



HAL
open science

Approche générique pour la coordination des manipulateurs mobiles en milieu naturel

Guillaume Picard

► **To cite this version:**

Guillaume Picard. Approche générique pour la coordination des manipulateurs mobiles en milieu naturel. Automatique / Robotique. Université Clermont Auvergne, 2022. Français. NNT : 2022UC-FAC099 . tel-04165297

HAL Id: tel-04165297

<https://theses.hal.science/tel-04165297v1>

Submitted on 18 Jul 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

THÈSE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ CLERMONT AUVERGNE

Ecole Doctorale
Sciences pour l'ingénieur

Spécialité de doctorat : Électronique et Système
Discipline : Robotique

Soutenue publiquement le 05/12/2022, par :

Guillaume Picard

**Approche générique pour la coordination des manipulateurs
mobiles en milieu naturel**

Devant le jury composé de :

Roland Chapuis

Professeur, Institut Pascal/Université Clermont Auvergne

Andrea Cherubini

Professeur, LIRMM

Cedric Pradalier

Professeur, Georgia Tech Lorraine

Viviane Cadenat

Maître de conférences, LAAS/Université Paul Sabatier

Eric Lucet

Chargé de recherche, CEA-List

Roland Lenain

Directeur de recherche, INRAE

Youcef Mezouar

Professeur, Institut Pascal/Université Clermont Auvergne

Benoit Thuilot

Maître de conférences, Institut Pascal/Université Clermont Auvergne

Examineur / Président du jury

Rapporteur

Rapporteur

Examinatrice

Examineur

Directeur de thèse

Co-Directeur de thèse

Encadrant de thèse

"Dans la vie, rien n'est à craindre, tout est à comprendre"

Marie Curie

Résumé

Aujourd'hui, le domaine agricole est confronté à de forts enjeux environnementaux et sociétaux, avec la nécessité de préserver les niveaux de production. Ces enjeux trouvent une réponse au sein de l'agroécologie qui redéfinit le cadre de l'agriculture conventionnelle par le développement de nouveaux itinéraires de culture ou d'élevage, permit par l'apport des nouvelles technologies et la croissance de la connaissance agronomique. Dans ce nouveau paradigme, les robots trouvent une place de choix grâce à leur autonomie de travail et leur précision, permettant d'envisager de nouvelles méthodes agricoles. Parmi ces derniers, une classe de système, capable d'allier des capacités de mobilité et de manipulation, possède un fort potentiel du fait de leur grande polyvalence : les manipulateurs mobiles.

Ces systèmes ont largement été étudiés dans le cadre d'applications agricoles, notamment la récolte, mais n'ont toujours pas trouvé de place au sein de nos campagnes. En effet, ceux-ci sont souvent exploités en distinguant le déplacement de la plateforme mobile et les actions de l'effecteur, ce qui nuit à leur efficacité. En outre, ces derniers possèdent des structures très variées et leur complexité, agrégeant des sous-systèmes avec des dynamiques et des contraintes différentes qu'il convient de faire travailler ensemble, implique la mise au point d'approches de commande coordonnées complexes permettant d'exploiter au mieux les capacités de ces systèmes. Par ailleurs, cette coordination doit être effectuée dans des milieux complexes soumis à de fortes perturbations, tel que l'environnement naturel, sans tomber en défaut ou entacher la réalisation de la tâche. Enfin, la redondance offerte par ces structures permet d'effectuer plusieurs tâches simultanément mais nécessite un schéma robuste de résolution pour déterminer la configuration optimale du système pour la bonne réalisation des travaux.

Les contributions de ces travaux de thèse proposent différentes réponses à ces problématiques afin de permettre l'émergence de tels systèmes dans le monde agricole de demain. Ces travaux proposent, dans un premier temps, au vu de l'état de l'art, une classification des méthodes de coordination développées depuis l'étude de ces systèmes. Par la suite, en se basant sur ces résultats, une méthode de coordination générique est proposée, capable de s'adapter à des structures différentes de manipulateurs mobiles. Enfin, pour répondre à la problématique des perturbations engendrées par le travail en milieu naturel, une approche d'estimation de compensation des perturbations, elle aussi générique, sera proposée comme dernière contribution.

Alors que la majorité des travaux présents dans l'état de l'art tendent à vouloir unifier le système sous un seul modèle et une seule commande, il apparaît également que la majorité des robots vendus sont des systèmes mono-tâche ou peu polyvalents, représentant un investissement élevé pour l'exploitant. Or, une commande coordonnée unifiée sous un seul modèle peut difficilement apporter de la polyvalence au système du fait de sa propre rigidité. Dans ces travaux, une approche découplant à la fois les modèles et les commandes de chaque sous-système du manipulateur mobile est présentée. Cette méthode réalise un couplage à travers des termes génériques à chaque commande des sous-systèmes du manipulateur mobile, offrant alors un paradigme où le type de base et de bras, ainsi que le nombre de manipulateurs n'importe pas dans le schéma de coordination. Afin de tester cette approche, plusieurs essais en simulation et expérimentaux ont été menés sur différentes plateformes. Ces derniers ont mis en évidence la généricité de l'approche ainsi que ses performances et intérêts dans un cas canonique ainsi que un cas applicatif réalisé en milieu naturel.

Du fait de la nature du terrain agricole, les systèmes y étant présents sont continuellement soumis à différentes perturbations venant détériorer la bonne réalisation de leur tâche. Ces phénomènes déjà bien connus et étudiés dans le cas de la robotique mobile sont d'autant plus présents pour un manipulateur mobile qui doit s'accommoder à la fois des glissements imposés par la variation d'adhérence du terrain avec le mobile et des perturbations engendrées par la navigation sur un terrain irrégulier. Pour cela, une méthode d'estimation des perturbations est proposée dans ces travaux. Cette dernière, associée à la commande adaptative de chaque sous-système, permet de compenser ces

perturbations pour améliorer la réalisation de la tâche. La contribution principale de cette approche d'estimation est son indépendance au modèle, permettant ainsi d'être adaptable à tous type de sous-système du manipulateur mobile, quel que soit le type de base mobile et de manipulateur. Cette approche a également été validée de façon expérimentale sur différentes plateformes démontrant ainsi sa généralité et ses performances d'estimation. Enfin une dernière partie démontre de manière expérimentale, sur un cas applicatif évalué en milieu naturel, la performance de l'approche de coordination liée aux méthodes d'estimation et de compensation des perturbations. Il en résulte la validation des différentes approches et paradigmes proposés par ces travaux.

Mots-clefs : Manipulateur mobile, robotique agricole, coordination de manipulateurs mobiles, résolution de la redondance, navigation en milieu naturel, commande adaptative, estimation de perturbation.

Abstract

Nowadays, the agricultural field is confronted with strong environmental and societal challenges, while the production level needs to be preserved. These challenges are met by agroecology, which redefines the framework of conventional agriculture through the development of new crop and livestock production itineraries, enabled by the contribution of new technologies and the growth of agronomic knowledge. In this new paradigm, robots may bring new solutions, thanks to their autonomy of work and their precision, allowing them to consider new agricultural methods. Among the latter, a class of systems, capable of combining mobility and manipulation capacities, has strong potential due to their great versatility : mobile manipulators.

These systems have been widely studied in the context of agricultural applications, particularly harvesting, but have still not found a place in our countryside. Indeed, their control is often designed separately with a sequential motion of the platform and the implement, limiting their efficiency. These systems have a wide range of structures and complexity, aggregating subsystems with different dynamics and constraints that must be made to work together, implies the development of complex coordinated control approaches allowing to exploit at best the capacities of these systems. Moreover, this coordination must be carried out in complex environments subject to strong disturbances, such as the natural environment, without failing or marring the achievement of the task. Finally, the redundancy offered by these structures allows multiple tasks to be performed simultaneously but requires a robust resolution scheme to determine the optimal system configuration for the successful completion of the task.

The contributions of this thesis propose different answers to these problems to allow the rising of such systems to allow the ecological transition of agriculture. These works propose, at first, because of the state of the art, a classification of the coordination methods developed since the study of these systems. Then, based on these results, a generic coordination method is proposed, able to handle to different structures of mobile manipulators. Finally, to address the problem of disturbances generated by work in a natural environment, a generic approach for estimating the compensation for disturbances will be proposed as the last contribution.

While the majority of the works in the state of the art tends to unify the system under a single model and a single control, it also appears that the majority of the robots sold are single-task or not very versatile systems, representing a high investment for the operator. However, an unified coordinated control under a single model can hardly bring versatility to the system because of its rigidity. In this work, an approach to decoupling both the models and the controls of each subsystem of the mobile manipulator is presented. This method couples through generic terms to each control of the mobile manipulator subsystems, thus providing a paradigm where the type of base and arm, as well as the number of manipulators, does not matter in the coordination scheme. To test this approach, several simulation and experimental tests were conducted on different types of platforms. The latter have highlighted the generality of the approach as well as its performances and interests in a canonical case as well as in an applicative case carried out in a natural environment.

Due to the nature of the agricultural land, the systems present there are continuously subjected to various disturbances that deteriorate the work efficiency. These phenomena, already well known and studied in the case of mobile robotics, are even more present for a mobile manipulator which must deal with both the slippage imposed by the variation of adherence of the ground with the mobile and the disturbances generated by the navigation on an irregular ground. For this purpose, a method for estimating the disturbances is proposed in this work. The latter, associated with the adaptive control of each subsystem, allows for compensation of these disturbances to improve the realization of the task. The main contribution of this estimation approach is its independence from the model, allowing it to be adaptable to any type of mobile manipulator subsystem, whatever the type of mobile base and manipulator. This approach has also been experimentally validated on different platforms, thus demonstrating its

generality and its estimation performances. Finally, the last part demonstrates experimentally, on an application case evaluated in a natural environment, the performance of the coordination approach linked to the methods of estimation and compensation of disturbances. This results in the validation of the different approaches and paradigms proposed by this work.

Key-words : Mobile manipulator, agricultural robotics, coordination of mobile manipulators, redundancy resolution, navigation in natural environment, adaptive control, disturbance estimation.

Remerciements

Ce mémoire est le fruit de quatre années de travail qui n'aurait pu voir le jour sans le concours de nombreuses personnes que je tiens à remercier au long de ces quelques lignes.

Ces travaux ont été réalisés au sein de l'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE) de Clermont-Ferrand dirigé par Emmanuel Hugo, au sein de l'Unité de Recherche Technologies et Systèmes d'information pour les agro-systèmes (TSCF) dirigée par Jean-Pierre Chanet. Je les remercie, en tout premier lieu, pour m'avoir fait confiance et m'avoir permis de mener à bien ce projet au sein de leurs équipes, ainsi que l'ensemble du personnel de l'institut, pour les moyens mis à ma disposition et pour l'aide qu'ils m'ont continuellement apportée au long de ces années. Je remercie ensuite la région Auvergne-Rhône-Alpes et tous ses représentants pour le financement de mes travaux et la confiance qu'ils m'ont donnée.

Je souhaite ensuite remercier les membres du jury, présidé par Roland Chapuis, pour avoir évalué mes travaux de thèse. Je remercie Roland Chapuis, Viviane Cadenat ainsi qu'Eric Lucet, qui ont l'amabilité d'examiner mes travaux. Merci également à Cédric Pradalier et Andrea Cherubini pour avoir rapporté mon mémoire, ainsi que pour leurs remarques et questions constructives lors de mes comités de thèse qui ont jalonné ces dernières années.

Je tiens à remercier très sincèrement Roland Lenain, qui fut mon directeur de thèse depuis le début de cette aventure et sans qui rien n'aurait été possible. Je ne saurais, je pense, exprimer ici tout la gratitude qui est mienne et j'ai peur que ces quelques mots ne lui rendent pas honneur. Je n'étais qu'un humble padawan lorsque tu m'as pris sous ton aile et tu as su me motiver et me pousser à dépasser mes limites pour me mener au bout de ce projet. Merci à toi, pour le temps que tu m'as consacré, l'aide que tu m'as apportée en toutes circonstances et ton optimisme à toute épreuve. Merci pour tout ce que tu m'as enseigné, m'ayant permis de devenir un roboticien accompli mais également, m'ayant appris à prendre du recul et à voir les choses sous différents angles. Ta créativité, ta motivation et ton engagement dans ton travail resteront une source d'inspiration pour moi. Enfin, je te remercie pour ton amitié et tous les bons moments que nous avons passés ensemble.

Je remercie ensuite Youcef Mezouar, ainsi que Benoît Thuilot, respectivement co-directeur et encadrant de thèse, qui m'ont accompagné durant ces années et qui m'ont fait confiance pour porter ce projet. Je les remercie pour leurs remarques pertinentes et constructives qui m'ont permis d'améliorer continuellement mes travaux et de pousser mes réflexions toujours plus en avant.

Au-delà de son soutien comme encadrant de thèse, je remercie également Benoît qui fut mon responsable et professeur lors de mon arrivée à Clermont-Ferrand pour mon master. Je te remercie pour ces années sans lesquelles je n'aurais jamais envisagé ce travail de thèse et pour ton remarquable travail de professeur qui m'a poussé à m'intéresser davantage à la commande. J'admire ta rigueur et ta précision de travail et j'aimerais arriver un jour ne serait-ce qu'à la moitié de la tienne. Enfin, merci également pour le remarquable travail de correction de ce manuscrit qui a grandement gagné en précision et clarté grâce à toutes tes remarques et correctifs.

Je ne pourrais aller plus loin sans remercier ici mes collègues et amis ayant partagé ce parcours commun de la préparation d'une thèse. Tout d'abord, merci à Adrian avec qui j'ai partagé mon bureau pendant ces années. Merci à ta motivation et ta résilience indéfectible m'ayant inspirées pour ne jamais rien lâcher. Merci à ton soutien continu et à la bonne humeur que tu apportes avec toi. Merci également à toi, Mahmoud, pour ton amitié et les longues heures de discussion et de philosophie au sein de notre bureau. Le groupe que nous avons formé ensemble et tous ces moments resteront inoubliables.

Parmi les différents collègues avec qui j'ai pu travailler, je tiens à remercier tout d'abord Jean Laneurit, sans qui, aucune des nombreuses expérimentations présentées dans ce manuscrit n'auraient pu voir le jour. Merci à toi, pour le travail énorme que tu as accompli et toute l'aide technique que tu m'as donnée afin de réussir à faire fonctionner les différentes plateformes. Je remercie ensuite chacun des membres de l'équipe ROMEA qui m'ont tous apporté, à un moment ou un autre, leur aide et m'ont permis d'avancer dans mes travaux. Je vous remercie tous pour l'accueil que vous m'avez offert pendant ces années et pour les conseils que vous m'avez procurés.

Je remercie également l'équipe MACCS de l'Institut Pascal pour leur long prêt du robot Campero ainsi que Maxime, Laurent et Juan pour m'avoir aidé à son utilisation.

Je voudrais également remercier ma famille dans son ensemble pour leur soutien toujours présent dans cette entreprise. Merci à ma mère, qui m'a toujours poussé à me dépasser et à faire ce que j'aimais et merci à mon père, pour l'enseignement technique qu'il m'a offert et qui m'a largement été utile lorsque les plateformes tombaient en panne. Je remercie particulièrement mon frère Gaëtan avec qui, au détour des sentiers du Sancy et des Puys, j'ai eu de très longues discussions et débats sur la robotique et sa place dans le monde agricole et, qui ont fortement influencés la vision de mon travail à ce sujet ainsi que son intérêt sociétal. Merci également à toi pour ton appui technique lors de la rédaction de l'introduction de ce mémoire, sans laquelle j'aurais certainement abordé des notions et des sujets de façon bien plus hasardeuse. Enfin, un grand merci à ma soeur Hélène qui a eu le courage de relire la totalité de ce manuscrit pour le corriger. Merci pour ton énorme travail de correction orthographique et syntaxique qui a largement contribué à rendre clair et lisible mes différentes idées, qui s'enchaînent sur le papier, aussi vite et désordonnées que dans mon esprit.

Yumna, je te remercie du fond du coeur pour ton soutien immuable et ta présence continue à mes côtés durant ces dernières années. Merci d'avoir toujours cru en moi et de m'avoir épaulé dans les bons moments comme dans les mauvais. Merci pour ton amour et tes sentiments qui ont laissés une trace indélébile au fond de moi.

Finalement, un grand merci à toutes les personnes que je n'ai pas citées ici mais qui se reconnaîtront, sans qui, ce travail n'aurait pas pu aboutir. Merci à chacun d'entre vous pour les aides, le soutien, la bienveillance ou l'inspiration dont vous avez fait preuve et qui m'ont permis d'aller au bout de ce projet.

Avant de conclure, j'aimerais rendre hommage à mon oncle Joël et ma grand-mère Thérèse, disparus en 2020, qui ont fait parti des nombreuses personnes qui m'ont inspirées cet attrait pour l'agriculture et cette envie de proposer des solutions nouvelles pour simplifier la vie des exploitants.

Table des matières

1	Introduction générale	25
1.1	De l'outil à la robotique	26
1.1.1	L'évolution de l'outil technique	26
1.1.2	De la fiction à la réalité	28
1.1.3	La robotique de nos jours	28
1.2	Contexte agricole : de l'agriculture intensive à l'agroécologie	29
1.2.1	Amélioration de la production	30
1.2.2	Pérennité de l'environnement	31
1.2.3	Amélioration des conditions de travail des agriculteurs	32
1.2.4	Essor de l'agroécologie	32
1.3	La robotique : une des solutions de l'agroécologie	33
1.3.1	Apport de la robotique au monde agricole	34
1.3.2	La robotique dans le mode agricole d'aujourd'hui	34
1.3.2.1	Dans les élevages	35
1.3.2.2	Dans les cultures	35
1.3.3	Diversité des tâches à accomplir	37
1.3.3.1	Variation de l'environnement	38
1.3.3.2	Diversité des objets d'intérêts	40
1.3.3.3	Type d'atelier sur l'exploitation	40
1.4	Outil et porte-outils	41
1.4.1	Outil	41
1.4.2	Porte-outils	42
1.4.2.1	Robotique manipulatrice	42
1.4.2.2	Robotique mobile	43
1.4.3	Manipulateurs mobiles	44
1.5	Inscription de la thèse dans le contexte agricole et robotique	44
1.5.1	Intérêt de la commande coordonnée	45
1.5.2	Verrous scientifiques de la commande coordonnée	46
1.5.3	Manipulateur mobile en milieu naturel	46
1.5.4	Objectifs de la thèse	47
1.5.5	Plan du mémoire de thèse	47
1.6	Contexte de travail	47
2	État de l'art sur la commande des manipulateurs mobiles	49
2.1	Notion de coordination à travers la tâche	50
2.1.1	Tâche principale	50
2.1.1.1	Stabilisation d'un point dans l'espace	50
2.1.1.2	Suivi d'une trajectoire	51
2.1.2	Tâche secondaire : critère de résolution de la redondance	51
2.1.2.1	Manipulabilité	52
2.1.2.2	Limite articulaire du manipulateur	55
2.1.2.3	Position dans l'espace de travail	55
2.1.2.4	Évitement d'auto-collision	56
2.1.2.5	Évitement d'obstacle	57
2.1.2.6	Stabilité du système	57

2.1.3	Conclusion sur la notion de tâche	57
2.2	Classification des approches de coordination d'un manipulateur mobile	58
2.2.1	Les systèmes holonomes	58
2.2.2	Les systèmes non-holonomes	60
2.2.2.1	Les approches non coordonnées	61
2.2.2.2	Les approches coordonnées en couplage externe	63
2.2.2.3	Les approches coordonnées en couplage interne	66
2.2.3	Conclusion sur la coordination	70
2.2.3.1	Discussion sur les approches de modélisation en couplage interne	71
2.2.3.2	Discussion sur la pondération des systèmes	71
2.2.3.3	Comparaison entre le couplage interne et le couplage externe	72
2.2.3.4	Orientation de l'approche de coordination considérée pour ces travaux	73
2.3	Résolution de la redondance	73
2.3.1	Méthodes locales	73
2.3.1.1	Méthodes analytiques	74
2.3.1.2	Méthode numérique	82
2.3.2	Approches globales	86
2.3.2.1	Algorithmes génétiques	86
2.3.2.2	Échantillonnage de l'espace	87
2.3.2.3	Méthodes exploitant l'intelligence artificielle	89
2.3.3	Conclusion sur la gestion de la redondance des systèmes	90
2.4	Coordination et navigation en milieu naturel	91
2.4.1	Modélisation pour la navigation en environnement naturel	92
2.4.2	Estimation des effets dynamiques sur le système	93
2.4.2.1	Estimation empirique	94
2.4.2.2	Estimation par mesure directe	94
2.4.2.3	Estimation par des méthodes de logique floue	94
2.4.2.4	Observateur de Luenberger	95
2.4.2.5	Observateur de perturbations	96
2.4.2.6	Filtre de Kalman	97
2.4.2.7	Mode glissant	98
2.4.2.8	Commande H_∞	99
2.4.2.9	Filtre à particules	99
2.4.2.10	Estimateur prédictif	100
2.4.2.11	Estimation par réseau de neurones	100
2.4.3	Conclusion sur la navigation des robots en milieu naturel	100
2.5	Conclusion générale sur l'état de l'art	102
3	Approche de coordination générique pour un manipulateur mobile	105
3.1	Approche de coordination	106
3.1.1	Architecture de la coordination	106
3.1.1.1	Définition des écarts ε	106
3.1.1.2	Principe de coordination	106
3.1.2	Etage de coordination : Optimisation des écarts aux trajectoires	108
3.1.2.1	Définition des critères de coordination	109
3.1.2.2	Fonction de coordination	110
3.1.2.3	L'hypothèse de convergence des sous-systèmes	111
3.2	Modélisation des sous-systèmes	112
3.2.1	Notations	112
3.2.2	Modélisation d'un mobile dans le repère de Frenet	112
3.2.2.1	Cas de la vitesse linéaire	113
3.2.2.2	Cas de la vitesse angulaire	115
3.2.2.3	Modèle au point M	115
3.2.3	Modélisation des manipulateurs dans le repère de Frenet	117
3.2.3.1	Vitesse de rotation du repère de Frenet dans le repère monde	117
3.2.3.2	Calcul de la vitesse linéaire	118
3.2.3.3	Calcul de la vitesse angulaire	121

3.2.3.4	Modèle final	122
3.3	Résultats en simulation et expérimentaux	123
3.3.1	Présentation des essais canoniques	123
3.3.1.1	Présentation des manipulateurs mobiles	124
3.3.1.2	Présentation des scénarios	124
3.3.2	Expérimentations et simulations	125
3.3.2.1	Scénario n°1 sur le MM1 : Expérimentation	125
3.3.2.2	Scénario n°1 avec différentes structures de manipulateur mobile	128
3.3.2.3	Influence des critères	131
3.3.2.4	Variation de la méthode	135
3.3.2.5	Scénario n°5 sur le MM4	137
3.4	Conclusion	141
4	Navigation d'un manipulateur mobile en environnement naturel	145
4.1	Adaptation aux irrégularités du terrain	146
4.1.1	Résultats en simulation	146
4.1.2	Résultats expérimentaux	147
4.2	Adaptation aux perturbations du milieu extérieur	149
4.2.1	Observateur pour le mobile	150
4.2.1.1	Repère de référence	150
4.2.1.2	Observateurs spécifiques	151
4.2.1.3	Équivalences	155
4.2.1.4	Observateur générique	156
4.2.2	Observateur pour le manipulateur	160
4.2.3	Résultats expérimentaux	160
4.2.3.1	Présentation des essais expérimentaux	160
4.2.3.2	Résultat des essais sur les observateurs du mobile	162
4.2.3.3	Résultats des essais concernant l'équivalence	165
4.2.3.4	Résultats des essais sur l'application de l'observateur générique au manipulateur	166
4.3	Expérimentations en milieu naturel	167
4.4	Conclusion	172
5	Cas applicatif de coordination d'un manipulateur mobile en environnement naturel : le suivi de structure	175
5.1	Suivi de structure végétale	176
5.1.1	Présentation de la tâche	176
5.1.2	Suivi de structure en robotique mobile	176
5.1.3	Présentation des scénarios expérimentaux	177
5.1.4	Présentation de la plateforme d'expérimentation	178
5.1.5	Paramètres du manipulateur mobile liés à la tâche	178
5.1.5.1	Critère d'évitement d'obstacle	178
5.1.5.2	Changement de référence	180
5.2	Résultats expérimentaux de suivi de structure	180
5.2.1	Suivi de structure sur sol plat	180
5.2.1.1	Variation de la trajectoire du mobile	180
5.2.1.2	Transition de trajectoire et changement de tâche	182
5.2.1.3	Régulation de l'orientation de l'effecteur en simulation	184
5.2.1.4	Suivi de haie végétale	184
5.2.2	Suivi de structure sur sol irrégulier	186
5.2.3	Suivi de structure rectiligne à 1m/s	190
5.3	Conclusion	191

6 Conclusion générale	193
6.1 Conclusion	193
6.1.1 Rappel de la problématique	193
6.1.2 Contributions apportées par ces travaux	194
6.1.2.1 Classification des méthodes de coordination	194
6.1.2.2 Méthode de coordination générique	195
6.1.2.3 Observateur de perturbations génériques	195
6.1.2.4 Apport des contributions	196
6.2 Perspectives	196
6.2.1 Les pistes de développements	196
6.2.2 Un concept à étendre...	197
A Commande des sous-systèmes du manipulateur mobile	201
A.1 Commande des sous-systèmes	201
A.1.1 Commande du manipulateur	201
A.1.2 Commande du mobile	202
A.1.2.1 Régulation de l'écart longitudinal	202
A.1.2.2 Régulation de l'écart latéral	203
A.1.2.3 Régulation de l'écart de cap	204
A.2 Commande avec les modèles étendus	205
A.2.1 Commande du mobile	205
A.2.1.1 Régulation de l'écart longitudinal	206
A.2.1.2 Régulation de l'écart latéral	206
A.2.1.3 Régulation de l'écart de cap	208
A.2.2 Commande du manipulateur	208
A.3 Commande du mobile associée au modèle générique et à l'observateur générique	209
B Annexe : Preuve de convergence des observateurs par Lyapunov	211
C Rappels Mathématiques	213
C.1 Représentation de la rotation d'un repère	214
C.1.1 Matrice de rotation	214
C.1.1.1 Rotations successives	214
C.1.1.2 Rotation inverse	214
C.1.1.3 Dérivée de la matrice de rotation	214
C.1.1.4 Discussion sur la représentation	215
C.1.2 Représentation des angles d'Euler Θ	215
C.1.2.1 Relation avec la matrice de rotation	215
C.1.2.2 Extraction des paramètres à partir d'une matrice de rotation	215
C.1.2.3 Discussion sur la représentation	216
C.1.3 Représentation axe-angle u_Θ	216
C.1.3.1 Définition	216
C.1.3.2 Relation avec la matrice de rotation	216
C.1.3.3 Extraction des paramètres à partir d'une matrice de rotation	216
C.1.3.4 Discussion sur la représentation	217
C.1.4 Représentation quaternion	217
C.1.4.1 Rotations successives	217
C.1.4.2 Rotation inverse	217
C.1.4.3 Relation avec la matrice de rotation	217
C.1.4.4 Extraction des paramètres à partir d'une matrice de rotation	218
C.1.4.5 Discussion sur la représentation	218
C.2 Vitesse d'une rotation	218
C.3 Matrice	218
C.3.1 Matrice antisymétrique	218
C.3.2 Matrice de passage	219
C.3.3 Décomposition SVD	220
C.4 Courbe paramétrée	220

C.4.1	Longueur d'une courbe	220
C.4.2	Reparamétrisation	221
C.4.2.1	Paramétrisation par abscisse curviligne	221
C.4.3	Régularité de la courbe	221
C.4.4	Courbe en dimension deux	221
C.4.4.1	Repère de Frenet	222
C.4.4.2	Courbure	222
C.4.4.3	Formule de Frenet	223
C.4.5	Courbe en dimension trois (courbe gauche)	223
C.4.5.1	Repère de Frenet	223
C.4.5.2	Description locale de la courbe gauche	223
C.4.5.3	Formule de Frenet	224
C.4.5.4	Calcul du trièdre de Frenet dans la cas d'un paramétrage quelconque	224
C.4.6	Accélération dans le repère de Frenet	225
C.4.7	Définition du repère de Frenet dans \mathbb{R}^3 pour une droite	225
D	Rappels Robotique	227
D.1	Définitions	227
D.2	Modèles	229
D.2.1	Modèle géométrique	229
D.2.2	Modèle cinématique	229
D.2.3	Modèle statique	229
D.2.4	Modèle dynamique	230
D.3	Système holonome/non-holonome	230
D.4	Robot mobile à roues	230
D.4.1	Contrainte de roulement sans glissement	230
D.4.2	Type de roue d'un mobile :	232
D.4.3	Classe des robots mobiles :	232
D.4.4	Modèles classiques des robots mobiles	233
D.5	Représentation d'état	234
E	Optimisation	235
E.1	Algorithme d'optimisation combinatoire	235
E.1.1	Algorithme glouton	236
E.1.2	Algorithme génétique	236
E.2	Algorithme d'optimisation continue	236
E.2.1	Algorithme du simplex	236
E.2.2	Algorithme du recuit simulé	236
E.2.3	Essaim particulaire	237
E.2.4	Algorithme stochastique	237
E.2.4.1	RRT	237
E.2.4.2	PRM	238
F	Annexe : Présentation des manipulateurs Ur	241
F.1	Manipulateur Ur	241
F.2	Modélisation des manipulateurs Ur	242
F.2.1	Modèle géométrique des manipulateurs Ur	242
F.2.1.1	Modèle géométrique direct	242
F.2.1.2	Modèle géométrique inverse	246
F.2.2	Modèle cinématique	246
G	Annexe : Présentation des mobiles	247
G.1	Campero	247
G.2	Adap2E	247

H Annexe : Couplage interne	251
H.1 Modélisation cinématique d'un cas d'étude 2D	251
H.1.1 Modélisation cinématique en contrainte non-holonome par tâche	252
H.1.2 Modélisation cinématique en contrainte non-holonome par modèle	252
H.2 Application au cas 3D et expérimentation	253
H.2.1 Comparaison des modélisations	253
H.2.1.1 Détails des erreurs sur les différentes contraintes	254
H.2.1.2 Conclusion sur le comparatif des approches en couplage interne	255
H.2.2 Discussion sur la manipulabilité	256

