes), de segments de forme complexe, etc.

Le modèle de poutres de Timoshenko permettrait de prendre en compte l'effet de cisaillement qui est négligé par le modèle de Euler-Bernoulli. Cependant, la formulation

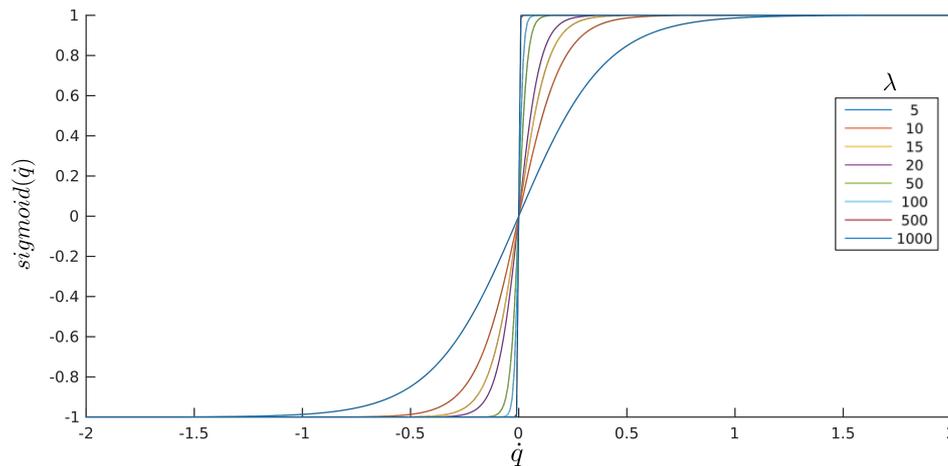


FIGURE 3.6 – Influence du paramètre  $\lambda$  sur la sigmoïde  $2 \left( \frac{1}{1+e^{-\lambda q}} \right) - 1$ . La sigmoïde s'apparente d'autant plus à une discontinuité que le paramètre  $\lambda$  est grand.

analytique est plus simple avec le modèle d'Euler-Bernoulli retenu et convient dans le cas de robots qui ne sont pas soumis à des déformations très importantes, comme le robot YAKA.

Ces limites sont évaluées dans le cadre des travaux expérimentaux menés sur le robot YAKA. Les résultats présentés dans la partie 3.2 montrent que le modèle obtenu en pratique est très satisfaisant (voir partie 3.2.5), ce qui permet de vérifier que les outils proposés sont bien adaptés à l'application visée.

De nombreux phénomènes physiques généralement négligeables doivent être pris en compte si un niveau de finesse plus important est nécessaire ou si l'environnement les rend dominants. En effet, certaines applications comme la robotique sous-marine ou spatiale font respectivement apparaître des forces de frottement fluide ou des contraintes internes importantes dues à de forts gradients de température. Ces phénomènes ne pouvant pas être pris en compte en tant qu'interactions extérieures dans le vecteur **Fext**, ils doivent être formulés lors de l'obtention du modèle dynamique détaillée par **ROGNANT et collab. [2010]**, ce qui dépasse le cadre de notre étude.

## 3.2 Recalage et validation expérimentale

Le modèle théorique décrit dans la partie 3.1 comporte de nombreux paramètres relatifs aux propriétés des différents éléments (masses, raideurs, amortissements, etc.), qui doivent être associés à des valeurs numériques réalistes.

Des bases de données ou les fiches techniques fournies par les fabricants des composants permettent d'obtenir certaines de ces valeurs numériques, leur précision est cependant rarement renseignée, certains paramètres ne sont simplement pas communiqués (amortissement et raideur de la plupart des liaisons passives par exemple).

Un recalage sur des mesures expérimentales permet d'affiner la représentativité globale du modèle et de chacun de ses paramètres.

La partie 2.2 présente les principales méthodes adaptées respectivement aux robots manipulateurs rigides et aux structures flexibles. Les travaux présentés ci-dessous proposent une méthodologie adaptée aux robots manipulateurs flexibles, elle est illustrée par les expérimentations menées sur le robot YAKA.

La confrontation des modèles une fois recalés aux mesures expérimentales permet d'évaluer à la fois les outils de modélisation et de recalage puisque l'objectif final de ces

deux étapes est d'obtenir un modèle fidèle à la réalité.

### 3.2.1 Méthodologie

L'étape de recalage expérimental a généralement pour but de régler les paramètres du modèle afin de maximiser la corrélation avec le système réel d'un point de vue global.

Cependant, un des objectifs est de conserver le sens physique du modèle (sens physique de chaque paramètre et des valeurs numériques associées) afin de pouvoir analyser l'impact réel de chaque paramètre physique sur les résultats et de rendre le modèle utilisable en dehors des conditions dans lesquelles il a été recalé. Par exemple, il faut pouvoir prédire correctement le comportement du système avec une masse en bout de bras différente de celle présente lors du recalage expérimental (voir tableau 3.5). C'est une problématique courante lorsque l'on change d'effecteur en bout de bras d'un robot.

En pratique, le recalage d'un modèle dynamique flexible n'est pas trivial. En effet, il y a de très nombreux paramètres inconnus (12 par liaison et 12 par poutre, soit environ 120 paramètres dans notre exemple) à recaler sur la base d'une quantité limitée de données expérimentales. De plus, certains paramètres ne sont pas (ou peu) observables et le besoin de cohérence globale du modèle n'est pas toujours conciliable avec la conservation du sens physique de chaque composant pris individuellement.

Pour répondre à ces problématiques, la méthodologie de recalage proposée est présentée en étapes successives :

1. Mesure des paramètres physiques précisément mesurables avec des moyens de métrologie classiques : métrologie dimensionnelle précise des segments et pièces d'interfaces, pesée de chaque composant mécanique isolé. Cette étape permet de figer les grandeurs dont les valeurs sont connues, pour le reste de la procédure d'identification ( $L$ ,  $\rho$ ,  $S$ ,  $I_x$ ,  $I_y$ ,  $I_z$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ ).
2. Recalage expérimental des paramètres des composants pris séparément :
  - Les paramètres de raideur et d'amortissement de chaque segment pris séparément sont recalés à l'aide d'une analyse vibratoire et de chargements statiques (voir partie 3.2.2).
  - En fonction des moyens d'essai disponibles (bancs d'essai spécifiques et/ou possibilités de test d'un sous-ensemble isolé), les modèles mécaniques des actionneurs et liaisons sont recalés. Cette étape est généralement plus complexe, faute de moyens spécialisés permettant de mesurer directement les grandeurs physiques (raideur, frottements et inertie). Une identification du comportement des actionneurs isolés permet cependant de valider le choix d'un modèle et d'obtenir des paramètres numériques cohérents (voir partie 3.2.3).
3. Initialisation des paramètres du modèle complet avec les valeurs identifiées (longueurs, masses, paramètres de matériaux et d'actionneurs), à défaut avec valeurs spécifiées par les fabricants. Les grandeurs de raideur inconnues (ni spécifiées ni mesurées et d'ordre de grandeur inconnu) sont choisies arbitrairement grandes, les amortissements inconnus sont choisis nuls.
4. Analyse de sensibilité du modèle aux paramètres restants en fonction de la position articulaire du robot pour déterminer un nombre limité de configurations articulaires qui maximisent la sensibilité des paramètres à identifier (deux configurations sont choisies de manière empirique dans le cas du robot YAKA).
5. Recalage des paramètres sur la base d'une analyse vibratoire expérimentale sur le système assemblé (principalement des paramètres de raideur et d'amortissement

des liaisons et actionneurs, voir 3.2.4). Ce processus est effectué manuellement de manière itérative mais pourrait être automatisé.

6. Validation sur des mesures temporelles, si disponibles. Le modèle complet précédemment recalé est confronté à des résultats obtenus avec des sollicitations différentes, par exemple au cours de trajectoires dynamiques typiques (non effectué sur le robot YAKA, par manque de temps et de moyens de mesure adaptés à un volume de travail de grande taille).
7. Analyse du résultat obtenu :
  - Évaluation de la qualité globale du modèle : confrontation des données expérimentales (fréquentielles et temporelles) aux prédictions du modèle (voir tableau 3.5).
  - Évaluation de la cohérence entre les paramètres obtenus après identification du système assemblé. Puisque le recalage vise à minimiser l'écart entre le comportement global du système réel et de son modèle, il est possible que les paramètres numériques répondant à cet objectif ne soient pas fidèles aux paramètres réels de chaque composant. Cet éventuel écart entre les paramètres réels et ceux qui maximisent la cohérence du comportement global sont révélateurs de défauts du modèle analytique, en particulier des choix de modélisation (modèles de segments, de liaisons, d'actionneurs, etc.).
  - Si la fidélité globale du modèle est insuffisante ou si les paramètres du modèle ne sont pas cohérents, on peut remettre en question les choix de modélisation (maillage, masses localisées, respect des hypothèses, etc.) ou le processus de recalage (méthode, précision des mesures, etc.).

Les principales étapes de cette méthodologie sont détaillées dans les parties suivantes, elles sont illustrées par les travaux de recalage qui sont menés sur le robot YAKA.

### 3.2.2 Recalage expérimental des segments

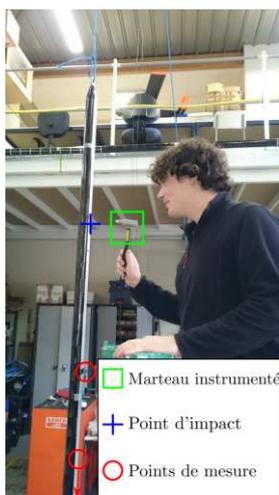


FIGURE 3.7 – Analyse vibratoire expérimentale d'un segment isolé.

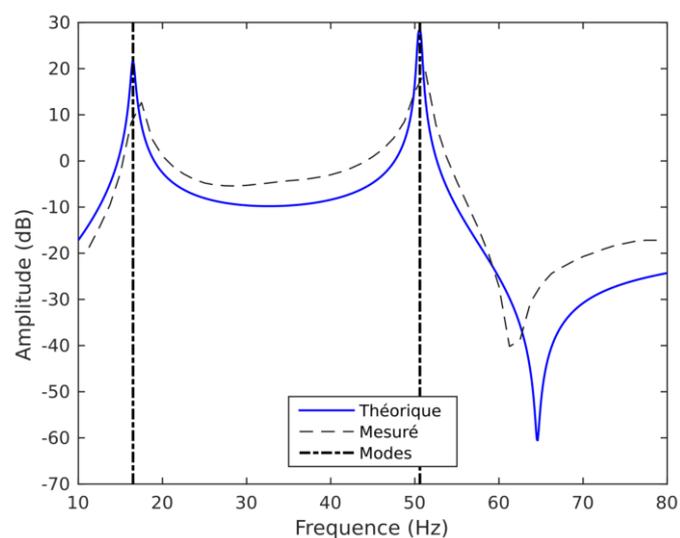


FIGURE 3.8 – Résultat d'identification d'un segment isolé du robot YAKA.

Les paramètres mécaniques de chaque segment peuvent être recalés séparément, ce qui limite le nombre de variables identifiées simultanément, puisque seuls les paramètres

liés aux matériaux sont concernés :  $E$ ,  $G$ ,  $\alpha$  et  $\beta$ . On suppose que les propriétés dimensionnelles ( $S$ ,  $L$ ) et de masse ( $\rho$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ ) sont mesurées via des moyens classiques).

Une analyse vibratoire expérimentale permet de déterminer les modes propres d'un segment isolé, suspendu par une corde élastique pour s'approcher de conditions aux limites Libre-Libre (voir figure 3.7). La figure 3.8 montre que le modèle obtenu est fidèle, en particulier au niveau des pics d'amplitude correspondant aux modes propres. Cette étape permet d'identifier les paramètres de matériau homogène ( $E$ ,  $G$ ,  $\alpha$  et  $\beta$ ) équivalents au comportement du matériau composite utilisé.

L'analyse vibratoire permet d'identifier le comportement sur un large spectre fréquentiel, mais met en jeu des niveaux de déformation très faibles. Une mesure de déformation sous un chargement statique connu permet de vérifier que le module d'Young  $E$  déterminé par l'analyse vibratoire est cohérent, y compris avec des déplacements élastiques plus importants. Cette étape permet de faire apparaître d'éventuelles non-linéarités dans le comportement du matériau, qui ne sont pas à écarter dans le cas de matériaux composites qui ne respectent pas a priori toutes les hypothèses du modèle de poutres de Euler-Bernoulli utilisé.

Par exemple, on place un segment de longueur  $L$  sur deux appuis avec un chargement statique connu  $F$  appliqué au milieu pour mesurer la flèche  $f$ , comme sur la figure 3.9. L'équation (3.8) est alors utilisée pour déterminer le module de Young  $E$  du matériau, connaissant le moment quadratique  $I$  de la poutre et le chargement  $F$  :

$$f = \frac{FL^3}{48EI} \quad (3.8)$$

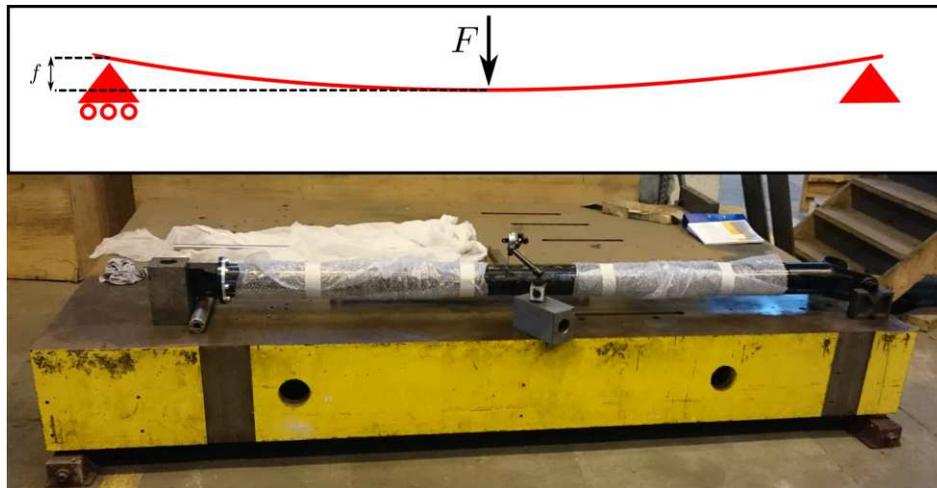


FIGURE 3.9 – Chargement statique d'un segment du robot YAKA pour le recalage de ses paramètres de raideur : le segment est placé sur deux appuis, un comparateur relève la valeur de déformation en son milieu, sous un chargement statique connu (dispositif d'application de l'effort non présent sur la photographie).

Les mesures effectuées sur le grand segment du robot YAKA sont données dans le tableau 3.2. Les résultats montrent que le module de Young recalé avec les différentes méthodes est significativement plus faible que la donnée constructeur (écart de environ 40%, confirmé par analyse vibratoire). L'écart de module de Young équivalent entre les deux valeurs de chargement statique s'explique par le comportement non-linéaire du matériau composite utilisé.

Donnée constructeur	Analyse vibratoire	Chargement statique (F = 20N)	Chargement statique (F = 200N)
85GPa	50GPa	50GPa	57 GPa

TABLEAU 3.2 – Comparaison du module de Young théorique (donnée constructeur)  $E$  du grand segment du robot YAKA avec celui identifié par chargement statique et analyse vibratoire.

### 3.2.3 Identification dynamique des actionneurs

Certaines propriétés mécaniques des actionneurs sont souvent spécifiées par les fournisseurs. C'est par exemple le cas de l'inertie des différents éléments et des rapports de transmission.

En revanche, les frottements sont généralement moins connus et dépendent de nombreux paramètres propres à l'assemblage (précontraintes, alignements, etc.) et à l'environnement (température, hygrométrie, etc.).

Divers modèles de frottement peuvent être considérés et donnent des résultats plus ou moins représentatifs selon leur complexité. Les parties suivantes proposent d'identifier le comportement des actionneurs du robot YAKA en considérant un modèle de frottement classique (frottement sec et frottement visqueux).

#### 3.2.3.1 Identification du frottement sec

Le frottement sec dans les actionneurs peut être facilement observé en effectuant des mouvements à vide (segments démontés) et à très faible vitesse. En effet, avec  $\ddot{q} \approx 0$  et  $\dot{q} \approx 0$ , l'équation (3.5) se réduit alors à :

$$\tau_s = F_s \text{sign}(\dot{q}) \quad (3.9)$$

La figure 3.10 montre les mesures effectuées sur le robot YAKA, qui permettent d'identifier directement un frottement sec symétrique de 60N.m.

L'actionneur étant asservi en position pour ce test (correcteur PD, sans terme intégral), on remarque que le frottement sec est encore visible à vitesse nulle, puisque le couple en sortie d'asservissement est alors en équilibre avec le frottement sec.

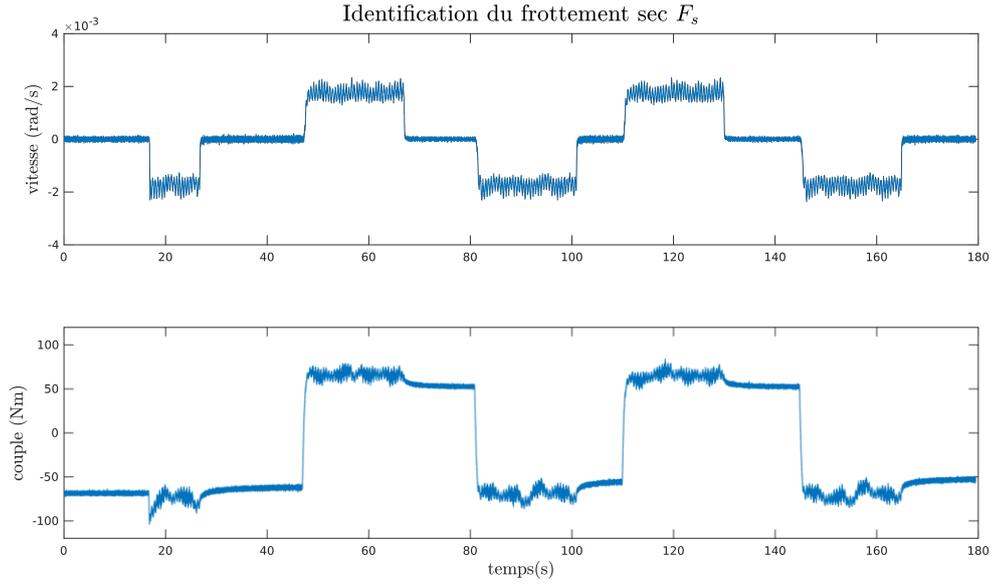


FIGURE 3.10 – Identification du frottement sec d'un actionneur du robot YAKA : l'actionneur est mis en mouvement à vitesse très faible pour isoler le frottement sec du frottement visqueux. L'opération est répétée dans les deux sens de rotation pour identifier une éventuelle assymétrie.

### 3.2.3.2 Identification complète par erreur de modèle

Afin d'isoler la dynamique d'un actionneur, les segments flexibles sont remplacés par des masses rigides, d'inertie similaire (voir figure 3.11).

Les modèles proposés dans la partie 3.1.3 sont utilisés pour l'identification des actionneurs. L'identification par erreur de modèle permet d'obtenir le jeu de paramètres qui minimise l'écart entre des mesures et le modèle, au sens des moindres carrés.

Dans ces conditions expérimentales simplifiées, on impute l'inertie des masses ajoutées pour l'identification dans l'inertie de sortie équivalente  $I_{eq}$ . La composante d'action extérieure liée à la gravité est aussi ajoutée et notée  $Grav(q)$ .

Le modèle dynamique du système, dérivé de 3.5 s'écrit :

$$I_{eq}\ddot{q} = \tau_s - F_v\dot{q} - F_s \text{sign}(\dot{q}) + Grav(q) \quad (3.10)$$

Il peut alors être mis sous la forme :

$$\begin{pmatrix} \ddot{q} & \text{sign}(\dot{q}) & \dot{q} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{eq} \\ F_s \\ F_v \end{pmatrix} = Grav(q) + \tau_s \quad (3.11)$$

On note respectivement  $\mathbf{q}_t$ ,  $\dot{\mathbf{q}}_t$ ,  $\ddot{\mathbf{q}}_t$  et  $\tau_{s_t}$  les vecteurs des données temporelles mesurées expérimentalement des variables  $\mathbf{q}$ ,  $\dot{\mathbf{q}}$ ,  $\ddot{\mathbf{q}}$  et  $\tau_s$ .

L'équation d'identification s'écrit :

$$\begin{pmatrix} I_{eq} \\ F_s \\ F_v \end{pmatrix} = (\ddot{\mathbf{q}}_t \quad \text{sign}(\dot{\mathbf{q}}_t) \quad \dot{\mathbf{q}}_t)^+ (Grav(\mathbf{q}_t) + \tau_{s_t}) \quad (3.12)$$

L'opérateur  $^+$  désigne la pseudo-inverse de Moore-Penrose.

Dans cet exemple, cette méthode est appliquée à un actionneur du robot YAKA, sur des jeux de données correspondant à des mouvements sinusoïdaux de différentes fréquences et amplitudes.

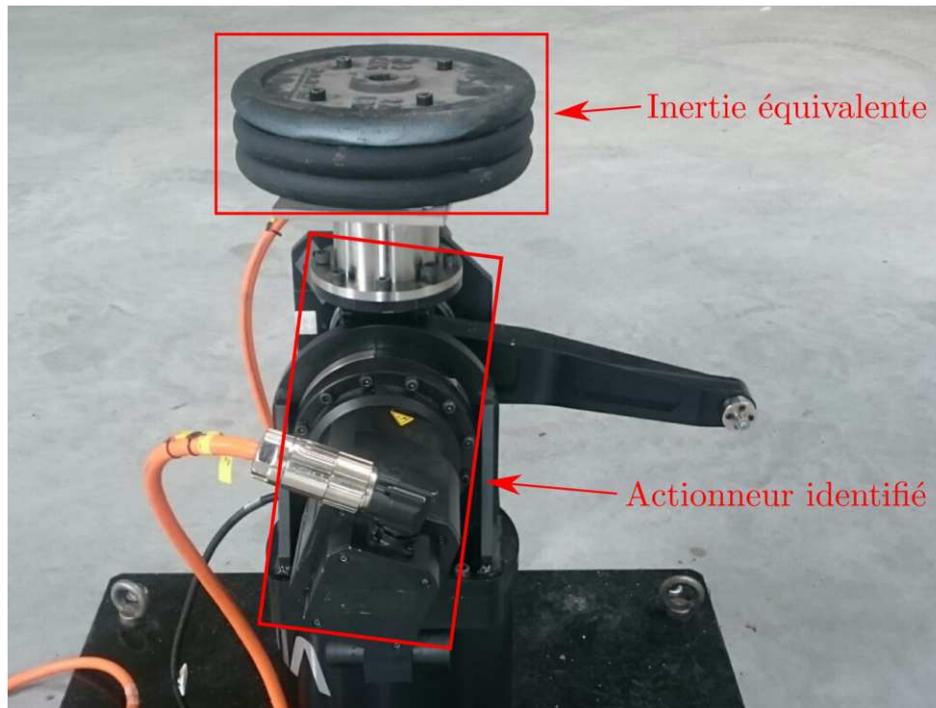


FIGURE 3.11 – Dispositif d'identification d'un actionneur du robot YAKA : une charge de masse et d'inertie connue (de l'ordre de grandeur de l'inertie des segments du robot) est placée en sortie d'un actionneur pour permettre une identification dynamique représentative, sans subir l'effet des flexibilités des segments.

Les résultats obtenus sont présentés sur les figures 3.12 et 3.13 pour deux jeux de données différents. Les données mesurées (en bleu) sont superposées à celles prédites par le modèle (en orange, couple recalculé à partir des autres données temporelles et des paramètres identifiés). On s'intéresse aux courbes présentant l'évolution du couple en fonction de la vitesse (à droite sur ces deux figures), qui sont plus lisibles que l'évolution temporelle (à gauche).

La table 3.3 résume les paramètres obtenus pour tous les jeux de données considérés. Les valeurs moyennes peuvent être utilisées comme paramètres du modèle, et offrent une bonne représentativité à des fins d'analyse énergétique par exemple. La figure 3.14 présente les résultats d'identification. À gauche, chaque jeu de données (correspondant à une des courbes fermées) est confronté individuellement aux prédictions effectuées avec le jeu de paramètres identifiés correspondants. À droite, on confronte le modèle unique retenu (jeu de paramètres moyens figé) à toutes les données collectées, il offre une corrélation globale de 0.9876, qui est satisfaisante pour notre application.

Les différentes courbes fermées imbriquées correspondent chacune à une trajectoire sinus de paramètres donnés, de la plus faible à la plus forte dynamique en partant de l'intérieur vers l'extérieur. Il apparaît clairement que lorsque les paramètres sont identifiés séparément (figure de gauche), les résultats sont bien meilleurs que si l'on considère des paramètres moyens (figure de droite). Ce constat illustre les limites du modèle utilisé, qui ne semble pas adapté pour décrire le système sur toute sa plage de fonctionnement (jeux de paramètres différents pour chaque point de fonctionnement considéré).

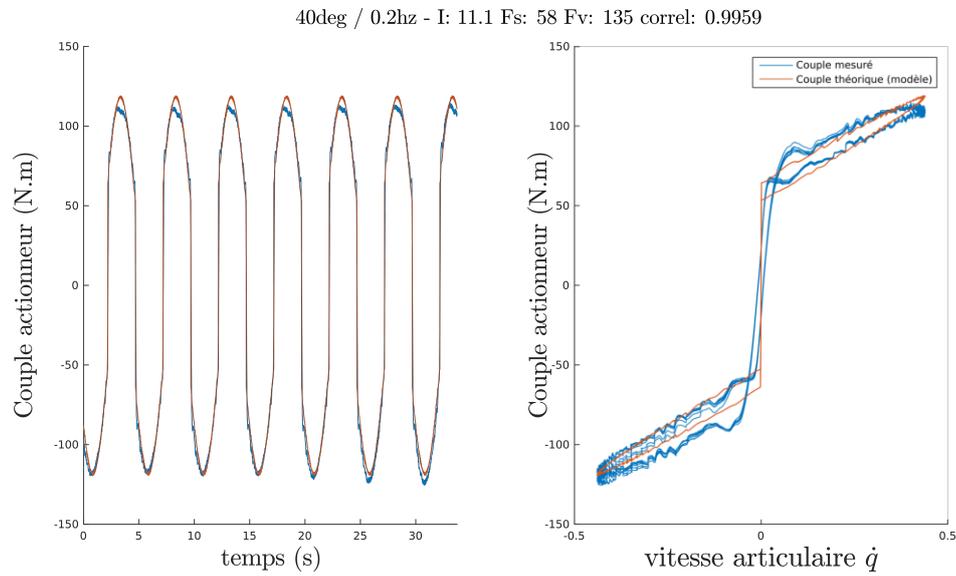


FIGURE 3.12 – Résultats d'identification à faible dynamique : on observe une bonne corrélation du modèle.

Trajectoire sinus	$I_{eq}$	$F_s$	$F_v$	Corrélation
40deg / 0.2hz	11.053	58.4792	135.4756	0.99592
40deg / 0.3hz	13.4866	62.6215	106.1767	0.99514
40deg / 0.4hz	15.3524	59.4897	87.8925	0.99507
40deg / 0.5hz	16.1751	56.9509	73.115	0.995
40deg / 0.6hz	16.6325	55.0777	59.2728	0.9952
40deg / 0.7hz	17.0094	54.3969	47.0144	0.99553
40deg / 1.0hz	17.7575	48.3511	15.6816	0.99717
60deg / 0.2hz	15.101	68.6558	88.7818	0.99647
60deg / 0.3hz	16.4422	67.1844	66.8499	0.99563
60deg / 0.5hz	16.8833	60.6337	42.9992	0.99501
Moyenne	15.5893	59.1841	72.326	0.99561

TABEAU 3.3 – Table des paramètres identifiés avec méthode de la pseudo-inverse de Moore-Penrose.

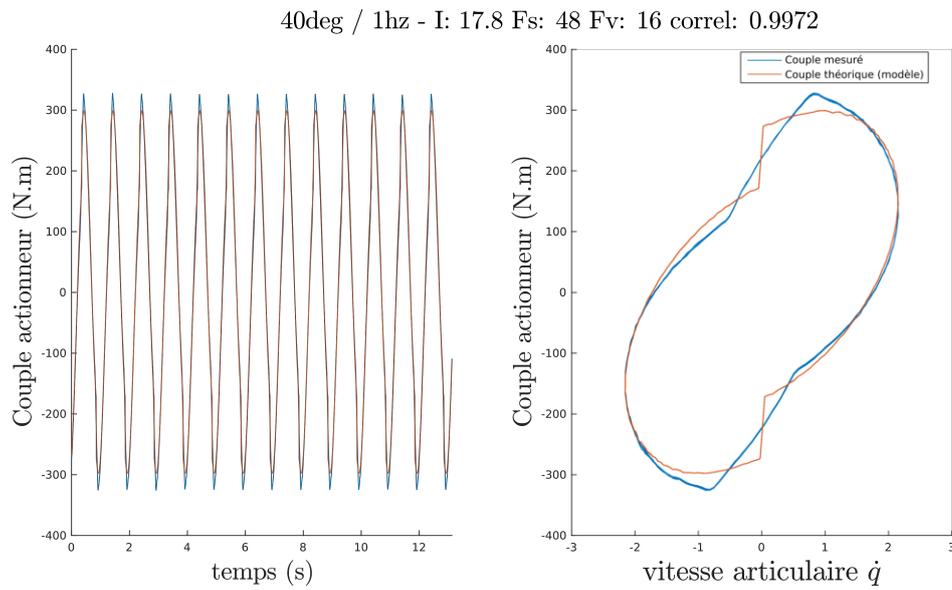


FIGURE 3.13 – Résultats d'identification à forte dynamique : les résultats temporels sont satisfaisants, mais la courbe de droite permet d'identifier une imperfection du modèle au voisinage de  $\dot{q} = 0$ .

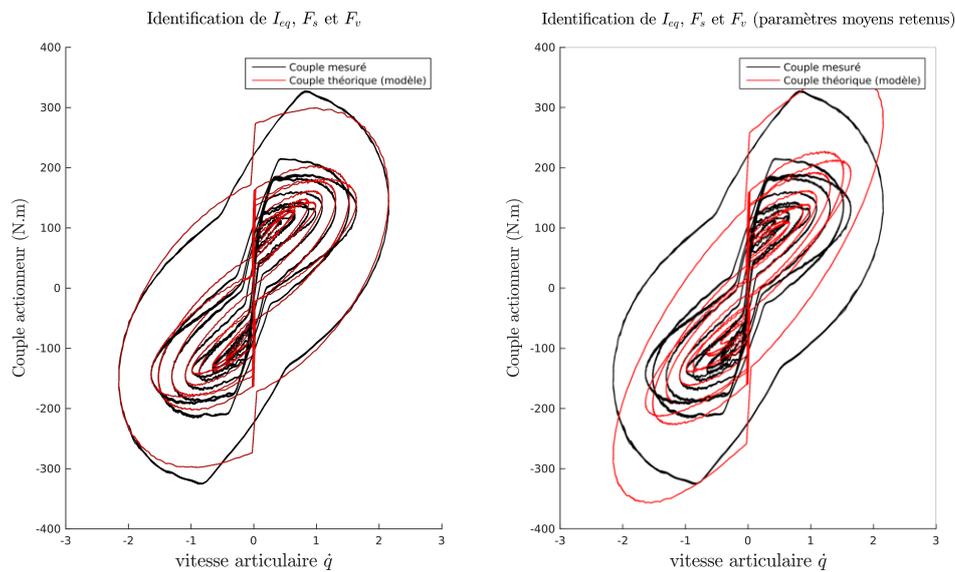


FIGURE 3.14 – Résultats d'identification sur toute la plage de fonctionnement avec la méthode de la pseudo-inverse. À gauche, les résultats obtenus en considérant pour chaque trajectoire le jeu de paramètres optimaux correspondants. À droite, on compare toutes les trajectoires avec le modèle obtenu avec les paramètres moyens.

### 3.2.3.3 Extension du modèle d'identification

Les résultats présentés dans la partie précédente montrent que les écarts entre le modèle et les mesures sont principalement concentrés au voisinage des faibles vitesses articulaires  $\dot{q}$ . Les courbes suggèrent que le modèle de frottement sec discontinu n'est pas adapté, particulièrement à forte dynamique (voir figure 3.14), puisque la pente observée sur les courbes expérimentales s'éloigne de plus en plus du modèle discontinu, lorsque la dynamique augmente (courbes extérieures, à droite sur la figure 3.14).

Afin d'améliorer la qualité du modèle d'actionneurs et de faciliter sa résolution numérique, on propose de remplacer le modèle discontinu par une fonction sigmoïde (voir partie 3.1.3).

Le modèle utilisé pour l'identification est alors l'équation (3.7). Du fait de l'apparition du paramètre supplémentaire à identifier  $\lambda$ , il n'est plus possible d'utiliser la méthode précédente pour identifier les paramètres. Des méthodes d'optimisation non-linéaire telles que celle implémentée dans la fonction *fmincon* COLEMAN et ZHANG [2011] permet en revanche de déterminer les paramètres optimaux selon un critère, en l'occurrence celui de la distance des moindres carrés (de nombreuses alternatives existent, le choix d'une méthode d'optimisation et de critères les plus pertinents dépasse ce propos).

Les résultats obtenus avec cette méthode sont présentés par le tableau 3.4 et la figure 3.15, qui comparent à nouveau les résultats d'identification avec les paramètres identifiés sur chaque jeu de donnée (à gauche) et ceux obtenus avec le modèle utilisant les paramètres moyens (à droite). La corrélation moyenne obtenue avec les paramètres moyens est de 0.9912, soit une amélioration significative de la fidélité du modèle (représentativité de la dynamique et des performances en boucle fermée), en comparaison avec le modèle de frottement discontinu.

Le choix du modèle de frottement continu améliore significativement la représentativité du modèle si l'on considère séparément chaque jeu de données avec les paramètres correspondants. En revanche, comme dans la partie précédente, le résultat obtenu sur toute la plage de fonctionnement avec le jeu de paramètres moyens montre des écarts réduits, mais toujours significatifs entre le modèle et les mesures. Une des possibilités évoquées dans la partie 3.2.3.4 est alors de faire varier les paramètres du modèle sur la plage de fonctionnement pour profiter de la très bonne fidélité du modèle, observée sur la figure 3.15 (gauche).

Trajectoire sinus	$I_{eq}$	$F_s$	$F_v$	Corrélation	$\lambda$
40deg / 0.2Hz	10.3297	66.5453	112.2737	0.99819	94.8791
40deg / 0.3Hz	13.2768	75.9881	80.6527	0.99848	39.789
40deg / 0.4Hz	15.3121	78.5421	60.8532	0.99901	20.5098
40deg / 0.5Hz	16.1189	81.2742	45.5889	0.99931	13.1968
40deg / 0.6Hz	16.6071	83.5442	32.4888	0.99943	9.4419
40deg / 0.7Hz	17.0235	89.2439	19.0467	0.99955	6.9146
40deg / 1.0Hz	17.7864	108.693	-17.4188	0.99979	3.1335
60deg / 0.2Hz	14.5557	77.9299	71.203	0.99916	69.4206
60deg / 0.3Hz	16.266	81.957	48.0613	0.99933	26.2449
60deg / 0.5Hz	16.9046	88.407	22.0631	0.99954	8.3119
Moyenne	15.4181	83.2125	47.4813	0.99918	29.1842

TABLEAU 3.4 – Table des paramètres identifiés avec la méthode d'optimisation incluant l'identification du paramètre  $\lambda$ .

