

Thèse de Doctorat

Maylis UHART

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du
grade de Docteur de l'Université de Nantes
sous le label de l'Université de Nantes Angers Le Mans*

École doctorale : Sciences et Technologies de l'Information et Mathématiques (STIM)

Discipline : Automatique, Productique et Robotique

Unité de recherche : Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes (IRCCyN)

Soutenue le 5 novembre 2014

Amélioration de la précision du Placement de Fibres Robotisé en utilisant un schéma de commande hybride externe force / vision

JURY

Président : **M. Benoît FURET**, Professeur des universités, Université de Nantes, IRCCyN
Rapporteurs : **M. Philippe FRAISSE**, Professeur des universités, Université de Montpellier, LIRMM
M. Franck LUTHON, Professeur des universités, IUT de Bayonne, LIUPPA
Examineurs : **M. Yannick AUSTIN**, Maître de Conférences - HDR, Université de Nantes, IRCCyN
M. Cyril NOVALES, Maître de Conférences, Université d'Orléans, PRISME
M. Olivier PATROUX, Enseignant Chercheur, ESTIA, ESTIA Recherche, Bidart
Directeur de thèse : **M. Yannick AUSTIN**, Maître de Conférences - HDR, Université de Nantes, IRCCyN
Co-encadrant de thèse : **M. Olivier PATROUX**, Enseignant Chercheur, ESTIA, ESTIA Recherche, Bidart

Remerciements

J'adresse mes remerciements aux personnes qui m'ont aidée, soutenue ou qui m'ont tout simplement permis de passer d'agréables moments durant ces trois années de thèse.

Tout d'abord, je voudrais remercier Yannick Aoustin, mon directeur de thèse, HDR à l'Université de Nantes, pour avoir accepté d'encadrer ma thèse et pour la confiance qu'il m'a accordée malgré la distance. Ses nombreuses remarques, sa réactivité ainsi que sa rigueur scientifique ont largement aidé au bon déroulement de cette thèse.

Je tiens tout particulièrement à remercier Olivier Patrouix, mon co-encadrant de thèse, enseignant-chercheur à l'ESTIA, de m'avoir convaincue de réaliser cette thèse. Ses nombreuses corrections, son soutien ainsi que ses conseils durant ces trois années m'ont permis de progresser dans le domaine de la robotique et de mener à terme cette thèse.

Je remercie Philippe Fraisse et Franck Luthon d'avoir accepté de rapporter mon mémoire de thèse ainsi que Benoît Furet et Cyril Novales de faire partie des membres du jury.

Je souhaite aussi remercier mes collègues d'ESTIA Recherche et en particulier Seb, Joseph, Pierre, Denis et Nico pour leur aide, leur soutien et leurs nombreuses discussions qui m'ont permis de grandir en compétences tant sur le plan scientifique que sur le plan pédagogique.

Je voudrais également remercier mes collègues présents sur la plateforme CompositAdour, Francis et Simon, pour leur confiance lors de projets industriels, JB, Vincent et Didier, Thomas et Maël, pour leur patience et leurs explications, et enfin Gene, Isabelle et Hélène, pour leur bonne humeur et leur soutien au quotidien.

Cette thèse s'est déroulée dans le cadre du projet IMPALA avec des partenaires industriels et académiques que je tiens à remercier pour leur écoute et leurs conseils lors des réunions techniques d'avancement du projet.

Je remercie aussi d'autres personnes que j'ai pu rencontrer lors de cette thèse. Je pense notamment à Khalid Lafdi et Abdelghani Saouab, pour leur écoute et leurs remarques lors de la présentation à Marrakech. Une pensée va aux doctorants de l'IRCCyN et en particulier à Jonathan et Sahab, pour leur accueil chaleureux

lors de mes venues à Nantes.

Enfin, je tiens à adresser un remerciement spécial à ma famille et mes amis qui m'ont toujours épaulée, qui m'ont permis de passer d'agréables moments, qui m'ont toujours soutenue et particulièrement dans la dernière ligne droite.

Table des matières

1	Introduction générale	13
1.1	Contexte	13
1.2	Objectifs de la thèse	14
1.3	Problématique	14
1.4	Organisation du mémoire	15
2	Cadre de l'étude	17
2.1	Introduction	17
2.2	Caractéristiques et utilisation du composite	17
2.3	Méthodes de fabrication des pièces	18
2.4	Les enjeux du Placement de Fibres Robotisé	20
2.5	Système développé par Coriolis Composites	20
2.6	Limitations du système actuel	23
2.7	Conclusion	25
3	Robotisation du procédé	27
3.1	Introduction	27
3.2	Les robots manipulateurs industriels et les procédés robotisés	27
3.3	Définition de la tâche de dépose	29
3.4	Nouvelle définition de la tâche	30
3.5	Modélisation du robot	32
3.5.1	Chaîne cinématique	33
3.5.2	Modèle géométrique	34
3.5.3	Modèle dynamique	38
3.6	Conclusion	40
4	Commande référencée capteurs	41
4.1	Introduction	41
4.2	Structures de commande	41
4.2.1	Généralités	41
4.2.2	Types de commande	42
4.2.3	Rappels sur la tâche de dépose des fibres	43
4.2.4	Choix de la structure de commande	44

4.3	Approche mono-capteur	46
4.3.1	Asservissement en force	46
4.3.2	Asservissement en vision	48
4.4	Approche mixte	53
4.5	Loi de commande	55
4.5.1	Description du contrôleur PID	55
4.5.2	Algorithme incrémental	56
4.6	Conclusion	58
5	Mise en œuvre de l'approche mixte	59
5.1	Introduction	59
5.2	Dispositif expérimental	59
5.2.1	Capteur de force	59
5.2.2	Capteur de vision active	63
5.2.3	Architecture matérielle	69
5.2.4	Système de communication	70
5.2.5	Architecture logicielle	71
5.2.6	Implémentation	74
5.3	Effort de compactage	76
5.3.1	Introduction	76
5.3.2	Génération de consigne à partir de l'erreur en effort	76
5.3.3	Résultats expérimentaux	77
5.3.4	Bilan	82
5.4	Positionnement des bandes	83
5.4.1	Introduction	83
5.4.2	Génération de consigne à partir de l'erreur en vision	83
5.4.3	Résultats expérimentaux	83
5.4.4	Bilan	86
5.5	Asservissement Position-Force-Vision	87
5.5.1	Introduction	87
5.5.2	Génération de consigne	88
5.5.3	Résultats expérimentaux	90
5.5.4	Bilan	90
5.6	Conclusion	90
6	Conclusions et Perspectives	93
6.1	Conclusions	93
6.2	Perspectives	94

Table des figures

1.1	Partenaires du projet	14
2.1	Demande mondiale de fibres de carbone en tonnes 2008-2020 (* estimations)	18
2.2	Drapage manuel à CompositAdour	19
2.3	Placement de bandes automatisé - Brochure commerciale MTorres [MTorres,]	19
2.4	Placement de fibres automatisé [Coriolis-Composites,]	20
2.5	Système développé par <i>Coriolis Composites</i> (a) Mèches en sortie d'effecteur (b) Cellule de Placement de Fibres Robotisé	21
2.6	Procédure de génération de trajectoires - CATfiber, CADfiber	23
2.7	Description de l'effort de compactage (a) Vue de côté (b) Vue de face	24
2.8	Espacement entre deux mèches	24
3.1	Robots manipulateurs (a) KUKA (b) FANUC (c) STAUBLI (d) ABB	28
3.2	Définition de la tâche (a) Vue de dessus (b) Vue de côté	29
3.3	Description du stratifié : (a) Vue de dessus (b) Vue de face	31
3.4	Positionnement des bandes (a) Erreur de positionnement (b) Proposition de positionnement avec système de vision	31
3.5	Redéfinition de la tâche (a) Vue de dessus (b) Vue de côté	32
3.6	Modèles mathématiques	33
3.7	Entrées / sorties SYMORO+	33
3.8	Sens de rotation des articulations	34
3.9	Architecture géométrique	34
3.10	Définition des paramètres de Denavit-Hartenberg modifiés	35
3.11	Algorithme de solutions du MGI	38
3.12	Représentation des solutions du MGI	39
4.1	Commande classique	42
4.2	Commande hybride interne	43
4.3	Commande hybride externe	43
4.4	Principe de la commande hybride externe	45
4.5	Définition du repère de la tâche	46
4.6	Transport des efforts dans le repère de la tâche	47
4.7	Etapas du procédé de dépose	48

4.8	Schéma pour l'asservissement en force	48
4.9	Principe de la commande référencée vision	49
4.10	Position du système de vision (a) Caméra embarquée (b) Caméra déportée (c) Stéréovision	50
4.11	Détection du bord de bande	51
4.12	Positionnement du laser et de la caméra sur l'outil	52
4.13	Schéma pour l'asservissement en vision	53
4.14	Schéma de commande de l'asservissement mixte force-vision	55
5.1	Capteurs à jauges d'extensiométries : (a) Mesure de flexion (b) Capteur en "S" (c) Capteur Pan-Cake	60
5.2	Capteurs piézoélectriques : (a) Capteur à une composante (b) Capteur à trois composantes (c) Capteur de couple	61
5.3	Capteur de forces multi-composantes FN7325	62
5.4	Capteur de forces 6 composantes : FT-Delta	62
5.5	ATI FT-Gamma	62
5.6	Capteur d'effort ATI	63
5.7	Positionnement des éléments source laser, caméra et rouleau de compactage	64
5.8	Vue du simulateur 3D	65
5.9	Clichés de l'échiquier pour la calibration	66
5.10	Description des repères	67
5.11	Optimisation de la vision active	68
5.12	Caméra et laser fixé sur l'outil	68
5.13	Relation entre l'espacement en millimètre et la position du bord de bande en pixel	69
5.14	Paramètres dimensionnels des robots KUKA KR240 et KUKA KR6	69
5.15	Environnement de test	71
5.16	Architecture logicielle	73
5.17	Interface graphique de l'application	74
5.18	Schéma de l'asservissement en position - force	77
5.19	Asservissement en effort avec réponse à un échelon	78
5.20	Asservissement en effort avec montée en rampe	78
5.21	Effort de compactage commandé en position pendant le déplacement	79
5.22	Effort de compactage commandé en force pendant le déplacement	80
5.23	Moyenne et écart-type sur la mesure F_z pendant la simulation de drapage asservie en force	81
5.24	Erreur de mesure sur F_z pendant la simulation de drapage asservie en force	82
5.25	Diminution de l'effort parasite F_y entre l'asservissement en position et en force pendant la simulation de drapage	82
5.26	Schéma de commande de l'asservissement position - vision	84
5.27	Image capturée	84
5.28	Analyse polyline de l'image (a) Image d'origine (b) Bord de bande détecté	85
5.29	Asservissement visuel pour réponse à un échelon	86
5.30	Détection du bord de bande pendant le déplacement le long de l'axe x de l'outil	87

5.31	Asservissement visuel le long de l'axe y pendant le déplacement le long de l'axe x	88
5.32	Schéma de commande de l'asservissement position - force - vision	89
5.33	Déplacement le long de l'axe x avec (a) asservissement en force le long de l'axe z et (b) asservissement visuel le long de l'axe y	91
6.1	Approche proposée	94

Liste des tableaux

3.1	Définition de la tâche	30
3.2	Redéfinition de la tâche	32
3.3	Paramètres de Denavit-Hartenberg modifiés [Khalil and Dombre E., 1999] pour le placement robotisé de fibres	35
4.1	Matrices de sélection S_f et S_v en fonction des étapes du procédé	54
5.1	Matrices de sélection en fonction des étapes du drapage	89

Introduction générale

1.1 Contexte

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans le domaine exigeant de l'aéronautique. Beaucoup de pièces sont fabriquées de façon manuelle en disposant les tissus de composite à l'intérieur d'un moule ou en utilisant des machines-outils qui permettent d'avoir un meilleur rendement de production pour les pièces relativement simples. Par conséquent, un des objectifs de l'aéronautique est de mettre en œuvre les matériaux composites sur des machines automatisées afin d'améliorer les cadences de production et d'avoir une meilleure accessibilité sur les moules. Des travaux de recherche ont déjà été menés sur le procédé de placement de fibres automatisé afin d'utiliser un bras manipulateur pour avoir une meilleure accessibilité et une bonne répétabilité [N. J. Johnston et al., 1999].

L'entreprise *Coriolis Composites* établie à Lorient, a déjà développé une solution de placement de fibres robotisé appelée procédé PFR. La solution utilise un bras manipulateur industriel composé de six axes. Il est conçu à partir de composants industriels standards. L'entreprise a conçu toute l'ingénierie de la tête de dépose des fibres ainsi que les logiciels adaptés en utilisant dans la mesure du possible les matériels industriels existants. La tâche de placement de fibres nécessite un effort de compactage dont la quantité est adaptée suivant le matériau utilisé. L'outil du robot doit rester en contact avec la surface du moule et contrôler l'effort de compactage qu'il applique. Or, un robot manipulateur n'est pas fait à l'origine pour travailler en effort. Par conséquent, des problèmes de suivi de trajectoires et de précision apparaissent.

Suite à cette solution, un nouveau besoin est né. Il s'agit de prendre en compte l'utilisation du laser pour réaliser des pièces en thermoplastique et améliorer la précision du robot. Pour y répondre, un regroupement de leaders de la production de structures aéronautiques s'est formé et a monté le projet *IMPALA*¹ qui signifie

¹Programme FUI-011 sous la convention n° F 11 08 008 B



FIGURE 1.1 – Partenaires du projet

Innovation Matériaux et Procédés avec placement de fibres LAsEr (Fig. 1.1). Il s'agit de *Dassault Aviation* à Biarritz, *Daher-Socata* à Tarbes et *EADS Composites Aquitaine* à Bordeaux. Des partenaires académiques se sont également impliqués dans le projet : l'*Université de Bretagne-Sud*, l'*Ecole Centrale* de Nantes et l'*Ecole Supérieure des Technologies Industrielles Avancées* de Bidart. Ce projet est développé au sein de la plateforme technique composites et robotique *CompositAdour* à Bayonne. Cette plateforme est gérée et exploitée par l'école d'ingénieurs *ESTIA*. Elle a été créée à l'initiative du regroupement des trois industriels aéronautiques.

Le projet *IMPALA* a pour objectif d'optimiser à l'aide de modèles numériques et de valider par la réalisation de démonstrateurs les solutions déjà proposées par *Coriolis Composites* qui est le coordinateur du projet. Trois thèses sont intégrées dans le cadre du projet :

- Réaliser la simulation détaillée du procédé PFR ;
- Développer un modèle réduit du processus de chauffe et l'intégrer dans la boucle de commande de la source de chaleur ;
- Améliorer la précision de dépose des fibres du robot.

1.2 Objectifs de la thèse

L'objectif de cette thèse est donc d'améliorer la précision de la dépose robotisée des fibres. Pour cela, il y a deux types d'objectifs. D'un point de vue industriel, la source des erreurs qui génèrent les problèmes de précision doit être identifiée et le système mécatronique permettant le placement de fibres doit être étudié et modélisé. Ensuite, d'un point de vue recherche, la stratégie de contrôle la plus pertinente doit être trouvée afin d'atteindre les objectifs de précision et par conséquent le pilotage de la dépose des fibres doit être adapté.

1.3 Problématique

De plus en plus de tâches industrielles sont robotisées telles que le meulage, l'ébavurage et le polissage. Tout d'abord, la tâche manuelle doit être correctement analysée avant d'être automatisée. Une tâche est définie par des degrés de liberté nécessaires pour l'accomplir. La compatibilité entre le robot et la tâche

doit être vérifiée. Par conséquent, la tâche de placement de fibres doit être analysée de manière détaillée si l'on veut améliorer le système développé par *Coriolis Composites*. Le processus industriel de dépose de fibres existe déjà. Il ne peut donc pas être complètement modifié. Il est possible d'équiper le système avec des capteurs extéroceptifs dans l'objectif d'ajouter des informations sur l'interaction entre l'effecteur et l'environnement (moule) et/ou sur le positionnement de l'effecteur dans l'environnement. Pour cela, la commande référencée capteurs est traitée dans cette thèse en utilisant un capteur de force et un capteur de vision qui ne se substituent pas au contrôleur industriel déjà mis en place.

1.4 Organisation du mémoire

Le chapitre 2 présente le cadre de cette étude. Les caractéristiques des matériaux composites ainsi que les méthodes de fabrication des pièces utilisant ces matériaux sont présentées. Ensuite, les enjeux du placement robotisé de fibres sont décrits et le système développé par l'entreprise *Coriolis Composites* est détaillé. Pour finir, les limitations du système actuel sont listées et présentées.

Le chapitre 3 décrit la robotisation du procédé en commençant par les robots manipulateurs industriels utilisés aujourd'hui ainsi que les procédés déjà robotisés. Ensuite la tâche de dépose des fibres est définie de manière basique puis une nouvelle définition est proposée afin de répondre à tous les critères de qualité. Puis la modélisation du robot est réalisée en établissant la chaîne cinématique du robot manipulateur utilisé, le modèle géométrique et le modèle dynamique.

Le chapitre 4 aborde la commande référencée capteurs. Il s'agit de rappeler les différentes structures de commande et de détailler la solution choisie. Ensuite, les approches mono-capteur (force puis vision) sont décrites. Puis, l'approche mixte est proposée comme réponse à notre problématique. Enfin, chaque asservissement sera détaillé.

Le chapitre 5 est dédié à la mise en œuvre de l'approche mixte. Tout d'abord, il s'agira d'exposer le dispositif expérimental en passant par les systèmes de capteurs utilisés, l'architecture matérielle et logicielle. Ensuite, les lois de commandes ainsi que les résultats expérimentaux sont décrits et analysés concernant l'effort de compactage, le positionnement des bandes et l'asservissement position - force - vision.

Le chapitre 6 propose les conclusions générales ainsi que les perspectives de ce travail de thèse.

Cadre de l'étude

2.1 Introduction

Dans cette partie, les caractéristiques et l'utilisation du matériau composite sont présentées dans un premier temps. Dans un second temps sont décrites les différentes méthodes de fabrication des pièces en composite. Après avoir détaillé les enjeux du placement de fibres robotisé, le système développé par l'entreprise *Coriolis Composites* est exposé. Enfin, la conclusion énumère les limitations du système actuel.

2.2 Caractéristiques et utilisation du composite

Les matériaux composites présentent de nombreux avantages par rapport aux structures métalliques. Leur comportement est très bénéfique pour l'industrie [Chalaye, 2002, Hachemane and Bezzazi, 2009]. La durée de vie de ce type de matériaux est plus grande car ils ont une bonne résistance à la fatigue. Ils ont également de bonnes caractéristiques mécaniques telles que la résistance à la corrosion et une résistance au feu plus importante. De plus, ce type de matériaux est plus léger que les matériaux classiques. Il permet de réduire le poids des produits et donc de diminuer la consommation en carburant. Grâce à la flexibilité de conception et la facilité d'élaboration, il est facile d'obtenir des formes complexes et de mettre en forme la matière de manière optimale. Le coût de fabrication est plus important que pour des matériaux traditionnels tels que l'acier, le bois et l'aluminium mais la tenue dans le temps est meilleure. Par conséquent, l'amortissement du coût est intéressant et cela permet d'accroître la compétitivité des coûts de production.

Ainsi, nombreuses sont les industries qui utilisent, ou qui pensent utiliser les matériaux composites pour la fabrication des structures mécaniques dans de nombreux secteurs comme l'aéronautique, l'automobile, la marine, le sport et l'énergie éolienne. En raison des règlements importants mis en place concernant la pollution de l'air, les industriels doivent diminuer le poids de leurs produits et la consommation de pé-

trole. Pour toutes ces raisons, l'utilisation des matériaux composites prend une place significative dans les procédés de fabrication des industries (Fig. 2.1). Il s'agit d'un nouveau marché en pleine expansion [JEC Composites, 2011, Witten et al., 2012]. En 2012, l'Europe a utilisé la plupart des composites dans les domaines suivants : aérospatial et défense (46 % de 8100 t), les éoliennes (74 % de 9500 t) et l'automobile (56 % de 2150 t). L'Asie a utilisé la plupart des composites dans le sport et les loisirs (86 % de 7800 t).

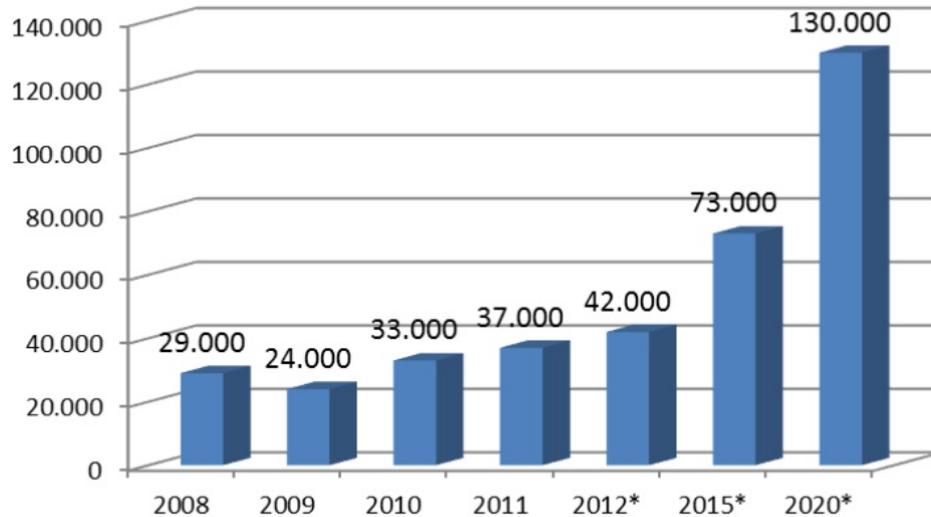


FIGURE 2.1 – Demande mondiale de fibres de carbone en tonnes 2008-2020 (* estimations)

2.3 Méthodes de fabrication des pièces

Il y a plusieurs méthodes de fabrication des pièces en composite [Lucas, 2008]. Le drapage manuel est la méthode la plus simple et la plus ancienne des procédés de fabrication utilisant les pré-imprégnés. Il s'agit de matrices thermodurcissables ou thermoplastiques qui sont sous la forme d'un tissu enrobé dans la résine possédant un certain collant au toucher [Lucas and Parneix, 2014]. Le tissu de carbone est placé manuellement sur un moule généralement ouvert (Fig. 2.2). Suivant les spécifications données par le bureau de conception, les stratifieurs doivent porter une attention particulière à la direction de dépôt des tissus de carbone. Le compactage de la matière se fait à l'aide d'un rouleau ébulleur permettant d'assurer un bon contact entre les différents plis. Lorsque le nombre de plis est important, des compactages intermédiaires, avec l'aide d'un sac à vide, peuvent être nécessaires. Lorsque tous les tissus sont déposés sur le moule, la pièce doit passer en étuve ou en autoclave pour la cuisson. Ce type de procédé est adapté pour la réalisation de pièces de très grandes dimensions. Malgré le haut niveau de compétences des stratifieurs, un manque de répétabilité est présent dans ce procédé de fabrication.

Le placement automatisé de bandes, appelé Automated Tape Placement (ATP) est une technique plus récente [Toso, 2003]. Il s'agit de déposer automatiquement une bande de grande largeur sur un moule avec l'aide d'une machine-outil à commande numérique par ordinateur (MOCN) (Fig. 2.3). Autrement dit, la machine-outil dépose la bande à la place du stratifieur. Les fibres de cette bande sont pré-imprégnées mais le matériau est plus coûteux. Un système de chauffe est placé sur l'outil de dépôt et un rouleau de compactage permet de réaliser le compactage de manière automatique. Dans le cas de ce procédé de fabrication,

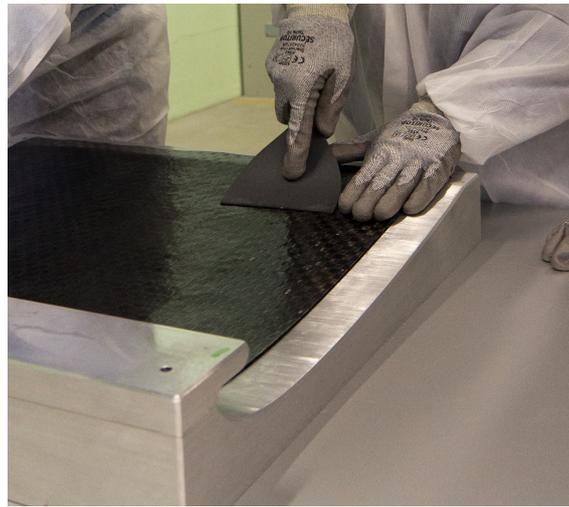


FIGURE 2.2 – Drapage manuel à CompositAdour

l'efficacité de production est améliorée et le coût de fabrication est réduit. En revanche, les moules sont contraints par une surface plus ou moins plane. En effet, ce procédé ne permet pas de réaliser des pièces avec une courbure ou une double courbure.



FIGURE 2.3 – Placement de bandes automatisé - Brochure commerciale MTorres [MTorres,]

Le placement automatisé de fibres, appelé Automated Fibre Placement (AFP) est la plus récente technique de fabrication des pièces en composite. Il s'agit de déposer plusieurs mèches de carbone en même temps sur le moule avec l'aide d'un robot manipulateur (Fig. 2.4). Le nombre de mèches constituant une bande varie en fonction de la conception. Le matériau utilisé peut être du thermodurcissable, du thermoplastique ou de la fibre sèche. En fonction de celui-ci, le système de chauffe doit être adapté afin de mettre le matériau à la bonne température. Comme dans le cadre du placement de bande automatisé, un rouleau de compactage permet de compacter la matière. L'avantage du robot manipulateur est qu'il peut être monté sur un rail linéaire et par conséquent travailler sur des pièces de très grandes dimensions. D'autre part, il possède une bonne répétabilité et une meilleure accessibilité [N. J. Johnston et al., 1999]. Par conséquent, ce procédé peut être utilisé pour des pièces avec simple ou double courbure. Enfin, il permet de moins perdre de matière. En effet, les chutes sont mieux maîtrisées puisque lorsqu'on arrive en bord de pli, le nombre de mèches déposées peut être réduit.

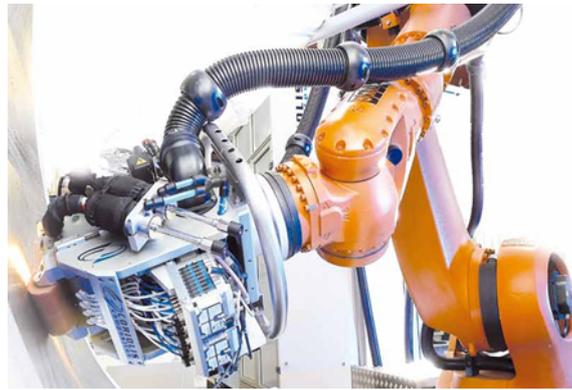


FIGURE 2.4 – Placement de fibres automatisé [Coriolis-Composites,]

2.4 Les enjeux du Placement de Fibres Robotisé

L'industrie automobile réalise de la production en série. Pour cela, de nombreuses tâches sont accomplies à l'aide de robots. Afin de répandre l'utilisation du composite, il est nécessaire d'automatiser les tâches d'assemblage composite. Dans le domaine de l'aéronautique, il est indispensable d'être capable de proposer des solutions industrielles à des coûts abordables pour le client final [Lecompte-Boinet, 2006]. Cela passe donc par une automatisation efficace des procédés de fabrication des pièces en composite. Le prix des fibres de carbone étant élevé par rapport au prix de l'aluminium par exemple et les chutes de composites ne pouvant pas être recyclées contrairement aux copeaux d'aluminium, il est important d'éviter au maximum le gaspillage du matériau. La dextérité et la répétabilité d'un robot permet non seulement la dépose de bandes mais aussi la dépose de mèches pour avoir un placement de fibres plus précis sur des structures de forme complexe. Il est évident que l'automatisation engendre un gain de temps et de coût par rapport au drapage manuel lorsque les pièces sont produites en série. Elle permet également de travailler sur des moules de grandes dimensions et avec des formes complexes tout en ayant une bonne répétabilité. Les pièces fabriquées en métal doivent être composées de plusieurs sous-éléments à assembler au préalable. Avec une approche en composite, ces mêmes pièces peuvent être fabriquées en une seule fois sans avoir besoin d'avoir recours au perçage, à la fixation et à l'usinage ce qui simplifie la gamme de fabrication. Enfin, l'innovation est nécessaire afin d'apporter des améliorations sur l'efficacité et le coût de production.

2.5 Système développé par Coriolis Composites

L'entreprise *Coriolis Composites* a développé une solution de Placement de Fibres Robotisé. La société a développé l'ingénierie de la tête de dépose et des logiciels en utilisant si possible des composants industriels qui existent déjà comme le bras manipulateur. Ce système ne dépose pas des bandes mais plusieurs mèches suivant l'outil de placement utilisé. Depuis 2001, la compagnie a déposé plus de douze brevets internationaux non seulement sur le système AFP (Automated Fibre Placement) mais aussi sur les équipements et les algorithmes.

Cellule robotisée

La cellule robotisée est composée d'un bras manipulateur KUKA KR 240 (six axes) et de son effecteur développé spécialement pour la dépose de fibre (Fig. 2.5). Le robot peut se déplacer sur un rail linéaire (un axe) d'une longueur de 16 mètres afin de pouvoir travailler sur des pièces de grandes dimensions. Les fibres de carbone peuvent être drapées sur différents supports : une table aspirante sur un plan horizontal fixe ou un moule fixé sur un système de positionnement (un axe) horizontal ou vertical permettant de modifier l'orientation du moule. Ainsi, huit degrés de liberté doivent être pilotés de manière synchronisée. A l'arrière du robot, se trouve le cantre où sont placées les bobines de mèches de carbone. Celles-ci sont acheminées vers l'effecteur via une gaine contenant des tubes flexibles spécialement développés, conçus pour ne pas endommager les fibres. Un réducteur de tension appelé Multiwinch a été mis en place en sortie du cantre. L'effecteur peut déposer le carbone dans tous types de moules ayant des rayons de courbure supérieurs ou égaux à un mètre.

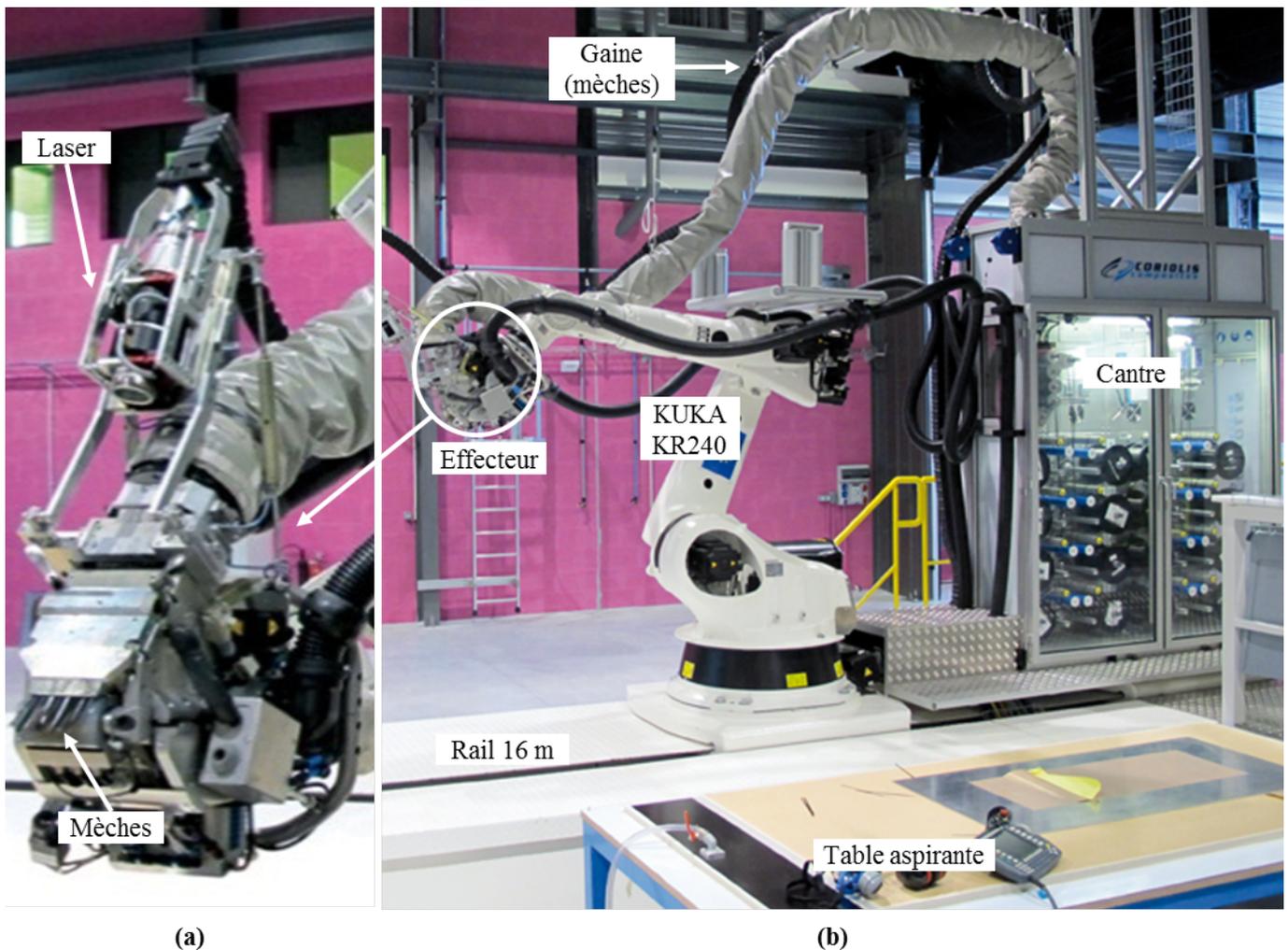


FIGURE 2.5 – Système développé par *Coriolis Composites* (a) Mèches en sortie d'effecteur (b) Cellule de Placement de Fibres Robotisé

Systeme de chauffe

La fibre de carbone est mêlée à de la résine qu'il faut cuire pour solidifier la matière. Un système de chauffe est utilisé pour chauffer les mèches juste avant leur dépose en cours de drapage. Le moyen de chauffe dépend du matériau utilisé et des températures de chauffe nécessaires. Il peut être soit une lampe infrarouge, soit un laser à diode à émission continue d'une puissance maximale de 12 kW. La lampe infrarouge est utilisée pour le thermodurcissable qui nécessite des températures autour de 50°C. Le laser est utilisé pour la fibre sèche et le thermoplastique. Ces matériaux nécessitent respectivement des températures autour de 150-200°C et 350-400°C. La lampe infrarouge chauffe de manière plus diffuse alors que la zone de chauffe est géométriquement mieux maîtrisée avec le laser.

Matériau

La largeur d'une mèche de carbone est égale à 6,35 mm (Fig. 2.5-a). En fonction de l'outil de dépose utilisé, le robot peut déposer d'une à huit ou 16 ou 32 mèches en même temps. Par conséquent, la largeur de la bande finale varie en fonction du nombre de mèches de 6,35 mm à 50,8 mm ou 101,6 mm ou 203,2 mm. L'épaisseur d'un pli de carbone varie entre 0,1 mm et 0,3 mm.

Génération de trajectoires

Deux logiciels ont été développés pour générer les trajectoires théoriques de la tête du robot en mode hors-ligne. Il s'agit du logiciel CADFiber qui fonctionne sous Windows et du logiciel CATFiber qui fonctionne sous CATIA/DELMIA. Différentes étapes logicielles sont nécessaires avant la création du programme permettant la fabrication (Fig. 2.6).

Tout d'abord, il faut concevoir l'échantillonnage de la pièce à fabriquer. Il s'agit de déterminer le nombre de plis et leurs orientations. Puis, les différents plis sont créés sur la surface à partir de la CAO de la pièce à draper. Ensuite, les bandes peuvent être générées suivant le sens de dépose choisi. Si le sens de dépose est différent entre deux bandes successives, cela signifie qu'une "retourne"¹ de la tête est nécessaire. Ceci peut être utilisé pour une pièce de grande longueur pour améliorer le temps de cycle, en créant un drapage bi-directionnel imitant nos imprimantes.