Table des figures

1.1	Exemple de systèmes de stockage de données dans l'histoire	26
1.2	Exemple de systèmes techniques à travers l'histoire	27
1.3	Exemple des systèmes techniques programmables dans l'histoire	27
1.4	Principe de régulation	28
1.5	Evolution des types de puissance utilisées en agriculture	29
1.6	Aménagement foncier des territoires agricoles à partir des années 50	31
1.7	Différentes pratiques de travail du sol	31
1.8	Différents types de robots selon les approches agricoles	33
1.9	Exemple de robot répondant à certains besoins de l'agroécologie	34
1.10	Exemple de robot destiné à l'élevage	36
1.11	Exemple de robots destinés aux cultures	37
1.12	Différents environnements de culture et d'élevage agricole par structuration humaine décroissante	38
1.13	Différentes structures de robot attachées à une même tâche de récolte pour des cultures distinctes	41
1.14	Différents outils pour la réalisation autonome de tâches agricole	42
1.15	Exemple de différents types de robots manipulateurs	43
1.16	Exemple de différents types de robots mobiles à roues	43
1.17	Exemple de robots avec des mobilités différentes	44
1.18	Exemple de manipulateur mobile avec différentes modalités de mobilité	45
2.1	Schéma de classification des approches de coordination des manipulateurs mobiles	59
2.2	Principe de modélisation d'une plateforme mobile en considérant un ensemble de liaisons rotoïdes et prismatiques	59
2.3	Comparaison de la norme de la vitesse articulaire obtenue par la méthode de la pseudo inverse et pseudo inverse amortie	76
3.1	(a) Représentation schématique des écarts ε_m du mobile dans le repère de Frenet. (b) Représentation schématique des écarts ε_a du manipulateur dans le repère de Frenet.	107
3.2	(a) Schéma de principe de l'approche de coordination pour un manipulateur mobile mono-bras. (b) Schéma de principe de l'approche de coordination pour un manipulateur mobile bi-bras.	108
3.3	Schéma de principe du coordinateur	109
3.4	Aspect des différents critères proposés pour la fonction de coordination.	110
3.5	Schéma générique de modélisation du point de contrôle d'un mobile dans le repère de Frenet.	113
3.6	Schéma de modélisation du point de contrôle de l'effecteur d'un manipulateur dans le repère de Frenet.	118
3.7	Structures des manipulateurs mobiles utilisés pour les essais canoniques.	124
3.8	Ensemble des scénarios expérimentaux et de simulation proposés.	125
3.9	Position de l'effecteur et du mobile par rapport à leurs trajectoires de référence pour une discontinuité de 0,5m.	126
3.10	Position de l'effecteur et du mobile par rapport à leurs trajectoires de référence pour une discontinuité de 2m.	126
3.11	Écarts ε réels et désirés des sous-systèmes.	127
3.12	Manipulabilité w du manipulateur dans les deux cas de largeur de discontinuité	127
3.13	Position de l'effecteur et du mobile par rapport à leurs trajectoires de référence pour les trois types de base mobile	128
3.14	Manipulabilité w du manipulateur et distance à l'objectif de l'effecteur pour les trois types de base mobile	129

3.15	Position des effecteurs et du mobile par rapport à leurs trajectoires de référence pour les deux configurations possibles de la base mobile du MM3	130
3.16	Manipulabilité w des manipulateurs et distance à l'objectif des effecteurs pour les deux configurations possibles de la base mobile du MM3	130
3.17	Position de l'effecteur et du mobile par rapport à leurs trajectoires de référence pour les différents ensembles de critères proposés.	131
3.18	Manipulabilité w du manipulateur et distance à l'objectif de l'effecteur pour les différents ensembles de critères proposés	132
3.19	Écarts de l'effecteur à sa trajectoire pour l'ensemble des critères λ_w , λ_d , λ_l et λ_θ	132
3.20	Position des effecteurs et du mobile par rapport à leurs trajectoires de référence pour différentes valeurs de α_d avec le robot MM3 sur le scénario 2.	133
3.21	Manipulabilité w des manipulateurs et distance à l'objectif des effecteurs pour différentes valeurs de α_d avec le robot MM3 sur le scénario 2.	134
3.22	Écart latéral du mobile pour différentes valeurs de α_d avec le robot MM3 sur le scénario 2.	134
3.23	Position des effecteurs et du mobile par rapport à leurs trajectoires de référence pour différentes valeurs de α_d avec le robot MM3 sur le scénario 3.	135
3.24	Illustration du quatrième scénario de simulation, utilisant une trajectoire de référence du mobile sous forme de sigmoïde.	136
3.25	Résultats des simulations présentant les variations de méthodes sur la trajectoire de référence et l'hypothèse de convergence.	138
3.26	Manipulabilité et distance à l'objectif lors des simulations utilisant les variations sur la trajectoire de référence du mobile et les critères d'exploration.	138
3.27	Essais expérimentaux sur un manipulateur mobile à roues directrices.	139
3.28	Position dans l'espace des sous-systèmes du MM4 lors des deux essais en cinématique voiture et deux trains directeurs.	140
3.29	Manipulabilité et distance à l'objectif lors des expérimentations du MM4 en cinématique voiture et cinématique à deux trains directeurs.	140
3.30	Écarts réels et désirés du mobile composant le MM4 lors des deux essais en cinématique voiture et deux trains directeurs.	141
3.31	Écarts réels et désirés du manipulateur composant le MM4 lors des deux essais en cinématique voiture et deux trains directeurs.	141
4.1	Essais de la compensation des irrégularités terrain en simulation.	147
4.2	Terrain pour les essais expérimentaux de la compensation d'irrégularités.	148
4.3	Erreur à la trajectoire de l'effecteur lors des essais expérimentaux, sans la compensation, avec la compensation utilisant les données capteurs et avec la compensation utilisant le modèle du mobile.	149
4.4	Repère de modélisation classique des robots mobiles.	151
4.5	Différents modèles cinématiques d'un mobile à deux trains directeurs selon leur prise en compte des perturbations extérieures.	152
4.6	Modèles cinématiques d'un mobile skid-steering avec et sans la prise en compte des perturbations externes	153
4.7	Modèle cinématique équivalent entre un mobile skid-steering et un mobile de type voiture.	156
4.8	Modèle cinématique d'un mobile quelconque avec et sans la prise en compte des perturbations externes sous forme générique.	158
4.9	Présentation des terrains d'essais expérimentaux.	161
4.10	Comparaison des dérives des différents observateurs spécifiques et de l'observateur générique sur un robot skid-steering.	163
4.11	Perturbations obtenues en sortie de l'observateur générique.	163
4.12	Comparaison des erreurs de suivi de trajectoire obtenues en utilisant les observateurs spécifiques et l'observateur générique sur un robot skid-steering.	164
4.13	Erreurs de suivi de trajectoire sans observateur, avec les observateurs dédiés modèle et avec l'observateur générique sur un robot à un ou deux trains directeurs.	164
4.14	Comparaison des dérives obtenues par différents observateurs spécifiques et avec les dérives obtenues par l'utilisation d'un modèle d'équivalence voiture sur un robot skid-steering.	165
4.15	Comparaison des erreurs de suivi de trajectoire obtenues en utilisant les observateurs dédiés modèle ou par l'utilisation d'un modèle d'équivalence sur les lois de commande et d'observation d'un modèle voiture sur un robot skid-steering.	166

4.16	Trajectoire du manipulateur pour le suivi avec et sans observateur.	167
4.17	Dérives estimées par l'observateur générique sur l'effecteur lors du suivi de trajectoire.	168
4.18	Erreurs de l'effecteur par rapport à la trajectoire lors du suivi du manipulateur avec et sans observateur.	168
4.19	Erreurs de suivi de trajectoire du mobile avec et sans l'observateur. Haut erreur longitudinale. Bas : erreur latérale.	170
4.20	Erreurs de l'effecteur par rapport à la trajectoire lors des expérimentations sans ajout de la compensation.	170
4.21	Erreurs de l'effecteur par rapport à la trajectoire lors des expérimentations avec la compensation utilisant les données capteurs.	171
4.22	Erreurs de l'effecteur par rapport à la trajectoire lors des expérimentations avec la compensation utilisant les données modèles.	171
4.23	Comparaison des erreurs de suivi de l'effecteur avec l'observateur du manipulateur et du mobile selon le type de compensation utilisé : modèle ou capteur.	172
5.1	Scénarios expérimentaux proposés sur la tâche applicative de suivi de structure.	178
5.2	Contexte de suivi de structure.	179
5.3	Plateforme utilisée lors des expérimentations de suivi de structure.	179
5.4	Position du mobile et de l'effecteur par rapport à leur référence et la structure de référence lors de la tâche de suivi.	181
5.5	Erreur à l'objectif de l'effecteur lors du suivi de structure selon la coordination et la trajectoire de référence du mobile.	182
5.6	Manipulabilité du manipulateur lors du suivi de structure selon la coordination et la trajectoire de référence du mobile.	182
5.7	Configuration du système lors de l'expérimentation avec le changement de référence et de tâche.	183
5.8	Position du mobile et de l'effecteur par rapport à leurs références et la structure de référence lors de la tâche de suivi avec le changement de référence et de tâche.	183
5.9	Manipulabilité du manipulateur et distance à l'objectif lors de la tâche de suivi avec le changement de référence et de tâche selon la trajectoire de référence du mobile.	184
5.10	Erreurs angulaires de l'effecteur lors de la tâche de suivi avec le changement de référence et de tâche selon la trajectoire de référence du mobile.	184
5.11	Position de l'effecteur et du mobile lors de la simulation du suivi de structure avec l'orientation de l'angle de l'effecteur parallèle à la face de la structure suivie.	185
5.12	Distance à l'objectif et écarts angulaires de l'effecteur par rapport à l'orientation de la face de la structure suivie.	185
5.13	Position du mobile et de l'effecteur lors du suivi de la haie végétale.	185
5.14	Distance à l'objectif de l'effecteur lors du suivi de structure le long d'une haie végétale.	186
5.15	Erreur de l'effecteur lors du suivi de structure le long d'une haie végétale.	186
5.16	Position de l'effecteur et du mobile lors du suivi de structure en pente avec les observateurs bras et mobile.	187
5.17	Erreur de l'effecteur lors du suivi de structure en pente.	188
5.18	Dérives de l'observateur générique du mobile lors du suivi de structure en pente avec les observateurs bras et mobile.	189
5.19	Manipulabilité du manipulateur et distance à l'objectif lors du suivi de structure en pente avec les observateurs bras et mobile.	189
5.20	Erreur de régulation du mobile lors du suivi de structure en pente avec les observateurs bras et mobile.	190
5.21	Erreur de l'effecteur lors du suivi de structure rectiligne en pente à $1m/s$	191
5.22	Erreur du mobile lors du suivi de structure rectiligne en pente à $1m/s$	191
5.23	Manipulabilité et distance à l'objectif lors du suivi de structure rectiligne en pente à $1m/s$	192
C.1	Rotation par les angles d'Euler selon l'ordre de rotation XYZ	215
C.2	Représentation axe-angle u_θ	216
C.3	Changement de repère par l'utilisation des matrices de passage.	220
C.4	Courbe plane	222
C.5	Définition du repère de Frenet pour une droite.	225
D.1	Exemple de mouvement interne sur un manipulateur	228
D.2	Contrainte de roulement sans glissement	231

D.3	Cinématique des trois types de roue classiquement utilisés pour les robots mobiles.	232
D.4	Les cinq classes de robot mobile.	233
F.1	Manipulateur Ur de la société <i>Universal Robot</i>	241
F.2	Schéma cinématique pour la modélisation des manipulateurs Ur	243
G.1	Plateforme Campero de la société Robotnik	248
G.2	Plateformes de manipulation mobile Adap2e	249
H.1	Modélisation 2D d'un manipulateur mobile.	252
H.2	Norme de l'erreur sur l'ensemble des contraintes sur les quatre essais.	254
H.3	Erreur en position de l'effecteur sur les quatre essais.	254
H.4	Erreur angulaire de l'effecteur sur les essais n°2, 3 et 4.	255
H.5	Erreur angulaire de l'articulation du coude du manipulateur sur les essais n°3 et 4.	255
H.6	Erreur angulaire du mobile sur l'essai n°4.	255
H.7	Manipulabilité du système complet sur les quatre essais.	257
H.8	Manipulabilité du manipulateur seul sur les quatre essais.	257
H.9	Situation du manipulateur mobile à la fin de l'expérimentation pour l'essai n°1 et n°2.	258

Liste des tableaux

1.1	Différences parmi quatre environnements de production selon les facteurs qui peuvent avoir un effet sur le robot de récolte	39
2.1	Tableau récapitulatif des approches de coordination en couplage externe	55
2.2	Tableau récapitulatif des facteurs d'amortissement λ proposés dans la littérature	76
3.1	Valeur des paramètres des critères de l'ensemble minimal	124
3.2	Temps et distance de convergence du mobile.	125
3.3	Paramètres géométriques des plateformes.	125
4.1	Moyenne et écart-type des erreurs à la trajectoire de l'effecteur avec et sans la compensation des irrégularités du terrain.	148
4.2	Équation des modèles étendus complets du mobile à deux trains directeurs dans le repère de Frenet et dans le repère absolu.	152
4.3	Équation des modèles étendus complets du mobile skid-steering dans le repère de Frenet et dans le repère absolu.	153
4.4	Paramètres de glissement $\hat{\beta}$ and $\hat{\beta}_r$ donnés par l'observateur par backstepping.	154
4.5	Paramètre de glissement v_p donné par l'observateur par backstepping.	154
4.6	Paramètre de glissement $\hat{\theta}_p$ et β_f donnés par l'observateur par backstepping.	154
4.7	Hybridation du modèle dans le repère de Frenet ($\dot{\epsilon}_s$ et $\dot{\epsilon}_y$) et dans le repère absolu ($\dot{\epsilon}_\Theta$).	159
4.8	Gain de contrôle et d'observation pour les trois mobiles lors des expérimentations.	162
4.9	Moyenne et écart-type des erreurs des trois modèles de robots avec et sans les différents observateurs.	165
4.10	Moyenne et écart-type des erreurs de suivi de trajectoire avec le mobile en skid-steering selon le type de modèle utilisé pour la commande et l'observation.	166
4.11	Gains de commande et d'observation du manipulateur lors des expérimentations.	167
4.12	Moyenne et écart-type des erreurs de suivi de trajectoire du manipulateur avec et sans observateur.	167
4.13	Moyenne et écart-type des erreurs à la trajectoire de l'effecteur selon les différentes expérimentations menées avec/sans la compensation/l'observateur du mobile/l'observateur du manipulateur.	169
5.1	Configuration des écarts désirés fixes des sous-systèmes lors des essais sans coordination	181
5.2	Moyenne et écart-type des erreurs à la trajectoire de l'effecteur, des erreurs de régulation, de la manipulabilité et de la distance à l'objectif lors du suivi de structure en pente.	187
5.3	Moyenne et écart-type des erreurs à la trajectoire de l'effecteur, des erreurs de régulation, de la manipulabilité et de la distance à l'objectif lors du suivi de structure rectiligne le long d'une pente régulière.	191
A.1	Modèle de Frenet étendu avec les paramètres de perturbation génériques pour le mobile Skid-steering et le mobile à deux trains directeurs.	205
A.2	Vitesse de contrôle longitudinale v pour les modèles étendus (première ligne) et pour le modèle générique (seconde ligne).	206
A.3	Dérivée spatiale ϵ'_{m_y} pour l'observateur étendu (première ligne) et pour l'observateur générique (deuxième ligne).	206
A.4	Valeur de $f^s_{m_{py}}$ évaluer pour les modèles skid-steering et à deux trains directeurs.	207

A.5	Écart de cap ε_{m_θ} pour un mobile à deux trains directeurs et un mobile skid-steering avec les observateurs dédiés et l'observateur générique. Ces valeurs sont ensuite considérées comme la valeur désirée de la commande virtuelle ψ^d	207
A.6	Commande de la vitesse de lacet avec les observateurs dédiés et l'observateur générique pour un mobile Skid-steering.	207
A.7	Commande de l'angle de braquage avant avec les observateurs dédiés et l'observateur générique pour un mobile à deux trains directeurs.	208
D.1	Tableau des modélisations classiques de plusieurs cinématiques de mobiles dans le repère absolu et de Frenet, utilisées au sein de cette thèse.	234
F.1	Caractéristiques techniques des manipulateurs Ur5, Ur10 et Ur10e.	242
F.2	Ensemble des paramètres géométriques du manipulateur.	242
F.3	Solution au modèle géométrique inverse du manipulateur de la série Ur.	246
G.1	Caractéristiques techniques de la plateforme Campero	247
G.2	Caractéristiques techniques de la plateforme Adap2E	249

Glossaire

- ADRC : Active Disturbance Rejection Control.
- ANFIS : Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System.
- AQF : Adaption of a Quality Function.
- ARA : Auvergne-Rhone-Alpes.
- BiRRT : Bi-directional Rapidly-exploring random tree.
- CIR : Centre instantané de rotation.
- CNH : Contrainte de non-holonomie.
- CNN : Convolutional Neural Network.
- CM : Capability Map.
- CPER : Contrat de plan état-region.
- DAC : Distributeur automatique de concentré.
- DLS : Damped Least Squares.
- DOB : Disturbance Observer.
- EID : Equivalent Input Disturbance.
- EKF : Extended Kalman Filter.
- ERF : Elastic Roadmap Framework.
- ESO : Extended Observer State.
- FNN : Fuzzy Neural Network.
- FWNN : Fuzzy Wavelet Neural Network.
- FWS : Four Wheels steering.
- GESO : General Extended State Observer.
- GPIO : Generalized Proportional Integral Observer.
- GPS : Global Positioning System.
- GRNN : General Regression Neural Network.
- HAMP : Hierarchical and Adaptative Mobile Manipulator Planner.
- HAMP-U : Hierarchical and Adaptative Mobile Manipulator Planner-Uncertainty.
- HAMP-BUA : Hierarchical and Adaptative Mobile Manipulator Planner-Base pose Uncertainty and its propagation to Arm motions.
- HGO : High Gain Observer.
- HQP : Hierarchical Quadratic Programming.
- HSMFNN : Hybride Sliding-Mode Fuzzy Neural Network.
- IBE : Input Based Estimator.
- IESO : Improved Extended Observer State.
- IMU : Inertial Measurement Unit.
- INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.
- IOBO : Input Output Based Observer.
- JRAE : Joint range availability.
- MIMO : Multiple-Input-Multiple-Output.
- MISO : Multiple-Input-Single-Output.
- MLP : MultiLayered Perceptron.
- MPC : Model Predictive Control.
- MPI : Manipulability Percentage Index.
- NDOB : Non-linear Disturbance Observer.
- NMPC : Nonlinear Model Predictive Control.
- OAD : Outils d'aide à la décision.
- OBE : Output Based Estimator.
- OGM : Organisme génétiquement modifié.
- OHMP : Optimized Hierachical Mobile Manipulator Planner.
- PD : Proportionnelle - Dérivée.
- PID : Proportionnelle - Intégrale - Dérivée.
- PIO : Proportional Integral Observer.
- POB : Perturbation Observer.
- PRM : Probabilistic roadmap.
- QP : Quadratic programming.
- RAMP : Real-Time Adaptative Motion Planning.
- RBFN : Radial Basis Function Network.
- RFNN : Recurrent Fuzzy Neural Network.
- RFWNN : Recurent Fuzzy Wavelet Neural Network.
- RLS ; Recursive Least Squares.
- RNN : Recurrent Neural Network.
- ROS : Robot operating system.
- RRT : Rapidly-exploring random tree.
- SDLS : Selectively damped Least Squares.
- SISO : Single-Input-Single-Output
- SLAM : Simultaneous Localisation And Mapping.
- SLQ : Sequential Linear Quadratic.
- SLSQP : Sequential Least-Squares Quadratic Programming.
- SNC : State Noise Compensation.
- TOM : Tip-over moment.
- TOMM : Task Oriented Manipulability measure.
- UCA : Université Clermont Auvergne.
- UDE : Uncertainty Disturbance Estimator.
- UIO : Unknown Input Observer.
- UKF : Unscented Kalman Filter.
- VDA : Virtual Decomposition Approach.
- WNN : Wavelet Neural Network.
- ZMP : Zero Moment Point.

Chapitre 1

Introduction générale

SOMMAIRE DU CHAPITRE

1.1	De l'outil à la robotique	26
1.1.1	L'évolution de l'outil technique	26
1.1.2	De la fiction à la réalité	28
1.1.3	La robotique de nos jours	28
1.2	Contexte agricole : de l'agriculture intensive à l'agroécologie	29
1.2.1	Amélioration de la production	30
1.2.2	Pérennité de l'environnement	31
1.2.3	Amélioration des conditions de travail des agriculteurs	32
1.2.4	Essor de l'agroécologie	32
1.3	La robotique : une des solutions de l'agroécologie	33
1.3.1	Apport de la robotique au monde agricole	34
1.3.2	La robotique dans le mode agricole d'aujourd'hui	34
1.3.2.1	Dans les élevages	35
1.3.2.2	Dans les cultures	35
1.3.3	Diversité des tâches à accomplir	37
1.3.3.1	Variation de l'environnement	38
1.3.3.2	Diversité des objets d'intérêts	40
1.3.3.3	Type d'atelier sur l'exploitation	40
1.4	Outil et porte-outils	41
1.4.1	Outil	41
1.4.2	Porte-outils	42
1.4.2.1	Robotique manipulatrice	42
1.4.2.2	Robotique mobile	43
1.4.3	Manipulateurs mobiles	44
1.5	Inscription de la thèse dans le contexte agricole et robotique	44
1.5.1	Intérêt de la commande coordonnée	45
1.5.2	Verrous scientifiques de la commande coordonnée	46
1.5.3	Manipulateur mobile en milieu naturel	46
1.5.4	Objectifs de la thèse	47
1.5.5	Plan du mémoire de thèse	47
1.6	Contexte de travail	47

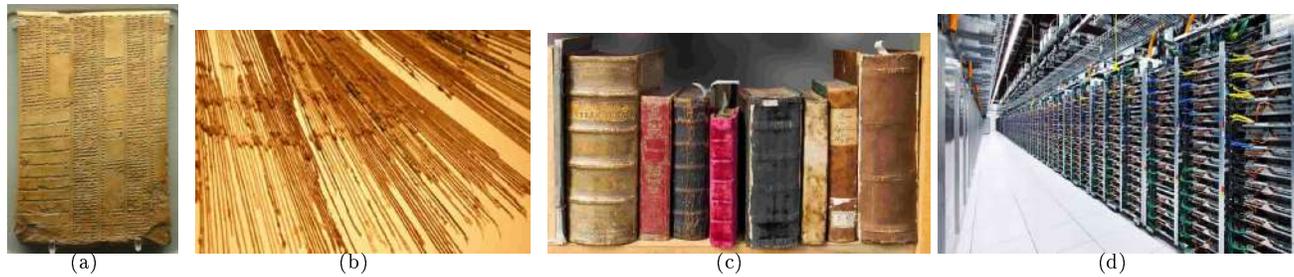


FIGURE 1.1 – Exemple de système de stockage de données dans l’histoire. (a) Tablette d’argile Sumérienne. (b) Quipu incas basés sur des noeuds le long de cordes permettant de tenir une comptabilité. (c) Livre, stockage de données sur papier relié. (d) Data center de l’entreprise Google.

1.1 De l’outil à la robotique

1.1.1 L’évolution de l’outil technique

Tout au long de son histoire, l’homme imagina des outils pour l’aider dans les tâches qu’il eût à mener, que ce soit des premières pierres taillées permettant de chasser et découper la viande, des marteaux pour bâtir, des charrues pour préparer la culture des sols ou encore, des véhicules roulants pour déplacer des charges sur de longues distances. Dans ce domaine, chaque civilisation, qu’elle soit aujourd’hui disparue ou non, selon son mode de vie et sa culture, rivalisa d’ingéniosité avec les autres, pour inventer des systèmes et des méthodes de plus en plus aboutis et perfectionnés afin de simplifier les tâches qu’elles avaient à accomplir. Que ce soit des bâtisseurs tels que l’Egypte des pyramides ou des nomades comme les peuples d’Amérique du nord, chacun développa des systèmes et des méthodes permettant de faciliter leur quotidien en fonction des connaissances, techniques et matières premières dont il disposait.

Cette recherche de la réalisation de travaux par l’utilisation d’outils n’est pas nouvelle et elle s’est propagée dans l’ensemble des aspects de la vie des hommes. Que ce soit du marteau pour planter des clous, du four pour faire cuire le pain, de la monnaie pour gérer le commerce, de nouveaux outils ont été quotidiennement inventés et améliorés pour développer les sociétés humaines. Ces systèmes, de plus en plus complexes et performants à travers les années, permettent à la fois de déléguer une tâche de l’homme à l’outil et d’en améliorer la réalisation. L’écriture, par exemple, a été inventée pour permettre aux hommes de mémoriser d’énormes quantités de données sur de nombreuses générations alors que la mémoire humaine est imparfaite et dure rarement au delà d’un siècle. Pour ranger et classer ces nouvelles quantités d’innombrables données, les systèmes de catalogage ont alors été inventés, permettant de retrouver l’information plus efficacement HARARI (2015). De nos jours, ces mêmes données ne sont plus stockées sur des tablettes d’argile (Fig.1.1(a)) ou des rouleaux de parchemin mais dans des bases de données informatiques (Fig.1.1(d)) permettant un stockage encore plus important, dans un espace restreint et sur un support plus résistant. De même, les algorithmes de recherche et de classification ont remplacés les index des catalogues permettant de retrouver une information dans un temps minimal. Entre les tablettes d’argile sumérienne et les bases de données actuelles, trois millénaires d’histoire ont fait évoluer l’outil technique destiné à une tâche inchangée pour le rendre plus performant.

Cependant, l’évolution des outils techniques recherche, en plus de la performance, à se rendre indépendante de l’homme, à être capable d’agir sur l’environnement sans son intervention. Durant l’antiquité, Heron d’Alexandrie imagina des mécanismes de théâtre permettant de mouvoir plateformes et personnages, ou encore d’ouvrir les portes de temples sans recourir à la force humaine (Fig.1.2(a)). Plus récemment, durant le Moyen âge, les moulins ont évolué pour être activés à la force du vent, de l’eau ou de l’animal amenant des mécaniques plus élaborées pour démultiplier les forces destinées à moudre le grain (Fig.1.2(b)). Durant la Renaissance, Léonard de Vinci imagina à son tour des systèmes capables de se déplacer par eux-mêmes tels que le lion ou le chevalier mécanique (Fig.1.2(c)). Deux siècles et demi plus tard, Jacques de Vaucanson présente son célèbre canard digesteur et ses automates musicaux (Fig.1.2(d)). Bien que ces derniers exemples semblent s’éloigner de l’outil technique à proprement parler, ils n’en restent pas moins une belle illustration de ce que ces outils permirent de créer à leur époque, ainsi qu’un aperçu de ce que peuvent réserver les siècles à venir.



FIGURE 1.2 – Exemple de système technique à travers l'histoire. (a) Illustration du système de porte automatique imaginé par Héron d'Alexandrie. (b) Roue à aube d'un moulin à eau. (c) Reconstitution du chevalier de Léonard de Vinci. (d) Illustration du joueur de tambourin, du flûteur automate et du canard de Jacques de Vaucanson.

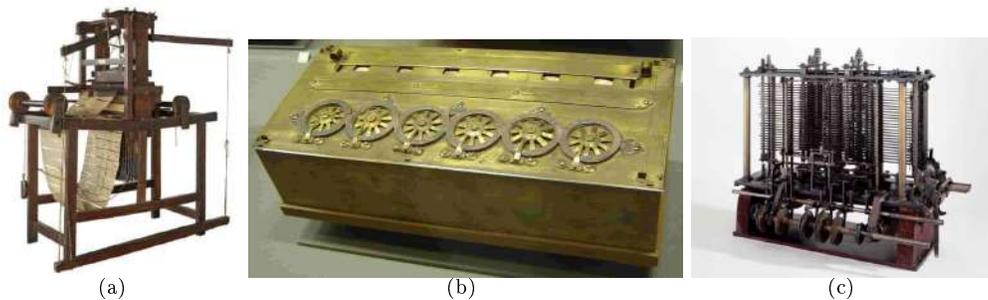


FIGURE 1.3 – Exemple des systèmes techniques programmables dans l'histoire. (a) Reconstruction d'un métier à tisser de Jacquard. (b) Pascaline. (c) Reconstruction d'une machine analytique de Babbage.

La révolution industrielle émergeant, d'importantes usines se créèrent grâce au système fer/houille/vapeur, caractéristique de cette époque JACOMY (2015) et l'on eut besoin de produire de plus en plus en masse. Les outils cherchèrent alors une flexibilité en permettant à l'ouvrier qui les utilisait, de réaliser plusieurs tâches différentes. Dans ce domaine, les industries textiles du XIX^{ème} siècle ont beaucoup fait. Ainsi en 1801, Joseph Marie Jacquard, crée le premier système mécanique fonctionnant par l'utilisation de carte perforée permettant de tisser différents motifs selon la perforation de la carte (Fig.1.3(a)). Ce genre de système permettra, en 1834, à Charles Babbage, d'imaginer une machine analytique programmable (Fig.1.3(a)) près de deux siècles après la création de la Pascaline (Fig.1.3(b)), premier système mécanique permettant de réaliser des calculs mathématiques. Ce fut par la suite sur les travaux de Babbage qu'Ada King, comtesse de Lovelace, développa le premier algorithme de l'histoire et ouvrit ainsi la porte à une nouvelle révolution qui n'arrivera qu'un siècle plus tard. Ainsi, ce fut au tour des domaines de l'électronique et de l'informatique de remplacer les anciens rouages mécaniques dans l'espoir de pousser toujours plus loin la flexibilité et l'efficacité de ces outils.

Toutefois, malgré le perfectionnement de l'outil, son indépendance de l'homme ne peut être assurée qu'en lui fournissant un moyen lui permettant d'agir selon des conditions variables. Malgré la puissance de calcul offerte par l'informatique, l'existence des structures de contrôle communes à tout langage de programmation est indispensable pour faire plus qu'une simple amélioration du boulier. Malgré la complexité et la précision des engrenages des horloges astronomiques, ces dernières sont condamnées à répéter inlassablement les mêmes mouvements. La première forme d'"intelligence" imaginée pour rendre plus autonomes nos outils est la notion d'asservissement par une boucle de rétroaction et, à travers elle, la régulation (Fig.1.4(a)), retrouvée à travers l'histoire sur différents systèmes. Ce concept simple est pourtant extrêmement prolifique et a ouvert la voie au domaine de l'automatique, de la cybernétique et aujourd'hui, de la robotique. Il est la base de nos systèmes automatisés actuels par le triplet *Perception-Décision-Action* LAUMOND (2001). D'une forme très simpliste, le régulateur à boules de James Watts permet de contrôler la vitesse de rotation d'une machine à vapeur autour d'un point de consigne en variant l'admission de la vapeur, à partir de la vitesse mesurée, sécurisant ainsi le fonctionnement de la machine (Fig.1.4 à droite). Ceci a ensuite ouvert la voie à de nombreux types de régulateurs dont le PID (Fig.1.4(c)) encore très utilisé de nos jours. Bien que les capteurs et systèmes de commande se soient considérablement améliorés et perfectionnés, les bases de nos systèmes automatisés restent concentrées autour de ce triplet et du principe d'asservissement.

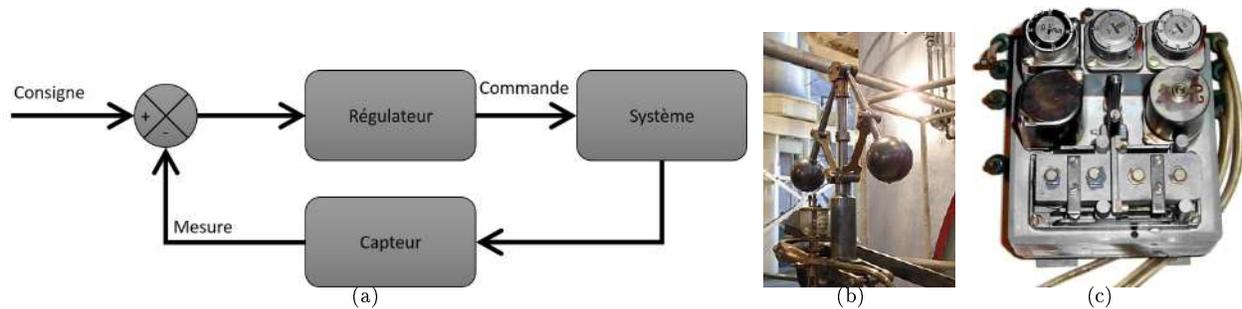


FIGURE 1.4 – Principe de régulation. (a) Principe d'une boucle de rétroaction. (b) Régulateur à boule de James Watt. (c) Régulateur PID pneumatique.