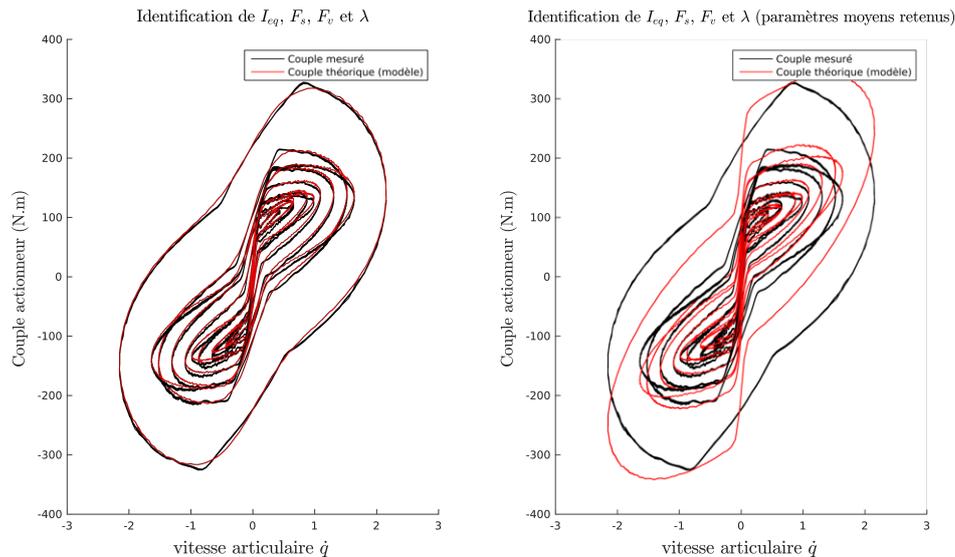


FIGURE 3.15 – Résultats d’identification sur toute la plage de fonctionnement avec la méthode d’optimisation incluant l’identification du paramètre  $\lambda$ . À gauche, les résultats obtenus en considérant pour chaque trajectoire le jeu de paramètres optimaux correspondants. À droite, on compare toutes les trajectoires avec le modèle obtenu avec les paramètres moyens.

### 3.2.3.4 Perspectives d’amélioration du modèle d’actionneurs

Les résultats obtenus dans les parties précédentes sont très encourageants, en particulier ceux obtenus par l’identification des paramètres actionneurs et de  $\lambda$ , listés dans le tableau 3.4. Cependant, chaque jeu de paramètres est valable pour un jeu de données, qui correspond à une sollicitation donnée.

Le modèle obtenu avec les paramètres moyens est satisfaisant pour la majorité des applications, dont celle du projet YAKA. Pour des applications plus exigeantes, rendre le modèle adaptatif en faisant varier les paramètres (notamment  $\lambda$  en fonction de la dynamique) semble permettre une amélioration significative, mais il est nécessaire de choisir une variable d’interpolation pertinente dont la valeur peut être calculée en temps réel, ou à minima en post-traitement.

La figure 3.16 propose de tracer l’évolution du paramètre lambda identifié en fonction de la variable homogène à un couple :  $I_{eq}\ddot{q}_{max}$ , où  $\ddot{q}_{max}$  est l’accélération articulaire maximale, pour chaque jeu de données. Cette variable est proposée à titre exemple, elle représente un ordre de grandeur du couple instantané  $\tau_s$ .

Le résultat obtenu sur la figure 3.16 suggère que l’évolution du paramètre  $\lambda$  peut être interpolée par une fonction exponentielle.

La diminution du paramètre lambda lorsque la dynamique augmente s’interprète comme un frottement sec dont la pente au voisinage de  $\dot{q} = 0$  diminue quand la dynamique augmente. Cette évolution s’explique physiquement par la déformation des composants mécaniques qui augmente avec le couple. L’évolution exponentielle du comportement de deux matériaux en contact (modèle de contact de hertz) pourrait être une explication physique de celle du paramètre  $\lambda$ .

De nombreuses questions restent en suspens, comme le choix rigoureux de la variable d’interpolation et l’interprétation physique du phénomène observé. Cependant, cette ébauche met en évidence le fait qu’il est possible d’approcher très finement le comportement des actionneurs avec des méthodes relativement simples. L’évolution observée des paramètres semble continue, monotone et répétable, le résultat obtenu pourrait être mis sous la forme d’un modèle linéaire à paramètres variants.

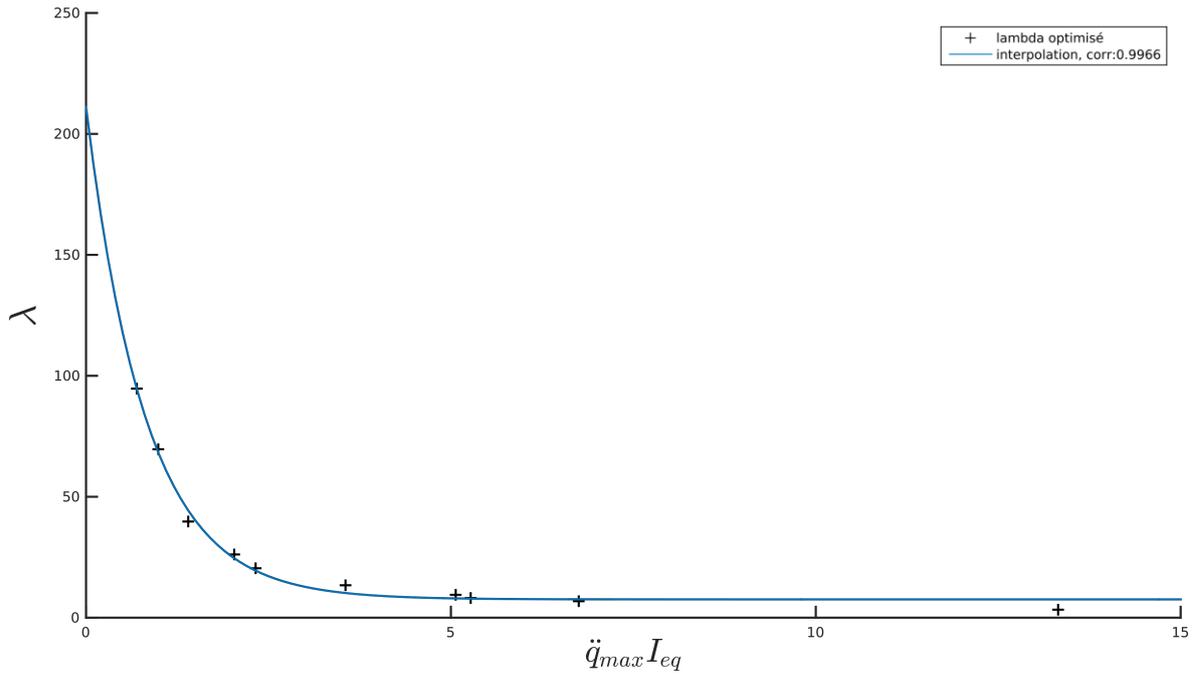


FIGURE 3.16 – Interpolation du paramètre  $\lambda$  en fonction de la dynamique (représentée par la variable  $I_{eq} \ddot{q}_{max}$ ).

### 3.2.4 Recalage expérimental du système assemblé

Une fois les différents composants recalés séparément, on s'intéresse au comportement global du système.

Une analyse vibratoire est effectuée cette fois-ci sur le système complet assemblé (voir figure 3.17) afin de recalcr les paramètres qui n'ont pas pu être identifiés par ailleurs, comme les liaisons passives et autres composants d'assemblage. Pendant cette étape, on cherche à recalcr en priorité les paramètres peu connus comme les raideurs et amortissements articulaires ( $K_{r(x,y,z)}$  et  $C_{r(x,y,z)}$ ). Le système est décrit par un très grand nombre de paramètres, ils sont alors regroupés et recalés par lot lors qu'ils désignent des propriétés physiques supposées identiques. Par exemple, le robot YAKA est constitué de trois mêmes actionneurs dont les propriétés mécaniques sont supposées identiques et recalées simultanément pour simplifier la démarche et conserver la cohérence physique du modèle.

Pour assurer la cohérence du modèle sur l'ensemble de l'espace de travail, le recalage est mené simultanément dans deux configurations articulaires différentes (configurations 1 et 2, décrites par la figure 4.13). Les résultats présentés sur les figures 3.18 et 3.19 correspondent aux fonctions de transfert qui font apparaître les modes propres (pics d'amplitudes, que l'on cherche à recalcr en priorité), correspondant à une sollicitation donnée (ici, un impact en bout de bras) et dans une direction donnée (ici dans un plan horizontal, perpendiculaire au plan formé par le bras robot). Le recalage est effectué avec des mesures dans les trois directions de l'espace et pour divers types de sollicitations, pour assurer l'observabilité de tous les modes de vibration.

En particulier en présence de composants liés par deux liaisons passives comme la bielle du robot YAKA, liée par deux rotules libres, il convient d'être vigilant sur le choix des paramètres qui semblent ne pas avoir d'influence sur le système. En effet, des degrés de liberté internes peuvent apparaître (rotation de la bielle autour de son axe dans cet exemple) et les paramètres qui les contraignent en pratique ne sont pas observables lors de l'identification (termes d'amortissement  $C_{r(x,y,z)}$  liés aux rotules). Cependant ces pa-

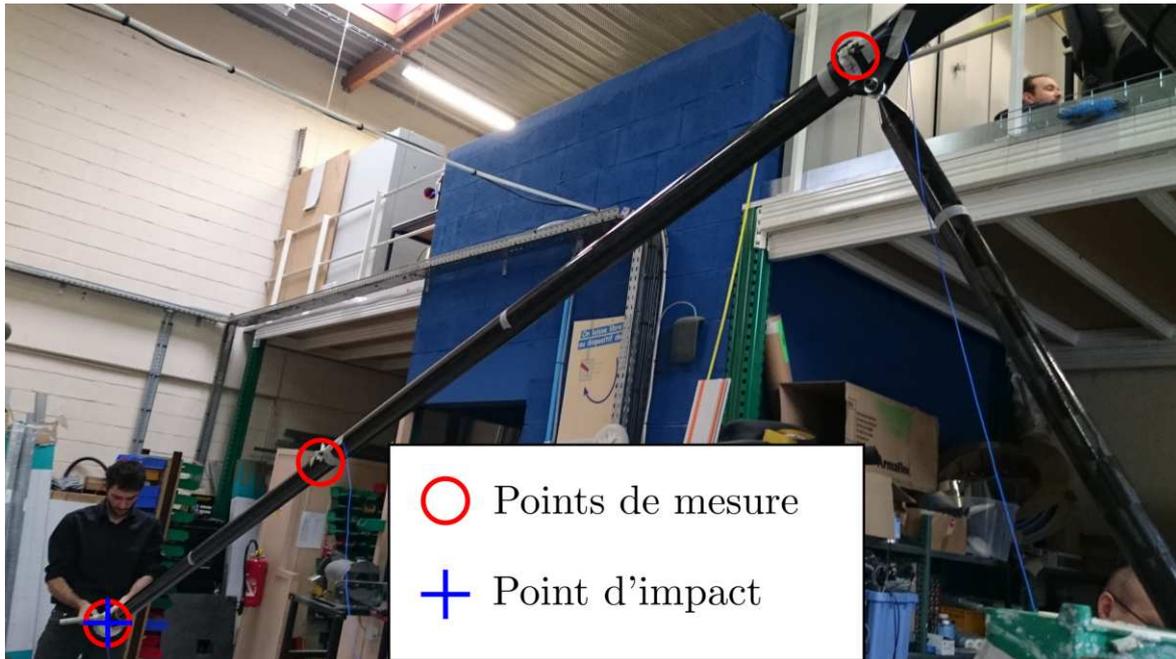


FIGURE 3.17 – Analyse vibratoire expérimentale du système complet assemblé (ici en configuration 2).

ramètres doivent être fixés avec des valeurs non nulles pour éviter l'apparition de degrés de liberté qui n'apparaissent pas en pratique et posent problème lors de l'exploitation du modèle (modes propres non physiques associés aux mouvements de corps rigides qui apparaissent lors de l'analyse modale théorique et instabilités des simulations numériques).

La figure 3.18 montre une étape du processus itératif de recalage, durant laquelle le module de Young du second segment du robot YAKA est recalé pour approcher au mieux le modèle.

Une fois les paramètres inconnus recalés par lot, un réglage plus fin de chaque paramètre pris individuellement peut permettre de compenser des variations entre deux composants identiques ou des défauts de modélisation (par exemple, des approximations faites sur la forme des segments ou de leurs interfaces aux extrémités).

Cette dernière étape permet de maximiser la fidélité du modèle, mais il est important de noter que ces manipulations risquent d'éloigner les paramètres de chaque composant de la grandeur réelle qu'ils représentent, au profit de la cohérence globale du modèle.

Par exemple, le recalage expérimental du bras YAKA a fait apparaître une anomalie, qui mettait en évidence que les paramètres de raideur d'un des actionneurs (actionneur 2) devaient être très différents de ceux des deux autres actionneurs (1 et 3), pourtant rigoureusement identiques. Ce constat a permis de mettre en valeur l'importance de la souplesse des assemblages collés (entre les tubes en composites et les actionneurs notamment), qui n'avait pas été anticipée, ni modélisée initialement. Cet exemple illustre l'intérêt d'avoir un modèle doté de sens physique, qui représente un atout considérable pour l'analyse, la rétro conception et le recalage expérimental. Un modèle dont les paramètres ne représentent pas des grandeurs physiques réelles aurait pu représenter correctement le comportement global du système, mais n'aurait pas permis de détecter des effets non modélisés ni de remettre en cause les choix de modélisation.

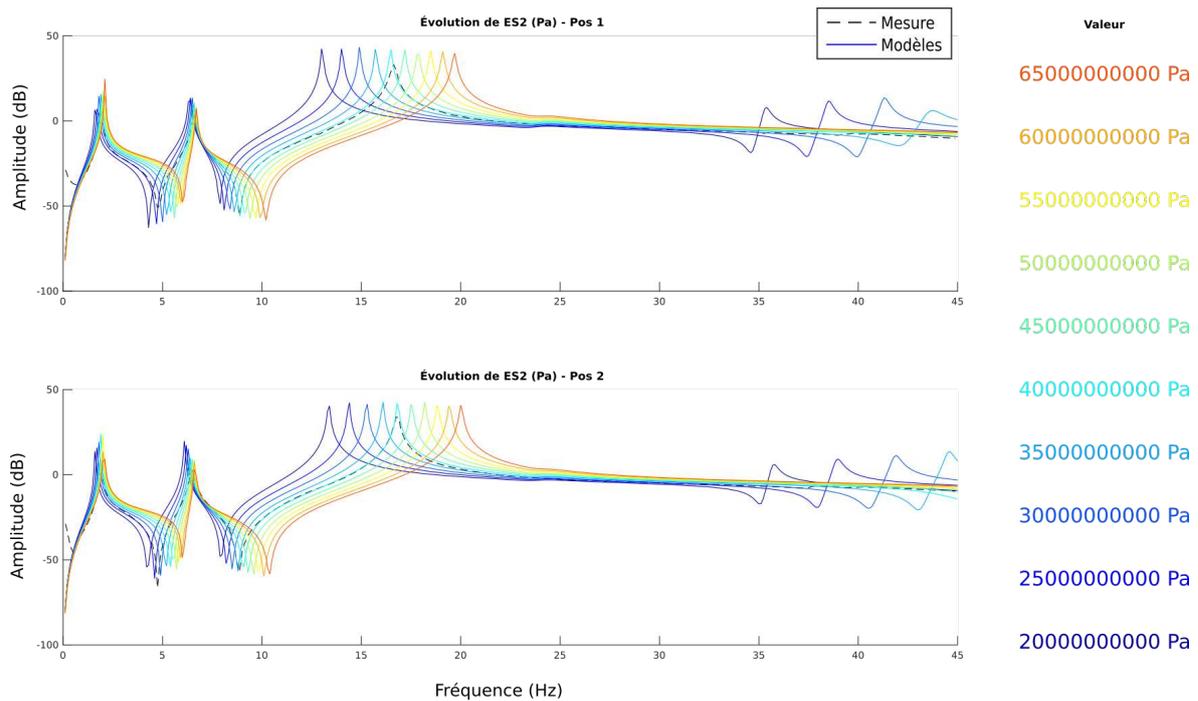


FIGURE 3.18 – Recalage du module de Young d'un segment du robot YAKA, sur le modèle complet. Évolution du modèle en fonction du paramètre réglé (courbes colorées) confronté aux mesures expérimentales (pointillés), dans deux configurations différentes.

### 3.2.5 Modèle obtenu après recalage

La figure 3.19 présente le résultat final obtenu après recalage, le modèle est très fidèle sur la plage de fréquence étudiée (0-45Hz), ce qui permet de valider le choix de modélisation et de montrer qu'il est conforme aux besoins de l'application.

Le tableau 3.5 récapitule les six premiers modes propres du bras YAKA et l'erreur de modélisation associée. Il donne les écarts sur les données recalées, avec une charge de 1kg en bout de bras et une validation sur un point de fonctionnement différent (sans masse en bout de bras). La déformée modale des quatre premiers modes du robot YAKA est présentée sur la figure 3.20

L'erreur maximale sur la fréquence propre des six premiers modes est inférieure à 5%, ce qui valide le choix du modèle pour notre application. La conservation du sens physique du modèle a permis d'obtenir directement un résultat satisfaisant en prenant en compte la modification de la charge en bout de bras et de mettre en évidence la souplesse des assemblages collés, qui n'était pas modélisée initialement.

Mode	Prehenseur 1kg (recalage pos1 / pos2)						Prehenseur 0kg (validation, sans recalage)					
	POS 1			POS 2			POS 1			POS 2		
	Théorique	Mesuré	Écart %	Théorique	Mesuré	Écart %	Théorique	Mesuré	Écart %	Théorique	Mesuré	Écart %
1	1,93	1,91	1,27	1,90	1,88	1,23	2,66	2,59	2,64	2,59	2,56	1,23
2	2,70	2,68	0,80	2,68	2,69	0,40	3,92	3,75	4,38	3,87	3,77	2,64
3	5,26	5,27	0,20	5,31	5,40	1,60	5,51	5,46	0,77	5,58	5,62	0,78
4	6,57	6,68	1,67	6,42	6,60	2,69	6,81	Amorti	?	20,40	19,69	3,58
5	16,48	16,46	0,11	16,83	16,80	0,18	20,02	19,36	3,42	46,08	48,12	4,25
6	18,95	18,93	0,11	18,94	19,21	1,40	23,32	22,35	4,34	23,29	22,89	1,73

TABEAU 3.5 – Table comparative des valeurs de fréquences propres prédites par le modèle obtenu et celles mesurées expérimentalement. Les résultats sont satisfaisants (erreur inférieure à 5%). Une validation est effectuée en retirant le préhenseur de 1kg du bout de bras, avec des données expérimentales qui ne sont pas utilisées pour le recalage.

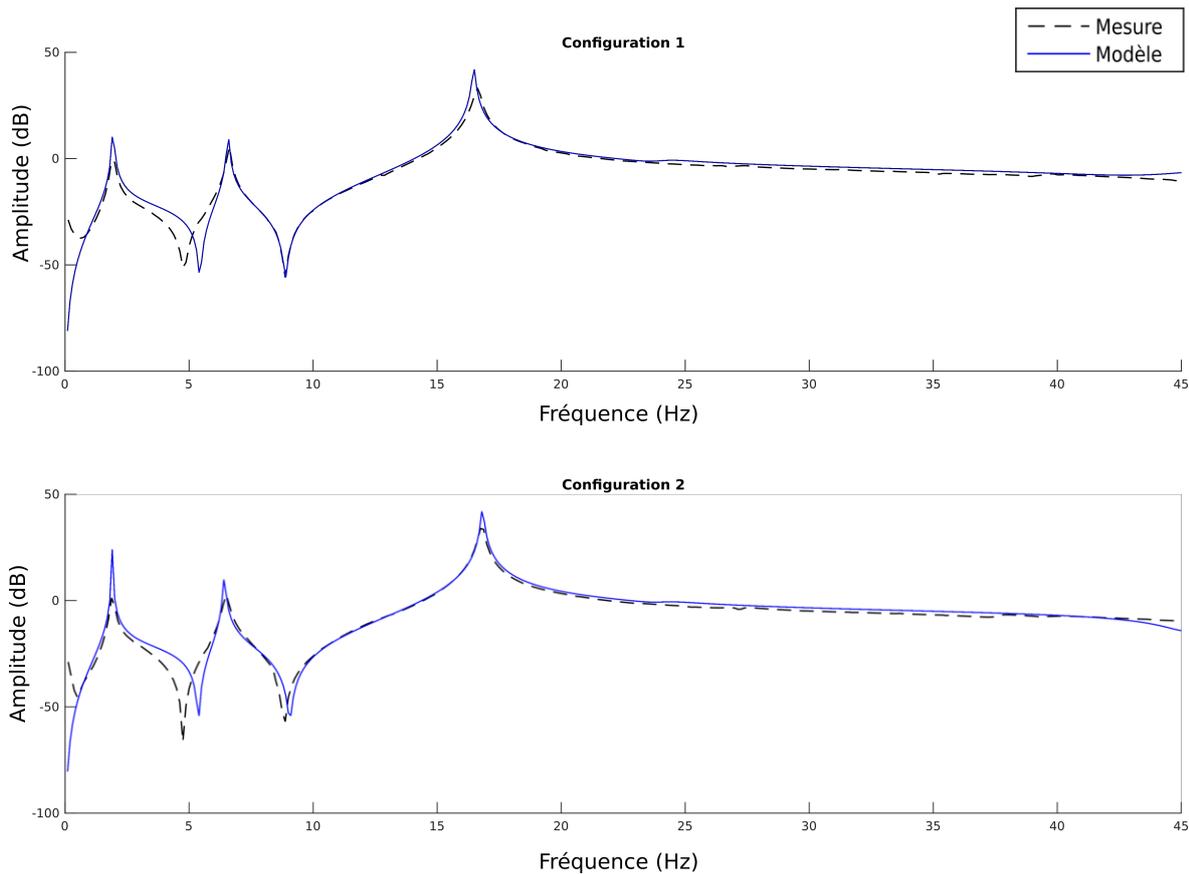


FIGURE 3.19 – Comparaison des fonctions de transfert mesurées et celles prédites par le modèle dans deux configurations différentes.

### 3.2.6 Conclusion et perspectives pour le recalage expérimental

La méthodologie de recalage et de validation expérimentale proposées dans la partie 3.2.1 permettent d'obtenir un jeu de paramètres fidèle et physiquement cohérent.

La démarche contient des étapes manuelles et d'arbitrage humain qui permettent de s'assurer de la cohérence du modèle obtenu. Ce choix a pour but d'éviter une approche "boîte noire" qui pourrait mener à un jeu de paramètres optimal compte tenu des données expérimentales disponibles, mais valable uniquement dans les conditions de recalage et dépourvu de sens physique.

Des outils d'analyse de sensibilité et d'optimisation pourraient cependant être intégrés pour automatiser partiellement la démarche tout en conservant l'intervention d'un utilisateur compétent pour les étapes qui le nécessitent.

La modélisation et l'identification des actionneurs deviennent complexes si un modèle très fidèle est requis, mais les parties 3.2.3.3 et 3.2.3.4 ouvrent la voie à de futurs travaux visant à améliorer la représentativité de modèles simples en optant pour un modèle à paramètres variants.

Les résultats obtenus sur le robot YAKA sont satisfaisants et sont utilisés pour les travaux dans les chapitres suivants. La qualité du modèle obtenu dans la partie 3.2.5 atteste de la qualité des outils mis en place, et de la validité des hypothèses dans le contexte de l'étude du bras robot YAKA.

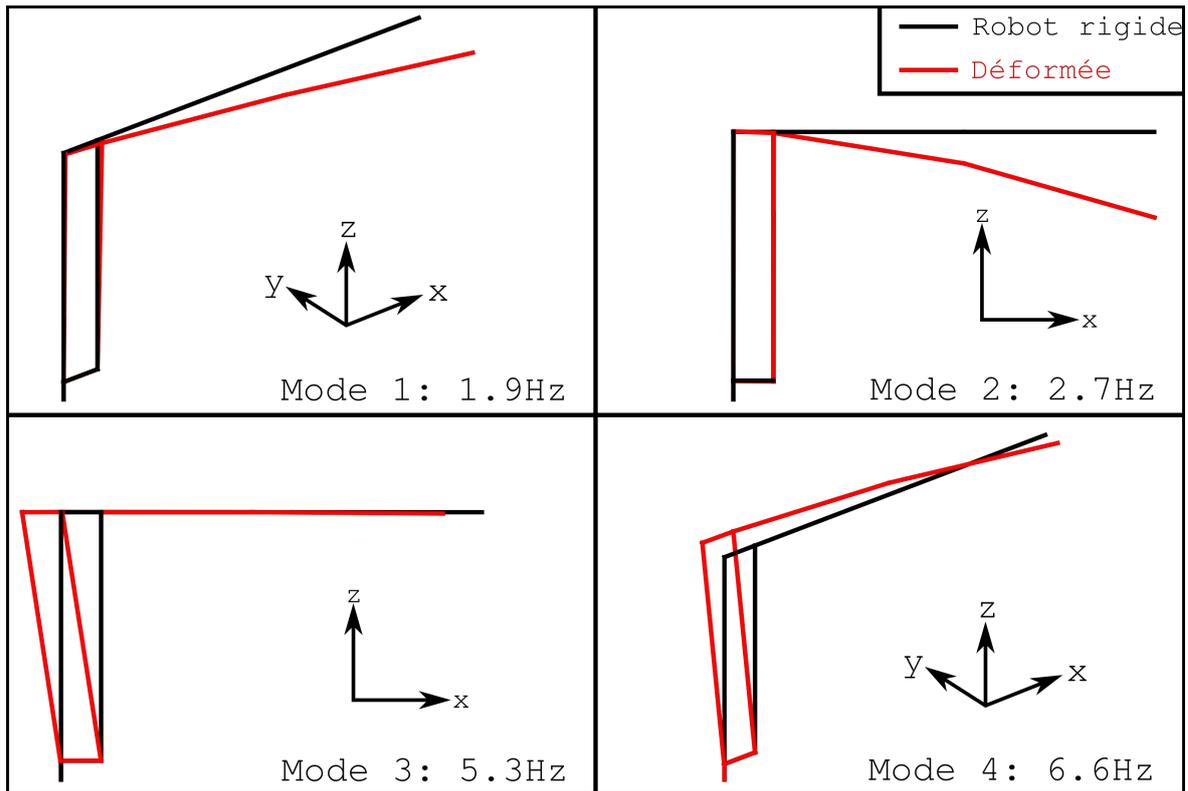


FIGURE 3.20 – Modes propres obtenus à partir des vecteurs propres et valeurs propres de la matrice  $\mathbf{M}_{uu}^{-1}\mathbf{K}_{uu}$ . Les déformées modales sont représentées en rouge, le modèle rigide équivalent en noir.  
vidéo : [modes\\_yaka.mp4](#)

### 3.3 Réduction de modèle

Comme présenté dans la partie 3.1.1, on propose de réduire la dimension du modèle par troncature de la base modale selon un critère fréquentiel. Autrement dit, il est question d'extraire du modèle complet quelques-uns des premiers modes de vibration. Le choix du nombre de modes de vibration à considérer dépend principalement de la bande passante utile du système, comme évoqué dans la partie 2.1.2 et par DE LUCA et BOOK [2016]. La figure 3.2 remplace l'étape de réduction dans le processus plus global d'obtention systématique des modèles (modèle complet et modèle réduit).

L'analyse modale du modèle complet permet de déterminer le comportement vibratoire du système en une configuration donnée (voir partie 3.3.1). L'espace de travail doit alors être discrétisé (voir partie 3.3.2) pour effectuer cette analyse en différents points et ainsi couvrir l'ensemble de l'espace de travail du système.

Avant d'effectuer l'interpolation des modèles locaux obtenus pour construire le modèle réduit (voir partie 3.3.4), il est nécessaire d'effectuer un appariement de modes pour assurer la continuité des données à interpoler (voir partie 3.3.3).

Parmi les différentes méthodes de l'état de l'art mentionnées dans la partie 2.3, nous choisissons d'effectuer la réduction à l'aide d'une décomposition en valeurs singulières tronquée BENNER et collab. [2013] qui s'avère efficace pour notre cas d'application pratique.

### 3.3.1 Analyse modale

Si l'on isole la dynamique relative au déplacement élastique  $\mathbf{u}$  dans l'équation (3.2), on obtient l'équation qui régit uniquement la dynamique flexible du système :

$$\mathbf{M}_{uu}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}_{uu}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_{uu}\mathbf{u} = \mathbf{F}_{ext} + \mathbf{F}_{c_u} + \mathbf{F}_{g_u} \quad (3.13)$$

Puisque l'amortissement structural  $\mathbf{C}_{uu}$  est faible et sous la forme de Rayleigh, il peut être négligé pour cette étude. On s'intéresse alors au comportement vibratoire en régime libre et non amorti, décrit par l'équation suivante :

$$\mathbf{M}_{uu}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_{uu}\mathbf{u} = 0 \quad (3.14)$$

L'analyse modale théorique consiste en l'étude de la matrice  $\mathbf{M}_{uu}^{-1}\mathbf{K}_{uu}$ , dont les valeurs propres  $\nu p_i$  sont le carré des pulsations propres  $\omega_i$  de chaque mode et le vecteur propre  $\mathbf{V}p_i$  donne la déformée modale de chaque mode.

Les matrices  $\mathbf{M}_{uu}$  et  $\mathbf{K}_{uu}$  dépendent de la position articulaire  $\mathbf{q}$ , l'analyse modale donne donc une linéarisation du comportement flexible en un point donné de l'espace de travail. Pour étudier le comportement du système dans son ensemble, il est donc nécessaire d'effectuer l'analyse modale en différents points qui couvrent l'espace de travail.

### 3.3.2 Discrétisation

L'espace de travail utile<sup>2</sup> du système est discrétisé et une analyse modale est effectuée en chaque point. Dans le cas du robot YAKA, les modes propres du système complet sont invariants par rotation autour du premier axe. L'étude est alors limitée à l'espace de travail couvert par les autres articulations.

On obtient alors les valeurs propres  $\omega_i$  associés aux vecteurs propres  $\mathbf{V}p_i$  pour chaque mode  $i$ , et dans chacune des configurations articulaires considérées. La figure 3.21 présente par exemple l'évolution de la fréquence propre du quatrième mode du robot yaka sur son espace de travail. Les vecteurs propres obtenus permettent de connaître la déformée modale du système, ainsi que le déplacement de n'importe quel point du maillage, comme illustré sur la figure 3.22.

---

2. Pour minimiser la complexité du modèle, on restreint son obtention à la zone utile de l'espace de travail du robot.

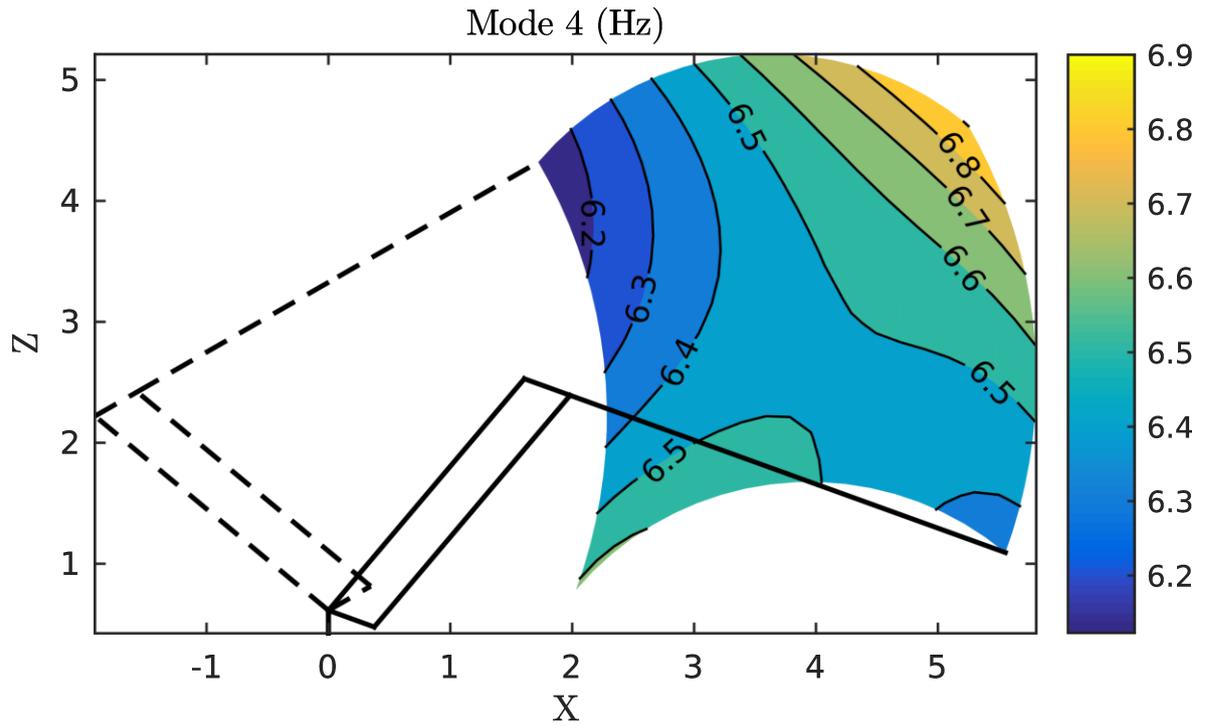


FIGURE 3.21 – Illustration des informations pouvant être issues du modèle : évolution de la fréquence propre du 4<sup>ième</sup> mode propre du robot YAKA.

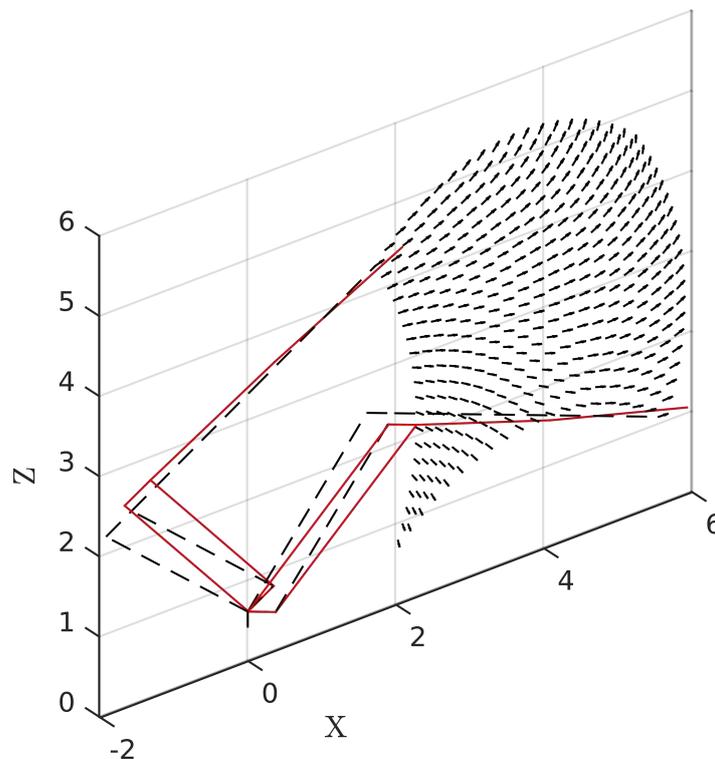


FIGURE 3.22 – Illustration des informations pouvant être issues du modèle : évolution du vecteur propre du 3<sup>ième</sup> mode propre du robot YAKA (seule la composante de déplacement cartésien en bout de bras est représentée).