Ensuite, des stratégies de mouvement et de compactage doivent être déterminées. Il s'agit de savoir si le robot doit bouger sur l'axe linéaire, c'est-à-dire le rail de 16 mètres. Ceci peut être utile lorsque la pièce est de longueur importante. L'orientation du moule peut être modifiée via le positionneur pour faciliter l'accès à certaines zones de la pièce. La valeur de l'effort de compactage doit être choisie en fonction du matériau utilisé ainsi que la vitesse nominale de drapage. L'intervalle de bande est défini dans les spécifications du client. Ainsi, les trajectoires théoriques de la tête du robot peuvent être générées. Il s'agit d'une succession de mouvements linéaires ou basés sur des splines. La génération de trajectoires est uniquement basée sur la géométrie de la pièce, sur la géométrie de l'outil de dépose et sur l'architecture géométrique du bras manipulateur.

Finalement, le robot peut être modélisé de façon géométrique (en 3D) et les simulations de dépose de fibres

¹La tête Coriolis ayant un sens de drapage dû au système, il est nécessaire de faire une rotation de la tête afin de déposer les fibres de manière continue quelle que soit la géométrie de la pièce (vocabulaire *Coriolis Composites*)

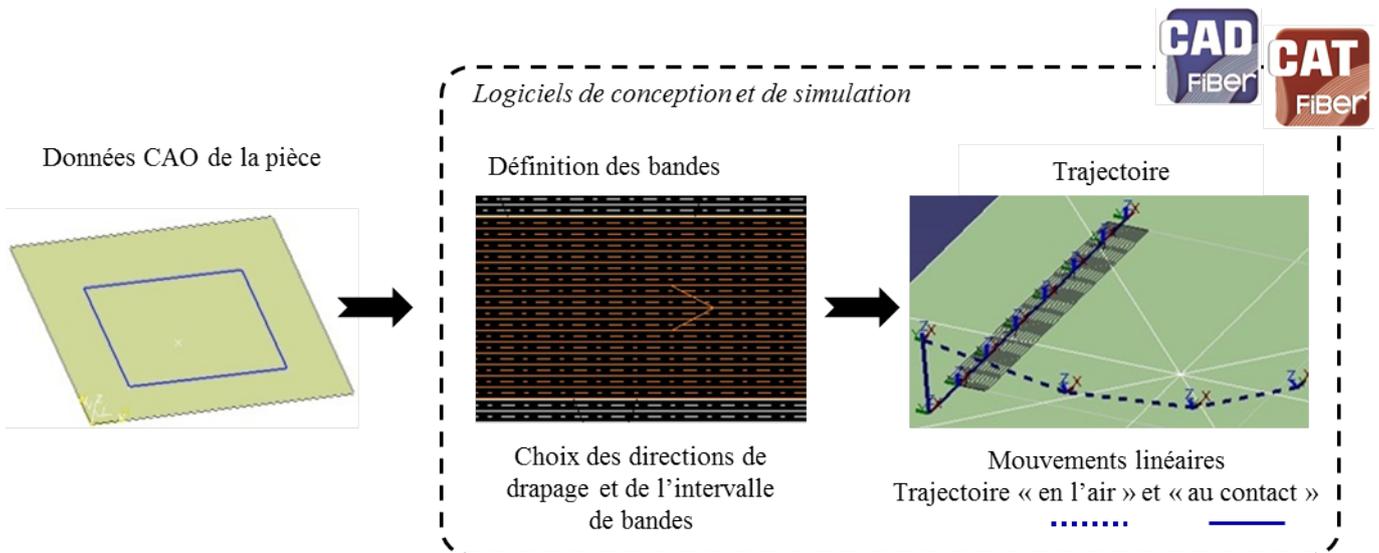


FIGURE 2.6 – Procédure de génération de trajectoires - CATfiber, CADfiber

peuvent être réalisées à partir des trajectoires créées précédemment. Les programmes de commande du robot sont créés à partir des simulations et le logiciel génère les fichiers interprétables par le contrôleur du robot en langage KRL (Kuka Robot Language).

Commande du robot

Toutes les directions sont commandées en position et orientation grâce à la création des trajectoires de l'outil en langage KRL. Des contraintes dues à la tâche métier sont prises en compte par le logiciel. Un pli de carbone doit être compacté et la direction de l'effort de compactage doit être normale à la surface (Fig. 2.7). Le rouleau de compactage est placé à l'extrémité de l'effecteur permettant l'acheminement des mèches sur le moule. Le contact est établi entre les mèches en cours de dépose et le moule grâce au rouleau. Un vérin pneumatique est utilisé pour gérer l'effort de compactage en ajustant ou en contrôlant la pression à l'intérieur du vérin.

Les déplacements sont définis dans le repère du TCP (Tool Center Point). La commande de la position de l'outil le long de l'axe x permet de suivre la génération de trajectoire en vitesse et l'orientation autour de l'axe x permet d'appliquer l'effort de compactage de manière homogène sur toute la surface. La position de l'outil le long de l'axe y permet le positionnement de la bande par rapport à la définition du pli et l'orientation autour de l'axe y est contrainte car l'axe z doit être perpendiculaire à la surface du moule. La position de l'outil le long de l'axe z permet de positionner correctement l'outil afin d'activer le vérin pneumatique et l'orientation autour de l'axe z est liée au positionnement de la bande le long de l'axe y .

2.6 Limitations du système actuel

Pendant la dépose des mèches, différents défauts peuvent apparaître suite à des placements de mèches incorrects, qui entraînent une mauvaise qualité de la pièce. Tout d'abord, il peut y avoir un espacement (Fig. 2.8) ou un recouvrement entre deux mèches successives appartenant à la même bande. Ensuite, il peut y avoir un espacement ou un recouvrement entre deux bandes successives quel que soit le sens de la dépose. Enfin,

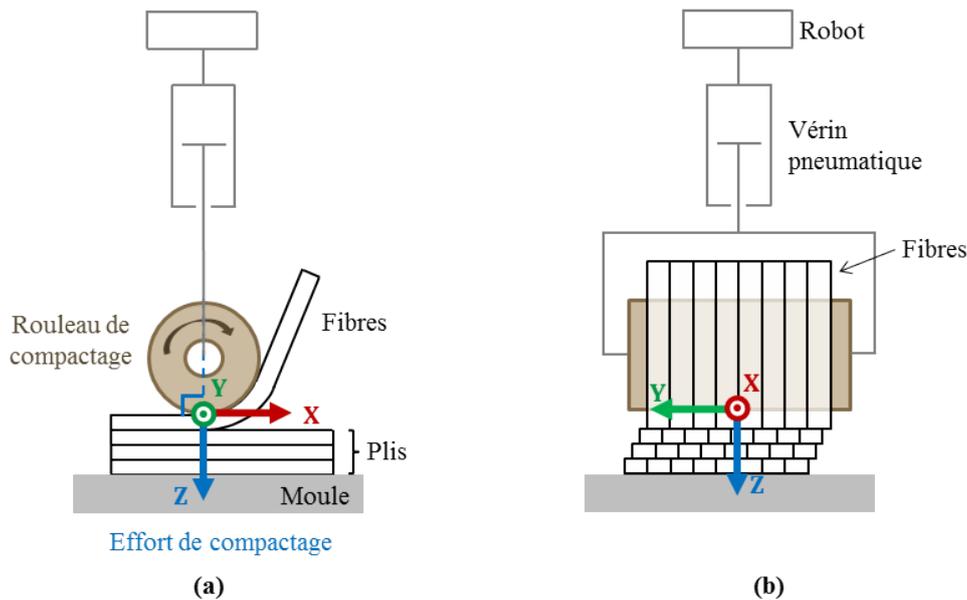


FIGURE 2.7 – Description de l'effort de compactage (a) Vue de côté (b) Vue de face

il peut y avoir une déviation angulaire trop importante car elle dépasse les limites spécifiées.



FIGURE 2.8 – Espacement entre deux mèches

Les défauts observés peuvent avoir plusieurs origines. Les filières qui permettent le passage des mèches dans l'effecteur sont usinées à 6,4 mm. Les spécifications envoyées aux fournisseurs de matières sont que la largeur des mèches doit être égale à $6,35 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$. Si la largeur des mèches est en dehors des tolérances, cela peut entraîner un espacement ou un recouvrement entre les mèches appartenant à la même bande. Par conséquent, une mauvaise calibration de la largeur des mèches peut engendrer des défauts indépendamment du système de dépose. Ce type de défaut n'est donc pas traité dans le cadre de l'amélioration du procédé robotisé.

Ensuite, une différence entre le placement théorique des fibres et le placement réel des fibres peut être due à une position / orientation de l'effecteur incorrecte. La configuration du robot joue un rôle important dans l'apparition de défaut. Par exemple, suivant le bras de levier, la structure mécanique du robot sera plus ou moins résistante aux efforts extérieurs.

L'effort de compactage est généré par le pilotage du vérin en boucle ouverte sur l'effort car il n'y a pas de capteur d'effort sur le système. L'effort de compactage est créé en contrôlant la pression dans le vérin

pneumatique. Il est donc fondé sur la relation qu'il y a entre la pression p , la force F et la surface S telle que $p = \frac{F}{S}$. Cette hypothèse est valide seulement si le robot est indéformable sous la force (hypothèse des corps rigides). Le non respect de cette hypothèse peut entraîner des efforts parasites qui génèrent des déplacements non désirés de l'effecteur qui n'ont pas lieu d'être dans le procédé de placement des fibres.

2.7 Conclusion

Cette partie a permis de présenter l'importance de l'utilisation des matériaux composites pour les années à venir. Elle a également montré que le système développé par *Coriolis Composites* présentait quelques limitations. Certaines de ces limitations dépendent de la configuration du système mais d'autres viennent directement du matériau en lui-même. Il est donc important d'étudier en détail la définition de la tâche de dépose afin de proposer une approche pertinente dans la robotisation du procédé.

Robotisation du procédé

3.1 Introduction

Tout d'abord, un état de l'art est fait sur les robots manipulateurs industriels et les procédés robotisés. Ensuite, la tâche de dépose des fibres en carbone est étudiée et définie. Il s'agit de décrire les degrés de liberté de la tâche. Ensuite, une nouvelle définition de la tâche est proposée afin de prendre en compte le positionnement des bandes au sein d'un pli. Enfin, le robot manipulateur utilisé pour la tâche de dépose des fibres est modélisé.

3.2 Les robots manipulateurs industriels et les procédés robotisés

Les robots manipulateurs sont des systèmes poly-articulés généralement composés de six degrés de liberté permettant le positionnement (porteur constitué de trois axes) et l'orientation (poignet constitué de trois axes) de l'effecteur dans un espace de travail. Les articulations peuvent être des articulations rotoïdes ou prismatiques. Si l'on désire une articulation plus complexe, elle peut être une combinaison de plusieurs degrés de liberté. Ainsi, une liaison rotule est composée de trois articulations rotoïdes dont les axes sont concourants. Les robots manipulateurs sont largement utilisés dans les secteurs de l'automobile et de l'aéronautique pour augmenter la production et donc diminuer les coûts tout en garantissant une bonne qualité du produit. Dans la plupart des cas, ils travaillent sans application d'effort extérieur dans des procédés pour permettre le déplacement de pièces sur un poste de travail, le travail coopératif, l'assemblage, la peinture, etc. Depuis quelques temps, on les voit apparaître dans le cadre d'applications où les efforts extérieurs autre que la gravité sont présents tels que l'usinage, le placement de fibres, le soudage.

Les caractéristiques à prendre en compte pour le choix d'un robot en fonction de la tâche à accomplir sont l'espace de travail, la charge maximale transportable par le robot, les vitesses et les accélérations

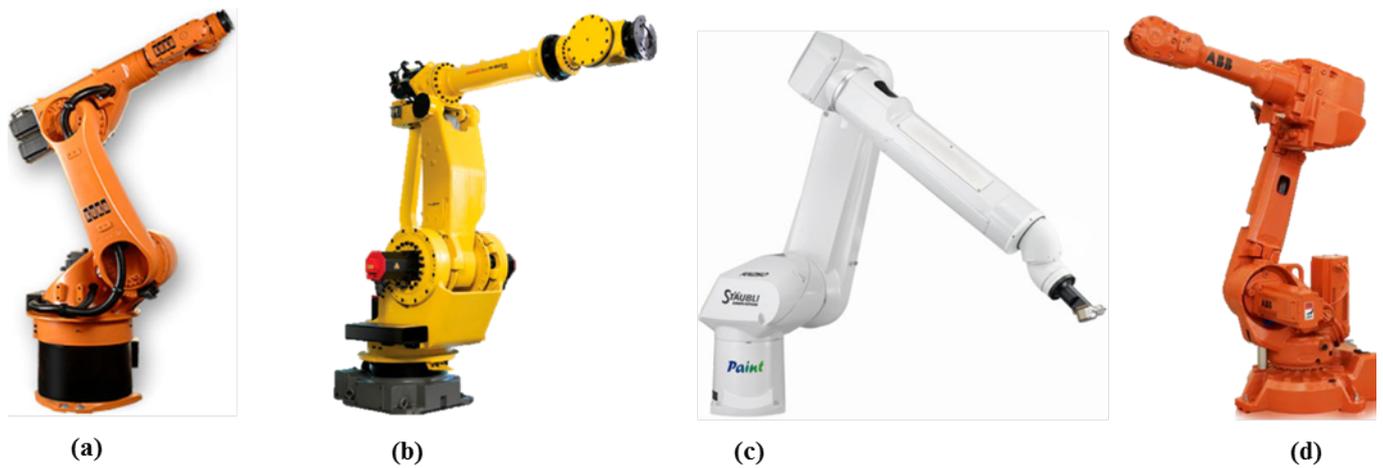


FIGURE 3.1 – Robots manipulateurs (a) KUKA (b) FANUC (c) STAUBLI (d) ABB

maximales qui conditionnent les temps de cycle, les performances, la répétabilité ainsi que la résolution [Khalil and Dombre E., 1999]. Contrairement aux machines-outils par exemple, les robots manipulateurs offrent la possibilité d'augmenter l'espace de travail et grâce à leur structure mécanique, ils permettent de travailler sur des pièces avec des formes plus complexes. Malgré la flexibilité des articulations des robots manipulateurs qui joue négativement sur la précision par rapport à la rigidité des machines-outils, ils gardent comme point fort la caractéristique de bonne répétabilité.

Il existe plusieurs constructeurs de robots manipulateurs industriels tels que KUKA, FANUC, STAUBLI, ABB. Un robot de chaque constructeur précédemment cité est représenté en Fig. 3.1. Les éléments qui distinguent les robots des différents constructeurs sont l'enveloppe de travail, le langage de programmation, le contrôleur, les vitesses de communication, etc.

Quel que soit le robot utilisé ainsi que le langage de programmation, il est possible de générer la trajectoire de l'outil dans l'espace articulaire (trajectoire libre entre deux points) ou dans l'espace opérationnel (trajectoire contrainte entre deux points). Dans l'espace articulaire, le mouvement peut être généré par une interpolation polynomiale (interpolation linéaire ou interpolation par des polynômes de degrés trois ou cinq), une loi Bang-Bang ou une loi trapèze. Dans l'espace opérationnel, le mouvement est décomposé en un mouvement de translation en ligne droite et en un mouvement de rotation entre les deux points qui se terminent en même temps.

De plus en plus de tâches industrielles telles que le polissage, le meulage ou l'ébavurage sont robotisées [Robertsson et al., 2006, Nagata et al., 2007]. Tout d'abord, la tâche manuelle doit être bien analysée avant d'envisager son automatisation. Une tâche est définie par des degrés de liberté nécessaires afin de l'accomplir correctement. Pour robotiser une tâche, la compatibilité des degrés de liberté entre le robot et la tâche doit être vérifiée. Le nombre de degrés de liberté (ddl) de l'outil doit être supérieur ou égal au nombre de degrés de liberté de la tâche. Dans le cadre du placement de fibres robotisé, des travaux de recherche sont réalisés avec l'objectif d'améliorer le nouveau procédé et sa précision afin de prendre en compte tous les paramètres de la tâche de placement de fibres. Il est possible d'équiper les systèmes robotisés avec des

capteurs afin d'ajouter des informations sur l'interaction qu'ils ont avec l'environnement. Il peut s'agir de capteur d'efforts [Zheng and Fan, 1991] mais aussi de capteurs visuels [Espiau et al., 1992] en fonction du procédé traité.

3.3 Définition de la tâche de dépose

Pour assurer la qualité de dépose, l'effort de compactage doit être maîtrisé et il est différent suivant le matériau utilisé. Pour la fibre sèche, l'effort de compactage est égal à environ 5 N. Pour le matériau thermoplastique, il est égal à environ 200 N et pour le matériau thermodurcissable, il est égal à 500 N et il peut aller jusqu'à 1500 N. Dans tous les cas, cet effort de compactage doit être normal à la surface quelle que soit la courbure du moule.

Au vue de la forte interaction qu'il y a entre l'effecteur du robot et la surface à draper, la tâche de placement de fibres est clairement une tâche en effort. La maîtrise de cet effort est donc primordiale si l'on veut respecter les efforts demandés par les spécifications du bureau d'étude et méthodes "composite". Le rouleau permettant le compactage de la matière n'est pas rigide. Il se déforme sous la pression de l'effort de compactage. Le contact rouleau-surface n'est pas un segment de droite mais une surface. Par conséquent, l'effort de compactage doit être correctement réparti sur cette surface afin que toutes les mèches subissent le même effort.

Le procédé de placement de fibres nécessite une mixité des types de commande entre la force et la position ainsi qu'entre le moment et l'orientation (Fig. 3.2). Lors d'une première approche, on peut considérer le rouleau de compactage non déformable et un roulement sans glissement. Par conséquent, on commande le robot uniquement en effort (moment) ou en position (orientation). Les degrés de liberté de l'outil qui doivent être contrôlés en force (moment) et non en position (orientation) doivent être définis dans le repère de la tâche dont la direction z est normale à la surface du moule.

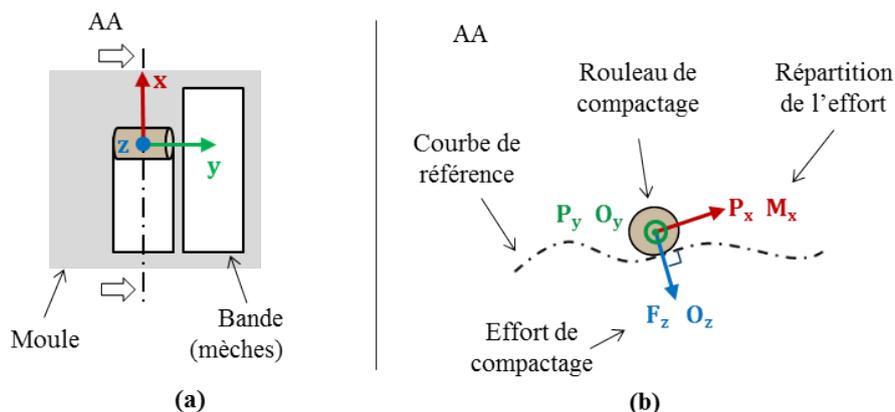


FIGURE 3.2 – Définition de la tâche (a) Vue de dessus (b) Vue de côté

L'effort de compactage F_z étant appliqué sur la surface à draper, la valeur de l'effort est commandée suivant l'axe z . Si la valeur de l'effort est nulle, l'outil n'est pas au contact de la pièce. En revanche, lorsque la valeur est positive, l'outil est en contact avec la surface de la pièce et la position de l'outil dans le repère

fixe de l'atelier est uniquement observable (non commandée). En revanche, suivant les axes x et y , ce sont les positions P_x et P_y qui doivent être contrôlées. Le rouleau doit avancer et suivre une courbe de référence dont on connaît la position à atteindre. Les positions le long des axes x et y sont commandées par la trajectoire outil. Les efforts suivant les axes x et y , autrement dit F_x et F_y ne sont pas contrôlés mais peuvent seulement être observés (efforts de frottement par exemple). Chacune des trois directions est commandée soit en position soit en force. Il s'agit bien là de la dualité de commande force-position.

Il est possible que la surface du moule ait une certaine courbure sur la longueur de la pièce. Cependant, la force suivant l'axe z doit être répartie le plus uniformément possible sur la surface de contact afin de garantir un moment M_x nul autour de l'axe x . Par conséquent, la surface du rouleau doit suivre la courbure du moule. Donc l'orientation de l'outil autour de l'axe x doit être adaptée afin de garantir un moment nul M_x . La direction x est donc commandée via le moment. L'effort de compactage doit être perpendiculaire à la surface. Par conséquent, l'orientation O_y de l'effecteur autour de l'axe y est contrôlée selon la définition de la trajectoire alors que le moment M_y ne peut qu'être mesuré. Afin de suivre la courbe de référence, la rotation autour de l'axe z O_z doit être maîtrisée. Il s'agit de la dualité moment-orientation.

La tâche de dépose des fibres n'est pas une tâche à six degrés de liberté car elle nécessite le respect des contraintes de force et de moment. Elle est donc définie par le torseur des efforts et le torseur cinématique dans le repère de la tâche.

Le tableau 3.1 établit une synthèse de la définition des torseurs des efforts et cinématique.

TABLE 3.1 – Définition de la tâche

Torseur des efforts	0	0	F_z	M_x	0	0
Torseur cinématique	P_x	P_y	0	0	O_y	O_z

3.4 Nouvelle définition de la tâche

Suivant les spécifications des clients, le stratifié peut être différent. Il est possible de régler la distance entre deux bandes appelée *intervalle de bandes* (Fig. 3.3-a) mais aussi la distance entre plis de même orientation, appelée *décalage de grille* (Fig. 3.3-b). Concernant le positionnement des bandes, les spécifications aéronautiques imposent une précision importante. Le recouvrement entre mèches, appelé *overlap*, est interdit. L'espacement non prévu entre mèches, appelé *gap*, est autorisé sous certaines conditions. Par exemple, sur une largeur moyenne de 300 mm, le gap cumulé ne doit pas être supérieur à 1,5 mm. La déviation angulaire doit être inférieure à ± 1 degré.

Dans le système industriel actuel, le positionnement des bandes suivant l'axe y est réalisé en position d'après la génération de trajectoires en mode hors-ligne. Les logiciels de génération des trajectoires de l'outil de dépose spécifient la position de chaque bande séparément avant le drapage de la pièce. Lors de la génération des trajectoires, un intervalle de bande est spécifié suivant les consignes des clients. Il n'y a pas de correction pendant le déroulement du drapage. Par conséquent, la dépose de chaque bande se fait par rapport à la théorie et non pas en tenant compte de la bande précédemment déposée. Par exemple, il est possible que la dépose d'une bande ne respecte pas le positionnement théorique pour différentes raisons (défaut

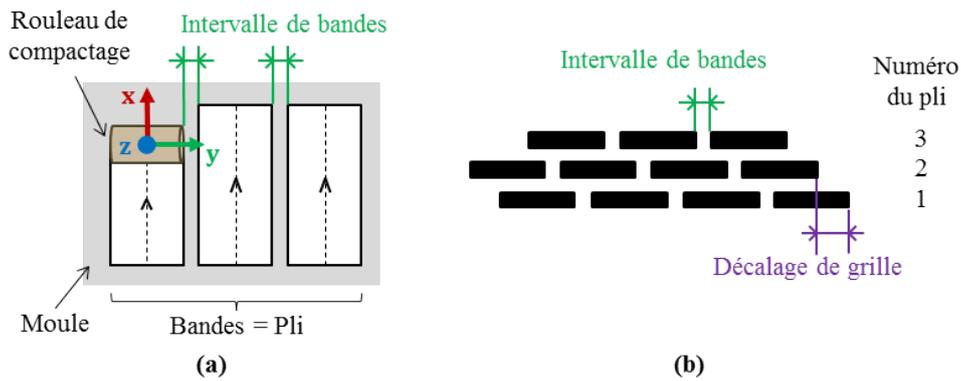


FIGURE 3.3 – Description du stratifié : (a) Vue de dessus (b) Vue de face

géométrique) mais que la dépose de la bande suivante soit réalisée correctement par rapport au positionnement théorique. Dans ce cas là, des défauts peuvent apparaître tels qu'un espacement ou un recouvrement entre deux bandes. La figure 3.4-a représente des défauts de manière exagérée. A cause d'un écart entre la génération de trajectoires théoriques et la dépose des bandes réelles dû à un mauvais positionnement des bandes, l'intervalle de bandes n'est pas totalement maîtrisé, pouvant créer un recouvrement mais aussi une déviation angulaire trop importante.

L'objectif est de respecter l'intervalle spécifié de bandes lors de la génération des trajectoires durant la dépose des bandes. Il s'agit de faire une juxtaposition des bandes. Par exemple, si la première bande n'est pas déposée précisément à l'emplacement théorique mais reste dans les exigences, la deuxième bande sera déposée en prenant comme référence la première bande. Ceci permet de respecter l'orientation du pli tout en évitant les défauts de type gap et overlap (Fig.3.4-b). La tolérance sur l'orientation des plis doit être prise en compte. Cette amélioration peut être appliquée sur des moules de type plaque ou lors d'un changement du sens de dépose des bandes. Il s'agit de piloter la position de la bande sur le moule par rapport à la bande précédente en utilisant un capteur extéroceptif. Sachant que ce capteur doit pouvoir détecter le bord de la bande précédente et au vu de l'environnement, un système de vision active semble être une solution pertinente.

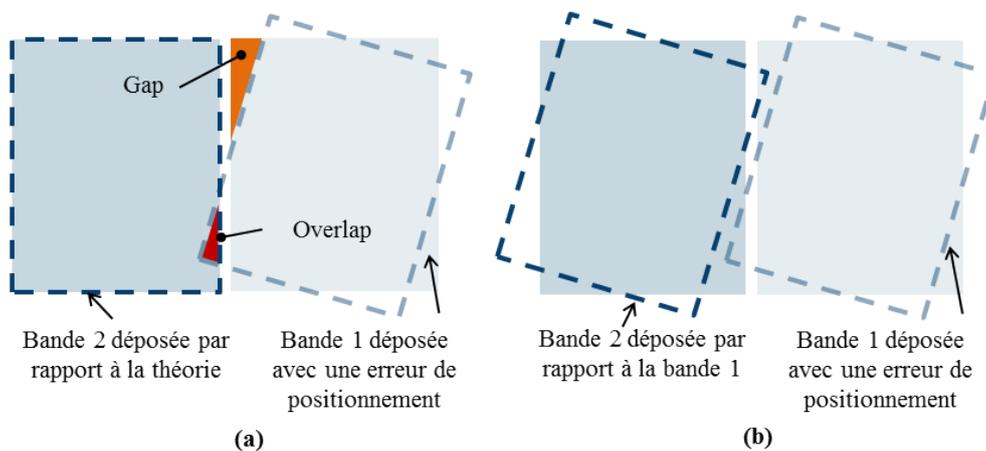


FIGURE 3.4 – Positionnement des bandes (a) Erreur de positionnement (b) Proposition de positionnement avec système de vision

Afin de prendre en compte ce nouveau paramètre de positionnement, la définition de la tâche décrite en section 3.3 doit être complétée. Il s’agit d’ajouter la dualité position / vision dans la définition des degrés de liberté dans le repère de la tâche. Par conséquent, le positionnement de la bande suivant l’axe y est maintenant défini en vision. Cela permet de positionner la nouvelle bande par rapport à la bande précédente. Ce degré de liberté est maintenant noté I_y en référence au repère caméra. Figure 3.5, cette nouvelle définition de la tâche est prise en compte.

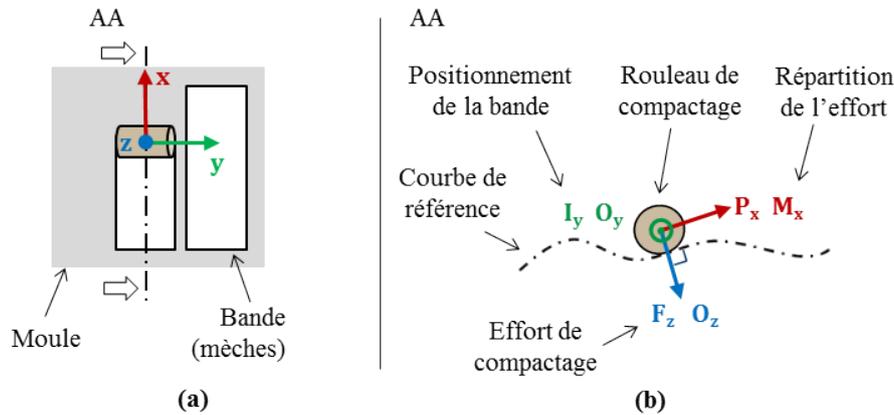


FIGURE 3.5 – Redéfinition de la tâche (a) Vue de dessus (b) Vue de côté

On propose de remplacer la commande de la composante y du torseur cinématique par une commande liée à des informations visuelles.

Le tableau 3.2 établit une synthèse de la définition des torseurs des efforts et cinématique et de la définition de la direction commandée en vision dans le repère de la tâche.

TABLE 3.2 – Redéfinition de la tâche

Torseur des efforts	0	0	F_z	M_x	0	0
Torseur cinématique	P_x	0	0	0	O_y	O_z
Vision	0	I_y	0	0	0	0

3.5 Modélisation du robot

Afin de faire la synthèse des trajectoires de mouvement du robot, de sa commande et d’effectuer sa simulation, nous allons déterminer ses modèles géométriques, cinématiques et dynamiques. Ces modèles nous permettent de passer de l’espace articulaire à l’espace opérationnel et vice-versa (Fig. 3.6). La modélisation s’appuie sur un ouvrage de référence dans la modélisation des robots [Khalil and Dombre E., 1999].

Dans cette partie, les modèles géométriques direct et inverse sont présentés. Les solutions sont calculées grâce au logiciel SYMORO+ (SYmbolic MOdeling of ROBots) [Khalil and Dombre E., 1999]. Il permet le calcul des modèles des robots plus aisément. Il nécessite en données d’entrées les paramètres de Denavit-Hartenberg [Denavit and Hartenberg, 1955] modifiés (DHM) définissant l’architecture mécanique du robot ainsi que les paramètres dynamiques (masses, inerties, etc). Avec ces paramètres, SYMORO+ calcule les



FIGURE 3.6 – Modèles mathématiques

modèles géométriques, cinématiques, dynamiques et le modèle d’identification des paramètres inertiels (Fig. 3.7).

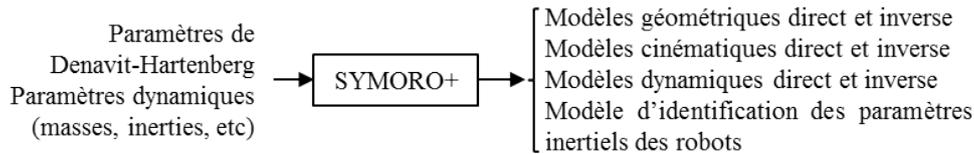


FIGURE 3.7 – Entrées / sorties SYMORO+

Pour terminer, une approche du modèle dynamique est réalisée pour permettre la compréhension du système et des efforts appliqués sur le bras manipulateur.

3.5.1 Chaîne cinématique

Nous allons tout d’abord rappeler le matériel nécessaire pour le placement de fibres automatisé. Il s’agit d’un bras manipulateur six axes KUKA KR240 avec un effecteur permettant le placement de fibres. Le robot se déplace sur un rail linéaire. Chaque articulation est affectée d’un repère dont l’axe z est porté par l’axe de l’articulation (Fig. 3.8) [Khalil and Dombre E., 1999]. Les paramètres de Denavit-Hartenberg modifiés (DHM) sont connus.

La chaîne cinématique est représentée dans la configuration où toutes les variables articulaires sont nulles afin de respecter les choix du constructeur (Fig. 3.9). Le repère de l’atelier R_{ate} est un repère fixe lié au sol de l’atelier. L’axe z_{ate} est normal à la surface du sol et dirigé vers le haut. Les axes x_{ate} et y_{ate} sont dans le plan de la surface du sol. Le repère R_0 correspond au repère de la base du rail. Ce repère est fixe par rapport au repère de l’atelier R_{ate} . La translation entre le repère R_1 et le repère R_0 représente le déplacement du robot sur le rail linéaire. Le bras manipulateur est représenté par le repère R_1 jusqu’au repère R_7 . Le repère R_8 correspond au capteur d’efforts fixé sur le poignet du robot. Le repère R_{12} représente l’extrémité de l’effecteur, c’est-à-dire le rouleau de compactage. Des repères sont ajoutés entre le repère R_8 et le repère R_{12} afin de respecter la modélisation classique avec l’approche de Denavit-Hartenberg modifié. Ainsi, nous obtenons la table des paramètres DHM (Tab. 3.3) où les paramètres géométriques ($\alpha_j, d_j, \theta_j, r_j$) qui sont définis en Fig. 3.10 déterminent la localisation du repère R_j par rapport au repère précédent R_{j-1} .