1.1.2 De la fiction à la réalité

L'évolution des outils au fil des âges a permis de changer les aspects du quotidien des hommes de façon très tangible. Pourtant, cette évolution a continuellement nourri des fantasmes de l'imaginaire des hommes, lui-même ayant nourri leur créativité. Dès l'antiquité, l'idée d'un homme de bronze forgé par Hephæistos, naquit dans l'esprit des gens en la personne du géant Talos. Plus récemment, ces idées prirent part dans la littérature, portées notamment par Jules Vernes ou encore Mary Shelley, donnant naissance à la science-fiction. De nos jours, ces mêmes idées promulguent encore de nouveaux courants imaginaires, tels que le steampunk ou cyberpunk, toujours basés sur l'idée du progrès de l'homme et de l'outil et à terme de l'indissociation même de l'homme et de l'outil.

De plus, cette même idée poussée à son paroxysme motiva l'introduction du terme *robot* dans notre imaginaire. Ce ne sera qu'en 1920, lors de l'écriture de la pièce de théâtre *Rossum's universal Robots* par Karel Capek, qu'apparaîtra pour la première fois le mot "robot", provenant du terme tchèque *robota* signifiant "travail, corvée", issu du slave *rob*, signifiant "esclave". Auparavant, afin de désigner ces machines de plus en plus perfectionnées, on parlait d'automate signifiant d'après sa racine latine *automatus*, "qui se meut soi-même". Capek introduisit le terme *robot* afin de désigner un être artificiellement créé, à l'image de l'homme mais débarrassé de toute fonction inutile et conçu spécifiquement pour réaliser toutes les tâches autrefois dévolues à l'homme.

Par la suite, l'auteur de science-fiction Isaac Asimov introduit le terme *robotique* et participa à populariser ce terme passé aujourd'hui dans le langage courant par son œuvre dont l'un des thèmes majeurs fut celui des robots. Depuis cette époque, les robots n'ont eu de cesse de nourrir notre imaginaire collectif au sein de nombreuses œuvres de fiction sur différents supports mettant en scène des systèmes dont la technologie nous est aujourd'hui encore inaccessible, malgré plus d'un demi-siècle de recherche scientifique leur étant consacré. Dès lors, le terme *robot* passé dans le langage courant, reste flou et désigne désormais de nombreux systèmes techniques, le plus souvent mécatroniques, mais s'extrapole volontiers à d'autres domaines tels que l'informatique, où le terme désigne un programme spécifique, ce dernier restant purement immatériel.

De nos jours, la robotique est devenue un domaine technique et de recherche à part entière, foisonnant de nouveaux travaux toujours plus avancés. Cependant, l'utilisation de ce terme montre à quel point fiction et réalité s'entremêlent.

1.1.3 La robotique de nos jours

Finalement, il n'existe pas, au cours de l'histoire, une "fracture" annonçant l'arrivée de la robotique, cette dernière étant le résultat d'une longue évolution des savoirs et des techniques, ainsi que de l'imaginaire collectif. Aujourd'hui, les outils que nous utilisons, il y a dix ans, un siècle ou même un millénaire, continuent leur évolution pour assister au mieux l'être humain dans sa vie quotidienne. Ce à quoi nous assistons depuis plusieurs années maintenant, est une accélération de l'automatisation de nombreuses tâches dans notre vie quotidienne, mais également une généralisation de cette automatisation dans de très nombreux domaines qui, jusqu'à aujourd'hui, n'utilisaient

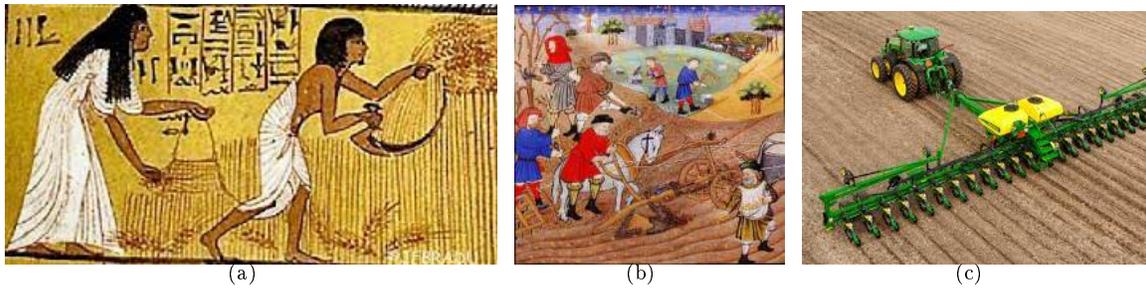


FIGURE 1.5 – Evolution des types de puissance utilisées en agriculture. (a) Représentation de l'agriculture en égypte antique. (b) Représentation de la traction animale au moyen-âge en Europe. (c) Moyen moderne de traction mécanique dans l'agriculture.

que peu de systèmes techniques ou automatisés.

Elle se développe dans tous les aspects de notre quotidien, que ce soit dans les transports, l'industrie, le monde agricole, le service à la personne ou bien même au sein de nos maisons, engageant notre société dans une nouvelle transformation. Ainsi, les robots autrefois destinés à des tâches répétitives, difficiles, voire même dangereuses pour l'être humain, tels que l'assemblage sur les chaînes de montage T. SONG et al. (2016), l'exploration spatiale SEENI, SCHÄFER et HIRZINGER (2010) ou encore la surveillance de sites à risques NAGATANI, KIRIBAYASHI et al. (2013), se tournent désormais vers l'assistance de l'humain dans son quotidien. Cela se traduit par l'intérêt croissant pour le développement et la recherche sur les voitures autonomes, l'essor des maisons connectées, l'apparition de robots d'assistance pour les personnes âgées TSUI et al. (2009), ou encore pour aider les chirurgiens lors d'une opération BOYD et al. (2000).

L'évolution de nos sociétés amène la robotique à explorer de nouvelles applications permettant de répondre à des attentes plus ambitieuses en devenant plus versatiles, plus autonomes et devant réaliser des tâches de plus en plus complexes. De même, les robots doivent désormais composer avec des environnements de moins en moins contrôlés et normés. Auparavant cantonnés à des cellules de travail entièrement contrôlées, ces systèmes doivent maintenant être capables de sortir de ces espaces pour opérer, voire se déplacer au sein d'un espace beaucoup plus grand et non maîtrisé. Cela implique également que ces systèmes doivent partager leur espace de travail avec l'homme, voire coopérer dans la réalisation de tâches avec lui ou avec d'autres robots.

De fait, la recherche d'outils performants et flexibles est encore loin d'être aboutie à l'heure actuelle, et les travaux présentés dans le cadre de cette thèse s'inscrivent pleinement dans cet objectif.

1.2 Contexte agricole : de l'agriculture intensive à l'agroécologie

Comme le reste de la société, le domaine agricole n'a pas été en reste en ce qui concerne la recherche et le développement des outils techniques. Que les innovations soient matérielles, telle que le soc de charrue en fer, ou encore agronomiques avec la rotation des cultures, le domaine agricole a contribué au développement technique de nos sociétés. Depuis les premiers berceaux de l'agriculture il y a dix mille ans, où l'homme cultivait manuellement (Fig.1.5(a)), à la traction animale (Fig.1.5(b)) permettant de retourner la terre plus efficacement, jusqu'à la mécanisation (Fig.1.5(c)) et les apports de la chimie qui changèrent le paradigme de l'agriculture au siècle dernier, l'outil agricole se perfectionna en continu pour améliorer les rendements et le confort des exploitants.

De nos jours, l'agriculture fait partie des secteurs dont les attentes économiques, environnementales et sociétales sont fortes. Ces attentes poussent l'agriculture à évoluer vers des changements de paradigme nécessaires. Cependant, ce changement ne peut être réalisé que par le développement de nouveaux outils pouvant l'accompagner et répondre à l'ensemble de ces demandes.

Il est courant d'entendre parler des différentes révolutions industrielles qui ont jalonné notre histoire, débutant par le développement de la mécanisation, basée sur la machine à vapeur à la fin du 18ème siècle, suivie par l'introduction de l'électricité et l'apparition de la production de masse à la fin du 19ème siècle et, enfin, la robotisation et

l'automatisation des industries. On annonce désormais la quatrième révolution industrielle, appelée industrie 4.0, qui repose sur quatre piliers illustrant les nouvelles attentes de notre époque :

- Une production flexible et personnalisable s'adaptant à la demande en temps réel.
- Une traçabilité complète.
- Une maintenance efficace.
- Une usine avec une efficacité énergétique importante et économe en matière première.

Similairement à l'industrie, l'agriculture a connu des révolutions au cours de son histoire avec, notamment, la mécanisation agricole au début du siècle dernier, ou encore le développement des organismes génétiquement modifiés et l'apport de la chimie dans ce domaine. De nos jours, une majeure partie des paradigmes futurs imaginés pour l'agriculture repose sur l'utilisation des systèmes robotisés, du "big data" ou encore de l'intelligence artificielle. Par analogie avec l'industrie, cette révolution est nommée par certains : agriculture 4.0 RIOT et EGON (2018). Cette digitalisation nouvelle et massive de l'agriculture correspond à son entrée dans une période charnière de son histoire, au moment où elle doit être capable de se renouveler afin de répondre à trois principaux enjeux ADAM et GENERAL (2017) :

- La garantie du niveau de productivité compatible avec la croissance de la population
- La pérennité de l'environnement.
- L'amélioration des conditions de travail, de santé et de bien être des agriculteurs.

1.2.1 Amélioration de la production

Historiquement, la production agricole a toujours été un enjeu majeur de toute société et à la base de son bon fonctionnement. On retrouve déjà cette idée dans les civilisations anciennes qu'elles soient romaines, grecques ou encore chinoises PRETTY (2008) avec, par exemple, l'expression *Panem et circenses* "Du pain et des jeux" nous venant de la Rome antique. Le problème de production agricole a également pu être à l'origine de révolutions et d'importantes mutations à l'échelle mondiale, telles que la famine de la pomme de terre en Irlande entre 1845 et 1852, qui a bouleversé l'économie du pays ainsi que sa démographie par un exode massif des Irlandais vers l'Amérique.

Cet enjeu de production, encore d'actualité, se fait de plus en plus présent par l'évolution de la population qui ne cesse de croître d'année en année et qui dépassera neuf milliard d'ici 2050 BÉLANGER, PILLING et al. (2019); BERGERMAN et al. (2016); STEENSLAND et ZEIGLER (2017). Cet accroissement de la population engendre une demande de nourriture de plus en plus importante, mais également une demande d'autres produits issues de l'agriculture comme le bio-fuel BOMMARCO, KLEIJN et POTTS (2013) ou encore les énergies issus de la biomasse (méthanisation, ...). En conséquence, l'agriculture doit garder une productivité suffisante pour répondre à ces besoins.

Dans ce but, des progrès très importants ont pu être faits en matière de production agricole depuis la moitié du siècle dernier. Les stratégies développées ont été l'extension des terres arables (de 9% depuis 1961 BOMMARCO, KLEIJN et POTTS (2013)), la mécanisation, la mise en place de l'irrigation et l'utilisation de plus en plus massive d'intrants extérieurs tels que les fertilisants et produits phytosanitaires STEENSLAND et ZEIGLER (2017). Depuis les années 50 jusque dans les années 70, les campagnes ont également été le lieu d'importants aménagements fonciers (voir Fig.1.6), le remembrement (voir Fig.1.6(a)), visant à augmenter la taille des parcelles en enlevant les haies et bosquets, facilitant le travail des tracteurs, l'installation des systèmes de drainage (voir Fig.1.6(b)) asséchant des marais, ou le recalibrage et reprofilage des cours d'eau (voir Fig.1.6(c)). Ces approches ont permis une augmentation massive de la production agricole de 145% depuis le début des années 1960 PRETTY (2008).

Aujourd'hui, ce système de production intensif est cependant remis en cause par de nombreux acteurs de notre société qu'ils soient politiques, citoyens ou même agriculteurs PAYSAN (2021). En jeu, les considérations environnementales, sociétales et sanitaires que l'agriculture intensive a délaissé au profit d'une production toujours plus importante.

1.2.2 Pérennité de l'environnement

Depuis plusieurs années déjà, la société prend conscience que ces modes intensifs et productivistes de l'agriculture ne pourront, à terme, répondre aux besoins de production mondiaux PRETTY (2008); MINISTÈRE DE



FIGURE 1.6 – Aménagement foncier des territoires agricoles à partir des années 50. (a) Evolution du paysage de La Roë (Mayenne) avant et après remembrement GÉOCONFLUENCE (2022). (b) Pose d'un drain dans une parcelle agricole. (c) Modification du cours de l'Udon entre 1947 et 2016 SYMOA (2016).



FIGURE 1.7 – Différentes pratiques de travail du sol. (a) Labour d'un champ. (b) Travail culturel simplifié, travail de la terre sans labour. (c) Semis-direct. (d) Semis-direct sous couvert végétal.

L'AGRICULTURE (2012). De fait, cette stratégie a mené à une faible diversité de cultures et une spécialisation des exploitations dans leur production. En 2012 en France, sur 90% des sols cultivables, on trouvait seulement sept cultures différentes et 85% des exploitations cultivaient moins de quatre cultures différentes. Ces assolements peu diversifiés se traduisent alors par de courtes rotations de cultures et accroissent les risques sanitaires. Cela participe également à l'augmentation des surfaces des parcelles d'exploitation causant la disparition des haies bocagères, des bois et redessinant le parcours de certains cours d'eau. Cela favorise ainsi l'érosion et le lessivage du sol, ainsi que la destruction d'une partie de la biodiversité de ces espaces BAUDRY (2019) et potentiellement, contribue à la présence croissante de certains ravageurs. De même, la réponse au risque sanitaire et aux espèces nuisibles implique un usage accru des herbicides et insecticides et prend part à la destruction de la biodiversité des sols mais aussi au déclin de certaines espèces essentielles à l'agriculture.

Dans ce même mode cultural, l'utilisation du labour (Fig.1.7(a)) empêche la restructuration des sols et détruit leur écosystème ce qui diminue leur fertilité. En réponse, d'autres pratiques telles que le semis-direct (Fig.1.7(c)) ou le semis sous couvert végétal (Fig.1.7(d)) n'utilisent plus le labour mais imposent un meilleur contrôle de la végétation parallèle à la culture commerciale, par l'utilisation de produits phytosanitaires. D'autre part, l'utilisation de machines agricoles, toujours plus conséquentes, génère une compaction du terrain ce qui limite l'enracinement des cultures et la quantité d'eau retenue, diminuant la productivité de la parcelle TOMIS et al. (2014). En agriculture biologique, le désherbage mécanique nécessaire au contrôle des adventices impose que le nombre de passages de tracteur dans une parcelle soit plus important qu'en agriculture conventionnelle et contribue davantage à la compaction des sols DICTE (2008).

L'appauvrissement des sols pousse alors à l'usage massif d'engrais minéraux NPK (azote, phosphore, potassium) dont le coût environnemental (extraction et fabrication) est important et se répercute économiquement sur l'agriculteur et le consommateur. De plus, le manque de matière organique des sols, notamment par l'enfouissement dû aux labours, rend difficile la retenue des engrais minéraux dans le sol, qui se déversent alors par lessivage dans les cours d'eau et par pénétration dans les nappes phréatiques.

L'ensemble de ces raisons motive aujourd'hui l'évolution de nos pratiques culturales afin de pérenniser l'agriculture et de lui permettre de maintenir ce niveau de production. Cependant, cela ne doit pas se faire au détriment de l'agriculteur qui reste au cœur de l'exploitation et de son fonctionnement.

1.2.3 Amélioration des conditions de travail des agriculteurs

En parallèle des problèmes environnementaux posés par cette agriculture, reviennent aussi les questions concernant les conditions de travail des exploitants et la main d'œuvre nécessaire pour les travaux agricoles. En plus d'être productive et propre, l'agriculture doit permettre à l'exploitant d'avoir un revenu tout en garantissant sa sécurité au travail. Les revenus d'activité des non-salariés agricoles en 2017 sont en moyenne de 1390 euros par mois et peuvent descendre à 620 euros par mois pour certaines productions (ovin, caprin) INSEE (2017). De plus, la spécialisation des exploitations permettant de faire des économies d'échelle devant le coût important d'une exploitation (terres, bâtiments, matériels ...) accroît le risque financier par la volatilité des prix du marché agricole, les aléas climatiques et les risques sanitaires.

D'un autre côté, la santé est un facteur important à prendre en compte. Plusieurs études tendent à montrer que le risque de troubles musculo-squelettiques (TMS) est plus élevé parmi les agriculteurs OSBORNE et al. (2012); ROQUELAURE et al. (2019) à cause des travaux pénibles et fastidieux. Dans les élevages de petits animaux par exemple, la manipulation des bêtes est quotidienne et répétitive, facteur provoquant des TMS. De plus, beaucoup d'études ont été effectuées et sont encore en cours sur les effets d'exposition aux pesticides MINISTÈRE DES SOLIDARITÉS ET DE LA SANTÉ (2019) mais elles apportent déjà certains résultats, notamment des liens avec l'apparition de cancers INSTITUT NATIONAL DU CANCER (2014). De plus, la santé du consommateur peut également être mise en jeu par l'ingestion de résidus de pesticides dans la nourriture, notamment par des effets "cocktails" de plusieurs molécules LUKOWICZ et al. (2018). Sur ce point, la controverse est grande au sujet des influences potentielles de ces molécules sur telle ou telle maladie (ou encore des OGM (Organisme génétiquement modifié)) et des risques admissibles selon nos connaissances, malgré les études qui progressent pour essayer de mieux saisir ces impacts. Malgré tout, la question est posée au sein du débat public et est devenue, ces dernières années, une véritable question de société.

Ces différents facteurs, appuyés par la migration rurale vers les villes, participent à la diminution des exploitations et la raréfaction de la main d'œuvre. Or, à certaines périodes de l'année, notamment pour les récoltes, le besoin de main d'œuvre de manière ponctuelle peut se faire jusqu'à sept fois plus important que pendant le reste de l'année BERGERMAN et al. (2016); MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE (2012) ce qui entraîne de véritables défis de recrutement ou des pénuries de mains d'œuvre VERBIEST et al. (2020).

1.2.4 Essor de l'agroécologie

Afin de répondre à l'ensemble des besoins et des problèmes détaillés précédemment, une approche des pratiques agricoles prend de plus en plus de place dans la discussion publique. On parle aujourd'hui d'agroécologie CHAMBRES D'AGRICULTURE (2020). Cette discipline englobe des réflexions bien plus larges que l'agriculture seule. Certes, elle s'intéresse à ses pratiques, selon les modes de production, la valorisation des ressources, la valorisation de la biodiversité,... mais également aux aspects sociaux à travers l'emploi agricole, l'utilisation de ressources locales, l'autonomie alimentaire et s'appuie sur une grande diversité de domaines de recherche, qu'ils soient agronomique, écologique, des sciences humaines et sociales, de la transformation et de l'alimentation ou encore de la santé. Dans le cadre traité ici, seul l'aspect agricole et pratiques culturelles sera traité, mais il est important de saisir que ce domaine, plébiscité de nos jours, se veut bien plus large que cela et ne peut se fonder en une structure formelle et précise. La définition même des approches considérées comme agroécologiques fait débat tant les indicateurs permettant de les qualifier sont imprécis, quelques fois inexistantes, voire, concernent des domaines difficilement quantifiables et mesurables.

Cependant, cela traduit une tendance de fond des agriculteurs et de la société en général, à rechercher de nouvelles méthodes de production. Cette tendance, très concrète, se retrouve sur le terrain où des expérimentations voient le jour pour trouver des solutions aux besoins et enjeux discutés précédemment. Parmi ces dernières, le semis direct, le semis direct sous couvert, les bâtiments mobiles, la culture sur planche permanente, les associations de cultures ou d'animaux, la permaculture,...

Cependant, la mise en place de ces diverses pratiques requiert le développement d'outils spécifiques facilitant et optimisant le travail de l'agriculteur.



FIGURE 1.8 – Différents types de robots selon les approches agricoles. (a) Ferme hydroponique automatisée Iron Ox en 2018. (b) John Deere autonome présenté au CES 2022. (c) Robot Xaver de la société Fendt en 2020. (d) Robot adap2e de l'INRAE en 2019 travaillant en collaboration pour la pulvérisation le long d'une haie

1.3 La robotique : une des solutions de l'agroécologie

Différentes écoles de pensée sont attachées à la mise en place effective de pratiques agroécologiques ainsi que de moyens à mettre en place pour y arriver. Ces dernières peuvent par ailleurs se trouver radicalement opposées, les premières proposant un modèle basé sur les hautes technologies avec l'utilisation massive de l'intelligence artificielle, des données collectées par des batteries de capteurs et le recours à la robotique de précision. Les secondes, au contraire, PAYSAN (2021) estiment que cette digitalisation agricole pousse encore plus avant le système agricole intensif actuel. Ils proposent, en contrepartie, une dénumérisation de l'exploitation agricole avec un retour massif de petites structures, multipliant le nombre d'agriculteurs réalisant un travail manuel en contact avec leurs cultures, densifiant les réseaux agricoles et artisanaux en prônant l'utilisation de "basses" technologies. Emerge aussi l'idée de trouver un juste milieu entre techno-optimisme et rejet de la technologie avec des approches préférant les placer comme biens communs, libres et accessibles à tous pour permettre aux agriculteurs de rester indépendants en leur fournissant une assistance dans la pratique de l'agroécologie HANAPPE (2018).

De fait, la place de la robotique et des nouvelles technologies de façon plus générale, dans les modèles agricoles futurs, est incertaine selon le modèle privilégié. La société Iron Ox propose ainsi la construction d'une ferme hydroponique robotisée et autonome dans le but de standardiser et structurer au mieux la production (Fig.1.8(a)). D'un autre côté, les constructeurs historiques automatisent les machines agricoles déjà existantes, afin de perfectionner la réalisation de manière autonome, des mêmes tâches qu'aujourd'hui DUQUEF (2018) ; COROT (2022) (Fig.1.8(b)). D'autres approches cherchent à innover dans la pratique de ces tâches. Ainsi, le projet Xaver de la marque Fendt XAVER (2020) propose une flotte de robots pour réaliser un semis de précision (Fig.1.8(c)). Cela permet de limiter la compaction des sols par l'utilisation de robots de petite taille, de proposer des unités peu coûteuses qui peuvent travailler en continu, tout en se relayant en cas de panne ou de besoin de recharge. A la rencontre de ces deux approches, le projet de recherche ADAP2E (2014) (Fig.1.8(d)) propose le développement de plateformes de taille moyenne adaptatives selon la tâche à réaliser, tout en ayant la capacité de coopération entre plusieurs plateformes de façon complètement autonome.

Ces quelques exemples ne représentent pourtant qu'une partie des paradigmes possibles offerts par la robotique à l'agriculture. De la ferme-usine complètement autonome dirigeant une armée de robots toujours plus puissants, munis de multiples capteurs et maximisant l'usage d'intelligence artificielle, au petit robot semi-autonome, extrêmement flexible, capable d'étroite collaboration avec l'homme, le soulageant des tâches pénibles, à risque, ou inintéressante, il y a un gouffre. Un gouffre idéologique, reflet de la société dans laquelle nous nous projetons, tant les approches possibles sont nombreuses (Voir Fig.1.8), et remettant davantage en cause l'utilisation de l'outil, que l'outil lui-même.

Ainsi, au sein de nos sociétés, la robotique apparaît comme une solution viable et intéressante pour la plupart des approches de l'agroécologie. Non pas la seule, car elle ne pourrait se substituer au développement de solutions agronomiques et sociales nécessaires à ce modèle. Mais les nombreuses percées techniques qu'elle offre, permettent la mise en place de solutions agronomiques et sociales nouvelles qui ne pourraient exister sans elle Stavros G VOUGIOUKAS (2020). De plus, la robotique doit s'appuyer sur d'autres domaines techniques tels que, la production et gestion de l'énergie, la conception électronique et mécanique, permettant de construire des systèmes ayant une meilleure empreinte carbone sur leur cycle de vie et de minimiser les ressources nécessaires à leur construction tout en restant performantes. De même, la tâche propre, ou la manière de la réaliser, doit aussi être questionnée devant la difficulté de certaines d'entre elles et notre incapacité actuelle à rendre nos systèmes performants lors de leur réalisation, devant ainsi faire évoluer les robots vers des nouvelles conceptions. De fait, la robotique ne peut être

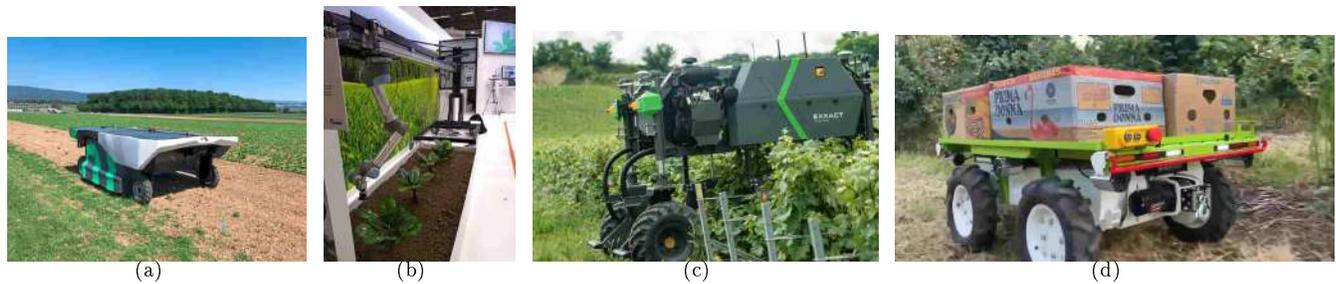


FIGURE 1.9 – Exemple de robot répondant à certains besoins de l’agroécologie. (a) Robot AVO de la société Ecorobotix Robot pour le désherbage chimique de précision en 2020. (b) Robot Betty Bot au Sima 2019 pour la surveillance des maladies sur la culture de betterave. (c) Robot Traxx présenté au Sitevi 2021 par la société Exxact Robotics pour la pulvérisation autonome de précision dans les vignobles. (d) Ally de la société T-SPARK Engineering en 2021 pouvant suivre un homme et porter des charges lourdes.

considérée comme la solution de l’agroécologie, mais elle n’en reste pas moins un maillon essentiel ouvrant la voie à de prolifiques développements sociaux, techniques et scientifiques.

1.3.1 Apport de la robotique au monde agricole

Parmi ses intérêts, elle permet d’accroître la productivité d’une exploitation par la parallélisation des tâches effectuées en toute autonomie BERGERMAN et al. (2016); Stavros G. VOUGIOUKAS (2019). De plus, la précision offerte par ces systèmes, rend possible la limitation des apports d’intrants chimiques dans les cultures, en réalisant des dépôts ciblés sur les organismes en ayant besoin. En outre, il serait envisageable d’accomplir des tâches autrefois pratiquées par de larges dépôts chimiques, par d’autres méthodes plus locales. L’utilisation de systèmes autonomes pourrait, notamment, apporter une réponse au problème du désherbage en proposant une solution de précision, autonome, chimique, mécanique ou électrique, CHALLENGE ROSE (2019) (voir Fig.1.9(a)).

La robotique permet, de surcroît, une surveillance accrue de l’exploitation ainsi que le suivi de son évolution au cours du temps, rendant ainsi possible la surveillance du départ de maladie dans une culture, le traitement de précision sur les plants malades et le suivi de l’évolution de la contamination selon l’efficacité du traitement JOUDELAT (2019) (Voir Fig.1.9(b)). De plus, l’ensemble de ces informations peut servir à alimenter des OAD (outils d’aides à la décision) assistant les agriculteurs dans la gestion de leurs exploitations BELLON MAUREL et al. (2022).

En matière de santé, les systèmes robotisés seront en mesure de retirer l’homme des situations accidentogènes ou dangereuses pour leur santé, tels que les environnements chimiques nocifs lors des tâches de pulvérisation SAMMONS, FURUKAWA et BULGIN (2005) (Voir Fig.1.9(c)). Ils sont également capables d’assister ou de soulager l’exploitant dans la réalisation de certaines tâches comme le port de charges lourdes ou de longue distance comme pour les activités de récoltes (voir Fig.1.9(d)) ou de transport d’animaux.

1.3.2 La robotique dans le mode agricole d’aujourd’hui

De part l’ensemble des besoins de l’agriculture et les forts potentiels des robots, ces derniers se sont de plus en plus démocratisés au sein des exploitations ces dernières années. Il est déjà possible de différencier deux utilisations différentes, l’élevage et la culture, ne répondant pas aux mêmes besoins et critères de robotisation. En élevage, la robotique est très présente, intégrée depuis les années 90. Au contraire, dans les cultures, son apparition n’est que plus tardive et les premières commercialisations de robots agricoles ne remontent qu’à quelques années.

1.3.2.1 Dans les élevages

Cette différence de dynamique de robotisation entre élevage et culture s’explique principalement par la structure du milieu dans lequel les robots sont amenés à évoluer. Ainsi, les bâtiments d’élevage sont normés et structurés de façon importante, présentant des similarités avec les bâtiments industriels offrant un transfert de technologies plus

aisé.

Les robots d'élevage se basent alors sur des technologies de filoguidage, de lignes au sol, de transpondeurs ou d'aimants GRIFFOUL (2018), qui sont déjà éprouvés depuis longtemps dans le milieu industriel. De plus, la structure des bâtiments offre de nombreuses possibilités pour l'installation de capteurs ou de repères permettant une localisation et une navigation plus aisée. Enfin, pour les mêmes raisons et parce qu'un élevage ne se situe en général que sur un seul site, la supervision des robots est plus facilement réalisable. Ils peuvent ainsi être connectés à un réseau central, collectant des données, gérant l'exploitation et offrant des OAD aux éleveurs. Ainsi, plusieurs projets et recherches ont vu le jour plus récemment, afin de caractériser le comportement des animaux en utilisant des caméras fixes en intérieur RIEKERT et al. (2020) ; MATTHEWS et al. (2017) ou montées sur un drone pour l'extérieur VAYSSADE, ARQUET et BONNEAU (2019).

De plus, les tâches à réaliser sont en général plus simples d'un point de vue technique, car favorisées par un environnement mieux contrôlé. Ainsi, le raclage ou la distribution des fourrages se fait la plupart du temps en ligne droite sur un sol plat. Une des différences majeures les caractérisant est la polyvalence des plateformes. En élevage, le paradigme adopté par les constructeurs est de dédier chaque plateforme à la réalisation d'une unique tâche en continu LAMBERT (2017) (repousser le fourrage (Fig.1.10(c)), traite (Fig.1.10(a)), raclage, alimentation (Fig.1.10(f)),...). Cela peut se justifier par le nombre de fois où ces tâches doivent être réalisées en une journée, tous les jours de l'année. Or, les robots pour la culture agricole, ne répondent pas aux mêmes problématiques. Le plus souvent, ils doivent servir à des tâches ponctuelles dans l'année (récolte, semis, traitement...) et souffrent donc d'un défaut de versatilité permettant leur rentabilité.

Enfin, la démocratisation des systèmes robotisés en élevage est organisée autour de plusieurs fabricants mondiaux ou nationaux, commercialisant ce matériel telles que les sociétés Lely, Delaval, GEA, Wasserbauer, Joz, Rovibec, ALB Innovation, Tatoma, Triolet... installées pour certaines depuis des dizaines d'années et organisées avec les réseaux de coopératives, offrant à leurs systèmes un impact commercial plus important que dans la culture.