### 3.3.3 Appairage de modes

Une problématique liée à l'analyse modale sur l'espace de travail est que les modes propres évoluent et risquent d'être confondus. La fréquence propre de chaque mode (habituellement utilisée pour les identifier et les classer) ne permet pas à elle seule d'appairer les différents modes entre deux points de l'espace de travail. En effet, comme le montre la figure 3.23, les fréquences propres de certains modes (les deux premiers par exemple) se recourent dans l'espace de travail.

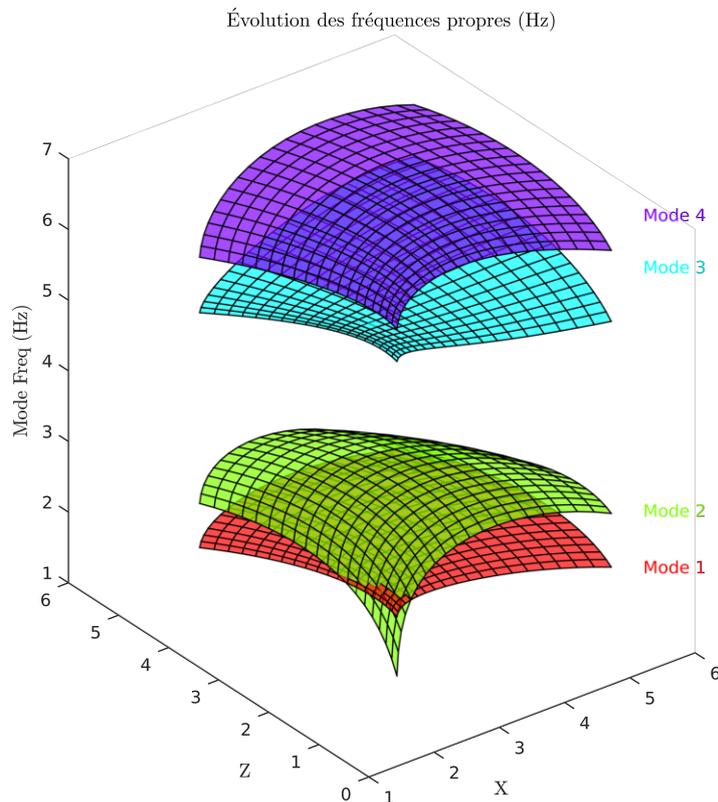


FIGURE 3.23 – Évolution des quatre premiers modes propres du robot YAKA : les deux premiers modes de vibration se croisent aux extrémités dans l'espace de travail du robot, ce qui rend leur distinction ambiguë et problématique pour la réduction de modèle.

Pour les besoins de l'application YAKA et des travaux présentés ici, l'appairage est effectué en séparant les vecteurs qui se chevauchent en deux parties, à savoir ceux qui sont orthogonaux au plan  $(X, Z)$  et ceux qui sont inclus dans ce plan.

Comme illustré sur la figure 3.24, un mauvais appairage de modes engendre des discontinuités des propriétés modales (basé uniquement sur la valeur des fréquences propres) sur l'espace de travail, qui empêchent toute interpolation ou utilisation des résultats au voisinage des chevauchements.

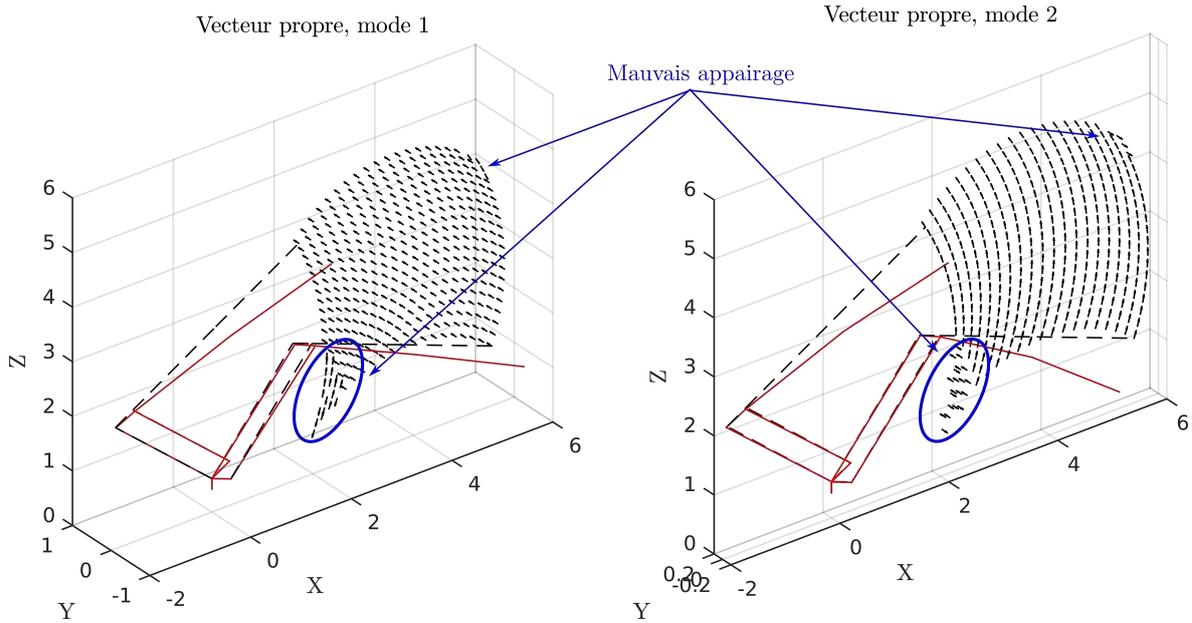


FIGURE 3.24 – Illustration de l'effet d'un mauvais appairage de modes : on observe une discontinuité des vecteurs propres des deux premiers modes de vibration.

### 3.3.4 Réduction

La méthode de réduction choisie fait appel à une décomposition en valeurs singulières tronquée [PANZER et collab. \[2010\]](#). Il s'agit de déterminer une base orthonormée réduite, commune à tous les vecteurs propres calculés précédemment, dans toutes les configurations.

On note  $\mathbf{VP}_c$  la matrice qui concatène tous les vecteurs propres  $\mathbf{VP}_{i,c}$  de chaque mode  $i$ , dans chaque configuration articulaire donnée  $c$  :

$$\mathbf{M}_{uu}^{-1} \mathbf{K}_{uu} = \mathbf{VP}_c^T \begin{pmatrix} \omega_1^2 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \omega_i^2 \end{pmatrix} \mathbf{VP}_c \quad (3.15)$$

$$\mathbf{VP}_c = (\mathbf{VP}_{1,c} \quad \mathbf{VP}_{2,c} \quad \dots \quad \mathbf{VP}_{i,c}) \quad (3.16)$$

L'ensemble des vecteurs à considérer est alors la matrice  $\mathbf{B}$  qui concatène toutes les bases modales locales  $\mathbf{VP}_c$  :

$$\mathbf{B} = (\mathbf{VP}_1 \quad \mathbf{VP}_2 \quad \dots \quad \mathbf{VP}_c) \quad (3.17)$$

La matrice  $\mathbf{B}$  est décomposée en valeurs singulières (équation (3.18)). La matrice  $\mathbf{\Sigma}$  est une matrice diagonale qui contient les valeurs singulières  $\sigma_i$  de la matrice  $\mathbf{B}$ , rangées par ordre décroissant.

$$\mathbf{B} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T \quad (3.18)$$

Les colonnes de la matrice  $\mathbf{U}$  forment une base orthonormée de la matrice  $\mathbf{B}$  qui contient tous les vecteurs propres du modèle dans toutes les configurations.

Chaque valeur singulière  $\sigma_i$  s'interprète comme l'importance relative du vecteur colonne correspondant de la matrice  $\mathbf{U}$ . Par conséquent, il est possible d'approximer la matrice  $\mathbf{B}$  en ne gardant qu'un nombre donné de valeurs singulières  $\sigma_i$ .

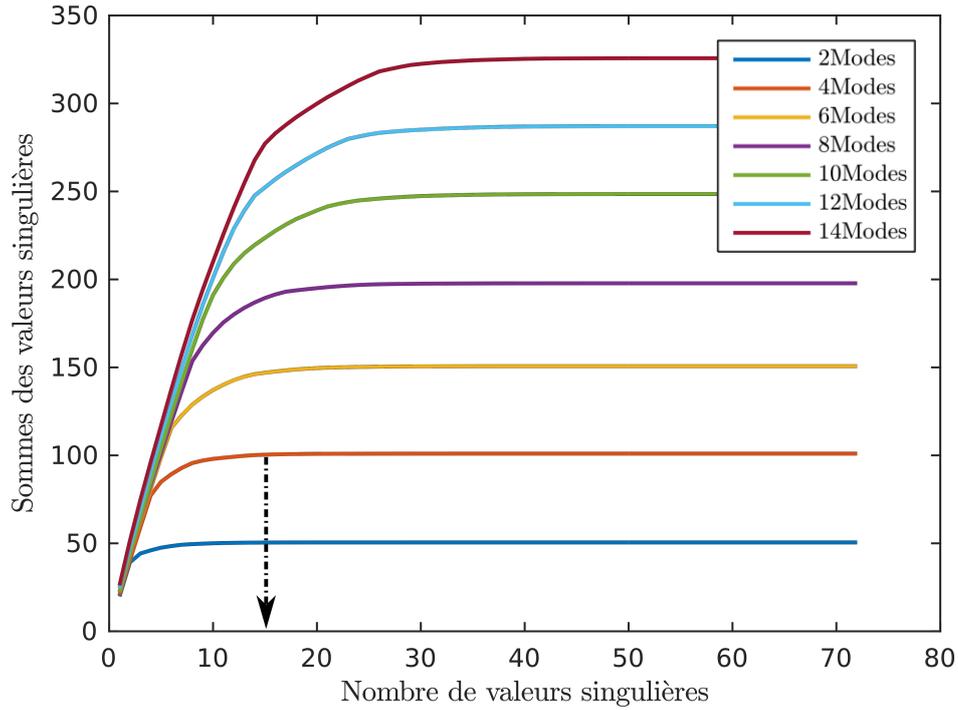


FIGURE 3.25 – Évolution de la somme des valeurs singulières en fonction du nombre de modes considérés. L'atteinte d'une asymptote permet de choisir le nombre de valeurs singulières à conserver.

La figure 3.25 montre l'évolution de la somme des premières valeurs singulières en fonction du nombre de valeurs singulières et de modes propres conservés pour le modèle du robot YAKA. L'apparition d'une asymptote permet de déterminer facilement un nombre de valeurs singulières nécessaire et suffisant pour approximer la matrice  $\mathbf{B}$ , et donc le comportement physique du système.

L'exemple donné sur le robot YAKA suggère par exemple que 15 valeurs singulières suffisent à approximer le modèle dynamique limité aux 4 premiers modes propres du système.

On obtient  $\hat{\mathbf{B}}$  l'approximation de la matrice  $\mathbf{B}$  par troncature des matrices  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{\Sigma}$  et  $\mathbf{V}$ , notées  $\mathbf{U}_t$ ,  $\mathbf{\Sigma}_t$  et  $\mathbf{V}_t$  :

$$\hat{\mathbf{B}} = \mathbf{U}_t \mathbf{\Sigma}_t \mathbf{V}_t^T \quad (3.19)$$

Si comme dans cet exemple, l'étude est réduite à l'aide d'une invariance par rotation, on applique la rotation autour du premier axe et on obtient la matrice de passage  $\mathbf{P} = \text{Rot1}(\mathbf{U}_t)$  la matrice de passage dans la base modale tronquée interpolée (sinon, on a simplement  $\mathbf{P} = \mathbf{U}_t$ ). La transformation  $\text{Rot1}()$  est une rotation qui s'applique à tous les vecteurs  $3 \times 1$  (déplacements élastiques linéaires et angulaires de chaque nœud dans chaque vecteur propre) qui constituent la matrice  $\mathbf{U}_t$ .

Les matrices approximées  $\hat{\mathbf{M}}_{uu}$ ,  $\hat{\mathbf{C}}_{uu}$  et  $\hat{\mathbf{K}}_{uu}$  sont alors obtenues dans la base réduite :

$$\hat{\mathbf{M}}_{uu} = \mathbf{P}^T \mathbf{M}_{uu} \mathbf{P} \quad (3.20)$$

$$\hat{\mathbf{C}}_{uu} = \mathbf{P}^T \mathbf{C}_{uu} \mathbf{P} \quad (3.21)$$

$$\hat{\mathbf{K}}_{uu} = \mathbf{P}^T \mathbf{K}_{uu} \mathbf{P} \quad (3.22)$$

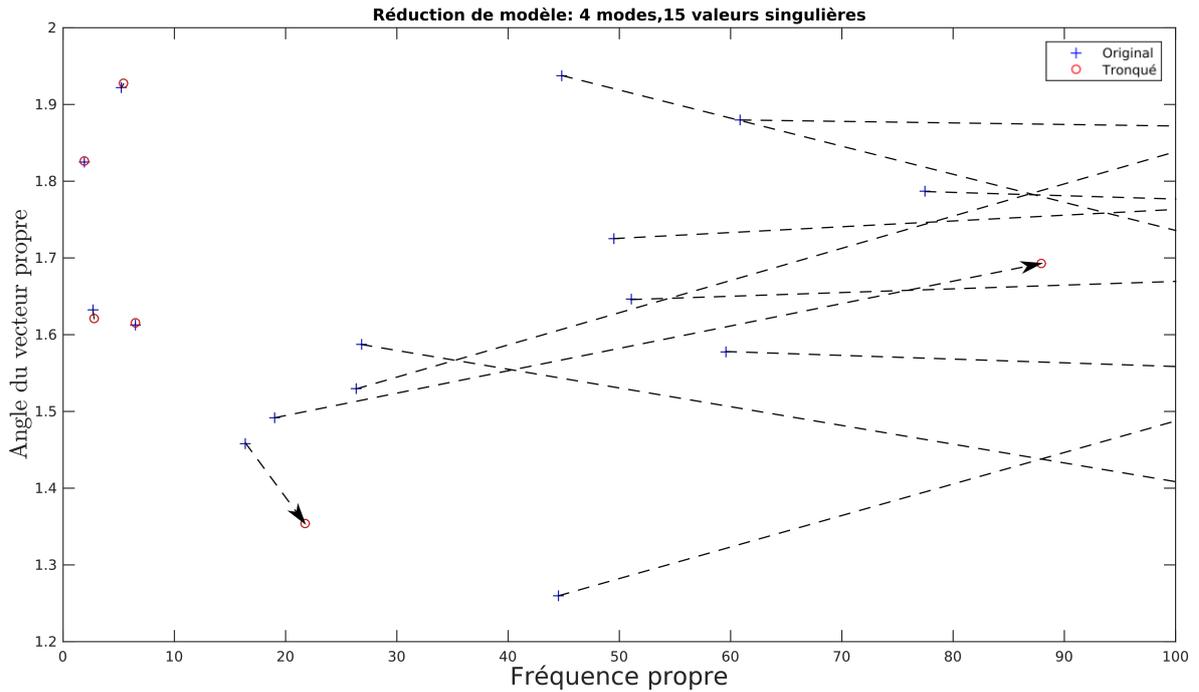


FIGURE 3.26 – Confrontation du modèle réduit au modèle de référence : comme désiré, les quatre premiers vecteurs propres sont correctement représentés, les artefacts sont repoussés à plus haute fréquence, hors du domaine utile du modèle.

L'étude des vecteurs propres et des valeurs propres de  $\hat{\mathbf{M}}_{uu}^{-1}\hat{\mathbf{K}}_{uu}$  permet de comparer les modes propres du modèle réduit avec ceux du modèle complet  $\mathbf{M}_{uu}^{-1}\mathbf{K}_{uu}$ .

La figure 3.26 illustre le résultat de la réduction de modèle pour le robot YAKA dans sa configuration centrale, en conservant 4 modes et 15 valeurs singulières.

Le modèle obtenu est alors de dimension 15, et présente donc 15 vecteurs propres et valeurs propres. Les 4 premiers vecteurs propres correspondent aux modes propres physiques du système que l'on cherche à conserver, les 11 autres vecteurs propres sont nécessaires pour prendre en compte leur évolution sur l'espace de travail, mais n'ont pas de sens physique. Ces modes propres supplémentaires ne dégradent pas la qualité du modèle, car ils sont rejetés à plus haute fréquence, hors du domaine de validité recherché pour le modèle (voir figure 3.26).

### 3.3.5 Modèle réduit

L'étape de réduction permet de déterminer une matrice de passage dans la base réduite  $\mathbf{P}$ , qui permet d'écrire le modèle réduit à partir du modèle complet 3.2 :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{M}_{qq} & \mathbf{M}_{qu}\mathbf{P} \\ \mathbf{P}^T\mathbf{M}_{qu}^T & \mathbf{P}^T\mathbf{M}_{uu}\mathbf{P} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \ddot{\boldsymbol{\eta}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}^T\mathbf{C}_{uu}\mathbf{P} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \dot{\boldsymbol{\eta}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}^T\mathbf{K}_{uu}\mathbf{P} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{q} \\ \boldsymbol{\eta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{P}^T\mathbf{F}_{ext} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{F}\mathbf{c}_q \\ \mathbf{P}^T\mathbf{F}\mathbf{c}_u \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{F}\mathbf{g}_q \\ \mathbf{P}^T\mathbf{F}\mathbf{g}_u \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

$\mathbf{P}(\mathbf{q})$  est une base modale approchée du modèle complet sur l'espace de travail.

La variable modale  $\boldsymbol{\eta} = \mathbf{P}^T\mathbf{u}$  est la nouvelle variable d'état qui représente la contribution de chaque mode souple dans le comportement du système. Les matrices de masse et de raideur équivalentes s'écrivent :

$$\hat{\mathbf{M}}_{\text{eq}} = \mathbf{P}^T \mathbf{M}_{uu} \mathbf{P} \quad (3.24)$$

$$\hat{\mathbf{K}}_{\text{eq}} = \mathbf{P}^T \mathbf{K}_{uu} \mathbf{P} \quad (3.25)$$

De même que pour le modèle complet, il est possible d'associer des modèles d'actionneurs au modèle réduit et d'interactions extérieures pour simuler le comportement du système complet.

### 3.3.6 Limites et perspectives pour la réduction

La réduction de modèle est un problème ouvert qui fait l'objet de nombreuses études (voir partie 2.3). La méthode de réduction proposée dans ce chapitre s'appuie sur une des méthodes de l'état de l'art et est choisie pour des raisons de praticité de mise en œuvre.

D'autres méthodes pourraient être envisagées pour améliorer la qualité de la réduction, mais celle-ci donne des résultats satisfaisants pour l'application du robot YAKA, notamment en simulation.

## 3.4 Conclusion

La démarche de modélisation présentée dans ce chapitre s'appuie sur des outils existants afin d'obtenir les modèles nécessaires aux diverses études de robots flexibles.

Un modèle symbolique complet est obtenu de manière systématique sur la base de [ROGNANT et collab. \[2010\]](#).

La méthodologie de recalage expérimental proposée dans la partie 3.2 permet d'obtenir un jeu de paramètres qui assure la fidélité du modèle tout en conservant le sens physique des valeurs numériques des propriétés des composants du système.

La validation expérimentale sur le bras YAKA permet de vérifier la pertinence du modèle symbolique et de la méthodologie de recalage. Le caractère analytique du modèle et la conservation de son sens physique permettent de prendre en compte l'évolution de paramètres physiques. Cette propriété du modèle offre la possibilité de prendre en compte des variations de charge en bout de bras, comme présenté dans la partie 3.2.5. C'est en particulier intéressant pour prendre en compte l'effet de la présence d'un UAV en bout de bras.

Le modèle complet obtenu, recalé expérimentalement ou non, peut être utilisé pour des applications ne nécessitant pas une résolution en temps réel, comme dans le chapitre 5.

Le modèle complet étant trop complexe pour être adapté aux besoins de simulation et de commande, un modèle simplifié est alors obtenu sur la base de [PANZER et collab. \[2010\]](#).

Les travaux présentés dans les chapitres 4 et 5 sont des exemples d'utilisation concrète des différents modèles obtenus dans ce chapitre.

## 3.5 Références

BENNER, P., S. GUGERCIN et K. WILLCOX. 2013, «A survey of model reduction methods for parametric systems», . 48, 71

COLEMAN, T. et Y. ZHANG. 2011, «Fmincon [online]. mathworks, natick», . 65

- DE LUCA, A. et W. J. BOOK. 2016, *Robots with Flexible Elements*, Springer International Publishing, Cham, ISBN 978-3-319-32552-1, p. 243–282, doi :10.1007/978-3-319-32552-1\_11. URL [https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1_11). 48, 54, 71
- KHALIL, W. et E. DOMBRE. 2004, *Modeling, identification and control of robots*, Butterworth-Heinemann. 50, 53
- KHALIL, W. et M. GAUTIER. 2000, «Modeling of mechanical systems with lumped elasticity», dans *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on*, vol. 4, IEEE, p. 3964–3969. 47
- KIM, J.-S. et M. UCHIYAMA. 2003, «Vibration mechanism of constrained spatial flexible manipulators», *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, vol. 46, n° 1, p. 123–128. 47
- PANZER, H., J. MOHRING, R. EID et B. LOHMANN. 2010, «Parametric model order reduction by matrix interpolation», *at-Automatisierungstechnik Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstechnik*, vol. 58, n° 8, p. 475–484. 75, 78
- ROGNANT, M., E. COURTEILLE et P. MAURINE. 2010, «A systematic procedure for the elastodynamic modeling and identification of robot manipulators», *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 26, n° 6, p. 1085–1093. 47, 48, 49, 52, 56, 78
- SICILIANO, B., L. SCIavicCO, L. VILLANI et G. ORIOLO. 2010, *Robotics : modelling, planning and control*, Springer Science & Business Media. 47
- SPECKER, T., M. BUCHHOLZ et K. DIETMAYER. 2014, «A new approach of dynamic friction modelling for simulation and observation», *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, n° 3, p. 4523–4528. 55
- THEODORE, R. J. et A. GHOSAL. 1995, «Comparison of the assumed modes and finite element models for flexible multilink manipulators», *The International journal of robotics research*, vol. 14, n° 2, p. 91–111. 48
- ZHU, G., S. S. GE et T. H. LEE. 1999, «Simulation studies of tip tracking control of a single-link flexible robot based on a lumped model», *Robotica*, vol. 17, n° 1, p. 71–78. 48



# Chapitre 4

## Commande de robots flexibles

### Sommaire

---

<b>4.1 Cadre de l'étude</b> . . . . .	<b>82</b>
4.1.1 Principe de l'Input Shaping . . . . .	83
4.1.2 Architecture de commande proposée . . . . .	85
4.1.3 Input Shaping pour les bras manipulateurs . . . . .	85
<b>4.2 Conception d'un Input Shaper multi-mode, multi-actionneur</b> . . . . .	<b>88</b>
4.2.1 Approche proposée . . . . .	88
4.2.2 Résultats expérimentaux . . . . .	93
<b>4.3 Input Shaping adaptatif</b> . . . . .	<b>95</b>
4.3.1 Approche proposée . . . . .	95
4.3.2 Résultats expérimentaux . . . . .	96
<b>4.4 Conclusion et perspectives</b> . . . . .	<b>99</b>
4.4.1 Limites de l'approche . . . . .	99
4.4.2 Perspectives d'amélioration et mise en œuvre . . . . .	100
<b>4.5 Références</b> . . . . .	<b>101</b>

---

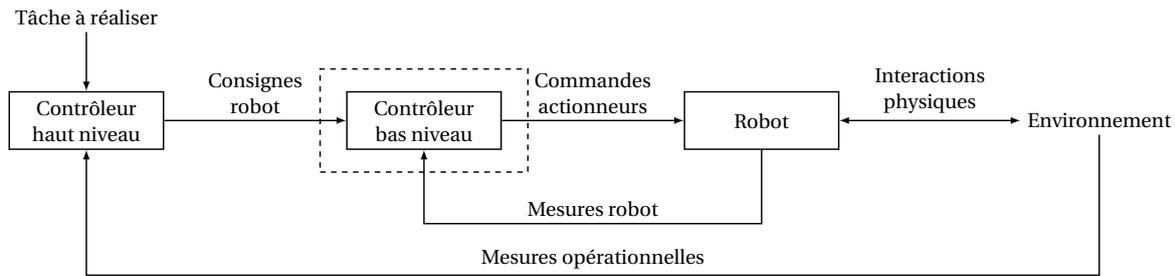


FIGURE 4.1 – Exemple de chaîne de commande typique d'un robot. Notre étude se limite au contrôleur bas niveau, qui est chargé de produire des commandes actionneurs à partir de consignes articulaires désirées et de mesures articulaires (mesures robot). Les mesures opérationnelles représentées sont des informations utiles à la génération de trajectoire (par le contrôleur haut niveau).

Le contrôleur d'un robot a pour but de calculer et transmettre les consignes à envoyer à ses actionneurs pour lui faire réaliser la tâche désirée. Comme présenté dans la partie 2.4, on peut séparer cette tâche en un contrôleur bas niveau destiné à suivre une consigne de mouvement et un contrôleur haut niveau qui détermine la trajectoire articulaire à effectuer pour accomplir une tâche donnée, comme présenté sur la figure 4.1. La génération de trajectoire pour les robots manipulateurs est une problématique commune à tous les systèmes, pour laquelle il existe de nombreuses solutions [KHALIL et DOMBRE \[2004\]](#).

Ce chapitre a pour but de proposer une approche adaptée à la commande de robots manipulateurs flexibles en se concentrant sur les problématiques nouvelles qu'ils font apparaître au niveau du contrôleur bas niveau. Il se base sur deux méthodes éprouvées, à savoir l'inversion de modèle dynamique rigide [KHALIL et DOMBRE \[2004\]](#) et l'Input Shaping [SINGH et SINGHOSE \[2002\]](#); [SINGHOSE \[2009\]](#). En effet, l'inversion de modèle dynamique rigide est largement utilisée et donne des résultats satisfaisants pour les robots rigides. L'Input Shaping est quant à elle une méthode très efficace pour le pilotage de systèmes oscillants tels que les grues ou les ponts roulants, qui nécessite cependant d'être adaptée aux bras manipulateurs qui présentent des propriétés mécaniques différentes.

Le cadre de l'étude est décrit dans la partie 4.1, il présente l'approche proposée, rappelle le principe de l'Input Shaping et met en évidence les problématiques qui doivent être traitées pour l'appliquer aux robots manipulateurs flexibles. Les parties 4.2 et 4.3 proposent de répondre à ces problématiques à l'aide de la connaissance du système apportée par les travaux de modélisation présentés dans le chapitre 3.

Les limites et les perspectives de ces travaux sont discutées dans la partie 4.4.

L'orientation des travaux théoriques présentés dans ce chapitre est motivée par le cahier des charges spécifique de l'application du projet YAKA. Les résultats expérimentaux obtenus avec le robot YAKA permettent de valider et d'illustrer les résultats théoriques (parties 4.2.2 et 4.3.2).

## 4.1 Cadre de l'étude

La plupart des tâches à réaliser par un robot impliquent d'effectuer des trajectoires en répondant à des critères de précision, de rapidité et de stabilité. L'état de l'art présenté dans la partie 2.4 montre que cette tâche est nettement plus complexe en présence de flexibilités. La majorité des méthodes existantes ne donne pas satisfaction dans le contexte du projet YAKA, car elles se limitent à des cas simplifiés qui ne permettent pas

de prendre en compte simultanément plusieurs modes de vibration, plusieurs axes ainsi que des flexibilités dans les articulations et dans les segments.

De plus, le contexte industriel et l'environnement opérationnel du projet (environnement marin hostile, fonctionnement par toutes conditions météorologiques) ne permettent pas d'envisager l'implémentation de méthodes complexes faisant usage de nombreux capteurs et actionneurs tels que des caméras, jauges de contraintes, matériaux piézoélectriques, etc.

Il apparaît aussi que la dynamique propre du robot est la principale source de sollicitations de la structure mécanique puisque les trajectoires à réaliser comportent des accélérations importantes qui sollicitent fortement la structure flexible. De plus, l'ordre de grandeur de l'énergie impliquée dans les modes de vibration dépasse le domaine d'application de méthodes classiques de contrôle actif de vibrations [PREUMONT \[2011\]](#).

#### 4.1.1 Principe de l'Input Shaping

L'Input Shaping est une méthode initialement développée pour la commande de systèmes oscillants (à un seul mode propre) tels que les grues ou ponts roulants, elle retarde une partie de la consigne envoyée au système de façon à ce que les vibrations inculquées à la structure lors de la première partie du mouvement soient compensées par la deuxième partie de mouvement retardée, comme illustré sur la figure 4.2, issues de [SINGH et SINGHOSE \[2002\]](#).

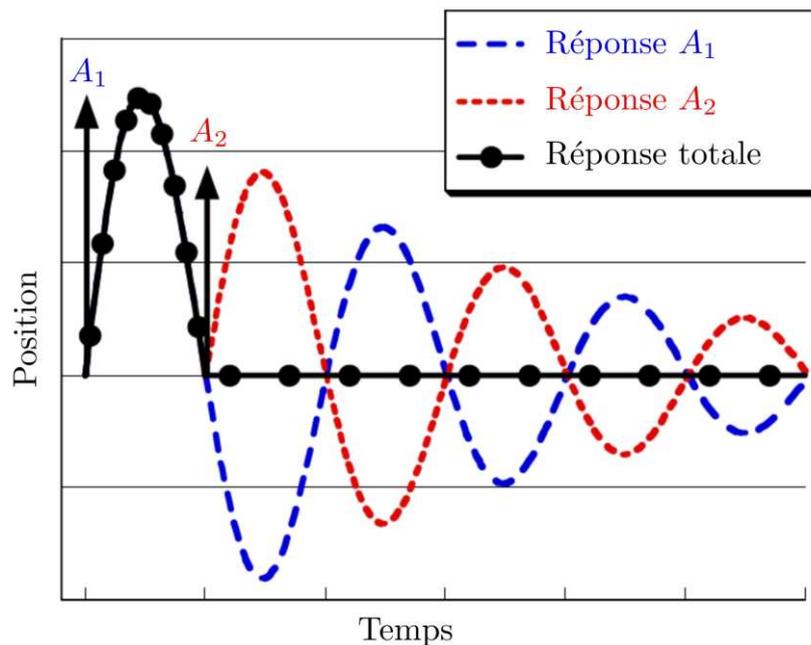


FIGURE 4.2 – Principe de l'Input Shaping illustré sur un système oscillant simple (adapté de [SINGHOSE \[2009\]](#)). Le filtre de convolution présenté fait apparaître deux impulsions séparées d'un délai  $T$  (demi-période propre d'oscillation du système). Une première impulsion d'amplitude  $A_1$  sollicite la structure et crée une oscillation qui est compensée par une deuxième impulsion d'amplitude  $A_2$ . [vidéo : input\\_shaping.mp4](#)

La fonction de transfert dans le domaine fréquentiel ( $s$  étant la variable de Laplace) d'un bloc d'Input Shaping s'écrit :

$$\frac{\tilde{q}^d(s)}{q^d(s)} = A_1 + A_2 e^{-sT} \quad (4.1)$$

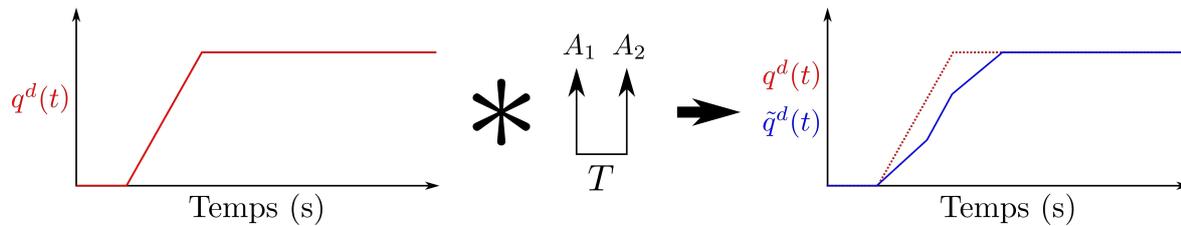


FIGURE 4.3 – Illustration de l'effet d'un Input Shaper simple, appliqué à une trajectoire articulaire (adapté de SINGHOSE [2009]). La trajectoire modifiée qui est transmise au contrôleur bas niveau est modifiée de manière à annuler les vibrations résiduelles créées par le mouvement.

Les gains  $A_1$  et  $A_2$  dépendent de l'amortissement du mode de vibration traité, le retard  $T$  est égal à la moitié de sa période propre de vibration. D'un point de vue plus général, l'Input Shaping est un filtre de convolution appliqué à la consigne  $q^d$ , constitué d'une série d'impulsions d'amplitudes et de décalages définis. La trajectoire filtrée  $\tilde{q}^d$  est alors transmise au contrôleur bas niveau pour déplacer le système en annulant les vibrations résiduelles.

L'exemple d'Input Shaper présenté ici correspond à l'Input Shaper ZV (Zero Vibration), qui permet d'annuler les vibrations résiduelles en induisant un retard minimal avec un filtre constitué de deux impulsions. En revanche, il est peu robuste aux erreurs de modélisation du système (utilisée pour le réglage des paramètres  $A_1$ ,  $A_2$  et  $T$ ). Comme le montre la figure 4.4, d'autres schémas peuvent être envisagés et permettent d'obtenir une meilleure robustesse aux erreurs de modélisation. D'une manière générale, le choix d'un Input Shaper est un compromis entre rapidité et robustesse SINGHOSE et collab. [1996].

Un bloc d'Input Shaping filtre les consignes articulaires envoyées par le contrôleur haut niveau, pour les transmettre au contrôleur bas niveau (voir figure 4.1).

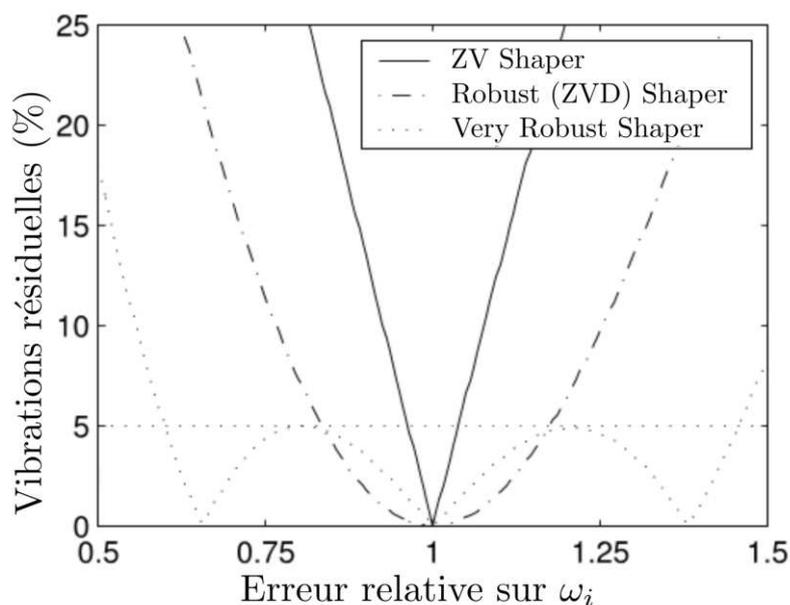


FIGURE 4.4 – Robustesse de différents Input Shaper aux erreurs de modélisation : évolution du pourcentage de vibrations résiduelles en fonction du type d'Input Shaper et de l'erreur relative sur la pulsation propre  $\omega_i$  du mode  $i$  considéré (adapté de SINGH et SINGHOSE [2002]).