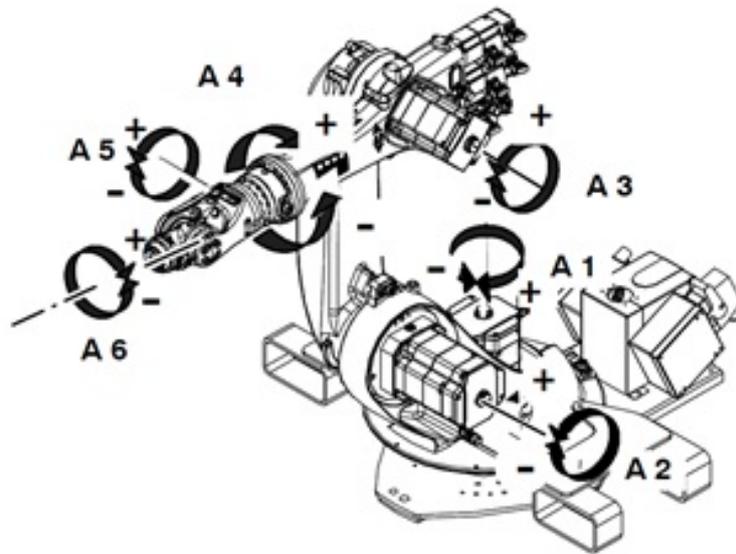


FIGURE 3.8 – Sens de rotation des articulations

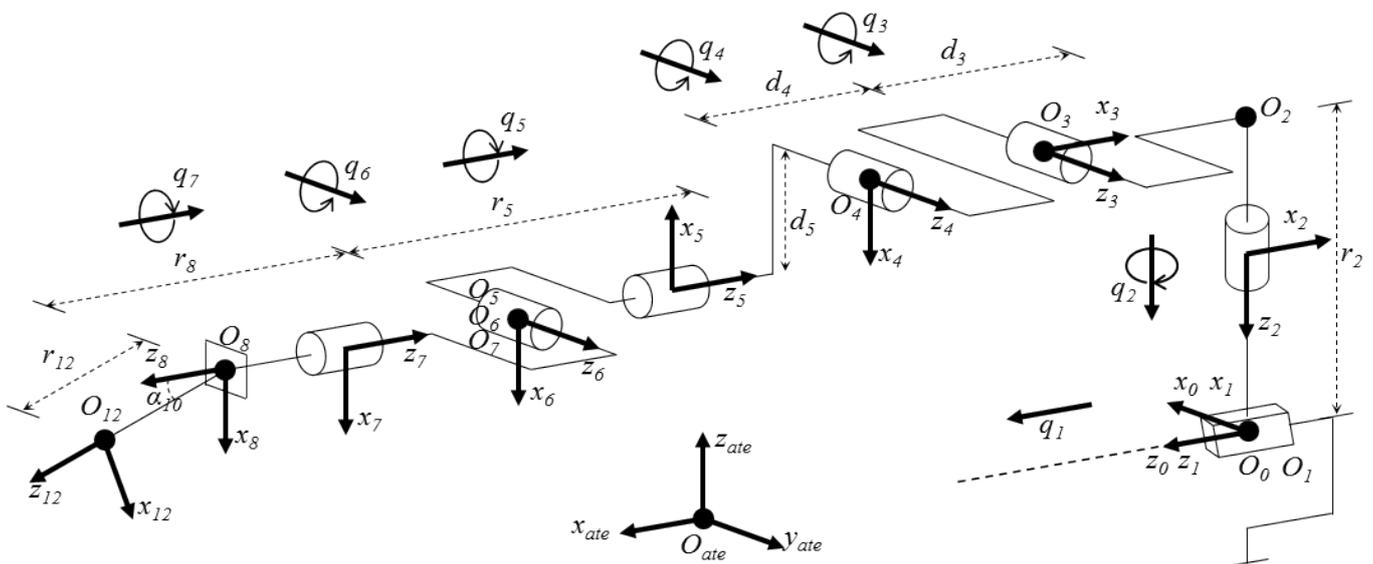


FIGURE 3.9 – Architecture géométrique

3.5.2 Modèle géométrique

Modèle géométrique direct

Le modèle géométrique direct (MGD) permet de calculer la situation de l'organe terminal en fonction des variables articulaires du robot tel que $\mathbf{X} = f(\mathbf{q})$. Il s'appuie sur les matrices homogènes de passage qui permettent de définir un repère R_j dans le repère R_{j-1} à l'aide des paramètres de Denavit-Hartenberg modifié :

$${}^0\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad {}^1\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} \cos(q_2 + \frac{\pi}{2}) & -\sin(q_2 + \frac{\pi}{2}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -r_2 \\ -\sin(q_2 + \frac{\pi}{2}) & -\cos(q_2 + \frac{\pi}{2}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

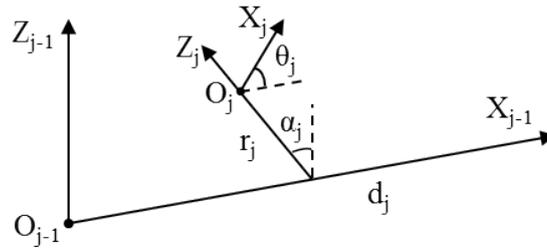


FIGURE 3.10 – Définition des paramètres de Denavit-Hartenberg modifiés

TABLE 3.3 – Paramètres de Denavit-Hartenberg modifiés [Khalil and Dombre E., 1999] pour le placement robotisé de fibres

j	α_j	d_j	θ_j	r_j
1	0	0	0	q_1
2	$-\frac{\pi}{2}$	0	$q_2 + \frac{\pi}{2}$	$-r_2$
3	$-\frac{\pi}{2}$	$-d_3$	q_3	0
4	0	$-d_4$	$q_4 - \frac{\pi}{2}$	0
5	$-\frac{\pi}{2}$	d_5	$q_5 + \pi$	$-r_5$
6	$-\frac{\pi}{2}$	0	$q_6 + \pi$	0
7	$-\frac{\pi}{2}$	0	q_7	0
8	π	0	0	r_8
9	0	0	$\frac{\pi}{2}$	0
10	α_{10}	0	0	0
11	0	0	$-\frac{\pi}{2}$	0
12	0	0	0	r_{12}

$${}^2\mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} \cos(q_3) & -\sin(q_3) & 0 & -d_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin(q_3) & -\cos(q_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^3\mathbf{T}_4 = \begin{bmatrix} \cos(q_4 - \frac{\pi}{2}) & -\sin(q_4 - \frac{\pi}{2}) & 0 & -d_4 \\ \sin(q_4 - \frac{\pi}{2}) & \cos(q_4 - \frac{\pi}{2}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4\mathbf{T}_5 = \begin{bmatrix} -\cos(q_5) & \sin(q_5) & 0 & d_5 \\ 0 & 0 & 1 & -r_5 \\ \sin(q_5) & \cos(q_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^5\mathbf{T}_6 = \begin{bmatrix} -\cos(q_6) & \sin(q_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \sin(q_6) & \cos(q_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
{}^6\mathbf{T}_7 &= \begin{bmatrix} \cos(q_7) & -\sin(q_7) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin(q_7) & -\cos(q_7) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^7\mathbf{T}_8 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -r_8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^8\mathbf{T}_9 &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^9\mathbf{T}_{10} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_{10}) & -\sin(\alpha_{10}) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_{10}) & \cos(\alpha_{10}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^{10}\mathbf{T}_{11} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^{11}\mathbf{T}_{12} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Le passage du repère atelier R_{ate} au repère R_0 nécessite trois translations le long des axes x , y , z ainsi qu'une rotation autour de l'axe z et une rotation autour de l'axe x . On utilise le produit de matrices de translation et rotation tel que :

$${}^{ate}\mathbf{T}_0 = Trans(x_0, y_0, z_0) Rot(z, \frac{-\pi}{2}) Rot(x, \frac{-\pi}{2}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & x_0 \\ -1 & 0 & 0 & y_0 \\ 0 & -1 & 0 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Le modèle géométrique s'obtient en faisant le produit des matrices de passage précédentes sachant que

$${}^{11}\mathbf{T}_{outil} = {}^{11}\mathbf{T}_{12} \text{ tel que : } {}^{ate}\mathbf{T}_{outil} = {}^{ate}\mathbf{T}_0 \cdot {}^0\mathbf{T}_1 \cdot {}^1\mathbf{T}_2 \cdot {}^2\mathbf{T}_3 \cdot {}^3\mathbf{T}_4 \cdot {}^4\mathbf{T}_5 \cdot {}^5\mathbf{T}_6 \cdot {}^6\mathbf{T}_7 \cdot {}^7\mathbf{T}_8 \cdot {}^8\mathbf{T}_9 \cdot {}^9\mathbf{T}_{10} \cdot {}^{10}\mathbf{T}_{11} \cdot {}^{11}\mathbf{T}_{outil}$$

Ainsi, la matrice ${}^{ate}\mathbf{T}_{outil}$ est de la forme :

$${}^{ate}\mathbf{T}_{outil} = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Cette matrice est composée d'un vecteur position $\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}$ et d'une matrice 3×3 de rotation $\begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x \\ s_y & n_y & a_y \\ s_z & n_z & a_z \end{bmatrix}$.

Le robot est divisé en deux parties : le porteur et le poignet. La position de l'effecteur est définie à partir des articulations q_1 , q_2 , q_3 et q_4 appartenant au porteur du robot (pour rappel, notre système qui est composé d'un porteur sur un rail, possède sept axes). L'orientation de l'effecteur est définie à partir des articulations q_5 , q_6 et q_7 appartenant au poignet du robot.

Modèle géométrique inverse

Le modèle géométrique inverse (MGI) permet de calculer la configuration du robot en fonction des variables opérationnelles de l'organe terminal tel que $\mathbf{q} = f(\mathbf{X})$. Il s'appuie sur le même schéma cinématique que le modèle géométrique direct.

La tâche de dépose des fibres est composée de deux sous-tâches :

- Robot en l'air : Cette sous-tâche permet d'amener le robot dans une position et une orientation désirées de l'espace de travail. Elle est définie par six degrés de liberté.
- Robot au contact du moule via le rouleau de compactage : Cette sous-tâche permet de réaliser le compactage des fibres sur le moule. Le compactage est réalisé grâce à un rouleau déformable qui va exercer un effort selon l'axe z de la tête. Le rouleau s'écrase sous la pression (déformation). Il doit donc être déplacé en position le long de l'axe z afin de réaliser l'effort F_z . Il doit également se déplacer suivant les axes x et y pour se positionner sur la surface. Des rotations autour des axes y et z sont autorisées afin d'assurer la dépose des mèches de carbone. Nous avons donc cinq degrés de mobilité entre le rouleau et la surface. Le rouleau étant directement lié à la tête de dépose industrielle via un vérin pneumatique servant à appliquer l'effort, des contraintes s'ajoutent. L'orientation de la tête est contrainte car le vérin pneumatique doit être normal à la surface pour appliquer l'effort de compactage. La rotation autour de l'axe y est donc contrainte. De plus, il est nécessaire d'ajouter une contrainte d'appui rouleau-moule qui implique la commande de la rotation autour de l'axe x afin que l'effort soit appliqué de façon uniforme sur la surface. Par conséquent, au contact, nous avons trois degrés de liberté en position et trois degrés de liberté en rotation, soit six degrés de liberté pour pouvoir positionner correctement le rouleau de dépose sur la surface.

La tâche de dépose des fibres est donc une tâche à six degrés de liberté alors que le système de dépose est composé de sept degrés de liberté. Or, si le nombre de composantes utilisées pour spécifier la tâche est inférieur au nombre de degrés de liberté du robot, cela signifie que le robot est redondant vis-à-vis de la tâche [Khalil and Dombre E., 1999].

Lorsqu'on veut résoudre le calcul du MGI, trois cas peuvent se présenter :

- Il n'y a pas de solution car la situation désirée n'est pas atteignable.
- Il y a une infinité de solutions car le système est redondant vis-à-vis de la tâche ou il se trouve dans des configurations singulières.
- Il y a un nombre fini de solutions car il est possible de calculer toutes les configurations permettant d'atteindre une situation donnée. Le robot utilisé possède trois articulations rotoïdes d'axes concourants, il y a donc huit solutions en dehors des problèmes de butées.

Pour ne pas avoir une infinité de solutions mais un système résolvable lorsqu'on a un système redondant, une technique consiste à fixer les degrés de libertés redondants à des valeurs données ou insérer des équations ou des relations supplémentaires [Hollerbach, 1984]. Pour cela, nous choisissons de considérer l'articulation prismatique correspondant au déplacement du robot sur le rail constante : $q_1 = \text{constante}$. Il va falloir optimiser la valeur de cette articulation de façon à ce que la position-orientation désirée soit atteignable et que le robot soit dans une bonne configuration. En effet, lorsqu'un robot est soumis à une force extérieure, la rigidité des articulations doit être étudiée pour déterminer la cartographie de la précision du robot dans son volume de travail. Lors de la conception du drapage d'une pièce, les meilleures configurations des articulations du robot devraient être prises en compte [Dumas et al., 2010].

Pour obtenir une solution du modèle géométrique inverse cohérente, la procédure suivante est réalisée. Une fois que la variable articulaire q_1 est fixée, il faut s'assurer que la situation désirée est atteignable dans un premier temps. Si c'est le cas, les variables articulaires peuvent être calculées puis comparées aux plages de mouvements articulaires. Huit combinaisons de variables articulaires sont calculées pour q_2, q_3, q_4, q_5, q_6 et q_7 . La figure 3.11 présente ces huit solutions en montrant que pour la variable q_1 fixée, deux solutions pour l'épaule sont possibles. Ensuite, pour chaque solution de l'épaule, deux solutions sont possibles pour le coude et enfin pour chaque solution du coude, deux solutions pour le poignet sont possibles.

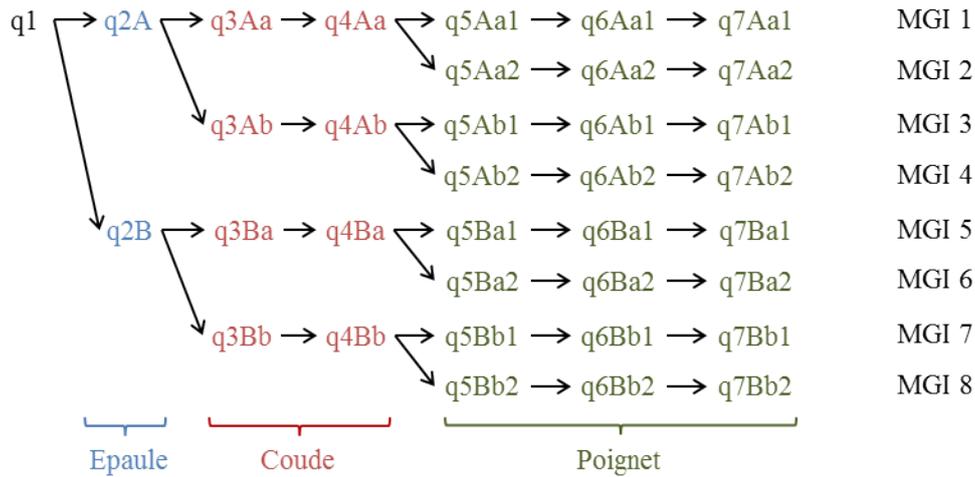


FIGURE 3.11 – Algorithme de solutions du MGI

Pour terminer, il faut choisir la solution du modèle géométrique inverse la plus adéquate. Afin de choisir la meilleure solution, on utilise la configuration lors de la position précédente comme référence. Par exemple, si le robot avait la configuration suivante : [épaule à droite - coude en haut - poignet vers le haut], il faut chercher la même configuration dans l'espace des solutions du MGI pour assurer un déplacement contraint dans l'espace cartésien. Un déplacement en ligne droite entre la configuration MGI1 et MGI5 n'est pas possible car la configuration de l'épaule change (Fig. 3.12).

3.5.3 Modèle dynamique

Le modèle dynamique classique d'un robot manipulateur s'écrit sous la forme de Lagrange [Le Tien et al., 2010] :

$$\Gamma = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \tag{3.1}$$

avec :

Γ est le vecteur des couples/forces des actionneurs.

q est le vecteur des positions articulaires.

$M(q)$ est la matrice d'inertie du robot définie positive.

$C(q, \dot{q})$ est la matrice représentant les couples/forces de Coriolis et des forces centrifuges.

$G(q)$ est le vecteur des couples/forces de gravité.

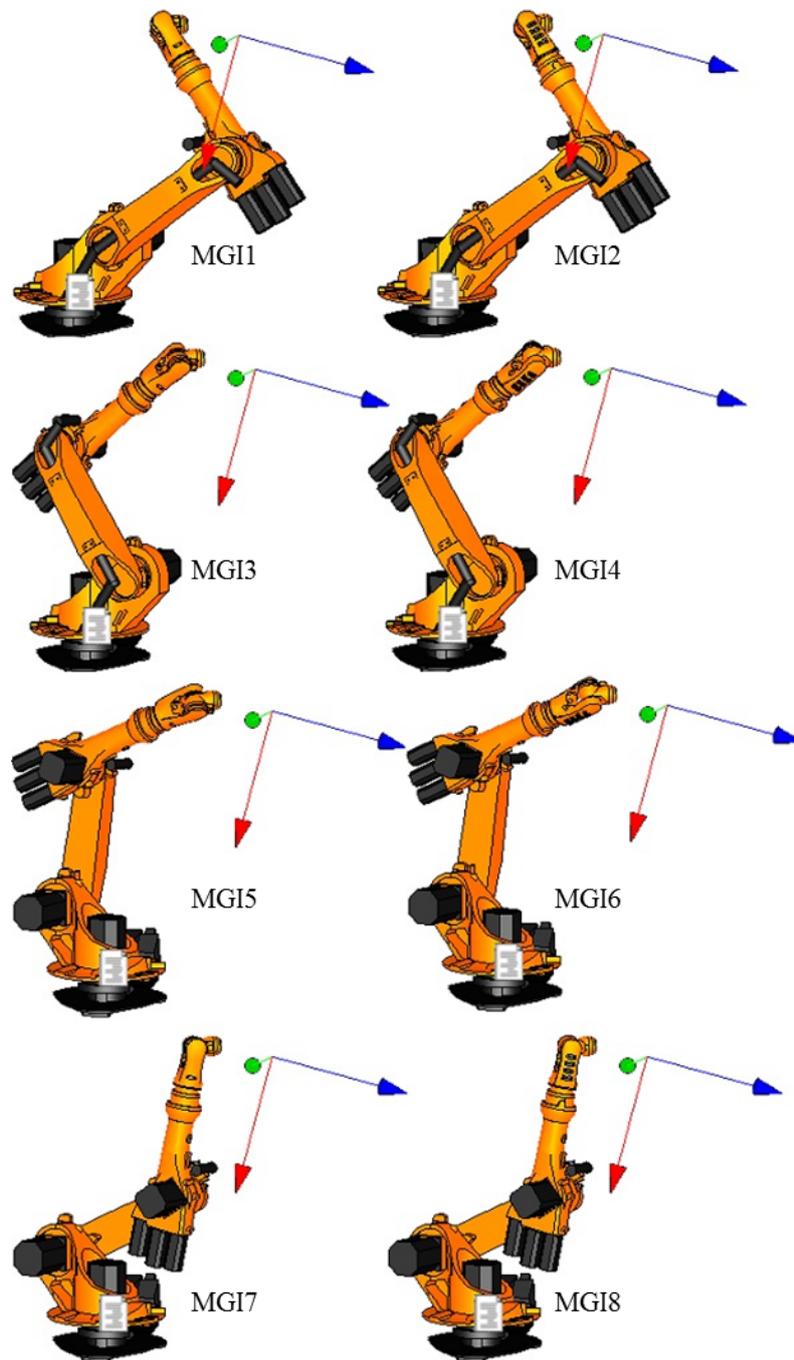


FIGURE 3.12 – Représentation des solutions du MGI

Ce modèle est valide lorsque le robot est considéré sans effort extérieur autre que la gravité. En incluant ce modèle dans le schéma de contrôle, le système mécatronique peut être correctement commandé par un contrôleur PID.

Cependant, le robot de placement de fibres est en contact avec une surface rigide via le rouleau de compactage. Il y a une interaction entre la pièce et le bras manipulateur à cause de l'effort de compactage. De plus, la gaine d'acheminement des mèches perturbe le système. Par conséquent, il faut tenir compte de cette interaction en ajoutant les efforts extérieurs $\mathbf{J}^T \mathbf{F}_{\text{ext}}$ où \mathbf{J} est la matrice jacobienne de l'effecteur exprimée dans le repère de référence R_0 . On obtient donc une nouvelle formulation du modèle classique :

$$\Gamma + \mathbf{J}^T \mathbf{F}_{\text{ext}} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) \quad (3.2)$$

3.6 Conclusion

Pour le moment, l'approche en effort n'est pas gérée par les robots industriels en natif. Le contrôle en effort est donc une application industrielle nécessitant une intégration spécifique et qui impose des contraintes. Pour prendre en compte cet effort, il faut pouvoir utiliser (calculer en temps réel) le modèle dynamique du système. Pour cela, il faudrait avoir accès au contrôleur du robot. Par conséquent, pour prendre en compte les efforts extérieurs, nous proposons de mettre en place une commande référencée capteur. De la même manière, nous proposons de mettre en place une commande référencée capteur pour prendre en compte le positionnement de la nouvelle bande par rapport à la bande précédente en tenant compte du retour visuel.

Commande référencée capteurs

4.1 Introduction

Dans cette partie, les différentes structures de commande seront décrites et le choix de la solution est détaillé. Ensuite, l'approche mono-capteur est présentée pour permettre l'asservissement en force et l'asservissement en vision indépendamment. Puis, l'approche mixte est proposée pour permettre la combinaison des deux asservissements précédents. Enfin, la loi de commande permettant l'asservissement est exposée.

4.2 Structures de commande

4.2.1 Généralités

Une tâche robotisée simple est commandée dans l'espace des configurations. Lorsqu'on veut faire de la commande référencée capteurs, on ne travaille pas dans l'espace des configurations mais dans l'espace du capteur utilisé. Il s'agit de voir quelle est la relation du robot avec son environnement. Par conséquent, la commande du robot est définie en boucle fermée à partir des informations données par les capteurs et non par la configuration du robot. Ainsi, l'accomplissement de la tâche peut se faire de manière plus précise à condition que le capteur soit plus rapide que le système d'asservissement. La précision dynamique du système est d'autant meilleure que la bande passante sera élevée.

On désire connaître la situation du robot par rapport à son environnement. Pour cela, les capteurs extéroceptifs sont utilisés. Il peut s'agir de caméras, proximateurs à ultrasons ou laser, capteur d'efforts, GPS, etc. Ceux sont des capteurs qui ne donnent pas d'information sur l'état interne du robot (appelés capteurs proprioceptifs) mais sur son interaction avec l'environnement extérieur.

4.2.2 Types de commande

Lorsqu'un robot est commandé en position de manière classique, la trajectoire est définie uniquement sur le torseur cinématique. Les instructions de déplacement sont envoyées au contrôleur du robot, représenté en rouge Fig. 4.1. Ce dernier calcule et envoie les commandes aux variateurs afin que le robot fasse les mouvements désirés. Selon les constructeurs de robot, les commandes sont définies en couple ou en vitesse.

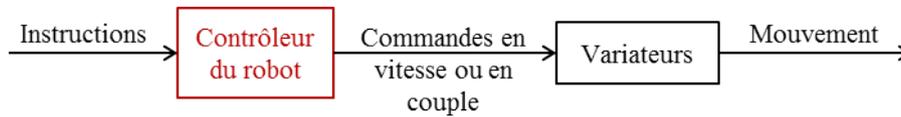


FIGURE 4.1 – Commande classique

La commande d'un robot en interaction avec l'environnement a beaucoup évolué depuis ces dernières années [Whitney, 1985]. Elle peut être réalisée suivant différentes architectures [Degoulange et al., 1993] que l'on peut classer en deux approches : la commande sans consigne d'effort et la commande avec consigne d'effort.

Dans le cas de la commande sans consigne d'effort, le robot est contrôlé uniquement en position. Le mouvement de référence peut être modifié avec la mesure d'effort éventuel. Il existe différentes commandes telles que la compliance passive, la commande par raideur active et la commande en impédance.

La compliance passive permet de diminuer les efforts de contact en utilisant un dispositif qui se déforme, placé entre l'effecteur et le robot [Drake, 1978].

Avec la commande par raideur active, le comportement du robot est modélisé par un ressort à raideur programmable. Il s'agit de modifier la valeur du gain de la raideur en fonction des directions commandées en position et en effort [Salisbury, 1980].

Avec la commande en impédance, il est possible de faire la relation entre l'effort exercé par le robot et la position de l'effecteur [Hogan, 1987]. L'effort désiré ne peut pas être traité explicitement. C'est la relation entre l'effort exercé et la position de l'effecteur qui est commandée.

Dans notre cas, que ce soit pour la commande en effort ou pour la commande en vision, la consigne concernant l'effort désiré ou l'intervalle de bande spécifié a un rôle important. La tâche de dépose s'appuie sur le torseur cinématique pour certaines composantes, sur le torseur des efforts et sur les informations visuelles pour d'autres. De ce fait, la commande est dite hybride [Raibert and Craig, 1981] car elle mélange des informations de natures différentes. Il existe deux types de commandes hybrides avec consigne : la commande interne et la commande externe.

Dans la commande hybride, les informations des capteurs extéroceptifs et la position - orientation de l'effecteur sont combinées afin de satisfaire au mieux à la trajectoire désirée [Raibert and Craig, 1981]. Une matrice de sélection permet de choisir les directions qui sont commandées en position - orientation et les directions qui sont commandées via les capteurs extéroceptifs. Les lois de commandes sont parallèles. Les sorties sont sommées et envoyées directement au robot. Les axes du robot sont commandés grâce aux mesures des capteurs extéroceptifs et aux mesures des positions des axes du robot.

Dans le cas de la commande hybride interne, celle-ci nécessite de se substituer au contrôleur de bas niveau puisqu'il est remplacé par le correcteur de la commande hybride, représenté en rouge Fig. 4.2. L'environnement doit être parfaitement connu pour maîtriser chaque direction à contrôler.

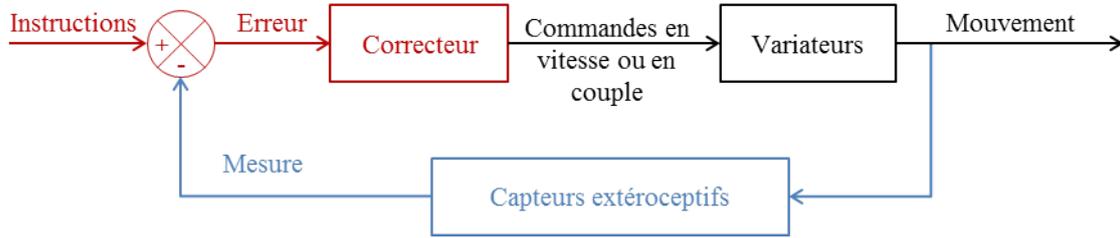


FIGURE 4.2 – Commande hybride interne

Dans le cas de la commande hybride externe, la partie correcteur + générateur de trajectoire représentée en violet Fig. 4.3 est ajoutée en aval du contrôleur du robot. L'erreur calculée à partir des mesures du capteur extéroceptif est traduite en variation de position grâce à une loi de commande [Ouahad et al., 2003]. Cette variation de position devient un paramètre d'entrée de la boucle de commande en position. Les axes du robot sont commandés grâce au contrôleur interne de position fourni par le fabricant du robot (en vitesse ou en couple suivant les modèles). Le générateur de trajectoire génère les coordonnées opérationnelles qui sont ensuite converties en consignes de vitesse ou couple par le contrôleur. Ce type de commande permet de travailler avec une boucle de plus haut niveau que la boucle de commande en position du contrôleur (Fig. 4.3). La boucle d'asservissement de bas niveau a une bande passante plus élevée que celle de l'asservissement de haut niveau. La bande passante du capteur a non seulement de l'influence sur la réponse du capteur mais aussi sur la stabilité du système [Katsura et al., 2006]. D'autre part, ce type de commande est déjà implémenté dans des applications industrielles telles que le meulage ou l'ébavurage [Robertsson et al., 2006], dans le cadre de la robotique sous-marine [Lapierre, 1999] mais aussi dans le cadre de la gestion de distance entre deux véhicules [Molina, 2005].

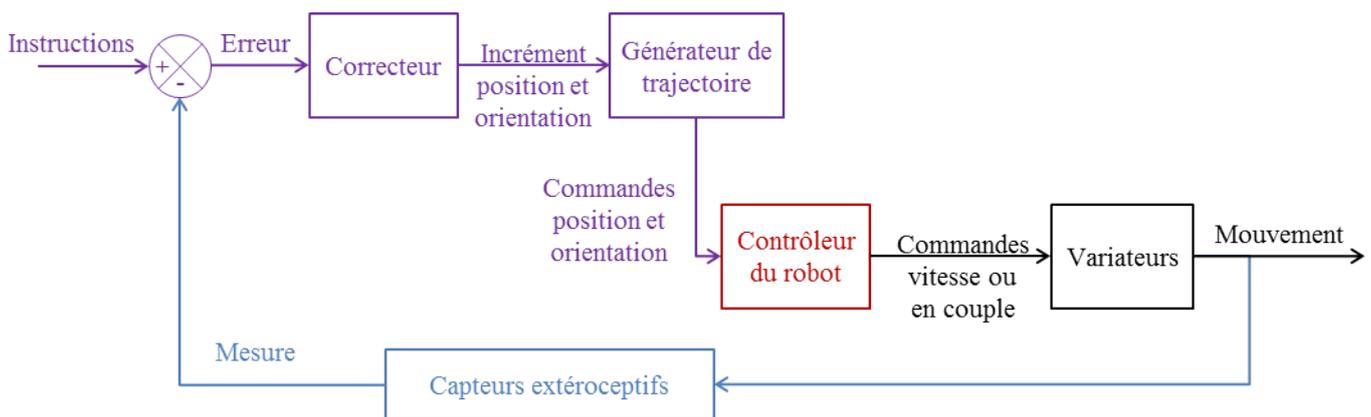


FIGURE 4.3 – Commande hybride externe

4.2.3 Rappels sur la tâche de dépôt des fibres

Nous rappelons que la tâche de dépôt des fibres a été redéfinie de telle sorte que des directions soient contrôlées en position, d'autres en force et enfin en vision. La tâche de dépôt nécessite un effort de com-

compactage $\mathbf{F}_{\text{compactage}}$ maîtrisé selon la direction z du repère de la tâche et réparti de manière homogène sur les fibres, soit un contact rouleau-surface le plus uniforme possible. La direction le long de l'axe z est donc commandée en effort $\mathbf{F}_z = \mathbf{F}_{\text{compactage}}$ et la rotation autour de l'axe x est commandée en moment $\mathbf{T}_x = 0$ N/m. Elle nécessite également un positionnement des bandes correct le long de l'axe y appelé \mathbf{I}_y . La direction le long de l'axe y est donc commandée en vision. Le reste des directions est commandé en position et orientation.

4.2.4 Choix de la structure de commande

L'asservissement en position consiste à respecter les instructions de position créées à partir de la génération de trajectoire via les logiciels CADfiber ou CATfiber. Les mouvements peuvent être des mouvements articulaires ou des mouvements linéaires en fonction des étapes du procédé et de l'application. Dans notre cas, nous travaillons avec le contrôleur industriel KUKA KR C2. Ce contrôleur est considéré comme une boîte noire parce que nous ne connaissons pas ses caractéristiques exactes. Le modèle implémenté n'est pas explicite et il existe différentes approches pour contrôler un robot telles qu'une commande locale axe par axe, une commande par découplage non linéaire, une commande passive et une commande adaptative [Khalil and Dombre E., 1999]. Malgré leur comportement dynamique non-linéaire, la plupart des robots industriels sont asservis axe par axe avec un correcteur PID qui offre un compromis entre simplicité de mise en œuvre et performances acceptables. C'est le cas pour le robot de dépose de fibres qui est à notre disposition. Sa commande interne est inaccessible et donc non modifiable.

Nous avons vu que la commande hybride interne permet de se substituer au contrôleur de bas niveau alors que la commande hybride externe permet de travailler à un niveau plus haut. Dans notre cas, l'ajout de capteurs conduit donc à l'ajout d'une boucle externe pour contrôler le robot sans modifier le contrôleur industriel interne. Nous devons utiliser une sur-couche à la boucle de contrôle en position pour prendre en compte les données des capteurs. Celle-ci permet de maîtriser les déplacements, les efforts et/ou la vision. Il nous semble donc pertinent d'envisager dans un premier temps de travailler avec la commande hybride externe.

La commande hybride externe permet de découpler les degrés de liberté [Gangloff and Poignet, 2007] grâce à la matrice de sélection. Certains degrés de liberté seront commandés via des capteurs extéroceptifs (capteur d'efforts, capteur de vision, proximètre, etc.) et les autres degrés de liberté seront commandés en position. Elle est composée de deux boucles (Fig. 4.4). La boucle externe qui est hiérarchiquement supérieure [De Schutter and Van Brussel, 1988], fait un asservissement sur l'interaction avec l'environnement extérieur grâce au capteur extéroceptif. La boucle de position permet un asservissement en position. La sortie de la boucle externe est transformée en consigne de position pour la boucle en position du contrôleur. Par conséquent, le déplacement de l'outil permet d'obtenir l'interaction désirée avec l'environnement.

Au vu de la hiérarchie, la consigne d'interaction est toujours respectée en priorité par rapport à la consigne de position. L'état du robot peut être modifié uniquement par l'interaction en aval du capteur. En effet, les asservissements articulaires s'opposent aux perturbations en amont du capteur. Cette commande convient

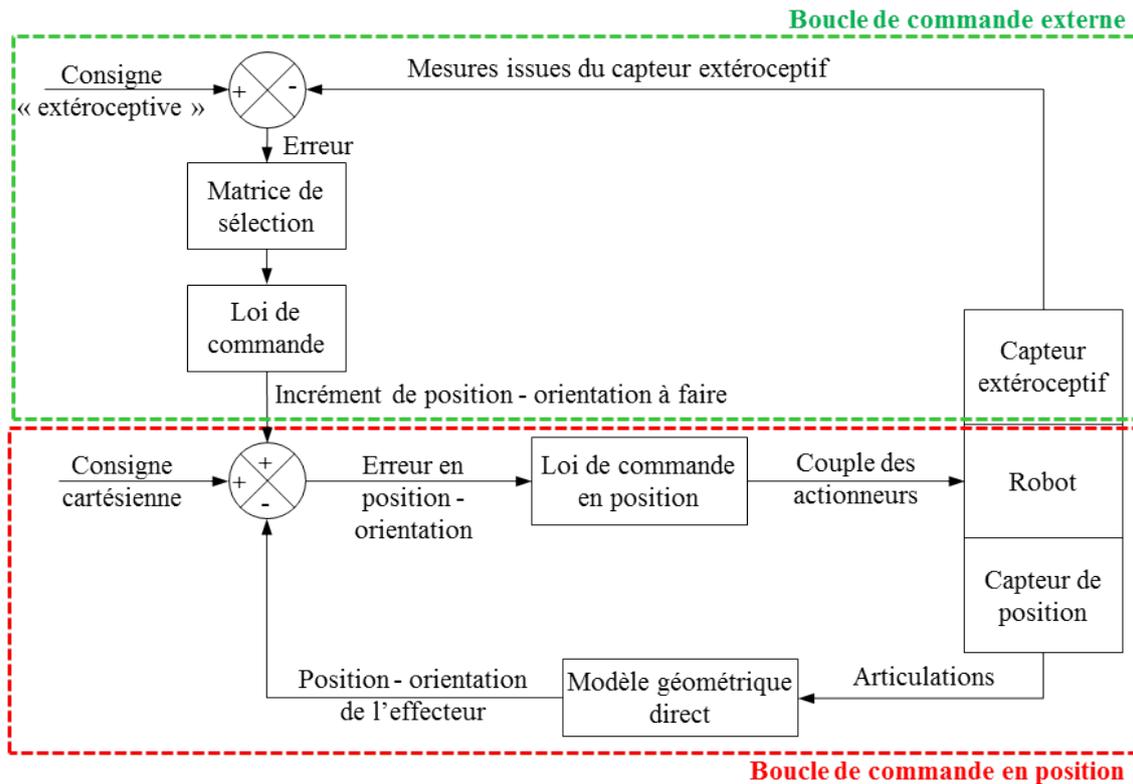


FIGURE 4.4 – Principe de la commande hybride externe

lorsque l'environnement n'est pas connu avec précision (dans notre cas : pièce de grandes dimensions, écarts entre CAO et pièce, etc.). S'il n'y a aucune consigne au niveau de la boucle de commande externe, la matrice de sélection ne sélectionne pas de commande référencée capteurs. Par conséquent, la position commandée est directement la position désirée définie par la consigne de la boucle de commande en position. Autrement dit, la position du robot est maintenue. La performance du système global dépend de la fréquence d'interaction entre la boucle externe et interne du système.

A minima, la commande hybride externe est implémentée avec un capteur d'effort au vu de la définition de la tâche décrite en section 3.4. Cependant, une boucle externe mixte vision/force est proposée pour pouvoir corriger le placement des fibres en position dans une direction différente de celle du compactage. Ce type de commande mixte a déjà été utilisé. Afin d'attraper et manipuler des objets, Prats [Prats et al., 2007] a implémenté une boucle de contrôle externe en effort et en vision. Le contrôle en effort permet uniquement de modifier la trajectoire de référence. La rigidité est contrôlée par une loi proportionnelle de type $dX = K^{-1}(f^d - f)$ avec dX le déplacement à effectuer pour corriger la trajectoire, K la raideur d'interaction robot-environnement, f^d l'effort désiré placé en entrée de la boucle de contrôle et f l'effort mesuré. La loi de commande en effort combinée avec la vision permet dans cet exemple, d'atteindre la poignée de la porte correctement centrée par rapport à la pince du robot qui va l'ouvrir. Pour une bonne réalisation de la tâche, l'effort doit donc rester constant.

4.3 Approche mono-capteur

4.3.1 Asservissement en force

Pour la mesure des efforts, le capteur d'effort est généralement fixé sur le poignet du robot entre l'effecteur et le bras manipulateur (des expérimentations ont été réalisées avec un capteur entre le sol et la base du robot). Le retour d'effort est déjà utilisé et testé dans le cadre d'applications chirurgicales [Zemiti, 2005, Dombre et al., 2003]. De cette façon, la trajectoire de l'outil peut être corrigée selon l'effort mesuré afin de respecter les contraintes d'interaction entre l'outil chirurgical et le patient.

Dans le cas du placement de fibres robotisé, il est important de contrôler l'effort de compactage F_z le long de l'axe z ainsi que sa répartition sur la surface correspondant au moment autour de l'axe x appelé M_x sur le matériau. Les efforts et les moments sur les autres directions sont uniquement observés afin de visualiser l'influence des corrections sur la dynamique du système (augmentation ou diminution des efforts non contrôlés). Par conséquent, le capteur d'effort doit pouvoir mesurer les six composantes *i.e.* les forces le long des axes x , y et z et les moments autour des axes x , y et z . La consigne d'effort est importante dans cette application puisqu'elle garantit la qualité de la pièce fabriquée et de plus elle dépend du matériau utilisé (thermodurcissable, thermoplastique, fibre sèche).