Pour ces différentes raisons, des recherches sur la tonte des moutons TREVELYAN (1989) débutent dès la fin des années 80 et la commercialisation des premiers robots de traite commence au début des années 90 BELLON-MAUREL et HUYGHE (2016). Dans ces mêmes années, les premiers DAC (distributeurs automatique de concentrés) font leurs apparitions. Plus récemment, dans les élevages de production d'œufs, des systèmes de surveillance viennent observer la ponte CRONIN, BORG et DUNN (2008). Dès 2012, les premiers robots d'affouragement de Lely (Fig.1.10(d)) arrivent sur le marché. Puis, c'est au tour de l'automatisation des racleurs, devenant même pour certains, des collecteurs à lisier (Fig.1.10(e)). Certains élevages de poules pondeuses se dotent désormais de palettiseurs et convoyeurs afin de conditionner leurs œufs (Fig.1.10(h)). Encore aujourd'hui, la robotique en élevage est en plein essor et de nouveaux produits apparaissent régulièrement sur le marché (Fig.1.10).

Même s'il apparaît que la robotisation en élevage semble plus simple, les normes concernant le bien-être animal, l'agriculture biologique et les labels, ainsi que les attentes d'une partie de la société, risquent de remettre en cause une partie tout du moins, de la structuration des bâtiments traditionnels. Ainsi, bien que le sujet soit encore controversé, l'article 68 de la loi n°2018-938, prévoit l'arrêt de tout nouveau bâtiment (ou réaménagement) pour l'élevage de poules pondeuses. Ce type de loi existe déjà en Suisse, Autriche et au Luxembourg. De même, une loi concernant l'arrêt des élevages de lapins en cages, existe en Autriche depuis 2012 et est prévue en 2025 pour la Belgique. De façon plus générale, le parlement européen a demandé un arrêt progressif de l'élevage en cages d'ici à 2027. Par ailleurs, nombre de cahiers des charges de différents labels demandent que les animaux puissent sortir ou vivre en extérieur. En conséquence, les robots vont devoir s'adapter à ces nouveaux paradigmes et seront de plus en plus confrontés aux problèmes techniques plus complexes de leurs cousins des cultures.

1.3.2.2 Dans les cultures

D'un autre côté, la robotique pour les cultures intérieures ou extérieures n'apparaît vraiment, d'un point de vue commercial, que depuis ces dernières années. Pourtant, de très nombreux projets de recherche ont été lancés depuis le début des années 90, notamment pour le désherbage et dans le ramassage des fruits et légumes, secteurs très demandeurs sur le sujet VERBIEST et al. (2020). En 2014, une synthèse de différents robots récolteurs a été publiée dans BAC et al. (2014), recensant 50 projets pour tout type d'environnements et de cultures, en indiquant qu'aucun de ces systèmes n'a par la suite été commercialisé. Sur les trente années où ces projets ont été achevés, leur performance n'a jamais augmenté. Cette constatation a été reprise par la suite dans BELLON-MAUREL et

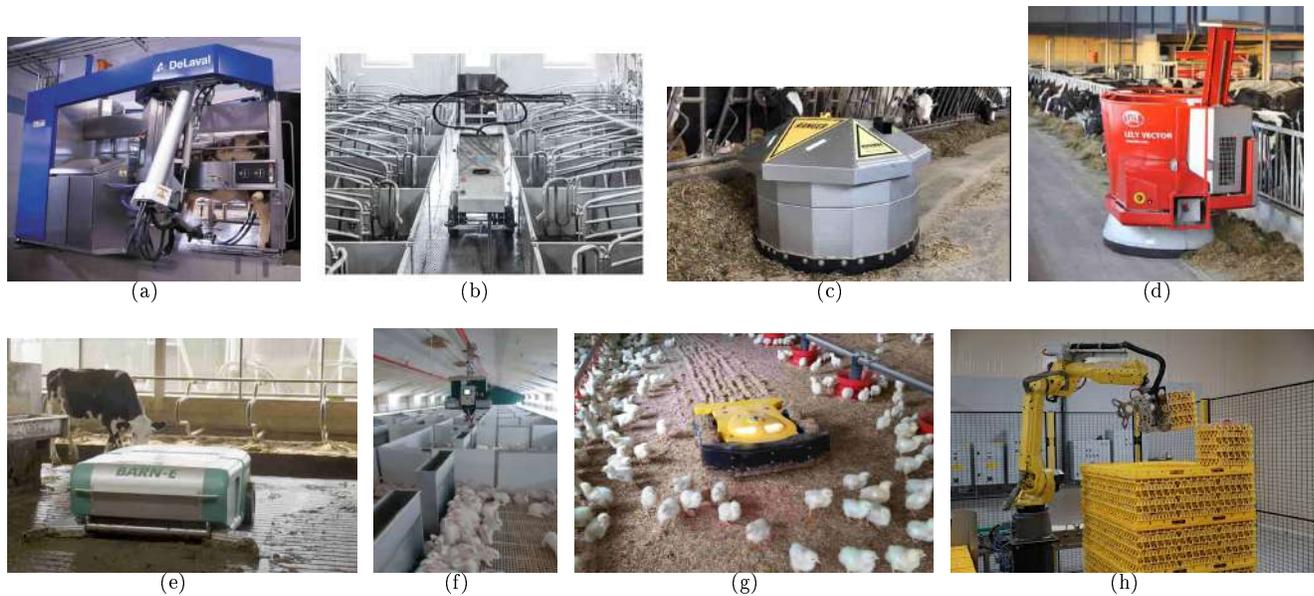


FIGURE 1.10 – Exemple de robot destiné à l'élevage. (a) Robot de traite Delaval. (b) Robot de lavage ProCleanerX100 (société ID1PORT) pour les porcheries. (c) Robot Ranger pour repousser le fourrage, de la société Rovibec. (d) Robot d'alimentation Vector de la société Lely. (e) Robot Barn-e collecteur de lisier de la société Joz. (f) Robot de distribution d'aliment pour parcs à lapins de la société Innovlap. (g) Robot Spoutnic Nav, société Tibot, destiné à stimuler le déplacement des poulets en élevage hors-sol, tout en aérant la litière. (h) Robot de palettisage d'oeufs de la société OvoConcept.

HUYGHE (2016) en prenant comme exemple les projets MAGALI et CITRUS, respectivement pour les pommes et les oranges. Les auteurs dénoncent le gain limité pour les exploitants à cause de la courte période de ramassage des fruits, la difficulté importante de ce genre de tâches à effectuer dans un milieu peu structuré, la disponibilité de méthodes alternatives et moins coûteuses et l'absence d'investisseurs importants dans le domaine. Ces arguments sont également repris dans une synthèse plus récente VERBIEST et al. (2020) indiquant qu'à l'heure actuelle, le déploiement à grande échelle de la robotique dans les vergers, n'est pas possible pour des raisons techniques et financières.

Les raisons de ce retard de développement sont principalement techniques. De fait, il est plus aisé de se déplacer précisément dans un bâtiment bien structuré, que dans un champ boueux. De plus, la clémence de la météo au sein d'un bâtiment est bien meilleure que celle du champ, forçant le robot à être beaucoup plus robuste et donc, par conséquent, plus cher. Par ailleurs, la pluie, la poussière, le soleil et autres éléments extérieurs mènent la vie dure aux capteurs du robot, qui doivent eux-mêmes se perfectionner pour être robustes à tous ces aléas VERBIEST et al. (2020). De même, la distance séparant les champs du siège de l'exploitation, les réseaux de télécommunication moins développés dans les campagnes et les zones blanches, forcent les robots à être complètement autonomes sur la parcelle et rendent difficile la supervision distante. Enfin, à l'heure actuelle, la législation, encore très floue par certains aspects, rend plus difficile encore l'insertion des robots dans les champs.

Toutes ces difficultés font partie des raisons du retard de l'introduction de la robotique dans les champs jusqu'à maintenant. Cependant, durant ces dernières années, nombre de ces verrous scientifiques ont été étudiés et des solutions ont été proposées pour ces différents problèmes. De même, la technologie des capteurs devient de plus en plus fiable et robuste, avec des coûts moins importants, notamment pour des conditions d'utilisation pouvant être sévères. Alors que jusqu'à maintenant, l'automatisation agricole était essentiellement proposée par les constructeurs historiques déjà bien implantés dans le secteur, aujourd'hui, de plus en plus d'industriels se sont emparés de ce problème, pour proposer des systèmes autonomes ou semi-autonomes, principalement pour des tâches de désherbage, de pulvérisation et de récolte.

Depuis 2017, la société Naïo Technologies commercialise son robot Oz (Fig.1.11(a)), destiné au désherbage de petites surfaces. Depuis, la gamme s'est étendue et la société propose également un robot porte-outils pour les planches de maraîchage et un autre robot de désherbage pour les vignes. En restant dans les vignes, depuis 2018, la société Vitirover propose une solution de désherbage par l'utilisation de petits robots (Fig.1.11(b)) et la société

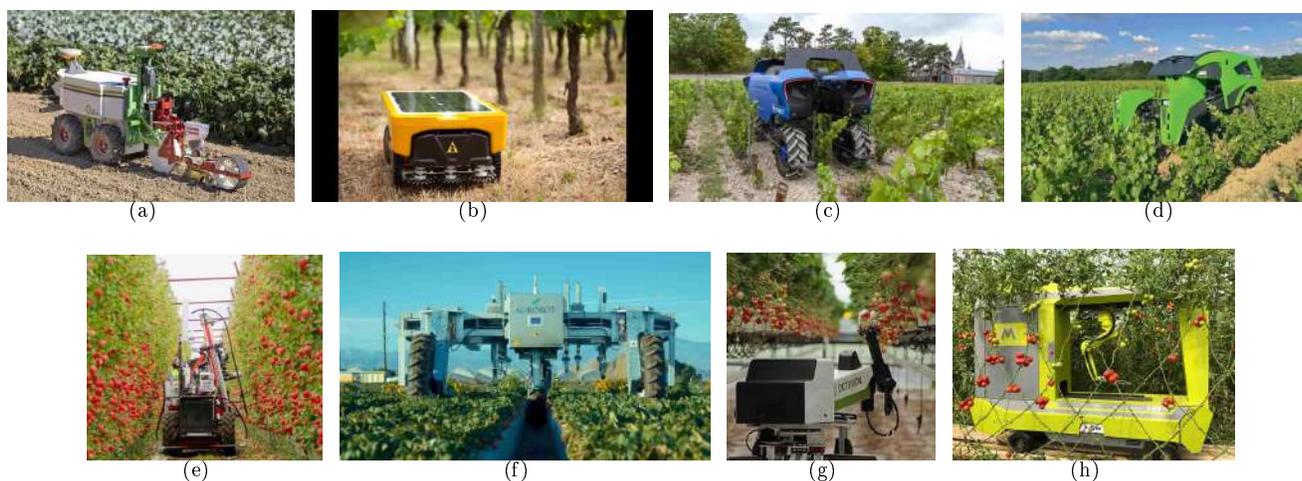


FIGURE 1.11 – Exemple de robots destinés aux cultures. (a) Robot Oz de la société Naïo Technologies pour les travaux de maraîchage. (b) Robot de tonte de la société Vitirover. (c) Robot Bakus de la société Vitibot pour les travaux viticoles. (d) Robot Trektor de la société Sitia pour les travaux viticoles et de maraîchage. (e) Robot cueilleur de pommes de la société Abundant Robotics. (f) Robot de cueillette de fraises de la société Agrobot. (g) Robot Rubion de la société Octinion pour la cueillette des fraises. (h) Robot GRoW de la société Metomotion pour la récolte des tomates.

Vitibot propose son enjambeur autonome Bakus (Fig.1.11(c)). Dans le maraîchage, depuis 2017, la société Sitia développe un porte-outils autonome pour le maraîchage (Fig.1.11(d)). Un robot de désherbage et un autre de phénotypage, sont commercialisés par la société Ecorobotix depuis 2018 (Fig.1.9(a)). A partir de 2020, la société Carré commercialise également son robot Anatis pour le désherbage des planches maraîchères et la récolte d'indicateurs de culture. Dans un concept un peu différent, depuis 2018, la société SabiAgri propose une solution de tracteur électrique semi-autonome.

A la manière de certains acteurs industriels qui s'emparent du marché de la robotique agricole pour des tâches de navigation, il existe plusieurs entreprises qui se sont emparées des problématiques de manipulation et proposent des solutions commercialisables. Parmi ces entreprises, nous pouvons citer la société Belge Octinion, qui commercialise depuis 2019, son robot Rubion (Fig.1.11(g)) pour la cueillette de fraises. Pour les fraises également, mais avec une approche différente, la société espagnole Agrobot commercialise une solution depuis 2019 (Fig.1.11(f)). Toujours en 2019, la société Green Robot Machinery commercialise, elle aussi, un robot de récolte pour le coton, la société MetoMotion, un robot pour la récolte des tomates et aux Etats Unis, la start-up Abundant Robotics, propose un robot de récolte de pommes (Fig.1.11(e)). Au Japon, à un stade expérimental, la société Panasonic développe un robot cueilleur de tomates et depuis 2017, la société Allemande Priva propose un robot pour effeuiller les tomates. La start-up hollandaise Cerescon présente, quant à elle, depuis 2018, un robot de récolte d'asperges. En France, la start-up SYHA développe également un projet de récolteur de tomates depuis 2017.

1.3.3 Diversité des tâches à accomplir

Que ce soit en élevage ou dans les cultures, l'une des difficultés majeures que doit supporter la robotique est la grande diversité des tâches à accomplir, ce qui motive souvent les fabricants à créer des systèmes monotâche. Même au sein de la recherche, les projets se concentrent souvent sur une seule tâche spécifique VERBIEST et al. (2020). Or, cette difficulté peut être due à la variation de trois facteurs avec lesquels le robot doit composer de la meilleure façon possible : la variation de l'environnement de la tâche, la variation de l'objet d'intérêt dans la tâche et la diversité des ateliers d'exploitation. Concevoir un système multitâches impose alors que ce dernier puisse composer avec plusieurs triplets différents de ces paramètres et le rend très complexe.

1.3.3.1 Variation de l'environnement

Le premier de ces facteurs est la variation de l'environnement dans lequel les cultures ou les animaux évoluent. Certains, tels que les serres de culture (Fig.1.12(a)) et bâtiments d'élevage (Fig.1.12(e) et Fig.1.12(f)), se-

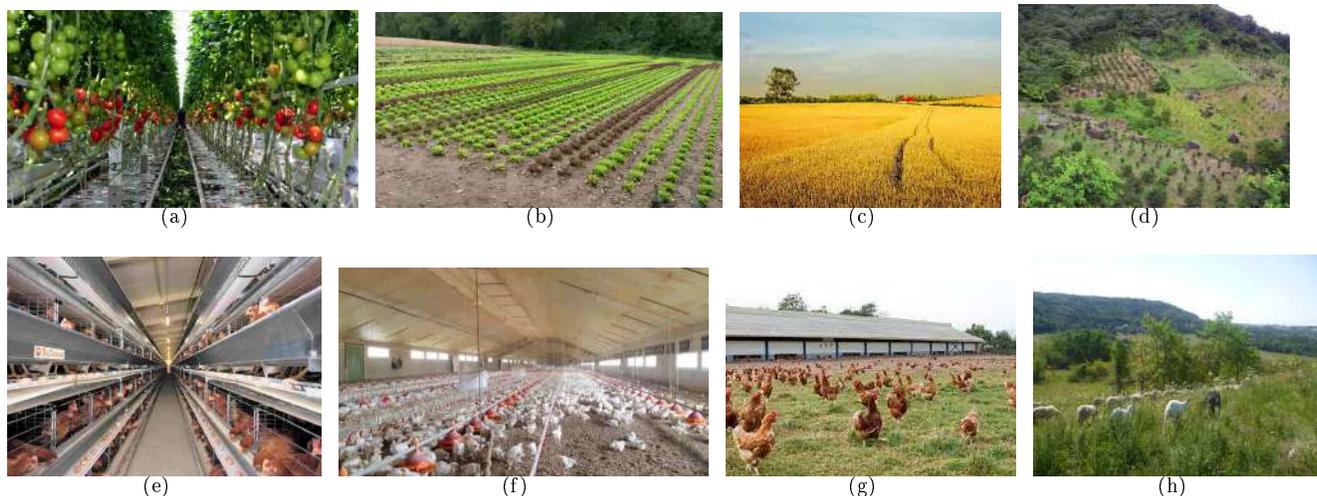


FIGURE 1.12 – Différents environnements de culture et d'élevage agricole par structuration humaine décroissante. (a) Une serre de culture. (b) Une planche de maraîchage. (c) Un champ de grande culture. (d) Un verger en côteaux. (e) Elevage de poules pondeuses en batterie de cages. (f) Elevage de poulets hors sol. (g) Elevage avec cour extérieure. (h) Pâturage.

ront bien structurés et permettront une introduction aisée des systèmes robotiques. D'autres, comme les planches de maraîchage (Fig.1.12(b)), les vergers (Fig.1.12(d)), les grandes cultures céréalières (Fig.1.12(c)), les pâturages (Fig.1.12(h))... sont des environnements façonnés par l'homme, mais évoluant de manière naturelle et seront nommés semi-structurés. Enfin, les environnements les plus destructurés et complexes à l'introduction de la robotique, sont les territoires forestiers qui sont étudiés dans un domaine à part entière de la robotique.

Chacun de ces environnements introduit des défis scientifiques et techniques différents, de difficulté variable, avec la diminution de la structuration humaine. Dans une culture de plein champ, le robot doit composer avec les aléas climatiques. La luminosité ne peut être contrôlée convenablement que dans les cultures intérieures et peut avoir une réelle incidence sur la récolte VERBIEST et al. (2020). Le taux de réussite de la cueillette peut être affecté par un ciel nuageux et un soleil rasant PLEBE et GRASSO (2001). A l'intérieur, le robot peut se servir de la structure du bâtiment pour se guider, par SLAM 3D par exemple OHI et al. (2018), ce qui est plus limité en extérieur par le manque d'amers auxquels il peut se raccrocher, ou le moyen de les différencier. Sous serre, le robot peut également exploiter un support physique comme le guidage sur rail pour se déplacer comme illustré dans VAN HENTEN et al. (2003), pour la cueillette des concombres, et dans SAMMONS, FURUKAWA et BULGIN (2005); LE CORE (2017) pour les tomates. Dans certains cas, il est même envisagé de faire bouger les plantes vers des systèmes automatisés à postes fixes HAYASHI et al. (2011) ou de modifier la structuration des vergers pour les rendre plus robotisables VERBIEST et al. (2020).

Au contraire, dans un environnement extérieur, le robot doit posséder un système de navigation plus complexe, lui permettant de se déplacer de façon autonome dans le champ. Dans ce domaine, on trouve déjà sur le marché des systèmes de guidages autonomes, simples, se basant sur la technologie GPS pour les tracteurs. Ces systèmes représentent actuellement la grande majorité des systèmes robotisés en agriculture de plein champ. Ils permettent à plusieurs machines agricoles de naviguer en parallèle dans le champ et de fonctionner automatiquement sous la supervision d'un conducteur Stavros G VOUGIOUKAS (2020). Cependant, dans le cas d'arboriculture, de nombreux problèmes de localisation se posent sous la canopée, car cette dernière détériore le signal GPS bien au-delà de la précision nécessaire à un guidage de robot VERBIEST et al. (2020). Par exemple, la navigation pour les travaux forestiers relève d'un véritable défi technique et scientifique. L'utilisation du GPS peut produire des erreurs de plus de 50m à cause de la détérioration des signaux par la canopée BERGERMAN et al. (2016). Ainsi, la perte des signaux GPS dans les endroits proches des arbres ou enclavés, impose de changer d'approche en se basant sur d'autres capteurs.

L'approche présentée dans DURAND-PETITEVILLE et al. (2018) utilise une caméra stéréoscopique permettant de détecter l'emplacement des arbres dans un verger. Dans les cultures de vignoble, les travaux développés dans DEREMETZ et al. (2019) se basent sur l'utilisation d'un capteur LIDAR permettant la détection et la reconstruction

Facteurs	Vergers	Serres	Intérieur	Champs ouverts
Protection de la pluie et du vent	-	+	++	-
Contrôle de la luminosité	-	-	++	-
Développement cohérent de la plante	+/-	+	++	-
Visibilité des objets	-	-	+	+/-
Accessibilité des objets	-	-	+	+/-
Facilité de navigation	-	+	++	-
Adapté au robot stationnaire	-	+/-	++	-

TABLE 1.1 – Différences parmi quatre environnements de production selon les facteurs qui peuvent avoir un effet sur le robot de récolte. De faible (-) à excellent (++) . Source : BAC et al. (2014)

de la rangée de vignes pour être suivie par le robot. Ce même genre d'approche a été utilisée sur les planches de maraîchage où l'on cherche à détecter les sillons sur le côté des planches pour guider le robot TOURRETTE et al. (2017). Cependant, dans les environnements moins structurés, elle peut également être mise en défaut à cause de l'environnement non-limité et incohérent. Ces derniers ont des aspects très complexes et variables avec nombre d'objets différents et un terrain irrégulier, voir accidenté. De plus, même un environnement structuré évolue au fil des saisons et des années, rendant la culture et le sol changeant. De ce fait, les approches par connaissance de la carte a priori, ou par construction de cette dernière, doivent être dynamiques et mises à jour régulièrement, tout en tenant compte de la dynamique de l'ensemble des objets présents (personne, autres robots, animaux, obstacles,...).

Enfin, le franchissement et l'évitement d'obstacles ainsi que leur nombre, posent d'importants problèmes pour la navigation et nécessitent la détection, le choix et le suivi du trajet le plus adapté, qui sont des problèmes encore ouverts. De plus, en dehors du problème du choix de chemin devant un obstacle, se pose le problème de la traversabilité de ce dernier. Il permet par exemple, d'évaluer si l'obstacle devant le robot est une souche ou des hautes herbes, et dans le cas de la souche, s'il peut passer dessus. Ceci, tout en garantissant, en continu, la sécurité d'un potentiel opérateur à ses côtés.

Les effets des variations de la structure de l'environnement des robots ont été résumés dans le tableau 1.1. Cependant, la structuration de l'environnement n'est pas le seul problème, la navigation dans des environnements extérieurs est soumise à des perturbations, principalement l'irrégularité et la structure du terrain. De ce fait, la navigation sur un terrain non-homogène, meuble, humide ou boueux, entraîne nécessairement la violation de la contrainte de roulement sans glissement sur laquelle se base d'ordinaire le contrôle de robots mobiles Claude SAMSON (1995). De plus, ces dynamiques de terrains changeantes, les rendent difficiles à modéliser. Ce genre de perturbations influence grandement la précision des systèmes et l'efficacité de la tâche à cause des glissements auxquels est soumise la base mobile.

Le second défi de la navigation proposé par ces environnements est qu'ils sont rarement plats et possèdent par conséquent des irrégularités dont il faut tenir compte. Ces dernières peuvent être de deux types, les irrégularités comme des bosses ou des trous dans le sol amenant le robot à se balancer, ou des pentes continues telles que ce que l'on peut retrouver dans les côteaux de vignoble. Ces irrégularités peuvent menacer l'intégrité du robot par le risque de renversement que cela entraîne, mais elles perturbent également la précision de réalisation de la tâche en cours.

Quelle que soit la complexité de l'environnement, l'un des défis importants de la robotique agricole est la navigation dans son milieu. Bien que la complexité de mise en œuvre de cette dernière soit liée à la structuration du milieu dans lequel le système se déplace, elle reste l'un des piliers de la plupart des tâches que le système doit réaliser et fait du milieu un facteur très contraignant pour l'intégration de la robotique.

1.3.3.2 Diversité des objets d'intérêts

La seconde variation des tâches à laquelle doit faire face le robot, est la diversité des objets qu'il peut trouver dans une même culture selon, la taille, la forme, la position et la couleur de ces objets. Cela peut être dû à une coexistence d'objets différents (tronc, feuille, fruit), mais également pour un même objet. En effet, tous les fruits d'une culture et les animaux d'un élevage ne sont pas rigoureusement les mêmes et peuvent varier de façon sensible de l'un à l'autre. Par exemple, la largeur d'un poivron peut varier de 6 à 11 cm BAC et al. (2014). Cela peut amener à une visibilité (occlusion par des feuilles ou d'autres fruits) ou une accessibilité (selon la position du fruit) qui peuvent varier au sein de la culture. Il devient alors nécessaire de posséder des approches de perception robustes

permettant la détection d'une partie de l'objet d'intérêt en cas d'occlusion, mais également de détecter un même objet à différents stades de maturité alors que ce dernier change de forme, de taille et de couleur. Dans le cas des élevages, la même remarque peut être faite car tous les animaux sont semblables mais possèdent des nuances, ce qui rend difficile leur détection. Pire encore, un même animal sous un même angle de vue, peut être différent selon la posture qu'il prend, or il convient de la caractériser car elle permet souvent de déterminer le comportement de l'animal ou son état de santé RIEKERT et al. (2020); MATTHEWS et al. (2017). Enfin l'occlusion rend tout aussi complexe l'isolation de chaque animal lorsqu'ils sont attroupés, que l'isolation de chaque tomate d'une même grappe.

De plus, au-delà de l'objet lui-même, il peut être nécessaire de caractériser les autres objets de son environnement que ce soit feuille, tige, tronc... Par exemple, nombre de fruits se cueillent en coupant sa tige, il est alors nécessaire de caractériser cette tige, ou du moins son emplacement pour la couper. De même, pour les tâches de tailles, en vigne par exemple, il faut caractériser l'arborescence entière de l'arbre, avec des tiges toutes différentes les unes des autres, pour déterminer quelle taille doit être appliquée BOTTERILL et al. (2017), et comment planifier le mouvement du robot YOU et al. (2020).

Du point de vue de la perception, la grande majorité des approches est basée sur les caméras couleur, stéréo et temps de vol, même si l'on retrouve de façon plus anecdotique, l'utilisation de caméras hyper-spectrales et de lasers GARRIDO et al. (2015) dans la détection des objets d'intérêt. Ces systèmes de vision, pour être performants, doivent s'appuyer sur une luminosité la plus homogène possible et montrent leur efficacité en intérieur ou par l'utilisation de structures englobantes, permettant de cacher la lumière extérieure BOTTERILL et al. (2017); NIEUWENHUIZEN, HOFSTEE et VAN HENTEN (2010) ainsi que l'utilisation de flashes lumineux ARAD et al. (2020).

Une seconde difficulté associée à ces objets d'intérêt est leur manipulation. Un même fruit, selon son stade de maturité, ne possédera pas les mêmes caractéristiques mécaniques, d'autant que la plupart des fruits doivent être manipulés avec précaution pour ne pas être abîmés. Dans le cas de la taille de la vigne par exemple, le sarment de la plante doit être attrapé pour le sectionner, mais cela demande une modélisation fine de ce dernier pour connaître son déplacement et être capable de l'amener jusqu'à un point désiré. Ainsi, les objets d'intérêts agricoles sont pour la plupart des objets mous à la dynamique complexe. Ce problème sera dans la plupart des cas écarté, en construisant un outil spécifique pour chaque plant à cueillir.

1.3.3.3 Type d'atelier sur l'exploitation

Enfin la dernière variation possible pour une même tâche est le type de culture ou d'élevage à cause des différences qui les caractérisent, entraînant des difficultés techniques distinctes. Dans le cas de la récolte, la difficulté pour réaliser la tâche entre une tomate et une rose est bien différente BAC et al. (2014). Dans le cas de la rose, le défi se situe dans la localisation et l'approche de l'objet pour le cueillir, tandis que dans le cas de la tomate, son atteinte est facile mais la difficulté se trouve dans l'estimation de sa maturité, ce qui dans le cas d'une rose est bien plus facile. Ainsi chaque type d'exploitation impose des difficultés différentes auxquelles les systèmes robotisés doivent pouvoir s'adapter.

Par exemple, l'application en terme de manipulation, qui a été la plus étudiée à ce jour, reste la récolte, avec de très nombreux projets associés à un type de culture précis Stavros G VOUGIOUKAS (2020); VERBIEST et al. (2020). Ainsi ont été examinées, la récolte de concombres VAN HENTEN et al. (2003) (Fig.1.13(a)), la récolte de pommes BAETEN et al. (2008), des kiwis SCARFE et al. (2009) (Fig.1.13(d)), des artichauts LONGO et MUSCATO (2013). Plus récemment, l'université de Plymouth, en partenariat avec Hall Hunter, a développé un robot cueilleur de framboises GAULAY (2019). Ces derniers ont également étudié la faisabilité de ce genre de système pour la récolte des choux-fleurs en imitant la main humaine comme effecteur PINKSTONE (2018) (Fig.1.13(c)). Le ramassage des poivrons est également concerné ARAD et al. (2020) (Fig.1.13(b)). Cependant, bien d'autres domaines incluant la manipulation ont aussi été le cas d'études d'autres recherches, tels que la pollinisation de précision de fleurs de mûrier OHI et al. (2018), la segmentation de feuilles ALENYA et al. (2013), la détection de feuilles de betteraves dans le but d'un phénotypage DUBOS et al. (2019), le phénotypage du sorgho MUELLER-SIM et al. (2017), la pulvérisation de précision, OBERTI et al. (2016) ou encore la taille de la vigne BOTTERILL et al. (2017).

Cependant, parmi tous les projets cités précédemment, il n'existe pas de solution générique ou "sur étagère" au problème. En effet, les projets qui sont développés sont souvent "fait mains", par les laboratoires ou les entreprises, et adaptés à un seul environnement et un seul type de culture, voire même à une seule tâche Stavros G VOUGIOUKAS (2020); VERBIEST et al. (2020). De fait, les différents effecteurs des récolteurs qui ont été conçus



FIGURE 1.13 – Différentes structures de robot attachées à une même tâche de récolte pour des cultures distinctes. (a) Robot pour la récolte des concombres sous serre VAN HENTEN et al. (2003). (b) Robot Sweeper pour la récolte des poivrons sous serre ARAD et al. (2020). (c) Prototype de robot pour la récolte des choux-fleurs en plein champ PINKSTONE (2018). (d) Robot pour la récolte des kiwis dans les vergers SCARFE et al. (2009).

avec des technologies très variées, sont adaptés à l’objet à récolter. Il en est de même, pour les mobiles adaptés spécifiquement au terrain sur lequel ils doivent évoluer.

Finalement, un robot ayant pour tâche la récolte de pommes ne sera certainement pas adapté à la récolte de tomates, même si la tâche reste identique. La variation d’environnement, d’objet d’intérêt et de culture imposera des structures de robot très différentes (Fig.1.13).

1.4 Outil et porte-outils

Ce tour d’horizon de la robotique dans le milieu agricole, a permis de mettre en évidence le nombre toujours plus important de robots arrivant sur ce marché mais également leurs structures très variées. Cependant, il est possible de grossièrement décomposer l’ensemble de ces systèmes en deux parties distinctes, l’outil et le porte-outils.

1.4.1 Outil

L’outil est la partie du système qui permet de réaliser la tâche. Ce dernier peut avoir une importante variation de complexité en fonction de la tâche à réaliser. De plus, il est le plus souvent dévolu à un seul objectif pour lequel il a été spécifiquement conçu. Pour cela, l’outil se doit d’être interchangeable sur son porte-outils VERBIEST et al. (2020).

Ces outils peuvent également se décomposer en deux catégories, les outils passifs et actifs. Les seconds nécessitent un apport d’énergie et un contrôle alors que les premiers ne nécessitent aucune énergie et agissent en réaction à l’environnement. L’un des outils passifs les plus utilisés est la bineuse pour le désherbage (Fig.1.14(a)). De plus en plus de plateformes proposent également l’utilisation de disques Cress pour les vignes ((Fig.1.14(b)), destinés à replacer la terre au pied des ceps. Concernant les outils actifs, l’un des plus simples et déjà grandement utilisé avec les tracteurs manuels sont les chargeurs (Fig.1.14(c)) pour le transport et la manipulation de charges lourdes. Les effecteurs pour la récolte sont, de leur côté, plus complexes et allient une conception particulière à la préhension du fruit, ainsi qu’un organe de détection pour l’identifier (Fig.1.14(d)).