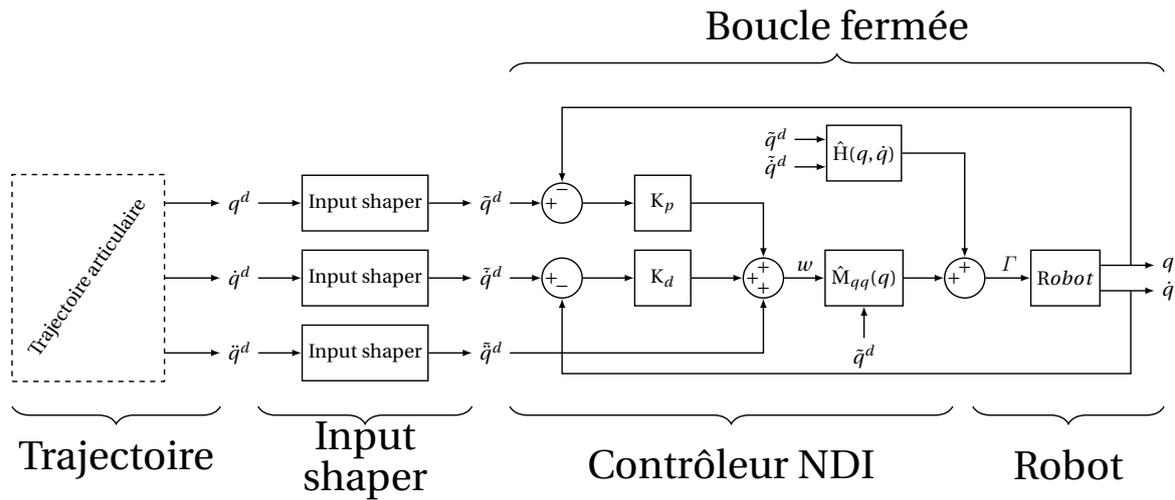


FIGURE 4.5 – Architecture de commande proposée : Linéarisation de la dynamique rigide avec un contrôleur par inversion de modèle **NDI** (asservissement en boucle fermée au niveau articulaire). L'Input Shaper développé prend en charge la maîtrise des vibrations de la structure flexible.

#### 4.1.2 Architecture de commande proposée

Au vu des différents travaux existants traitant de la commande de systèmes flexibles, deux approches sont retenues pour répondre à la problématique de commande du bras robot YAKA.

La commande par inversion de modèle **KHALIL et DOMBRE [2004]** est une méthode très utilisée pour les robots rigides, elle exploite la connaissance du modèle dynamique du système pour calculer le couple nécessaire pour atteindre l'accélération désirée (trajectoire désirée), en prenant en compte à la fois les propriétés du système (géométrie, masses, inertie, etc.), l'action de la gravité et les effets inertiels (effet centrifuge, Coriolis, etc.). Cette approche est choisie pour prendre en compte au mieux le comportement rigide du système et effectuer son asservissement en boucle fermée au niveau articulaire (contrôle en trajectoire de chaque articulation).

L'asservissement en boucle fermée du comportement flexible du système est écarté, car incompatible avec les contraintes industrielles pour un système complexe comme le robot YAKA. En effet, les calculs à réaliser en temps réels ne sont pas compatibles avec les ressources disponibles. De plus, l'observation de l'état flexible du système nécessiterait l'ajout de capteurs ou d'observateurs coûteux et complexes. Par conséquent, les approches d'Input Shaping en boucle ouverte paraissent mieux adaptées, puisqu'elles permettent de prendre en compte le comportement flexible du système de manière simple (seule connaissance de la fréquence et de l'amortissement des modes propres) et permettent d'annuler les vibrations résiduelles induites par les mouvements du robot.

La figure 4.5 présente l'architecture de commande retenue, faisant apparaître l'asservissement en boucle fermée par inversion de modèle **NDI**, associé à un bloc d'Input Shaping adapté aux caractéristiques spécifiques des robots manipulateurs, dont la définition est l'objet des parties suivantes.

#### 4.1.3 Input Shaping pour les bras manipulateurs

L'Input Shaping est une méthode initialement développée pour assister le pilotage de grues et ponts roulants en annulant les phénomènes d'oscillation de la charge. Cette ap-

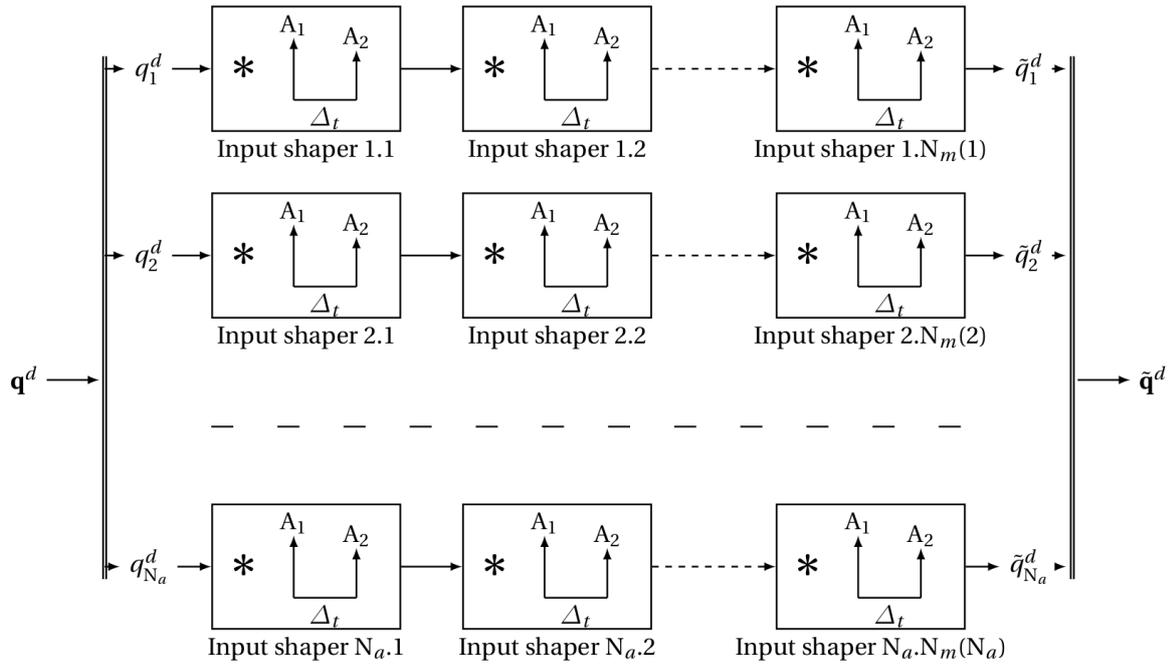


FIGURE 4.6 – Architecture d’un Input Shaper multi-axes et multi-modes générique : un nombre quelconque de modes de vibration peut être traité par chaque actionneur en plaçant en série différents blocs d’Input Shaping.

proche se révèle très efficace dans ce contexte, elle suscite alors un fort intérêt dans un plus large champ d’applications, pour maîtriser les vibrations résiduelles de divers systèmes oscillants [SINGHOSE \[2009\]](#). Cependant, l’application de l’Input Shaping aux robots manipulateurs flexibles n’est pas triviale, car ils présentent des caractéristiques qui les distinguent d’autres systèmes oscillants, décrites dans les parties suivantes.

#### 4.1.3.1 Conception d’un Input Shaper

Une des particularités des robots manipulateurs est qu’ils ont plusieurs axes actionnés, potentiellement couplés, ainsi que plusieurs modes de vibration, contrairement aux systèmes présentant un seul mode de vibration pour lesquels l’Input Shaping est initialement développé.

En présence de plusieurs modes de vibrations et de plusieurs actionneurs agissant sur la structure, il est nécessaire de mettre en place plusieurs blocs d’Input Shaping sur la trajectoire articulaire de chaque actionneur, comme illustré sur la figure 4.6. Des travaux antérieurs démontrent la possibilité de combiner plusieurs blocs d’Input Shaping de cette manière pour maîtriser plusieurs modes de vibration [SINGHOSE \[2009\]](#); [TOKHI et AZAD \[2008\]](#), mais ne décrivent pas comment choisir les modes à considérer par les blocs d’Input Shaping placés sur chaque consigne articulaire.

On note  $N_m$  le nombre de modes propres considérés et  $N_a$  le nombre d’actionneurs d’un robot. Pour chaque actionneur, le nombre d’Input Shaper en action n’est pas nécessairement identique et peut varier entre 0 et  $N_m$ .

Pour écarter la question du choix des couples actionneur/mode à considérer, une approche possible est d’ajouter un Input Shaper pour chacun des  $N_m$  modes sur chaque actionneur, pour s’assurer que toutes les possibilités sont couvertes. Cependant, cette approche induit un retard maximal dû au cumul des retards induits par chaque Input Shaper, alors qu’il n’est en pratique pas nécessaire de considérer tous les modes propres

avec tous les actionneurs.

En effet, la place de chaque actionneur dans le système et leur contribution au mouvement global fait que seuls quelques couples actionneur/mode génèrent effectivement des vibrations du système flexible. De plus, chaque mode de vibration ne contribue pas de la même façon à la dégradation des performances du système. De ce fait, il est intéressant de limiter le nombre de blocs d'Input Shaping implémentés sur le robot pour ne pas subir un retard inutile.

La problématique est qu'il existe un très grand nombre de possibilités. En effet, si l'on considère  $N_m$  modes propres et  $N_a$  actionneurs, il existe  $(\sum_{k=0}^{N_m} \binom{N_m}{k})^{N_a} = 2^{N_m N_a}$  combinaisons possibles pour le choix des blocs d'Input Shaping à implémenter pour chaque actionneur. Dans le cas du robot YAKA qui comporte trois actionneurs et pour lequel on considère quatre modes de vibration, il y a 4096 configurations possibles, le choix d'une configuration pertinente n'est donc pas trivial.

Afin de choisir une solution parmi un grand nombre de possibilités, la partie 4.2 étudie comment la connaissance du système et de son application peut orienter ce choix, pour aboutir à une solution satisfaisante du point de vue de la réduction des vibrations résiduelles, en induisant un retard minimal.

#### 4.1.3.2 Compensation des variations de modes propres

Une autre spécificité des bras manipulateurs est que leurs propriétés mécaniques évoluent en fonction de leur position, ce qui modifie leurs modes de vibration sur l'espace de travail. Or, la partie 4.1.1 montre que les paramètres d'un Input Shaper sont réglés en fonction d'une valeur donnée de fréquence propre et d'amortissement. Conformément à la figure 4.4, si ces paramètres sont figés et réglés pour une configuration donnée, des vibrations résiduelles apparaissent dès que le système s'éloigne de celle-ci.

L'emploi d'un Input Shaper robuste aux erreurs de modélisation peut permettre d'absorber ces variations, mais présente deux inconvénients :

- L'introduction d'un retard supplémentaire est inévitable pour augmenter la robustesse aux erreurs de modélisation
- Pour un bras manipulateur, les variations de propriétés vibratoires peuvent être très conséquentes, dégradant inévitablement les performances obtenues, même avec un Input Shaper très robuste (et introduisant beaucoup de retard).

Grâce à la connaissance du système apportée par les travaux de modélisation présentés dans le chapitre 3, il est possible de connaître précisément le comportement vibratoire du système sur tout son espace de travail, et donc de compenser les variations modales en faisant varier les paramètres de chaque Input Shaper.

Des travaux antérieurs montrent qu'il est possible d'adapter les paramètres d'un Input Shaper en temps réel, mais étudient cette possibilité dans le but de compenser les variations de modes propres en associant un Input Shaper adaptatif associé à un estimateur chargé de suivre l'évolution des modes sur des temps caractéristiques relativement longs par rapport à la durée d'une trajectoire [KHORRAMI et collab. \[1995\]](#); [KOJIMA et SINGHOSE \[2007\]](#).

La partie 4.3 propose d'adapter les paramètres des blocs d'Input Shaping en fonction de la position du robot sur son espace de travail, afin de conserver la rapidité offerte par un Input Shaper peu robuste et un niveau de vibrations résiduelles faible à l'aide d'un schéma adaptatif qui détermine et ajuste les paramètres des blocs d'Input Shaping en fonction de la position du robot dans son espace de travail.

## 4.2 Conception d'un Input Shaper multi-mode, multi-actionneur

Pour choisir efficacement quels blocs d'Input Shaping mettre en place sur chaque actionneur, on propose dans cette partie d'étudier la contribution de chaque couple actionneur/mode de vibration sur la dégradation de performances du système. Les indicateurs proposés et la méthode sont ensuite appliqués au robot YAKA et confrontés aux résultats expérimentaux obtenus.

### 4.2.1 Approche proposée

Dans un premier temps, on considère l'application visée et en particulier l'implication de chaque actionneur dans la réalisation des tâches effectuées par le robot. Cette considération propre à chaque application (trajectoires types à réaliser) permet de distinguer les actionneurs les plus susceptibles de solliciter le système.

La connaissance du système apportée par le modèle de comportement élasto-dynamique du système (3.2) (présenté dans le chapitre 3) permet d'obtenir des informations cruciales pour le choix d'un contrôleur adapté :

- La contrôlabilité de chaque mode par chaque actionneur, qui indique à quel point un actionneur est susceptible d'échanger de l'énergie avec chacun des modes de vibration.
- L'effet de la vibration de chaque mode sur les performances du robot :
  - L'amortissement, qui détermine notamment la vitesse à laquelle l'énergie de vibration est dissipée naturellement par la structure.
  - Le déplacement élastique du bout du bras du robot, qui est le principal effet pénalisant de la vibration (mis à part les problématiques de fatigue des matériaux, de bruit, etc.).

Pour chacun des points énoncés ci-dessus, on propose de calculer des indicateurs chiffrés qui permettent de quantifier la criticité globale de chaque couple actionneur/mode de vibration afin d'en déduire ceux pour lesquels il est nécessaire de mettre en place un bloc d'Input Shaping.

Puisque les propriétés mécaniques évoluent en fonction de la position sur l'espace de travail, il est nécessaire de calculer les indicateurs en différentes positions caractéristiques pour tirer des conclusions valables sur tout l'espace de travail. Dans l'illustration sur le bras YAKA proposée ici, on présente les valeurs calculées dans la configuration articulaire 1 (voir fig 4.13).

#### 4.2.1.1 Implication de chaque actionneur dans les trajectoires à effectuer

Les trajectoires opérationnelles types de l'application visée sont traduites en trajectoires articulaires, afin de dissocier la contribution de chaque actionneur. On s'intéresse alors à la densité spectrale d'énergie de la trajectoire articulaire de consigne à chaque fréquence propre des modes considérés.

Les modes de vibration sont sensibles à des excitations au voisinage de leur fréquence propre, cet indicateur quantifie le niveau de sollicitation de chaque mode par chaque actionneur.

On note cet indicateur  $\text{Freq}_{a,i}$ , où  $a$  et  $i$  sont respectivement le numéro d'actionneur et de mode.

Pour illustrer cet indicateur sur le bras YAKA, on considère que compte tenu des trajectoires à réaliser, les sollicitations de l'application sont similaires sur les trois axes du robot. Les valeurs considérées dans cet exemple sont données dans le tableau 4.1.

Mode $i$	1	2	3	4
$\text{Freq}_{a,i}$	0.22	0.16	0.08	0.06

TABLEAU 4.1 – Valeurs de densité spectrale d'énergie des trajectoires types du projet YAKA, données pour la fréquence propre de chaque mode  $i$  (identiques pour les trois actionneurs  $a$ ).

#### 4.2.1.2 Commandabilité des modes

La commandabilité des modes de vibration permet de déterminer la capacité de chaque actionneur à échanger de l'énergie avec chaque mode de vibration, et donc de déterminer si les actionneurs et les modes de vibration ont une forte capacité à interagir.

La contribution des degrés de liberté associés aux actionneurs dans les vecteurs propres  $Vp_i$  de chaque mode permet de déterminer la commandabilité de chaque mode, pour chaque actionneur :

$$\text{Ctr}_{a,i} = Vp_{i,\text{aval}(a)} - Vp_{i,\text{amont}(a)} \quad (4.2)$$

Pour chaque mode  $i$  et actionneur  $a$ , on considère la différence de déplacement élastique axial en amont et en aval de la liaison actionnée (la déformée modale est représentée par les vecteurs propres  $Vp_i$ ).

La figure 4.7 donne la commandabilité des différents modes du robot YAKA pour chaque actionneur. On voit que chaque actionneur a une commandabilité non nulle sur seulement deux des quatre modes de vibrations considérés pour le robot YAKA. Cette information permet d'éliminer toutes les configurations d'Input Shaper qui font intervenir un bloc d'Input Shaping correspondant à un couple actionneur/mode dont la commandabilité est nulle ou négligeable.

Le calcul de la commandabilité des modes permet dans cet exemple de réduire le nombre de configurations admissibles de 4096 à 64.

#### 4.2.1.3 Amortissement naturel des vibrations

Chaque mode de vibration a un amortissement différent, qui dépend des caractéristiques mécaniques de la structure (type et proportion des dissipations mises en jeu). L'amortissement naturel des modes d'une structure est une propriété importante, car elle joue un rôle capital dans sa stabilité. L'amortissement de chaque mode détermine le temps nécessaire pour que la structure se stabilise naturellement.

Si un mode est très amorti, l'énergie injectée dans celui-ci lors d'un mouvement est très rapidement dissipée, il est donc possible de se dispenser de l'utilisation d'un Input Shaper pour celui-ci.

On définit  $\text{Damp}_i$  comme le critère d'amortissement du mode  $i$  comme son temps de stabilisation à 5%. Autrement dit, c'est le temps nécessaire (en secondes) pour que l'amplitude de sa vibration atteigne 5% de sa valeur initiale, en l'absence d'interactions extérieures (vibration libre).

On calcule ainsi l'indicateur  $\text{Damp}_i$  en fonction de la fréquence propre  $f_i$  et l'amortissement  $\xi_i$  du mode  $i$  :

$$\text{Damp}_i = \frac{-\ln(0.05)}{2\pi f_i \xi_i} \quad (4.3)$$

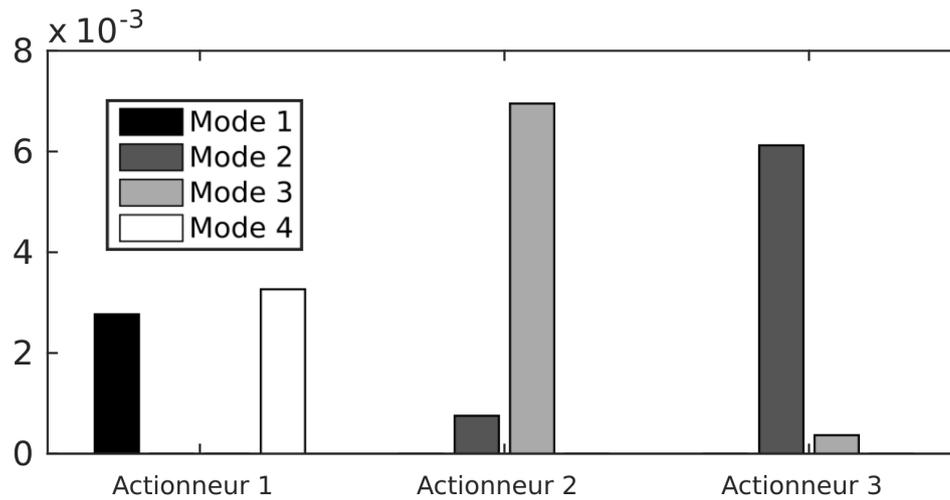


FIGURE 4.7 – Commandabilité des modes propres du robot YAKA : mise en évidence des couples actionneur/mode présentant la plus grande criticité. Indicateur exprimé en radians (en mètre pour les liaisons prismatiques), représentant la contribution de chaque liaison actionnée dans la déformée modale donnée pour chaque mode par le vecteur propre  $Vp_i$ .

Les valeurs de cet indicateur sont données pour le robot YAKA dans le tableau 4.2. Les valeurs obtenues sont relativement grandes dans ce cas : le temps d'amortissement le plus court (mode 3) est de 7.6 secondes, ce qui est nettement supérieur à la durée caractéristique d'une trajectoire de lancement ou de récupération de drone (entre 1 et 4 secondes).

Ce constat n'est pas surprenant, car en pratique, l'amortissement naturel est très rarement suffisant. L'indicateur d'amortissement  $Damp_i$  ne permet donc pas à lui seul d'éliminer des solutions, mais peut en revanche pondérer la criticité d'un couple actionneur/mode sur le comportement du système.

Par exemple, si les indicateurs de commandabilité  $Ctr_{a,i}$  des modes  $i = 1$  et  $i = 4$  sont similaires pour l'actionneur  $a = 1$ , l'indicateur d'amortissement  $Damp_i$  permet de mettre en évidence que le mode  $i = 4$  provoque en pratique des dégradations de performances moins importantes que le mode  $i = 1$ .

Mode $n$	1	2	3	4
$Damp_i$ (s)	49.0	33.0	7.6	8.9

TABEAU 4.2 – Valeurs des indicateurs d'amortissement  $Damp_i$  (temps de stabilisation) calculés pour le robot YAKA.

#### 4.2.1.4 Déplacements élastiques engendrés par les vibrations

Les indicateurs présentés précédemment permettent de prendre en compte le potentiel de chaque couple actionneur/mode à engendrer des vibrations. Une dernière notion importante est la connaissance de l'effet des vibrations sur les performances opérationnelles, en particulier sur la précision en suivi de trajectoire du bout du bras.

On définit l'indicateur  $Eoa_i$  comme la norme du déplacement cartésien en bout de bras engendré par chaque mode de vibration  $i$ . On l'obtient en extrayant du vecteur propre  $Vp_i$  les trois composantes de déplacement cartésien du nœud correspondant au bout du bras.

Si un mode de vibration affecte peu ou pas la position de l'organe terminal (dynamique interne), on peut choisir de ne pas le considérer dans la mise en place de l'Input Shaper pour ne pas entacher la rapidité, puisqu'il ne dégrade pas les performances. En pratique, si un mode de vibration interne est fortement sollicité sans pour autant avoir une influence sur les performances opérationnelles, il est tout de même intéressant d'annuler ses vibrations résiduelles pour limiter la fatigue des matériaux.

Pour le robot YAKA, les valeurs de cet indicateur sont données dans le tableau 4.3, on peut observer que ces valeurs sont cohérentes avec les déformées modales présentées sur la figure 4.8.

Mode $i$	1	2	3	4
$Eoa_i$ (m)	0.86	0.91	0.39	0.4

TABLEAU 4.3 – Valeurs des indicateurs de déplacement élastique  $Eoa_i$  pour le robot YAKA.

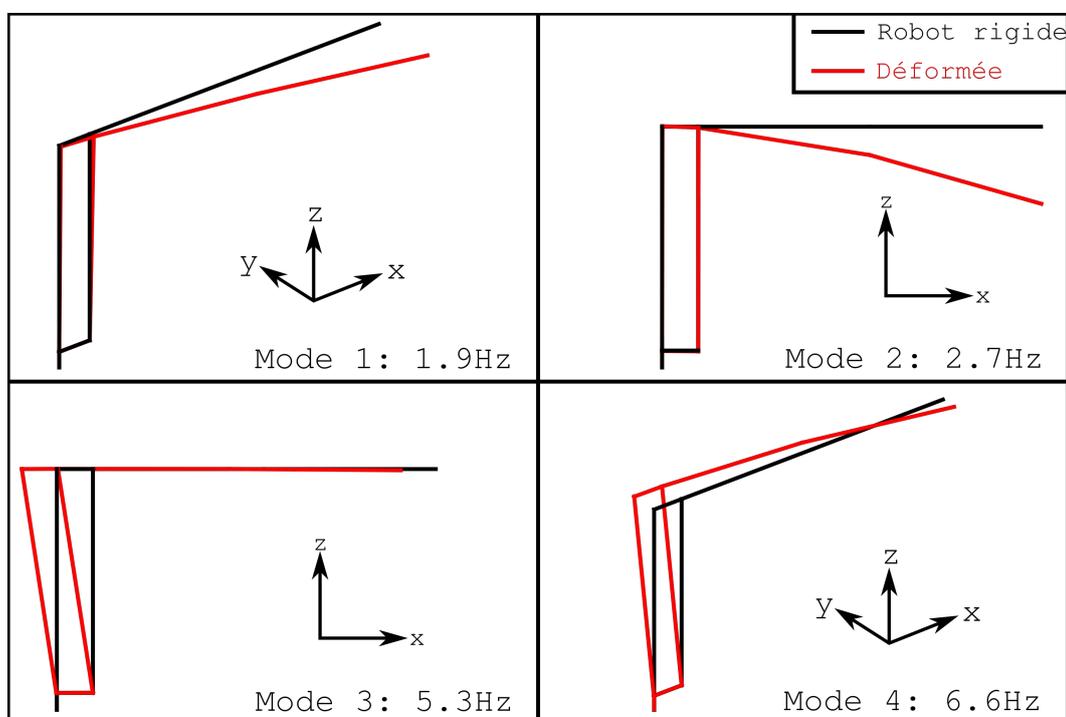


FIGURE 4.8 – Déformée modale et fréquence propre des quatre premiers modes de vibration du robot YAKA, représentées en configuration centrale (configuration 1). [vidéo : modes\\_yaka.mp4](#)

#### 4.2.1.5 Conception d'un Input Shaper

Les indicateurs présentés dans les parties précédentes permettent d'appréhender les interactions entre les actionneurs et les modes grâce à la commandabilité  $Ctr_{a,i}$  et densité spectrale d'énergie des trajectoires à réaliser  $Freq_{a,i}$ . L'indicateur de déplacement en bout de bras  $Eoa_i$  et d'amortissement  $Damp_n$  indiquent respectivement l'impact de la vibration d'un mode sur la précision du robot et la durée nécessaire à ce qu'une perturbation s'estompe naturellement.

Pour regrouper ces informations dans un indicateur global, on définit l'indicateur  $Perf_{a,i}$  qui affecte un score à chaque couple actionneur/mode et atteste de sa criticité, compte tenu de toutes les considérations citées précédemment :

$$\mathbf{Perf}_{a,i} = \mathbf{Ctr}_{a,i} \mathbf{Eoa}_i \mathbf{Damp}_i \mathbf{Freq}_{a,i} \quad (4.4)$$

Par souci de simplicité, nous choisissons une pondération unitaire pour chaque indicateur, mais les objectifs associés à chaque application peuvent faire varier l'importance apportée à chaque considération. Par exemple, si l'objectif est de réduire les vibrations du système pour préserver sa mécanique indépendamment des dégradations de performance, l'indicateur  $\mathbf{Eoa}_i$  peut être négligé. Le sens physique contenu dans chaque indicateur permet d'en tirer le meilleur parti, au regard de chaque cas particulier.

Les résultats (normalisés) de cet indicateur pour le robot YAKA sont donnés sur la figure 4.9. Il apparaît clairement que deux couples actionneur/mode sont prédominants ( $a = 1/i = 1$  et  $a = 3/i = 2$ ), il est donc pertinent de les prendre en compte dans la conception de l'Input Shaper.

Deux autres couples actionneur/mode ont une criticité similaire ( $a = 2/i = 2$  et  $a = 2/i = 3$ ), bien inférieure à celle des deux principaux. Le choix concernant ceux-ci doit être fait au regard de l'application, il s'agit encore une fois d'un compromis entre la qualité de réduction des vibrations et la rapidité du système, puisque chaque bloc d'Input Shaping introduit un délai supplémentaire. Les deux couples actionneur/mode restants qui n'ont pas une criticité nulle ( $a = 1/i = 4$  et  $a = 3/i = 3$ ) sont nettement moins influents que les autres. Ils ne sont donc pas pris en compte dans cet exemple.



FIGURE 4.9 – Indicateur global normalisé  $\mathbf{Perf}_{a,i}$  utilisé pour la conception d'un Input Shaper pour le bras YAKA : il indique la criticité de chaque couple actionneur/mode dans le comportement vibratoire du robot YAKA. Cet indicateur met en évidence que parmi les douze couples actionneur/mode considérés, seulement cinq ont une influence significative, avec deux couples ( $a = 1/i = 1$  et  $a = 3/i = 2$ ) largement prépondérants.

Au vu des résultats obtenus, on propose de retenir quatre configurations à évaluer avant d'effectuer le choix final, listées dans le tableau 4.4. L'évaluation de ces différentes configurations peut être effectuée à l'aide des outils de simulation utilisés dans le chapitre 5 ou directement expérimentalement, comme dans la partie 4.2.2.

La configuration *NO IS* sert de référence, aucun Input Shaper n'est mis en place, la trajectoire désirée est directement envoyée au contrôleur bas niveau, sans modification. Toutes les autres configurations contiennent deux blocs d'Input Shaping, dédiés aux deux couples actionneur/mode dominants ( $a = 1/i = 1$  et  $a = 3/i = 2$ ). Pour étudier l'impact des deux couples actionneur/mode de criticité similaire ( $a = 2/i = 2$  et  $a = 2/i = 3$ ) sur l'actionneur 2, on propose de tester trois configurations différentes :

Actionneur	1	2	3
NO IS	aucun	aucun	aucun
IS_1	mode 1	mode 3	mode 2
IS_2	mode 1	mode 2	mode 2
MMIS	mode 1	modes 2 & 3	mode 2

TABLEAU 4.4 – Présentation des configurations d'Input Shaper retenues pour l'expérimentation : blocs d'Input Shaping à mis en place sur chaque actionneur pour prendre en compte le(s) mode(s)  $i$ .

- IS\_1 : Cette configuration privilégie la gestion du mode  $i = 3$  avec l'actionneur  $a = 2$  et ignore le couple  $a = 2/i = 2$ .
- IS\_2 : Contrairement à la configuration précédente, celle-ci privilégie la gestion du mode  $i = 2$  avec l'actionneur  $a = 2$  et ignore le couple  $a = 2/i = 3$ .
- MMIS : La configuration MMIS (Multi-Mode Input Shaping) considère enfin ces deux couples actionneur/mode ( $a = 2/i = 2$  et  $a = 2/i = 3$ ), afin de privilégier la qualité de réduction des vibrations à la rapidité du système.

## 4.2.2 Résultats expérimentaux

Les différentes configurations d'Input Shaping présentées précédemment sont implémentées sur le bras robot YAKA, cette partie présente les résultats obtenus avec chacune d'entre elles. Comparer l'efficacité de ces différentes méthodes nécessite de mesurer l'état de déformation du système en cours de trajectoire, ce qui n'est pas trivial pour un bras manipulateur comme le robot YAKA.

Mesurer la position du bout du bras robot en cours de trajectoire nécessite d'importants moyens expérimentaux, c'est pourquoi les résultats comparatifs présentés dans la partie 4.2.2.1 se basent sur des données d'accélération, plus facilement mesurables.

### 4.2.2.1 Mesure de l'accélération en bout de bras

Une centrale inertielle (Xsens MTi-100) est placée au bout du bras robot YAKA afin de mesurer son accélération cartésienne. On s'intéresse ici à la norme de l'accélération cartésienne mesurée à laquelle on retranche la composante constante liée à la gravité ( $9.81m/s^2$ ). Cette mesure permet de quantifier le niveau de vibrations résiduelles au niveau de l'effecteur et ainsi comparer les différentes configurations d'Input Shaper.

Les mesures présentées sur la figure 4.10 sont acquises en réalisant une même trajectoire articulaire désirée  $\mathbf{q}^d(t)$ , qui correspond à une trajectoire type de lancement d'un UAV (catapultage) :

- Départ à vitesse nulle en configuration 2 (voir figure 4.13).
- Mise en mouvement de l'axe 1 pour atteindre une vitesse de  $7m/s$  en moins d'une seconde (vitesse de décollage de l'UAV).
- Arrêt brutal du robot en 0.2 secondes, pour déclencher le départ de l'UAV, en configuration 1.

Durant ce mouvement, l'actionneur 1 parcourt un angle de  $\frac{\pi}{2}rad$  et atteint une vitesse de  $1.5rad/s$ , les axes 2 et 3 passent de la configuration 2 à la configuration 1. Cette trajectoire est retenue, car elle est représentative de l'application du robot YAKA et sollicite tous les modes de vibration dans une manœuvre à forte dynamique.

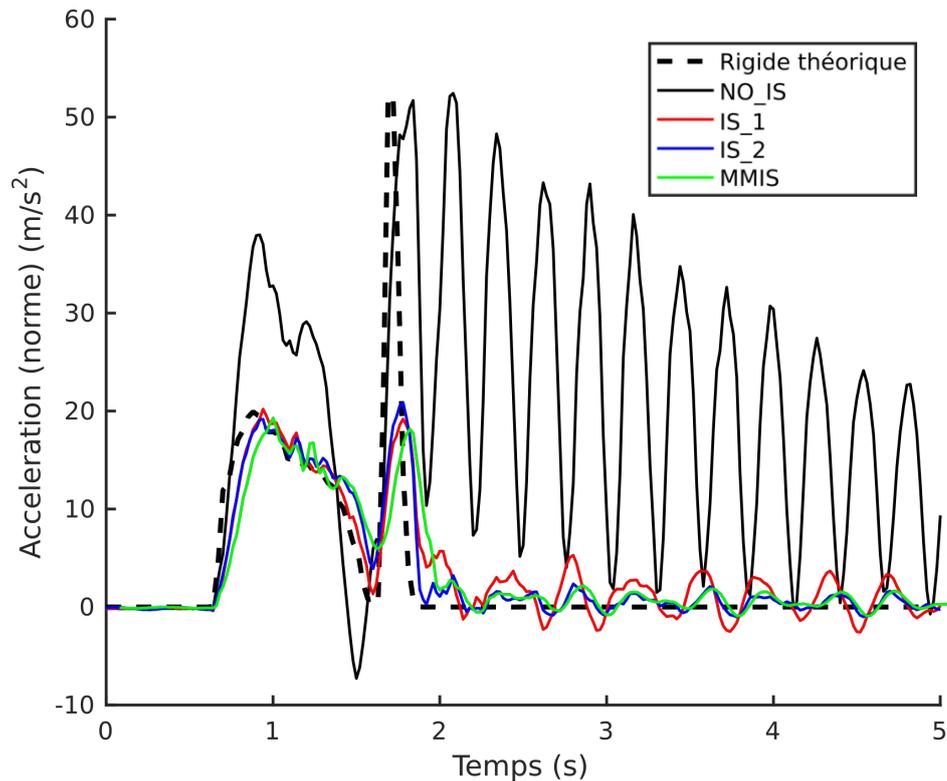


FIGURE 4.10 – Comparaison des mesures d’accélération lors d’une trajectoire de lancement : on observe une réduction très significative des vibrations de la structure en cours de mouvement et après le mouvement avec les différentes approches proposées (en rouge, bleu et vert), en comparaison avec le comportement sans Input Shaping (en noir) et l’accélération théorique en bout de bras (en pointillés). [vidéo : input\\_shaping\\_lancement.mp4](#)

Les résultats montrent comme prévu une réduction significative des vibrations résiduelles pendant et après le mouvement, quelle que soit la configuration utilisée, dès lors que les deux couples actionneur/mode les plus critiques sont traités (écart significatif entre la trajectoire sans Input Shaper (*NO IS*) et les autres). Ce premier constat valide la pertinence de la méthode proposée qui permet de les identifier.