Il existe un formalisme appelé *Task Frame Formalism* permettant de travailler dans le repère de la tâche lorsqu'il y a un contact entre l'effecteur et la pièce [Bruyninckx and De Schutter, 1996]. Dans ce cas, chaque direction du repère orthogonal lié à l'outil est spécifiée séparément [Baeten and De Schutter, 1999]. Le repère de la tâche est défini par la génération de trajectoire en programmation hors-ligne. Par conséquent, il y a une constante redéfinition entre le repère de l'effecteur et le repère de la tâche durant l'exécution de la trajectoire (Fig. 4.5).

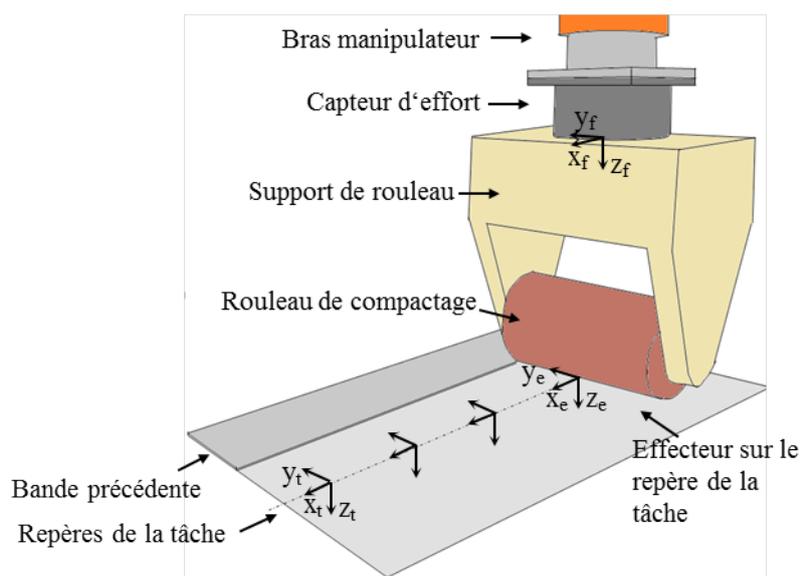


FIGURE 4.5 – Définition du repère de la tâche

La dualité de commande position - force peut être gérée dans l'espace Cartésien. Ainsi, la trajectoire théorique peut être suivie tout en appliquant un effort de compactage F_z et un moment T_x contrôlés. Les mouvements sont calculés dans le repère de la tâche. Il est important de contrôler le moment T_x car il y a un contact linéaire entre le rouleau de compactage et la surface du moule. Un moment peut apparaître autour de l'axe x si l'orientation n'est pas correcte. Ceci peut entraîner une mauvaise distribution de l'effort de compactage sur la surface. Par conséquent, les efforts et les moments mesurés au niveau du capteur d'efforts doivent être transportés au centre du contact linéaire (Fig. 4.6) pour avoir les efforts et les moments réels en utilisant la formule du transport des moments.

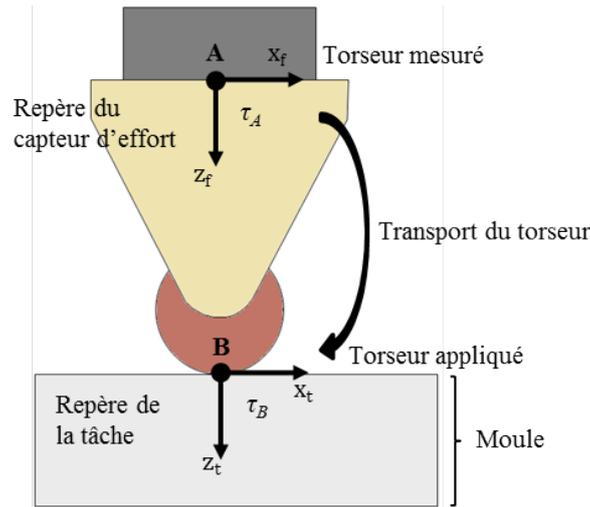


FIGURE 4.6 – Transport des efforts dans le repère de la tâche

Tout d'abord, les torseurs au point A et au point B sont écrits :

$$\tau_A = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_A \\ \mathbf{M}_A \end{bmatrix}_A = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_A \\ \mathbf{M}_A + \mathbf{BA} \times \mathbf{F}_A \end{bmatrix}_B \quad \tau_B = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_B \\ \mathbf{M}_B \end{bmatrix}_B \quad (4.1)$$

Si le Principe Fondamental de la Statique est appliqué, on obtient :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_A \\ \mathbf{M}_A + \mathbf{BA} \times \mathbf{F}_A \end{bmatrix}_B + \begin{bmatrix} \mathbf{F}_B \\ \mathbf{M}_B \end{bmatrix}_B = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}_B \quad (4.2)$$

Par conséquent, le torseur peut être écrit de la manière suivante :

$$\tau_B = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_B \\ \mathbf{M}_B \end{bmatrix}_B = - \begin{bmatrix} \mathbf{F}_A \\ \mathbf{M}_A + \mathbf{BA} \times \mathbf{F}_A \end{bmatrix}_B \quad (4.3)$$

La boucle externe calcule deux incréments en millimètres et degrés que l'outil de dépôt devra atteindre qui correspondent à l'erreur en force et moment calculée à partir des mesures en utilisant (4.3). Ainsi, l'incrément suivant la direction z et l'incrément autour de l'axe x sont calculés selon les erreurs de force et moment via la loi de commande en force. La loi de commande en force est décrite en section 4.5.

Pendant le process, il y a différentes étapes pour la dépôt d'une bande de mèches, (Fig. 4.7). Tout d'abord,

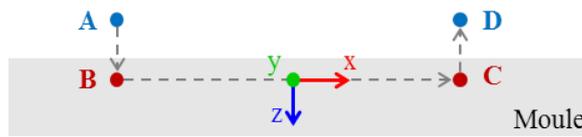


FIGURE 4.7 – Etapes du procédé de dépose

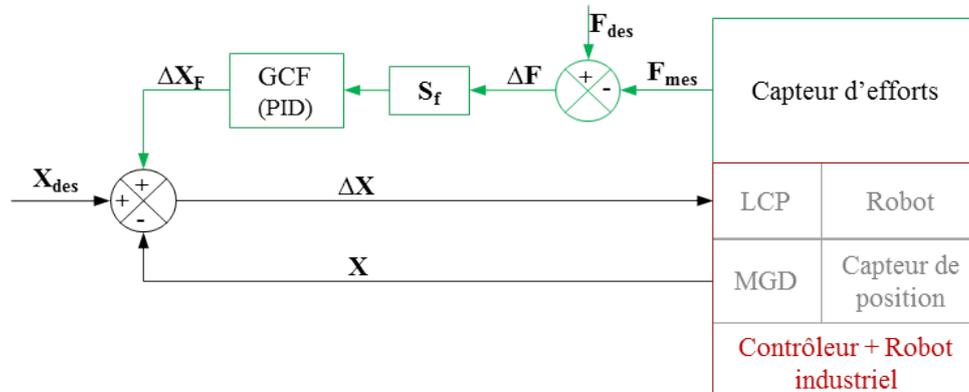


FIGURE 4.8 – Schéma pour l’asservissement en force

l’outil de dépose descend sur le moule à une petite distance de celui-ci, cette position est appelée position d’approche (point A). Une commande en position est utilisée car le rouleau de compactage n’est pas encore en contact avec la surface à draper (pas de commande en effort). Ensuite, l’outil descend au contact avec le moule (point B), donc l’effort de compactage et sa répartition sur la surface doivent être commandés. Puis, l’effecteur roule et applique les mèches sur le moule avec un effort de compactage qui doit être constant (point B au point C). Finalement, l’outil se dégage et la commande en position est suffisante (point D). Pour choisir quand et quelles directions sont commandées en force ou en position, la matrice diagonale de sélection S_f est utilisée. S’il n’y a pas d’effort désiré, la matrice de sélection S_f ne sélectionne pas la commande en effort le long de l’axe z et le système est commandé par défaut uniquement en position.

La figure 4.8 montre le mécanisme de la commande hybride externe position-force. Ici, la boucle de commande en effort est hiérarchiquement supérieure à la boucle de commande en position. Tout d’abord, le torseur désiré F_{des} est comparé au torseur mesuré F_{mes} . La matrice de sélection S_f permet de sélectionner les directions qui sont commandées en force. L’erreur en force ΔF doit être convertie en erreur de position ΔX_F grâce à la Génération de Consigne à partir de l’erreur en Force (GCF). Cette erreur s’ajoute à la position-orientation désirée de l’outil X_{des} . La nouvelle erreur de position ΔX est envoyée au contrôleur du robot qui est vu comme une boîte noire et qui contient sa propre Loi de Commande en Position (LCP). Le contrôleur du robot renvoie les coordonnées opérationnelles X de la position courante du robot.

4.3.2 Asservissement en vision

Définition

La commande référencée vision [Corke, 1996, Khalil, 2002], consiste à utiliser des informations visuelles provenant d’un système de vision pour pouvoir contrôler les mouvements d’un système robotique. Le sys-

tème de vision est composé d'une ou plusieurs caméras. Il peut être fixe ou embarqué sur le système robotique. Les mouvements commandés permettent de remplir des tâches élémentaires telles que le suivi de trajectoires, la saisie ou l'insertion d'objet suivant l'application. L'asservissement permet de compenser les erreurs de positionnement via une boucle de commande fermée sur les données extraites de l'image. Il s'agit d'asservir un bras manipulateur ou un robot mobile à une position fixe ou variable en utilisant les informations visuelles. En résumé, il y a donc trois sous-systèmes qui composent l'asservissement visuel dont le capteur visuel, un dispositif d'acquisition et de traitement d'images afin de générer la commande et un sous-système mécanique actionné représenté par un robot chargé de l'exécution de la commande (Fig. 4.9).

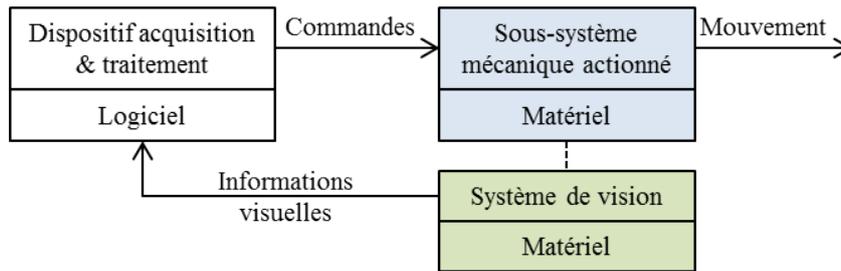


FIGURE 4.9 – Principe de la commande référencée vision

Système de vision

Le système de vision peut être composé d'une ou plusieurs caméras. Elles peuvent être positionnées suivant différentes configurations (Fig. 4.10) [Morel and J. Gangloff, 2005, Flandin et al., 2000].

Il est possible d'embarquer la caméra sur le système robotique, appelée configuration *eye in hand*, via un montage sur l'effecteur [Smith et al., 1997]. Le point de vue est partiel mais précis. Ici, il y a une relation de type transformation rigide entre la position de la caméra et celle du robot.

La caméra peut aussi être déportée dans l'espace de travail afin de visualiser un ensemble d'éléments, appelée configuration *eye to hand*. Le point de vue est moins précis mais global. Il n'y a pas de liaison mécanique avec le système robotique (donc de transformation rigide constante) [Kulpate et al., 2005]. Par conséquent, l'image acquise n'est pas liée aux mouvements du manipulateur. Afin de définir la position de chaque élément, il existe une relation entre la base du système robotisé et celle du système de vision et une autre relation entre le système robotisé et l'objet cible.

Il est possible de combiner les points de vue de deux caméras embarquées sur le robot. Il s'agit d'utiliser le principe de la stéréovision afin de reconstruire la profondeur de l'image à partir de deux images de la même scène [Dufournaud et al., 1998].

Type de mesure

La mesure peut se faire selon trois approches différentes : l'asservissement visuel 2D, l'asservissement visuel 3D et les approches hybrides (l'asservissement visuel 2D 1/2 et l'asservissement visuel d2D/dt).

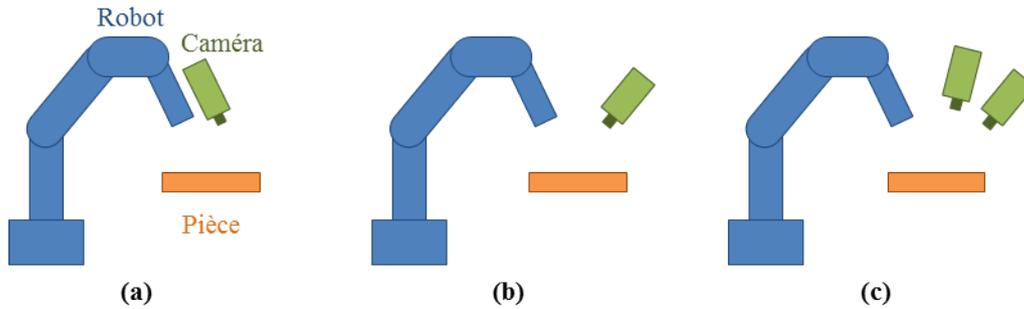


FIGURE 4.10 – Position du système de vision (a) Caméra embarquée (b) Caméra déportée (c) Stéréovision

L'*asservissement visuel 2D* se base sur l'erreur mesurée dans le plan de l'image ; il est aussi appelé "*Image Based Visual Servoing*". Le motif désiré, autrement dit la consigne, est comparé au motif extrait de l'image. Ces motifs s'appuient sur des primitives géométriques comme des points [Feddema and Mitchell, 1989], des droites, des cercles, des ellipses [Chaumette, 1990] ou moment de l'image [Chaumette, 2004]. Cette comparaison donne lieu à une erreur qui doit être annulée via la commande du robot. Ce type de mesure ne nécessite pas de reconstruction 3D. La conséquence est d'obtenir une loi de commande relativement rapide à calculer. Une connaissance limitée de la géométrie de la scène est suffisante. Un des champs d'application qui utilise ce type de mesure est la robotique chirurgicale [Krupa et al., 2003, Vitrani et al., 2006].

L'*asservissement visuel 3D* se base sur l'erreur mesurée dans l'espace cartésien ; il est aussi appelé "*Position Based Visual Servoing*". La situation désirée de la caméra par rapport à l'objet traité, autrement dit la consigne, est comparée à la situation en cours de la caméra définie par des informations tridimensionnelles extraites de l'image acquise. Afin d'atteindre la situation de référence désirée, il faut pouvoir estimer la situation de la caméra. Pour cela, une connaissance du modèle de l'objet et des paramètres intrinsèques de la caméra est nécessaire. L'estimation se fait également à partir d'informations visuelles comme des points [Horaud et al., 1989, Haralick et al., 1989], des droites [Dhome et al., 1989].

Les approches hybrides sont des approches plus récentes que les précédentes.

L'*asservissement visuel 2D 1/2* exploite des informations 2D dans l'image qui permettent de faire un asservissement de la position et des informations 3D dans le repère de la caméra pour effectuer un asservissement de l'orientation. Il s'agit d'une approche intermédiaire entre l'asservissement 2D et 3D afin de séparer la translation et la rotation de la caméra. Ceci entraîne un découplage de la loi de commande en deux boucles d'asservissement, l'une pour la translation et l'autre pour la rotation [Malis and Chaumette, 2000]. Cet asservissement se base sur le principe de l'homographie entre l'image courante et l'image désirée afin de calculer l'orientation et la translation que doit effectuer la caméra pour atteindre la situation désirée. Ici, il n'est pas nécessaire de connaître le modèle géométrique 3D de l'objet. L'*asservissement visuel $d2D/dt$* permet d'asservir la vitesse relative entre la caméra et la cible. Cette grandeur est définie dans le plan image par un champ de vitesse des points. Le mouvement 2D mesuré atteint le champ de vitesse désiré en contrôlant les mouvements de la caméra.

Application au système

La couleur de la fibre de carbone étant le noir, il est intéressant d'utiliser une caméra rapide combinée avec un laser [Pages et al., 2006]. La lumière structurée permet de capturer les informations de la forme 3D sur la pièce en analysant l'intersection entre la répartition de la lumière et de la pièce [Xu et al., 2010]. Les erreurs de positionnement sont corrigées à travers la boucle de commande fermée sur les données extraites de l'image. Il peut s'agir d'un asservissement visuel direct appelé aussi asservissement bas niveau car le système de vision se substitue au contrôleur de bas niveau, ou d'un asservissement visuel indirect car l'asservissement se fait dans une boucle de haut niveau. [Ouadah et al., 2003].

La position latérale de l'outil de placement de fibres est importante car l'espacement entre deux bandes doit être géré et le recouvrement doit être évité. La position latérale correspond à la direction y commandée en vision. Ce type de commande fait référence au traitement et à l'analyse d'image, donc la variable qui correspond au positionnement latéral le long de l'axe y est appelée I_y . Dans le système industriel, la position de chaque bande est définie séparément avant le drapage lors de la programmation hors-ligne. Sans correction durant le drapage, une différence peut apparaître entre la trajectoire théorique et la trajectoire réalisée. Par conséquent, cette différence peut entraîner des erreurs de positionnement des bandes. Dans cette idée, un schéma de commande en vision est mis en place le long de l'axe y afin de respecter l'intervalle spécifié de bandes. L'objectif est de contrôler la dépose de la nouvelle bande par rapport au bord de la bande précédemment déposée afin de corriger la trajectoire en-ligne.

Pour cela, une caméra rapide couplée à un laser est utilisée. La ligne laser est projetée sur la surface de la pièce et elle est perpendiculaire à l'orientation du pli en cours de dépose. Le bord de la bande précédente crée une déformation de la ligne laser qui est observée par la caméra (Fig. 4.11). La variation d'épaisseur est détectée et sa localisation est mesurée en pixel dans l'image capturée à partir de la caméra après traitement. La localisation désirée du bord de bande précédent (pour obtenir l'espacement désiré entre bandes) est définie en coordonnées de pixel dans le repère de l'image. Pour cela, le système de vision active a besoin d'être calibré. Ensuite, la localisation du bord de la bande précédente est comparée avec la cible pour calculer l'erreur en pixel. La caméra est positionnée et orientée telle que la ligne "laser" sur l'image soit le long de l'axe y de l'outil (Fig. 4.12). Ainsi, l'outil se déplace le long de l'axe y pour corriger l'erreur de positionnement.

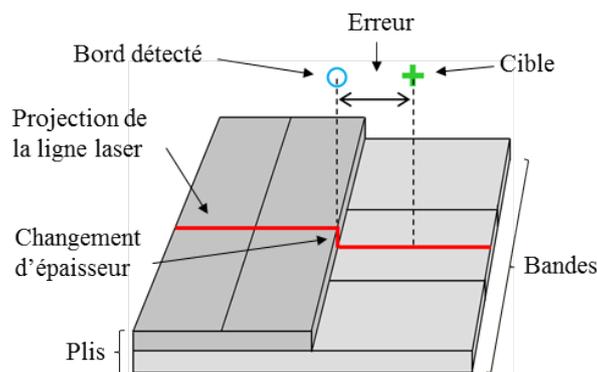


FIGURE 4.11 – Détection du bord de bande

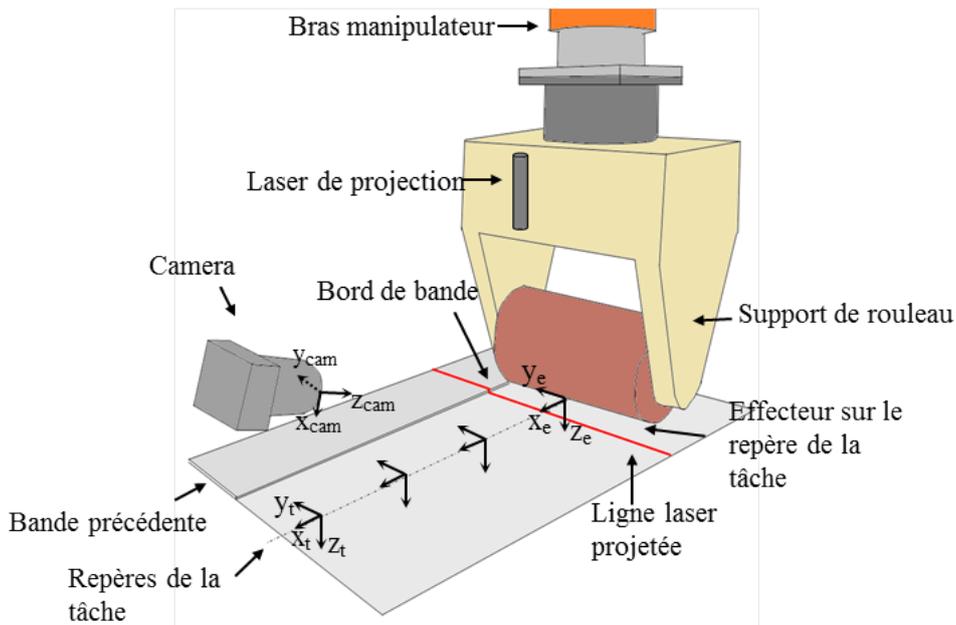


FIGURE 4.12 – Positionnement du laser et de la caméra sur l’outil

Pour commander le déplacement de l’outil en utilisant l’asservissement visuel le long de l’axe y , une boucle externe est ajoutée au système initial de la même manière que pour l’asservissement en force. De cette façon, la trajectoire théorique peut être suivie tout en faisant une correction le long de l’axe y pour respecter l’intervalle de bandes spécifié.

L’erreur d’alignement entre la cible fixée et le bord de bande détecté est mesurée en pixel sur l’image capturée à partir de la caméra le long de l’axe y de la caméra. La génération de consigne à partir de l’erreur en vision permet de calculer le déplacement en millimètres que l’outil doit réaliser dans le but de corriger l’erreur d’alignement. Cette loi de commande est décrite en section 4.5.

Pour mettre en œuvre l’asservissement visuel dans notre cas expérimental, plusieurs étapes sont nécessaires. Tout d’abord, l’outil descend à une position d’approche au dessus du moule en utilisant la loi de commande en position interne du robot. Ensuite, la génération de consigne à partir de l’erreur en vision permet de corriger la localisation de l’outil le long de l’axe y en utilisant la matrice de sélection S_v . Enfin, l’outil peut se déplacer le long de l’axe x tout en maintenant l’intervalle de bande corrigé grâce à la loi de commande en vision. Dans un premier temps, le déplacement le long de l’axe x est réalisé sans contact pour ne pas perturber la commande en vision.

La figure 4.13 présente le mécanisme de la commande hybride externe position-vision. Tout d’abord, la localisation désirée du bord de bande dans l’image I_{des} est comparée à la localisation mesurée dans l’image I_{mes} . L’erreur en pixel ΔI doit être convertie en erreur de position ΔX_V via la génération de consigne à partir de l’erreur en vision (GCV). Cette erreur s’ajoute à la position-orientation désirée de l’outil X_{des} . La nouvelle erreur de position ΔX est envoyée au contrôleur du robot qui est vu comme une boîte noire. Le contrôleur du robot renvoie les coordonnées opérationnelles X de la position courante du robot.

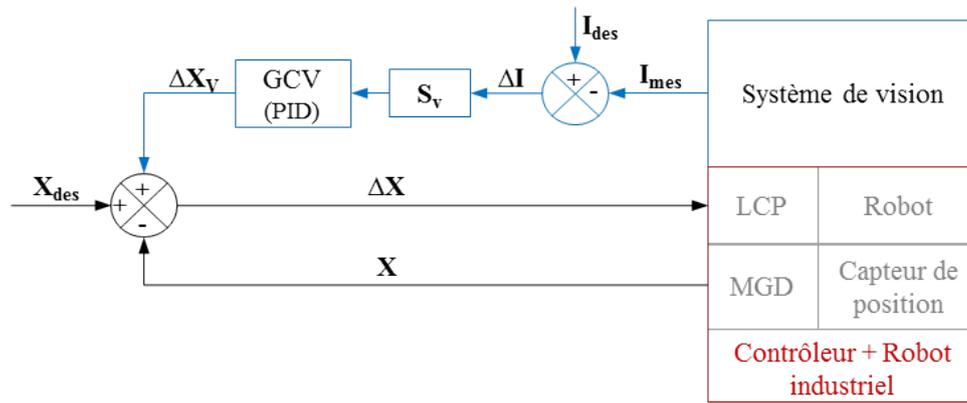


FIGURE 4.13 – Schéma pour l'asservissement en vision

4.4 Approche mixte

Dans les sections 4.3.1 et 4.3.2, l'asservissement en force et l'asservissement visuel sont présentés et implémentés séparément. Il s'agit de faire des essais avec des capteurs de natures différentes mesurant des grandeurs indépendantes. Dans le premier cas, nous étudions les bénéfices pour notre tâche du contrôle de l'effort de compactage le long de l'axe z et du moment autour de l'axe x grâce au schéma de commande en effort. Dans le second cas, nous étudions les bénéfices du contrôle de la position latérale le long de l'axe y grâce au schéma de commande en vision.

Ici, l'objectif est de fusionner les précédentes approches mono-capteurs pour avoir un système complet. Par conséquent, une commande multi-capteurs est implémentée en utilisant un capteur d'effort pour gérer l'effort de compactage le long de l'axe z et le moment autour de l'axe x , et un capteur de vision pour gérer la positionnement de la bande le long de l'axe y . Les autres directions sont commandées en position. Dans la littérature, il y a deux approches multi-capteurs : la *fusion* et l'*intégration*, utilisées pour augmenter la précision car les informations redondantes et complémentaires permettent de réduire des incertitudes [Luo, 2002]. L'intégration de capteurs fait référence à la combinaison des commandes après le retour des données des capteurs alors que la fusion fait référence à la combinaison des données des capteurs [Prats et al., 2010]. La fusion de capteurs permet de donner des informations de natures différentes pour une même direction. Le filtre de Kalman étendu (FKE) est très souvent utilisé pour estimer les paramètres et l'état du système [Smits et al., 2006, Lipiello et al., 2007, Hebert et al., 2011]. Contrairement à la fusion, avec la combinaison des capteurs, un seul type d'information est mesuré par direction. Le contrôleur hybride est implémenté grâce à des matrices diagonales de sélection qui doivent être orthogonales entre elles [Prats et al., 2010]. Ceci permet d'assigner des degrés de liberté de la tâche (ou de l'organe terminal) pour chaque capteur.

Dans notre cas, nous travaillons avec une intégration de capteurs car pour chaque direction commandée, un type d'information est donné. Un capteur peut donner des informations sur plusieurs directions. Deux capteurs de natures différentes peuvent donner des informations sur la même direction. En revanche, en fonction du type de commande désiré pour chaque direction, il faut choisir les données d'entrée qui sont adéquates. Par conséquent, les matrices de sélection sont utilisées pour choisir les directions qui doivent

être commandées en force ou en vision. Dans ces matrices, il est noté 1 lorsque la direction est sélectionnée pour être commandée par la force ou la vision selon la matrice et 0 lorsque la direction est commandée par défaut en position. Ces matrices sont orthogonales entre elles *i.e.* $\mathbf{S}_f \perp \mathbf{S}_v$. Nous avons donc les matrices de sélection suivantes :

$$\mathbf{S}_f = \mathbf{diag} (0, 0, 1, 1, 0, 0) \quad (4.4)$$

$$\mathbf{S}_v = \mathbf{diag} (0, 1, 0, 0, 0, 0) \quad (4.5)$$

En fonction des étapes dans le procédé, les matrices de sélection sont modifiées afin de commander les bonnes directions au bon moment (Tab. 4.1).

TABLE 4.1 – Matrices de sélection \mathbf{S}_f et \mathbf{S}_v en fonction des étapes du procédé

Étape	1	2	3	4	5
\mathbf{S}_f	[0, 0, 0, 0, 0, 0]	[0, 0, 0, 0, 0, 0]	[0, 0, 1, 1, 0, 0]	[0, 0, 1, 1, 0, 0]	[0, 0, 0, 0, 0, 0]
\mathbf{S}_v	[0, 0, 0, 0, 0, 0]	[0, 1, 0, 0, 0, 0]	[0, 1, 0, 0, 0, 0]	[0, 1, 0, 0, 0, 0]	[0, 0, 0, 0, 0, 0]

Durant l'étape 1, l'outil descend à une position d'approche au dessus du moule et toutes les directions sont commandées par défaut en position, donc les matrices de sélection \mathbf{S}_f et \mathbf{S}_v ne sélectionnent pas la commande en force ni la commande en vision.

Durant l'étape 2, la localisation de l'outil le long de l'axe y est corrigée par rapport au bord de bande précédente. Ici, la direction y est contrôlée en vision et les autres directions sont commandées par défaut en position.

Durant l'étape 3, l'outil descend au contact jusqu'à avoir l'effort de compactage désiré et une répartition correcte de l'effort sur la surface tout en gardant une position latérale de l'outil par rapport à la bande précédente. Ici, la direction y est commandée en vision, la direction z est commandée en force, la direction x est commandée en moment et les autres composantes sont commandées par défaut en position-orientation.

Durant l'étape 4, l'outil se déplace le long de l'axe x pour déposer une bande tout en maintenant un effort de compactage spécifié avec une répartition correcte et une position latérale de l'outil correcte. Donc les directions sont commandées de la même manière que dans l'étape 3.

Durant l'étape 5, l'outil se relève à une position dite de dégagement. Toutes les directions sont commandées par défaut en position.

La figure 4.14 présente le mécanisme de l'intégration des capteurs avec les deux boucles externes (boucle de commande en effort et boucle de commande en vision) ajoutées à la boucle de commande en position interne. En fonction des matrices de sélection \mathbf{S}_f et \mathbf{S}_v , l'incrément de position $\Delta \mathbf{X}_{FV}$ est calculé à partir de l'asservissement en force et/ou de l'asservissement visuel. Ce schéma de commande est la combinaison du schéma de commande en force (Fig. 4.8) et du schéma de commande en vision (Fig. 4.13).

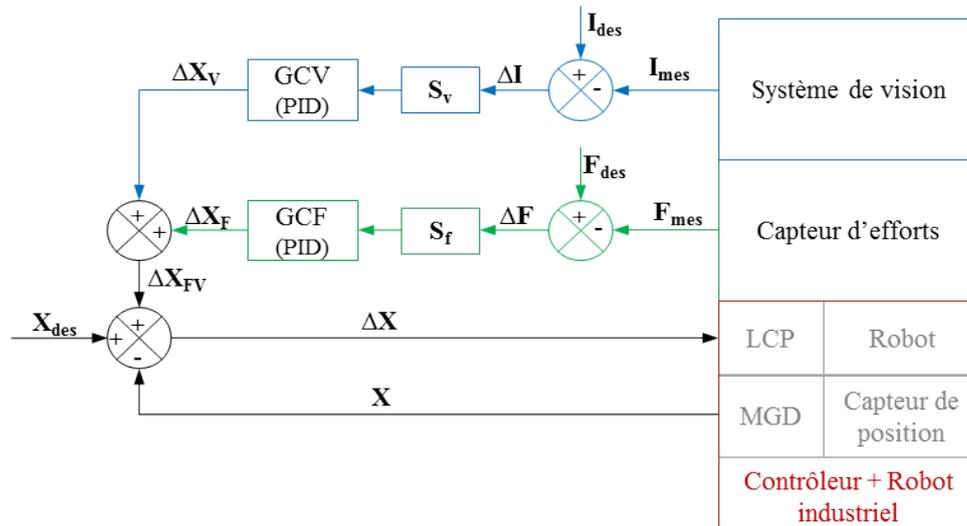


FIGURE 4.14 – Schéma de commande de l'asservissement mixte force-vision

4.5 Loi de commande

Pour mettre en œuvre la commande référencée capteurs, nous avons vu que nous travaillerons avec une boucle externe permettant l'intégration des capteurs en s'appuyant sur la boucle de commande interne. Le correcteur PID (Proportionnel Intégral Dérivé) est un outil permettant d'effectuer une régulation en boucle fermée d'une grandeur physique d'un système ou procédé industriel. Il s'agit du régulateur le plus utilisé dans l'industrie pour les asservissements. A partir de la différence entre la consigne et la mesure $m(t)$, appelée erreur de mesure $e(t)$, un signal de commande $u(t)$ est calculé afin de piloter le système pour lui permettre d'atteindre et de maintenir la consigne. Le correcteur PID construit le signal $u(t)$ en combinant une action proportionnelle à $e(t)$, une action proportionnelle à l'évolution de $e(t)$ (dérivation temporelle) et une action proportionnelle à l'accumulation de $e(t)$ (intégration temporelle). Suivant les systèmes, la consigne peut être une vitesse, une température [Grassi and Tsakalis, 2000], une position en pixel [Corke, 1996], un angle, etc. Nous faisons donc le choix de fonctionner avec une génération de consigne à partir de l'erreur en position - force - vision simple basée sur une structure PID.

4.5.1 Description du contrôleur PID

De manière générale, quelles que soit la nature de la consigne, la régulation peut être réalisée avec un contrôleur PID [Astrom and Hagglund, 1995]. **P** représente l'action proportionnelle à l'erreur de réglage. **I** représente l'action intégrale permettant d'annuler l'erreur statique. Ce paramètre peut dégrader la réponse transitoire. **D** représente l'action dérivée permettant d'améliorer la réponse transitoire grâce à l'effet d'anticipation. L'expression du signal de sortie à temps continu d'un contrôleur PID s'écrit de la manière suivante :

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4.6)$$

Dans l'équation précédente, le coefficient K_p est en facteur, si l'on développe l'expression, on obtient :

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.7)$$

avec :

$u(t)$ représente le signal de sortie

$e(t)$ représente l'erreur entre la mesure et la consigne

K_p est le gain proportionnel

K_i est le gain intégral

T_i est la constante de temps intégrale telle que $K_i = \frac{K_p}{T_i}$

K_d est le gain dérivé

T_d est la constante de temps de dérivation telle que $K_d = K_p \cdot T_d$

Si l'on prend par exemple une régulation de température, $e(t)$ représente l'erreur de température exprimée en degré noté [deg] et $u(t)$ représente le signal de commande qui peut être exprimé en Volt noté [V] (suivant le dispositif de chauffe). Le temps est exprimé en seconde [s]. Pour avoir une équation homogène, K_p est exprimé en [V].[deg]⁻¹, K_i est exprimé en [V].[deg]⁻¹.[s]⁻¹ et K_d est exprimé en [V].[s].[deg]⁻¹.

Dans la commande en effort, $e(t)$ représente l'erreur de force exprimée en Newton noté [N] et $u(t)$ représente le signal de commande exprimé en millimètre noté [mm]. Ce dernier correspond en fait dans notre schéma de contrôle à la consigne d'incrément du contrôleur industriel. Pour avoir une équation homogène, K_p est exprimé en [mm].[N]⁻¹, K_i est exprimé en [mm].[N]⁻¹.[s]⁻¹ et K_d est exprimé en [mm].[s].[N]⁻¹.

Dans la commande en vision, $e(t)$ représente l'erreur de position dans l'image exprimée en pixel noté [pxl] et $u(t)$ représente le signal de commande en millimètre noté [mm]. Ce dernier correspond également à la consigne d'incrément du contrôleur industriel. Pour avoir une équation homogène, K_p est exprimé en [mm].[pxl]⁻¹, K_i est exprimé en [mm].[pxl]⁻¹.[s]⁻¹ et K_d est exprimé en [mm].[s].[pxl]⁻¹.