1.4.2 Porte-outils

Le porte-outils est la partie du système qui permet à l’outil de venir se positionner dans une configuration idéale à la réalisation de la tâche. Comme déjà pointé dans la section précédente, les portes-outils robotisés sont extrêmement variés en raison des différentes variations auxquelles ils doivent faire face (Voir Sec.1.3.3). Cependant, leur fonction reste identique quelle que soit la tâche de leurs outils.

Les travaux présentés dans le cadre de cette thèse s’intéressent uniquement au cas du porte-outils, laissant l’outil de côté. Ils s’intéressent notamment à la commande du porte-outils quand ce dernier possède de multiples degrés de liberté et se trouve composé de plusieurs parties différentes. Le cas le plus classique, et qui est étudié ici, est



FIGURE 1.14 – Différents outils pour la réalisation autonome de tâches agricoles. (a) Outils de binage associé au robot Anatis de la société Carré. (b) Disque Cress pour le remplacement de la terre au pied des vignes monté sur le robot Ted de la société Nafo Technologies. (c) Chargeur monté sur le tracteur électrique Alpo de la société Sabi Agri. (d) Outils de détection et récolte des poivrons monté sur le robot Sweeper ARAD et al. (2020).

celui d'une base mobile possédant un ou plusieurs manipulateurs, appelée manipulateur mobile. Cependant, comme il sera détaillé en dernière partie de ce manuscrit, la notion de porte-outils peut être étendue et généralisée bien au-delà de cette vision restrictive des choses. La conception et la commande des manipulateurs mobiles se basent sur deux domaines de la robotique déjà bien connus et explorés par la recherche et les industriels : la robotique manipulatrice et la robotique mobile.

1.4.2.1 Robotique manipulatrice

L'un des domaines les plus étudiés, historiquement pour l'industrie, est celui de la robotique manipulatrice. Ce dernier, exploré depuis plusieurs décennies, étudie les capacités de manipulation d'un objet par les manipulateurs robotiques. Le premier robot manipulateur, Unimate (Fig.1.15(a)) fut mis en installation en 1961 et était destiné à la manipulation de pièces à haute température sur des chaînes d'assemblage. Depuis, les manipulateurs n'ont cessé de se développer et de se répandre dans nos industries. Ils ont, par la suite, également été exploités pour réaliser des tâches d'assemblage ou encore de conditionnement sur les lignes de production industrielle.

Cet essor important dans le monde de l'industrie a permis au domaine de la manipulation d'être le moteur d'une recherche florissante depuis les débuts de la robotique. Ce domaine étudie deux types de manipulateurs basés sur des architectures différentes, les manipulateurs sériels (Fig.1.15(b)) et les manipulateurs parallèles (Fig.1.15(c)). Les premiers sont une succession de liaisons mécaniques (pivot ou glissière) partant de la base jusqu'à l'effecteur. Les seconds, sont constitués de plusieurs enchaînements de liaisons mécaniques (appelées jambes), qui partent de la base pour atteindre l'effecteur. Ces derniers sont historiquement moins utilisés en industrie car plus complexes à contrôler et leur espace de manipulation est plus restreint. Ils se sont cependant de plus en plus démocratisés ces dernières années pour les nombreux avantages que propose cette architecture MERLET, GOSSELIN et T. HUANG (2016), notamment par leur vitesse, précision et rigidité accrues par rapport aux manipulateurs sériels.

De façon générale, les manipulateurs permettent de réaliser des tâches avec précision et rapidité. De plus, ces systèmes sont capables de répondre à des objectifs divers tout en offrant une certaine flexibilité dans leur utilisation (manipulation d'objets, contrôle de qualité, assemblage...). Cependant, les manipulateurs sont confrontés à une contrainte commune, inhérente à leur structure, résidant dans la limite restreinte de leur espace de travail.

1.4.2.2 Robotique mobile

Un autre domaine de plus en plus exploré est celui de la robotique mobile. L'une des raisons du développement de ces systèmes robotisés est de pouvoir pallier à la limite des manipulateurs dans leur espace de travail. De ce fait, ayant une capacité de mobilité importante, l'espace de travail des robots mobiles n'est aucunement limité par une contrainte physique liée à leur conception.

De façon générale, on considère que le premier robot mobile est le robot Shakey (Fig.1.16(a)) INTERNATIONAL (2020) développé par la société SRI International en 1967. A partir de là, de nombreux travaux ont été menés pour améliorer leur mobilité et leurs commandes. Ces derniers se sont par la suite diversifiés pour s'adapter aux environnements

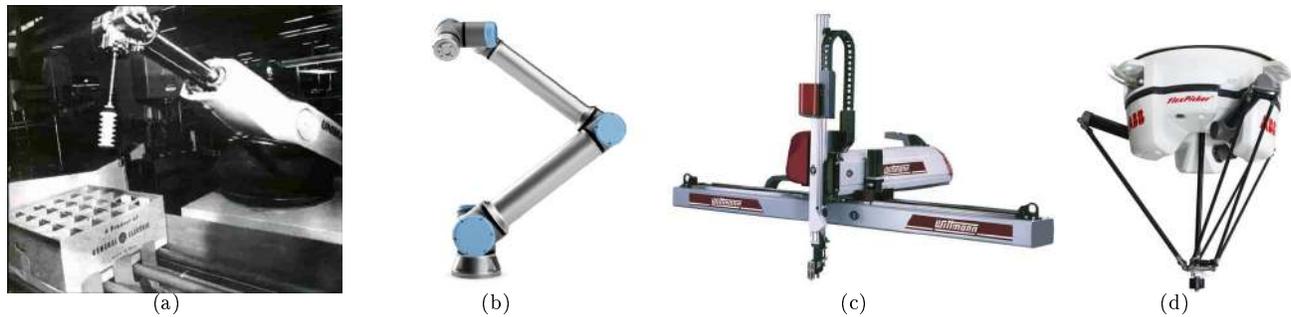


FIGURE 1.15 – Exemple de différents types de robots manipulateurs. (a) Robot Unimate. (b) Robot manipulateur série UR10e de la société Universal Robots. (c) Robot manipulateur série de type cartésien (axe linéaire) de la marque Wittman Battenfeld. (d) Robot manipulateur parallèle de la société ABB.

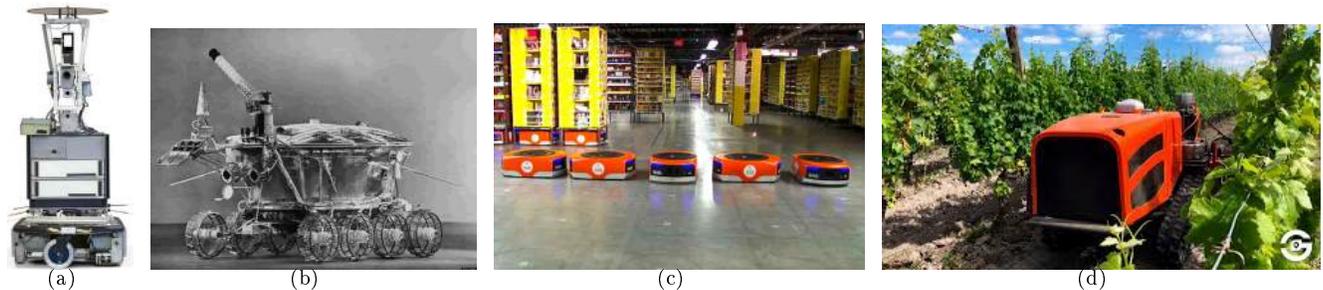


FIGURE 1.16 – Exemple de différents types de robots mobiles à roues. (a) Shakey (1967) développé dans un cadre de recherche par SIR International. (b) Lunokhod (1970) développé pour l'exploration lunaire par l'URSS. (c) Système Kiva (2012) de la société Amazon pour la logistique en entrepôts. (d) Robot Ceol de la société AgreeenCulture pour le travail viticole.

dans lesquels ils pouvaient évoluer ainsi qu'à leur type de mobilité (Fig.1.16(b)). En même temps, les AGV (Automated guided Véhicule) ont vu le jour dans les années 50 pour les industries et les entrepôts, et n'ont cessé de se perfectionner en augmentant leur autonomie jusqu'à aujourd'hui, où nous retrouvons des flottes dans la gestion des entrepôts, comme le système KIVA (Fig.1.16(c)). J.-t. LI (2016), présenté en 2012, par la société Amazon. Plus récemment, nous avons également vu apparaître des robots mobiles adaptés pour le travail en terrain extérieur (Fig.1.16(d)).

De plus, la mobilité de ces robots a évolué au cours du temps pour faire face à la complexité de l'environnement (obstacles, terrain,...) ou pour être capable d'évoluer dans d'autres espaces (Voir Fig.1.17). Par exemple, le premier robot bipède a été développé par l'université Wasada dans le projet Wabot (1970) WASEDA (2020) (Fig.1.17(a)). Un autre cas possible est l'utilisation de robots AUV (Autonomous Underwater Vehicle) dans les milieux sous-marins (Fig.1.17(c)). Par ailleurs, la mobilité aérienne par l'utilisation des drones se démocratise de plus en plus, ces dernières années, dans divers domaines de la société (Fig.1.17(b)). Enfin, cas de robots plus exotiques mais qui possèdent néanmoins une mobilité intéressante : les robots rampants TAKEMORI, TANAKA et MATSUNO (2018) (Fig.1.17(d)), plus marginaux mais amenés à se développer, notamment pour des applications d'exploration.

Cependant, malgré la taille de leurs espaces de travail et leurs mobilités variées, il ne sont que peu efficaces dans la réalisation de tâches complexes et doivent dépasser leur seule fonction de mobilité.

1.4.3 Manipulateurs mobiles

A l'interface de la robotique manipulatrice et mobile, se trouve la robotique des manipulateurs mobiles. Ces derniers représentent une partie des porte-outils existants en agriculture et sont classiquement conçus à partir d'une base mobile sur laquelle est accroché un ou plusieurs manipulateurs robotiques.

Afin de pallier aux limites des deux systèmes précédents (limitation de l'espace de travail ou limitation de la

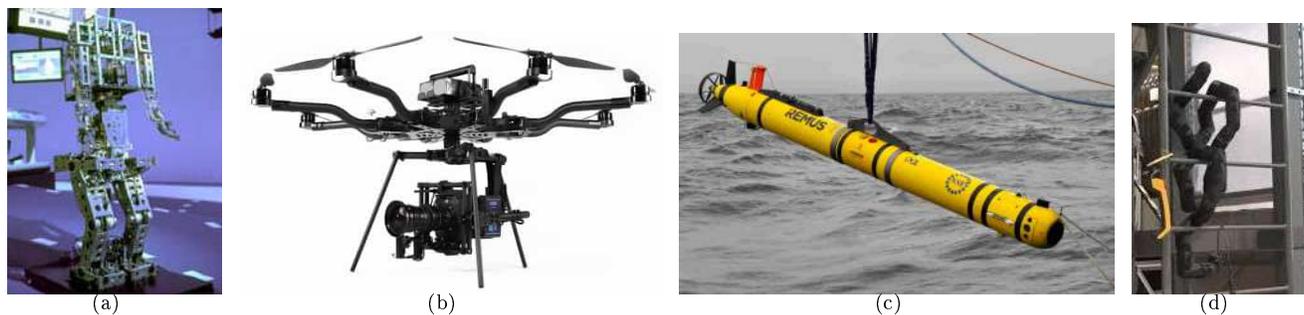


FIGURE 1.17 – Exemple de robots avec des mobilités différentes. (a) Wabot (1970) développé par l’université de Wasada, précurseur des robots à pattes. (b) Drone Alta (2020) de la société FreeFly, conçu pour les prises de vues au cinéma. (c) Remus (2001) de la société Hydroïd. (d) Robot rampant (2018) de l’université de Kyoto TAKEMORI, TANAKA et MATSUNO (2018).

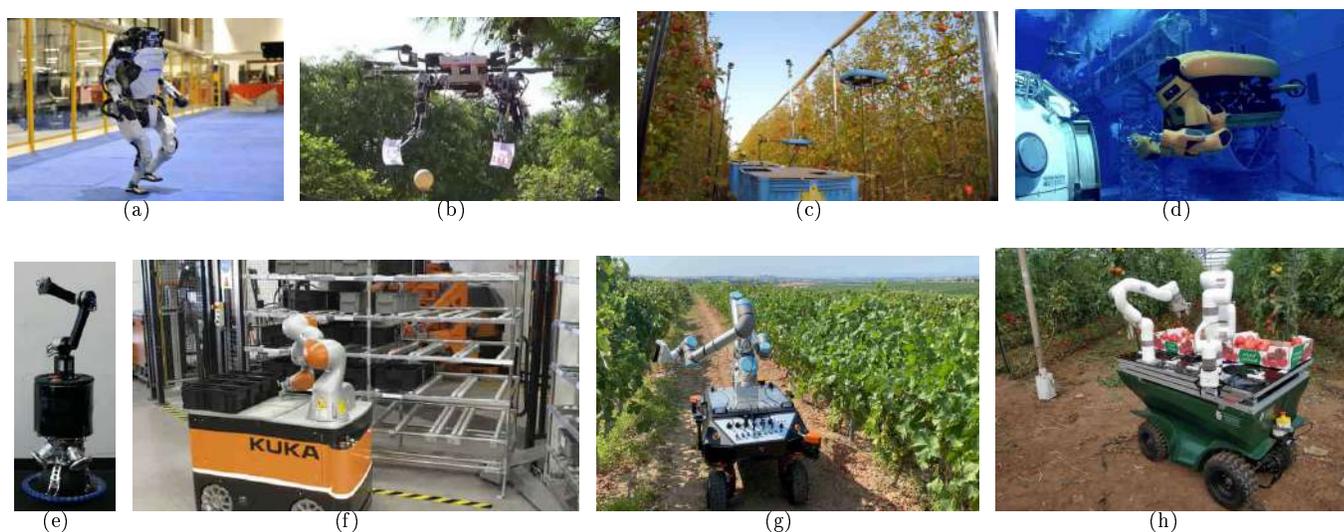


FIGURE 1.18 – Exemple de manipulateur mobile avec différentes modalités de mobilité. (a) Robot humanoïde Atlas de la société Boston Dynamics se déplaçant sur deux jambes. (b) Manipulateur mobile aérien du Laas. (c) Manipulateur mobile FAR de la société Tevel Aerobotics Technologies, composé d’une base mobile rattachée à deux drones possédant chacun un manipulateur à un degré de liberté. (d) Manipulateur mobile sous-marin Aquanaut de la société Nauticus Robotics. (e) Manipulateur mobile se déplaçant en équilibre sur une sphère MINNITI et al. (2019). (f) Manipulateur mobile Kmr Iiwa de la société Kuka possédant des roues omnidirectionnelles. (g) Robot Baccus de la société Robotnik et (h) manipulateur mobile de la société Automato Robotics pour des déplacements en terrain extérieur avec des roues orientables.

complexité de la tâche), les manipulateurs mobiles sont apparus au début des années 90 et ont fait l’objet de nombreuses recherches depuis ces années. Ces derniers consistent en l’association d’un ou plusieurs manipulateurs sur une base mobile, permettant la réalisation de tâches nécessitant à la fois des capacités de mobilité et de manipulation.

Tout comme la diversité des mobiles et des manipulateurs est importante, celle des manipulateurs mobiles l’est également (Fig.1.18) La structure de ces derniers peut fortement évoluer en fonction de leur domaine d’application. Des travaux sont ainsi effectués sur les manipulateurs mobiles aériens (Fig.1.18(b) et Fig.1.18(c)) composés d’une base mobile type drone associée à un manipulateur STAUB et al. (2018). D’autres encore sont utilisés pour des missions sous-marines G. ANTONELLI et S. CHIAVERINI (2003) (Fig.1.18(c)). Egalement, les robots humanoïdes (Fig.1.18(a)) et plus généralement les robots à pattes, peuvent être considérés comme de tels systèmes. Malgré tout, la majorité des manipulateurs mobiles étudiés aujourd’hui se constitue en une base mobile à roues associée à un bras sériel ((Fig.1.18(f), Fig.1.18(g) et Fig.1.18(h)).

1.5 Inscription de la thèse dans le contexte agricole et robotique

Le bilan de la robotique dressé dans le milieu agricole, a permis de mettre en valeur les différents intérêts que cette dernière représente pour ce domaine, mais également l'ensemble des difficultés qu'elle rencontre encore pour s'y intégrer pleinement. Ainsi il apparaît que les tâches à réaliser dans le monde agricole sont extrêmement diverses et imposent des structures de robots différentes pour y faire face. De plus, nombre de ses tâches nécessitent le positionnement précis d'un outil dans un espace important. Ceci justifie alors, de plus en plus, l'apparition de porte-outils mobiles munis de bras robotisés pour effectuer ces tâches. Pour cela, les chercheurs et industriels capitalisent sur leur bonne maîtrise des robots manipulateurs et de la navigation des robots mobiles pour offrir des systèmes, capables de se mouvoir dans un environnement jusqu'à un point déterminé, où la tâche de manipulation pourra être réalisée. Cependant, afin que ce porte-outils soit économiquement rentable pour un exploitant, il doit être multitâches. Pour résoudre la contradiction apparente, les plateformes se doivent de devenir modulaires VERBIEST et al. (2020).

1.5.1 Intérêt de la commande coordonnée

Cependant, au vu des recherches effectuées concernant les manipulateurs mobiles à roues, il n'existe que très peu de travaux où l'assemblage de ces systèmes va au-delà de la simple capitalisation des connaissances, en proposant une coordination des mouvements entre le manipulateur et la base mobile. Il s'agit en effet, pour la plupart, d'amener un manipulateur en position, via un système de navigation, afin que ce dernier puisse réaliser sa tâche, très souvent de façon statique et quelquefois de façon compensée. Dans le premier cas, le mobile s'arrête lors de la réalisation de la tâche, dans le second, le bras compense le mouvement de la base comme une perturbation. Il n'existe alors pas de notion de mouvement coordonné entre les sous-systèmes, et la réalisation du travail devient sous-optimale.

De fait, bien que l'étude scientifique de la coordination des mouvements des manipulateurs mobiles ait débuté depuis la fin des années 80, il semble que son intérêt n'ait que peu été perçu dans le cadre de la robotique agricole. Cela peut être en partie expliqué par sa superficialité apparente jusqu'à maintenant. En effet, la plupart des manipulateurs mobiles agricoles que nous avons recensés, sont des plateformes mono-bras. Or, comme indiqué dans BAC et al. (2014), à cette date, le temps moyen de récolte d'un fruit est de trente-trois secondes. Il apparaît donc raisonnable d'amener le manipulateur en position et de le laisser statique, pour réaliser la récolte des nombreux fruits, qui se trouveront dans sa zone de travail avant de le déplacer et ainsi de suite.

Cependant, comme le démontre le robot Agrobot, l'une des solutions pour rendre le système économiquement viable, ou du moins commercialisable, est l'utilisation de beaucoup plus de manipulateurs, attachés à la base mobile, permettant un travail en parallèle et donc une récolte plus rapide. Il est à ce moment intéressant de se poser la question du mouvement de la base mobile durant la récolte, pour augmenter la rapidité de l'ensemble et rendre le mouvement global plus fluide. De plus, de nombreux efforts ont été menés sur la tâche de récolte, et certaines productions réduisent aujourd'hui le temps de cueillette à neuf secondes DAWSON (2021). De même, il apparaît raisonnable de penser que ce dernier diminuera encore dans les années à venir. Ainsi la question du mouvement coordonné pour gagner en vitesse sera de plus en plus au cœur de la tâche.

Par ailleurs, en dehors du critère de vitesse d'exécution, l'utilisation de manipulateurs avec un degré de redondance non nul, permet à ces derniers d'avoir une meilleure accessibilité de l'objet, mais cela participe à la complexification du mouvement, la diminution de la vitesse et de la fiabilité et à l'augmentation des coûts. L'utilisation d'une commande de coordination des différentes parties du manipulateur mobile permettrait alors de se servir de la mobilité offerte par la plateforme pour améliorer l'accessibilité de l'objet, tout en gardant un manipulateur moins complexe, ce qui n'affecte ni les coûts, ni la fiabilité du système. Ce même constat peut s'extrapoler à toute autre tâche, telle que le désherbage, la pulvérisation ou la taille et se renforce avec la diminution du temps d'exécution d'une action par le manipulateur.

En troisième lieu, la redondance offerte par la plateforme et dont bénéficie une commande coordonnée, permet d'envisager d'optimiser la réalisation de la tâche au regard de différents critères tels que la rapidité d'exécution ou le maintien d'intégrité du système. Cela peut être fait en déplaçant le mobile pour optimiser la zone du travail du bras, pour que celui-ci soit dans un espace de dextérité ou encore pour assurer la stabilité du système dans des environnements en pente comme les vignobles.

Enfin, dans le cas de la coopération de deux ou plusieurs manipulateurs mobiles pour une tâche telle que le transport de charges lourdes, la coordination des mouvements de chaque manipulateur mobile devient une nécessité pour accomplir leur objectif.

C'est pour l'ensemble de ces raisons que les manipulateurs mobiles sont de plus en plus utilisés de nos jours, en agricole comme en industrie, et que les recherches effectuées sur les approches de coordination intéressent de plus en plus de personnes.

1.5.2 Verrous scientifiques de la commande coordonnée

En revanche, même si de tels systèmes suscitent un fort intérêt, la mise en place de commandes coordonnées pour ce genre de plateforme pose de forts verrous scientifiques, qui peuvent être définis sous la forme suivante Z. LI et GE (2013a) :

- Quels sont les modèles cinématiques et dynamiques des manipulateurs mobiles, en prenant en compte que le système peut être soumis à des contraintes de non-holonomie ?
- Comment planifier le mouvement de ces systèmes sous des contraintes pouvant être holonomes ou non ?
- Comment mettre en œuvre des contrôleurs mouvement /force ou position /force en sachant que le manipulateur mobile sera amené à interagir avec son environnement ?
- Comment peut-on coordonner et faire coopérer plusieurs manipulateurs mobiles pour remplir efficacement une tâche désirée lorsque la coordination et la coopération peuvent améliorer les performances de manipulation de l'ensemble des robots ?

De plus, la diversité des structures de manipulateurs mobiles présentes en agriculture, et plus généralement dans tous les domaines confondus, pose problème du point de vue de la versatilité d'une approche coordonnée. De fait, ces dernières sont généralement étudiées pour un type de plateforme sans être compatibles avec d'autres. Ceci est dommageable dans le cas où les structures de plusieurs robots sont différentes du fait des besoins de l'exploitation, et imposerait alors de créer une commande spécifique à chacun de ces systèmes, à l'image de ce qui se pratique aujourd'hui. Cependant, l'aspect plus problématique de ce paradigme est le cas où le porte-outils attèle et détèle des outils possédant eux-mêmes des degrés de liberté (devenant alors une extension du porte-outils). Par exemple, venir atteler une remorque sur laquelle se repose un manipulateur destiné à la récolte (à l'image de ce que propose la société Abundant Robotics pour la récolte de pommes). Ceci impose alors une commande différenciée entre avant et après l'attelage, et possiblement même différente entre plusieurs attelages. Or, dans le cas où l'on voudrait créer une plateforme modulaire pour permettre à cette dernière d'être multitâches, améliorant sa rentabilité, il serait nécessaire de créer une commande différenciée selon chaque combinaison de module possible.

Pour éviter cela, il semble nécessaire de réaliser une commande coordonnée générique, capable de s'adapter à la structure du manipulateur mobile, de changer à la volée, tout en étant robuste face à la diversité des tâches proposées par le monde agricole.

1.5.3 Manipulateur mobile en milieu naturel

En second lieu, il n'existe que très peu de recherches scientifiques portant sur l'utilisation des manipulateurs mobiles en milieu naturel. Autant l'utilisation de plateforme mobile en milieu agricole a suscité de nombreuses recherches afin de venir prendre en compte les perturbations et la dynamique du terrain. Autant l'étude de ces perturbations sur les manipulateurs mobiles a peu été étudiée. De fait, la commande non-coordonnée implique que la manipulation se réalise à l'arrêt de la plateforme. Ainsi, la dynamique et les perturbations engendrées par l'environnement ne sont pas à prendre en compte. Cependant la commande coordonnée, impliquant la manipulation synchronisée avec la mobilité, nécessite cette prise en compte pour rester précise et robuste dans la réalisation de la tâche.

Il apparaît donc nécessaire de prendre en compte, dans l'approche de coordination, à la fois la dynamique du terrain pour corriger les glissements de la base mobile, et les irrégularités et devers du terrain affectant la précision de la tâche.

1.5.4 Objectifs de la thèse

Le premier objectif de ces travaux sera donc de proposer une coordination générique d'un manipulateur mobile, adaptable à différentes structures de robots (nombre et structure des manipulateurs, type de locomotion,...). De plus, afin d'améliorer les performances du système, il sera nécessaire d'intégrer à la commande de ce système, l'optimisation de l'ensemble des degrés de redondance de la structure, permettant leur pleine utilisation et la réalisation optimale de une ou plusieurs tâches.

Le second objectif de ces travaux concerne la mise en place au sein de la commande coordonnée, de la capacité d'adaptation et de correction face aux perturbations provenant du milieu naturel. Ceci, afin de garantir la précision de la tâche, la vitesse d'exécution et le maintien d'intégrité de la plateforme.

1.5.5 Plan du mémoire de thèse

Le présent mémoire est organisé selon le plan suivant. Le prochain chapitre sera dédié à la synthèse de l'état de l'art en ce qui concerne la coordination des manipulateurs mobiles ainsi que les approches de résolution de la redondance pour ces systèmes. Un point sera également fait concernant l'utilisation des manipulateurs mobiles en environnement extérieur ainsi que sur les différentes approches permettant de répondre aux difficultés de navigation de ces systèmes dans de tels milieux.

Le chapitre trois présentera la méthode de coordination générique développée durant ces travaux ainsi que le développement des modèles utilisés pour la synthèse des commandes des différents sous-systèmes. Un ensemble de simulation et d'expérimentation sera présenté afin de démontrer la faisabilité ainsi que les forces de l'approche proposée.

Par la suite, le chapitre quatre se focalisera sur la coordination des manipulateurs mobiles en environnement naturel, afin de mettre en lumière les difficultés inhérentes à ces milieux et les méthodes proposées pour leur apporter une réponse. Ces développements théoriques seront accompagnés de plusieurs validations expérimentales afin d'en démontrer les intérêts.

Le cinquième chapitre, proposera l'étude d'un cas applicatif de suivi de structure végétale en milieu naturel, afin de mettre en oeuvre une tâche nécessitant à la fois la coordination du système, tout en étant opposée à la difficulté de navigation en milieu extérieur. Ce cas sera également mis en oeuvre et validé expérimentalement.

Enfin, un dernier chapitre conclura sur l'ensemble des contributions proposées durant cette thèse et développera l'ensemble des perspectives qu'elles peuvent offrir pour des travaux futurs.

1.6 Contexte de travail

Les travaux présentés dans le cadre de cette thèse ont été financés par la région ARA (Auvergne Rhône-Alpes) dans le cadre du CPER Mmasyf - "Mobilités - Matériaux et Systèmes du futur". Ce dernier a également financé trois plateformes de manipulation mobile, dont l'une a été utilisée pour les validations expérimentales de ces travaux.

La thèse a été réalisée en collaboration entre les laboratoires INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) et l'Institut Pascal de Clermont-Ferrand sous la tutelle de l'UCA (Université Clermont Auvergne). Cette collaboration est menée dans la dynamique du laboratoire d'excellence IMOBS3 et du projet I-site CAP 20-25, qui ont pour but de fédérer les acteurs de recherche de la place clermontoise, autour de grandes thématiques multi-disciplinaires telles que les agro-écosystèmes durables dans un contexte de changement global, les risques naturels catastrophiques et la vulnérabilité socio-économique, les systèmes et services innovants pour les transports et la production, ou encore la mobilité personnalisée comme facteur clé de la santé.

Chapitre 2

État de l'art sur la commande des manipulateurs mobiles

SOMMAIRE DU CHAPITRE

2.1	Notion de coordination à travers la tâche	50
2.1.1	Tâche principale	50
2.1.1.1	Stabilisation d'un point dans l'espace	50
2.1.1.2	Suivi d'une trajectoire	51
2.1.2	Tâche secondaire : critère de résolution de la redondance	51
2.1.2.1	Manipulabilité	52
2.1.2.2	Limite articulaire du manipulateur	55
2.1.2.3	Position dans l'espace de travail	55
2.1.2.4	Évitement d'auto-collision	56
2.1.2.5	Évitement d'obstacle	57
2.1.2.6	Stabilité du système	57
2.1.3	Conclusion sur la notion de tâche	57
2.2	Classification des approches de coordination d'un manipulateur mobile	58
2.2.1	Les systèmes holonomes	58
2.2.2	Les systèmes non-holonomes	60
2.2.2.1	Les approches non coordonnées	61
2.2.2.2	Les approches coordonnées en couplage externe	63
2.2.2.3	Les approches coordonnées en couplage interne	66
2.2.3	Conclusion sur la coordination	70
2.2.3.1	Discussion sur les approches de modélisation en couplage interne	71
2.2.3.2	Discussion sur la pondération des systèmes	71
2.2.3.3	Comparaison entre le couplage interne et le couplage externe	72
2.2.3.4	Orientation de l'approche de coordination considérée pour ces travaux	73
2.3	Résolution de la redondance	73
2.3.1	Méthodes locales	73
2.3.1.1	Méthodes analytiques	74
2.3.1.2	Méthode numérique	82
2.3.2	Approches globales	86
2.3.2.1	Algorithmes génétiques	86
2.3.2.2	Échantillonnage de l'espace	87
2.3.2.3	Méthodes exploitant l'intelligence artificielle	89
2.3.3	Conclusion sur la gestion de la redondance des systèmes	90
2.4	Coordination et navigation en milieu naturel	91
2.4.1	Modélisation pour la navigation en environnement naturel	92
2.4.2	Estimation des effets dynamiques sur le système	93

2.4.2.1	Estimation empirique	94
2.4.2.2	Estimation par mesure directe	94
2.4.2.3	Estimation par des méthodes de logique floue	94
2.4.2.4	Observateur de Luenberger	95
2.4.2.5	Observateur de perturbations	96
2.4.2.6	Filtre de Kalman	97
2.4.2.7	Mode glissant	98
2.4.2.8	Commande H_∞	99
2.4.2.9	Filtre à particules	99
2.4.2.10	Estimateur prédictif	100
2.4.2.11	Estimation par réseau de neurones	100
2.4.3	Conclusion sur la navigation des robots en milieu naturel	100
2.5	Conclusion générale sur l'état de l'art	102

Un état de l'art concernant les manipulateurs mobiles est fourni dans ce chapitre. Ce dernier permettra d'étudier les approches prometteuses permettant de répondre aux besoins des manipulateurs mobiles pour le monde agricole, énumérés dans le chapitre précédent (Voir chapitre 1.5). Il servira ainsi de base de départ pour développer l'approche coordonnée, proposée dans le cadre des travaux de thèse au chapitre suivant.

2.1 Notion de coordination à travers la tâche

Avant d'aborder les notions de coordination qui nous intéressent, il est important de préciser que cette notion n'a de sens qu'au travers de la réalisation d'une tâche particulière. L'obtention d'un mouvement global cohérent ne peut être obtenu qu'au travers d'un objectif précis. Sans ce dernier, dire que le mouvement est cohérent ou incohérent n'a pas lieu d'être. De fait, il est nécessaire de matérialiser cet objectif au travers d'une tâche globale, elle-même décomposable en sous-tâches.