La configuration d’Input Shaping qui prend en compte tous les couples actionneur/mode significatifs offre comme attendu les meilleures performances en termes de réduction de vibration, au prix d’un retard supplémentaire, légèrement visible sur la figure 4.10

Si l’on compare enfin les configurations *IS\_1* et *IS\_2*, on observe que la deuxième offre une meilleure réduction de vibrations après la fin de la trajectoire, là où la première (*IS\_1*) est plus performante pendant la trajectoire. Le mode  $i = 3$  est nettement plus amorti que le mode  $i = 2$  (voir tableau 4.2), cela explique le résultat obtenu, puisque les vibrations induites par le mode  $i = 3$  sont amorties rapidement après la fin de la sollicitation due au mouvement.

#### 4.2.2.2 Illustration expérimentale qualitative : light painting

Des dispositifs de suivi de trajectoire (tracking optique, laser, etc.) permettent de suivre précisément la position d’un objet au cours du temps et pourraient permettre de mesurer l’erreur de suivi de trajectoire réelle, pour aller plus loin que la mesure du niveau d’accélération. Cependant, ils sont très coûteux et pour la plupart inadaptés au robot YAKA du fait de son grand volume de travail. Pour cette étude, une méthode de *light painting* est donc utilisée pour visualiser la trajectoire suivie par le système.

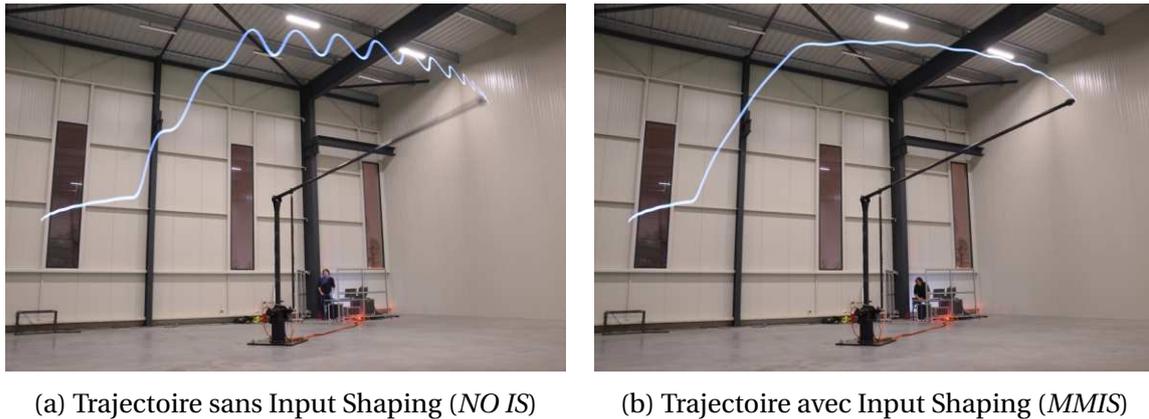


FIGURE 4.11 – Appréciation qualitative de l’amélioration de la précision en suivi de trajectoire apportée par l’approche d’Input Shaping proposée. Ces clichés sont obtenus avec une méthode de *light painting* (photographie à long temps de pause, avec un dispositif lumineux attaché à l’organe terminal du robot YAKA).

Une source lumineuse est fixée au bout du bras et une photographie à long temps de pause est réalisée pendant que le mouvement est effectué. Cette méthode permet de visualiser qualitativement l’amélioration obtenue avec la méthode d’Input Shaping utilisée (ici *MMIS*), en comparaison avec une approche sans Input Shaping (*NO IS*). Les clichés sur la figure 4.11, sont obtenus en effectuant une trajectoire simple (rampe), sollicitant le mode de vibration  $i = 2$  via une rampe en position articulaire sur l’axe 3, accompagnée d’un mouvement à vitesse constante de l’axe 1.

### 4.3 Input Shaping adaptatif

Cette partie présente l’approche d’Input Shaping adaptatif proposée pour répondre à la problématique de variation des modes propres sur l’espace de travail présenté dans la partie 4.1.3.2.

#### 4.3.1 Approche proposée

Afin de prendre en compte les variations de modes propres sur l’espace de travail, on propose de mettre en place un schéma adaptatif, présenté sur la figure 4.12. Le délai des différents blocs d’Input Shaping est calculé et adapté en fonction de la configuration du robot. Cette tâche nécessite une cartographie de l’évolution des fréquences propres des modes, fournie par le modèle dynamique flexible présenté dans le chapitre 3 ou obtenue expérimentalement. Une interpolation polynomiale permet de calculer les fréquences propres (et donc les paramètres d’Input Shaping correspondants) des modes de vibration en fonction de la position articulaire du système.

Afin d’assurer la continuité de l’évolution des paramètres et ainsi conserver les propriétés de continuité des trajectoires entrantes, les paramètres de modes de vibration sont estimés à partir de la position désirée et non la position courante mesurée. Cette précaution permet de générer des trajectoires continues en écartant les problématiques liées aux bruits de mesures et les problématiques de stabilité liées au bouclage implicite mis en place en faisant intervenir la position courante dans la modification de la trajectoire entrante.

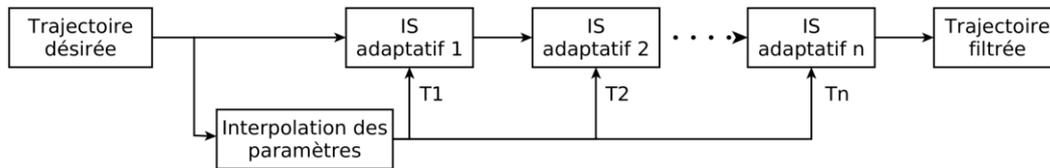


FIGURE 4.12 – Schéma d’Input Shaping adaptatif proposé : les fréquences propres sont calculées à partir de la trajectoire entrante et d’un modèle d’interpolation pour régler en temps réel les paramètres des différents blocs d’Input Shaping adaptatif.

Le principe d’Input Shaping adaptatif tel qu’il est proposé suppose que les variations de modes propres pendant la durée de l’Input Shaper sont négligeables, c’est-à-dire que les trajectoires désirées ne présentent pas de discontinuités ou de sollicitations de nature à faire varier radicalement les modes propres en un temps court devant cette durée. En pratique, les capacités d’accélération limitées du système et la continuité de la variation des modes sur l’espace de travail permettent souvent de considérer que cette hypothèse est vérifiée.

### 4.3.2 Résultats expérimentaux

Afin d’évaluer l’efficacité du schéma d’Input Shaping adaptatif, on propose de comparer l’Input Shaper précédent (*MMIS*, conçu et testé dans la partie 4.2) à sa version adaptative (*AMMIS*) qui conserve des réglages optimaux sur tout l’espace de travail.

On définit quelques exemples de configurations articulaires sur la figure 4.13 pour lesquelles les paramètres du système sont donnés dans le tableau 4.5 :

Configuration	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
1 (Hz)	1.85	2.57	4.96	6.53
2 (%)	98.1	99.9	102.0	99.0
3 (%)	107.0	98.2	103.0	99.9
4 (%)	102.0	98.7	101.0	96.8
5 (%)	98.7	95.6	114.0	104.0

TABLEAU 4.5 – Variations de fréquences propres de chaque mode de vibration données pour différentes configurations articulaires du robot YAKA, données par rapport à sa configuration centrale (configuration 1 sur la figure 4.13).

#### 4.3.2.1 Trajectoires locales

L’Input Shaper à paramètres fixes (*MMIS*) est réglé dans la configuration 1, présentée sur la figure 4.13. Son comportement au voisinage de cette configuration doit donc être similaire à celui de la version adaptative (*AMMIS*). Pour évaluer l’intérêt du schéma adaptatif, on propose d’effectuer une trajectoire locale très agressive au voisinage de deux configurations de l’espace de travail, pour les deux versions d’Input Shaper à évaluer.

La trajectoire locale utilisée est une rampe à vitesse constante égale à  $0.14 \text{ rad/s}$ , effectuée pendant  $0.6 \text{ s}$  pour atteindre un déplacement articulaire relatif de  $0.09 \text{ rad}$ , sur chacun des trois axes du robot YAKA.

On choisit d’effectuer cette trajectoire locale au voisinage de deux configurations (voir 4.13) :

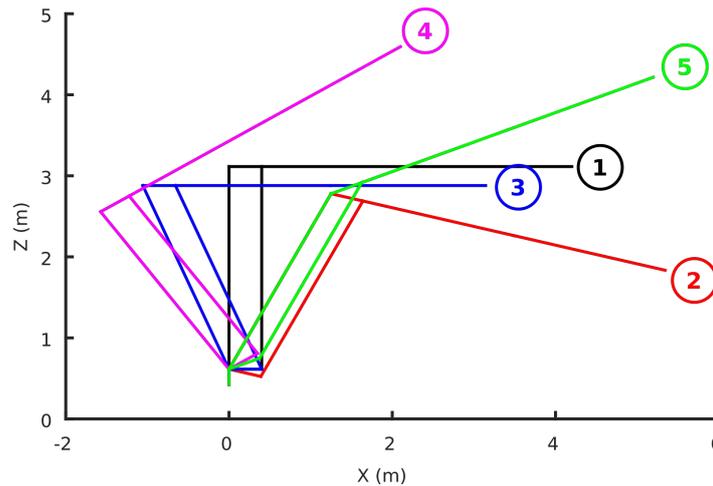


FIGURE 4.13 – Configurations de test considérées, réparties sur l'espace de travail du robot.

- Dans la configuration 1, où le comportement des deux méthodes doit être similaires, puisque la version adaptative et la version à paramètres fixes utilisent le même réglage.
- La configuration 5 est celle qui présente la plus grande variation de modes par rapport à la configuration centrale (configuration 1), elle est alors retenue pour comparer le comportement des deux Input Shaper (*MMIS* et *AMMIS*).

La figure 4.14 montre les mesures d'accélération en bout de bras lors du mouvement dans ces deux configurations, avec les deux méthodes distinctes. Il apparaît comme attendu que les comportements sont sensiblement identiques au voisinage de la configuration 1 et que l'approche adaptative (*AMMIS*) offre une amélioration au voisinage de la configuration 5, dans laquelle ses paramètres sont plus appropriés (amélioration de 30%).

#### 4.3.2.2 Trajectoire globale

Pour valider la démarche proposée sur une trajectoire plus représentative de celles effectuées dans le cadre d'une application réelle, on propose d'effectuer une comparaison des deux méthodes avec une trajectoire qui traverse l'espace de travail du robot, subissant ainsi les variations de modes de la structure en cours de mouvement.

La trajectoire proposée est décrite par le tableau 4.6, les résultats obtenus sont présentés sur la figure 4.15. On observe à nouveau une amélioration des performances apportée par le schéma adaptatif (*AMMIS*), qui atteste de l'efficacité de la méthode.

Position articulaire	Axe 1	Axes 2 & 3
Position initiale (1s)	0 rad	Configuration 2
Position finale (2.9s)	1 rad	Configuration 5

TABLEAU 4.6 – Description de la trajectoire globale réalisée pour comparer l'efficacité du schéma adaptatif (*AMMIS*) à sa version classique (*MMIS*).

#### 4.3.2.3 Validation de la démarche proposée

Au vu des résultats expérimentaux, l'approche d'Input Shaping adaptatif proposée s'avère être une solution pertinente pour la compensation des variations de modes de

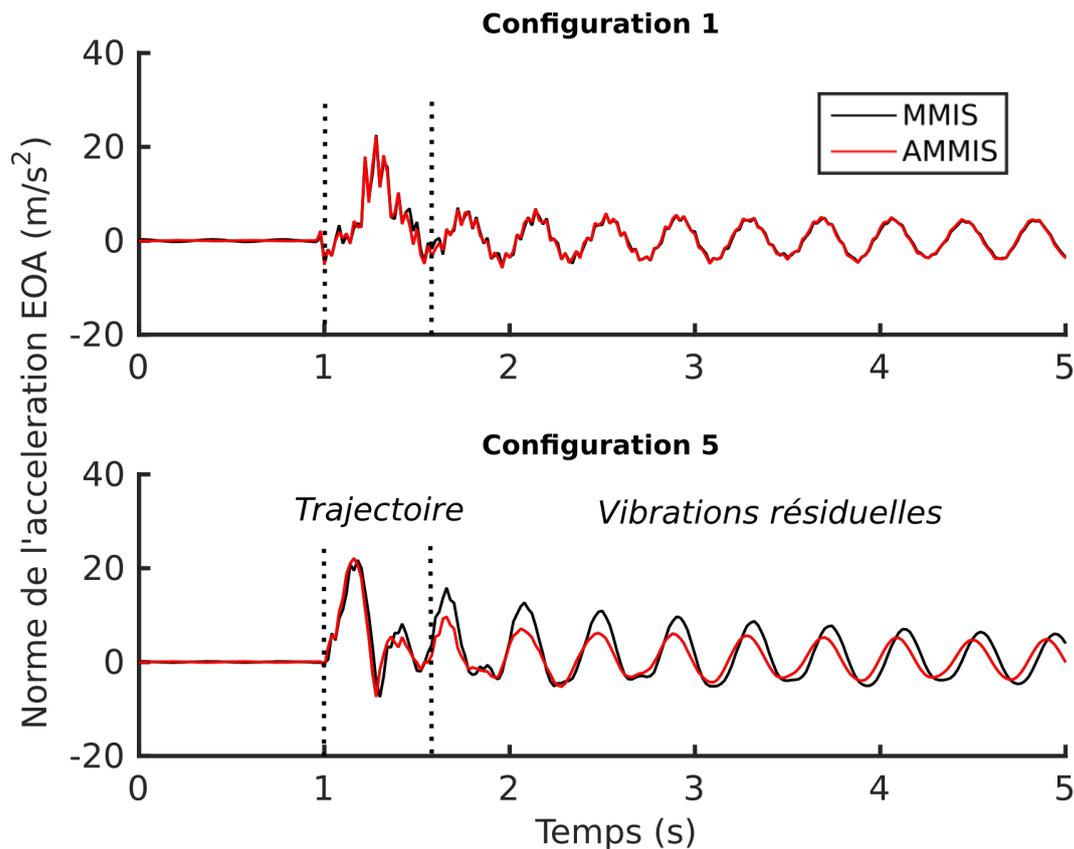


FIGURE 4.14 – Résultats expérimentaux évaluant l'efficacité du schéma adaptatif sur des trajectoires locales. Comme prévu, les deux approches ont un comportement identique dans la configuration 1 où elles utilisent le même réglage. L'approche adaptative (*AMMIS*) apporte une réduction de vibrations résiduelles de 30% dans la configuration 5, par rapport à l'approche classique (*MMIS*) qui y utilise un réglage moins adapté. [vidéo : input\\_shaping\\_traj\\_locale.mp4](#)

vibration sur l'espace de travail. Malgré le fait que les variations de modes de vibration sont relativement faibles pour le robot YAKA (voir figure 4.8), on observe une réduction de vibrations résiduelles de l'ordre de 30% à 40% avec l'approche adaptative.

La plupart des robots manipulateurs subissent des variations de modes plus importantes que le robot YAKA, on peut donc anticiper d'importantes améliorations de performances avec un autre robot auquel ces travaux seraient appliqués.

Les vibrations résiduelles subsistent après la fin des trajectoires, elles s'expliquent notamment par le fait que le réglage des paramètres n'est jamais parfait en pratique. De plus, l'annulation complète des vibrations résiduelles suppose un comportement parfaitement linéaire de déformation, qui est une approximation, en particulier au niveau des liaisons (contacts entre éléments) et des matériaux composites des segments du robot YAKA.

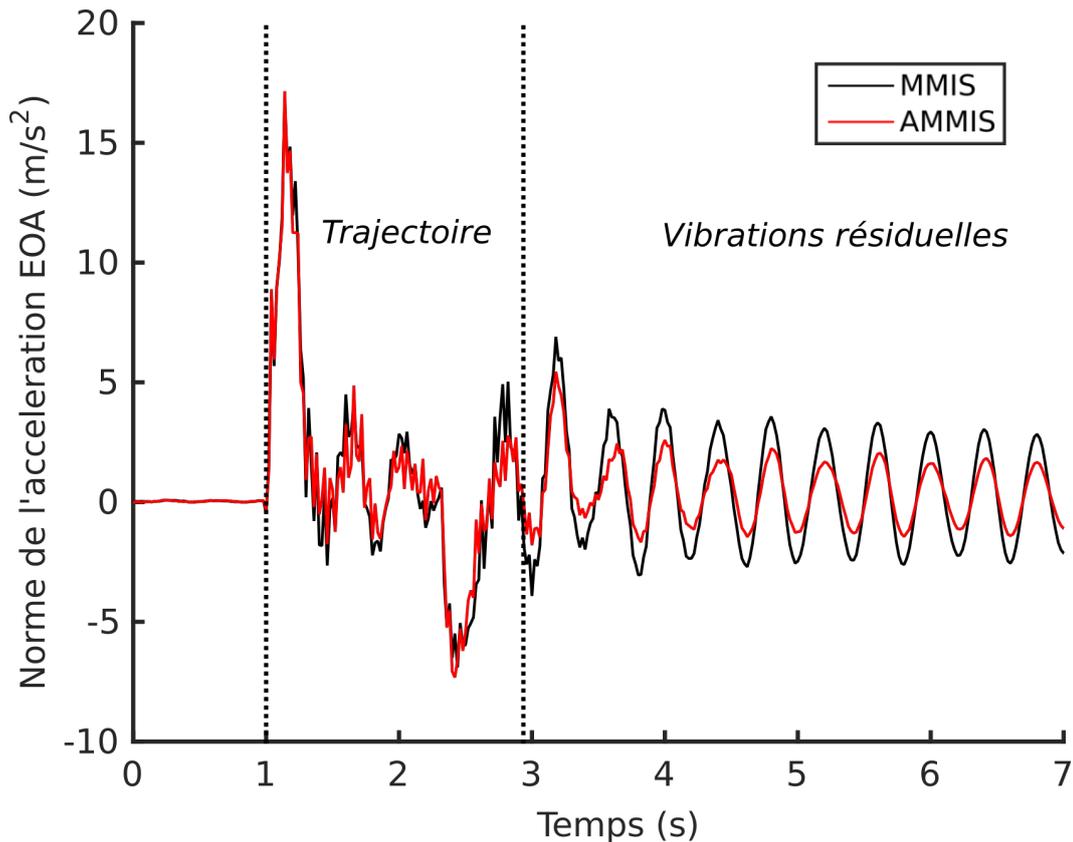


FIGURE 4.15 – Résultats comparatifs évaluant l’efficacité du schéma adaptatif sur une trajectoire globale : la version adaptative (*AMMIS*) montre une réduction de vibrations résiduelles de 40% par rapport à l’approche à paramètres fixes (*MMIS*).

## 4.4 Conclusion et perspectives

Les travaux présentés dans ce chapitre permettent d’adapter les méthodes d’Input Shaping aux robots manipulateurs flexibles dans le cas général, en présence d’un nombre quelconque de liaisons flexibles et de segments flexibles, avec ou sans chaînes cinématiques fermées.

Si le choix d’architecture de commande partiellement en boucle ouverte peut être critiqué pour son manque de robustesse aux perturbations extérieures, elle reste cependant très adaptée dans un contexte comme le projet YAKA, pour lequel les sollicitations de la structure proviennent principalement de son mouvement propre.

La connaissance apportée par le modèle dynamique présenté dans le chapitre 3 permet d’appréhender le comportement physique d’un bras manipulateur flexible et de concevoir un Input Shaper adapté (voir partie 4.2). Le schéma adaptatif proposé dans la partie 4.3 compense les variations de modes propres sur l’espace de travail, sans augmenter la durée de l’Input Shaper, offrant une bonne capacité de réduction de vibrations résiduelles sans augmenter le retard en suivi de trajectoire.

### 4.4.1 Limites de l’approche

L’approche de commande proposée pilote le comportement flexible du système en boucle ouverte, ce qui permet d’éviter les problématiques de stabilité et d’améliorer considérablement le comportement du système à moindre coût (ne nécessite pas de capteurs supplémentaires ni de calculs complexes). En revanche, elle présente quelques limita-

tions :

- L'architecture de commande en boucle ouverte (du point de vue de la dynamique flexible uniquement) ne permet pas de réagir à des perturbations extérieures. Cette limitation n'est pas pénalisante si comme pour le robot YAKA <sup>1</sup>, l'application considérée implique des sollicitations extérieures qui ont un spectre fréquentiel éloigné des modes de vibration (mouvements de houle très basse fréquence pour un navire) et/ou une amplitude négligeable (trainée aérodynamique des segments).
- La démarche de conception d'Input Shaper proposée peut faire apparaître des retards différents sur chaque axe, induisant une légère déformation de la trajectoire cartésienne du robot. Une possibilité de contournement de cet effet est de rajouter artificiellement un délai sur les axes les plus rapides pour égaliser le retard (introduit un retard inutile). Il est aussi possible de prendre en compte cet effet lors de la génération de trajectoire (puisque'il est parfaitement défini), c'est la stratégie pour laquelle nous optons pour le projet YAKA.
- L'approche d'Input Shaping adaptatif peut s'avérer inefficace si la dynamique de consigne fait varier les modes propres du système en un temps court devant la durée de l'Input Shaper. Dans le pire des cas (échelon en position sur l'espace de travail <sup>2</sup>), les performances atteintes par le schéma adaptatif sont identiques à celles obtenues avec un Input Shaper classique.

#### 4.4.2 Perspectives d'amélioration et mise en œuvre

Le développement des outils proposés et leur utilisation concrète dans le cadre du projet YAKA font apparaître différentes perspectives d'amélioration :

- Puisque le comportement d'un Input Shaper (adaptatif ou non) est parfaitement défini, il est possible de générer des trajectoires en connaissance de cause pour compenser certains effets, comme le retard et la déformation de la trajectoire cartésienne.
- Comme le montrent les figures 4.2 et 4.3, l'Input Shaping annule les vibrations du système une demi-période d'oscillation après leur apparition. On considère le plus souvent que les demi-périodes de vibration de chaque mode sont courtes vis-à-vis des trajectoires à réaliser, on ignore alors le déplacement élastique du système durant ce court instant. Il est cependant envisageable de s'intéresser au comportement flexible transitoire du système pour effectuer des déplacements à très haute dynamique, au voisinage d'une position fixe ou d'une trajectoire opérationnelle lente.
- Parmi les deux principales causes de variations de modes propres d'un robot flexible, l'approche d'Input Shaping adaptatif proposée prend en compte uniquement celles liées au déplacement sur l'espace de travail. La connaissance du comportement d'un robot flexible offerte par les modèles présentés dans le chapitre 3 peut être exploitée pour prendre en compte les variations de modes propres dues à des variations de charge utile en bout de bras (déplacement d'un objet, changement d'outil, etc.). Dans le cadre du projet YAKA, il est donc envisageable de prendre en compte la modification de dynamique due à la présence de l'UAV en bout de bras.

1. L'interaction entre le bras et l'UAV peut être significative, mais n'est pas critique puisqu'une fois l'UAV saisi, les oscillations de la structure ne sont pas pénalisantes

2. Puisque le système n'a pas la capacité à suivre une telle consigne, ce cas de figure ne se présente pas si la trajectoire entrante respecte les limites de capacités d'accélération du système.

- En supposant qu'il est possible d'observer l'état flexible du système, l'utilisation de diagrammes de vecteurs permet de déterminer des impulsions à infliger au système pour amortir des vibrations dues à des sollicitations extérieures (par exemple, le choc lors de la récupération d'un UAV avec le robot YAKA). Cette approche proposée par DHANDA et collab. [2016] dans le cadre du pilotage de systèmes à un seul mode de vibration peut être appliquée de la même façon aux robots manipulateurs en suivant la démarche proposée dans ce chapitre. [vidéo : amortissement\\_vibrations.mp4](#)

Le chapitre 5 propose d'utiliser l'architecture de commande proposée dans ce chapitre à des fins de conception. En effet, elle constitue un contrôleur de référence, utilisable pour évaluer et comparer des solutions en cours de conception.

## 4.5 Références

- DHANDA, A., J. VAUGHAN et W. SINGHOSE. 2016, «Vibration reduction using near time-optimal commands for systems with nonzero initial conditions», *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 138, n° 4, p. 041 006. [101](#)
- KHALIL, W. et E. DOMBRE. 2004, *Modeling, identification and control of robots*, Butterworth-Heinemann. [82](#), [85](#)
- KHORRAMI, F., S. JAIN et A. TZES. 1995, «Experimental results on adaptive nonlinear control and input preshaping for multi-link flexible manipulators», *Automatica*, vol. 31, n° 1, p. 83–97. [87](#)
- KOJIMA, H. et W. SINGHOSE. 2007, «Adaptive deflection-limiting control for slewing flexible space structures», *Journal of Guidance Control and Dynamics*, vol. 30, n° 1, p. 61–67. [87](#)
- PREUMONT, A. 2011, *Vibration control of active structures : an introduction*, vol. 179, Springer Science & Business Media. [83](#)
- SINGH, T. et W. SINGHOSE. 2002, «Input shaping/time delay control of maneuvering flexible structures», dans *American Control Conference, 2002. Proceedings of the 2002*, vol. 3, IEEE, p. 1717–1731. [xii](#), [82](#), [83](#), [84](#)
- SINGHOSE, W. 2009, «Command shaping for flexible systems : A review of the first 50 years», *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 10, n° 4, p. 153–168. [xii](#), [82](#), [83](#), [84](#), [86](#)
- SINGHOSE, W. E., W. P. SEERING et N. C. SINGER. 1996, «Input shaping for vibration reduction with specified insensitivity to modeling errors», *Japan-USA Sym. on Flexible Automation*, vol. 1, p. 307–13. [84](#)
- TOKHI, M. O. et A. K. AZAD. 2008, *Flexible robot manipulators : modelling, simulation and control*, vol. 68, Iet. [86](#)



# Chapitre 5

## Conception de robots flexibles

### Sommaire

---

<b>5.1 Cadre de conception</b> . . . . .	<b>104</b>
5.1.1 Périmètre de l'étude . . . . .	104
5.1.2 Spécifications et conception préliminaire . . . . .	105
5.1.3 Scénarios d'utilisation et simulation . . . . .	106
5.1.4 Démarche proposée . . . . .	106
<b>5.2 Modélisation des systèmes candidats</b> . . . . .	<b>108</b>
5.2.1 Paramétrisation d'une conception . . . . .	108
5.2.2 Modélisation système . . . . .	108
<b>5.3 Simulation et architecture de commande de référence</b> . . . . .	<b>109</b>
<b>5.4 Mesure de performance</b> . . . . .	<b>110</b>
5.4.1 Indicateurs de performance d'un robot rigide . . . . .	110
5.4.2 Indicateurs de performance basés modèle . . . . .	112
5.4.3 Indicateurs de performance basés simulation . . . . .	114
5.4.4 Critères de faisabilité et de dimensionnement . . . . .	117
<b>5.5 Analyse de la solution</b> . . . . .	<b>119</b>
5.5.1 Évaluation de performances et comparaison de systèmes . . . . .	119
5.5.2 Analyse de sensibilité et amélioration . . . . .	119
5.5.3 Itérations de conception . . . . .	120
<b>5.6 Fabrication et validation expérimentale</b> . . . . .	<b>121</b>
<b>5.7 Illustration sur le cas du projet YAKA</b> . . . . .	<b>122</b>
5.7.1 Exemple d'itération de conception . . . . .	122
5.7.2 Analyse de l'influence des paramètres incertains . . . . .	123
<b>5.8 Synthèse de l'utilisation des indicateurs de performance</b> . . . . .	<b>124</b>
<b>5.9 Limites et perspectives</b> . . . . .	<b>126</b>
<b>5.10 Conclusion</b> . . . . .	<b>126</b>
<b>5.11 Références</b> . . . . .	<b>127</b>

---

La conception de systèmes est une discipline dotée de très nombreux outils d'ingénierie destinés au choix et au dimensionnement. En particulier en robotique, ces outils orientent généralement la conception mécanique de façon à pouvoir négliger les effets de la flexibilité sur les performances du système (voir partie 2.1.2). En conséquence, les robots flexibles sont le plus souvent écartés des solutions envisagées, en particulier dans un contexte industriel. Cependant, cette famille de solutions présente des caractéristiques intéressantes dont de nombreuses applications peuvent bénéficier, comme c'est le cas du projet YAKA.

Ce chapitre propose des outils spécifiques pour la conception de robots flexibles afin d'enrichir les techniques de conception classiques. Afin de faciliter leur appréhension, ces outils et les considérations relatives à leur utilisation sont décrits au sein d'une démarche qui est proposée à titre illustratif.

Étant donné le nombre et la variété des éléments qui ont un impact sur la conception d'un système, il semble nécessaire de proposer une démarche ouverte et adaptable, qui permet à un concepteur de faire des choix pertinents techniquement tout en ayant la connaissance des éléments qui ne peuvent pas être considérés formellement (savoir-faire, fournisseurs, délais, etc.).

Les travaux théoriques présentés dans ce chapitre sont confrontés au cas d'application du projet YAKA qui permet d'illustrer l'utilisation des outils, bien que ceux-ci soient génériques.

Dans une première partie, nous exposons le cadre et la démarche de conception puis nous passerons par les différentes étapes du processus proposé : modélisation du système (partie 5.2), évaluation et mesure de performances via simulation (parties 5.4 et 5.3) puis analyse (partie 5.5). Une fois une solution satisfaisante déterminée, nous évoquerons les enjeux liés à la fabrication et la validation expérimentale (partie 5.6). Les résultats appliqués au robot YAKA sont exposés et discutés en partie 5.7. La partie 5.9 discute enfin des limites et perspectives d'évolution des outils de conception de robots flexibles proposés dans ce chapitre.

## 5.1 Cadre de conception

La conception d'un robot s'inscrit dans un cadre complexe qu'il s'agit de définir : hypothèses générales (partie 5.1.1) et cahier des charges (partie 5.1.2).

On suppose qu'une étude préliminaire basée sur les outils présentés dans la partie 2.5 permet de déterminer une cinématique et propose une première solution technique qui décrit un système de manière complète avec un choix préliminaire de composants (liaisons, actionneurs, segments, etc.). Les outils proposés permettent alors d'évaluer ce point de départ et de le faire évoluer jusqu'à obtention d'un résultat satisfaisant.

### 5.1.1 Périmètre de l'étude

Du fait de l'interaction forte entre le système mécanique et son système de pilotage, l'étude de conception doit considérer le système complet, en incluant le comportement des actionneurs et du système de pilotage.

La figure 5.1 présente les éléments considérés à l'étape de conception. Un contrôleur de référence, des trajectoires types et des sollicitations types sont figés lors de la définition du problème. Le système mécanique flexible et les actionneurs, quant à eux, évoluent au cours du processus de conception. [LU et collab. \[2015\]](#) montre l'importante influence que

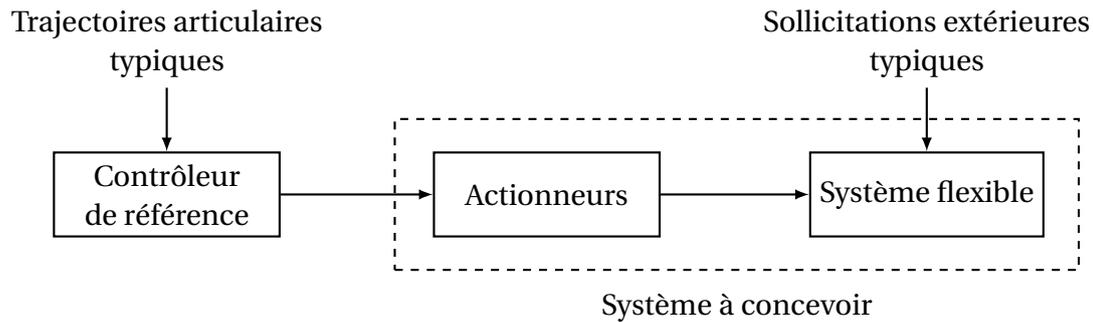


FIGURE 5.1 – Périmètre considéré pour les travaux de conception : Le processus détermine le système flexible et ses actionneurs, une architecture de référence est figée pour une évaluation de performances impartiale des différentes solutions.

peut avoir le comportement des articulations sur un système flexible, ce qui motive de les prendre en compte au cours du processus de conception.

Le modèle mécanique complet (3.2) et sa forme réduite (3.23) obtenus dans le chapitre 3 sont respectivement utilisés pour représenter la mécanique flexible du système de manière analytique ou dans l'environnement de simulation. Le modèle d'actionneurs obtenu dans la partie 3.1.3 est associé au modèle mécanique flexible pour représenter les dissipations dues aux frottements dans les réducteurs.

Comme présenté dans la partie 2.5, de nombreux travaux s'intéressent à la conception de robots flexibles et permettent de mener des démarches de conception basées sur des indicateurs de performance. Cependant, ces approches concernent le plus souvent uniquement la structure mécanique du système [ALESSANDRO et ROSARIO \[2014\]](#); [COURTEILLE et collab. \[2009\]](#); [LI et collab. \[2009\]](#). Les travaux présentés dans ce chapitre proposent des outils et un cadre permettant de les intégrer dans une approche plus globale qui prend en compte l'application visée, le comportement des actionneurs et du contrôleur.

### 5.1.2 Spécifications et conception préliminaire

Le point de départ de la démarche proposée est une conception préliminaire réaliste obtenue à l'aide des spécifications et des outils de conception classiques.

Les spécifications du système définissent généralement diverses caractéristiques relatives à sa mécanique et ses actionneurs, par exemple :

- Son espace de travail géométrique.
- Ses vitesses maximales à atteindre dans chaque zone de l'espace de travail.
- Ses accélérations maximales à atteindre dans chaque zone de l'espace de travail.
- Sa charge utile maximale en bout de bras.
- Ses actions mécaniques maximales admissibles en bout de bras.

De plus, l'application envisagée pour le système fournit des spécifications telles que :

- Les trajectoires types à réaliser.
- Les interactions avec l'environnement.

Les outils de conception classique (indicateurs et méthodes) comme ceux proposés par [PAHL et BEITZ \[2013\]](#); [PHOLSIRI \[2004\]](#) et [ANGELES et PARK \[2016\]](#) sont utilisés afin de déterminer une solution admissible du point de vue de ces spécifications, sans prendre en compte les problématiques liées au caractère flexible du robot.

Les contraintes relatives à l'application permettent d'éliminer dès l'étape de conception préliminaire certaines solutions techniques, afin de réduire le domaine de recherche. En effet, le domaine d'application implique des contraintes fortes sur le système. C'est par exemple le cas du domaine médical, de l'agroalimentaire et de la robotique spatiale, qui réduisent drastiquement les choix techniques admissibles, du fait de normes en vigueur et de spécificités techniques très contraignantes.

La conception préliminaire inclut le choix de chaque élément mécanique (matériau, section, etc.) et des actionneurs (courbe couple/vitesse, rapport de réduction, etc.), elle doit être conforme avec toutes les exigences du cahier des charges qui ne dépendent pas du caractère flexible du robot, qui est considéré par la suite.

La figure 5.2 présente deux conceptions préliminaires considérées à l'origine du projet YAKA (espace de travail utile représenté par le volume rose), elles définissent la cinématique et les solutions techniques envisagées (emplacement des liaisons et actionneurs, pré dimensionnement des actionneurs, etc.). Pour des raisons opérationnelles, notamment d'encombrement sur le pont du navire, la cinématique parallèle (à droite de la figure 5.2) est exclue.