4.5.2 Algorithme incrémental

La structure PID précédemment décrite correspond à la description d'un système à temps continu théorique. Notre mise en œuvre se faisant sur ordinateur, la période d'échantillonnage de mesure est à prendre en compte. C'est pour cela que la forme continue doit être discrétisée. Il existe plusieurs formes de PID numériques dont les points faibles doivent être pris en compte : bruits de dérivation, repliement de spectres... La discrétisation passe par l'approximation de l'intégrale via les méthodes des rectangles, des trapèzes ou de Simpson et par l'approximation de la dérivée via l'estimation de la dérivée première par une droite ou l'approximation des trois dernières erreurs par une courbe parabolique ou cubique. Parmi les différentes formes, nous choisissons de travailler avec l'algorithme incrémental (appelé Velocity algorithm). Le terme intégral de l'équation (4.6) est approché par une somme finie où Δ représente la période d'échantillonnage :

$$\sum_{i=1}^k e(i)\Delta \quad ; \quad t = k\Delta \quad (4.8)$$

Le terme de la dérivée du premier ordre de l'équation (4.6) est approximée par une différence finie :

$$\frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta} \quad (4.9)$$

En remplaçant le terme intégral (4.8) et le terme dérivé (4.9) dans l'équation (4.6), on obtient :

$$u(k) = K_p \left[e(k) + \frac{\Delta}{T_i} \sum_{i=1}^k e(i) + \frac{T_d}{\Delta} (e(k) - e(k-1)) \right] \quad (4.10)$$

La valeur de l'erreur à chaque instant doit être enregistrée. Pour avoir $\Delta u(k)$, $u(k-1)$ est soustrait à $u(k)$ et on obtient :

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) \\ &= K_p \left[e(k) - e(k-1) + \frac{\Delta}{T_i} e(k) + \frac{T_d}{\Delta} (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \right] \\ &= K_0 \cdot e(k) + K_1 \cdot e(k-1) + K_2 \cdot e(k-2) \end{aligned} \quad (4.11)$$

où :

$$K_0 = K_p \left(1 + \frac{\Delta}{T_i} + \frac{T_d}{\Delta} \right) \quad (4.12)$$

$$K_1 = -K_p \left(1 + \frac{2T_d}{\Delta} \right) \quad (4.13)$$

$$K_2 = K_p \left(\frac{T_d}{\Delta} \right) \quad (4.14)$$

A chaque instant, l'incrément de commande $\Delta u(k)$ est calculé et envoyé au robot car nous travaillons en position relative dans l'espace de l'outil. Les trois valeurs précédentes sont nécessaires : $e(k)$, $e(k-1)$ et $e(k-2)$ qui sont les erreurs aux instants $k\Delta$, $(k-1)\Delta$ et $(k-2)\Delta$. Les paramètres K_0 , K_1 et K_2 peuvent être vus comme des paramètres réglables. Sachant que $T_i = \frac{K_p}{K_i}$ et que $T_d = \frac{K_d}{K_p}$, les paramètres peuvent être réglés à partir de K_p , K_i et K_d tel que :

$$K_0 = K_p + K_i \Delta + \frac{K_d}{\Delta} \quad (4.15)$$

$$K_1 = -K_p - \frac{2K_d}{\Delta} \quad (4.16)$$

$$K_2 = \frac{K_d}{\Delta} \quad (4.17)$$

Par sa formulation, il permet d'une part de gérer la protection *anti-windup* de l'intégrateur afin d'éviter le phénomène de saturation et d'autre part, de ne pas avoir de transfert avec un saut lors du passage du mode manuel au mode automatique appelé *bumpless transfer* [Peng et al., 1996].

4.6 Conclusion

Dans cette partie, plusieurs structures de commande ont été présentées afin de choisir la plus pertinente pour notre application : la commande hybride externe. Au vue de la nouvelle définition de la tâche du procédé de placement de fibres robotisé, l'asservissement en force et l'asservissement visuel ont tout d'abord été présentés dans le cadre d'une approche mono-capteur. Ensuite, les deux asservissements sont combinés pour réaliser une approche mixte.

Mise en œuvre de l'approche mixte

5.1 Introduction

Dans cette partie l'approche mixte est mise en oeuvre. Tout d'abord, le dispositif expérimental est présenté. Ensuite, les approches mono-capteur sont testées et leurs bénéfices sont exposés. Enfin, l'approche mixte est expérimentée et les résultats sont montrés.

5.2 Dispositif expérimental

Dans cette section, les capteurs extéroceptifs sont détaillés. Ensuite, l'architecture matérielle, le système de communication ainsi que l'architecture logicielle sont présentés. Enfin, l'implémentation du système est exposée.

5.2.1 Capteur de force

Plusieurs types de capteurs d'efforts sont détaillés avant de présenter le capteur choisi. Cette section s'appuie sur le cours des capteurs d'efforts [Toulminet, 2002].

Principe de fonctionnement

Pour déterminer la force appliquée sur une structure, le capteur d'effort est constitué d'un corps déformable suivant des directions connues. La déformation de ce dernier est mesurée par des jauges qui permettent d'en déduire les efforts appliqués. Il existe deux types de capteurs d'efforts : les capteurs d'efforts à jauges d'extensiométries et les capteurs d'efforts piézoélectriques.

Les capteurs d'efforts à jauges d'extensiométries sont également appelés capteurs de force à jauges de

contraintes. La jauge est collée sur la surface dont on veut connaître les efforts subis. Lorsqu'un effort est appliqué, le fil de la jauge se déforme et il subit une variation de longueur. La variation de la résistance est proportionnelle à la variation de longueur. Une loi de comportement spécifique au matériau utilisé permet d'établir une relation entre la déformation et l'effort appliqué. Il existe différents types de capteurs à jauges d'extensiométries (Fig. 5.1) tels que :

- les capteurs de mesures de flexion : l'étendue de mesure va de 0,5 N à ± 125 N.
- les capteurs de mesures de traction et de compression :
 - en "S" : le corps d'épreuve est utilisé en traction-compression entre les deux extrémités du S. L'étendue de mesure va de 0 N à ± 20000 daN.
 - Pan-Cake : capteur conçus pour des mesures de poids allant de 0 kg à 100 tonnes.

Ces capteurs présentent des inconvénients tels que la sensibilité à la température et la non linéarité mais l'étalonnage permet d'éliminer ces erreurs. Ils permettent de travailler avec des fréquences de coupure élevées et ils doivent être utilisés lorsque des forces nominales importantes sont à mesurer.



FIGURE 5.1 – Capteurs à jauges d'extensiométries : (a) Mesure de flexion (b) Capteur en "S" (c) Capteur Pan-Cake

Concernant les capteurs d'efforts piézoélectriques, lorsque les cristaux du capteur sont soumis à une charge mécanique, ils génèrent une charge électrique. Une tension est produite lorsque le capteur est "serré" par une force proportionnelle à la force appliquée. Le signal électrique généré par les cristaux se détériore rapidement après l'application d'un effort. Par conséquent, ce type de capteur est inadéquat pour la détection de force statique. Le signal électrique est converti par un amplificateur pour être adapté aux instruments tels que les oscilloscopes à mémoire numérique permettant une analyse du signal avant sa détérioration. L'effort dynamique peut être mesuré en tant que force de traction, de compression ou de couple. Le matériau piézoélectrique le plus largement utilisé dans l'industrie est le zirconotitanate de plomb (PZT). Il existe différents types de capteurs de force piézoélectrique (Fig. 5.2) :

- les capteurs de force à une composante : constitués de rondelles de quartz sensibles à la pression entre deux anneaux d'acier.
- les capteurs de force à trois composantes : constitués de rondelles de quartz sensibles à la pression (F_z) et au cisaillement (F_x , F_y).

- les capteurs de couple : constitués d'un empilage de rondelles de quartz qui est sensible au cisaillement.

De nombreux amplificateurs de charge ont une bande passante qui dépend de la charge électrique et donc de la force mesurée. Les forces importantes génèrent des charges électriques élevées limitant la bande passante.

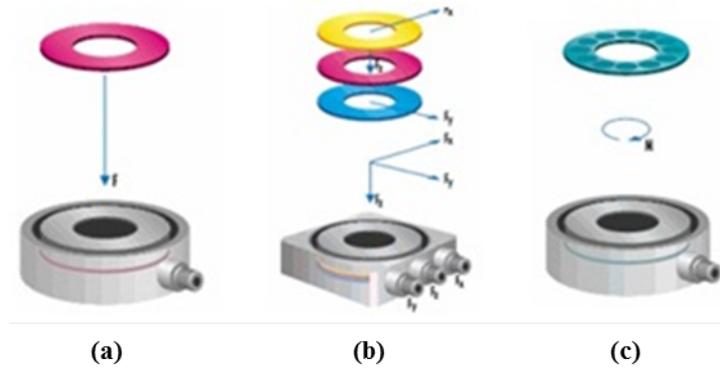


FIGURE 5.2 – Capteurs piézoélectriques : (a) Capteur à une composante (b) Capteur à trois composantes (c) Capteur de couple

Technologies existantes

Les capteurs piézoélectriques sont destinés à mesurer rapidement de faibles forces alors que les capteurs à jauges peuvent mesurer des forces importantes. Concernant notre application, nous avons besoin de mesurer six composantes. Il s'agit de connaître les trois composantes de force (F_x , F_y , F_z) et les trois composantes de couple (M_x , M_y , M_z). L'étendue de mesure doit être entre 0 N et au moins 500 N. Nous choisissons d'étudier les capteurs de force multi-axes à jauges d'extensiométries.

Capteur de forces multi-composantes FN7325 : La description suivante est basée sur la documentation technique de Measurement Specialities [Measurement-Specialties, 2011]. Ce capteur (Fig. 5.3) mesure les forces et les couples dans les trois directions (x, y, z). L'étendue de mesure est comprise entre 0 et 250 kN pour la force et entre 200 Nm à 7000 Nm pour les couples. La plage d'utilisation en température varie entre -20°C et 80°C . La sortie analogique haut niveau, intégrée au capteur, régule l'alimentation du pont de jauges et assure l'amplification du signal. Il est utilisé pour des applications de tests très diverses telles que :

- Les accouplements mécaniques,
- Les tests de structures et composants,
- Les crash tests,
- Les bancs d'essais d'endurance automobile,
- Les bancs d'essais industriels.

Capteur FTD-Delta : SI-660-60, Schunk : La description suivante est basée sur la documentation technique de Schunk [Schunk,]. Ce capteur (Fig. 5.4) mesure les forces et les couples dans les trois directions (x, y, z). L'étendue de mesure est différente selon la direction : $F_x, F_y = \pm 660 \text{ N}$, $F_z = \pm 1980 \text{ N}$,



FIGURE 5.3 – Capteur de forces multi-composantes FN7325

$M_x, M_y, M_z = \pm 60 \text{ Nm}$. La plage d'utilisation en température varie entre 0°C et 70°C . Il fonctionne avec un élément de mesure monolithique avec trois segments de mesure à 120° . Chaque segment est équipé de deux jauges de contraintes semi-conductrices qui détectent des déformations de l'ordre du micron. Il est utilisé dans le cadre des applications suivantes :

- Surveillance des efforts en temps-réel,
- Configuration de robot.



FIGURE 5.4 – Capteur de forces 6 composantes : FT-Delta

Capteur ATI FT-Gamma : La description suivante est fondée sur la documentation technique d'ATI Industrial Automation [ATI Industrial Automation,]. Ce capteur (Fig. 5.5) mesure les forces et les couples dans les trois directions (x, y, z). L'étendue de mesure est différente selon la direction : $F_x, F_y = \pm 32 \text{ N}$, $F_z = \pm 100 \text{ N}$, $M_x, M_y = \pm 2,5 \text{ Nm}$ et $M_z = \pm 2,5 \text{ Nm}$. Le fonctionnement de ce capteur est basé sur les jauges de contrainte intégrées dans un pont de Wheatstone. Le transducteur est une structure monolithique en acier. Suivant le modèle du transducteur utilisé, la plage d'utilisation en température varie de 0 à 60°C , de 0 à 70°C ou de -5 à 105°C . Ce type de capteur est utilisé dans le cadre des applications suivantes :

- Assemblage robotisé,
- Ebavurage, polissage, meulage,
- Réadaptation physique,
- Chirurgie.



FIGURE 5.5 – ATI FT-Gamma

Capteur choisi

Pour la mise en œuvre de l'approche mixte, nous allons travailler avec le capteur ATI FT-Gamma décrit dans le paragraphe 5.2.1. Celui-ci est, d'une part, disponible à l'ESTIA avec son fichier de calibration et son kit de développement et d'autre part, ses caractéristiques sont compatibles avec notre cellule robotique de laboratoire. De plus, ce type de capteur a déjà été utilisé et testé dans le cadre de différentes applications telles que le contrôle de l'usinage [Pan and Zhang, 2008] mais aussi dans le cadre chirurgical [Gangloff and Poignet, 2007, Zemiti, 2005]. Il mesure les efforts et les moments suivant les trois directions x , y et z (Fig. 5.6). Trois logiciels sont disponibles avec le capteur : "ATICombinedDAQFT", "ATIDAQ-DotnetDemo" et "VisualC-Sample" qui faciliteront le développement de notre application. Voici d'autres caractéristiques du capteur d'effort :

- Fréquence de résonance pour F_x , F_y et $M_z = 1400$ Hz
- Fréquence de résonance pour F_z , M_x et $M_y = 2000$ Hz
- Masse = 0,255 kg
- Diamètre = 75 mm
- Épaisseur = 33 mm

Ce capteur est fixé sur le poignet du robot entre la tête de dépose et le bras manipulateur. Il peut être intégré sur le robot grâce à un module KUKA appelé module RSI (Robot Sensor Interface). Il mesure les efforts et les moments exprimés dans le repère du capteur d'effort. Pour les avoir au point de contact, un transport des efforts doit être réalisé du repère capteur au repère de la tâche.

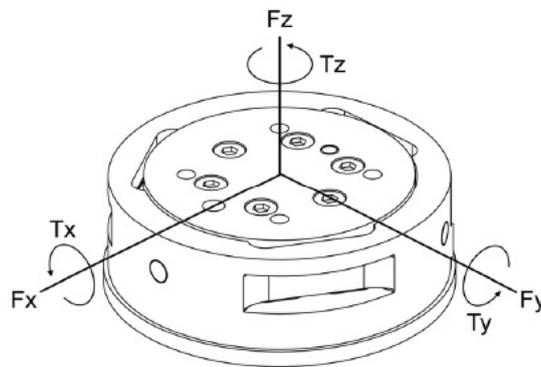


FIGURE 5.6 – Capteur d'effort ATI

5.2.2 Capteur de vision active

Les contraintes qui ont amené à choisir l'utilisation d'un capteur de vision active ont été décrites en section 4.3.2. L'épaisseur de la fibre étant très faible (de 0,1 mm à 0,3 mm), la position relative des trois éléments : source laser, caméra et rouleau de compactage doit être étudiée avant l'ingénierie des pièces pour les essais (Fig. 5.7).

Pour cela, nous avons réalisé une simulation de l'environnement 3D que nous avons programmé avec MATLAB® afin d'optimiser la détection du bord de bande. La figure 5.8 présente une vue de notre simulateur 3D montrant le repère de l'outil de placement de fibre, le faisceau laser, les intersections entre le plan du

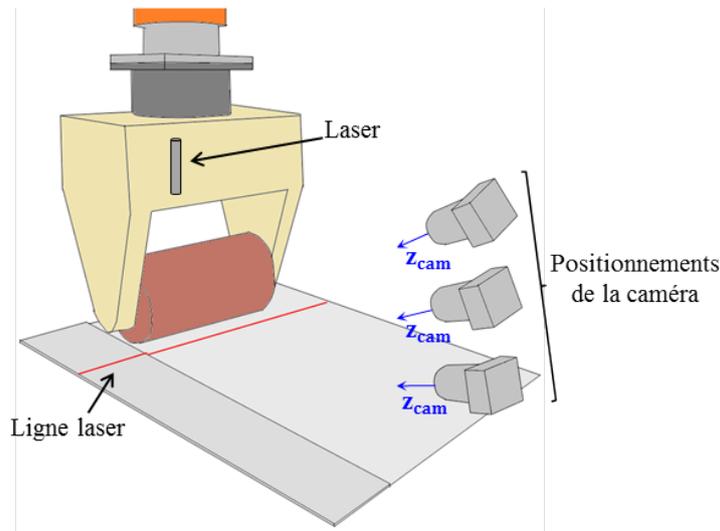


FIGURE 5.7 – Positionnement des éléments source laser, caméra et rouleau de compactage

laser et la surface de la pièce et le repère caméra à différentes positions.

Modélisation et calibration de la caméra

Pour choisir la résolution de la caméra, sa position et son orientation par rapport au rouleau de compactage et au faisceau du laser, nous devons modéliser la caméra pour être en mesure d'exécuter une simulation 3D.

Modélisation : Nous utilisons le modèle d'une caméra miniature classique [Bouguet and P. Perona, 1998]. Dans ce modèle, une vue de la scène est formée en projetant les points 3D sur le plan de l'image en utilisant la projection en perspective (5.1).

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

où :

- s représente le facteur d'échelle appliqué à l'image
- (X, Y, Z) sont les coordonnées d'un point 3D de la ligne laser dans l'espace de coordonnées de l'atelier
- $[R|t]$ est la matrice des paramètres intrinsèques
- (u, v) sont les coordonnées de la projection des points en pixels
- (c_x, c_y) est un point principal qui est habituellement au centre de l'image
- f_x, f_y sont les distances focales exprimées en pixels

La matrice des paramètres intrinsèques ne dépend pas de la scène observée. Ainsi, une fois qu'elle est estimée, elle peut être réutilisée à condition que la distance focale soit fixe. La matrice de rotation-translation $[R|t]$ est utilisée pour décrire la position et l'orientation de la caméra. C'est pourquoi, $[R|t]$ permet de translater les coordonnées d'un point (X, Y, Z) à un autre système de coordonnées fixe par rapport à la

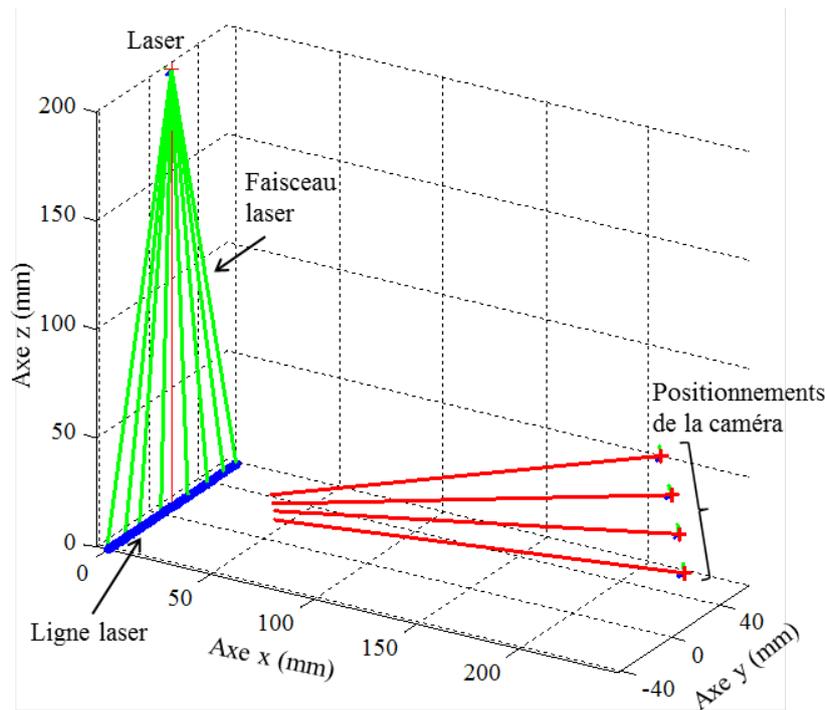


FIGURE 5.8 – Vue du simulateur 3D

caméra. La transformation précédente est équivalent à ce qui suit (quand $z \neq 0$) (5.2) :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} + t \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} x' &= \frac{x}{z} \\ y' &= \frac{y}{z} \\ u &= f_x \cdot x' + c_x \\ v &= f_y \cdot y' + c_y \end{aligned}$$

Les lentilles réelles ont généralement des distorsions, essentiellement des distorsions radiales mais aussi de légères distorsions tangentielles. Le modèle ci-dessus peut être étendu pour inclure la modélisation de la déformation. Les distances focales et le centre de l'image doivent être mis à l'échelle avec la résolution actuelle à partir de la résolution calibrée (calibrée à 640×480 et utilisée à 320×240) alors que les coefficients de distorsion sont les mêmes quelles que soient les résolutions de la caméra.

Calibration : Avec la calibration, nous déterminons la relation entre les unités naturelles de la caméra (pixels) et les unités réelles (par exemple les millimètres). Cette fonction est utile lorsqu'on veut déterminer le meilleur emplacement et la meilleure orientation pour une cible de taille donnée à observer (épaisseur de la fibre dans notre cas). Les paramètres inconnus sont les distances focales f_x , f_y et les coordonnées du

centre exprimées en pixels (c_x, c_y) . Si, pour les deux axes, une distance focale commune est utilisée avec un rapport donné a (généralement égal à 1), alors $f_y = f_x \cdot a$ et dans la formule précédente nous avons une seule longueur focale f . Le procédé pour déterminer ces deux matrices est appelé calibration. Le calcul de ces paramètres est effectué par des équations géométriques de base. Les équations utilisées dépendent des objets de calibration choisis. Nous avons choisi d'utiliser la bibliothèque de traitement d'image OpenCV qui prend en charge trois types d'objets pour la calibration :

- Échiquier classique en noir et blanc
- Motif de cercle symétrique
- Motif de cercle asymétrique.

Nous choisissons de travailler avec un échiquier classique en noir et blanc. Nous prenons une dizaine de clichés avec différentes positions de l'échiquier avec la caméra et ensuite OpenCV peut trouver les paramètres estimés à partir des nœuds qu'il a calculés dans chaque image. Figure 5.9, deux des clichés sont présentés. Chaque motif trouvé détermine une nouvelle équation. Pour résoudre le système d'équations, nous avons besoin d'au moins un nombre prédéterminé de clichés des motifs pour poser correctement le système d'équations. Dans la pratique, nous avons un bruit dans les images de départ, donc pour de bons résultats, nous avons besoin d'au moins dix clichés de bonne qualité du motif de départ dans différentes positions [Bouguet and P. Perona, 1998].

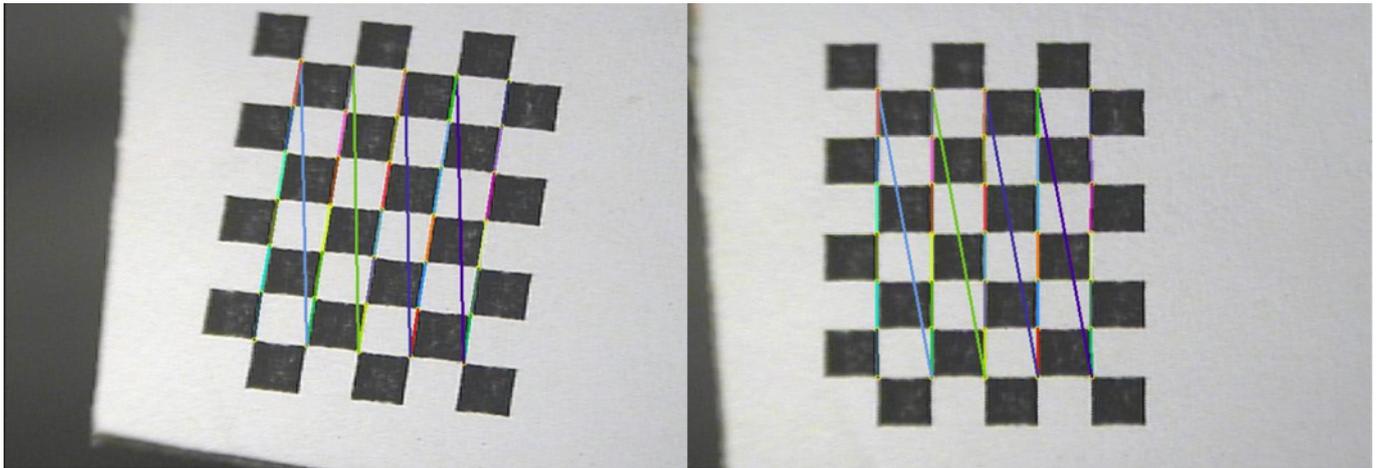


FIGURE 5.9 – Clichés de l'échiquier pour la calibration

Matrice de rotation-translation : La matrice des paramètres extrinsèques $[R|t]$ translate les coordonnées d'un point (X, Y, Z) dans le système de coordonnées de l'atelier au système de coordonnées de la caméra. Dans notre cas, nous avons choisi de décrire cette matrice avec une rotation autour de l'axe Y de l'outil de placement de fibres pour avoir l'axe de la caméra qui vise le centre de l'outil et une distance en coordonnées polaires $[\rho, \theta]$ (Fig. 5.10).

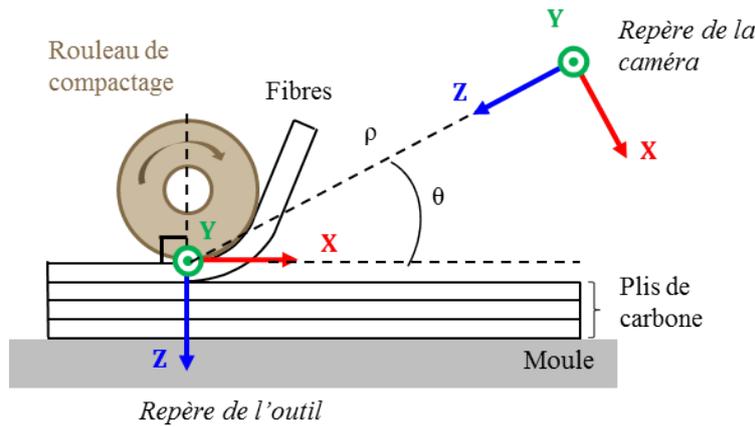


FIGURE 5.10 – Description des repères

La matrice extrinsèque est définie comme suit :

$$M_{extrinsque} = \begin{bmatrix} \cos(\theta - \frac{\pi}{2}) & 0 & -\sin(\theta - \frac{\pi}{2}) & \rho \cos(\theta) \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ \sin(\theta - \frac{\pi}{2}) & 0 & \cos(\theta - \frac{\pi}{2}) & \rho \sin(\theta) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Optimisation de la matrice extrinsèque : En fonction d'une caméra donnée (paramètres intrinsèques), nous optimisons la détection du trait laser en réglant les paramètres $[\rho, \theta]$ (Fig. 5.11). La résolution de la caméra qui est comprise entre 640×480 pixels et 800×600 pixels afin de garantir des temps de traitement cohérents avec notre boucle de commande et l'épaisseur de la fibre qui est d'environ 0,3 mm sont prises en compte. Nous devons aussi prendre en compte les contraintes géométriques de l'outil de placement de fibres. Par conséquent le positionnement de la caméra ne doit pas interférer avec l'environnement de drapage et donc avec la surface du moule. Les plages de valeurs choisies pour $[\rho, \theta]$ sont les suivantes :

$$\begin{aligned} 200 \text{ mm} < \rho < 280 \text{ mm} \\ 8^\circ < \theta < 10^\circ \end{aligned}$$

Ces plages permettent, d'une part, d'avoir une distance entre la caméra et le moule supérieure à 35 mm et d'autre part, de garantir une détection du saut de presque 10 pixels. La figure 5.12 montre le réglage expérimental que nous avons utilisé pour les essais.

Caractéristiques du laser

Le laser utilisé pour projeter un trait sur la surface a les caractéristiques suivantes :

- Longueur d'onde = 635 nm
- Longueur de ligne à 1 m = 2.3 m
- Largeur de ligne à 1 m = 1 mm
- Puissance de sortie optique = 7 mW

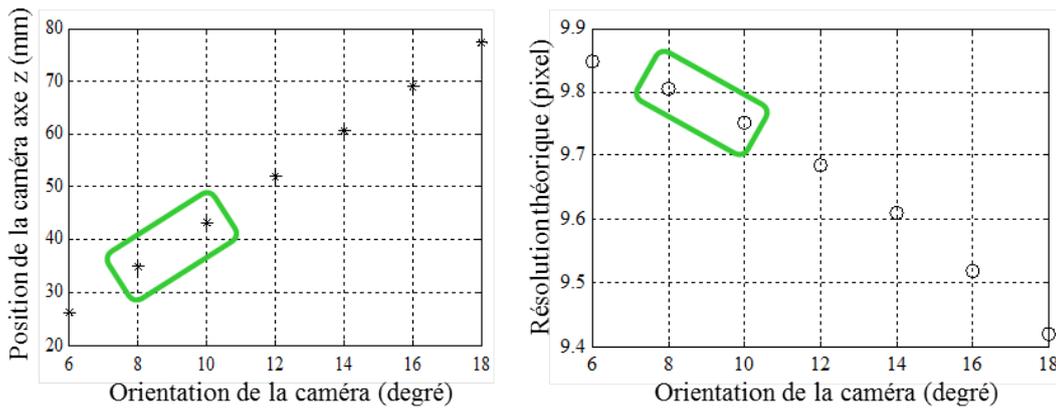


FIGURE 5.11 – Optimisation de la vision active

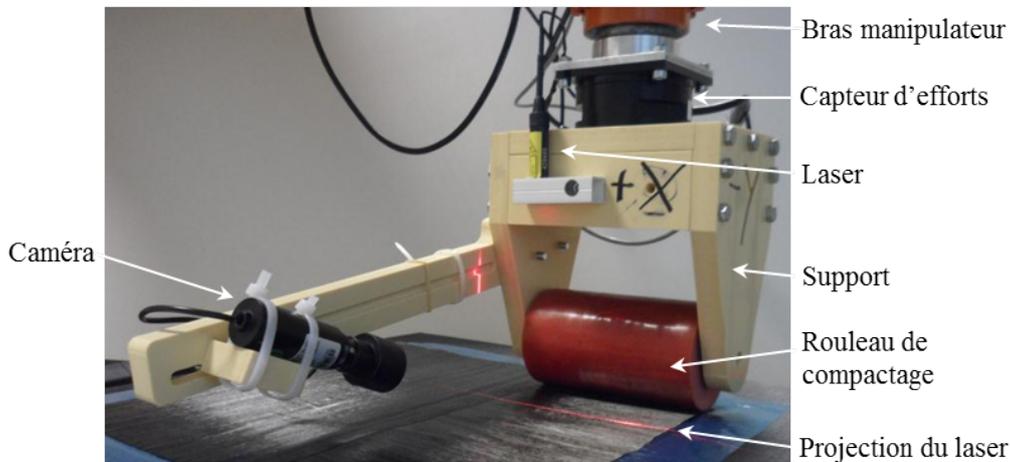


FIGURE 5.12 – Caméra et laser fixé sur l'outil

Dans notre dispositif, le laser est placé à environ 40 mm de la surface (Fig. 5.11) donc la distance est grandement inférieure à 1 m. La largeur de la ligne est finalement plus large qu'1 mm, ce qui peut être pénalisant par rapport à l'épaisseur de la fibre.

Calibrage du système

Une fois que la caméra est correctement calibrée et positionnée par rapport au trait laser et au rouleau de compactage, on peut étudier la relation entre le déplacement de l'outil le long de l'axe y et la mesure en pixel sur l'image. Pour cela, on place le rouleau en bord de bande afin d'avoir un espacement nul puis l'outil est déplacé le long de l'axe y . A chaque nouvelle position de l'outil, la position du bord de bande en pixel est mesurée sur l'image ($Y_{mesuré}$). Ceci nous permet de représenter la relation entre le positionnement relatif rouleau-bord de bande et la détection de ce dernier dans l'image (Fig. 5.13). La relation peut être approchée par une droite et une régression linéaire sur les mesures. ($Y_{théorique}$) permet de calculer les paramètres de l'équation reliant l'espacement en millimètres et la position dans l'image en pixel de type $Y_{pixel} = a.Y_{mm} + b$. Ainsi, à partir de l'intervalle de bande qui est spécifié, on peut savoir où placer la cible sur l'image tel que :

$$Y_{cible_{pixel}} = a.espacement_{mm} + b \quad (5.4)$$

avec : $a = -32.4 \text{ pxl/mm}$ et $b = 341.9 \text{ pxl}$.

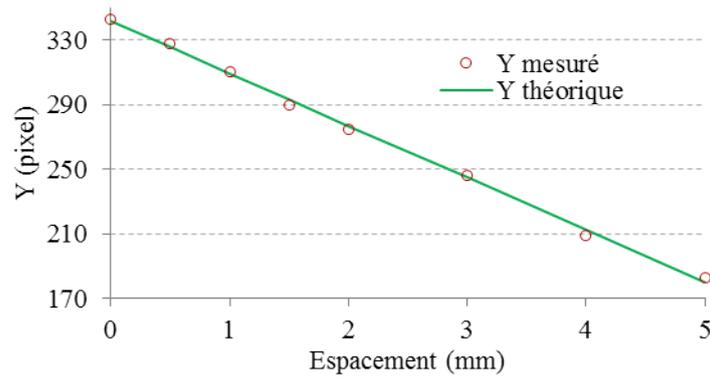
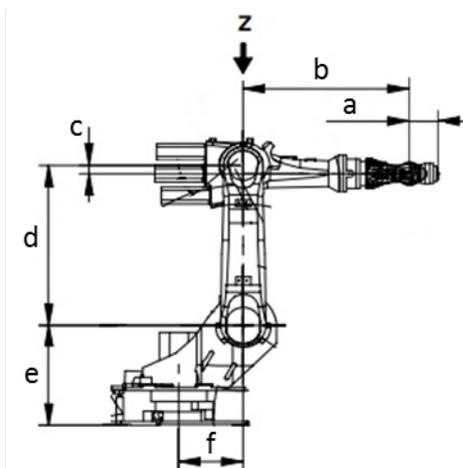


FIGURE 5.13 – Relation entre l'espacement en millimètre et la position du bord de bande en pixel

5.2.3 Architecture matérielle

La cellule robotisée de CompositAdour étant utilisée pour des prestations de service, il n'est pas envisageable de modifier sa configuration (ajouter des capteurs). Il n'est donc pas possible de l'utiliser pour réaliser des essais. En revanche, la cellule robotisée de l'école d'ingénieurs ESTIA est disponible. Elle est composée d'un bras manipulateur KUKA KR6 (six axes). Ce robot est plus petit que le robot KUKA KR240 utilisé pour le placement robotisé de fibres mais ces deux robots ont une architecture géométrique similaire, seuls les paramètres dimensionnels et inertiels diffèrent (Fig. 5.14). La cellule de laboratoire ne comportant pas de rail linéaire, il faut fixer la valeur de la variable articulaire représentant l'avancement sur l'axe linéaire tel que $q_1 = 0$. Les deux robots ont le même contrôleur KRC2 et ils ont la possibilité de travailler avec un module étant un système intermédiaire entre le robot et les capteurs pour permettre leur intégration. Il s'agit du module RSI (Robot Sensor Interface) qui doit recevoir une consigne d'incrément de position dans une période d'échantillonnage de 12 ms, sinon les données sont perdues. Si un nombre important de données est perdu alors le contrôleur KRC2 reprend le contrôle du bras manipulateur pour des questions de sécurité.



Dimensions (mm)	KR240	KR6
a	230	115
b	1300	670
c	55	35
d	1250	680
e	750	675
f	350	260

FIGURE 5.14 – Paramètres dimensionnels des robots KUKA KR240 et KUKA KR6

Pour simuler le procédé sur notre environnement expérimental, un effecteur a été fabriqué pour pouvoir

imiter le placement de fibres robotisé et il est fixé sur le bras manipulateur (Fig. 5.12). Un rouleau de compactage, venant de la machine industrielle, a été ajouté au nouvel effecteur. Cependant, il n'y a pas de fibres de carbone à draper sur ce système.

Les mesures des efforts et des moments doivent de se faire au plus proche du rouleau de compactage. Par conséquent, le capteur d'efforts est fixé sur le poignet du robot entre l'outil de placement de fibres et le bras manipulateur. Donc dans notre cas, il sera placé entre le nouveau support de rouleau et le bras manipulateur. Ensuite, le laser est fixé sur l'effecteur et il projette une ligne sur la surface de la pièce. L'axe du laser est normal à la surface de la pièce et la ligne projetée est perpendiculaire à la bande précédemment déposée (Fig. 5.12). La caméra qui doit pouvoir observer le trait laser est fixé sur l'effecteur via l'intermédiaire d'un bras fixe permettant de régler la distance et l'orientation entre le laser et la caméra.