2.1.1 Tâche principale

Souvent, en robotique, on parle de tâche principale pour représenter l'objectif que l'on cherche à atteindre, et de tâche secondaire pour les objectifs nécessaires au bon déroulement de la tâche principale. De façon récurrente, la littérature scientifique se focalise autour de deux tâches principales; la stabilisation en un point de l'espace et le suivi de trajectoire. Ces dernières sont pertinentes au vu des besoins et enjeux rencontrés dans le chapitre précédent (Voir Chap.1.5). De fait, atteindre un point particulier permettra, par exemple, de venir positionner un outil pour récolter un fruit dans un verger, tandis que le suivi de trajectoire permet le suivi d'un profil particulier de végétation pour des tâches de taille ou de pulvérisation ciblées.

2.1.1.1 Stabilisation d'un point dans l'espace

La stabilisation en un point se formalise par la définition d'un point particulier dans l'espace de travail du système et la mise en place d'une commande permettant d'atteindre ce point particulier. La commande des manipulateurs est classiquement réalisée pour ce genre de tâche par l'utilisation de commandes par retour d'état.

Cependant dans le cas d'un mobile, soumis à une contrainte de non-holonomie (Voir Annexe.D.3), la stabilisation en un point précis est impossible par retour d'état statique BROCKETT (1983). De fait, bien que l'ensemble de l'espace de configuration leur soit accessible, l'espace des vitesses admissibles est restreint, ce qui implique la réalisation de manœuvres complexes pour atteindre l'objectif. Il est donc nécessaire de passer par des approches différentes pour répondre à cette question.

Dans le cas des manipulateurs mobiles, la question est moins tranchée et dépend de la structure du système ainsi que des contraintes cinématiques de ses différentes sous-parties. Dans le cas d'un manipulateur mobile holonome¹, la stabilisation en un point est tout à fait envisageable. Ce dernier a notamment été traité dans OSMAN et al. (2020) par l'intermédiaire d'un NMPC (Nonlinear Model Predictive Control).

1. dont aucune des sous-parties n'est soumise à une contrainte de non-holonomie

Dans le cas où l'une des parties du manipulateur mobile est non-holonome, généralement la base mobile², la stabilisation en un point est également possible et a été traitée plusieurs fois de manière différente. Des travaux se basant sur l'utilisation des fonctions transverses P. MORIN et C. SAMSON (2003) ont permis la mise en place de ce genre de tâche pour les manipulateurs mobiles non-holonome FRUCHARD, Pascal MORIN et Claude SAMSON (2006). ANDALUZ et al. (2012) ont également proposé une commande adaptée à ces tâches au travers de deux contrôleurs, cinématique et dynamique, en cascade. Par ailleurs, comme montré par les travaux présentés dans l'Annexe.H, la stabilisation en un point par retour d'état linéaire pour un manipulateur mobile non-holonome est possible sous réserve que la base puisse approcher suffisamment du point objectif pour permettre au manipulateur de l'atteindre. Or, cette hypothèse n'est pas restrictive, car bien que la stabilisation asymptotique du mobile soit impossible, il suffit qu'il soit suffisamment proche du point objectif pour que le manipulateur prenne le relais et atteigne le point en compensant les défauts de mobilité de la base.

Le cas de la stabilisation en un point pour un manipulateur mobile complètement non-holonome ou possédant un manipulateur non-holonome n'a pas été traité dans la littérature scientifique au vu des recherches effectuées dans le cadre de ce manuscrit.

2.1.1.2 Suivi d'une trajectoire

Contrairement à la stabilisation en un point, le suivi de trajectoire impose un chemin dans l'espace de travail du système, ce dernier étant alors contraint de le suivre. La notion de trajectoire apparaît lorsqu'à chaque point du chemin est imposée une notion temporelle, ce qui permet alors de faire varier la vitesse du système le long de ce dernier.

Le suivi de trajectoire est très majoritairement choisi comme tâche principale pour la commande des manipulateurs mobiles, des travaux les plus anciens YAMAMOTO et X. YUN (1992), aux plus récents VARGA, MEIER et al. (2019). Certains n'utilisent qu'une seule trajectoire Y. JIA et al. (2014), tandis que d'autres utilisent des approches bi-trajectoires Mustafa MASHALI (2015). Le détail de ces différentes méthodes sera plus largement abordé dans la partie traitant des approches de coordination et de résolution de la redondance, où la planification et l'utilisation de trajectoire en sont des composantes importantes.

2.1.2 Tâche secondaire : critère de résolution de la redondance

Les manipulateurs mobiles sont par leur structure des systèmes extrêmement redondants, ce qui constitue l'un de leurs attraits dès le début de leur étude F. PIN et J.-C. CULIOLI (1990). Or, l'un des objectifs de la coordination est de pouvoir user de cette redondance de façon optimale. Pour cela, un ensemble de tâches secondaires est proposé, en complément de la tâche principale, permettant d'occuper tous les degrés de liberté qui n'ont pas été dévolus à cette dernière. Les approches de résolution de redondance ont alors pour but de distribuer ces degrés de liberté restant, entre ces tâches, pour les réaliser de la meilleure façon possible au vu des critères donnés.

Au contraire des tâches principales qui restent peu nombreuses, les tâches secondaires le sont beaucoup plus car elles dépendent du contexte dans lequel le système est utilisé. Dans le cadre de la coordination de manipulateur mobile, un important travail a été développé dans la littérature scientifique pour la définition de ces critères en fonction des robots et des besoins.

La liste ci-dessous, non-exhaustive, répertorie un grand nombre de critères abordés dans les travaux antérieurs :

- Manipulabilité du manipulateur
- Manipulabilité du manipulateur mobile
- Limite articulaire du manipulateur
- Position dans l'espace de travail
- Évitement d'auto-collision
- Évitement d'obstacle
- Stabilité du manipulateur mobile
- Nombre de mouvements de la plateforme mobile par rapport au nombre de mouvements nécessaires (liés à la rapidité d'exécution de la tâche ou des coûts énergétiques).
- Temps de réalisation de la tâche
- Limitation de couple des articulations
- Minimisation de l'énergie cinétique du système
- Contrainte sur la rotation du véhicule. Ce critère est destiné à limiter la vitesse maximale de rotation du mobile en fonction de sa vitesse linéaire.
- Erreur minimum du manipulateur
- L'orientation du mobile pour la réalisation de la tâche

2. ce qui est le cas classique rencontré dans la littérature

- Amortissement articulaire

Le nombre important de ces tâches amène alors une considération importante quant à la notion de priorité des tâches, qu'elles soient principale ou secondaire. Plusieurs travaux ont montré qu'il était possible de faire évoluer cette priorité en fonction du besoin. Cependant, le choix de l'ordre de priorité n'est pas toujours évident et peu abordé. Dans ce but, DIETRICH, WIMBOCK, ALBU-SCHAFFER et al. (2012) proposent une classification des critères permettant de faire ces choix selon l'ordre ci-dessous :

- 1– La sécurité
- 2– Les contraintes physiques
- 3– L'exécution des tâches
- 4– La posture des systèmes (exemple : minimisation de l'énergie, posture désirée,...)

Dans la suite de cette partie, les critères les plus étudiés seront détaillés afin de comprendre leurs intérêts dans une commande coordonnée.

2.1.2.1 Manipulabilité

Le critère d'optimisation par excellence retrouvé dans quasiment tous les travaux ayant abordé les manipulateurs mobiles, est la manipulabilité. Que ce soit selon une forme ou une autre, elle permet de traduire la "dextérité" d'un système de manipulation dans la réalisation de sa tâche et mérite de s'y attarder. Sa définition a été proposée telle que :

Définition 2.1. Manipulabilité Tsuneo YOSHIKAWA (1985)

La manipulabilité w d'un système est la mesure quantitative de la capacité de ce système à effectuer des mouvements dans certaines directions. Elle définit l'espace de travail "confortable" du manipulateur et s'exprime de la façon suivante :

$$w = \sqrt{\det(J(q)J^t(q))}. \quad (2.1)$$

Avec J la matrice Jacobienne d'un système dépendant de variables articulaires pilotées q .

Historiquement, cette métrique a été développée pour les manipulateurs afin de donner une mesure quantifiant la distance aux singularités cinématiques du système. Elle a ensuite été déclinée en de nombreuses variantes de mesure au fil des années, différentes versions pour la modélisation cinématique, dynamique, mais également pour les manipulateurs mobiles.

2.1.2.1.a Manipulabilité d'un manipulateur

La première mention de la manipulabilité a été faite dans Tsuneo YOSHIKAWA (1985) dans le cas du manipulateur seul. Cette dernière peut être calculée par (2.1) mais également par la décomposition SVD (Voir Annexe.C.3.3) de la matrice jacobienne :

$$w = \sigma_1 \sigma_2 \cdots \sigma_m. \quad (2.2)$$

Les valeurs des différentes valeurs singulières $\sigma_i, i \in [1, m]$ de la jacobienne $J(q)$ représentent la grandeur des demi-axes de l'ellipsoïde de manipulabilité, ou de l'espace vectoriel des vitesses opérationnelles. Une petite valeur singulière implique que le robot se déplace dans cette direction avec difficulté tandis qu'une grande valeur singulière implique qu'il s'y déplace avec aisance.

La mesure w permet d'établir la posture optimale du travail où le robot sera le plus « à l'aise » pour réaliser sa tâche. Une valeur singulière nulle implique que l'un des demi-axes de l'ellipsoïde est nul, laissant le robot incapable de se déplacer dans cette direction, car il perd une dimension de l'espace des vitesses accessibles. Le manipulateur est alors dans une position de singularité.

La définition donnée précédemment (2.1) peut-être utilisée de façon similaire avec le modèle statique du système³ afin d'obtenir une mesure de force manipulatrice et son ellipsoïde correspondante. Les demi-axes de l'ellipsoïde de

3. Voir annexe D.8.

manipulabilité et de force manipulatrice sont de même direction et leur norme est inversement proportionnelle. Ainsi, une direction dans laquelle une force importante peut-être générée, ne pourra générer une vitesse importante et vice versa. Ces deux représentations sont regroupées sous le terme manipulabilité kinetostatic.

Une autre forme de manipulabilité a été présentée dans T. YOSHIKAWA (1985); YAMAMOTO et Xiaoping YUN (1996) sous l'appellation de manipulabilité dynamique utilisant la matrice d'inertie M du système. De façon similaire à la mesure précédente, elle permet d'évaluer les directions possibles pour générer une accélération plus ou moins importante. Cette dernière est alors donnée par la relation :

$$w_d = \sqrt{\det(J(M^t M)^{-1} J^t)} = \frac{w}{|\det(M)|}. \quad (2.3)$$

Dans les années suivantes, différents travaux KLEIN et BLAHO (1987); Stefano CHIAVERINI, Giuseppe ORIOLO et MACIEJEWSKI (2016) ont défini de nouvelles mesures de manipulabilité afin de caractériser la capacité de manipulation des systèmes. La seconde mesure de manipulabilité, appelée nombre de conditionnement est donnée telle que :

$$w_2 = \frac{\sigma_1}{\sigma_m}. \quad (2.4)$$

Ce nombre permet d'évaluer l'uniformité de l'ellipsoïde de manipulabilité. Si la mesure est égale à l'unité, alors la configuration est isotropique et l'effecteur possède la même capacité de manipulation dans toutes les directions.

La troisième mesure est définie comme la plus faible valeur singulière de la jacobienne :

$$w_3 = \sigma_m. \quad (2.5)$$

Cette valeur singulière changeant plus rapidement que les autres à l'approche des singularités, il est possible de s'en servir pour caractériser la dextérité du robot.

Une dernière mesure w_4 a été proposée dans B. BAYLE, J.-Y. FOURQUET et M. RENAUD (2001). Elle présente la notion d'excentricité de l'ellipse donnant une information sur sa forme, si $w_4 = 1$, l'ellipse est une ligne, si $w_4 = 0$, l'ellipse est un cercle. Cette dernière se définit telle que :

$$w_4 = \sqrt{1 - \frac{\sigma_m^2}{\sigma_1^2}}. \quad (2.6)$$

Toutes les formulations présentées jusqu'ici concernant la manipulabilité offrent une mesure scalaire de cette dernière. L'utilisation de cette quantité étant souvent associée à un algorithme d'optimisation pour en déterminer une valeur optimale. Cependant, cette approche ne permet pas de bien maîtriser l'ellipsoïde de manipulabilité du système. De fait, la mesure résulte du produit des éléments diagonaux de la matrice de manipulabilité (2.2) trouvés par décomposition SVD :

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sigma_m \end{pmatrix}. \quad (2.7)$$

Or, à une même mesure de manipulabilité w peut correspondre plusieurs ellipses donnant des directions de déplacements préférentiels différents. Pour améliorer cet aspect, JAQUIER et al. (2018) propose une approche permettant, non plus de converger vers une mesure w de manipulabilité, mais vers une matrice Σ où la valeur de chacun des demi-axes de manipulabilité peut être spécifiée indépendamment les unes des autres. Ainsi, il devient possible de contrôler pleinement les directions de déplacements possibles du manipulateur et de régler la préférence des uns par rapport aux autres.

2.1.2.1.b Manipulabilité d'un manipulateur mobile

La manipulabilité introduite par Tsuneo YOSHIKAWA (1985) a été utilisée dans de très nombreux travaux de manipulation, mais son intérêt a également été montré par YAMAMOTO et X. YUN (1992) dans le cadre de la manipulation mobile avec des approches coordonnées. Beaucoup d'auteurs l'ont utilisée de cette façon par la suite

en adaptant le critère à la nouvelle structure du système.

Lorsque les approches coordonnées sont basées sur une modélisation globale (Voir Sec.2.2), plusieurs auteurs ont montré qu'il était possible d'étendre le concept de manipulabilité du manipulateur au manipulateur mobile dans son ensemble.

De telles recherches ont été effectuées dans YAMAMOTO et Xiaoping YUN (1999) proposant une définition de l'ellipsoïde cinématique et dynamique associée à la tâche, prenant compte de la manipulabilité du manipulateur et de la mobilité de la plateforme dans le cas général. Ils donnent ensuite une analyse de ces derniers pour le cas de la manipulation d'un objet par un manipulateur mobile bi-bras.

Les travaux GARDNER et Steven A. VELINSKY (2000) proposent également une analyse de la manipulabilité du système selon la position du montage du manipulateur sur le mobile et montrent que la position de ce dernier peut faciliter la maximisation de ce critère.

Les travaux présentés dans GARDNER et Steven A. VELINSKY (2000); SHIN et al. (2003) proposent l'idée que la mesure de manipulabilité peut être utilisée pour déterminer la vitesse maximale possible selon une direction privilégiée pour la réalisation de la tâche. Cette idée est reprise dans Huatao ZHANG, Yunyi JIA et XI (2012) qui propose une fonction objectif TOMM (Task Oriented Manipulability measure) telle que :

$$w_{TOMM} = \max \left(\frac{1}{v_e^t (J J^t) v_e} \right). \quad (2.8)$$

Avec v_e le vecteur de vitesse unitaire de l'effecteur et J la Jacobienne prenant compte du mobile.

L'idée de direction préférentielle pour la réalisation d'une tâche sera également développée dans la thèse NAIT-CHABANE (2006) où l'auteur propose une autre mesure de manipulabilité afin de prendre en compte la direction de la tâche à effectuer dans le calcul. Il définit alors la manipulabilité directionnelle selon les valeurs singulières de la matrice Jacobienne :

$$w_{dir} = \sum_{i=1}^n |(v_e^t u_i) \sigma_i|. \quad (2.9)$$

Avec σ_i les valeurs singulières de la Jacobienne et u_i les vecteurs des demi-axes principaux donnés par l'ellipsoïde de manipulabilité.

Dans les travaux suivants SYNODINOS, MOULIANITIS et ASPRAGATHOS (2015) les auteurs proposent une méthode basée sur une approche floue permettant une approximation correcte et rapide de la mesure de manipulabilité. Cette dernière permet de diminuer la complexité de calcul par rapport à la décomposition SVD notamment pour des systèmes hautement redondants comme les manipulateurs mobiles.

Dans B. BAYLE, J.-Y. FOURQUET et M. RENAUD (2001); B. BAYLE, J. -Y. FOURQUET et M. RENAUD (2003a) les auteurs mentionnent cependant que délaisser le critère de manipulabilité du manipulateur au profit du manipulateur mobile, peut s'avérer dommageable pour le bras. De fait, ne privilégier que le critère du manipulateur mobile peut conduire le manipulateur dans une position où, sans l'apport de mobilité de la base, il serait en singularité. Dès lors, sans le support de la base mobile, il n'est plus en mesure de réaliser une tâche de manipulation. Ceci est problématique car la base mobile a principalement pour vocation à amener l'effecteur dans une zone proche de la zone d'intérêt, sans chercher la précision de positionnement. Or dans une telle configuration, le mobile est contraint à participer directement à la tâche de manipulation ce qui nécessite une précision que ce dernier ne peut pas nécessairement atteindre à cause des ses dynamiques propres. Il devient donc nécessaire de créer une fonction pondérant la manipulabilité du manipulateur et celle du manipulateur mobile avec un facteur pouvant évoluer au cours du temps en fonction de la tâche du robot.

Cet argument est repris par la suite dans une étude Yunong ZHANG, YAN et al. (2016) proposant une comparaison critique, via des simulations, entre l'utilisation de la mesure de manipulabilité du manipulateur mobile et celle du manipulateur seul, pointant le fait que l'utilisation de la métrique du système complet peut engendrer des positions singulières pour le manipulateur seul. Pour le lecteur intéressé, une illustration de ce point est proposé en

Référence	Expression du critère
Mesure JRAE (Joint range availability) KLEIN et BLAHO (1987)	$H(q) = \sum_{i=1}^n (q_i - a_i)^2$
ZGHAL, R.V. DUBEY et EULER (1990)	$H(q) = \sum_{i=1}^n \frac{(q_{iM} - q_{im})}{(q_{iM} - q_i)(q_i - q_{im})}$
CHAN et R.V. DUBEY (1995)	$H(q) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4} \frac{(q_{iM} - q_{im})^2}{(q_{iM} - q_i)(q_i - q_{im})}$
Huatao ZHANG, Yunyi JIA et XI (2012)	$H(q) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{1}{q_i - q_{min}} \right)^2 + \left(\frac{1}{q_i - q_{max}} \right)^2 \right]$

TABLE 2.1 – Tableau récapitulatif des approches de coordination en couplage externe

annexe H avec l'appui de plusieurs expérimentations.

Cependant, ces différents auteurs font également le constat commun que la mesure ne prend pas en compte la différence de vitesse maximum des actionneurs du système. Pour résoudre cela, ils proposent une normalisation du vecteur de commande $u = (v, \omega, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_{m_a})^t$ YAMAMOTO et Xiaoping YUN (1996); YAMAMOTO et Xiaoping YUN (1999); GARDNER et Steven A. VELINSKY (2000); B. BAYLE, J. -Y. FOURQUET et M. RENAUD (2003a); NAIT-CHABANE (2006), telle que :

$$u = \left(\frac{v}{v_{max}}, \frac{\omega}{\omega_{max}}, \frac{\dot{q}_1}{\dot{q}_{1_{max}}}, \frac{\dot{q}_2}{\dot{q}_{2_{max}}}, \dots, \frac{\dot{q}_n}{\dot{q}_{n_{max}}} \right)^t. \quad (2.10)$$

Cette normalisation permet de prendre en compte les limites physiques du manipulateur dans le calcul de la manipulabilité, car elle permet de représenter les vitesses possibles du système dans une sphère centrée de rayon unitaire. De ce fait, les valeurs singulières associées à cette nouvelle jacobienne seront un indicateur plus pertinent des vitesses maximales possibles pour le système en fonction des directions de la tâche.

2.1.2.2 Limite articulaire du manipulateur

Dès la fin des années 70, la question de l'utilisation d'un critère de limite articulaire du manipulateur apparaît dans LIEGEOIS (1977). Ce dernier se sert alors du noyau de la jacobienne du manipulateur pour minimiser un critère $H(q)$ représentant l'éloignement des butées physiques des articulations défini par la fonction suivante :

$$H(q) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_i - a_i}{a_i - q_{iM}} \right)^2. \quad (2.11)$$

Avec $a_i = \frac{q_{iM} + q_{im}}{2}$ le milieu entre les deux limites des butées, n le nombre d'articulations du manipulateur, q_{im} la limite minimum des butées articulaires et q_{iM} la limite des butées maximales des articulations.

Par la suite, d'autres expressions de ce même critère seront introduites dans différents travaux et sont répertoriées dans le tableau Tab.2.1.

Bien que développés dans un premier temps pour les manipulateurs, ces critères, tout comme la manipulabilité, furent néanmoins rapidement intégrés dans les approches de résolution de la redondance des manipulateurs mobiles, en tant que critère de sécurité pour ne pas endommager le manipulateur.

2.1.2.3 Position dans l'espace de travail

Dans le peu de travaux ne faisant pas état de la manipulabilité, la notion de position de l'effecteur dans son espace de travail est utilisée. Cette dernière ne cherche pas à amener le manipulateur dans une position "confortable" en évitant les singularités, mais à le garder dans une zone bien définie autour de lui. Cela a l'avantage de pouvoir bloquer des zones qui lui serait normalement accessibles (exemple : éviter de rentrer dans la table sur laquelle il est accroché) mais n'empêche pas les singularités présentes dans son espace de travail d'apparaître (exemple :

alignement des axes).

Dans le domaine des manipulateurs mobiles, les premiers travaux exploitant ce critère à la place de la manipulabilité furent présentés dans M. EGERSTEDT et Xiaoming HU (2000); OGREN, N. EGERSTEDT et X. HU (2000); OGREN, PETERSSON et al. (2000). L'espace de travail du manipulateur mobile est alors considéré comme une sphère de rayon $R_{3D_{max}}$ évidée au centre d'une sphère de rayon $R_{3D_{min}}$, centrée sur la base du bras. Le contrôle du bras est ensuite effectué dans le plan XY où l'espace de travail est limité par deux cercles concentriques dont le rayon dépend de la hauteur de l'effecteur :

$$R_{2D_{max}} = \sqrt{R_{3D_{max}}^2 - (z_e - h)^2}. \quad (2.12)$$

$$R_{2D_{min}} = \sqrt{(z_e - h)^2 - R_{3D_{min}}^2}. \quad (2.13)$$

Avec h la hauteur de la base du bras par rapport au sol et z_e la hauteur de l'effecteur.

L'objectif de la coordination du manipulateur mobile étant de maintenir une distance appropriée entre la base du manipulateur et l'effecteur, plusieurs paramètres sont définis tels que :

- R_{min} : Distance effecteur-base minimum
- R_{LA} : Distance basse effecteur-base acceptable
- R_{LG} : Distance basse effecteur-base correcte
- R_{UG} : Distance haute effecteur-base correcte
- R_{UA} : Distance haute effecteur-base acceptable
- R_{max} : Distance effecteur-base maximum

Ces paramètres définissent différents espaces sphériques concentriques. Un profil de vitesse du mobile et du point à suivre sur la trajectoire est ensuite associé à ces espaces.

Ce type de critère a également été utilisé dans DUBOS et al. (2019) afin de pondérer le contrôle du manipulateur. Les coefficients de pondération sont calculés en fonction de la distance entre la pose de l'effecteur et les limites de son espace de travail sur un de ses axes. Dans les travaux présentés, les auteurs ne s'intéressent qu'à l'axe y et définissent la distance avec la limite la plus proche telle que :

$$e_y = \frac{2p_y^d}{|y_{max} - y_{min}|}. \quad (2.14)$$

Avec p_y^d la position désirée de l'effecteur sur l'axe y , y_{max}, y_{min} les limites supérieure et inférieure de l'espace de travail du manipulateur. Le coefficient λ de pondération est ensuite calculé tel que :

$$\lambda = \begin{cases} 0.5(\tanh(\mu\pi(e_y - \eta)) + 1) & \text{si } e_y > 0 \\ 0.5(\tanh(\mu\pi(e_y - \eta)) - 1) & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.15)$$

Avec η et μ des paramètres permettant de régler le profil de pondération.

2.1.2.4 Évitement d'auto-collision

Un autre critère revenant dans la littérature est l'évitement d'auto-collision du système. En premier lieu, cela peut être réglé par l'introduction de limites dans l'espace de travail mais cette méthode peut ne pas être suffisante pour des systèmes plus complexes et des collisions peuvent survenir au sein de l'espace de travail.

Afin d'améliorer cette tâche secondaire, DIETRICH, WIMBOCK, TAUBIG et al. (2011) propose une approche en ajoutant un modèle de collision (polyèdre convexe) à chaque liaison du système. La méthode des champs de potentiels KHATIB (1990) est ensuite appliquée sur chaque polyèdre afin de définir des forces de répulsion et empêcher la collision.

Une autre méthode a été présentée dans la thèse FLECHER et al. (2019) en proposant l'utilisation d'un asservissement visuel prédictif pour éviter l'auto-collision entre les deux manipulateurs d'un même système. Les distances minimales entre chaque liaison des manipulateurs sont alors définies comme des contraintes à respecter par le solveur devant résoudre l'algorithme prédictif.

2.1.2.5 Évitement d'obstacle

Les différents critères étudiés jusqu'à présent étaient induits par les limitations propres du système (singularité des modèles, limitation de l'espace de travail,...) mais d'autres limitations à considérer sont celles induites par l'environnement sur le robot. Dans ce cas, la tâche secondaire la plus étudiée et utilisée est celle de l'évitement d'obstacle, autant dans le domaine des manipulateurs que des mobiles, pour permettre au système de se déplacer en toute sécurité dans l'environnement qui les entoure.

Une première approche pour traiter ce problème est proposée dans V. PILANIA et K. GUPTA (2014), où l'évitement d'obstacles se base sur la génération de trajectoire dans un espace libre via la méthode PRM (Probabilistic roadmap).

Une autre façon de résoudre cette tâche est l'utilisation de méthodes réactives telle que la méthode des champs de potentiels développée dans KHATIB (1990) utilisée dans les travaux DIETRICH, WIMBOCK, ALBU-SCHAFFER et al. (2012); OGREN, PETERSSON et al. (2000); Huatao ZHANG, Yunyi JIA et XI (2012) tandis que d'autres se basent sur des méthodes d'inférences floues NAIT-CHABANE (2006) pour réaliser cette tâche.

2.1.2.6 Stabilité du système

Le dernier critère abordé dans cette liste est également relatif à une influence extérieure : la stabilité. Ce dernier a déjà donné lieu à de nombreuses études dans le cas des robots mobiles pouvant évoluer en milieu naturel. Mais ce problème se pose doublement pour les manipulateurs mobiles car l'adjonction d'un bras au système, selon son placement, son poids, ses mouvements, sa vitesse, sa tâche,... peut être amené à déséquilibrer l'ensemble du système.

Ce sujet sur le maintien de l'intégrité des systèmes a commencé à être étudié rapidement après les premières études de manipulateurs mobiles. Les travaux Q. HUANG, TANIE et SUGANO (2000) s'ouvrent au problème de la stabilité dynamique qui cherche à garantir la stabilité du système en mouvement. Ils s'appuient sur un critère de stabilité défini à partir du ZMP (Zero Moment Point) et d'une marge de stabilité permettant de définir trois zones. La première où l'intégrité du robot est préservée, la seconde où l'effet de perturbations peut induire un déséquilibre et la dernière où le système se renverse. Ce critère permet alors de générer une trajectoire du manipulateur et du mobile pour maintenir l'intégrité de la plateforme. Ce même type de critère de stabilité est également retrouvé dans le cadre de la robotique humanoïde pour le maintien de l'équilibre du système SALINI, PADOIS et BIDAUD (2011).

D'autres travaux PAPADOPOULOS et REY (2000) présentent également une mesure de stabilité pour éviter le retournement du robot. Cette dernière se base sur une interprétation géométrique simple à mettre en œuvre et à calculer partant de l'hypothèse que le robot est en contact permanent avec le sol et qu'il est à vitesse faible (dans ce cas on peut considérer que le poids du robot participe à assurer sa stabilité). Ce critère a l'avantage d'être simple à calculer et peut donc être utilisé pour une application temps réel, mais l'hypothèse qu'il considère interdit au système de se déplacer en environnement trop escarpé.

Un article plus récent T. SONG et al. (2016) propose une méthode pour optimiser la conception du mobile qui s'inclut dans le manipulateur mobile afin d'optimiser la stabilité de retournement par rapport aux forces et aux mouvements engendrés par les mouvements du bras. L'optimisation est formulée selon un problème de type min-max et veut maximiser le ratio région stable/espace de travail tout en minimisant le moment de retournement. Pour cela, il se base sur le critère de stabilité du moment de retournement TOM (Tip-over moment). Ce dernier se différencie des autres critères de stabilité dans le sens où il représente directement la valeur du moment qui rend le système instable contrairement aux autres qui représentent un indicateur de stabilité.

Dans cette continuité, les travaux présentés dans S. GUO et al. (2017) réutilisent le critère de stabilité TOM, afin de garantir la stabilité du système lors de la réalisation de sa tâche par la prise en compte des forces de gravité (statique), de la vitesse du manipulateur (cinématique) et les accélérations de ce dernier (dynamique) sous l'hypothèse d'un système complètement rigide, d'un sol plan et d'une influence négligeable du manipulateur sur le mobile.

2.1.3 Conclusion sur la notion de tâche

Cette première partie de l'état de l'art a permis de faire un tour d'horizon des diverses tâches usuellement mises en œuvre dans la littérature scientifique.

Concernant les travaux présentés par la suite, la tâche principale sera préférée comme une tâche de suivi de trajectoire, car il s'agit typiquement du genre de tâche pouvant se retrouver dans un cadre applicatif lié au monde agricole tel que le suivi de ligne de semis ou de profil de végétation pour la surveillance, le traitement ou la taille. Bien que les tâches telles que le désherbage ou la récolte peuvent s'apparenter à une tâche de stabilisation en un point, elles peuvent être tout autant réalisées par un suivi de trajectoire amenant le système jusqu'au point d'intérêt final. Ainsi, pour des raisons de simplicité, seule cette tâche principale sera étudiée.

Concernant les tâches secondaires, plusieurs d'entre elles seront abordées au fil du mémoire et selon les expérimentations et tâches à mener. Cependant, les tâches de maintien de manipulabilité et de limite articulaire seront constamment utilisées afin de garantir l'intégrité du manipulateur⁴.

2.2 Classification des approches de coordination d'un manipulateur mobile

Cette partie s'intéresse aux approches de couplage des différents sous-systèmes ayant été mis en œuvre dans les différents travaux de la littérature, ainsi qu'à leurs intérêts et inconvénients. Ces couplages sont une notion importante des manipulateurs mobiles, car ils sont la base de leur commande, modélisation et des approches de coordination pouvant être mises en œuvre.

Cependant, au vu des recherches effectuées et malgré de rares bilans de l'état de l'art Bernard BAYLE, Jean-Yves FOURQUET et Marc RENAUD (2001); BOSTELMAN, HONG et MARVEL (2016), dont SIVČEV et al. (2018) consacré exclusivement à la manipulation mobile sous-marine et un livre associé à ces recherches Z. LI et GE (2013b), il n'existe pas encore de classification détaillée permettant de synthétiser les approches et les principes de coordination de manipulateurs mobiles présentés au cours de ces années. Ainsi, cette seconde partie de l'état de l'art propose une telle classification en se basant sur le degré de couplage des différents sous-systèmes le composant (Voir Fig.2.1).