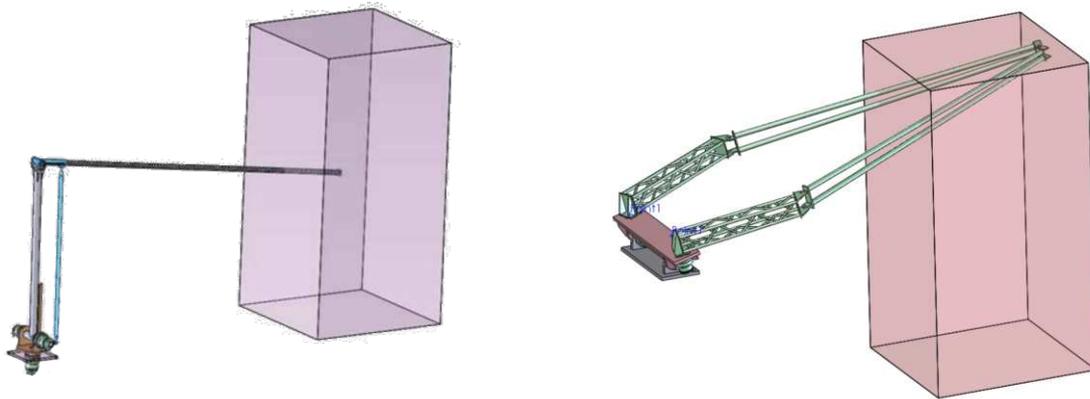


FIGURE 5.2 – Exemples de conceptions préliminaires d'un robot flexible, à l'origine du processus de conception. À gauche, une morphologie de type série, avec une chaîne cinématique fermée pour déporter l'actionnement (solution retenue). À droite, une autre solution envisagée à l'origine du projet, exclue pour des raisons d'encombrement.

### 5.1.3 Scénarios d'utilisation et simulation

Au-delà des spécifications listées en partie 5.1.2 qui doivent être prises en compte pour la définition de la conception préliminaire, le comportement global du système flexible doit être qualifié. Cette étape ne peut se faire que par le biais d'une simulation dynamique complète, sur un scénario représentatif d'utilisation.

Le modèle de simulation obtenu dans la partie 3.3, associé au modèle d'actionneur (partie 3.1.3) et à la loi de commande de référence (partie 5.3) permet de mener la conception au plus proche des objectifs et contraintes de l'application visée. Des trajectoires types du robot et ses interactions avec l'environnement doivent alors être renseignées et représentatives des différents scénarios d'utilisation.

### 5.1.4 Démarche proposée

Cette partie présente comment les outils proposés dans cette thèse peuvent être intégrés à une démarche systématique afin de mener à bien la conception d'un robot flexible.

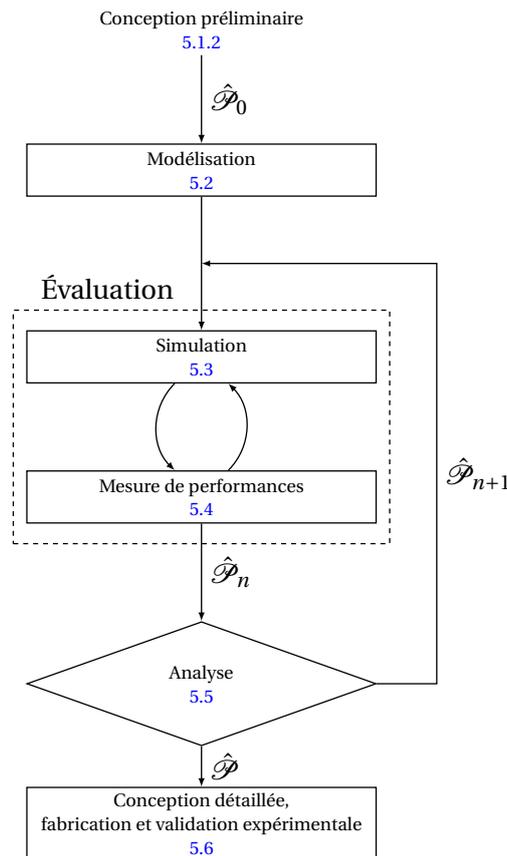


FIGURE 5.3 – Processus de conception d’un robot flexible associé aux différents outils proposés dans ce chapitre. Chaque étape de ce processus est l’objet d’une partie de ce chapitre.

Elle se veut adaptée à un contexte industriel ou académique dans lequel les moyens techniques et humains sont limités, capable d’aboutir à une solution satisfaisante dans un temps limité.

Il nous semble important d’attirer l’attention sur le fait que comme mentionné précédemment, de nombreuses contraintes dépendent de l’application et d’éléments indirects comme les normes en vigueur ou l’environnement (médical, agroalimentaire, spatial, etc.) qui imposent des considérations supplémentaires (facilité de nettoyage, réduction des vibrations, du bruit, des masses, etc.) qui ne sont pas toujours formalisables, et nécessitent l’expertise d’un concepteur averti. En ce sens, la démarche proposée ne doit pas être considérée comme un algorithme automatique et nécessite le regard critique et la vigilance de son utilisateur à chaque étape.

Comme présenté dans la partie 5.1.2, l’étude se repose sur une conception préliminaire obtenue à l’aide de moyens de conception classique. Elle se focalise sur la conception de la partie mécanique flexible (actionneurs, liaisons et structure) en prenant en compte le comportement du contrôleur et en la confrontant à un scénario d’utilisation réaliste.

La démarche proposée porte uniquement sur les problématiques spécifiques aux robots flexibles. Par conséquent, elle ne traite pas la conception de l’électronique de commande, de l’électronique de puissance, de l’architecture logicielle ni du choix des capteurs.

La figure 5.3 présente les différentes étapes de la démarche de conception proposée, qui sont détaillées dans les parties suivantes. Chaque jeu de paramètres  $\hat{\mathcal{P}}$  représente une conception donnée (voir partie 5.2.1).

## 5.2 Modélisation des systèmes candidats

Afin de pouvoir considérer les systèmes candidats de façon standard, il convient d'adopter des conventions pour leur paramétrisation et leur modélisation.

### 5.2.1 Paramétrisation d'une conception

Un jeu de paramètres  $\mathcal{P}$  est renseigné dans un tableau qui regroupe toutes les valeurs numériques associées aux propriétés mécaniques du modèle présenté dans la partie 3.1.2. Chaque jeu de paramètres numériques  $\mathcal{P}$  correspond à une conception qui peut être évaluée avec les outils proposés dans ce chapitre. Chaque élément du jeu de paramètres  $\mathcal{P}$  décrit une propriété physique (masse, raideur, frottement, amortissement, etc.) propre à un des éléments du système.

Le processus de conception se limite généralement au choix et à l'assemblage de composants du commerce, seuls les segments et pièces mécaniques d'interfaces étant conçus sur mesure. Tous les paramètres du jeu  $\mathcal{P}$  ne sont donc pas indépendants, leurs valeurs numériques dépendent du composant qu'ils décrivent. Il est donc impossible de faire varier de manière continue chaque paramètre individuellement. En pratique, la conception se limite à une recherche dans un espace limité à des valeurs discrètes correspondant à des composants existants, chaque choix de composant déterminant plusieurs paramètres simultanément. Par exemple, les propriétés des segments décrites dans la partie 3.1.2 dépendent du matériau choisi, qui fixe les paramètres  $\rho$ ,  $E$ ,  $G$ ,  $\alpha$  et  $\beta$ . Les sections de poutres  $S$  et moments d'inertie  $I_x$ ,  $I_y$ ,  $I_z$  dépendent quant à eux des dimensions géométriques des poutres, qui prennent en général des valeurs discrètes issues de catalogues.

Le choix des liaisons, qu'il s'agisse d'éléments sur étagère ou d'un assemblage d'éléments, définit pour chaque articulation les paramètres de raideur  $K_{rx}$ ,  $K_{ry}$ ,  $K_{rz}$ ,  $K_a$ ,  $K_r$  et d'amortissement associés  $C_{rx}$ ,  $C_{ry}$ ,  $C_{rz}$ ,  $C_a$ ,  $C_r$  (voir partie 3.1.2). Le choix des actionneurs définit enfin le groupe de paramètres correspondant au moteur ( $K_i$  et  $K_v$ ), et à la transmission :  $R$ ,  $F_s$ ,  $F_v$ ,  $\lambda$ . La masse totale de l'actionneur détermine la valeur de la masse localisée associée au nœud correspondant.

L'interdépendance des paramètres et l'aspect discret des solutions techniques accessibles motivent l'élaboration d'une démarche de conception en forte interaction avec le concepteur, plutôt qu'un processus d'optimisation global qui supposerait de décrire l'espace des solutions dans son ensemble (liste de toutes les solutions techniques envisageables associées à des paramètres numériques) ainsi que de formaliser l'ensemble des contraintes et objectifs de conception.

### 5.2.2 Modélisation système

Le modèle dynamique analytique de la conception préliminaire est obtenu sous la forme (3.2), à l'aide de la démarche de modélisation présentée dans le chapitre 3.

On considère un jeu de paramètres initiaux  $\hat{\mathcal{P}}_0$  et leurs valeurs numériques qui décrivent les propriétés physiques de la conception préliminaire. À chaque itération  $i$  de la conception correspond un jeu de paramètres  $\hat{\mathcal{P}}_i$ , le modèle symbolique reste inchangé si la cinématique n'est pas remise en cause.

À chaque itération, le modèle de simulation (3.23) est déduit du modèle symbolique initial et du jeu de paramètres, pour permettre l'évaluation des performances dans le contexte de l'application.

### 5.3 Simulation et architecture de commande de référence

Afin de permettre la comparaison des performances de différentes conceptions du système, on simule une trajectoire type sollicitant tous les actionneurs simultanément, sans actions mécaniques extérieures. Cette trajectoire est représentée sur la figure 5.4, elle se veut représentative d'une opération de lancement d'un UAV. Pour évaluer équitablement les systèmes candidats, il est nécessaire de définir une loi de commande de référence de comportement connu et similaire, indépendamment du matériel piloté.

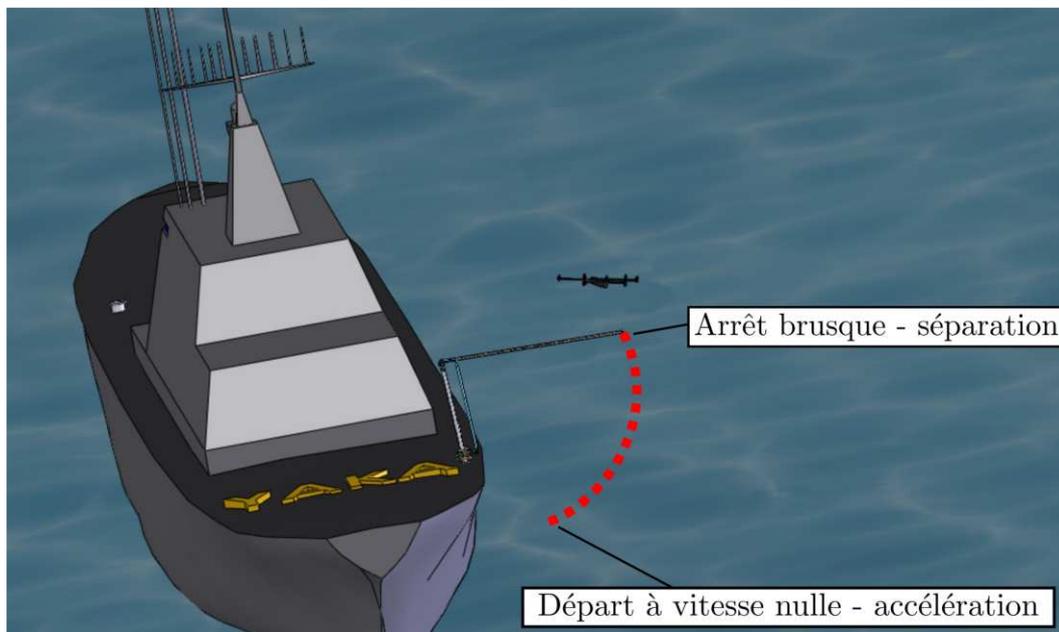


FIGURE 5.4 – Trajectoire type de lancement d'un UAV, considérée pour le processus de conception du robot YAKA : un UAV de 5Kg est lancé à une vitesse de 10m/s.

Une loi de commande par inversion de modèle NDI couramment utilisée en robotique rigide [KHALIL et DOMBRE \[2004\]](#) permet de linéariser la dynamique rigide du robot. Cette méthode éprouvée permet d'imposer la dynamique du système équivalent rigide en fixant des gains proportionnel  $K_p$  et dérivé  $K_d$  communs. Ce choix permet de comparer différentes conceptions avec un contrôleur de comportement identique.

Le robot flexible dont la dynamique rigide est linéarisée peut alors être assimilé à un ensemble d'oscillateurs dont le comportement vibratoire peut être maîtrisé à l'aide d'un Input Shaper, tel que présenté dans le chapitre 4.

L'Input Shaper et la commande par inversion de modèle étant définis en fonction du modèle du système lui-même, cette architecture de commande a un comportement de référence similaire, quelles que soient les valeurs des paramètres  $\hat{\mathcal{P}}$ , qui permettent l'évaluation et la comparaison de solutions pendant le processus de conception. On choisit à l'étape de conception un Input Shaper qui considère tous les modes déterminants, selon la valeur de leur fréquence propre, comme présenté dans la partie 2.1.2.

La figure 5.5 présente l'architecture de commande de référence proposée.

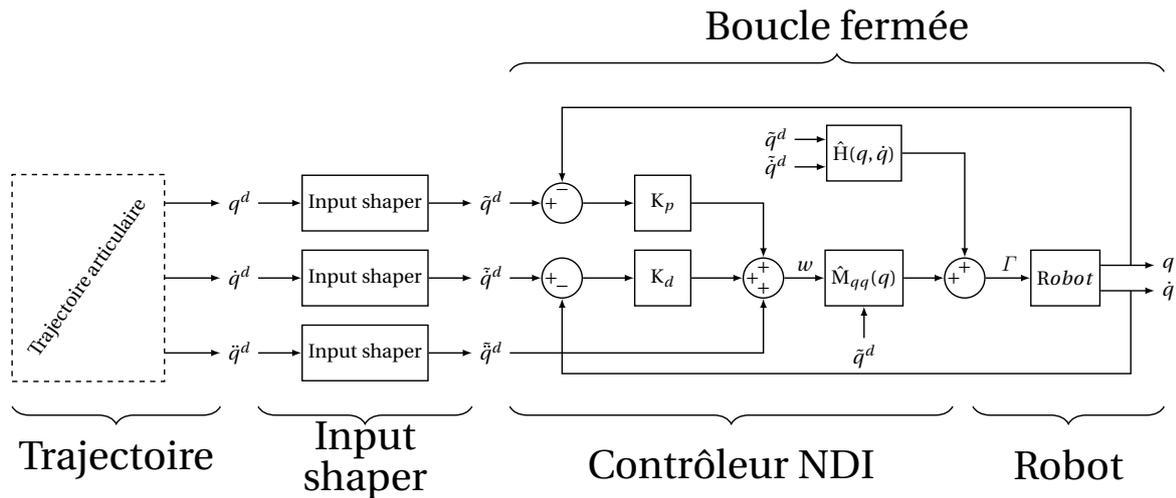


FIGURE 5.5 – Architecture de commande de référence choisie pour la conception : Linéarisation de la dynamique rigide avec un contrôleur par inversion de modèle NDI (asservissement en boucle fermée au niveau articulaire). Un Input Shaper prend en charge la maîtrise des vibrations de la structure flexible.

## 5.4 Mesure de performance

Les indicateurs de performance permettent de quantifier la qualité d'une solution et sont couramment utilisés pour assister les choix du concepteur. Cette partie présente quelques indicateurs classiques utilisés pour les robots rigides (partie 5.4.1) ainsi que ceux proposés pour la conception de robots flexibles (parties 5.4.2 et 5.4.3). La partie 5.4.4 propose d'autres indicateurs principalement issus des résultats de simulation, utiles à la conception détaillée d'un système (étape suivant la démarche de conception proposée dans ce chapitre).

### 5.4.1 Indicateurs de performance d'un robot rigide

Les principaux indicateurs de performance de robots rigides sont aussi utiles à la conception de robots flexibles. Ces éléments de l'état de l'art sont notamment présentés par ANGELES et PARK [2016]; PHOLSIRI [2004] et KHALIL et DOMBRE [2004].

#### 5.4.1.1 Atteindre des positions : espace de travail géométrique

Une des premières considérations lors de la conception d'un bras manipulateur est la définition de son espace de travail, autrement dit, de sa capacité à atteindre différentes positions et orientations dans l'espace, d'un point de vue uniquement géométrique.

Les concepteurs cherchent généralement à maximiser le volume de l'espace de travail, mais des contraintes de sécurité peuvent parfois nécessiter de le limiter volontairement afin d'éviter mécaniquement l'accès à certaines zones jugées critiques.

Vis-à-vis de l'application, cet indicateur est binaire, positif si les zones à atteindre sont (complètement) incluses dans l'espace de travail géométrique **ET** les zones interdites sont (totalement) exclues de l'espace de travail géométrique.

La capacité d'un robot à atteindre certaines positions ne suffit généralement pas à vérifier si il est capable d'y accomplir des tâches. L'espace de travail "utile" du robot est généralement un sous-espace de l'espace de travail géométrique, dans lequel le système

peut atteindre certaines vitesses et accélérations et/ou appliquer des efforts (indicateurs suivants).

#### 5.4.1.2 Transmettre des vitesses : ellipsoïde de vitesse et manipulabilité cinématique

Afin de déterminer la capacité d'un manipulateur à atteindre des vitesses cartésiennes, l'ellipsoïde de vitesses, présentée par **KHALIL et DOMBRE [2004]** définit les vitesses atteignables en bout de bras  $\dot{\mathbf{X}}_{\max}$  en fonction des vitesses articulaires maximales  $\dot{\mathbf{q}}_{\max}$  (limites des actionneurs) et de la matrice Jacobienne  $\mathbf{J}$  du système, issue du modèle cinématique du robot. La manipulabilité cinématique est un indicateur scalaire qui décrit la capacité d'un système à atteindre des vitesses. Il s'agit du volume de l'ellipsoïde de vitesse, défini par  $\sqrt{\det(\mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{J}^T(\mathbf{q}))}$ .

Dans le cas de la conception du robot YAKA, l'ellipsoïde de vitesses est utilisé pour vérifier la capacité du robot à atteindre les vitesses nécessaires au lancement et à la récupération d'un **UAV**, conformément au cahier des charges.

Lors de la conception d'un robot polyvalent (sans application précise définie), on peut chercher à maximiser la plus petite valeur singulière de  $\mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{J}^T(\mathbf{q})$  qui détermine la vitesse minimale atteignable (toutes directions confondues) pour chaque position articulaire  $\mathbf{q}$ .

#### 5.4.1.3 Transmettre des accélérations : ellipsoïde de manipulabilité dynamique et rayon d'accélération

L'ellipsoïde de manipulabilité dynamique proposé par **YOSHIKAWA [1985]** (publication en langue japonaise, retranscrite par **ANGELES et PARK [2016]**), permet de déterminer les capacités d'accélération d'un robot en fonction des couples maximaux applicables par ses actionneurs.

De façon similaire à la manipulabilité cinématique pour les vitesses, le rayon d'accélération est un scalaire qui définit la capacité minimale d'accélération (toutes directions confondues) d'un robot manipulateur. Les limitations de chaque actionneur (couple maximal et minimal  $\tau_s$ ) et le modèle dynamique du robot (3.3) définissent pour un état donné  $(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  du robot le volume d'accélération cartésienne maximale  $\ddot{\mathbf{X}}$ . Le rayon d'accélération est alors défini comme le rayon maximal d'une sphère centrée, incluse dans ce volume **GRAETTINGER et KROGH [1988]**.

#### 5.4.1.4 Transmission des efforts

La matrice Jacobienne  $\mathbf{J}$  permet de déterminer le rapport de transmission entre les actions cartésiennes  $\mathbf{F}$  en bout de bras et les couples  $\Gamma$  appliqués par les actionneurs (à vitesse nulle) **KHALIL et DOMBRE [2004]** :

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}^{-T} \Gamma \quad (5.1)$$

Connaissant les capacités des actionneurs, il est alors possible de déterminer l'ellipsoïde d'efforts applicables en bout de bras et d'en déduire de manière similaire aux précédents indicateurs une capacité minimale d'effort, toutes directions confondues.

Les indicateurs de capacité dynamique proposés par **BOWLING et KHATIB [2005]** étendent la notion de rayon d'accélération et de transmission d'efforts pour évaluer la capacité à transmettre des efforts au cours d'un mouvement, en prenant en compte l'état  $(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  du robot.

### 5.4.2 Indicateurs de performance basés modèle

La connaissance du modèle dynamique flexible du système (équation (3.2) ) permet de calculer des indicateurs globaux, reflétant son comportement élasto-dynamique. La partie du modèle relative à la dynamique rigide permet naturellement de calculer les indicateurs adaptés aux robots rigides présentés précédemment. L'évaluation des performances d'un robot flexible nécessite la définition d'indicateurs adaptés.

L'étude des vecteurs propres  $Vp_i$  et valeurs propres  $vp_i$  de la matrice  $M_{uu}^{-1}K_{uu}$  permet par exemple l'étude du comportement vibratoire du système.

Les indicateurs présentés dans cette partie décrivent des propriétés physiques intrinsèques du système et donnent rapidement des résultats généraux, indépendants de l'application considérée.

#### 5.4.2.1 Raideur du système

La matrice de raideur du système permet de déterminer le déplacement élastique du système (représenté par le vecteur d'état  $u$ ), soumis à un effort connu  $F_{ext}$ .

En statique (pour  $\dot{q} = \ddot{q} = \ddot{u} = \dot{u} = 0$  et en ne considérant pas la déflexion statique due à la gravité), le modèle donné par l'équation (3.2) est réduit à :

$$K_{uu}u = F_{ext} \quad (5.2)$$

De même que pour les indicateurs de manipulabilité cinématique et dynamique, on peut dériver de cette relation un ellipsoïde de raideur du système et ainsi des indicateurs attestant de la raideur du système. Par exemple, on s'intéresse couramment aux valeurs des valeurs singulières de  $K_{uu}$  et au rayon de la plus grande sphère incluse dans l'ellipsoïde de raideur. L'étude proposée par COURTEILLE et collab. [2009] est un exemple d'utilisation de ces indicateurs dans le processus de conception d'un robot flexible.

#### 5.4.2.2 Valeur des fréquences propres

La valeur des fréquences propres des modes du système permet dans un premier temps de définir ceux qui doivent être pris en compte (voir partie 2.1.2).

La bande passante  $\omega$  atteignable sans prendre en compte l'effet des flexibilités (et donc utiliser les outils de conception classiques) est alors égale à  $\frac{\omega_1}{3}$ , avec  $\omega_1$  la pulsation propre du premier mode de vibration.

Si la bande passante  $\omega$  est définie, on peut déduire directement que tous les modes propres de pulsation propre inférieure à  $3\omega$  doivent être pris en compte lors de la conception.

Cet indicateur est couramment utilisé dans l'industrie pour la conception de systèmes rigides (dimensionnement de différents éléments de machine pour placer le premier mode de vibration au-delà des sollicitations de plus haute fréquence. Des travaux antérieurs utilisent notamment cet indicateur pour mener un processus de conception d'un robot en maximisant la valeur des modes de vibration ALESSANDRO et ROSARIO [2014]; LARA-MOLINA et collab. [2016]; LI et collab. [2009]. Dans certains cas, le concepteur peut aussi chercher à fixer la valeur des fréquences propres de certains modes TSAGARAKIS et collab. [2013].

### 5.4.2.3 Compatibilité avec l'environnement vibratoire

Les robots manipulateurs sont le plus souvent solidement fixés au sol, l'assemblage peut alors être supposé infiniment rigide et immobile. Cependant, ils peuvent aussi être embarqués sur divers véhicules qui sollicitent la structure avec des vibrations et mouvements qui ne doivent pas dégrader les performances ni la stabilité du système.

Afin de garantir la compatibilité vibratoire entre le bras manipulateur et son environnement, le spectre fréquentiel des sollicitations doit être identifié et confronté au comportement vibratoire du robot manipulateur. Les fréquences propres de la structure doivent idéalement être nettement distinctes des principales fréquences de sollicitations extérieures.

Pour chaque source de vibrations identifiée, on peut s'intéresser au gain  $G$  de la fonction de transfert de la structure mécanique entre le point d'interaction avec la sollicitation (le plus souvent à la base du robot) et le point d'intérêt à piloter (généralement le bout du bras). Cet indicateur permet de connaître le taux d'amplification ( $G > 0$ ) ou d'atténuation ( $G < 0$ ) du système mécanique, vis-à-vis d'une sollicitation à une fréquence donnée.

Dans le cadre du projet YAKA, il est par exemple envisagé de placer un bras robot sur un navire motorisé, faisant route. Le bras manipulateur est alors soumis à diverses sollicitations. Au-delà des mouvements de grande amplitude et basse fréquence dus à la houle, le navire comporte des sources de vibrations. En effet, ce type de navire produit des vibrations significatives aux fréquences de rotation des moteurs, des hélices, des transmissions mécaniques et leurs différentes harmoniques (multiples de la fréquence principale). S'il est exposé au vent, le bras manipulateur est aussi sollicité par les efforts de traînée aérodynamique.

Il est enfin nécessaire d'étudier l'assemblage entre le robot et le véhicule porteur. Si l'assemblage n'est pas infiniment rigide devant la structure du robot manipulateur, il est nécessaire de considérer le comportement vibratoire du système complet, en considérant la dynamique du manipulateur, de l'assemblage et du véhicule porteur.

### 5.4.2.4 Incertitudes et variations des modes propres

Les lois de commande basées sur le modèle flexible telles que la méthode d'Input Shaping proposée dans le chapitre 4 présentent une robustesse connue aux erreurs de modélisation et aux variations du comportement vibratoire du système.

La minimisation de la variation des fréquences propres sur l'espace de travail du robot peut alors être un objectif de conception, s'il n'est pas envisagé d'employer des méthodes adaptatives telles que celles présentées dans le chapitre 4.

Dans le cas du robot YAKA, le déport des actionneurs et la déduction des masses embarquées par la structure permettent notamment de réduire les variations des fréquences propres.

### 5.4.2.5 Commandabilité des modes

La commandabilité des modes de vibration  $\mathbf{Ctr}_{a,i}$  permet de déterminer la capacité de chaque actionneur à échanger de l'énergie avec chaque mode de vibration, et donc leur capacité à interagir. Cet indicateur est aussi utilisé dans le chapitre 4, est détaillé dans la partie 4.2.1.2.

Une faible commandabilité permet d'éviter que la structure puisse être excitée par les actionneurs, mais en présence de sources d'excitation extérieure, les actionneurs ont une faible capacité à rejeter les perturbations. Les objectifs de conception concernant la

commandabilité des modes dépendent directement de l'application et des stratégies de contrôle choisies.

### 5.4.3 Indicateurs de performance basés simulation

Les indicateurs présentés précédemment peuvent être calculés directement à partir du modèle dynamique du système. Ils ont l'avantage d'être obtenus facilement et rapidement, ce qui permet d'explorer un vaste espace de solutions en peu de temps. Cependant, ils ne prennent pas en compte le scénario d'utilisation du robot.

Il est nécessaire d'avoir recours à une simulation pour évaluer les performances du système complet, doté de ses actionneurs et de son contrôleur vis-à-vis d'une application donnée. Les informations obtenues à l'issue d'une simulation sont très riches, mais leur obtention est gourmande en temps de calcul<sup>1</sup>.

Pour chaque scénario de simulation, on obtient l'évolution temporelle de variables clés du système, notamment :

- L'état courant du système (position, vitesse et accélération).
- Le couple instantané délivré par les actionneurs.
- Les actions mécaniques perçues en chaque point du maillage.
- L'état de déformation du système en chaque point du maillage.

Ces résultats sont exploités pour calculer les indicateurs de performance décrits dans les parties suivantes, ils peuvent être aussi directement utilisés pour l'étape de conception détaillée et le dimensionnement de composants annexes (voir partie 5.4.4).

#### 5.4.3.1 Énergie totale fournie par les actionneurs

La puissance totale instantanée délivrée par les actionneurs est un indicateur global qui peut être directement calculé à partir de l'état courant du robot :

$$P_{tot}(t) = \mathbf{I}^T(t) \dot{\mathbf{q}}(t) \quad (5.3)$$

En particulier pour les actionneurs électriques, on distingue deux modes de fonctionnement :

- Le fonctionnement moteur, lorsque l'actionneur fournit de l'énergie au système :

$$P(t) = \Gamma(t) \dot{q}(t) > 0$$

- Le fonctionnement générateur, lorsque de l'énergie est régénérée :

$$P(t) = \Gamma(t) \dot{q}(t) < 0$$

On considère ici la puissance instantanée totale  $P_{tot}(t) = \mathbf{I}^T(t) \dot{\mathbf{q}}(t)$  délivrée par les actionneurs, sans considérer leur mode de fonctionnement individuel. Cette hypothèse signifie implicitement que l'on considère que les échanges de puissance d'un moteur à l'autre se font sans perte. Cette supposition est valable dans le cas de robots manipulateurs équipés de moteurs brushless et de contrôleurs à fort rendement, comme c'est le cas du robot YAKA.

1. Le temps de simulation est très dépendant de la complexité du modèle, de son conditionnement numérique, du scénario, des outils de résolution et du temps de simulation. À titre d'exemple, une simulation du robot YAKA telle que celle exploitée pour illustrer ce chapitre nécessite moyenne 250s de calcul pour 85 de simulation avec un processeur intel core i7-5500U.

Le système de distribution d'énergie en amont des actionneurs détermine en revanche quelle portion de la puissance négative est effectivement régénérée<sup>2</sup> ou dissipée<sup>3</sup>.

La puissance instantanée permet de calculer l'énergie impliquée dans la tâche du robot. On peut calculer différents indicateurs énergétiques, en fonction du mode de régénération considéré :

- L'intégrale de la puissance instantanée sur la durée de la trajectoire permet de dresser un bilan énergétique global, en considérant que toute la puissance négative est régénérée.

$$E_{tot} = \int \mathbf{I}^T(t) \dot{\mathbf{q}}(t) dt \quad (5.4)$$

- L'intégrale de la valeur absolue de la puissance instantanée indique l'énergie totale qui transite par les actionneurs, quel que soit le mode de fonctionnement. C'est l'énergie totale consommée par le système si l'on considère que toute la puissance négative est dissipée.

$$E_{tot} = \int |\mathbf{I}^T(t) \dot{\mathbf{q}}(t)| dt \quad (5.5)$$

- Plus généralement, on peut déterminer la quantité d'énergie consommée par les actionneurs si seule une part  $a$  (entre 0 et 100%) de la puissance négative est régénérée :

$$E_{tot} = \int pos(\mathbf{I}^T(t) \dot{\mathbf{q}}(t)) - \mathcal{A} neg(\mathbf{I}^T(t) \dot{\mathbf{q}}(t)) dt \quad (5.6)$$

Avec  $pos(x) = \frac{x+|x|}{2}$  la partie positive de  $x$  et  $neg(x) = \frac{x-|x|}{2}$  la partie négative de  $x$ .

L'efficacité  $\mathcal{A}$  en mode génératrice dépend directement du système de distribution de puissance et de la capacité de la source d'énergie à accepter la puissance entrante (efficacité de la recharge de batteries ou de la réinjection sur le réseau). Dans le cas du robot YAKA, l'énergie est délivrée par des batteries et les contrôleurs de moteurs sont capables de régénérer de l'énergie au freinage. La prise en compte de l'efficacité de régénération permet donc de déterminer les besoins énergétiques réels (consommation énergétique réaliste) et de dimensionner les composants électriques de puissance (capacité de recharge maximale des batteries, courant maximal admissible par les contrôleurs de moteurs, etc.).

L'énergie mécanique totale nécessaire pour réaliser une tâche donnée est un témoin intéressant de l'efficacité du système d'un point de vue global. Il est en général intéressant de la minimiser, puisque tout l'excédent d'énergie consommée qui n'est pas directement utile à l'application est à minima inefficace d'un point de vue énergétique (sur dimensionnement, surconsommation, etc.), sinon destructif pour le système (usure, fatigue prématurée, etc.).

#### 5.4.3.2 Énergie impliquée dans les modes de vibration

L'énergie modale LYON [2014]; MAXIT et GUYADER [2003] est un indicateur qui permet d'évaluer le niveau d'énergie global impliqué dans les vibrations de la structure. Dans une démarche de conception visant à réduire les manifestations de la flexibilité, on cherche généralement à le minimiser.

2. charge de batteries ou réinjection sur le réseau électrique.

3. dissipation dans des résistances de puissance, par friction mécanique, etc.

Le modèle réduit (3.23) utilisé pour la simulation expose directement l'état d'excitation de chaque mode à partir de la variable d'état  $\boldsymbol{\eta}$ . L'énergie cinétique impliquée dans les modes de vibration s'écrit :

$$E_{c_{flex}}(t) = \frac{1}{2} \dot{\boldsymbol{\eta}}^T(t) \mathbf{M} \mathbf{e} \mathbf{q} \dot{\boldsymbol{\eta}}(t) \quad (5.7)$$

De même, l'énergie potentielle élastique s'écrit :

$$E_{p_{flex}} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\eta}^T(t) \mathbf{K} \mathbf{e} \mathbf{q} \boldsymbol{\eta}(t) \quad (5.8)$$

L'énergie totale instantanée emmagasinée dans les modes de vibration est alors :

$$E_{flex}(t) = E_{c_{flex}}(t) + E_{p_{flex}}(t) \quad (5.9)$$

L'indicateur scalaire retenu est l'énergie moyenne impliquée dans les modes de vibration, pendant la durée  $\Delta t$  de la trajectoire :

$$E_{tot_{flex}} = \frac{1}{\Delta t} \int E_c(t) + E_p(t) dt \quad (5.10)$$

De même que précédemment, on peut s'intéresser au signe de la puissance instantanée, et envisager qu'une partie de l'énergie négative peut être régénérée (en pratique, si c'est le cas, elle est échangée avec la dynamique rigide, puis régénérée ou dissipée par les actionneurs).

La figure 5.6 montre l'évolution de l'énergie totale échangée avec les modes souples au cours de la simulation en fonction de la quantité de puissance négative régénérée. On remarque que dans le cas où 100% de la puissance négative est régénérée, l'énergie transférée aux modes souples n'est pas nulle en fin de simulation. Cette valeur atteste du fait que le système flexible n'est pas conservatif, elle correspond à l'énergie transférée à la structure flexible puis dissipée dans les matériaux et les liaisons passives.