5.2.4 Système de communication

Pour pouvoir corriger la trajectoire du robot, nous allons faire de la commande référencée capteur. Pour cela, il faut permettre l'interaction entre les capteurs et l'armoire de commande du robot. Dans notre cas, nous devons interagir avec l'armoire de commande KRC2 du robot KUKA KR6. Le module RSI est développé par KUKA et il est proposé comme un composant optionnel de la baie de commande KRC2. Il s'agit d'un système intermédiaire entre la boucle de position interne implémentée dans le contrôleur du robot et l'environnement extérieur. C'est une porte ouverte permettant d'envoyer des commandes à la boucle de contrôle interne en position. En revanche, il n'est pas possible d'envoyer des commandes directement en langage KRL (Kuka Robotics Language) au contrôleur, par contre le module RSI peut accéder directement à certaines variables systèmes. Le module RSI peut travailler de différentes manières. Il est possible d'envoyer la position absolue désirée de l'outil dans l'atelier ou d'envoyer les valeurs des variables articulaires désirées. Il est également possible d'envoyer un incrément de la position de l'outil et le module RSI ajoute cet incrément à la position courante. Dans notre configuration, nous choisissons de travailler avec un incrément de position-orientation de l'outil parce que nous travaillons avec une position relative dans le repère de référence. Finalement, le module RSI envoie les coordonnées cartésiennes de l'outil dans le repère de référence au contrôleur du robot. Avec la baie de commande KRC2, le module RSI doit recevoir les données dans un délai de 12 ms, sinon les données sont perdues et les données sont transmises au format XML. Il est possible de récupérer la position cartésienne courante de l'outil dans le repère de référence ainsi que les valeurs de chaque articulation du robot. Un numéro d'identifiant appelé *IPOC* pour chaque trame échangée est utilisé. Il permet de savoir si une trame a été perdue. Voici un exemple de trame échangée :

```
<Sen Type="PCext">
<DeltaPos X="0" Y="0" Z="0" A="0" B="0" C="0" />
<IPOC>123645634563</IPOC>
</Sen>
```

Avec :

- PCext : identifiant de la machine qui envoie la trame
- DeltaPos : incrément de position/orientation à appliquer par rapport à la position/orientation courante

- IPOC : numéro d'identifiant de la trame

Une communication de type client-serveur est développée entre les différents éléments. Le robot ainsi que les capteurs utilisés sont considérés comme des clients. Un serveur est créé en tant que mandataire, il sert d'intermédiaire entre les clients pour permettre la distribution des informations. Cette communication se fait via une liaison TCP/IP¹ spécifique. Lorsque le serveur envoie un paquet de données à un des clients, il attend un accusé de réception pour pouvoir envoyer d'autres données. Ceci permet de réduire la perte des données. La période d'échantillonnage est de 12 ms. Ce système de communication est représenté Fig. 5.15. De cette manière, le client *robot* peut communiquer avec le client *capteurs* grâce à l'application serveur via la communication TCP/IP. Le robot envoie la position de l'outil dans l'atelier X au module RSI. Celui-ci la transmet au serveur et ensuite, le serveur l'envoie au client *capteurs*. En parallèle, le client *capteurs* reçoit les données du capteur d'efforts F_{mes} et de la caméra I_{mes} . Il calcule la correction nécessaire pour l'effecteur en millimètres ΔX_{FVP} et l'envoie au serveur qui la transmet ensuite au module RSI. Le module RSI ajoute cette correction calculée à la position courante et envoie la nouvelle valeur de position désirée X_d au contrôleur du robot.

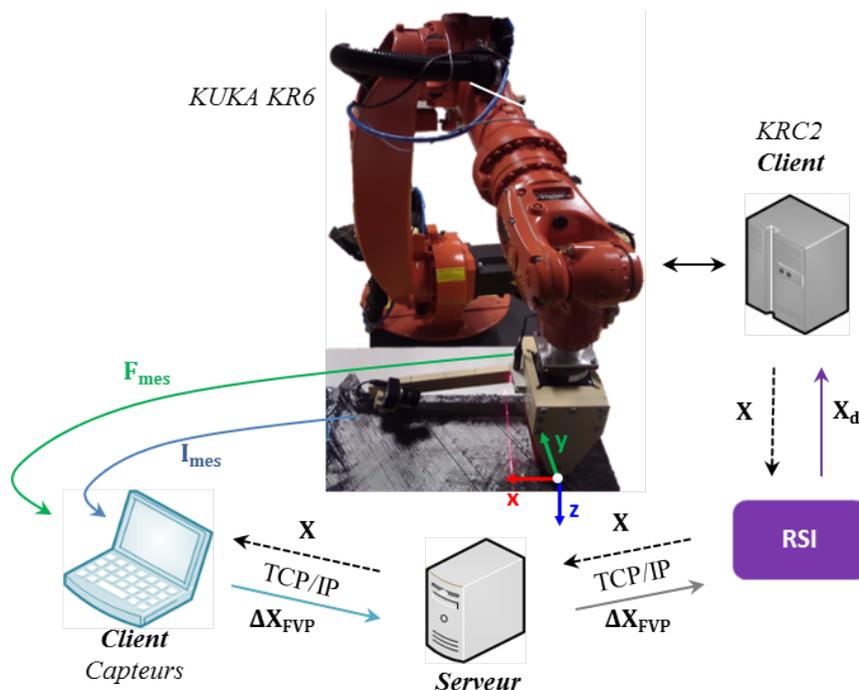


FIGURE 5.15 – Environnement de test

5.2.5 Architecture logicielle

Dans le système industriel actuel, la génération de trajectoire se fait via les logiciels CATfiber ou CAD-fiber développés par *Coriolis Composites*. Ces logiciels génèrent un programme en langage KRL pour le contrôleur KRC2. Dans le cas d'ajout de capteurs entraînant l'utilisation du module RSI, la génération de trajectoire en langage KRL n'est plus possible puisque le module RSI prend le contrôle. L'architecture logicielle se décompose en trois parties : le client *capteurs*, le serveur et le client *KRC2* lui-même divisé en

¹Transmission Control/Internet Protocol

deux parties : le module RSI et le programme KRL (Fig. 5.16).

Lorsque le serveur est lancé, il attend la connexion du client *capteurs* puis la connexion du client *KRC2*. Dans les deux cas, il renvoie au client concerné une validation de connexion. Ensuite, le serveur lance deux procédures distinctes. L'une d'entre elles attend de recevoir les coordonnées opérationnelles de la part du client *KRC2* puis les transmet au client *capteurs*. Cette procédure reboucle sur elle-même. L'autre procédure attend de recevoir de la part du client *capteurs* le déplacement relatif ΔX_{FVP} à effectuer et le transmet au client *KRC2*. Cette procédure reboucle également sur elle-même.

Le client *capteurs* commence par le chargement des paramètres de calibrage du capteur d'efforts et de la caméra. Ensuite, les réglages de consignes de force, vision, position ainsi que les PID correspondants et les paramètres de vitesses utilisés pour la génération de trajectoires doivent être réglés. Puis le client se connecte au serveur. Lorsqu'il reçoit la confirmation, il attend de recevoir les coordonnées opérationnelles X de la part du serveur. Une fois qu'il les réceptionne, des mesures sur les forces et sur la vision sont faites. Ces mesures sont ensuite comparées aux consignes. Si elles sont équivalentes, un incrément nul est envoyé et le système reboucle sur l'attente de nouvelles coordonnées opérationnelles. Si elles sont différentes des consignes, l'erreur de déplacement correspondant à l'erreur de force et/ou vision et/ou position (suivant les matrices de sélection spécifiées) est calculée par les lois de commande puis le système reboucle sur l'attente de nouvelles coordonnées opérationnelles. L'entrée de la boucle de commande en force est l'erreur sur la mesure de force exprimée en Newton et la sortie est la consigne pour le contrôleur industriel, c'est-à-dire un incrément de position exprimé en millimètres. L'entrée de la boucle de commande en vision est l'erreur sur la mesure de l'image exprimée en pixel et la sortie est la consigne pour le contrôleur industriel comme précédemment. L'incrément de commande de déplacement calculé ΔX_{FVP} est ensuite envoyé au serveur.

Le programme KRL commence par charger les paramètres de calibrage du robot puis il permet de mettre le robot en position de départ. Ensuite, il se connecte au module RSI et donc ce n'est plus le programme KRL qui commande le robot. Il se met en attente de recevoir une erreur du module RSI pour mettre le robot en position de repos et terminer la procédure.

Lorsque le module RSI est activé par le programme KRL, il se connecte au serveur et attend une validation de connexion de la part du serveur. Ensuite, il envoie les coordonnées opérationnelles de l'effecteur X au serveur puis il attend le déplacement relatif à effectuer ΔX_{FVP} de la part du serveur. S'il n'y a pas d'erreur au niveau du module RSI, il ajoute à la position courante de l'outil le déplacement relatif à effectuer pour avoir la nouvelle position désirée de l'effecteur puis le robot se déplace et la procédure revient sur l'envoi des coordonnées opérationnelles. Les erreurs RSI peuvent être liées à la perte de données, à la sécurité de la cellule qui est défaillante, etc. Par exemple, si la durée entre l'envoi des coordonnées opérationnelles et la réception du déplacement relatif est plus importante que 12 ms, une erreur est envoyée au programme KRL.

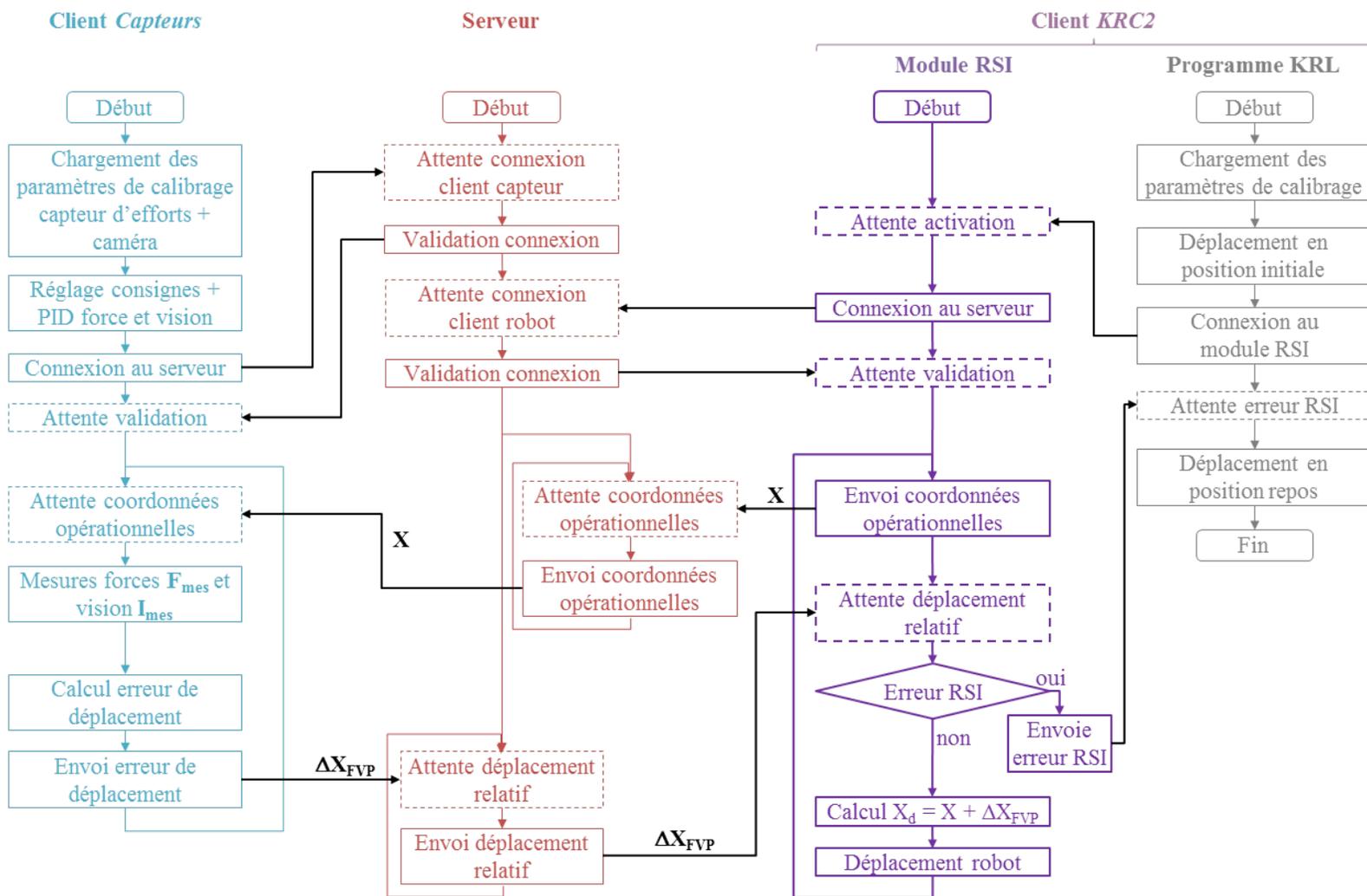


FIGURE 5.16 – Architecture logicielle

5.2.6 Implémentation

Le développement des interfaces (serveur, capteur d'efforts) est réalisé en langage C# dans l'environnement de développement Visual Studio dans le but d'uniformiser les sources, d'avoir une maintenance aisée, de permettre une utilisation plus rapide des fichiers dll de calculs. Le langage C# est un langage de programmation orienté objet. Enfin, ce type de développement permet la portabilité sur les différents windows quelle que soit la version utilisée. EmguCV est également utilisé. Il s'agit d'une encapsulation en langage C# d'OpenCV (développé en langage C) permettant d'effectuer toutes les tâches basiques de traitement et d'analyse d'image.

L'interface graphique dédiée à l'application client "capteur" (Fig. 5.17) est composée de sept parties.

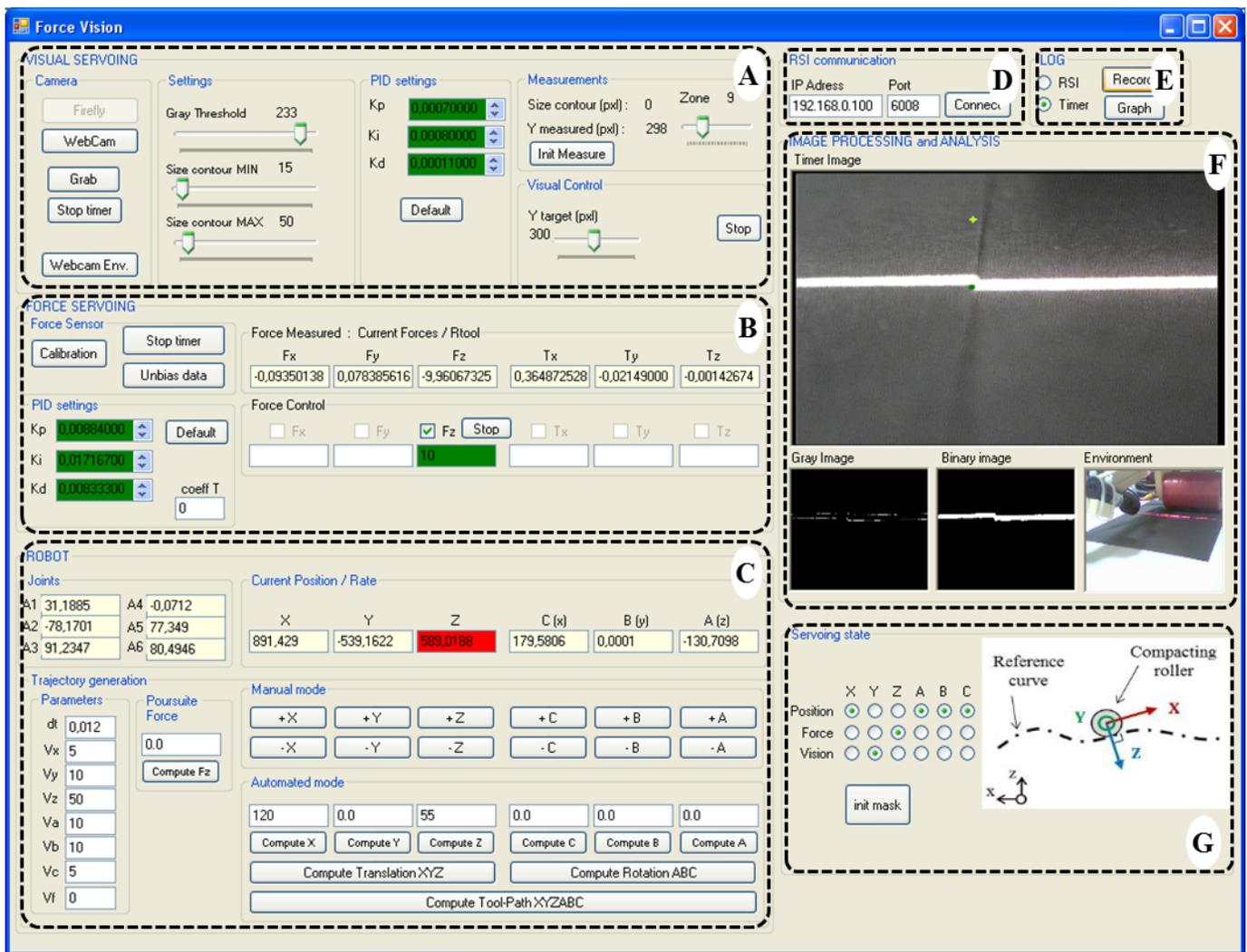


FIGURE 5.17 – Interface graphique de l'application

- *Vision* : partie A.

Dans cette partie, il est possible de se connecter à une caméra qui va permettre de réaliser l'asservissement visuel mais il est également possible de se connecter à une autre caméra qui va permettre la visualisation de l'environnement. Une fois la connexion avec la première caméra établie, il est possible de régler des paramètres concernant le traitement et l'analyse d'image. En ce qui concerne l'asservissement visuel, l'utilisateur doit régler les coefficients du correcteur PID et il doit choisir la cible en pixel s'il choisit de

commander la direction le long de l'axe y en vision. La valeur en pixel de la mesure du bord de bande est également affichée dans cette partie. Si la direction y est commandée via l'asservissement visuel, elle ne peut être commandée ni en position ni en force à cause des matrices de sélection (visualisables en zone G).

- *Force* : partie B.

Dans cette partie, il est possible de se connecter au capteur d'efforts qui est fixé sur le poignet du robot. Une fois la connexion établie, le fichier de calibration est chargé et un zéro doit être fait (les mesures doivent être débiaisées pour enlever l'effet de la gravité notamment). En ce qui concerne l'asservissement en effort, l'utilisateur doit régler les coefficients du correcteur PID et il doit déterminer la consigne sur la direction voulue. En accord avec les matrices de sélection, les directions commandées en force ne peuvent être commandées ni en position ni en vision. Les efforts et les moments mesurés sont également affichés en Newton et $\text{Newton} \times \text{mètre}$.

- *Robot* : partie C.

Cette partie permet l'affichage des valeurs des articulations du robot et des coordonnées cartésiennes de l'outil dans le repère de référence. Ces valeurs sont rafraîchies toutes les 12 ms. Concernant la génération de trajectoire, il est possible de régler les paramètres de vitesses de chaque direction. Ensuite, la génération de trajectoire peut se faire en mode manuel ou en mode automatique. Dans ce dernier cas, il s'agit d'entrer une valeur de déplacement en millimètres suivant la direction désirée et le robot exécute la commande. Les trajectoires sont générées en mouvements linéaires pour le module RSI. En accord avec les matrices de sélection, les directions commandées en position ne peuvent être commandées ni en force ni en vision.

- *Communication* : partie D.

Cette partie permet de se connecter au serveur pour pouvoir communiquer avec le module RSI lorsque ce dernier sera connecté.

- *Enregistrement* : partie E.

Dans cette partie, les données sont enregistrées dans un fichier texte qui peut être ouvert avec le logiciel MATLAB® pour analyser et afficher les résultats. Les données sont composées de la position - orientation de l'outil dans le repère de référence $[x, y, z, A, B, C]$, des mesures des efforts et des moments $[Fx, Fy, Fz, Tx, Ty, Tz]$ et de la mesure de la détection du bord de bande I_y .

- *Affichage* : partie F.

Cette partie permet l'affichage du traitement et de l'analyse d'image ainsi que l'affichage de l'environnement. Les variables telles que les efforts désirés, les efforts mesurés, la position de l'effecteur ainsi que la détection du bord de bande dans l'image peuvent être affichées si besoin (non montrées dans cette figure).

- *Etat du système* : partie G.

La figure permet de faire un bref rappel sur les directions de la tâche. A gauche de la figure, un résumé des matrices de sélection est affiché. Il s'agit de visualiser rapidement quelles directions sont commandées en

position, en force ou en vision.

5.3 Effort de compactage

5.3.1 Introduction

Pour contrôler uniquement l'effort de compactage dans un premier temps, l'approche mono-capteur est mise en œuvre. La génération de consigne à partir de l'erreur en effort ainsi que les résultats expérimentaux sont présentés.

5.3.2 Génération de consigne à partir de l'erreur en effort

Nous rappelons que la boucle de commande en position interne du robot est vue comme une boîte noire à laquelle nous n'avons pas l'accès pour des questions de garantie. Le module RSI est l'intermédiaire entre la boucle de position interne et la boucle de commande externe. Vu que la génération de trajectoire ne peut pas se faire en langage KRL, il faut donc générer la trajectoire via une autre boucle de commande en position. Sachant que la dualité de commande impose qu'une direction soit commandée par un seul type de commande, alors il faut ajouter une matrice de sélection S_p orthogonale à la matrice de sélection S_f . Lorsque le système est commandé en force et moment pour l'effort de compactage selon la direction z et la répartition de l'effort autour de l'axe x , on a donc :

$$S_p = (1, 1, 0, 1, 1, 0)$$

$$S_f = (0, 0, 1, 1, 0, 0)$$

La boucle de commande en force permet de calculer un incrément en millimètres et en degrés que le robot doit appliquer afin de corriger la position-orientation de l'outil de placement de fibres. Cet incrément correspond aux erreurs de force et moment calculées entre la mesure du capteur d'effort et la consigne désirée en utilisant le transport des efforts décrit en section 4.3.1. Ainsi, l'incrément le long de l'axe z et l'incrément autour de l'axe x sont calculés grâce à la génération de consigne à partir de l'erreur en force. Cette loi a été décrite en section 4.5.

La figure 5.18 montre le mécanisme de la commande hybride externe force - position. Tout d'abord, le torseur désiré F_{des} est comparé au torseur mesuré F_{mes} . L'erreur en effort ΔF est convertie en incrément de position ΔX_F grâce à la génération de consigne à partir de l'erreur en force (GCF). Simultanément, la position - orientation désirée X_{des} est comparée à la position - orientation mesurée X . L'erreur ΔX est convertie en ΔX_P grâce à la génération de consigne à partir de l'erreur en position (GCP). Enfin, l'erreur de position ΔX_{FP} est composée de directions contrôlées en effort, et les autres directions sont contrôlées en position à cause de la dualité de commande. Cet incrément de position et orientation est envoyé au module RSI. Ce dernier y ajoute la position courante afin d'obtenir la nouvelle position et l'orientation désirées X_d et l'envoie à la boucle de commande en position interne.

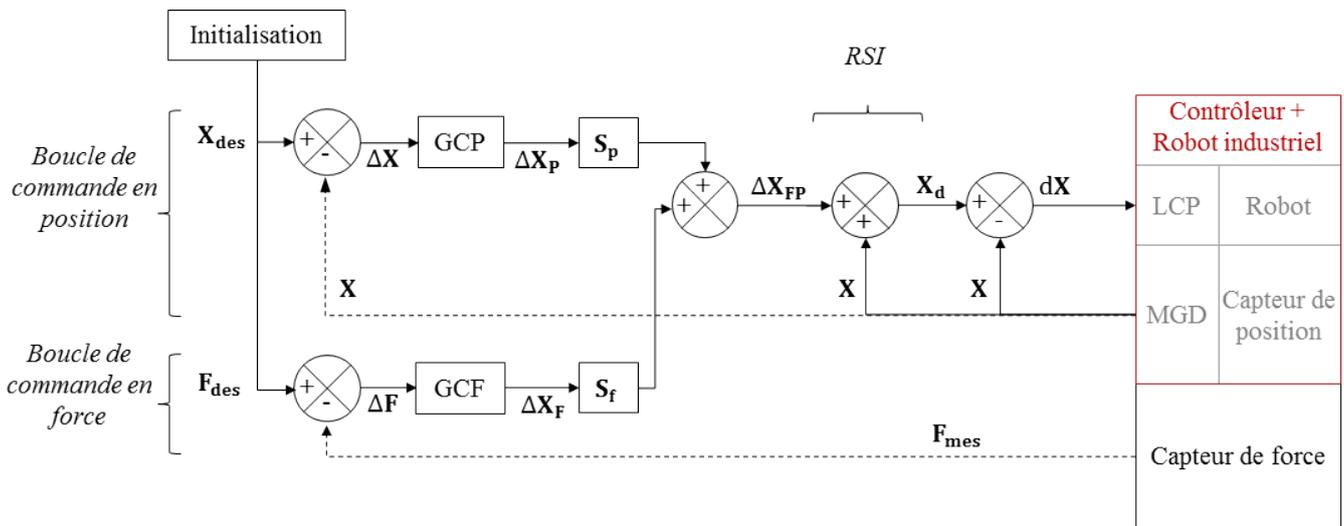


FIGURE 5.18 – Schéma de l'asservissement en position - force

5.3.3 Résultats expérimentaux

Asservissement en force suivant l'axe z sans déplacement le long de l'axe x

Nous présentons ici quelques résultats de la commande en effort le long de l'axe z sans déplacement sur les cinq autres directions. L'objectif de ces essais est de valider les réglages des paramètres du correcteur PID pour la génération de consigne à partir de l'erreur en force du schéma de commande hybride position/force (Fig. 5.18). Nous avons effectué deux types de tests :

- réponse à un échelon (0 N à 20 N),
- suivi d'une rampe (10 N à 40 N).

Réponse à un échelon : Figure 5.19, nous pouvons voir que le déplacement le long de l'axe z démarre quand l'échelon de consigne est actif (à $t = 1600$ ms). La première partie de ce déplacement n'apporte pas de changement sur la mesure de l'effort car le rouleau de compactage n'est pas en contact avec la surface du moule. Ensuite (à $t = 3300$ ms), la force de contact apparaît et l'outil continue de se déplacer le long de l'axe z pour atteindre la consigne de 20 N. Un léger dépassement de 1,64 N (+8 %) est observé et ensuite la force mesurée atteint la valeur de la consigne. Nous pouvons noter que l'erreur finale est très faible (moins de ± 2 %).

Suivi de rampe : Figure 5.20, nous présentons le résultat pour la réponse à une montée en rampe. Avant la montée, l'effort est régulé à 10 N qui est la valeur de départ de la rampe. Le déplacement le long de l'axe z a également le profil d'une rampe mais nous pouvons voir la non-linéarité de la rigidité du rouleau de compactage. La réponse du système peut être divisée en deux parties :

- de 2428 ms à 4442 ms,
- de 4442 ms à 31530 ms.

Dans la première partie, nous pouvons noter que l'erreur de suivi est très petite (moins de ± 5 %) et qu'il faut 2014 ms pour atteindre la consigne. Dans la seconde partie, l'erreur moyenne est d'environ $\pm 0,13$ N et la déviation maximale est égale à 0,38 N (1,42 %).

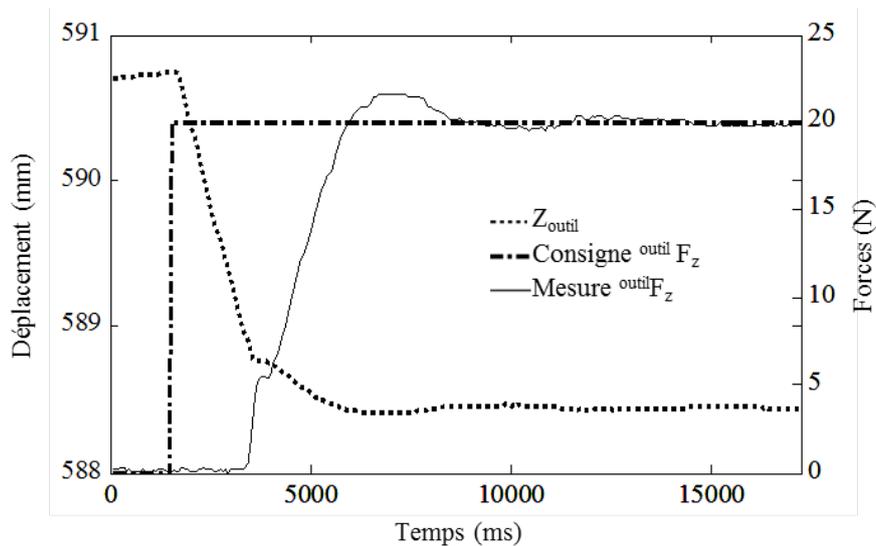


FIGURE 5.19 – Asservissement en effort avec réponse à un échelon

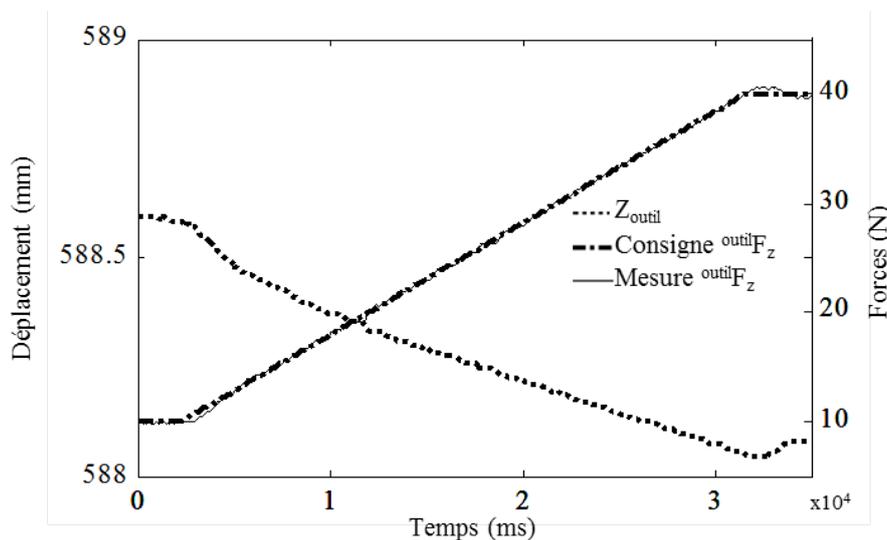


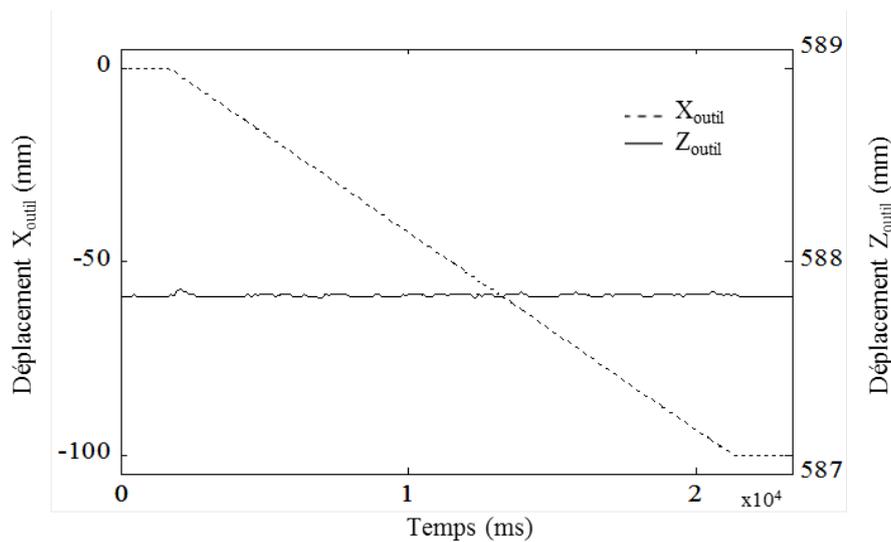
FIGURE 5.20 – Asservissement en effort avec montée en rampe

Les paramètres du correcteur PID (pour la génération de consigne à partir de l'erreur en force) ont été réglés expérimentalement et le comportement du système est suffisamment correct pour ajouter la simulation du procédé de drapage en utilisant l'asservissement en position le long de l'axe x .

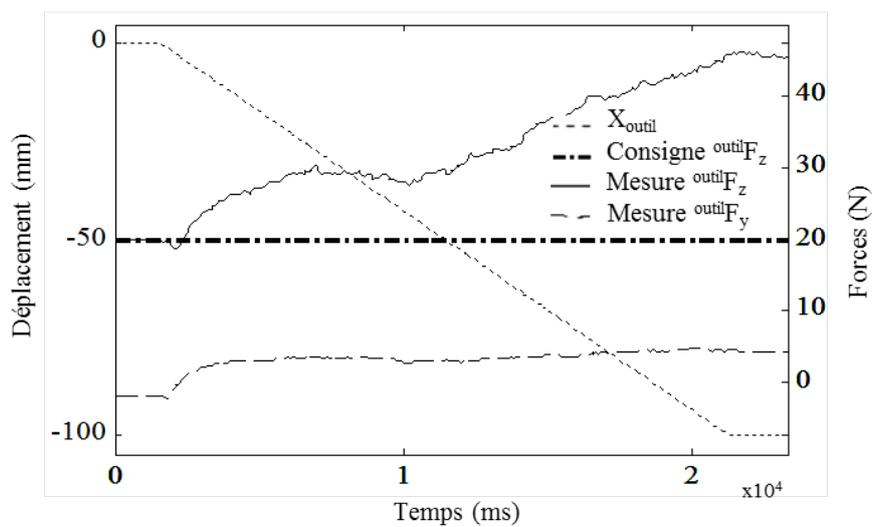
Asservissement en force le long de l'axe z avec déplacement le long de l'axe x

Pour observer l'effet de l'asservissement en force sur la tâche de placement de fibres automatisé, nous avons mis en place deux scénarios de test. Nous changeons seulement le fait que les forces / moments soient surveillés ou commandés. Nous simulons le procédé de drapage sur un plan horizontal ainsi la coordonnée suivant l'axe z de l'outil de placement de fibres doit rester constante par rapport au repère de l'atelier. Le mouvement est seulement le long de l'axe x du repère de l'effecteur et le déplacement est de 100 mm.

Commande en position de l'effort de compactage : Pour cet essai, le système est commandé en position comme l'implémentation actuelle. Lorsque l'outil se déplace le long de l'axe x (Fig. 5.21-a), la position de l'outil le long de l'axe z est presque constante (bruit du calcul du modèle cinématique) et l'effort de compactage augmente de manière importante de 20 N à 45 N (Fig. 5.21-b) alors que la valeur attendue était de 20 N. En fait, ceci montre que les hypothèses sur l'horizontalité et la planéité de la surface de drapage ne sont pas vraies ou que l'effecteur n'est pas correctement orienté pour avoir l'axe z dirigé verticalement vers le sol. De plus, nous pouvons noter qu'un effort le long de l'axe y apparaît avec une valeur moyenne de 5 N. Cette force ne devrait pas apparaître si le mouvement du rouleau de compactage était un roulement pur. La force le long de l'axe y aura tendance à générer un déplacement non désiré le long de cet axe. Le déplacement non désiré le long de l'axe y est celui qui va conduire à un non respect de l'intervalle entre deux bandes durant la dépose des fibres.