De fait, au vu de l'ensemble des travaux qui ont été réalisés dans la littérature scientifique et recensés ici, classifier les approches de coordination selon le niveau de couplage des sous-systèmes du manipulateur mobile semble pertinent, car il apparaît que cette interaction est le point crucial de leur commande et modélisation.

Cette classification reprend les premiers principes de catégorisation présentés dans U. NASSAL, DAMM et LUETH (1994) qui divisent le degré de couplage en trois catégories simples. Ces dernières sont ici détaillées et complétées pour obtenir une classification à six degrés de couplage permettant de balayer l'ensemble des approches existantes.

2.2.1 Les systèmes holonomes

Le premier des couplages étudié s'intéresse aux systèmes dit holonomes. Il est entendu par système holonome, un manipulateur mobile dont aucune des différentes parties ne comprend de contraintes non-holonome⁵ (Voir Annexe.D.3). Dans la classification proposée, le système holonome est placé comme étant celui possédant le meilleur couplage entre ses différentes parties. Ceci est justifié par le fait que toutes les commandes abordant un manipulateur mobile holonome peuvent être ramenées comme une commande d'un système unique sans en considérer les sous-parties. Comme indiqué dans SERAJI (1998), dans le cas d'un mobile holonome, il est possible de considérer la base mobile comme un ajout de degrés de liberté supplémentaires au manipulateur. Le système se présente alors

4. Concernant ce dernier point, le critère d'évitement d'auto collision aurait dû figurer dans la liste mais par manque de temps, il n'a pas pu être implémenté et ne figure par conséquent pas dans ces travaux. A la place, des restrictions basiques sur les limites minimales et maximales du manipulateur ont été ajoutées et permettent d'éviter que le manipulateur ne rentre dans le mobile. Cette approche bien qu'imparfaite et grossière s'avère suffisante pour mener à bien l'ensemble des résultats présentés ici. L'ajout de ce critère fera donc partie des perspectives de ces travaux de thèse.

5. Qui d'un point de vue physique ne peut pas évoluer instantanément dans toutes les directions de son vecteur d'état.

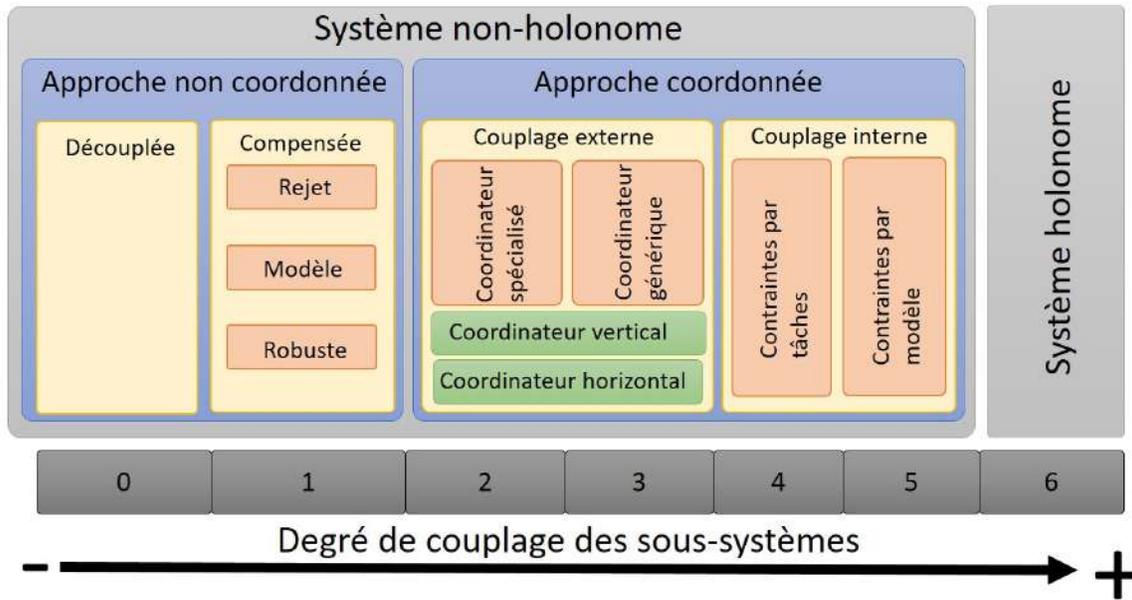


FIGURE 2.1 – Schéma de classification des approches de coordination des manipulateurs mobiles

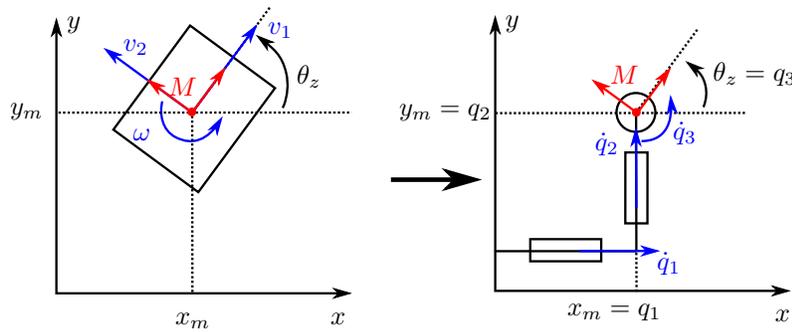


FIGURE 2.2 – Principe de modélisation d'une plateforme mobile en considérant un ensemble de liaisons rotoïdes et prismatiques. $(v_1 \ v_2 \ \omega)^t$ est le vecteur vitesse du mobile dans son repère propre. $(\dot{q}_1 \ \dot{q}_2 \ \dot{q}_3)^t$ est le vecteur vitesse articulaire équivalent tel que $\dot{q}_1 = v_1 \cos(\theta) - v_2 \sin(\theta)$, $\dot{q}_2 = v_1 \sin(\theta) + v_2 \cos(\theta)$ et $\dot{q}_3 = \omega$.

comme un manipulateur auquel deux articulations prismatiques et une articulation rotoïde ont été ajoutées (Voir Fig.2.2).

Les travaux présentés dans SERAJI (1998) proposent une modélisation cinématique des manipulateurs mobiles holonomes selon le même paradigme que les manipulateurs classiques de la manière suivante :

$$\dot{p} = \begin{pmatrix} J_a & J_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_a \\ \dot{q}_m \end{pmatrix} = J\dot{q}. \tag{2.16}$$

J_a représente la jacobienne du bras, J_m la jacobienne du mobile, \dot{p} la tâche principale, \dot{q}_a le vecteur de commande du manipulateur et \dot{q}_m le vecteur de commande du mobile.

De plus, en considérant la base mobile comme une simple extension du manipulateur, l'ensemble des travaux qui ont été développés dans le domaine des manipulateurs robotiques : commande, résolution de la redondance, évaluation des singularités,... peuvent être directement utilisés avec ce type de modélisation.

Une étude leur est dédiée dans OGREN, N. EGERSTEDT et X. HU (2000) ; OGREN, PETERSSON et al. (2000) où une approche de suivi de trajectoire est développée. Dans ces travaux, les mouvements des sous-systèmes sont pondérés l'un par rapport à l'autre, par un facteur de coordination C qui arrête le manipulateur si l'effecteur est trop loin de l'objectif et le maximise s'il est proche. Au contraire, loin de l'objectif, le mouvement de la base est

maximisé et devient nul lorsque ce dernier se rapproche. Ces travaux présentent également un système d'arbitrage qui permet de modifier le mouvement de la base mobile en présence d'obstacles afin d'en assurer l'évitement (basé sur la méthode des champs de potentiels KHATIB (1990)).

Une modélisation dynamique des manipulateurs mobiles holonomes peut être trouvée dans J. TAN et XI (2001) ainsi que dans les travaux C. LI et al. (2021) utilisant un bras possédant une cinématique de parallélogramme.

D'autres travaux AVANZINI, ZANCHETTIN et ROCCO (2015) proposant un contrôle prédictif permettant la prise en compte des obstacles ainsi que des contraintes d'inégalités cinématiques du système, ont été proposés dans le cadre des manipulateurs mobiles holonomes sous la forme d'un problème QP. De plus, le système intègre dans son contrôleur prédictif, une approche par champ de potentiel LACEVIC et ROCCO (2010) permettant de réaliser une navigation réactive, au sein d'un environnement inconnu, en évitant les obstacles. Dans ce même but, LOGOTHETIS et al. (2018) utilise des contrôleurs prédictifs visuels pour se déplacer dans un environnement encombré et saisir des objets.

Finalement, l'étude des manipulateurs mobiles holonomes en terme de coordination est assez limitée, due à leur facilité de modélisation en un système unique. Cependant, ils ont largement servi de base de travail pour la simulation et l'expérimentation des approches de résolution de la redondance, qui seront abordées dans la prochaine section de ce chapitre (voir Sec.2.3).

2.2.2 Les systèmes non-holonomes

Dans le cas contraire, un manipulateur mobile non-holonyme est un système qui possède au moins une contrainte non-holonyme dans l'une de ses sous-parties. Ce cas de figure le plus souvent rencontré concerne les systèmes avec une base mobile non-holonyme et des manipulateurs holonomes.

Les configurations où le manipulateur est lui aussi non-holonyme sont plus rares et peu de travaux ont été réalisés sur le sujet TCHON, J. JAKUBIAK et ZADARNOWSKA (2004). Dans ces derniers, le concept d'ellipsoïde de manipulabilité et l'inversion du modèle sont étudiés pour ce cas particulier.

Pour ces manipulateurs mobiles non-holonomes, cette contrainte impose une approche de commande plus difficile à mettre en place. Du fait de cette contrainte, le théorème de Brockett BROCKETT (1983) interdit l'utilisation du retour d'état statique pour la stabilisation en un point. Ainsi, les approches de commande par retour d'état et les méthodes de résolution de la redondance développées à partir de jacobiennes, utilisées pour les manipulateurs, tombent en défaut.

Ainsi, une importante partie des travaux concernant ce domaine s'attache à développer des méthodes de commande de ces systèmes malgré la présence de cette contrainte. Il est alors possible de classer ces approches de commande en trois catégories : les approches non coordonnées, les approches coordonnées par couplage externe et les approches coordonnées par couplage interne .

2.2.2.1 Les approches non coordonnées

On définit les approches non coordonnées comme les approches où les objectifs de commandes des sous-systèmes sont indépendants les uns des autres. Dans un tel cas, on considère que le mouvement de l'ensemble n'est pas coordonné, car il ne représente pas un mouvement global cohérent mais des mouvements indépendants sans conscience les uns des autres même si, vu de l'extérieur, les mouvements semblent simultanés. Ces approches peuvent elles-mêmes se diviser en deux catégories : les approches découplées ou compensées.

2.2.2.1.a Les approches découplées

La première des approches non coordonnées est l'approche découplée. Cette dernière est la plus simple à mettre en œuvre, mais également la moins performante. Elle ne possède pas de couplage entre chaque sous-système et n'autorise pas leurs déplacements simultanés. Il s'agit de contrôler, de façon distincte, les différents sous-systèmes du manipulateur mobile, sans prise en compte de l'état des autres. Par conséquent, les sous-systèmes ne peuvent bouger simultanément ensemble et le comportement complet du robot est une succession de mouvements séquentiels de ses différentes parties. Du fait de sa grande simplicité, cette approche de commande est actuellement la plus

répandue dans les robots commerciaux présentés en introduction (Voir Sec.1.3.2).

Ce type de méthode est proposé dans SHIN et al. (2003) en justifiant l'intérêt de cette approche par le fait qu'elle permet une réalisation précise de la tâche, débarrassée de toutes les perturbations et imprécisions causées par le mouvement du mobile, malgré le temps supplémentaire d'exécution. Dans ces travaux, une trajectoire de référence donnée pour l'effecteur est coupée en segments, chacun d'entre eux associé à une position particulière du mobile, à laquelle il devra se placer avant que l'effecteur réalise le suivi de ce segment et que le mobile ne se repositionne à la position suivante. Ces positions sont définies par une planification visant à limiter le nombre de positions tout en maximisant la manipulabilité du manipulateur.

D'autres travaux basés sur la génération de trajectoires stochastiques (par PRM), adaptées à des environnements statiques ou dynamiques et connus ou incertains, optent également pour ce type de commande V. PILANIA et K. GUPTA (2014); Vinay PILANIA et Kamal GUPTA (2015a); Vinay PILANIA et Kamal GUPTA (2018).

Il est également possible de trouver un comparatif d'une approche découplée et d'une approche coordonnée dans RAM, PATHAK et JUNCO (2019) qui propose une modélisation dynamique par une approche en graphe de relation, et un contrôleur destiné à limiter les perturbations de la base mobile. Un autre exemple est donné dans Ying WANG, LANG et SILVA CLARENCE (2010) qui montre une plateforme permettant la saisie d'un objet où la base mobile est pilotée par un contrôleur visuel prédictif.

Cependant, cette approche de commande possède de nombreux désavantages. De fait, si le système possède un nombre de degrés de liberté important, l'impossibilité de bouger simultanément plusieurs sous-systèmes, empêche une optimisation des degrés de redondance globale du système. A la place, l'optimisation se limite aux degrés de redondance propres à chacun des sous-systèmes s'ils en possèdent. Cela impose alors des temps de réalisation plus longs et une efficacité moins haute, même si cela permet de ne pas soumettre l'effecteur aux perturbations du mobile. Par ailleurs, pour obtenir le même mouvement, la structure du manipulateur doit être plus complexe pour posséder plus de liberté de mouvement, car il ne profite pas des degrés de redondance offerts par le mobile. Cette complexité en augmente les coûts tout en diminuant sa fiabilité.

2.2.2.1.b Les approches compensées

La seconde approche non coordonnée est l'approche compensée. Dans ce cas, les deux systèmes peuvent se déplacer simultanément. Cependant, chaque sous-système cherche à remplir un objectif propre, indépendant des objectifs des autres sous-systèmes. La notion de coordination n'est alors pas envisageable. Le mouvement induit par un sous-système sur un autre est vu comme une perturbation par ce dernier. De fait, les différentes commandes indépendantes chercheront à les compenser pour les réduire au maximum. Donc, même si le couplage de cette approche reste faible, il est néanmoins présent. De fait, ce premier niveau de coordination permet de synchroniser des mouvements de plusieurs sous-systèmes tout en compensant les perturbations des uns sur les autres, répondant au problème pointé dans SHIN et al. (2003).

Ce type d'approche est aujourd'hui fortement utilisé par les robots de récolte commercialisés. Pour ce faire, ces derniers se basent sur une commande référencée capteur et ciblent leurs objectifs en venant compenser la vitesse d'avance, lente, de la partie mobile qui est pilotée par un conducteur.

Cependant, à la manière des approches découplées, il est également impossible d'utiliser la redondance totale du système à cause de cette indépendance des sous-systèmes. En outre, les capacités des systèmes restent très limitées, car ils ne peuvent agir qu'en réaction aux autres, ce qui implique que la précision de réalisation de la tâche sera d'autant plus faible que les perturbations seront importantes.

Ce type de couplage est notamment utilisé dans le cas où une trajectoire est affectée à chaque sous-système par un planificateur⁶. Dans ce cas de figure chaque sous-système est contraint à suivre une trajectoire préalablement construite pour répondre à l'ensemble des contraintes qu'impose la coordination.

Les commandes utilisant ce genre de couplage, usent généralement de méthodes de commande robustes comme la commande par mode glissant ou la commande H_∞ ou encore sur l'estimation de perturbation pour venir les

6. Les travaux concernant ce point seront détaillés dans la partie Sec.2.3.2.

compenser au sein de commandes adaptatives. Ces dernières seront davantage détaillées dans la dernière partie de cet état de l'art, (Sec.2.4) consacrée à la navigation en milieu naturel par l'estimation et la compensation des perturbations internes et externes, exercées sur le système. Cependant, une rapide synthèse des approches de compensation est donnée ci dessous :

- 1— Rejet de perturbation : Ce premier cas de figure, limité à des perturbations faibles, ne considère aucune prise en compte de la perturbation dans le modèle des sous-systèmes et la commande doit la rejeter au mieux avec son correcteur. Cependant, cela ne peut fonctionner que pour de faibles perturbations et occasionne des erreurs statiques ou de traînée nécessitant alors l'utilisation de correcteurs de type PID.
- 2— Compensation par modèle : La seconde manière de faire cette compensation est d'intégrer dans les modèles des sous-systèmes, les vitesses des perturbations appliquées dessus. La difficulté suivante réside dans l'estimation de ces vitesses de perturbation :
 - Mesure capteur : Une première manière d'estimer ces perturbations est la mesure par un ou plusieurs capteurs. Toutefois, pour limiter l'instabilité liée aux erreurs de mesure, un filtrage peut être nécessaire, ce qui occasionne un retard dans la mesure.
 - Modèle de perturbation : Dans un cas classique, le recours à un modèle de perturbations est délicat car il est souvent inconnu ou empirique. Or, dans le cas d'un manipulateur mobile, la perturbation d'un sous-système sur un autre est modélisable et peut donc facilement s'intégrer dans le modèle d'un autre sous-système en vue de le compenser. Ce genre d'approche permet d'être plus réactif mais reste soumis aux erreurs du modèle de perturbation. De plus, certaines perturbations ne dépendant pas du modèle (par exemple, angle de roulis et de tangage pour un mobile) restent inconnues et doivent se compenser par une autre méthode. Ce type de compensation a été proposé dans FAREH, KHADRAOUI et al. (2016) ; FAREH, SAAD et al. (2019) qui présente une approche décentralisée avec un contrôleur dynamique pour chaque sous-système, tenant compte des perturbations dynamiques induites par l'interaction de ces derniers.
 - Estimation : Enfin la dernière solution envisageable pour connaître ces perturbations, sont les méthodes d'estimation telles que les observateurs ou les filtres de Kalman. Ce dernier point sera largement détaillé dans la dernière section de ce chapitre Sec.2.4.
- 3— Compensation par approche robuste : Cette dernière méthode utilise des contrôleurs mettant en œuvre des approches robustes dans chacun des sous-systèmes, afin de rejeter les perturbations induites mutuellement les uns sur les autres. Ce type de compensation se retrouve dans PENG, J. YU et J. WANG (2014) utilisant la théorie de Lyapunov pour développer une approche robuste adaptative. Le côté adaptatif de la méthode estime les bornes des perturbations compensant ainsi le défaut des approches robustes sur la nécessité de connaître la limite des perturbations auxquelles est soumis le système.

Enfin, il est important de noter que même si ces approches peuvent se suffire à elle mêmes, ces différentes variantes sont majoritairement employées conjointement avec des approches coordonnées afin d'en améliorer la précision et la performance.

2.2.2.2 Les approches coordonnées en couplage externe

Au contraire des approches non coordonnées, les approches coordonnées se distinguent par leur capacité à organiser les objectifs de commande de chaque sous-système, les rendant interdépendants. Ces dernières sont plus complexes à mettre en place que les précédentes, mais elles sont nécessaires dès que l'on aborde des tâches difficiles qui ne peuvent être décomposées en sous-tâches, ce qui nécessite alors une véritable coordination de l'ensemble FOULON, J. -Yves FOURQUET et Marc RENAUD (1999).

Le couplage externe est la première approche permettant de créer une coordination entre les sous-systèmes du manipulateur mobile. Pour réaliser ce couplage, cette approche utilise les modèles et commandes de chaque sous-système et cherche à réaliser un couplage entre les objectifs des sous-systèmes du manipulateur mobile. Ce genre d'approche à l'avantage de permettre une coordination tout en utilisant des modèles et des commandes déjà définis dans la littérature et qui ont pu être testés et éprouvés.

Cependant, posséder des modèles et commandes indépendants empêche l'utilisation de l'ensemble des degrés de redondance dans la résolution de tâches secondaires. Pour pallier à cela, la présence d'un coordinateur pour gérer les commandes des sous-systèmes est nécessaire. Ce dernier aura la charge de coordonner les différents objectifs des commandes de chaque sous-système. Ce coordinateur ayant la connaissance complète du système, il est alors capable d'utiliser l'ensemble des degrés de redondance du manipulateur mobile, à travers les objectifs de commande qu'il communique aux sous-systèmes, afin de créer un mouvement d'ensemble cohérent.

Très tôt, l'intérêt de ce couplage pour s'adapter aux différentes structures de systèmes a été prouvé. De fait, les travaux de Uwe M NASSAL (1996) démontrent que l'utilisation de ce genre de couplage (appelé alors coordination transparente) permet d'adapter facilement de multiples manipulateurs sur une base mobile holonome, tout en ajustant facilement différentes contraintes de tâches, au sein d'un coordinateur.

Par définition, le coordinateur représente l'objet faisant le lien entre les différents sous-systèmes. Selon sa nature, il peut être de deux types différents possédant deux couplages distincts.

2.2.2.2.a Type de coordinateurs

2.2.2.2.a.a Coordinateur vertical / hiérarchique

Les premiers types de coordinateurs sont dis verticaux car ils impliquent une hiérarchie entre les objectifs des sous-systèmes. De fait, ils sont souvent utilisés dans un paradigme où l'un des sous-systèmes (généralement le bras) impose le mouvement aux autres en toutes situations. Dans ce cas de figure, les systèmes les plus hauts dans la hiérarchie n'ont conscience que de leur propre objectif, alors que les systèmes les plus bas doivent adapter leurs objectifs à la réalisation de celui du système supérieur. Ce type de coordinateur peut alors s'exprimer comme une variation de l'objectif de commande du sous-système de plus bas niveau ou comme une contrainte au sein de sa commande.

L'exemple le plus simple de ce genre de coordinateur a été donné dans NAGATANI et YUTA (1996) qui propose l'un des premiers travaux sur la coordination des manipulateurs mobiles à savoir l'ouverture de porte par une approche composée d'un ensemble de comportements unitaires. Le comportement s'occupant de l'ouverture de la porte propose la définition de deux objectifs de position pour l'effecteur et le mobile en correspondance l'un avec l'autre. Cette correspondance apparaît à travers une fonction (2.17) permettant de faire varier la position du mobile selon la position de l'effecteur.

$$x = a \sin(\alpha) \quad (2.17)$$

Ici x représente la distance du mobile à la porte, a est la distance entre le point d'arrivée et le point de départ et α l'angle d'ouverture de la porte.

Dans YAMAMOTO et X. YUN (1992), l'utilisation d'un manipulateur plan à deux degrés de liberté permet de déterminer analytiquement sa seule position permettant de maximiser sa manipulabilité. Cette position est alors utilisée pour déterminer la position de l'effecteur dans le repère du mobile (position constante) et servir de référence pour la commande par linéarisation exacte du mobile. De fait, l'objectif du mobile est seulement fonction de la configuration du manipulateur.

Le même type de coordinateur a été mis en place dans J. TAN et XI (2001); J. TAN et XI (2002). Dans le cas d'un suivi de trajectoire, ces travaux proposent la création de deux planificateurs indépendants, agissant sur deux contrôleurs indépendants, étant assujettis à un mouvement de référence commun. Ce dernier est ensuite choisi comme le mouvement de l'effecteur sur sa trajectoire. Les deux planificateurs, liés par ce mouvement de référence commun, proposent alors des trajectoires permettant d'atteindre l'objectif de l'effecteur tout en gardant le système proche d'une configuration désirée. Par ailleurs, se basant sur les modèles dynamiques du système, ces travaux proposent également une commande en force et en position découplée, permettant le contrôle indépendant de la position et de la force sur une direction de la tâche commune, dans le but de réaliser de la manipulation d'objet en le soulevant, le poussant ou le tirant.

Une autre mise en œuvre de coordinateur vertical, peut être trouvée dans FRUCHARD, Pascal MORIN et Claude SAMSON (2006). Ici, le coordinateur prend la forme d'un problème de minimisation dans la commande du mobile sous la forme :

$$\mathcal{P} : \arg \min \{h_s(q_m, t) \mid e_m(q_m, q_a, t) = 0\}. \quad (2.18)$$

Avec h_s la tâche de positionnement du mobile, e_m la tâche de manipulation du bras, q_m et q_a la configuration respective du mobile et du manipulateur. Un tel problème peut être énoncé par le fait que bien souvent, c'est la précision de position du manipulateur qui est recherchée et non celle du mobile. De fait, même si le mobile ne converge pas parfaitement, le manipulateur pourra compenser cette petite erreur et réussir sa tâche. Dans les travaux présentés, le mobile déplace le manipulateur afin qu'il puisse réaliser sa tâche sans interruption, tout en restant dans sa zone de travail.

Plus récemment, VARGA, SHAHIRPOUR et al. (2019) a proposé une telle structure de coordinateur par l'intermédiaire d'une commande MPC (Model predictive controller) du mobile. Dans ces travaux, un opérateur humain contrôle le manipulateur pour le déplacer le long d'une trajectoire. Selon les commandes de l'opérateur envoyées au manipulateur, le MPC adapte la position de la base mobile pour minimiser l'erreur produite.

Une version du couplage externe a été présentée dans Abdelkrim BRAHMI et al. (2013) et consiste à diviser le robot à n degrés de liberté en n sous-systèmes par le principe de l'approche par décomposition virtuelle (VDA). L'idée derrière cette approche est de casser le système en n parties et de les relier entre elles en formant un graphe en chaîne ouverte. Ainsi, chaque degré de liberté possède son propre contrôleur. Cela simplifie les choses car ce contrôleur ne nécessite que les paramètres dynamiques du corps rigide attaché au sous-système et de son articulation, contrairement à un contrôleur classique dont la complexité d'obtention des paramètres dynamiques est croissante avec le nombre de degrés de liberté. Ce principe a été appliqué au cas du manipulateur mobile dans Abdelkrim BRAHMI et al. (2016) ; BRAHMI et al. (2016) puis aux systèmes multi-manipulateurs mobiles dans Abdelkrim BRAHMI et al. (2019)

2.2.2.2.a.b Coordinateur horizontal

Au contraire, les coordinateurs horizontaux organisent simultanément les objectifs et priorisent les objectifs en fonction des contraintes de la tâche en cours. Les premiers travaux posant plus formellement ce concept de coordinateur horizontal se trouvent dans Jae H. CHUNG, Steven A. VELINSKY et HESS (1998) ; J. H. CHUNG et S. A. VELINSKY (1998) par l'intermédiaire d'un schéma de commande et de modélisation dynamique, en décomposant les deux sous-systèmes ayant chacun leur propre contrôleur. Au dessus de ces contrôleurs, se trouve un étage dédié à la résolution de la redondance du robot. Ici, les objectifs des sous-systèmes sont interdépendants au travers de la résolution de la redondance offerte par le coordinateur, que les auteurs nomment "*contrôleur d'interaction*". Dans ce cas, le contrôleur d'interaction est composé d'un contrôleur par linéarisation exacte pour le mobile et d'une commande robuste et adaptative pour le manipulateur.

Ce type de coordinateur se retrouve également dans VARGA, MEIER et al. (2019) en se basant sur une approche double trajectoire (M. MASHALI, R. ALQASEMI et R. DUBEY (2014)) et proposant un coordinateur MPC permettant de minimiser une fonction de coût dont les paramètres sont ajustables afin de faire varier les objectifs à prioriser.

2.2.2.2.b Couplages des coordinateurs

Un second aspect des différents coordinateurs présents dans la littérature est le degré de couplage qu'ils proposent pour la coordination.

2.2.2.2.b.a Coordinateurs spécialisés

La première catégorie de ces couplages de coordinateur est représentée par les coordinateurs spécialisés. Cette dernière se focalise sur l'utilisation d'une commande spécifique par sous-système, autour d'un coordinateur créé particulièrement pour un type de commande et une structure de robot précis. De manière générale, le coordinateur est très simple car, adapté à un cas particulier. Très souvent, les coordinateurs spécialisés sont également hiérarchiques.

Ce type de contrôleur se retrouve dans FRUCHARD, Pascal MORIN et Claude SAMSON (2006) qui utilise le principe des fonctions transverses P. MORIN et C. SAMSON (2003) ; ARTUS (2005) comme commande du mobile pour stabiliser la posture d'un manipulateur mobile en un point. Ces fonctions permettent le passage d'un repère non holonome, lié à un robot mobile, à un repère « *compagnon* » holonome, utilisé pour le contrôler. Les deux repères sont liés et positionnés à une certaine distance ε l'un de l'autre, dépendants du type de fonction transverse utilisée et pouvant amener le mobile à effectuer plus ou moins de manœuvres. L'idée d'une telle approche est de contrôler le repère holonome plutôt que le repère classique qui, par l'utilisation des fonctions transverses, est garanti de limiter son erreur à une distance inférieure à ε . Cependant, l'utilisation des fonctions transverses cause l'apparition d'oscillations plus ou moins rapides et d'amplitude importante en fonction de l'écart ε admis par le système.

Les auteurs de M. EGERSTEDT et Xiaoming HU (2000) proposent également ce type d'approche basée sur l'utilisation de deux trajectoires et de la méthode des véhicules virtuels M. EGERSTEDT, X. HU et A. STOTSKY (1998) où ils suivent individuellement des points de référence (assimilés à un véhicule virtuel) sur leurs trajectoires respectives. Ces points évoluent de façon à garantir que le manipulateur reste dans sa zone de travail "confortable". Pour définir cette zone, ces travaux ne prennent pas en compte de la manipulabilité du système, mais la limite à un espace de travail défini par des sphères. Les commandes du manipulateur et de la base unicycle sont réalisées par de simples contrôles proportionnels sans modèle.

2.2.2.2.b.b Coordinateurs génériques

La seconde catégorie des couplages de coordinateurs est celle des coordinateurs génériques. Dans ce cas, la construction de l'étage de coordination est focalisée sur une seule commande générique. De fait, la coordination au sein de cet étage est réalisée de la même façon que si le système était holonome. Sous cette hypothèse, les sous-systèmes sont considérés comme génériques car leurs objectifs sont calculés sans la prise en compte de leur mobilité particulière. Ceci facilite ainsi la résolution de la redondance qui peut se baser sur les approches des systèmes holonomes. L'atteinte de ces objectifs est laissée à des contrôleurs spécifiques aux sous-systèmes (indépendants des autres) réalisés dans ce but, qui se chargent de prendre en compte les spécificités de leurs sous-systèmes. Contrairement aux coordinateurs spécialisés, le coordinateur générique ne s'occupe que de l'objectif final et non pas de la manière à adopter pour l'atteindre.

Les travaux ANCONA (2017) présentent très bien le concept de ces approches et pointent du doigt la généralité que l'on peut trouver au sein d'un tel concept. Ils présentent une méthode où le modèle géométrique du système est complété par un ensemble de paramètres de redondance, destinés à contraindre totalement le système tels que, la limite de l'extension du bras, de l'angle entre le mobile et le bras et de l'angle entre l'effecteur et la base du bras. Le modèle est ensuite inversé numériquement par un algorithme du simplexe avec trois fonctions objectifs : la manipulabilité, pondérée par un terme qui pénalise les configurations trop proches des limites articulaires, l'évitement d'obstacles et le déplacement minimal de la base mobile. Cependant, l'article n'aborde pas la commande des sous-parties et se borne à l'optimisation des coordonnées généralisées du robot. Ainsi, les simulations de tâches complexes sont réalisées par un système holonome et celles sur d'autres plateformes restent trop simplistes pour donner une idée de la performance de l'approche.

Une autre approche de commande générique est proposée dans SOROUR, CHERUBINI et FRAISSE (2019). Cette dernière est développée pour coordonner un manipulateur mobile possédant une plateforme à roues directrices. Les auteurs introduisent également dans la commande du robot un facteur de pondération dépendant de la distance à l'objectif du manipulateur. Une seconde tâche impose au bras à se mettre dans une position donnée par l'utilisateur, à la manière d'une position de repos. Cette tâche est activée ou désactivée par ce facteur. Ainsi, si le bras est loin de l'objectif, il reste dans cette position et lorsqu'il se rapproche, il entre en mouvement. De plus, lorsque l'objectif est proche, la base diminue ses mouvements pour garantir la précision de manipulation.