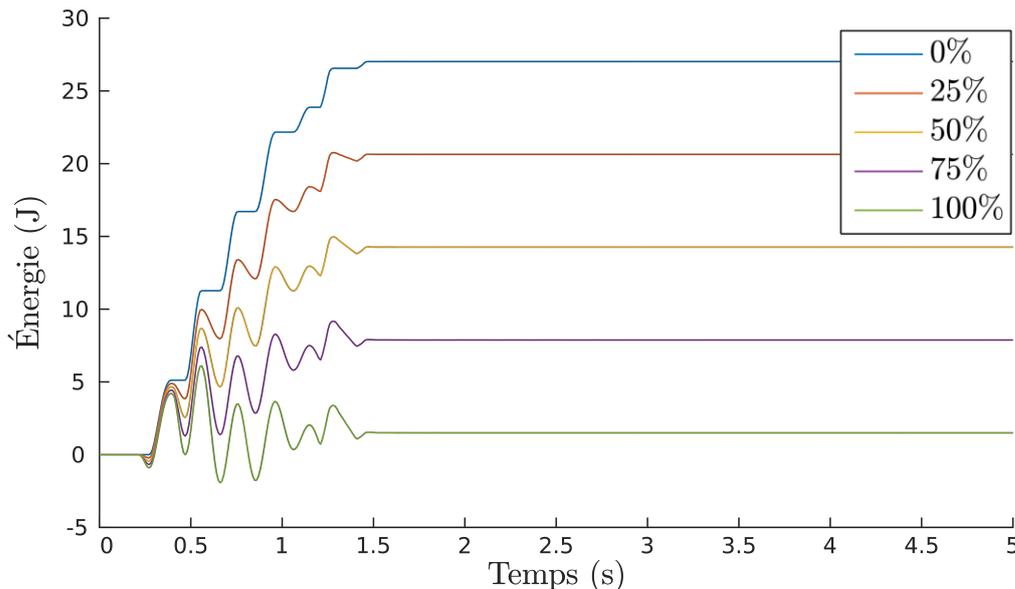


FIGURE 5.6 – Évolution de l'énergie impliquée dans les modes de vibration pour une simulation temporelle de trajectoire de lancement d'un UAV avec le bras YAKA en composite, en fonction de la capacité de régénération du système (efficacité ( $\mathcal{A}$ ), en %).

### 5.4.3.3 Rapport entre l'énergie impliquée dans les modes de vibration et l'énergie totale

La vibration de la structure flexible est un phénomène que l'on cherche le plus souvent à éviter, puisqu'il dégrade les performances dynamiques du système, réduit sa durée de vie, etc. Un indicateur intéressant est le rapport entre l'énergie impliquée dans les modes de vibration (considérée néfaste) et l'énergie totale :

$$\frac{E_{tot_{flex}}}{E_{tot}} = \frac{\frac{1}{\Delta t} \int E_c(t) + E_p(t) dt}{\int |\mathbf{I}^T(t)\dot{\mathbf{q}}(t)| dt} \quad (5.11)$$

Idéalement, cet indicateur est très faible, ce qui suggère que les modes de vibration sont peu sollicités et que la totalité de l'énergie consommée est utilisée pour effectuer le mouvement rigide, qui constitue la part "utile" du mouvement <sup>4</sup>.

### 5.4.3.4 Erreur de suivi en bout de bras

Le calcul de la norme de l'erreur de suivi de position cartésienne maximale en bout de bras est un indicateur primordial pour la plupart des applications, sa valeur est souvent imposée par le cahier des charges :

$$X_{err}(t) = |\mathbf{X}_{cons}(t) - \mathbf{X}(t)| \quad (5.12)$$

$\mathbf{X}_{cons}(t)$  désigne la position cartésienne de consigne, déduite de la trajectoire articulaire de consigne et du Modèle Géométrique Direct rigide (MGD) du robot :  $\mathbf{X}_{cons}(t) = \text{MGD}(\mathbf{q}_{cons})$ . On retient la valeur maximale de l'erreur de suivi comme indicateur, qui permet la comparaison de solutions et doit être confronté aux besoins de l'application :

$$X_{err_{max}} = \max(|\mathbf{X}_{cons}(t) - \mathbf{X}(t)|) \quad (5.13)$$

La figure 5.7 montre l'évolution de  $\mathbf{X}_{cons}(t)$ ,  $\mathbf{X}(t)$  et  $X_{err}(t)$  pour le scénario considéré.

## 5.4.4 Critères de faisabilité et de dimensionnement

Certains critères tels que ceux présentés dans cette partie relèvent davantage de la validation d'une solution ou de son dimensionnement que de sa conception à proprement parler. Ce sont cependant des notions essentielles qui ne doivent pas être négligées, qui interviennent en général en fin de processus de conception (conception détaillée), après le processus présenté dans ce chapitre.

En effet, le choix de nombreux éléments (sources d'énergie, capteurs, câblage, dissipateurs thermiques, etc.) n'est pas l'objet du processus de conception présenté ici. En revanche, les informations qui sont exploitées dans ce chapitre sont utiles pour la conception détaillée du système dans son ensemble.

### 5.4.4.1 Résistance mécanique

Les segments des robots sont conçus de façon à respecter à la fois des critères de raideur et de résistance mécanique. Afin de repousser les modes propres en dehors de la bande passante de l'asservissement (voir partie 2.1.2), les segments des robots rigides

4. Dans des cas particuliers, on peut chercher à exploiter la dynamique flexible du système. Cet indicateur n'est alors pas pertinent et nécessite de distinguer les mouvements flexibles volontaires des vibrations subies.

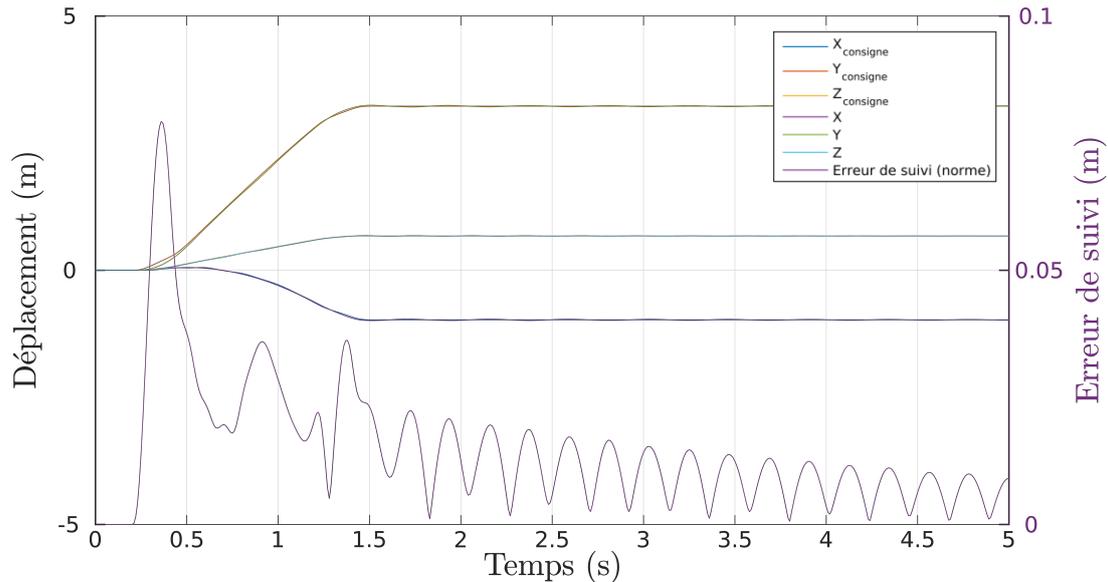


FIGURE 5.7 – Déplacement cartésien et erreur de suivi en bout de bras pour une simulation temporelle de trajectoire de lancement d'un UAV avec le bras YAKA en composite.

sont généralement très massifs, les contraintes mécaniques auxquelles ils sont soumis sont alors le plus souvent très éloignées de la limite à la rupture du matériau.

Les robots flexibles, beaucoup plus légers, sont en revanche soumis à des niveaux de déformation et des contraintes mécaniques nettement supérieurs. Il est donc primordial de considérer les critères de résistance mécanique et de fatigue des matériaux lors de leur conception.

Les courbes de Wöhler [BOUCARD et collab. \[2016\]](#) des matériaux utilisés permettent de déterminer le nombre de cycles de chargement maximal admissible par le matériau (durée de vie) en fonction de la valeur de la contrainte subie.

Un autre indicateur couramment considéré est le coefficient de sécurité  $\mathcal{S}$  vis-à-vis de la résistance mécanique d'un composant, connaissant la valeur des contraintes subies  $\sigma$  et la limite élastique  $\sigma_e$  du matériau :  $\mathcal{S} = \frac{\sigma_e}{\sigma}$

Ce facteur de sécurité  $\mathcal{S}$  doit être supérieur à 1, suffisamment grand pour compenser les incertitudes et les approximations dans le calcul des contraintes ( $\sigma$ ) et les paramètres réels du matériau ( $\sigma_e$ ).

#### 5.4.4.2 Dimensionnement des actionneurs

Pour chaque actionneur, les résultats issus de la simulation permettent de déterminer des spécifications clés du dimensionnement. Les indicateurs listés ci-dessous permettent d'évaluer les sollicitations des actionneurs d'un point de vue mécanique, électrique et thermique, ils sont utiles au choix des moteurs, des réducteurs et de l'électronique de puissance :

- La plage de vitesses de fonctionnement  $[\dot{q}_{min}, \dot{q}_{max}]$ .
- Le couple instantané maximal, à confronter avec le couple transitoire maximal admissible par les transmissions et le courant maximal transitoire admissible par l'électronique de puissance.
- La moyenne quadratique du couple (RMS), dont la limite physique admissible est généralement définie en fonction du comportement thermique des actionneurs.

- La puissance mécanique maximale.
- L'énergie totale nécessaire au mouvement.

Ces données permettent de guider ou de vérifier le choix des actionneurs, mais permettent aussi de dériver des informations utiles au dimensionnement de l'électronique de commande :

- Le courant maximal, déduit du couple maximal et de la constante de courant  $K_i$  du moteur.
- La moyenne quadratique (RMS) du courant, déduite du couple RMS et de la constante de courant  $K_i$  du moteur.
- La tension maximale, déduite de la vitesse maximale et de la constante de vitesse  $K_v$  du moteur.

En fonction des technologies utilisées, il est intéressant de distinguer le mode de fonctionnement des actionneurs (moteur ou générateur), pour le choix des variateurs par exemple (deux ou quatre quadrants, avec ou sans résistance de freinage (ou système de régénération), etc.).

## 5.5 Analyse de la solution

À chaque itération de conception ( $i$ ), la solution correspondant au jeu de paramètres  $\hat{\mathcal{P}}_i$  est évaluée à l'aide des indicateurs de performance rigides et flexibles présentés dans la partie 5.4 et remise en question suivant les étapes décrites ci-dessous.

### 5.5.1 Évaluation de performances et comparaison de systèmes

Les résultats obtenus pour chaque indicateur permettent dans un premier temps de déterminer si la solution étudiée respecte les spécifications, et donc si elle est acceptable en l'état.

Les valeurs obtenues pour chaque indicateur permettent de quantifier les performances de la solution envisagée et sont comparées avec celles obtenues aux itérations précédentes pour confirmer l'amélioration attendue.

Le concepteur peut associer une pondération différente à chaque indicateur en fonction des objectifs de conception qu'il a fixés.

### 5.5.2 Analyse de sensibilité et amélioration

Une fois le bilan de performances dressé à l'étape précédente, une analyse de sensibilité locale des indicateurs de performance aux paramètres  $\hat{\mathcal{P}}_i$  permet de mettre en évidence les pistes d'amélioration de la conception.

Une approche par calcul du gradient permet d'identifier les pistes principales d'amélioration. Des outils plus évolués tels que ceux proposés par MARELLI et SUDRET [2014] permettent de mener à bien une analyse de sensibilité complète, qui n'est pas l'objet de la contribution proposée ici.

Puisque l'espace des solutions<sup>5</sup> n'est en général pas clairement défini, il est donc complexe de formuler un problème d'optimisation qui permettrait de déterminer la meilleure

---

5. Ensemble des solutions possibles en fonction des composants disponibles sur le marché ou fabriquables.

solution vis-à-vis d'objectifs définis. Le concepteur peut en revanche choisir d'étudier différentes stratégies d'évolution pas à pas, en fonction des performances obtenues et des solutions techniques envisageables dans le cadre de l'étude (changement de type et/ou de modèle d'actionneur, de liaison, de matériau, etc.).

L'analyse de sensibilité locale permet d'identifier les composants qui ont le plus d'impact sur les performances et l'orientation globale à suivre. En pratique, l'ensemble des solutions envisageables par le concepteur est assez restreint, du fait des différentes contraintes présentées dans la partie 5.1. La conception se décompose alors en sous-problèmes de conception qui étudient l'impact du changement d'un nombre limité de paramètres sur les performances. Les sous-problèmes considérés par le concepteur à chaque itération de conception sont généralement mieux définis et formalisés que le problème global. Il devient alors possible de formuler des problèmes d'optimisation locaux.

L'analyse de sensibilité permet d'orienter la conception, mais aussi d'anticiper l'impact de l'écart entre le jeu de paramètres théoriques  $\hat{\mathcal{P}}$  (obtenu à partir des spécifications des composants, généralement issues des documentations fournisseurs) et le jeu de paramètres  $\mathcal{P}$  correspondant aux propriétés mécaniques réelles du système. La prise en compte des incertitudes est primordiale pour assurer la validité la démarche et atteindre les performances attendues avec le système réel (voir partie 5.7.2).

Dans le cas où les performances du système s'avèrent être très sensibles à la valeur de paramètres incertains (paramètres non spécifiés par les fournisseurs, par exemple), plusieurs stratégies sont envisageables :

- **Sécurité** : augmenter les coefficients de sécurité et les marges sur les performances attendues pour respecter les spécifications en considérant le cas le plus défavorable. C'est la solution la plus rapide et la plus sûre dans un contexte industriel, contraint en termes de délais.
- **Essai** : réaliser une campagne d'essais sur des composants réels pour obtenir un jeu de paramètres identifiés  $\tilde{\mathcal{P}}$  et ainsi réduire l'incertitude sur les paramètres les plus influents. Cette possibilité est en général très coûteuse en temps et en moyens d'essais. Elle peut cependant être intéressante si le gain envisagé est important, notamment pour des produits destinés à une fabrication en masse, dont le coût unitaire est un élément décisif.
- **Robustesse** : orienter la conception afin de réduire la sensibilité des performances aux paramètres incertains. Cette dernière option prolonge la durée du processus de conception, mais elle peut être pertinente dans des contextes spécifiques. Dans un contexte académique par exemple, des objectifs scientifiques peuvent motiver la volonté de maîtriser finement les incertitudes dès l'étape de conception.

### 5.5.3 Itérations de conception

Les résultats issus de l'étape précédente permettent d'orienter le choix du concepteur vers une nouvelle solution. Cela consiste à choisir des composants parmi une liste restreinte, au vu des résultats de l'analyse de sensibilité et/ou des problèmes d'optimisation. La plupart des paramètres évoluent uniquement de manière discrète (sections de segments pour les profilés standard, composants commerciaux sur catalogue, etc.). Seuls quelques paramètres tels que la longueur des segments ou les propriétés de composants fabriqués sur mesure peuvent être définis de manière continue pour satisfaire exactement une préconisation de l'étape précédente.

La solution obtenue est alors associée au jeu de paramètres  $\hat{\mathcal{P}}_{i+1}$ , puis évaluée à nouveau dans un processus itératif, jusqu'à aboutir à la solution retenue pour la fabrication

$\mathcal{P}$ .

Si la solution courante n'est pas compatible avec les contraintes de conception ou le cahier des charges et que les évolutions envisagées ne permettent pas de les satisfaire, les itérations de conception peuvent aboutir à une impasse. Dans ce cas, il est nécessaire de remettre en cause les choix figés par la conception préliminaire ou les contraintes imposées par le cahier des charges. Il est aussi intéressant d'envisager des solutions techniques auparavant écartées afin d'agrandir l'espace des solutions (montée en compétences sur des nouvelles technologies, recherche de solutions alternatives).

## 5.6 Fabrication et validation expérimentale

Une fois qu'une solution est retenue, le processus de conception présenté dans ce chapitre laisse place à la conception détaillée et au dimensionnement des éléments qui ne sont pas encore définis (électronique, capteurs, thermique, sécurité, etc.), notamment à l'aide des indicateurs de dimensionnement présentés dans la partie 5.4.4.

L'anticipation de l'étape de fabrication est une des préoccupations principales du concepteur, dès la phase de conception préliminaire. Cependant, de nombreux éléments peuvent perturber l'industrialisation et la fabrication du système (engagements non tenus par les fournisseurs, aléas techniques et humains, etc.). L'impossibilité à posteriori d'employer une technologie donnée ou de suivre des décisions prises lors de la conception préliminaire peut imposer de reprendre le processus de conception en intégrant les nouvelles contraintes.

Une fois la fabrication et la mise en route du système achevées, plusieurs étapes permettent de qualifier le comportement de la solution obtenue :

- L'étape de recalage expérimental décrite dans la partie 3.2 permet d'obtenir un jeu de paramètres identifiés  $\tilde{\mathcal{P}}$ , plus représentatif des paramètres réels  $\mathcal{P}$  du système. Ce jeu de paramètres permet alors d'actualiser les performances théoriques du système.
- Certains indicateurs de performance utilisés pour la conception comme les capacités dynamiques du système, la puissance d'actionnement consommée ou la valeur des fréquences propres de la structure peuvent être déterminées expérimentalement sur le système réel. Cette validation peut permettre de déceler d'éventuels problèmes, comme des défauts de fabrication, défauts de modélisation, etc. L'étape de mesure des performances réelles du système et de confrontation au cahier des charges est systématique dans un contexte industriel.
- Le système est enfin confronté à son contexte d'utilisation nominal, il peut alors être vérifié que les tâches sont effectuées conformément aux attentes.

Le contrôleur d'un système a une importance capitale dans les performances atteintes, en particulier pour un robot flexible. Comme évoqué dans la partie 5.3, une architecture de commande de référence et des lois de commande sont choisies pour les besoins de la conception. Cette approche générique est perfectible, des lois de commande plus spécifiques au système et à son application peuvent permettre de dépasser les performances initialement prévues. La partie 2.4 et le chapitre 4 présentent de nombreux exemples d'approches de commande alternatives, potentiellement plus performantes.

## 5.7 Illustration sur le cas du projet YAKA

Cette partie propose une illustration des travaux de conception sur le cas pratique du robot YAKA, elle présente une itération de conception, durant laquelle on évalue s'il est plus pertinent de choisir un matériau composite (carbone) ou de l'aluminium, plus classique.

Sur la base de cet exemple, on tente dans un second temps d'illustrer l'importance des incertitudes sur les paramètres mécaniques considérés lors de la conception, au vu des informations obtenues après fabrication du robot YAKA.

### 5.7.1 Exemple d'itération de conception

Afin d'illustrer le processus de conception, on se place au cours de la démarche de conception présentée par la figure 5.3, à une itération de conception pendant laquelle le concepteur envisage l'utilisation de matériaux composites (configuration  $\mathcal{P}_{i+1}$ ) pour remplacer les segments en aluminium considérés dans la conception précédente  $\mathcal{P}_i$ .

Les paramètres de matériau des segments sont les seuls qui évoluent lors de cette itération de conception, comme indiqué par le tableau 5.1 qui renseigne les données des poutres considérées, telles que fournies sur les catalogues.

Paramètre	$\mathcal{P}_i$ (Aluminium)	$\mathcal{P}_{i+1}$ (Composite)
<b>E</b>	7.4E <sup>10</sup> (Pa)	5.8E <sup>10</sup> (Pa)
<b>G</b>	2.8E <sup>10</sup> (Pa)	2.2E <sup>10</sup> (Pa)
<b><math>\rho</math></b>	2000 (Kg/m <sup>3</sup> )	1600 (Kg/m <sup>3</sup> )

TABLEAU 5.1 – Paramètres considérés lors de l'étude de l'influence du choix du matériau sur les performances atteintes par le robot YAKA.

Les solutions correspondant aux jeux de paramètres  $\mathcal{P}_i$  et  $\mathcal{P}_{i+1}$  sont alors évaluées à l'aide des indicateurs de performance présentés dans la partie 5.4 pour permettre au concepteur de déterminer si le choix de matériaux composites présente un intérêt technique qui justifie le coût et les contraintes qu'il engendre. Cette mise en situation est un exemple typique de compromis de conception, opposant les performances aux autres objectifs de conception (coût, délais, etc.).

La figure 5.8 présente quelques indicateurs qui peuvent être considérés par le concepteur dans cet exemple, elle montre clairement que le choix de matériaux composites permet de réduire considérablement l'énergie mise en jeu dans le mouvement rigide, du fait de la réduction de la masse volumique, et donc de l'inertie des poutres. L'énergie impliquée dans le mouvement flexible de la structure est aussi plus faible pour la configuration  $\mathcal{P}_{i+1}$ , ce qui s'explique par le rapport entre la masse volumique  $\rho$  et le module de flexion **E**, plus favorable pour le matériau composite considéré. L'erreur de suivi maximale en bout de bras est elle aussi réduite.

Dans cet exemple, tous les indicateurs présentés orientent la conception vers l'utilisation de matériaux composites, du point de vue des performances. Il apparaît à ce stade du projet YAKA que le coût et les délais supplémentaires associés à ce choix sont rentabilisés par l'apport en termes de performances. De plus, la réduction des inerties permet de réduire la dimension des actionneurs, des composants d'électronique de puissance associés, de la consommation énergétique, etc. Cette étude oriente la conception du robot YAKA en faveur des matériaux composites, qui est la solution retenue sur le système réel.

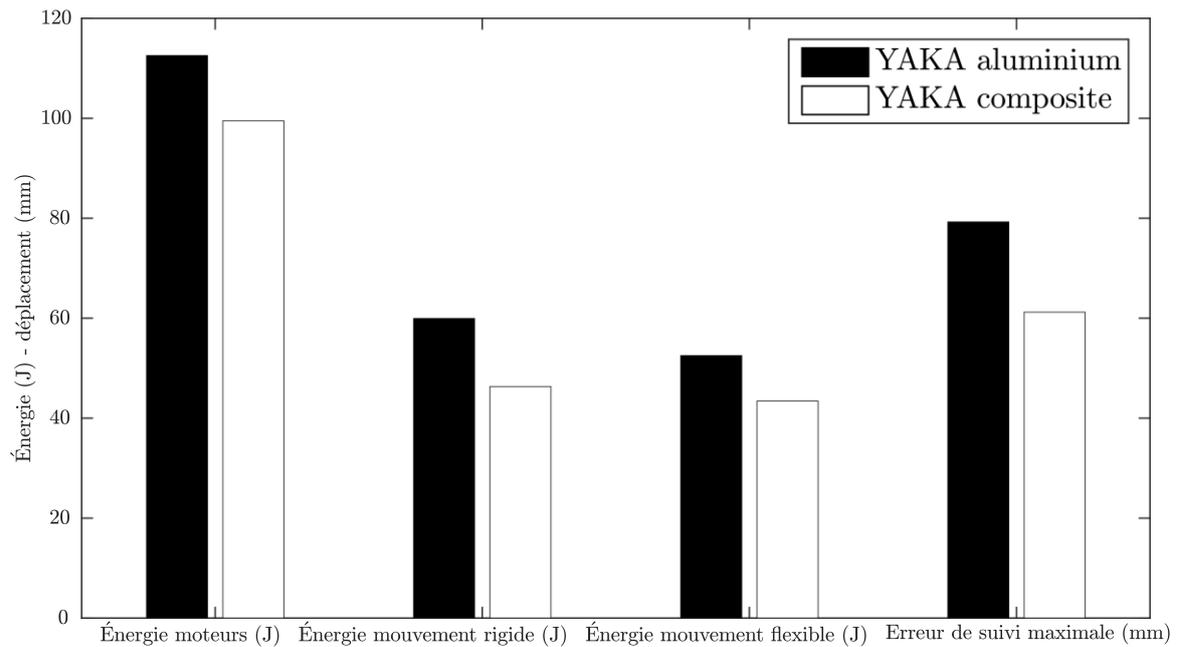


FIGURE 5.8 – Comparaison des performances de deux solutions en cours de conception : mise en évidence de l'intérêt de l'utilisation de matériaux composites dans le cadre du projet YAKA.

### 5.7.2 Analyse de l'influence des paramètres incertains

Le robot YAKA est issu de plusieurs itérations de conception, il est présenté dans le chapitre 2. L'étape de recalage expérimental présentée dans la partie 3.2 permet d'obtenir un jeu de paramètres recalés  $\tilde{\mathcal{P}}$ , plus proche de la réalité que celui pris en compte à l'étape de conception. On propose d'utiliser ce jeu de paramètres  $\tilde{\mathcal{P}}$  pour étudier a posteriori l'influence des écarts entre les valeurs des paramètres réels et celles considérées lors de la conception.

Les paramètres mécaniques des liaisons (roulements, paliers, actionneurs, rotules, etc.), sont la principale source d'incertitudes (car leurs paramètres ne sont pas communiqués par les fabricants) de la conception du robot YAKA. On propose sur la figure 5.9 de recalculer des indicateurs de performances que l'on considère lors de la conception, pour quatre configurations différentes (correspondant chacune à un jeu de paramètres  $\tilde{\mathcal{P}}$  différent) :

- Le robot YAKA en aluminium tel que considéré lors de la conception  $\hat{\mathcal{P}}_i$ .
- Le robot YAKA en aluminium en prenant en compte les paramètres de liaisons identifiés expérimentalement  $\tilde{\mathcal{P}}_i$ .
- Le robot YAKA en composites tel que considéré lors de la conception  $\hat{\mathcal{P}}_{i+1}$ .
- Le robot YAKA en composites en prenant en compte les paramètres de liaisons identifiés expérimentalement  $\tilde{\mathcal{P}}_{i+1}$ .

Les résultats obtenus mettent en évidence l'écart induit par la variation entre les paramètres des liaisons estimés lors de la conception et ceux identifiés expérimentalement. On note sur cet exemple que l'erreur sur les paramètres des liaisons a un impact plus important sur la solution utilisant des segments en aluminium, ce qui s'explique par le fait que l'impact d'une erreur d'estimation de la raideur des articulations est d'autant plus important que les inerties des segments sont importantes. Cet exemple illustre l'intérêt de prêter attention à la sensibilité des indicateurs aux incertitudes sur les paramètres lors de la conception.

D'une manière générale, la réduction des inerties des différents éléments mécaniques présente l'avantage d'améliorer la qualité de la prédiction des performances réelles lors de l'étape de conception en réduisant sa sensibilité aux paramètres de raideur articulaire.

Les conclusions tirées lors de la conception du système (choix des matériaux composites, dans cet exemple) ne sont cependant pas remises en cause par la connaissance des paramètres incertains ou inconnus. Il est toutefois nécessaire de prendre en compte le fait que le processus de conception s'appuie souvent sur des données incertaines, dont on doit évaluer l'influence sur indicateurs des performances au cours du processus de conception pour assurer l'atteinte des objectifs techniques.

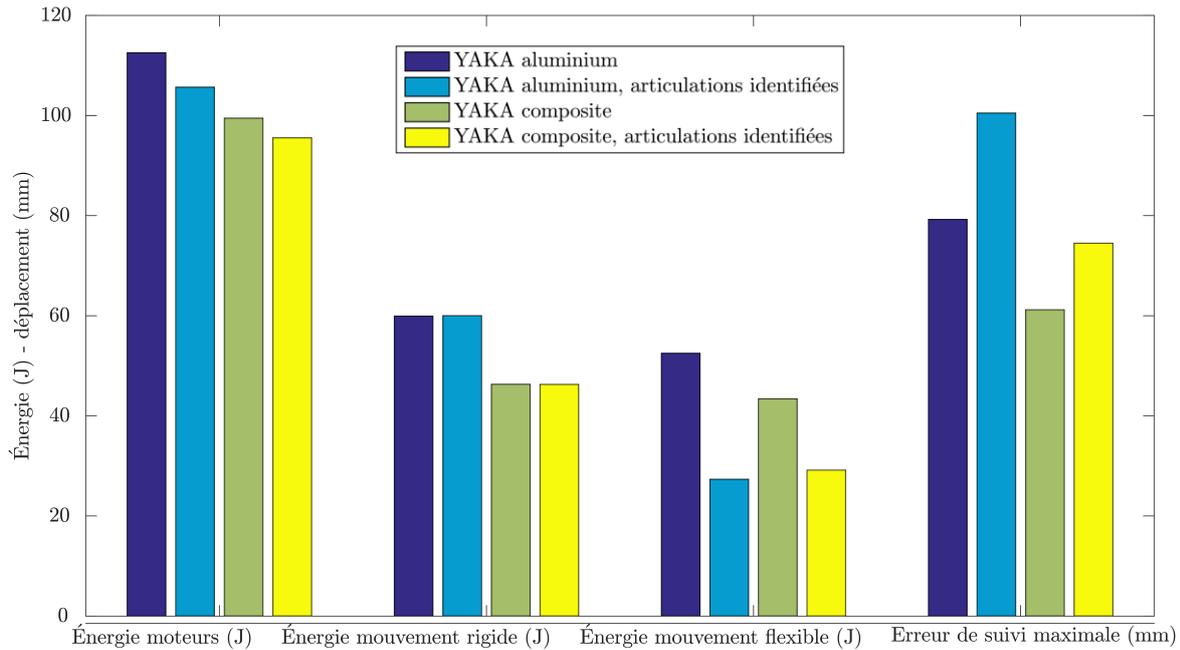


FIGURE 5.9 – Évaluation de la sensibilité aux paramètres incertains : comparaison des performances calculées avant et après recalage expérimental des paramètres mécaniques des liaisons.

## 5.8 Synthèse de l'utilisation des indicateurs de performance

Les usages qui peuvent être faits des indicateurs de performance (flexible) présentés dans ce chapitre sont synthétisés dans le tableau 5.2. Il donne pour chacun des indicateurs l'usage générique et spécifique dans le cadre de la conception d'une nouvelle version du robot YAKA.

Suite à la conception préliminaire réalisée à l'aide de ces indicateurs, les critères de dimensionnement, présentés pour leur part dans la partie 5.4.4, permettent de valider le respect du cahier des charge et le dimensionnement des systèmes annexes (sources énergétiques, dissipateurs thermiques, électronique de puissance, etc.)

Indicateur	Usage générique	Application au projet YAKA (Lancement et Récupération)
Raideur du système 5.4.2.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Évaluation du déplacement élastique sous une charge statique donnée</li> <li>• Respect d'une précision de positionnement statique en charge</li> </ul>	Non considéré
Valeur des fréquences propres 5.4.2.2 et 5.4.2.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Assurer une bande passante dans laquelle les flexibilités peuvent être négligées</li> <li>• Assurer la compatibilité avec l'environnement vibratoire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compatibilité avec les sollicitations vibratoires extérieures (mouvements du navire et vibrations des moteurs)</li> <li>• Maximiser la fréquence propre du premier mode de vibration</li> </ul>
Commandabilité des modes 5.4.2.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maîtriser la capacité à transférer de l'énergie entre les modes souples et les actionneurs (pour éviter de solliciter la structure ou au contraire permettre de l'amortir, en fonction de la stratégie de commande).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimiser la sollicitation des modes par les mouvements du premier axe (dynamique importante)</li> </ul>
Énergie fournie par les actionneurs 5.4.3.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimiser la consommation énergétique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• S'adapter aux ressources énergétiques embarquées disponibles sur le navire</li> </ul>
Énergie impliquée dans les modes de vibration 5.4.3.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimiser les problèmes de fatigue des matériaux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimiser les problèmes de fatigue des matériaux</li> </ul>
Rapport de l'énergie impliquée dans les mouvements rigides et flexibles 5.4.3.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimiser l'énergie impliquée dans les modes de vibration, par rapport à l'énergie utile au mouvement rigide</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimiser l'énergie impliquée dans les modes de vibration par rapport à l'énergie utile au mouvement rigide, en particulier lors de la capture d'un UAV et de la dissipation de son énergie cinétique</li> </ul>
Erreur de suivi en bout de bras 5.4.3.4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Assurer des performances en suivi de trajectoire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Assurer le maintien de conditions nécessaires à la récupération, uniquement pendant la phase de capture (non considéré pour l'accélération et la décélération)</li> </ul>

TABLEAU 5.2 – Tableau de synthèse des indicateurs de performance (flexible) présentés. Pour chaque indicateur, l'usage dans le cas général et dans le cas particulier du projet YAKA sont décrits.

## 5.9 Limites et perspectives

Les travaux proposés dans ce chapitre supposent une forte implication du concepteur, qui garde la maîtrise du processus de conception global. La méthodologie et les outils présentés ne prétendent donc pas résoudre de manière optimale et unique un problème de conception. En revanche, ils enrichissent les outils d'ingénierie courants, notamment en permettant d'évaluer les performances de différentes solutions, du point de vue de leur comportement dynamique flexible en boucle fermée.

La démarche proposée n'explore pas de manière globale l'espace des solutions, mais évolue de proche en proche à partir d'une conception préliminaire renseignée par le concepteur. L'évolution vers la configuration finale dépend donc directement des choix du concepteur et il n'est pas possible d'en assurer la convergence.

En revanche, il est possible de considérer différentes conceptions préliminaires (cinématique, actionneurs, solutions techniques) afin d'explorer l'espace des solutions de manière globale. Moyennant la définition d'un sous-problème bien défini, les outils proposés peuvent être utilisés avec une méthode d'optimisation pour figer le choix de certains composants. On peut par exemple optimiser la longueur d'un segment avec pour objectif de minimiser les erreurs de suivi en bout de bras, sous contrainte de conserver une manipulabilité minimale.

Du fait de la nature très ouverte et complexe du processus de conception, une démarche globale automatisée nécessiterait de définir entièrement le problème, ce qui représente un travail considérable. Par exemple, définir de manière complète l'espace des solutions<sup>6</sup> semble irréalisable, compte tenu de la quantité et variété des solutions techniques existantes. D'un point de vue global, les objectifs de conception sont nombreux et de nature variée. Par exemple, les savoir-faire, les contraintes liées aux fournisseurs et le respect du budget sont difficilement prévisibles et ont pourtant une influence majeure sur le processus de conception.

Il semble inenvisageable de créer une base de données représentant toutes les solutions techniques existantes, il est cependant possible de développer des modèles approchés qui décrivent le domaine d'évolution possible de certaines variables, pour chaque type de solution technique. Par exemple, sur la base des spécifications d'une gamme de réducteurs donnée, il est possible de relier les différentes propriétés physiques des différents modèles par des lois d'évolution simplifiées, continues. Ainsi, il devient envisageable de rechercher une solution optimale réaliste, pour ensuite choisir un modèle existant, au plus proche de l'optimum.

## 5.10 Conclusion

La conception des systèmes est une tâche complexe qui requiert de prendre en compte de très nombreux aspects, le rôle du concepteur est alors primordial dans cette étape de la vie d'un système. Les techniques d'ingénierie courantes présentées dans la partie 2.5 ne sont pas dotées de moyens adaptés pour traiter la conception de systèmes flexibles de manière satisfaisante.

Les outils proposés dans ce chapitre permettent de considérer l'aspect flexible d'un système lors de sa conception, en prenant en compte son comportement global en boucle fermée, régi par les propriétés de la structure flexible, des actionneurs et du contrôleur.

---

6. Propriétés mécaniques détaillées de chaque solution technique existante sur le marché, ou accessible en fabrication sur mesure

Des indicateurs de performance spécifiques sont proposés pour permettre de quantifier la qualité d'une solution technique, vis-à-vis des exigences du concepteur et d'un scénario d'utilisation défini.

La démarche de conception proposée met en application les outils proposés, elle est illustrée avec le cas pratique du projet YAKA. Elle a pour but d'assister le concepteur en lui fournissant des données concrètes sur les solutions évaluées (indicateurs de performance) et les possibilités d'amélioration (analyse de sensibilité).

Les travaux menés ouvrent la voie à d'autres développements, notamment visant à automatiser la démarche de conception. Par exemple, l'espace de recherche de solutions pourrait être réduit en regroupant les paramètres physiques interdépendants et en définissant les bornes de leur domaine d'évolution. Cette définition de l'espace des solutions permettrait d'utiliser des algorithmes de recherche d'une solution globale, sans nécessiter de conception préliminaire.