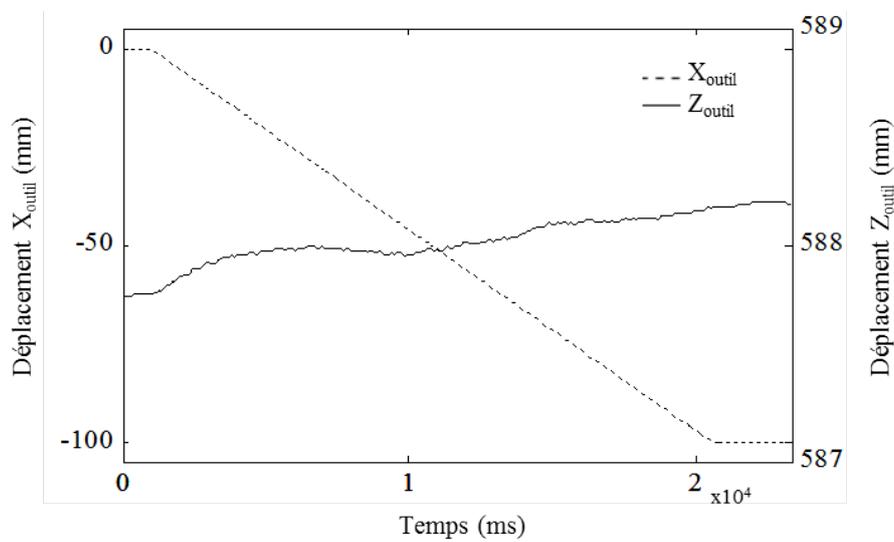
(a)



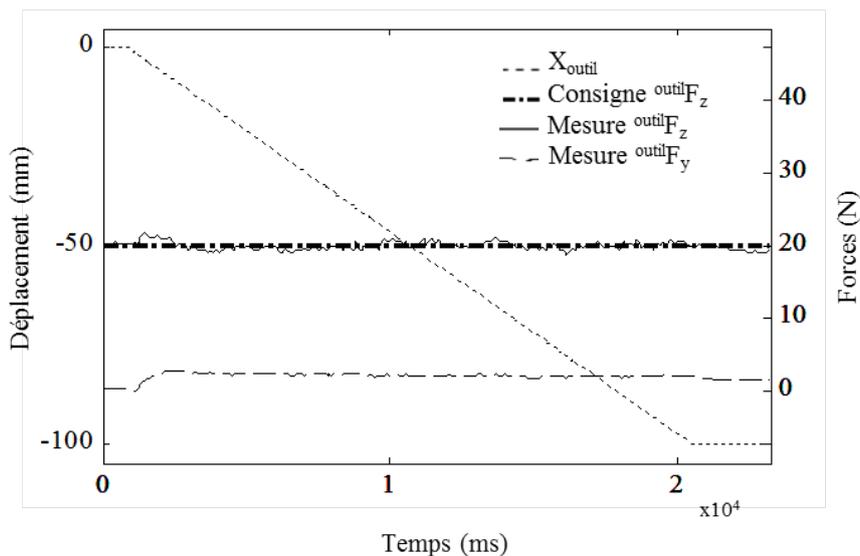
(b)

FIGURE 5.21 – Effort de compactage commandé en position pendant le déplacement

Commande en force de l'effort de compactage : Pour cet essai, le système est commandé via la boucle de commande hybride externe position/force. Dans ce cas, la position de l'outil est corrigée le long de l'axe z de l'effecteur (Fig. 5.22-a) afin de maintenir l'effort de compactage à la valeur désirée de 20 N grâce à la boucle d'asservissement en effort. La force mesurée le long de l'axe z est maintenue autour de la consigne de 20 N (Fig. 5.22-b). En fait, l'outil doit descendre sur la surface d'environ $\pm 0,25$ mm le long de l'axe z pour maintenir l'effort de compactage et les oscillations sont autour de la consigne de 20 N pendant le déplacement. Nous pouvons observer que l'effort non désiré le long de l'axe y a diminué jusqu'à 1,8 N. Cette valeur était de 5 N lorsqu'il n'y avait pas la commande en force. Avec l'asservissement en force, nous avons montré que les forces et les moments indésirables sur les directions contrôlées en position sont inférieurs ainsi la trajectoire de la dépose des fibres sera moins perturbée.



(a)



(b)

FIGURE 5.22 – Effort de compactage commandé en force pendant le déplacement

Essais quantitatifs

Afin de voir les améliorations sur le système avec l'asservissement en effort pendant la simulation de dépose des fibres, des essais quantitatifs sont réalisés. Le premier essai consiste à asservir le système en force pour l'effort de compactage F_z pendant que le robot avance le long de l'axe x de l'outil. Cet essai est réalisé pour les consignes allant de 10 N à 80 N avec un intervalle de consigne de 5 N. La moyenne sur la mesure ainsi que l'écart-type sont calculés pour chaque consigne (Fig. 5.23). On peut voir que pour chaque essai, la moyenne est autour de la consigne avec un écart-type variant de 0,35 N à 0,73 N.

Sur les mêmes informations données par l'essai précédent, l'erreur en Newton et l'erreur en pourcentage sur F_z par rapport à la consigne sont calculées (Fig. 5.24). L'erreur en Newton entre la moyenne et la consigne pour l'effort de compactage varie entre -0,027 N et -0,068 N quelle que soit la consigne. On a donc une erreur moyenne de -0,050 N sur l'ensemble des essais. Lorsqu'on calcule l'erreur relative en pourcentage par rapport à la consigne, on se rend compte que plus la consigne est élevée, plus ce pourcentage diminue. Cette caractéristique est pertinente car les consignes du processus sont supérieures à 50 N (sauf pour la fibre sèche 5 N).

Le deuxième essai consiste à faire une comparaison entre l'asservissement en position et l'asservissement en force de F_z sur l'effort parasite F_y . Par conséquent, pour chaque consigne de F_z allant de 10 N à 40 N pendant le drapage, le système est d'abord asservi en position puis en force et l'effort parasite F_y est mesuré. Ensuite, la diminution sur l'effort parasite est calculée grâce à l'asservissement en force (Fig. 5.25). La diminution varie entre 3 % et 18 % avec une valeur moyenne de 14 %.

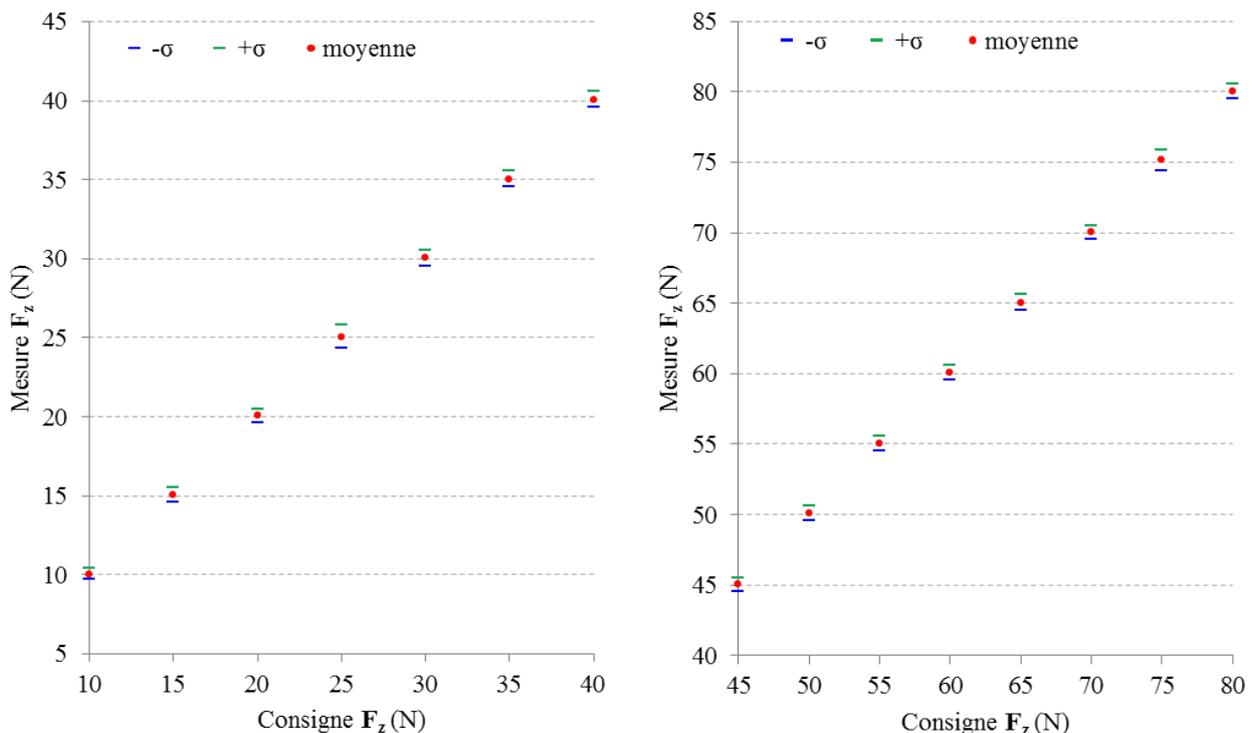


FIGURE 5.23 – Moyenne et écart-type sur la mesure F_z pendant la simulation de drapage asservie en force

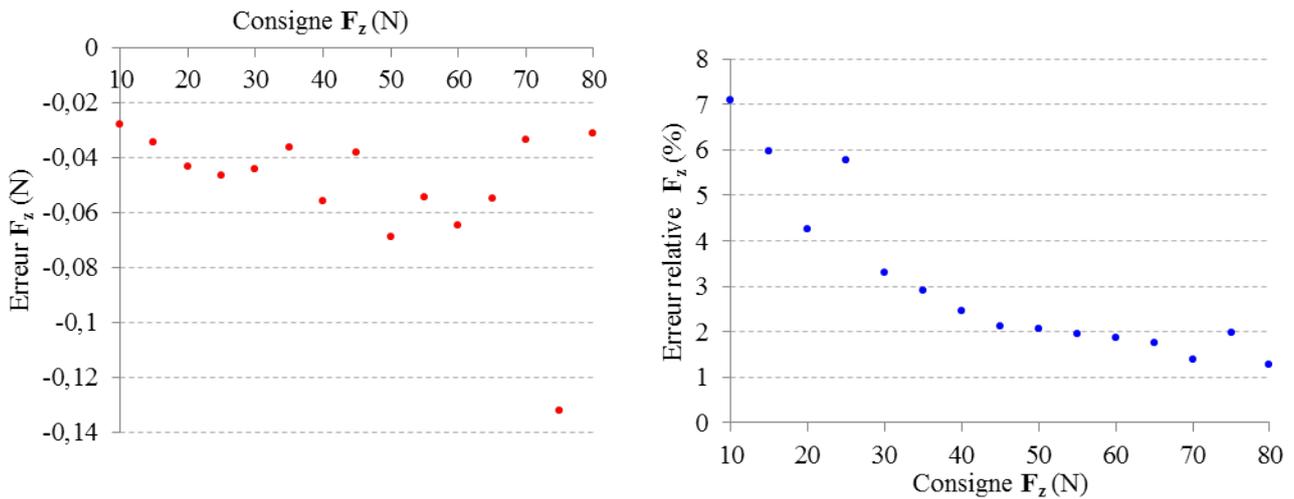


FIGURE 5.24 – Erreur de mesure sur F_z pendant la simulation de drapage asservie en force

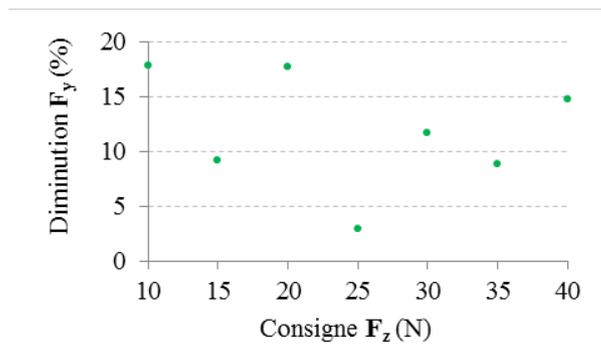


FIGURE 5.25 – Diminution de l'effort parasite F_y entre l'asservissement en position et en force pendant la simulation de drapage

5.3.4 Bilan

D'après ces expérimentations, on voit qu'avec l'utilisation de la commande en position pour générer un effort de compactage, celui-ci n'est pas constant et des efforts parasites apparaissent. En revanche, avec la commande en effort, il y a moins d'efforts parasites dans les directions commandées en position-orientation. L'effort le long de l'axe y , qui n'a pas lieu d'être, diminue avec cette commande d'environ 14 % dans notre expérimentation. Du coup, il y a moins de déplacement parasite suivant cet axe et la trajectoire théorique issue de la CAO est mieux suivie par l'outil (à vérifier au passage à l'échelle du processus : robot KR240 et effort compris entre 100 N et 500 N). L'interaction entre le rouleau et le moule ayant un comportement non linéaire (la raideur est variable), la structure du correcteur PID doit être améliorée pour prendre en compte ce comportement.

Ces résultats ont fait l'objet d'un article qui a été présenté à la conférence ICCM19 [Uhart et al., 2013].

5.4 Positionnement des bandes

5.4.1 Introduction

Pour contrôler uniquement le positionnement des bandes dans un premier temps, l'approche mono-capteur est mise en œuvre. La génération de consigne à partir de l'erreur en vision ainsi que les résultats expérimentaux sont présentés.

5.4.2 Génération de consigne à partir de l'erreur en vision

En section 5.3.2, nous avons vu que l'accès direct à la boucle de commande en position interne du robot n'était pas possible. En revanche, le module RSI est une porte ouverte du contrôleur KRC2 qui nous contraint à générer la trajectoire via une autre boucle de commande en position. Sachant que la dualité de commande impose qu'une direction soit commandée par un seul type de commande, alors il faut ajouter une matrice de sélection S_p orthogonale à la matrice de sélection S_v . Lorsque le système est commandé en vision le long de la direction y , on a donc :

$$S_p = (1, 0, 1, 1, 1, 1)$$

$$S_v = (0, 1, 0, 0, 0, 0)$$

La boucle de commande en vision permet de calculer un incrément en millimètres que l'outil de placement de fibres doit atteindre. Cet incrément correspond à l'erreur en pixel calculée entre la cible et le bord de bande détecté. Ainsi, l'incrément le long de l'axe y est calculé grâce à la génération de trajectoire à partir de l'erreur en vision. Cette loi a été décrite en section 4.5.

La figure 5.26 présente le mécanisme de la commande hybride externe position - vision. Tout d'abord, la position désirée du bord de bande dans l'image I_{des} est comparée à la position mesurée dans l'image I_{mes} . L'erreur en pixels ΔI est convertie en incrément de position en millimètres ΔX_V grâce à la génération de consigne à partir de l'erreur en vision (GCV). Simultanément, la position - orientation désirée X_{des} est comparée à la position - orientation mesurée X . L'erreur ΔX est convertie en ΔX_P grâce à la génération de consigne à partir de l'erreur en position (GCP). Enfin, l'erreur de position ΔX_{VP} est composée d'une direction commandée en vision, et les autres directions sont commandées en position à cause de la dualité de commande. Cet incrément de position-orientation est envoyé au module RSI. Ce dernier y ajoute la position courante afin d'obtenir la nouvelle position - orientation désirée X_d et l'envoie à la boucle de commande en position interne.

5.4.3 Résultats expérimentaux

Tout d'abord, le traitement d'image ainsi que l'asservissement visuel sans déplacement est présenté. Ensuite, les résultats obtenus avec la commande en position et la commande hybride externe position/vision sont exposés.

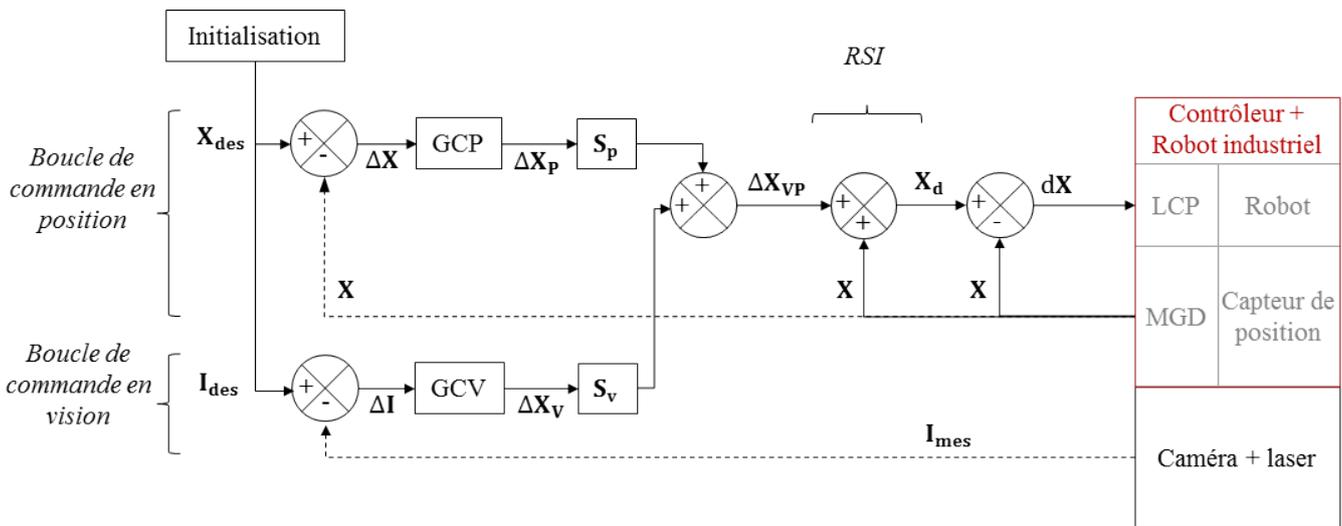


FIGURE 5.26 – Schéma de commande de l'asservissement position - vision

Détection du bord de bande

Comme le système de vision est embarqué avec un éclairage actif (faisceau laser), le traitement d'image est beaucoup plus simple que dans un environnement naturel. La figure 5.27 montre la projection du trait laser sur les fibres de carbone. Le positionnement du triplet [source laser - caméra - rouleau de compactage] étant connu, le traitement d'image peut se faire sur une sous-image. Donc, le traitement d'image n'a pas besoin d'être fait sur toute l'image. Dans cette sous-image, l'épaisseur du pli de 0,3 mm correspond à 10 pixels (Fig. 5.11). Ainsi, le temps du traitement d'image est très petit et la fréquence d'acquisition-analyse peut être importante.

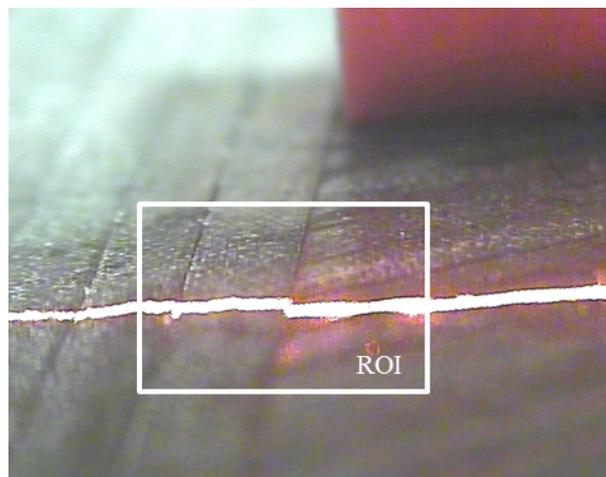


FIGURE 5.27 – Image capturée

Les étapes du traitement d'image sont les suivantes :

- Capture de l'image en couleurs,
- Conversion en niveaux de gris,
- Binarisation de l'image,
- Détection des contours (filtre de Canny),

- Analyse des contours (approximation polyligne),
- Détection du bord de bande (changement d'épaisseur sur la ligne laser).

Le résultat du traitement d'image typique est montré en Fig. 5.28. On peut voir l'approximation polyligne des contours trouvés avec le détecteur de Canny. La détection du bord de bande se trouve entre les extrema.

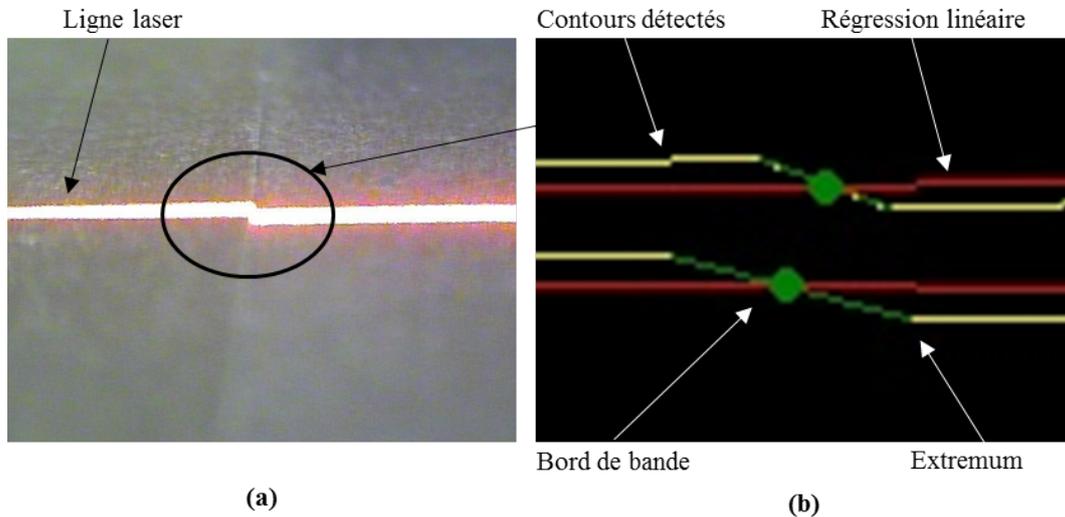


FIGURE 5.28 – Analyse polyline de l'image (a) Image d'origine (b) Bord de bande détecté

Asservissement en vision le long de l'axe y sans déplacement le long de l'axe x

L'objectif de cet essai est de valider les réglages des paramètres du correcteur PID pour la génération de consigne à partir de l'erreur en vision du schéma de commande hybride position/vision (Fig. 5.26). Le robot doit faire une régulation autour de la consigne qui est de 300 pixels sur l'image.

Figure 5.29, nous pouvons voir que le déplacement le long de l'axe y démarre quand l'échelon de consigne est actif (à $t = 1100$ ms). Lorsque l'asservissement visuel est actif, la détection du bord de bande converge vers la valeur de la cible avec une précision de ± 2 pixels. Les paramètres du correcteur PID (pour la génération de consigne à partir de l'erreur en vision) ont été réglés expérimentalement et le comportement du système est suffisamment performant pour ajouter la simulation du procédé de drapage en utilisant l'asservissement en position le long de l'axe x .

Asservissement en vision le long de l'axe y avec déplacement le long de l'axe x

Pour pouvoir mesurer l'amélioration du placement de bandes, nous avons mis en place deux scénarios de tests. Nous changeons uniquement le fait que les données visuelles soient surveillées ou commandées. Le procédé de drapage est simulé sur un plan horizontal. Ainsi, la coordonnée suivant l'axe z de l'effecteur devrait être à une valeur constante dans le repère de l'atelier. Le mouvement est uniquement le long de l'axe x du repère de l'outil et le déplacement est de 120 mm.

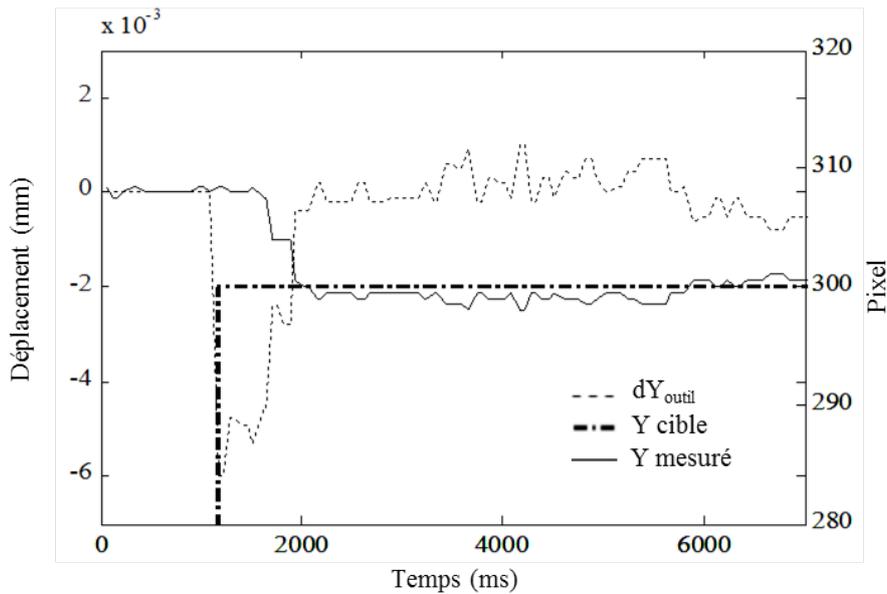


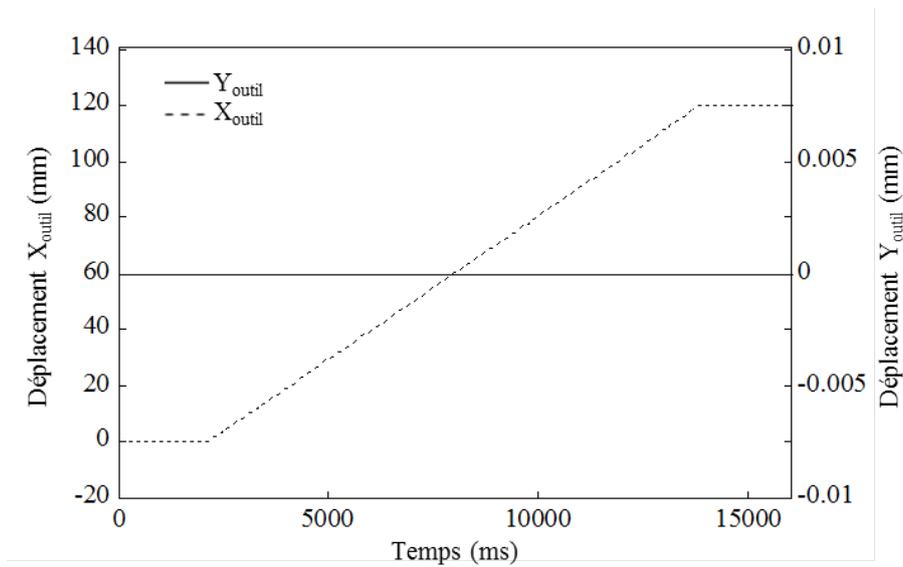
FIGURE 5.29 – Asservissement visuel pour réponse à un échelon

Commande en position du positionnement des bandes : Pour cet essai, le système est commandé en position comme l'implémentation actuelle. Pendant le déplacement le long de l'axe x , la position en pixel le long de l'axe y du bord de bande précédente détecté est mesurée et comparée à la position de la cible. Lorsque l'outil se déplace le long de l'axe x sur 120 mm, la position de l'outil le long de l'axe y est constante (Fig. 5.30-a). Cependant, la position du bord de bande mesuré le long de l'axe y en pixel sur l'image est différente de la cible spécifiée au départ (Fig. 5.30-b). On peut voir que l'espacement entre la bande en cours de dépose et la bande précédente est de plus en plus important. L'écart en pixels est converti en millimètres, grâce aux résultats de calibrage de la caméra. Le décalage est d'environ 1,5 mm à la fin du déplacement. Ceci montre que l'axe x de l'effecteur n'était pas rigoureusement parallèle au bord de bande précédent.

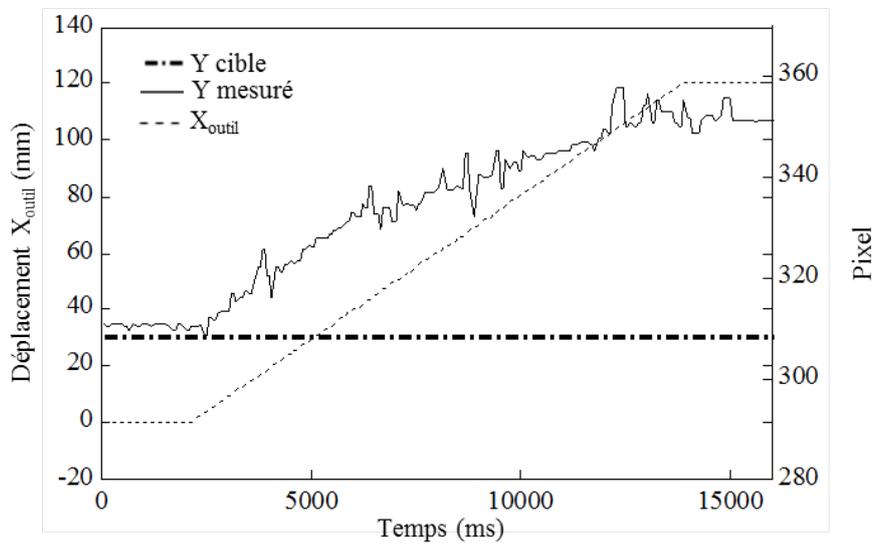
Commande en vision du positionnement des bandes : Pour cet essai, le système est commandé via la boucle de commande hybride externe position/vision. Dans ce cas, la position de l'outil est corrigée le long de l'axe y de l'effecteur (Fig. 5.31-a) afin de maintenir le bord de bande détecté aligné sur la cible grâce à la boucle d'asservissement en vision. La position mesurée le long de l'axe y est maintenue autour de la consigne de 300 pixels sur l'image (Fig. 5.31-b). L'erreur moyenne est égale à 2 pixels, ce qui représente 0,06 mm. La déviation maximale est égale à ± 12 pixels ou $\pm 0,36$ mm due principalement à la détection du bord de bande.

5.4.4 Bilan

D'après ces expérimentations, on voit que si la position de la première bande ne correspond pas à la position de la bande théorique, un espacement ou recouvrement entre deux bandes sera inévitable. Cependant, la commande hybride externe position/vision a un impact positif sur le système pour améliorer sa précision puisque les deux bandes sont correctement alignées. Enfin, si le trait laser projeté sur la surface est plus fin, la détection du bord de bande pourra être plus robuste.



(a)



(b)

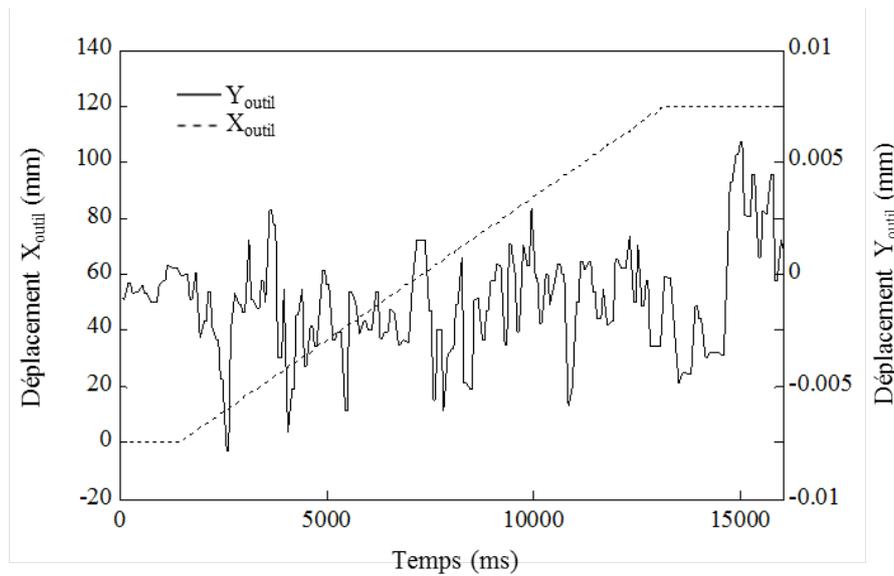
FIGURE 5.30 – Détection du bord de bande pendant le déplacement le long de l'axe x de l'outil

Ces résultats ont fait l'objet d'un article qui a été présenté à la conférence ACMA2014 [Uhart et al., 2014a].

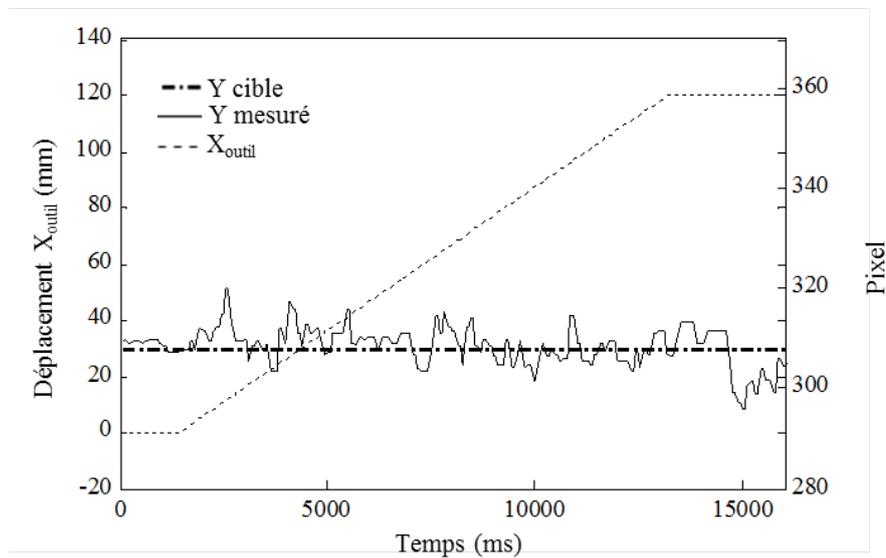
5.5 Asservissement Position-Force-Vision

5.5.1 Introduction

Pour contrôler l'effort de compactage et le positionnement des bandes, l'approche multi-capteurs est mise en œuvre. La génération de consigne ainsi que les résultats expérimentaux sont présentés.



(a)



(b)

FIGURE 5.31 – Asservissement visuel le long de l'axe y pendant le déplacement le long de l'axe x

5.5.2 Génération de consigne

Dans les sections précédentes l'asservissement en force et l'asservissement visuel ont été implémentés de manière indépendante. Dans l'approche mixte, les deux asservissements vont pouvoir travailler ensemble.

Pour choisir quelle direction est commandée en position, en force ou en vision, les matrices de sélection sont modifiées en fonction des étapes du procédé de drapage (Tab. 5.1). Durant l'étape 1, l'effecteur descend à une position proche de la surface du moule et toutes les directions sont commandées en position. Durant l'étape 2, la position de l'effecteur le long de l'axe y est corrigée afin d'être aligné sur le bord de la bande précédente. Ici, la position le long de l'axe y est commandée en vision et toutes les autres directions sont commandées en position. Durant l'étape 3, l'effecteur descend sur la surface au contact pour obtenir l'effort de compactage désiré et une répartition de l'effort correcte tout en gardant une position latérale alignée sur

TABLE 5.1 – Matrices de sélection en fonction des étapes du drapage

Step	1	2	3	4	5
S_p	[1, 1, 1, 1, 1, 1]	[1, 0, 1, 1, 1, 1]	[1, 0, 0, 0, 1, 1]	[1, 0, 0, 0, 1, 1]	[1, 1, 1, 1, 1, 1]
S_f	[0, 0, 0, 0, 0, 0]	[0, 0, 0, 0, 0, 0]	[0, 0, 1, 1, 0, 0]	[0, 0, 1, 1, 0, 0]	[0, 0, 0, 0, 0, 0]
S_v	[0, 0, 0, 0, 0, 0]	[0, 1, 0, 0, 0, 0]	[0, 1, 0, 0, 0, 0]	[0, 1, 0, 0, 0, 0]	[0, 0, 0, 0, 0, 0]

la bande précédente. Ici, la position le long de l'axe y est commandée en vision, la direction le long de l'axe z est commandée en force, la direction x est commandée en moment et toutes les autres directions sont commandées en position. Durant l'étape 4, l'outil de placement se déplace le long de l'axe x pour déposer une bande tout en appliquant l'effort de compactage désiré avec une bonne distribution de l'effort et une position latérale correcte. Donc, les directions sont commandées de la même manière que durant l'étape 3. Durant l'étape 5, l'effecteur se dégage au dessus de la surface. Toutes les directions sont commandées en position.