Puisqu'il a été conçu en amont de la formalisation des travaux présentés dans la thèse, le robot YAKA n'a pas bénéficié pleinement de la démarche proposée. En revanche, les outils mis en place permettent de mener rapidement une nouvelle étude de conception pour aboutir à un système plus performant ou adapté à un cahier des charges différent.

## 5.11 Références

- ALESSANDRO, C. et S. ROSARIO. 2014, «Elastodynamic optimization of a 3t1r parallel manipulator», *Mechanism and Machine Theory*, vol. 73, p. 184–196. [105](#), [112](#)
- ANGELES, J. et F. C. PARK. 2016, «Design and performance evaluation», dans *Springer Handbook of Robotics*, Springer, p. 399–418. [105](#), [110](#), [111](#)
- BOUCARD, P.-A., F. HILD et J. LEMAITRE. 2016, *Résistance mécanique des matériaux et des structures-2e éd. : Cours et exercices corrigés*, Dunod. [118](#)
- BOWLING, A. et O. KHATIB. 2005, «The dynamic capability equations : a new tool for analyzing robotic manipulator performance», *IEEE transactions on robotics*, vol. 21, n° 1, p. 115–123. [111](#)
- COURTEILLE, E., D. DEBLAISE et P. MAURINE. 2009, «Design optimization of a delta-like parallel robot through global stiffness performance evaluation», dans *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*, IEEE, p. 5159–5166. [105](#), [112](#)
- GRAETTINGER, T. J. et B. H. KROGH. 1988, «The acceleration radius : a global performance measure for robotic manipulators», *IEEE Journal on Robotics and Automation*, vol. 4, n° 1, p. 60–69. [111](#)
- KHALIL, W. et E. DOMBRE. 2004, *Modeling, identification and control of robots*, Butterworth-Heinemann. [109](#), [110](#), [111](#)
- LARA-MOLINA, F. A., E. KOROISHI et D. DUMUR. 2016, «Design criteria of 2-dof planar parallel manipulator with flexible joints», dans *Industry Applications (INDUSCON), 2016 12th IEEE International Conference on*, IEEE, p. 1–6. [112](#)
- LI, H., Z. YANG et T. HUANG. 2009, «Dynamics and elasto-dynamics optimization of a 2-dof planar parallel pick-and-place robot with flexible links», *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 38, n° 2, p. 195–204. [105](#), [112](#)

- LU, J.-W., X.-M. SUN, A. F. VAKAKIS et L. A. BERGMAN. 2015, «Influence of backlash in gear reducer on dynamic of single-link manipulator arm», *Robotica*, vol. 33, n° 8, p. 1671–1685. [104](#)
- LYON, R. H. 2014, *Theory and application of statistical energy analysis*, Elsevier. [115](#)
- MARELLI, S. et B. SUDRET. 2014, «Uqlab : A framework for uncertainty quantification in matlab», dans *Vulnerability, Uncertainty, and Risk : Quantification, Mitigation, and Management*, p. 2554–2563. [119](#)
- MAXIT, L. et J.-L. GUYADER. 2003, «Extension of sea model to subsystems with non-uniform modal energy distribution», *Journal of sound and vibration*, vol. 265, n° 2, p. 337–358. [115](#)
- PAHL, G. et W. BEITZ. 2013, *Engineering design : a systematic approach*, Springer Science & Business Media. [105](#)
- PHOLSIRI, C. 2004, *Task-based decision making and control of robotic manipulators*, thèse de doctorat. [105](#), [110](#)
- TSAGARAKIS, N. G., S. MORFEY, G. M. CERDA, L. ZHIBIN et D. G. CALDWELL. 2013, «Compliant humanoid coman : Optimal joint stiffness tuning for modal frequency control», dans *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*, IEEE, p. 673–678. [112](#)
- YOSHIKAWA, T. 1985, «Dynamic manipulability of robot manipulators», dans *Robotics and Automation. Proceedings. 1985 IEEE International Conference on*, vol. 2, IEEE, p. 1033–1038. [111](#)

# Chapitre 6

## Résultats, conclusion et perspectives générales

### Sommaire

---

<b>6.1 Résultats du projet YAKA</b>	<b>130</b>
6.1.1 Mise en service du robot YAKA : premiers mouvements et réglages des asservissements bas niveau	131
6.1.2 Récupération en atelier	132
6.1.3 Démonstrations de lancement	133
6.1.4 Mouvements sur base mobile	134
6.1.5 Essais de récupération sur base mobile	135
6.1.6 Démonstrations de récupération sur base fixe	136
6.1.7 Synthèse des résultats du projet	138
<b>6.2 Conclusion générale</b>	<b>139</b>

---

## 6.1 Résultats du projet YAKA

Cette partie a pour objectif de présenter les résultats du projet YAKA. Les résultats propres aux contributions de la thèse sont présentés dans les chapitres associés.

Le projet YAKA a été mené conjointement à la thèse et a motivé la plupart des travaux théoriques et expérimentaux qu'elle présente. Les deux premières années de la thèse ont accompagné le projet depuis la conception du robot YAKA, jusqu'aux démonstrations de lancement et de récupération et la clôture du projet DGA RAPID L&R YAKA.

La conception du robot YAKA, sa modélisation, sa fabrication et son recalage expérimental ont eu lieu au début de projet et de la thèse. Les outils présentés dans les chapitres 3 et 5 ont donc été développés simultanément au projet, pour venir assister le déroulement du projet qui s'est principalement reposé sur des outils d'ingénierie existants.

Le robot YAKA a été rapidement conçu et fabriqué pour les besoins du projet, ce qui a permis de développer les travaux de thèse et le projet simultanément, en particulier la méthodologie de recalage expérimental présentée dans le chapitre 3.

Les résultats présentés ci-après correspondent aux étapes de la démarche incrémentale de validation établissant la faisabilité du projet. Ils sont donnés à titre illustratif et ne peuvent être détaillés davantage pour des raisons de confidentialité.

### 6.1.1 Mise en service du robot YAKA : premiers mouvements et réglages des asservissements bas niveau

Pour valider le bon fonctionnement du robot YAKA, une première campagne d'essais a lieu sur le site d'essais de l'ONERA à Espernes (voir figure 6.1).

- **Objectifs** : Mettre au point le matériel, l'architecture logicielle et les asservissements pour assurer :
  - La sécurité des opérateurs.
  - La stabilité du système et le respect de son intégrité mécanique.
  - Les performances en boucle fermée.
- **Moyens expérimentaux** :
  - Bras YAKA.
- **Résultats et commentaires** : Utilisation de comportements adaptés pour assurer la sécurité sans arrêt d'urgence au sens strict (blocage des freins de sécurité), dans la mesure où cela risquerait de briser le système et de causer des risques supplémentaires. Validation des performances du système sur des trajectoires types représentatives de son utilisation opérationnelle.



FIGURE 6.1 – Vue du robot pendant sa mise au point lors de la campagne d'essais sur le site de l'ONERA à Espernes.

### 6.1.2 Récupération en atelier

Pour mettre au point l'opération de récupération sans nécessiter une campagne d'essais complète en extérieur (logistique, nécessité d'obtention d'autorisation de vol, mobilisation d'un pilote, etc.), des essais sont menés en intérieur avec un UAV inerte (voir figure 6.2).

- **Objectif** : Valider la chaîne d'action. On dispose d'une catapulte réalisant des lancers d'UAV répétables, les trajectoires du bras sont synchronisées avec le catapultage. Le but est de valider la répétabilité des trajectoires, l'efficacité du préhenseur et la résistance mécanique des différents éléments (préhenseur, UAV, bras).
- **Moyens expérimentaux** :
  - Bras YAKA.
  - Catapulte.
  - UAV non actionné de masse variable.
- **Résultats et commentaires** : La masse du drone a été progressivement augmentée jusqu'à 5 kg, ce qui correspond au cahier des charges du projet. La catapulte conçue et réalisée pour l'occasion a montré un comportement satisfaisant quant à la répétabilité des lancers. Ces essais permettent la capacité de la structure mécanique à supporter les opérations dans les conditions de charge maximale.



FIGURE 6.2 – Récupération d'un UAV non actionné lancé par une catapulte. [vidéo : recuperation\\_indoor.mp4](#)

### 6.1.3 Démonstrations de lancement

L'opération de lancement ne semble pas critique, la campagne de validation de faisabilité a pour objectif de le démontrer. La figure 6.3 montre le dispositif mis en place pour cet essai.

- **Objectif** : Valider la faisabilité du Lancement.
- **Moyens expérimentaux** :
  - Bras YAKA.
  - UAV.
- **Résultats et commentaires** : Les essais menés confirment que cette opération n'est pas critique et valident la capacité du robot à les réaliser.



FIGURE 6.3 – Démonstration de lancement d'un UAV par le bras YAKA. vidéo : [lancement.mp4](#)

### 6.1.4 Mouvements sur base mobile

Les mouvements du véhicule porteur jouent un rôle important sur la complexité des opérations de récupération, en particulier concernant la prédiction des conditions de rencontre. Une autre préoccupation concerne le comportement du robot face aux sollicitations du véhicule. Le robot YAKA est monté sur un camion en mouvement pour évaluer ce point (voir figure 6.4).

- **Objectif** : Valider la robustesse des asservissements du bras monté sur une plateforme mobile.
- **Moyens expérimentaux** :
  - Bras YAKA monté sur camion.
- **Résultats et commentaires** : Les perturbations issues du camion (vibrations hautes fréquences du moteur et sollicitations dues à la route) ne perturbent pas le comportement du robot. On observe cependant un couplage entre le robot et le véhicule porteur : les efforts inertiels engendrés par les mouvements du robot font osciller légèrement le camion.



FIGURE 6.4 – Évaluation du comportement du bras YAKA sur un camion mobile.

### 6.1.5 Essais de récupération sur base mobile

Afin de prouver la faisabilité de l'opération de récupération d'un **UAV** depuis une base mobile, un essai grandeur nature est mis en place (voir figure 6.5).

- **Objectif** : Valider la faisabilité de récupération sur base mobile.
- **Moyens expérimentaux** :
  - Bras YAKA sur camion.
  - Dispositif de perception LIDAR.
  - **UAV** de 5Kg autoguidé.
  - GPS RTK sur camion et **UAV**.
  - Site d'essais adapté (base militaire de Captieux).
- **Résultats et commentaires** : Diverses causes ont empêché un contrôle satisfaisant de l'**UAV** qui n'a pas rejoint le camion en mouvement. Cette campagne d'essais n'a pas pu être réitérée dans le cadre du projet pour des raisons de disponibilité de moyens.



FIGURE 6.5 – Essais de récupération d'un **UAV** par le bras YAKA, depuis un camion mobile.

### 6.1.6 Démonstrations de récupération sur base fixe

La mise en place d'un nouvel essai de récupération grandeur nature étant très lourde, un dispositif plus léger a été mis en place. Un dispositif de perception simplifié est posé au sol (voir figure 6.6), ce qui ne permet pas de procéder aux essais avec le camion en mouvement. La figure 6.7 montre l'arrivée de l'UAV à proximité du robot et sa récupération.

- **Objectif** : Valider la faisabilité de récupération sur base fixe.
- **Moyens expérimentaux** :
  - Bras YAKA sur camion (stationné).
  - Dispositif de perception posé au sol (voir figure 6.6).
  - UAV léger, piloté manuellement.
- **Résultats et commentaires** : Cette campagne d'essais (menée par SITIA après la clôture officielle du projet) a permis de réaliser plusieurs récupérations de deux UAV différents en vol, ce qui a permis de valider la faisabilité de l'opération. Faut de moyens de perception embarquables (GPS et/ou LIDAR 3D) et de disponibilité de l'UAV dédié au projet, cette campagne a été réalisée avec deux UAV légers (500g et 650g) sur un camion fixe et un système de perception simplifié.

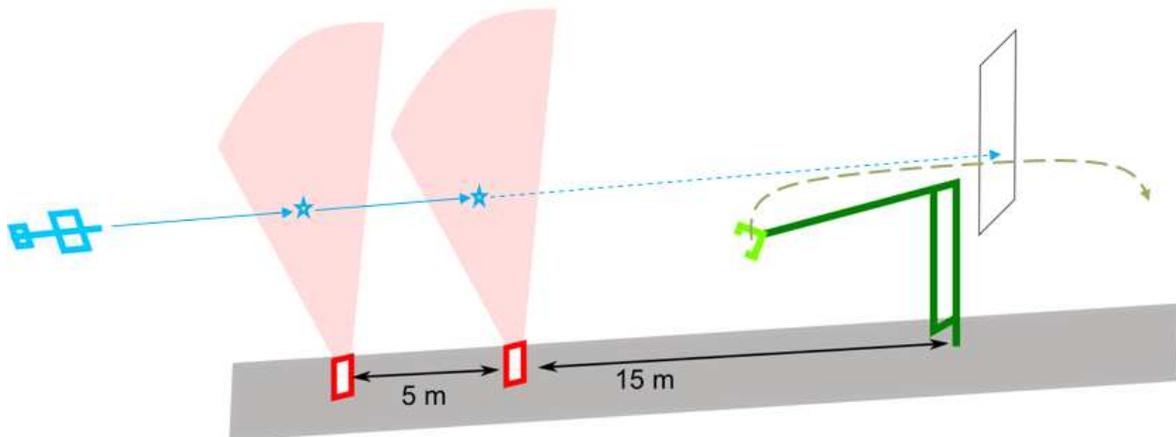


FIGURE 6.6 – Présentation du dispositif de perception utilisé pour les démonstrations de récupération. L'UAV arrive et est perçu successivement par des capteurs LIDAR (2D) verticaux. La trajectoire de l'UAV est extrapolée à partir de ces deux mesures pour calculer les conditions de rendez-vous. Le bras YAKA effectue alors une trajectoire d'interception adaptée.

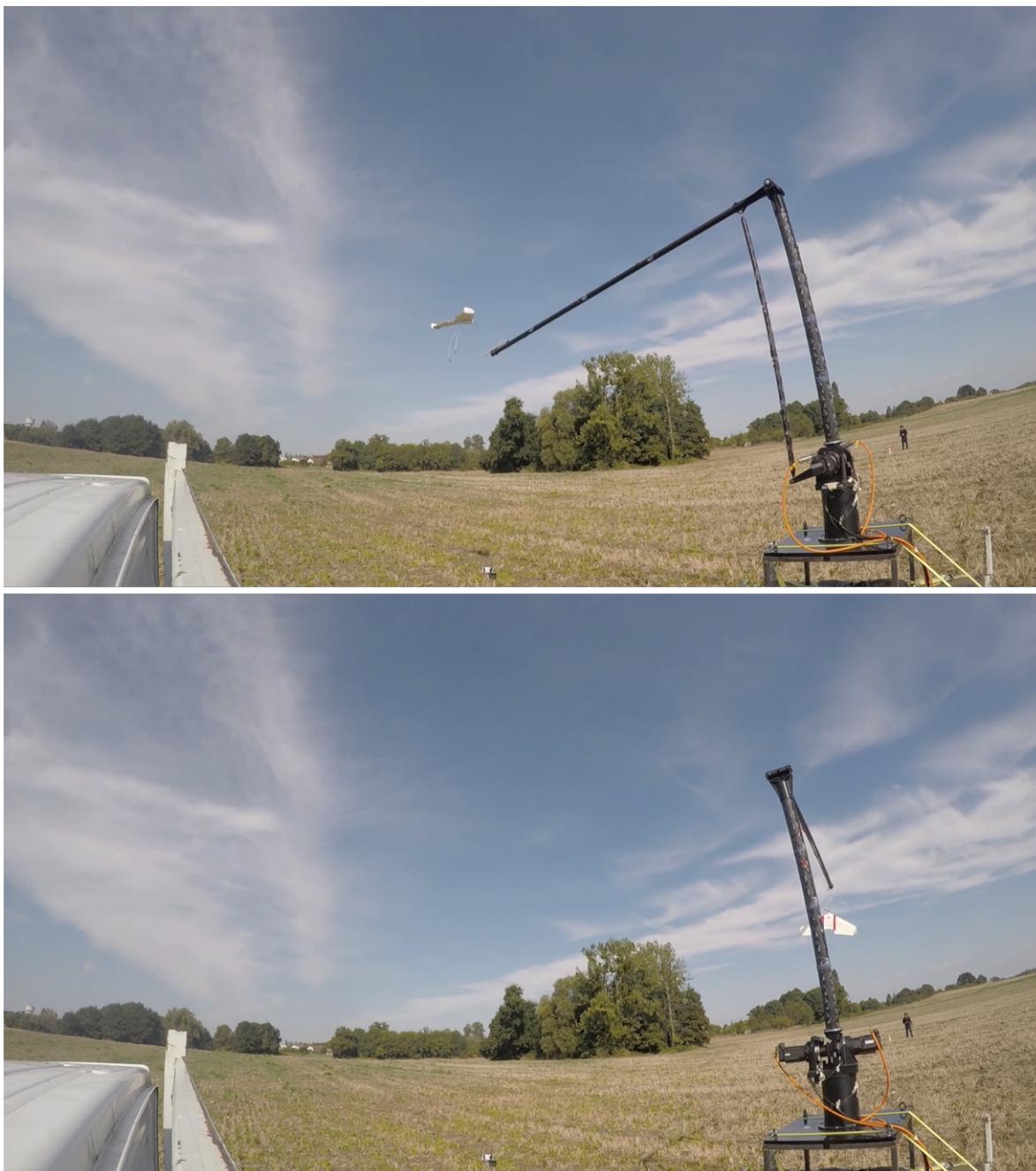


FIGURE 6.7 – Démonstration de récupération d'un **UAV** par le bras YAKA, depuis un camion fixe.  
vidéo : [recuperation.mp4](#)

### 6.1.7 Synthèse des résultats du projet

Le projet YAKA a permis de démontrer la faisabilité du lancement et de la récupération d'un UAV avec un bras manipulateur. Les campagnes d'expérimentation décrites dans les parties précédentes ont permis de valider que :

- Le robot YAKA est fonctionnel et stable, malgré sa forte flexibilité (voir partie 6.1.1).
- Le système reste stable en présence de perturbations extérieures infligées par le véhicule porteur (voir partie 6.1.4).
- Le système est capable de récupérer un UAV de 5Kg en vol et de dissiper son énergie en restant stable lors de l'impact (voir partie 6.1.2).
- Il est possible de lancer un UAV léger avec le robot YAKA de manière répétable (voir partie 6.1.3).
- Il est possible de prédire la trajectoire d'un UAV, de générer une trajectoire de rendez-vous adaptée et de le récupérer.

Ces résultats valident la faisabilité du lancement et récupération d'un UAV depuis un véhicule fixe, les moyens expérimentaux n'ont pas permis d'effectuer la démonstration sur base mobile. Les expérimentations et l'expérience acquise au cours du projet permettent d'identifier le périmètre de validité de la solution (conditions limites en termes de masse, vitesse différentielle, niveau de perturbations, etc.).

Les outils développés au cours de la thèse associés à ces résultats permettent d'envisager le développement d'un système opérationnel pour répondre aux divers besoins de lancement et de récupération, en mer comme sur terre.

## 6.2 Conclusion générale

Ce mémoire présente notre contribution à la modélisation, la commande et la conception de robots manipulateurs flexibles.

L'état de l'art général présenté au début de ce document illustre que malgré un effort considérable de la communauté scientifique porté sur l'étude de ces systèmes, les dispositifs expérimentaux de recherche restent mécaniquement élémentaires, de petites dimensions et possèdent peu de degrés de liberté. À notre connaissance, aucun système de grandes dimensions et à forte dynamique n'est opérationnel. Malgré les avantages prometteurs des robots manipulateurs flexibles, leur complexité reste un verrou qui freine leur démocratisation.

Dans un premier temps, nous avons abordé la modélisation de robots flexibles par la méthode des éléments finis et le formalisme de Lagrange. La contribution propose une démarche intégrée et systématique pour obtenir, pour tout robot manipulateur flexible, d'une part un modèle fidèle et d'autre part un modèle simplifié, adapté à la simulation. Nous nous sommes basés sur des outils de l'état de l'art, de manière à produire un modèle dynamique flexible représentatif, doté de sens physique et adapté à ses différentes utilisations. Notamment, la méthodologie de recalage expérimental est facilitée par la formulation du modèle dynamique choisie. Le modèle obtenu étant très fidèle, mais très complexe, une étape de réduction de modèle est mise en place pour extraire l'essentiel de l'information contenue dans le modèle complet. Le modèle réduit obtenu est alors adapté à une résolution numérique rapide, notamment nécessaire pour effectuer des simulations dynamiques.

L'approche de modélisation proposée offre des résultats satisfaisants en pratique sur le cas d'étude du robot YAKA. Si le processus de modélisation et de recalage expérimental est systématique et facilement utilisable pour un système différent, l'étape de réduction de modèle nécessite un effort supplémentaire pour être totalement automatisée. La réduction de modèles dynamiques flexibles est un problème ouvert qui est l'objet de nombreux travaux, dont le résultat pourrait à terme pallier les limites de l'approche présentée.

Le quatrième chapitre traite de la commande de robots manipulateurs flexibles, avec pour objectif d'aboutir à une solution permettant de maîtriser le comportement flexible en impliquant peu d'actionneurs ou de capteurs supplémentaires, adaptée à une implémentation pratique sur un calculateur temps réel. Afin de tirer parti du modèle dynamique obtenu dans le chapitre précédent sans mettre en jeu toute sa complexité dans la boucle de commande, l'architecture proposée est décomposée en deux niveaux de commande. Une commande par inversion de modèle dynamique est choisie pour imposer la dynamique articulaire du système, en prenant en compte uniquement le modèle dynamique rigide. Le comportement flexible est alors maîtrisé à l'aide d'un bloc de précommande par Input Shaping, très peu gourmand en calculs. La contribution réside dans la méthodologie de définition de la topologie et du réglage des paramètres de ce bloc de précommande.

La méthode de commande proposée est éprouvée sur le cas pratique du projet YAKA. Elle permet de réduire drastiquement les vibrations résiduelles au mouvement, et ainsi d'améliorer la précision de suivi de trajectoire en bout de bras, y compris à forte dynamique. L'approche proposée contrôle les vibrations de la structure induites par les mouvements propres du système, mais elle ne permet pas de contrer une sollicitation extérieure. De nombreuses perspectives sont ouvertes pour pallier cette limitation et augmenter la dynamique atteignable par le système, en se basant sur la méthodologie de

conception d'Input Shaping proposée.

À l'aide des outils de modélisation et de commande présentés précédemment, le cinquième chapitre propose d'assister le processus de conception d'un robot flexible avec des indicateurs de performance adaptés, issus du modèle dynamique du système et de résultats de simulation prenant en compte à la fois le comportement de la structure mécanique flexible, des actionneurs et de la commande. Ces outils sont intégrés à une démarche de conception générique qui permet de mener le processus de conception en interaction forte avec le concepteur, qui lui, maîtrise l'ensemble des contraintes de conception.

La méthodologie proposée permet d'attester de la pertinence des choix de conception du robot YAKA. Cette étude permet de mettre en évidence l'importance de la maîtrise des incertitudes lors du processus de conception. Les outils proposés dans ce chapitre étendent les techniques de conception habituelles pour prendre en compte les flexibilités. Enfin, ils permettent de concevoir rapidement une gamme de robots de lancement et de récupération de drones, adaptés à divers besoins (dimensions de l'espace de travail, vitesse différentielle navire/[UAV](#), masse de l'[UAV](#), etc.).

Les différents outils et méthodes proposés dans ce mémoire ont été appliqués au robot YAKA, qui a permis de les illustrer et de les valider en grandeur nature. Les résultats expérimentaux obtenus dans ce contexte sont convaincants et sont appuyés de manière plus globale par les résultats du projet YAKA. Si de nombreux choix ont été faits dans l'optique de répondre aux besoins spécifiques de l'application du projet YAKA, un effort particulier a été porté pour rendre les outils génériques et conserver le sens physique des outils théoriques, tout au long de la démarche. Cette précaution devrait faciliter l'application des outils développés à des applications et des systèmes différents.

Les résultats présentés dans cette thèse renforcent l'idée que les robots manipulateurs flexibles peuvent présenter un intérêt opérationnel indéniable, malgré la complexité de leur mise en œuvre. Les caractéristiques hors normes du robot YAKA et les perspectives ouvertes par la thèse laissent espérer des progrès significatifs et ainsi l'apparition de nouveaux robots manipulateurs flexibles opérationnels.

# Annexe A

## Publications personnelles

### Conférences internationales à comité de lecture

T. SOLATGES, M. ROGNANT, S. RUBRECHT, P. BIDAUD. "Contribution to modelling of highly dynamic and flexible link robot for control purpose". IET, IMechE, SSI AND SMeS-Tech SPACE ROBOTICS SYMPOSIUM. Glasgow, Royaume-Uni, 2015.

T. SOLATGES, M. ROGNANT, S. RUBRECHT, E. COURTEILLE, P. BIDAUD. "Design process of high dynamics multi-link flexible robot manipulators". IEEE/ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE), American Society of Mechanical Engineers. Cleveland, États-Unis, 2017.

T. SOLATGES, S. RUBRECHT, M. ROGNANT, P. BIDAUD. "Adaptive input shaper design for flexible robot manipulators", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Vancouver, Canada, 2017.

### Communications nationales sans actes

T. SOLATGES, S. RUBRECHT, M. ROGNANT, P. BIDAUD. "Développement d'un bras robotisé de lancement et de récupération de drone à voilure fixe sur une base mobile navale". Journées du GDR GT6 Conception de robots. Paris, France, 2015.

T. SOLATGES, S. RUBRECHT, M. ROGNANT, P. BIDAUD. "Développement d'un bras robotisé de lancement et de récupération de drone à voilure fixe sur une base mobile navale". Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique (JJCR'15). Amiens, France, 2015.

T. SOLATGES, S. RUBRECHT, M. ROGNANT, P. BIDAUD. "Développement d'un bras robotisé de lancement et de récupération de drone à voilure fixe sur une base mobile navale". Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique (JJCR'16). Paris, France, 2016.

T. SOLATGES, S. RUBRECHT, M. ROGNANT, P. BIDAUD. "Conception et commande d'un bras robotisé pour le lancement et la récupération de drones à voilure fixe". Congrès EDSYS. Toulouse, France, 2016.



# Annexe B

## Liste des acronymes

**ANCF** Absolute Nodal Coordinate Formulation. [17](#)

**DARPA** Defense Advanced Research Projects Agency. [5](#)

**ERLS** Système rigide équivalent (Equivalent Rigid Link System). [ix, x, 17, 18, 50, 53](#)

**L&R** Launch and Recovery (Lancement et Récupération). [4](#)

**MAC** L'indice de MAC (Modal Assurance Criterion) permet d'évaluer la corrélation entre deux vecteurs. [20](#)

**MALE** Medium Altitude Long Endurance. [5](#)

**NDI** Non-linear Dynamic Inversion: inversion de modèle non linéaire. [ix, xii, xiv, 28, 85, 109, 110](#)

**RMS** Moyenne quadratique (Root Mean Square). [118, 119](#)

**TERN** Tactically Exploited Reconnaissance Node. [5](#)

**UAV** Unmanned Aerial Vehicle: drone à voilure fixe dans ce contexte. [ix, x, xiii, xiv, 4–8, 23, 34, 36, 37, 78, 93, 100, 101, 109, 111, 116, 118, 125, 132, 133, 135–138, 140](#)



# Annexe C

## Liste des symboles

- <sup>+</sup> Pseudo-inverse de Moore-Penrose. [61](#)
- $a$  Indice désignant le numéro d'actionneur. [xv](#), [88](#), [89](#)
- $\alpha$  Coefficient proportionnel à la masse de l'amortissement de Rayleigh. [50](#), [52](#), [59](#), [108](#)
- $\beta$  Coefficient proportionnel à la raideur de l'amortissement de Rayleigh. [50](#), [52](#), [59](#), [108](#)
- $E$  Module de Young ( $Pa$ ). [xv](#), [59](#), [60](#), [108](#), [122](#)
- $\eta$  Vecteur contenant la contribution de chaque mode propre du modèle réduit au comportement flexible global. [116](#)
- Fext** Vecteur des forces extérieures appliquées aux différents nœuds du maillage. [54](#), [56](#), [112](#)
- $f_i$  Fréquence propre du mode  $i$ . [89](#)
- $F_s$  Frottement sec équivalent dans une transmission. [54](#), [63](#), [65](#), [108](#)
- $F_v$  Frottement visqueux équivalent dans une transmission. [54](#), [63](#), [65](#), [108](#)
- $G$  Module de Coulomb (ou module de cisaillement) ( $Pa$ ). [59](#), [108](#), [122](#)
- $F$  Vecteur de l'action mécanique des actionneurs sur le robot. [25](#)
- $i$  Indice désignant le numéro d'un mode de vibration (rangés par ordre croissants de fréquence propre). [xii](#), [xv](#), [84](#), [88–90](#), [93](#)
- $I_{eq}$  Inertie équivalente à  $I_m$  et  $I_s$  rapportée en sortie d'actionneur. [55](#), [61](#), [63](#), [65](#)
- $I_m$  Inertie de l'arbre d'un moteur. [54](#), [55](#)
- $I_x, I_y, I_z$  Moments quadratiques selon les directions  $x$ ,  $y$  et  $z$  ( $m^4$ ). [57](#), [108](#)
- J** Matrice Jacobienne du robot, qui relie la vitesse cartésienne  $\dot{X}$  et articulaire  $\dot{q}$ :  $\dot{X} = J\dot{q}$ . [111](#)
- $K_i$  Constante de courant d'un moteur électrique. [54](#), [108](#), [119](#)
- $K_v$  Constante de vitesse d'un moteur électrique. [54](#), [108](#), [119](#)
- $L$  Désigne la longueur d'une des poutres du maillage du robot ( $m$ ). [57](#), [59](#)
- $\lambda$  Paramètre de la sigmoïde. [x](#), [xi](#), [xv](#), [55](#), [56](#), [65–67](#), [108](#)
- $M_1, M_2$  Masses localisées aux extrémités d'une poutre du maillage. [57](#), [59](#)

$N_a$  Nombre d'actionneurs du système. 86, 87  
 $N_m$  Nombre modes de vibration considérés. 86, 87  
 $\omega_i$  Pulsation propre d'un mode de vibration. xii, 72, 84  
 $\hat{\mathcal{P}}$  Jeu de paramètres correspondant au modèle du système complet (estimation des propriétés géométriques, cinématiques, de matériaux, d'actionneurs, etc.). 107, 109, 120  
 $\tilde{\mathcal{P}}$  Jeu de paramètres mécaniques identifiés du système complet. 120, 121, 123  
 $\mathcal{P}$  Jeu de paramètres mécaniques réels du système complet. 108, 120, 121  
 $\mathbf{q}$  Vecteur des positions articulaires. x, 14, 24, 52, 53, 55, 72, 111  
 $R$  Rapport de transmission de vitesse,  $R = \frac{\text{sortie}}{\text{entree}}$ . 54, 108  
 $\rho$  Masse volumique ( $\text{Kg}/m^3$ ). 57, 59, 108, 122  
 $S$  Section d'une poutre du maillage du robot ( $m^2$ ). 57, 59, 108  
 $\tau_m$  Couple moteur. 55, 66, 111  
 $\mathbf{u}$  Vecteur des déplacements élastiques nodaux. x, 48, 52, 53, 72, 112  
 $\nu p_i$  Valeur propre du mode de vibration  $i$  ( $\nu p_i = \omega_i^2$ ). 72, 112  
 $V p_i$  Vecteur propre du mode de vibration  $i$ . xii, 72, 89, 90, 112  
 $\mathbf{VP}_c$  Matrice des vecteurs propres du système dans une configuration donnée  $c$ . 75  
 $\xi_i$  Taux d'amortissement du mode  $i$ . 89

## Résumé

### **Modélisation, conception et commande de robots manipulateurs flexibles. Application au lancement et à la récupération de drones à voilure fixe depuis un navire faisant route.**

Les robots manipulateurs sont généralement des machines rigides, conçues pour que leur flexibilité ne perturbe pas leurs mouvements. En effet, des flexibilités mécaniques importantes dans la structure d'un système introduisent des degrés de liberté supplémentaires dont le comportement est complexe et difficile à maîtriser. Cependant, la réduction de la masse d'un système est bénéfique du point de vue des coûts, de la performance énergétique, de la sécurité et des performances dynamiques. Afin de faciliter l'accès aux nombreux avantages d'une structure légère malgré la présence de fortes flexibilités, cette thèse porte sur la modélisation, la conception et la commande de robots manipulateurs flexibles. Elle est motivée par le projet YAKA, dont l'application est le lancement et la récupération de drones à voilure fixe depuis un navire faisant route. Cette application nécessite une importante dynamique sur un vaste espace de travail, bien au-delà des spécifications des robots rigides classiques. Les outils de modélisation, de conception et de commande proposés prennent en compte la flexibilité des segments et des articulations, pour un nombre quelconque de degrés de liberté et de segments flexibles. Le modèle dynamique flexible est obtenu par le formalisme de Lagrange, les poutres flexibles sont représentées par le modèle d'Euler-Bernoulli. Le schéma de commande proposé se décompose en une inversion de modèle dynamique rigide et un bloc de précommande par Input Shaping adapté aux robots manipulateurs flexibles. Les outils de conception proposés permettent de baser le processus de conception sur des performances prédites du système complet muni de ses actionneurs et de son contrôleur avec une simulation réaliste. Les validations expérimentales effectuées sur le robot YAKA permettent de valider la pertinence de la démarche suivie. Les résultats du projet YAKA confirment la faisabilité de la mise en œuvre d'un robot flexible de grande envergure et à forte dynamique dans un contexte industriel, en particulier pour le lancement et la récupération d'un drone à voilure fixe depuis un navire faisant route.

**Mots-clés :** robot manipulateur flexible, modélisation, conception, commande, Input Shaping, Lagrange, Euler-Bernoulli, segments flexibles, articulations flexibles, forte dynamique

## Abstract

### **Modeling, design and control of flexible robot manipulators - Applied to UAV launch and recovery from a moving ship.**

Robot manipulators are generally stiff machines, designed in a way that flexibility does not affect their movements. Indeed, significant flexibility introduces additional degrees of freedom with a complex behavior. However, reducing the mass of a system allows for costs, performance, and safety improvements. In order to allow those benefits despite important flexibility, this thesis focuses on modeling, design and control of flexible robot manipulators. It is motivated by the YAKA project, which aims at developing a robot to launch and recover fixed wing UAVs from a moving ship. It implies reaching very high dynamics on a large workspace, way beyond the specifications of common rigid robots. The proposed tools for modeling, design and control allow for taking into account both joint and link flexibility, for any number of degrees of freedom and flexible links. The elastodynamic model is obtained with Lagrange principle, each flexible link being represented with one or many Euler-Bernoulli beams. The proposed control scheme uses a nonlinear rigid dynamic inversion and extends classical Input Shaping techniques to flexible robot manipulators. The proposed design tools allow for performance prediction of the system including its actuators and controllers thanks to a realistic simulation. Experiments conducted with the YAKA robot validated the proposed approach. The results of the YAKA project confirmed the feasibility of using a large scale, highly dynamic flexible robot in an industrial context, in particular for UAVs launch and recovery operations from a moving ship.

**Keywords :** flexible robot manipulator, modeling, design, control, Input Shaping, Lagrange, Euler-Bernoulli, flexible links, flexible joints, highly dynamic