Figure 5.32, le mécanisme de l'intégration des capteurs est présenté, avec les trois boucles externes qui permettent l'intégration de la boucle de commande en position, la boucle de commande en force et la boucle de commande en vision. La dualité de commande permettant à une direction d'être commandée par un seul type de commande, les matrices de sélection S_p , S_f et S_v déterminent par quel type de commande chaque direction est commandée. Les trois matrices de sélection sont orthogonales deux à deux. On a donc : $S_p \perp S_f \perp S_v$. Ainsi, l'incrément de position ΔX_{FVP} est calculé à partir de l'asservissement en position et/ou de l'asservissement en force et/ou de l'asservissement visuel. Ce schéma de contrôle intègre le schéma de commande en force (Fig. 5.18) et le schéma de commande de l'asservissement visuel (Fig. 5.26).

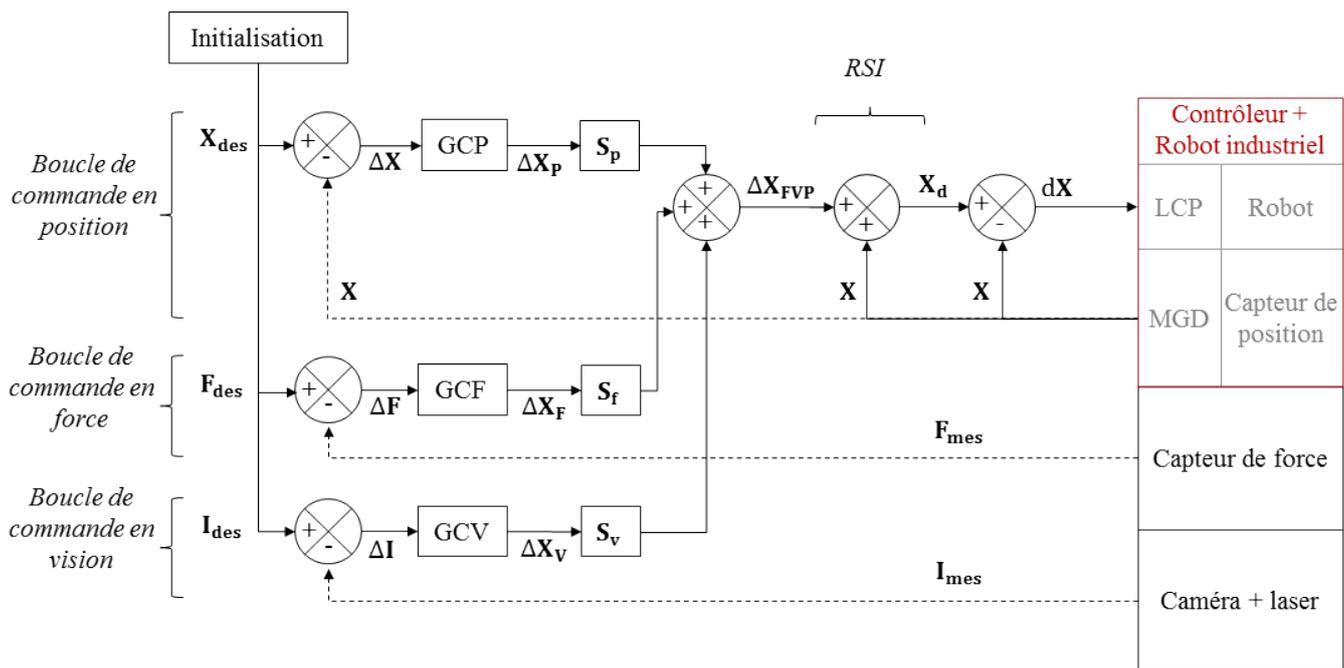


FIGURE 5.32 – Schéma de commande de l'asservissement position - force - vision

5.5.3 Résultats expérimentaux

Comme la tâche de placement de fibres nécessite en même temps l'effort de compactage, la trajectoire géométrique de la bande dans le pli et le contrôle de l'intervalle de bandes, nous avons mis en place sur notre dispositif expérimental le schéma de contrôle proposé Fig. 5.32.

Dans ce test, l'asservissement en effort le long de l'axe z et l'asservissement en vision le long de l'axe y sont actifs durant le déplacement de l'outil le long de l'axe x de 120 mm. Le système est commandé avec un asservissement hybride position / force / vision. Nous simulons le procédé de dépose des fibres sur un plan horizontal à côté d'une bande déjà déposée.

La figure 5.33-a montre l'asservissement en force de l'effort de compactage F_z . La position de l'outil est corrigée le long de l'axe z du repère de l'effecteur afin de maintenir un effort de compactage à la valeur désirée de 10 N. La force mesurée le long de l'axe z varie autour de la consigne de 10 N. La déviation maximale est égale à ± 2 N. Cette valeur est pratiquement constante à l'égard de l'effort de compactage (de 10 N à 40 N). Par conséquent, l'erreur relative diminue avec l'augmentation de la consigne de l'effort de compactage.

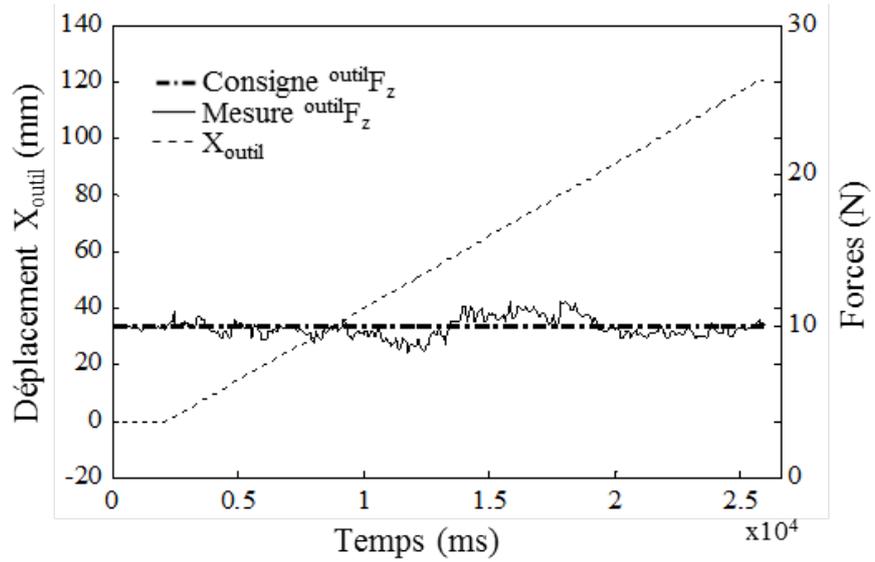
La figure 5.33-b montre l'asservissement visuel sur la position latérale de la bande déposée. La position de l'outil est corrigée le long de l'axe y du repère de l'outil afin d'être alignée au bord de la bande précédente. La position mesurée de l'outil en pixels sur l'image est maintenue autour de la consigne de 300 pixels. La déviation maximale est égale à $\pm 0,3$ mm.

5.5.4 Bilan

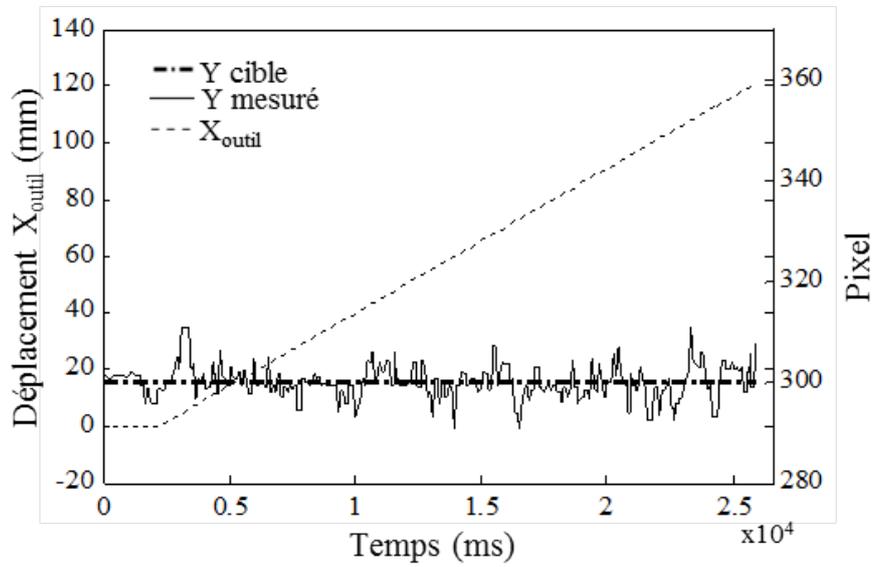
L'approche mixte permet de commander le système de manière complète, c'est-à-dire en commandant l'effort de compactage et sa distribution sur la surface ainsi que la position latérale de la bande. Les réglages du correcteur PID se perturbent entre chaque type de commande. Il faudra donc les améliorer. Ces résultats ont fait l'objet d'un article soumis au journal ROBOTICA [Uhart et al., 2014b].

5.6 Conclusion

Dans les sections 5.3 et 5.4, l'asservissement en force et l'asservissement visuel ont été implémentés séparément. Il s'agissait de deux essais indépendants. Dans le premier cas, nous avons étudié les bénéfices du contrôle de l'effort de compactage le long de l'axe z et du moment autour de l'axe x grâce au schéma de commande en force. Dans le deuxième cas, nous avons étudié les bénéfices du contrôle de la position latérale le long de l'axe y grâce au schéma de commande en vision. Dans le cas de l'approche mixte, nous avons mis les trois types d'asservissement en parallèle : position, force et vision. L'objectif de cette approche est de combiner les approches précédentes pour avoir un système complet et tirer profit des points forts de chaque approche pour la tâche de dépose des fibres. Nous avons pu montrer que sur notre dispositif de laboratoire les deux approches étaient compatibles et que leurs résultats s'ajoutaient mais un test sur le



(a)



(b)

FIGURE 5.33 – Déplacement le long de l'axe x avec (a) asservissement en force le long de l'axe z et (b) asservissement visuel le long de l'axe y

dispositif industriel est bien sûr inévitable.

Conclusions et Perspectives

6.1 Conclusions

Ce mémoire de thèse présente la mise en place d'une commande référencée capteurs sur un système industriel déjà existant afin d'améliorer le procédé de placement de fibres robotisé pour prendre en compte l'effort de compactage et le positionnement de la bande dans la définition du nouveau procédé. L'application industrielle ajoute quelques contraintes techniques à notre implémentation. Par exemple, le contrôleur original du robot ne peut pas être modifié pour des raisons de garantie, donc certains schémas de commande ne peuvent pas être utilisés dans notre cas. La tâche de placement de fibres consiste en une dualité de commandes force et position. En ajoutant un schéma de commande en force, les déplacements parasites sont réduits comparés à la commande en position standard implémentée sur le système industriel afin d'améliorer la qualité de dépose. Ensuite, nous avons proposé un schéma de commande en vision pour gérer la position latérale de la bande afin de contrôler l'espacement entre deux bandes consécutives. Finalement, nous avons trois boucles de commande pour l'asservissement en position, l'asservissement en force et l'asservissement visuel.

Pendant la dépose des fibres, les directions sont commandées comme suit :

- P_x : La translation le long de l'axe x doit être commandée en position pour gérer l'avance du robot ;
 - M_x : L'orientation autour de l'axe x doit être commandée en moment pour répartir correctement l'effort de compactage sur la surface ;
 - I_y : La translation le long de l'axe y doit être commandée en vision pour gérer l'espacement entre la bande précédente et la bande en cours de dépose ;
 - O_y : L'orientation autour de l'axe y doit être commandée en position pour garder l'axe z normal à la surface du moule ;
 - F_z : La translation le long de l'axe z doit être commandée en force pour gérer l'effort de compactage ;
 - O_z : L'orientation autour de l'axe z doit être contrôlée en position pour gérer l'orientation de la bande.
- Grâce aux matrices de sélection, les trois commandes (position - force - vision) peuvent agir en même

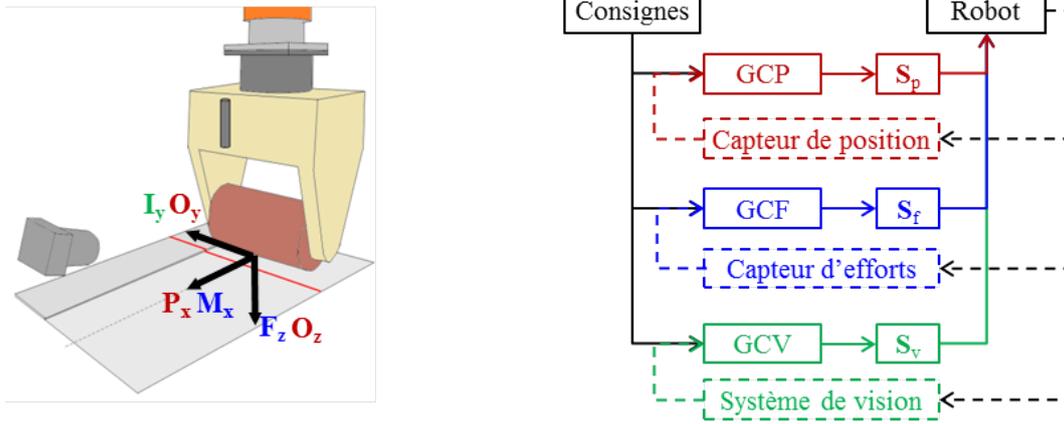


FIGURE 6.1 – Approche proposée

temps sur des directions différentes. Une boucle de commande externe est ajoutée pour chaque type d'asservissement. La figure 6.1 décrit le schéma général de commande avec la génération de consigne à partir de l'erreur en position (GCP), la génération de consigne à partir de l'erreur en force (GCF) et la génération de consigne à partir de l'erreur en vision (GCV).

Ces schémas de commande ont d'abord été testés séparément, puis intégrés ensemble. Dans le système industriel, il n'y a pas de retour d'information sur l'interaction avec l'environnement (ni capteur d'effort ni capteur de vision). L'effort de compactage n'est donc pas garanti et donc la procédure de fabrication n'est pas forcément respectée. Pour éviter le délaminage entre les plis, les industriels ont tendance à utiliser des valeurs importantes pour la commande du vérin pneumatique (commande en boucle ouverte). A cause de la rigidité d'interaction (rouleau de compactage vs moule), une petite différence de moins d'un millimètre entre la CAO du modèle utilisé pour la programmation hors-ligne et l'environnement réel (malgré la calibration) entraîne des efforts qui apparaissent le long des directions commandées en position. Ces forces non désirées créent des déplacements qui rendent impossible un drapage bi-directionnel, ce qui entraîne une perte de temps. En comparaison avec le système industriel, les améliorations du nouveau procédé de laboratoire sont nombreuses :

- une régulation de l'effort de compactage même si des perturbations apparaissent ;
- une meilleure distribution de l'effort sur le rouleau de compactage ;
- une diminution des forces non désirées qui permettent de réduire les déplacement perturbateurs ;
- une régulation de l'intervalle de bande.

L'approche proposée de commande référencée capteurs (force - vision) rend possible la fabrication des pièces avec du drapage bi-directionnel qui permettra de réduire les temps de fabrication.

6.2 Perspectives

Notre schéma de commande globale est composé de trois boucles en parallèle force - vision - position. Les lois de commande sont réglées afin de maximiser leurs performances mais de façon séparée. Dans le système expérimental, nous observons une diminution des performances de chacune des lois lors du couplage

global. Ce phénomène semble lié à la non prise en compte de la déformation du rouleau de compactage dans la définition du repère outil TCP (*Tool Center Point*) alors que les commandes sont définies dans ce dernier. En effet, l'implémentation industrielle ne permet pas pour l'instant de faire un TCP dynamique. Aussi nous envisageons dans le futur d'adresser ce problème en intégrant un modèle de comportement des éléments flexibles qu'ils soient dans l'outil (rouleau de compactage) ou dans l'environnement (détourage de pièce composite flexible). Nous proposons d'utiliser une méthode de plus en plus utilisée pour résoudre les problèmes de simulation de structures multi-échelles réputés difficiles. Il s'agit de la méthode PGD (*Proper Generalized Decomposition*) qui connaît depuis une dizaine d'années un succès croissant et une diffusion dans l'ensemble des champs de la physique. Elle a été utilisée dans le cadre du projet IMPALA pour la modélisation de la chauffe laser [Joyot et al., 2013]. Le principe de cette méthode est de construire un modèle réduit du comportement d'un système physique (l'interaction robot/outil/surface dans notre cas) permettant ensuite d'explorer très rapidement, et de façon cohérente avec une utilisation en temps réel, le comportement du système selon le principe d'abaques numériques multi-paramétriques. Cette méthode présente l'avantage de ne pas imposer de simplification du modèle de comportement du matériau ce qui est indispensable pour traiter le cas des matériaux composites.

La structure de commande hybride externe est implémentée sur le robot KUKA KR6 dont la baie de commande est la KRC2. Un point faible de notre dispositif expérimental est que le contrôleur KUKA KRC2 offre la possibilité de travailler avec une période d'échantillonnage du module RSI de 12 ms, donc la vitesse de la dépose des fibres est limitée. Mais les contrôleurs industriels plus modernes comme le contrôleur KUKA KRC4 offrent une période d'échantillonnage du module RSI de 4 ms, donc la commande peut être exécutée trois fois plus vite.

Un autre point à améliorer est la détection du bord de bande pour améliorer la stabilité de la localisation le long de l'axe y de la bande précédente. Ceci pourrait être traité par un traitement d'image mieux adapté mais aussi par un meilleur dispositif de vision active comprenant un projecteur laser projetant une ligne d'une largeur inférieure au millimètre puisque l'épaisseur de la fibre varie entre 0,1 mm et 0,3 mm.

Notre futur travail sera plus axé sur le transfert de la commande référencée capteurs pour une installation industrielle. Les essais ont été réalisés sur une cellule robotisée de laboratoire qui est similaire à l'industrielle mais à une échelle différente au niveau de la taille et des efforts d'interaction. Pour faire le transfert de technologie vers l'industrie, le système de commande doit être porté sur le robot industriel KR240 avec un capteur d'efforts capable de mesurer un effort de compactage pouvant aller jusqu'à 1500 N pendant le placement de fibres. Ces changements peuvent influencer sur les améliorations attendues présentées dans cette thèse.

La cellule industrielle utilise un faisceau laser de forte puissance pour chauffer les fibres afin d'obtenir un collage correct, la lumière laser est composée de quatre longueurs d'ondes. Pour éviter les perturbations au niveau de la caméra, on prévoit d'utiliser un filtre optique monochromatique, centré sur la fréquence du laser qui projette une ligne laser sur la surface afin d'éviter les fréquences provenant du laser de chauffe.

Bibliographie

- [Astrom and Hagglund, 1995] Astrom, K. and Hagglund, T. (1995). *PID Controllers*. Instrument Society of America, second edition. 55
- [ATI Industrial Automation,] ATI Industrial Automation. ATI Force/Torque Sensor : Gamma. 62
- [Baeten and De Schutter, 1999] Baeten, J. and De Schutter, J. (1999). Improving force controlled planar contour following using online eye-in-hand vision based feedforward. In *Proc. IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (Cat. No.99TH8399)*, pages 902–907, Atlanta, Georgia. 46
- [Bouguet and P. Perona, 1998] Bouguet, J. and P. Perona (1998). Camera calibration from points and lines in dual-space geometry. In *Proc. of the 5th European Conference on Computer Vision*, Freiburg, Germany. 64, 66
- [Bruyninckx and De Schutter, 1996] Bruyninckx, H. and De Schutter, J. (1996). Specification of force-controlled actions in the "task frame formalism". A synthesis. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 12(4) :581–589. 46
- [Chalaye, 2002] Chalaye, H. (2002). Les matériaux composites : Dynamisme et innovation. *SESSI, DiGITIP, Les 4 pages des statistiques industrielles, n°158*. 17
- [Chaumette, 1990] Chaumette, F. (1990). *La relation vision-commande : théorie et application à des tâches robotiques*. PhD thesis, Université de Rennes 1, IRISA. 50
- [Chaumette, 2004] Chaumette, F. (2004). Image Moments : A General and Useful Set of Features for Visual Servoing. *IEEE Trans. on Robotics*, 20(4) :713–723. 50
- [Coriolis-Composites,] Coriolis-Composites. www.coriolis-composites.com. 7, 20
- [Corke, 1996] Corke, P. (1996). *Visual control of robots : High performance visual servoing*. Research Studies Press LTD, Australia. 48, 55
- [De Schutter and Van Brussel, 1988] De Schutter, J. and Van Brussel, H. (1988). Compliant Robot Motion II. A Control Approach Based on External Control Loops. *The International Journal of Robotics Research*, 7(4) :18–33. 44
- [Degoulange et al., 1993] Degoulange, E., Dauchez, P., and Pierrot, F. (1993). "Determination of a force control law for an industrial robot in contact with a rigid environment". In *Proc. IEEE Systems Man and Cybernetics Conference - SMC*, pages 270–275, Le Touquet, France. 42

- [Denavit and Hartenberg, 1955] Denavit, J. and Hartenberg, R. (1955). A kinematic notation for lower pair mechanism based on matrices. *Trans. of ASME, J. of Applied Mechanics*, 22 :215–221. 32
- [Dhome et al., 1989] Dhome, M., Richetin, M., Lapreste, J.-T., and Rives, G. (1989). Determination of the attitude of 3D objects from a single perspective view. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11(12) :1265–1278. 50
- [Dombre et al., 2003] Dombre, E., Duchemin, G., Poignet, P., and Pierrot, F. (2003). Dermarob : a safe robot for reconstructive surgery. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 19(5) :876–884. 46
- [Drake, 1978] Drake, S. H. (1978). *Using compliance in lieu of sensory feedback for automatic assembly*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology. 42
- [Dufournaud et al., 1998] Dufournaud, Y., Horaud, R., and Quan, L. (1998). Robot Stereo-hand Coordination for Grasping Curved Parts. In *Proc. of the 9th British Machine Vision Conference (BMVC '98)*, volume 2, pages 760–769, Southampton, UK. 49
- [Dumas et al., 2010] Dumas, C., Caro, S., Chérif, M., Garnier, S., and Furet, B. (2010). A methodology for joint stiffness identification of serial robots. In *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 464–469, Taipei, Taiwan. 37
- [Espiau et al., 1992] Espiau, B., Chaumette, F., and Rives, P. (1992). A new approach to visual servoing in robotics. In *Proc. IEEE on Robotics and Automation*, volume 8, pages 313–326. IEEE. 29
- [Feddema and Mitchell, 1989] Feddema, J. and Mitchell, O. (1989). Vision-guided servoing with feature-based trajectory generation (for robots). *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 5(5) :691–700. 50
- [Flandin et al., 2000] Flandin, G., Chaumette, F., and Marchand, E. (2000). Eye-in-hand/eye-to-hand cooperation for visual servoing. In *Proc. ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 3, pages 2741–2746, San Francisco, CA, USA. 49
- [Gangloff and Poignet, 2007] Gangloff, J. and Poignet, P. (2007). Intégration Robot-Capteur. *Techniques de l'ingénieur*. 44, 63
- [Grassi and Tsakalis, 2000] Grassi, E. and Tsakalis, K. (2000). PID controller tuning by frequency loop-shaping : application to diffusion furnace temperature control. *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 8(5) :842–847. 55
- [Hachemane and Bezzazi, 2009] Hachemane, B. and Bezzazi, B. (2009). Material composite fatigue behavior. In *Proc. 16ème Journées Nationales sur les Composites*, Toulouse, France. 17
- [Haralick et al., 1989] Haralick, R., Joo, H., Lee, C., Zhuang, X., Vaidya, V., and Kim, M. (1989). Pose estimation from corresponding point data. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 19(6) :1426–1446. 50

- [Hebert et al., 2011] Hebert, P., Hudson, N., Ma, J., and Burdick, J. (2011). Fusion of stereo vision, force-torque, and joint sensors for estimation of in-hand object location. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 5935–5941, Shanghai, China. 53
- [Hogan, 1987] Hogan, N. (1987). Stable execution of contact tasks using impedance control. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 4, pages 1047–1054, Raleigh, NC, USA. 42
- [Hollerbach, 1984] Hollerbach, J. (1984). Optimum kinematic design for a seven degree of freedom manipulator. In *Proc. of the 2nd International Symposium of Robotics Research*, pages 349–356, Kyoto. 37
- [Horaud et al., 1989] Horaud, R., Conio, B., Leboulleux, O., and Lacolle, B. (1989). An analytic solution for the perspective 4-point problem. In *Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 500–507, San Diego, CA. 50
- [JEC Composites, 2011] JEC Composites (2011). Overview of the worldwide composites industry : 2010-2015, strategic study. Technical report, Paris, France. 18
- [Joyot et al., 2013] Joyot, P., Bur, N., and Verdon, N. (2013). PGD applied to the nonlinear heat equation. In *Proc. 1st Joint Thematic Workshop CSMA-SEMNI : Model Order Reduction Techniques*, Jaca, Espagne. 95
- [Katsura et al., 2006] Katsura, S., Matsumoto, Y., and Ohnishi, K. (2006). Analysis and experiment validation of force bandwidth for force control. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 53 :922–928. 43
- [Khalil, 2002] Khalil, W. (2002). Asservissement visuel. In *La commande des robots manipulateurs*, chapter 3, pages 105–150. Paris, France, hermes edition. 48
- [Khalil and Dombre E., 1999] Khalil, W. and Dombre E. (1999). *Modélisation, identification et commande des robots*. Hermes Sciences, Paris, France. 11, 28, 32, 33, 35, 37, 44
- [Krupa et al., 2003] Krupa, A., Gangloff, J., Doignon, C., de Mathelin, M., Morel, G., Leroy, J., Soler, L., and Marescaux, J. (2003). Autonomous 3-D positioning of surgical instruments in robotized laparoscopic surgery using visual servoing. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 19(5) :842–853. 50
- [Kulpate et al., 2005] Kulpate, C., Mehrandezh, M., and Paranjape, R. (2005). An eye-to-hand visual servoing structure for 3D positioning of a robotic arm using one camera and a flat mirror. In *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pages 1464–1470, Alberta, Canada. 49
- [Lapierre, 1999] Lapierre, L. (1999). *Etude et réalisation de la commande hybride position/force d'un robot sous-marin équipé d'un bras manipulateur*. PhD thesis, Université de Montpellier II. 43
- [Le Tien et al., 2010] Le Tien, D., Hee-Jun, K., and Young-Shick, R. (2010). "Robot manipulator modeling in Matlab-SimMechanics with PD control and online gravity compensation". In *Proc. International Forum on Strategic Technology*, pages 446–449, Ulsan, South Korea. IEEE. 38

- [Lecompte-Boinet, 2006] Lecompte-Boinet, G. (2006). Les composites cherchent à réduire leurs coûts. *L'Usine Nouvelle*, n°2994. 20
- [Lipiello et al., 2007] Lipiello, V., Siciliano, B., and Villani, L. (2007). Robot Force/Position Control with Force and Visual Feedback. In *Proc. European Control Conference*, pages 3790–3795, Kos, Greece. 53
- [Lucas and Parneix, 2014] Lucas, D. and Parneix, P. (2014). Les matériaux composites en construction navale militaire. *Techniques de l'ingénieur Applications des composites*, AM5660. 18
- [Lucas, 2008] Lucas, T. (2008). La dynamique des nouveaux procédés. *L'Usine Nouvelle*, n°3093. 18
- [Luo, 2002] Luo, R. (2002). Multisensor fusion and integration : approaches, applications, and future research directions. *IEEE Sensors Journal*, 2(2) :107–119. 53
- [Malis and Chaumette, 2000] Malis, E. and Chaumette, F. (2000). 2 1/2 D Visual Servoing with Respect to Unknown Objects Through a New Estimation Scheme of Camera Displacement. *International Journal of Computer Vision*, 37, n°1 :79–97. 50
- [Measurement-Specialties, 2011] Measurement-Specialties (2011). FN7325 Capteur de Forces Multi-Composantes. 61
- [Molina, 2005] Molina, J. J. M. (2005). *Commande de l'inter-distance entre deux véhicules*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble. 43
- [Morel and J. Gangloff, 2005] Morel, G. and J. Gangloff (2005). Commande référencée capteurs en robotique médicale et chirurgicale. In *Proc. of Les Journées Nationales de la Recherche en Robotique JNRR'05*, Guidel, France. 49
- [MTorres,] MTorres. www.mtorres.es. 7, 19
- [N. J. Johnston et al., 1999] N. J. Johnston, H. L. Belvin, R. J. Cano, J. M. Marchello, and A. B. Hulcher (1999). A prototype research laboratory for automated fabrication of high performance composites. In *Proc. of the 12th International Conference on Composite Materials*, Paris, France. 13, 19
- [Nagata et al., 2007] Nagata, F., Hase, T., Haga, Z., Omoto, M., and Watanabe, K. (2007). CAD/CAM-based position/force controller for a mold polishing robot. *Mechatronics*, 17(4-5) :207–216. 28
- [Ouadah et al., 2003] Ouadah, N., Hamerlain, M., and Djouadi, M. S. (2003). Positionnement d'un bras manipulateur par une commande référencée vision. In *Conf. Int. sur les systèmes de Télécommunications d'Electronique Médicale et d'Automatique*, Tlemcen, Algérie. 43, 51
- [Pages et al., 2006] Pages, J., Collewet, C., Chaumette, F., and Salvi, J. (2006). Optimizing plane-to-plane positioning tasks by image-based visual servoing and structured light. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 22(5) :1000–1010. 51
- [Pan and Zhang, 2008] Pan, Z. and Zhang, H. (2008). Robotic machining from programming to process control. In *Proc. of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pages 553–558, Chongqing, China. 63

- [Peng et al., 1996] Peng, Y., Vrancic, D., and Hanus, R. (1996). Anti-windup, bumpless, and conditioned transfer techniques for PID controllers. *IEEE Control Systems Magazine*, 16(4) :48–57. 57
- [Prats et al., 2007] Prats, M., Martinet, P., Del Pobil, A. P., and Lee, S. (2007). Vision force control in task-oriented grasping and manipulation. In *Proc. IEEE RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1320–1325, San Diego, California. 45
- [Prats et al., 2010] Prats, M., Sanz, P. J., and Pobil, A. P. (2010). Reliable non-prehensile door opening through the combination of vision, tactile and force feedback. *Autonomous Robots*, 29(2) :201–218. 53
- [Raibert and Craig, 1981] Raibert, M. H. and Craig, J. J. (1981). Hybrid Position/Force Control of Manipulators. *J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 103(2) :126. 42
- [Robertsson et al., 2006] Robertsson, A., Olsson, T., Johansson, R., Blomdell, A., Nilsson, K., Haage, M., Lauwers, B., Baerdemaeker, H., Brogardh, T., and Brantmark, H. (2006). Implementation of Industrial Robot Force Control Case Study : High Power Stub Grinding and Deburring. In *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pages 2743–2748, Beijing, China. 28, 43
- [Salisbury, 1980] Salisbury, J. (1980). Active stiffness control of a manipulator in Cartesian coordinates. In *Proc. of the 19th IEEE Conf. on Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes*, pages 95–100, Stanford, California. 42
- [Schunk,] Schunk. FT-Delta force sensor. Technical report. 61
- [Smith et al., 1997] Smith, C. E., Brandt, S. A., and Papanikolopoulos, N. P. (1997). Eye-In-Hand Robotic Tasks In Uncalibrated Environments. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 13, No.6 :903–914. 49
- [Smits et al., 2006] Smits, R., Bruyninckx, H., Meeussen, W., Baeten, J., Slaets, P., and Schutter, J. (2006). Model Based Position-Force-Vision Sensor Fusion for Robot Compliant Motion Control. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, pages 501–506, Heidelberg, Germany. 53
- [Toso, 2003] Toso, Y. (2003). *Effective automated tape winding process with on-line bonding under transient thermal conditions*. PhD thesis, Institute of technology Zurich Imes, Center of Structure Technologies. 18
- [Toulminet, 2002] Toulminet, G. (2002). Les capteurs de force. Technical report, Rouen, France. 59
- [Uhart et al., 2014a] Uhart, M., Patrouix, O., and Aoustin, Y. (2014a). Controlling the tape’s gap in robotized fiber placement process using a visual servoing external hybrid control scheme. In *Proc. of the International symposium Aircraft Materials ACMA2014*, Marrakech, Morocco. 87
- [Uhart et al., 2014b] Uhart, M., Patrouix, O., and Aoustin, Y. (2014b). Improving accuracy in robotised fibre placement using force and visual servoing external hybrid control scheme. *soumis à Robotica*. 90

- [Uhart et al., 2013] Uhart, M., Patrouix, O., Aoustin, Y., and Canou, J. (2013). Improving Accuracy in Robotized Fiber Placement. In *Proc. of The 19th International Conference on Composite Materials*, Montreal, Canada. 82
- [Vitrani et al., 2006] Vitrani, M.-A., Morel, G., Bonnet, N., and Karouia, M. (2006). A robust ultrasound-based visual servoing approach for automatic guidance of a surgical instrument with in vivo experiments. In *Proc. of The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*, pages 35–40, Pisa, Italy. 50
- [Whitney, 1985] Whitney, D. (1985). Historical perspective and state of the art in robot force control. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 2, pages 262–268, Cambridge, United States. 42
- [Witten et al., 2012] Witten, E., Jahn, B., and Karl, D. (2012). Composites Market Report 2012 : Market developments, trends, challenges and opportunities. Technical report, AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe (Federation of Reinforced Plastics), Frankfurt, Germany. 18
- [Xu et al., 2010] Xu, J., Xi, N., Zhang, C., and Shi, Q. (2010). Real-time 3D shape measurement system based on single structure light pattern. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 121–126, Anchorage, Alaska. 51
- [Zemiti, 2005] Zemiti, N. (2005). *Commande en Effort des Systèmes Robotiques pour la Chirurgie Mini-Invasive*. PhD thesis, Pierre et Marie CURIE - UPMC, Paris, France. 46, 63
- [Zheng and Fan, 1991] Zheng, Y. and Fan, Y. (1991). Robot force sensor interacting with environments. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 7(1) :156–164. 29

Thèse de Doctorat

Maylis UHART

Amélioration de la précision du Placement de Fibres Robotisé en utilisant un schéma de commande hybride externe force / vision

Improving Accuracy in Robotised Fibres Placement using Force and Visual Servoing External Hybrid Control Scheme

Résumé

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans le domaine exigeant de l'aéronautique. Pour répondre à ce besoin grandissant, l'entreprise *Coriolis Composites* a développé une solution de placement de fibres robotisé qui est déjà sur le marché. Ce process utilise un bras manipulateur industriel. La tâche de dépose des fibres nécessite un effort de compactage adapté suivant le matériau utilisé. Pour le robot, les trajectoires outils sont générées à partir de la programmation hors-ligne. Cependant, la précision du drapage peut être améliorée. Cette thèse présente l'utilisation de l'asservissement en force pour contrôler l'effort de compactage et l'utilisation de l'asservissement visuel pour contrôler la position latérale de la bande en cours de dépose. Un dispositif expérimental a été mis en œuvre en utilisant des éléments industriels similaires aux moyens de *Coriolis Composites* et une application logicielle a été développée en intégrant un capteur d'effort à six composantes et une caméra industrielle. Le schéma proposé est composé de trois boucles externes qui génèrent les consignes de position pour le contrôleur industriel. L'utilisation de ce schéma mixte force - vision - position a permis d'améliorer la précision et la qualité de la dépose des bandes.

Mots clés

Placement de Fibres Robotisé, Précision, Commande hybride position-force-vision, Intégration de capteurs

Abstract

Composite materials are increasingly used in the demanding field of aeronautics. To meet this growing need, the company *Coriolis Composites* has developed an Automated Fibre Placement device already on the market. This process uses an industrial manipulator robot. This fibre placement task requires a compacting strength adapted to the material used. For the robot, the reference trajectories in position of each tape are prescribed off-line. However, accuracy problems of tape placement appear. This thesis shows the use of force servoing to control the compacting strength and the use of visual servoing to control the lateral position of the tape. An experimental setup has been designed based on industrial devices similar to *Coriolis Composites* ones and a software application has been developed using a six axis force sensor and an industrial camera. The proposed scheme is composed of three external loops which generate the position setpoint for the industrial controller. The use of this force - visual combined servoing has improved the accuracy and the quality of the placement tapes.

Key Words

Robotised Fibre Placement, Accuracy, Position-Force-Visual hybrid control, Sensors integration