2.2.2.3 Les approches coordonnées en couplage interne

Finalement, la dernière des approches coordonnées est l'approche en couplage interne. Dans ce cas, le système dans son ensemble est modélisé par un unique modèle et commandé par une seule loi de commande. A la différence des coordinateurs génériques du couplage externe, le couplage interne n'utilise pas une modélisation générique, provenant d'un modèle holonome, mais repose sur un modèle et une commande unique qui prend directement en compte les spécificités de mobilité de chacune des sous-parties. On parle alors de couplage interne car dans ces

approches, la coordination prend place directement au sein de la commande, unique, du robot.

L'utilisation d'une modélisation unique permet de résoudre la haute redondance du manipulateur mobile de façon similaire au système holonome sans avoir à créer de contrôleur spécifique ensuite. Cependant, sa principale difficulté est sa modélisation, plus complexe à mettre en place que pour les approches vues précédemment. Les méthodes de couplage interne se divisent elles-mêmes en deux sous-catégories différenciées par leur manière de prendre en compte la non-holonomie de la base mobile.

2.2.2.3.a Les approches en contrainte non-holonome en tâche

La première façon de réaliser un couplage interne est d'utiliser une approche en contrainte non-holonome par tâche. Ce point de vue a été initié par SERAJI (1998) et fut la première manière d'opérer un couplage interne. Elle consiste à réaliser une modélisation et une commande générique, en considérant le système holonome, puis ajouter une tâche secondaire devant garantir le respect de la contrainte de non-holonomie. En utilisant le formalisme de la Jacobienne étendue initialement proposé, cette nouvelle tâche s'exprime comme :

$$(0_{1 \times n_a} \sin(\theta_m) - \cos(\theta_m) l) \begin{pmatrix} \dot{q}_a \\ \dot{x}_m \\ \dot{y}_m \\ \dot{\theta}_m \end{pmatrix} = 0 \Rightarrow J_c \dot{q} = 0. \quad (2.19)$$

Où \dot{q}_a est le vecteur vitesse généralisé du manipulateur, n_a sa dimension, l la distance sur l'axe d'avance du mobile entre le point de contrôle et le centre du robot, $(x_m \ y_m \ \theta_m)$ la posture du mobile et \dot{q} le vecteur vitesse généralisé du manipulateur mobile. Le modèle obtenu est donné tel que :

$$\begin{pmatrix} \dot{p} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J \\ J_c \end{pmatrix} \dot{q}. \quad (2.20)$$

Avec J la jacobienne associée à la tâche principale \dot{p} du système et J_c la Jacobienne associée à la contrainte de non-holonomie de la base mobile.

Les travaux suivants Jean-Yves FOURQUET et Marc RENAUD (2000) utilisent cette approche afin de comparer les performances de l'utilisation de la méthode de la jacobienne étendue et de l'utilisation de la pseudo inverse pondérée afin d'ajouter une tâche supplémentaire au manipulateur mobile.

En utilisant cette approche, la contrainte de roulement sans glissement est considérée comme étant une tâche à accomplir par le système au même titre qu'une autre. Or, le principal défaut de cette méthode apparaît lorsque la jacobienne du système est sur-contrainte, dans ce cas, son inversion imposera un compromis entre toutes les tâches et ne pourra imposer de zéro strict sur la tâche de non-holonomie. La contrainte ne sera alors plus respectée ce qui induira des erreurs dans la commande finale.

De plus, si le mobile est soumis à des glissements, à cause de la nature du terrain, l'approche est mise en défaut car la contrainte est violée. Pour répondre à cette dernière difficulté, SERAJI (1998) propose de prendre en compte le glissement dans la tâche à réaliser en exprimant la tâche de roulement sans glissement telle que :

$$J_c \dot{q} = \varepsilon. \quad (2.21)$$

Avec ε la valeur mesurée ou l'estimée du taux de glissement du mobile. De cette manière, la contrainte continue d'être satisfaite. Cette idée a par la suite été reprise et mise en œuvre par K. LEE et al. (2017) avec la mesure du glissement due à la dynamique de l'environnement. De plus, ces travaux proposent une méthode de filtrage des vitesses violant la contrainte, notamment lors de l'utilisation d'une pseudo inverse amortie sur la commande générique permettant ainsi de garantir que la contrainte sera toujours strictement remplie.

2.2.2.3.b Les approches en contrainte non-holonome par modèle

La seconde façon de mettre en place un couplage interne consiste à introduire directement la contrainte de non-holonomie au sein du modèle global. Ces approches sont apparues dans les travaux B. BAYLE, J. FOURQUET, F. LAMIRAUX et al. (2002) pour répondre aux problématiques posées par les approches en contrainte non-holonome

par tâche, et ont largement été étudiées et utilisées par la suite. De fait, même si l'intégration de telles contraintes complexifie le modèle global, cela garantit que la contrainte de non-holonomie ne sera jamais violée. De plus, une fois le modèle obtenu, la commande et la résolution de la redondance utilisent les mêmes approches que pour les systèmes holonomes.

Partant de ce constat, B. BAYLE, J. FOURQUET et M. RENAUD (2003) propose des travaux théoriques sur la modélisation cinématique des manipulateurs mobiles à roues selon un modèle unifié. Ce dernier est applicable à toutes les classes de robots mobiles et se veut systématique. De plus, il offre une extension des notions de non-holonomie, mobilité et manoeuvrabilité CAMPION, BASTIN et D'ANDREA-NOVEL (1993) appliquées au cas des manipulateurs mobiles. Cependant, le cas du contrôle des bases mobiles à roues orientables n'est pas complètement résolu.

Cette modélisation considère le modèle en posture du mobile :

$$\dot{q}_m = B_m(q_m)u_m. \quad (2.22)$$

Avec la matrice B_m qui représente la contrainte de roulement sans glissement du mobile, $u_m = (v_x, \omega_z)$ le vecteur de commande du mobile et \dot{q}_m la vitesse des coordonnées généralisées $q_m = (x_m \ y_m \ \theta)^t$ du mobile.

De plus, le manipulateur ne possédant pas de contrainte non-holonyme⁷, ses vitesses généralisées sont directement commandables, d'où :

$$\dot{q}_a = u_a. \quad (2.23)$$

Avec u_a le vecteur de commande du manipulateur et \dot{q}_a la vitesse de ses coordonnées généralisées.

Il est ensuite possible de définir un vecteur opérationnel p comme étant les coordonnées de l'effecteur dans un repère quelconque à travers un modèle géométrique $p = \phi(q_m, q_a)$, tel que :

$$\begin{aligned} \dot{p} &= \frac{\partial \phi}{\partial q_m} \dot{q}_m + \frac{\partial \phi}{\partial q_a} \dot{q}_a \\ &= J_m B_m(q_m)u_m + J_a u_a \\ &= J u \end{aligned} \quad (2.24)$$

Avec $u = (u_m \ u_a)$ le vecteur de commande du manipulateur mobile. De cette façon, les vitesses admises par la plateforme sont directement prises en compte par l'équation (2.22) et il n'est pas nécessaire de rajouter une contrainte pour tenir compte de la non-holonomie.

Les mêmes auteurs B. BAYLE, J. FOURQUET et M. RENAUD (2003) proposent ensuite une comparaison des modélisations des manipulateurs, face à cette modélisation unifiée des manipulateurs mobiles et montrent que l'utilisation de cette modélisation permet d'étendre les approches du domaine des manipulateurs au domaine des manipulateurs mobiles B. BAYLE, J.-Y. FOURQUET et M. RENAUD (2003b) (similairement à ce qui avait été fait pour les systèmes holonomes). Ce dernier point est important car il démontre l'une des grandes forces de ces approches : la facilité de commande et de résolution de redondance pour ces systèmes. Ainsi, la suite de ces travaux B. BAYLE, J. FOURQUET, F. LAMIRAUX et al. (2002) étend plusieurs des commandes initialement conçues pour les manipulateurs (addition de tâches et méthodes à noyaux) aux manipulateurs mobiles.

Par ailleurs, comme le montre A. DE LUCA, G. ORIOLO et P. GIORDANO (2006) cette méthode permet de diminuer, voire d'éliminer les singularités qui affectent le manipulateur seul. Un exemple théorique sur un manipulateur mobile planaire est donné sous l'hypothèse que le manipulateur ne se trouve pas au centre du robot. Sous cette condition, il n'existe aucune configuration de singularité pour le système.

Ce type de commande coordonnée a également été mis en œuvre dans NAIT-CHABANE (2006) en se basant sur différentes zones dans l'espace. Une première zone éloignée, où seul le mobile se déplace et dont les vitesses linéaire et angulaire sont pondérées par un système flou, dépendant des distances aux obstacles à droite, à gauche et devant. Une seconde zone proche de l'objectif, où le manipulateur est activé et se déplace conjointement avec la base, loin

7. Dans la plupart des cas d'études classiques, voir TCHON, J. JAKUBIAK et ZADARNOWSKA (2004)

des obstacles ou se déplace seul, proche des obstacles. Ces travaux présentent ainsi trois comportements différents selon la proximité des obstacles et de l'objectif.

Alors que des travaux plus anciens se concentraient uniquement sur le contrôle de l'effecteur via l'optimisation de critères, les travaux M. MASHALI, R. ALQASEMI et R. DUBEY (2014); Mustafa MASHALI, Rdwan ALQASEMI et Rajiv DUBEY (2016) proposent l'utilisation d'un contrôle bi-trajectoire, la première pour le mobile et la seconde pour le manipulateur. Cette idée permet de s'assurer de la position du mobile et de son évolution, ce qui garantit sa capacité à amener le manipulateur à l'emplacement désiré. De plus, elle permet de créer une notion de priorité entre les sous-systèmes du manipulateur mobile et de les alterner si nécessaire. Le contrôleur développé se base sur deux variables (α, D) représentant la position de l'effecteur sur le mobile en coordonnées polaires et doit s'assurer que les deux sous-systèmes suivent leurs trajectoires respectives en maximisant la manipulabilité du manipulateur. Dans le cas où une solution n'est pas trouvée, il autorise une erreur sur la trajectoire de moindre priorité. Une extension de cette paramétrisation est donnée dans Mustafa MASHALI (2015) en introduisant un paramètre d'angle β pour représenter la pose du manipulateur en trois dimensions en coordonnées sphériques. Les travaux suivants Mustafa MASHALI, L. WU et al. (2018) proposent une étude et un comparatif de trois cas de contrôle cinématique. Dans le premier, les deux sous-systèmes sont assujettis à des trajectoires dépendant du temps. Pour le second, seul le manipulateur est sujet à une trajectoire dépendant du temps, le mobile est laissé sans contrainte et la redondance est utilisée via la pseudo inverse. Enfin, la dernière où la redondance est utilisée pour maximiser la manipulabilité du système.

Le cas de la modélisation et de la commande dynamique des manipulateurs mobiles apparaît également dans plusieurs travaux de recherche. Ces derniers permettent le contrôle en tenant compte des effets dynamiques (masse, inertie, accélération,...) du système tandis que ces derniers sont négligés dans une commande cinématique.

Le modèle dynamique s'obtenant par la dérivation du modèle cinématique, la plupart des travaux ayant considéré cet aspect propose alors un modèle dynamique complet par la méthode du couplage interne. J. H. CHUNG et S. A. VELINSKY (1998) propose une première formulation du modèle dynamique d'un manipulateur mobile sur une base unicyclic en utilisant la formulation Lagrangienne. KORAYEM, SHAFEI et SEIDI (2014) présente une autre approche basée sur la formulation de Gibbs-Appell pour obtenir le modèle dynamique d'un manipulateur mobile à roues, possédant deux manipulateurs. Auparavant, d'autres travaux avaient proposé cette formulation dynamique pour un manipulateur mobile sous-marin SCHJØLBERG et FOSSEN (1994).

D'autres méthodes usent d'une cascade de deux contrôleurs basés sur la théorie de Lyapunov. ANDALUZ et al. (2012) présente un premier contrôleur cinématique basé sur la norme minimum (par l'inversion de la jacobienne), qui gère le mouvement de l'ensemble du système pour l'amener à réaliser sa tâche et le second, un contrôleur dynamique adaptatif permettant de venir compenser les perturbations dynamiques du système. Dans ZHOU, PRADEEP et P. C. CHEN (2015); ZHOU, PRADEEP, ZHU et al. (2018) le premier contrôleur cinématique est basé sur un retour d'état par linéarisation dynamique (similaire à celui trouvé dans Giuseppe ORIOLO, Alessandro DE LUCA et VENDITTELLI (2002)) permettant de définir des références de vitesse de commande pour le mobile. Le second contrôleur, en couple, basé sur une méthode par backstepping permet de contrôler l'ensemble des systèmes et de faire converger l'effecteur sur sa trajectoire de référence. Un principe similaire est utilisé dans PATEL, PAN et AHMAD (2017) où le premier contrôleur cinématique, par backstepping, génère la commande articulaire pour suivre la trajectoire, tandis que le second contrôleur en couple, adaptatif, régule les différentes erreurs de suivi articulaire du système.

Les travaux de GALICKI (2011) proposent un contrôleur dynamique du manipulateur mobile, en intégrant trois contraintes d'égalité, représentant les erreurs de suivi du robot sur sa trajectoire (erreur en position et en vitesse) ainsi que la contrainte de non-holonomie du mobile, et la minimisation de l'énergie du système. La convergence asymptotique du contrôleur proposé est ensuite démontrée par la théorie de Lyapunov. Basée sur les approches de projection dans le noyau, la redondance restante du système est utilisée à la maximisation de la manipulabilité du manipulateur mobile. Ces travaux sont étendus par la suite GALICKI (2012) afin d'intégrer au contrôleur la notion d'évitement d'obstacle et de singularité de configuration. Enfin, les travaux GALICKI (2019) proposent deux contrôleurs en cascade, également basés sur la théorie de Lyapunov afin de pouvoir s'affranchir de l'inversion de la jacobienne pour un suivi de trajectoire, préférant le paradigme de la jacobienne transposée qui ignore les singularités cinématiques imposées par l'inversion du modèle et algorithmiques lors des conflits de tâches et plus rapides en temps d'exécution.

Cependant ce genre d'approches, basée sur la dynamique des systèmes, suppose une connaissance exacte de ces dynamiques et des paramètres leur étant liés. Or, ces derniers sont complexes à mesurer ou à estimer précisément, ce qui peut impliquer une faible robustesse de la commande.

2.2.2.3.c Le cas des bases mobiles comportant des roues directrices

Cette méthode de couplage interne a été reprise de très nombreuses fois, dans divers travaux, s'attendant principalement au développement d'approches de résolution de la redondance (Voir Sec.2.3). De plus, ce concentrant sur un cas d'étude simple permettant de mettre en œuvre ces approches, ces travaux se bornent à l'utilisation de bases mobile de type unicycle ou skid-steering.

Cependant, dès les premiers travaux théoriques concernant la modélisation et la commande des approches en couplage interne B. BAYLE, J. FOURQUET et M. RENAUD (2003), les auteurs pointent du doigt l'un des plus importants défauts de cette approche; la difficulté de l'appliquer à des bases mobiles à roues directrices. En effet, bien que la modélisation proposée s'applique à toute classe de mobile, la simple inversion de modèle ne permet pas de commander l'entièreté du système.

La raison de cette difficulté est double. Premièrement, pour créer le modèle unique et la jacobienne associée, il faut qu'il existe une relation linéaire entre les vitesses généralisées du mobile \dot{q}_m et son vecteur de commande u_m incarnée par la matrice B_m dans l'équation (2.22). Or, une telle relation existe pour les bases mobiles type unicycle ou skid steering, mais pas de façon directe pour une base possédant des roues directrices. De fait, le vecteur de commande d'un mobile peut se décomposer en deux parties :

$$u_m = \begin{pmatrix} u_{m_p} \\ u_{m_\phi} \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

Avec u_{m_p} la commande des vitesses du corps du mobile et u_{m_ϕ} la commande des vitesses des roues directrices du mobile. Dans le cas particulier d'un robot dont le degré de dirigeabilité est nul, alors $u_{m_\phi} = \vec{0}$: on a $u_m = u_{m_p} = (v \ \omega)$ pour un robot unicycle ou skid-steering et $u_m = u_{m_p} = (v_x \ v_y \ \omega)$ pour un robot omnidirectionnel. Connaissant cela, le modèle (2.22) peut s'écrire plus généralement CAMPION, BASTIN et D'ANDREA-NOVEL (1993) :

$$\dot{q}_m = \begin{pmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{y}_m \\ \dot{\theta}_m \\ \dot{\delta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G(q_m) & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{m_p} \\ u_{m_\phi} \end{pmatrix} = B(q_m)u_m. \quad (2.26)$$

Selon le modèle (2.26), la commande u_{m_ϕ} n'a alors aucune influence sur la posture $(\dot{x}_m \ \dot{y}_m \ \dot{\theta}_m)^t$. L'inversion d'un tel modèle (2.26) au sein de l'équation (2.24) implique une vitesse nulle du braquage des roues directrices. Une partie du vecteur de commande de la base mobile ne permet donc pas de contrôler la posture de la plateforme.

Deuxièmement, le problème soulevé précédemment implique la perte d'un degré de mobilité à la plateforme, diminuant la redondance qu'elle offre au système, car le vecteur de contrôle impactant la posture du mobile est réduit (même si le vecteur de contrôle total est autant, voire plus grand). Or, les capacités de contrôle local en position et orientation des plateformes avec et sans roues directrices est équivalent FRUCHARD, Pascal MORIN et Claude SAMSON (2006). Plus encore, les plateformes possédant le plus important degré de manœuvrabilité (et donc les meilleures capacités de contrôle) sont celles qui perdent le plus de degré de redondance via l'utilisation des approches en couplage interne.

Ce problème a été traité dans Bernard BAYLE (2001) qui propose la résolution de quelques cas particuliers. En revanche, une résolution systématique du problème a été traitée dans Alessandro DE LUCA, Giuseppe ORIOLO et ROBUFFO GIORDANO (2010) offrant deux solutions à ce dernier :

- La première solution utilise conjointement une commande par retour d'état statique et la projection du gradient dans le noyau de la Jacobienne du robot. L'idée de cette approche est de générer des mouvements de braquage dans l'espace nul de la Jacobienne afin d'optimiser la manipulabilité du système. De ce fait, le vecteur de contrôle u_{m_p} est dédié à la réalisation de la tâche principale (suivi de trajectoire) tandis que le vecteur

de commande u_{m_ϕ} est dédié au maintien de la manipulabilité du système. Cependant, avec cette approche, l'inversion de la Jacobienne peut devenir singulière et nécessite le recours à des approches d'inversion robuste.

- La seconde solution proposée repose sur une linéarisation entrée-sortie, par retour d'état dynamique. Cette méthode provient du fait que la matrice J du modèle (2.24) est dépendante des braquages δ des roues directrices à travers la matrice $G(q_m)$. Ainsi, le modèle cinématique une nouvelle fois dérivé peut se mettre sous la forme :

$$\ddot{p} = A(q_a, q_m, u_{m_p}) \begin{pmatrix} \dot{u}_a \\ \dot{u}_{m_p} \\ u_{m_\phi} \end{pmatrix} + b(q_a, q_m, u_{m_p}, u_a). \quad (2.27)$$

La matrice A remplace alors la matrice Jacobienne, et son inversion prend en compte les effets de u_{m_ϕ} sur l'accélération de la tâche.

Peu après, d'autres travaux se sont emparés de la problématique DIETRICH, WIMBOCK, ALBU-SCHAFFER et al. (2012) et proposent également la résolution du problème à travers des tâches supplémentaires projetées dans le noyau de la tâche principale par le contrôle du CIR (centre instantané de rotation). De fait, ce dernier permet de diriger l'orientation des roues du mobile. De plus, ce dernier est soumis à un champ de potentiel pour l'empêcher de se placer trop proche de l'une des roues du mobile, au risque d'engendrer une vitesse de braquage très importante.

2.2.3 Conclusion sur la coordination

Cette seconde partie a permis de faire un point sur les nombreuses approches dédiées à la coordination des manipulateurs mobiles ayant été proposées depuis le début des recherches sur ce sujet. Par ailleurs, cela a permis d'en faire une synthèse pour en sortir une classification faisant, jusqu'à aujourd'hui, défaut au domaine. Cette classification se base sur le degré de couplage entre les sous-systèmes du manipulateur mobile selon une échelle graduelle (Voir Fig.2.1). Cette classification permet alors de détailler les forces et les faiblesses des différentes approches selon la force du couplage et des interactions qui animent ces robots.

Cette classification a mis en évidence quatre principales approches. La première concerne les approches non coordonnées. De part leur nature, ces dernières ne seront pas étudiées plus en avant dans ce mémoire. Seul l'aspect de compensation sera abordé dans le chapitre 4, car il sera nécessaire pour la navigation en milieu naturel.

La seconde concerne les systèmes complètement holonomes qui offrent des couplages extrêmement forts et pousse à l'utilisation de commandes et de modèles uniques, facilitant à la fois la coordination et la résolution de la redondance. Cependant, les systèmes complètement holonomes ne sont pas adaptés⁸ dans le cadre d'une application agricole qui se base davantage sur des mobilités à chenille ou à roue directrice. De fait, cette catégorie d'approches n'est pas pertinente pour nos travaux au vu des enjeux énoncés au premier chapitre.

Enfin, les deux dernières méthodes sont le couplage externe et interne qui peuvent se résumer simplement de la façon suivante. Le couplage interne intègre la coordination au sein de la commande par la construction d'un modèle unique et global, tandis que la coordination externe intègre un coordinateur qui gère les objectifs de commande de chaque sous-système, possédant eux-mêmes un modèle et une commande propre. Au vu des enjeux présentés au premier chapitre, ces deux approches peuvent être pertinentes et l'objectif des prochains paragraphes est de proposer une discussion vis-à-vis des forces et des faiblesses de chacune.

2.2.3.1 Discussion sur les approches de modélisation en couplage interne

Le premier point de discussion abordé ici concerne les deux approches en couplage interne : l'approche en contrainte non-holonyme par tâche et celle par modèle.

Bien que ces deux dernières soient conceptuellement différentes, elles n'en sont pas moins, en pratique, très semblables. Leurs méthodes de modélisation ne leur offrent pas d'avantages particuliers l'une sur l'autre, ce qui est cohérent au vu des capacités de mobilité du robot qui, dans tous les cas, ne peut augmenter son degré de manoeuvrabilité par simple changement de modélisation du manipulateur mobile. Par ailleurs, les performances dans la

8. De part les types de technologies mises en œuvre pour rendre le système holonome.

réalisation d'une tâche sont également très semblables et n'offrent pas de différences significatives. Pour le lecteur intéressé, ce point est détaillé en Annexe H et illustré de plusieurs expérimentations.

Le choix le plus pertinent entre ces deux types de couplage serait donc celui qui considère la contrainte de non-holonomie directement au sein de son modèle. Cette dernière semble plus naturelle et ne risque pas de causer une violation de la contrainte en cas de conflit de tâches.

2.2.3.2 Discussion sur la pondération des systèmes

Après ce tour d'horizon des approches de coordination existantes au sein de la littérature scientifique, il est important de discuter d'un second point concernant le rôle de la pondération dans les méthodes possédant les plus forts couplages. De fait, la tendance de la recherche sur la coordination des manipulateurs mobiles, tend vers ces méthodes. Cependant, dès les premières recherches concernant les manipulateurs mobiles, notamment sur la résolution de la redondance, les auteurs des différents travaux ont très vite remarqué l'intérêt de l'utilisation d'une pondération (souvent par l'intermédiaire d'une pseudo inverse pondérée) permettant de découpler les sous-systèmes, par une régulation de leur mouvement respectif, selon un ou plusieurs critères.

Ceci semble alors paradoxal du fait que pour des approches avec de très hauts niveaux de couplage (comme les systèmes holonomes ou les couplages internes), ces approches de pondération cherchent à découpler les sous-systèmes.

Ainsi, dès la fin des années 90, SERAJI (1998) propose l'utilisation d'une pseudo inverse pondérée, amortie pour l'inversion cinématique d'un manipulateur holonome, sous la forme :

$$\dot{q} = (J^t W_t J + W_v)^{-1} J^t W_t (\dot{p}^d + K(p^d - p)). \quad (2.28)$$

Dans cette expression, W_t pondère et priorise les tâches entre elles et le terme W_v pondère l'utilisation de l'un des sous-systèmes par rapport à l'autre.

Plus tard, les travaux B. BAYLE, J. -Y. FOURQUET et M. RENAUD (2003a) précisent qu'en raison de la différence de dynamique entre les sous-systèmes, il serait possible de pondérer la matrice jacobienne avec une autre matrice permettant une certaine prise en compte de ces différences. Ils proposent pour cela l'utilisation de la matrice d'énergie cinétique LIPKIN et DUFFY (1988). Ce même genre de pondération a également été répertorié dans Glenn D. WHITE et al. (2009) où la matrice d'inertie du manipulateur est utilisée comme matrice de pondération du système.

Même les systèmes holonomes, possédant le couplage le plus important, sont sujet à de telles pondérations et peuvent apparaître également en dehors d'une jacobienne pondérée. OGREN, N. EGERSTEDT et X. HU (2000); OGREN, PETERSSON et al. (2000) propose des profils de vitesse et un facteur de pondération C pour distribuer le mouvement entre la base et le manipulateur.

Similairement, dans les travaux Y. JIA et al. (2014), la distribution du mouvement est réalisée au moyen d'une pseudo inverse pondérée. Ainsi, le mobile ne rentre en mouvement que si le manipulateur a une faible manipulabilité et s'approche donc d'une singularité. Cette méthode est basée sur l'utilisation d'une pseudo-inverse avec une pondération λ adaptative telle que :

$$\lambda = \begin{cases} 1 - w, & \text{si } w \leq L \\ 0, & \text{si } w \geq L \end{cases} \quad (2.29)$$

w étant la mesure de manipulabilité du système ajustée entre 0 et 1 et L sa limite acceptable.

Ces mêmes travaux Y. JIA et al. (2014), accompagnés de Yunyi JIA, XI et NIEVES (2014), proposent de découpler les objectifs de la base mobile et du manipulateur le long de la trajectoire en utilisant une régulation par abscisse curviligne (similairement à ce qui a été proposé par J. TAN et XI (2002)), permettant au système de s'adapter à des événements inattendus, et aux sous-systèmes d'adapter leurs mouvements l'un à l'autre en fonction des situations rencontrées par la base mobile ou le manipulateur.

Plus récemment, des travaux ont proposé l'utilisation d'une pondération des mouvements en fonction d'un critère de distance. En fonction de la localisation de l'effecteur dans l'espace de travail du manipulateur DUBOS et al. (2019) ou selon la distance à l'objectif du système CIESLAK, RIDAO et GIERGIEL (2015); SOROUR, CHERUBINI

et FRAISSE (2019).

Cette présence de la pondération dans ces nombreuses méthodes utilisant de forts couplages, illustre alors le fait que, malgré tous les efforts donnés pour modéliser un système unique et homogène, il ne reste pas moins intrinsèquement un assemblage de systèmes très différents. Les mobiles sont, par nature, des systèmes imprécis et de dynamique lente, là où les manipulateurs sont des systèmes à dynamique rapide et beaucoup plus précis. Or, pour avoir une coordination satisfaisante, il convient de considérer ceci dans la commande. Cette remarque sur le rôle de la pondération dans le couplage des systèmes pose alors la question de la pertinence d'un couplage si important pour ce genre de système.

Il apparaît alors que le couplage homogène est impossible car il ne permet pas de distinguer les sous-parties du système, tandis que le découplage complet ne permet pas de prendre en compte le système dans son ensemble. La coordination implique un couplage fort alors que la nature des sous-systèmes implique un découplage fort. Ce dernier point pose finalement la question du choix sur le type de couplage selon la nature des sous-parties du système choisi.

2.2.3.3 Comparaison entre le couplage interne et le couplage externe

Un point important concernant la justification du choix de couplage effectué dans la suite de ce mémoire repose sur la question de la comparaison entre les couplages interne et externe dont aucun travail n'a fait mention à ce jour d'après les recherches effectuées. De fait, il est légitime de vouloir comparer les performances des deux méthodes pour argumenter sur le choix de l'approche. De prime abord, ce point paraît donc crucial et suscite sans aucun doute un manque au sein de la littérature scientifique. Cependant cette question est à prendre avec un certain recul.

Ainsi, les résultats obtenus sur une comparaison des deux approches seraient davantage porté par les différences fondamentales des méthodes plutôt que par des aspects techniques. De fait, comme il a été fait mention lors de leur présentation, ces deux couplages sont fondamentalement différents dans leur façon de coordonner le système. Ainsi, il est possible de prendre ces deux méthodes et de les comparer ensemble. Mais la validité de cette comparaison est largement discutable tant les différences sont nombreuses. Il ne s'agit pas ici de comparer l'influence de quelques paramètres au sein d'une loi de contrôle, mais de comparer deux paradigmes gérant les choses de façon très différentes.

De fait, il s'agit de comparer une commande par retour d'état, classique pour le couplage interne, avec deux commandes distinctes pour le couplage externe⁹. Ces deux commandes ayant des hypothèses, des paramètres et des réglages de gains différents. Les commandes étant différentes, les modèles associés le sont aussi. Par ailleurs, bien que les critères associés aux tâches secondaires expriment la même chose, leur formulation est différente. Dans le cas du couplage interne, il s'agit d'une minimisation par projection du gradient au sein du noyau de la jacobienne du modèle tandis que le couplage externe repose sur la minimisation d'une fonction de coût par un solveur numérique¹⁰. De fait, il devient compliqué de savoir quels paramètres influencent quels résultats et si, selon un paramétrage différent ou une formulation des critères différente, les tendances observées seraient restées les mêmes selon l'influence que pourrait avoir les variations de ces deux méthodes (changement du type de commande, de méthodes de résolution de redondance,...).

Ainsi, pour obtenir un comparatif pertinent, s'il est possible, il serait nécessaire de définir des indicateurs de comparaison objectifs et fiables, ayant un sens dans les deux cas et qui puissent intégrer l'ensemble des différences des approches. A l'heure actuelle, ce problème reste ouvert et tant que davantage d'éléments de réponse n'y auront pas été apportés, il sera difficile de comparer les diverses approches de couplage autrement que par des aspects conceptuels et théoriques.

2.2.3.4 Orientation de l'approche de coordination considérée pour ces travaux

L'ensemble des considérations développées dans cette seconde partie de l'état de l'art, face aux enjeux du monde agricole évoqués dans le premier chapitre, motive largement ces travaux à se tourner vers une approche de coordination en couplage externe générique.

9. Une par retour d'état et une par backstepping dans le cas présenté dans ce mémoire.

10. Méthode utilisé au sein de ce mémoire, sans pour autant être la seule possible

Ainsi, une approche en couplage externe permet de plus facilement prendre en compte les spécificités de chaque sous-système que les approches en couplage interne. Spécificités d'autant plus importantes que le système est voué à évoluer dans un milieu naturel. Ainsi dans ce milieu, les porte-outils sont le plus souvent imposants avec d'importantes dynamiques et relativement imprécis dans leur déplacement (également dégradé par le terrain) tandis que l'outil est plus petit et doit être précis et réactif. De fait, les sous-systèmes sont très hétérogènes ce qui impliquerait d'importantes fonctions de découplage au sein d'un couplage interne.

En relation avec ce dernier point, l'approche en couplage externe permet de différencier, si nécessaire, les types de modélisation utilisés pour chaque sous-système. L'utilisation d'un modèle dynamique pour la base mobile semble peu pertinent au vu des contraintes auxquelles elle est soumise par le milieu. Au contraire, le milieu ayant un impact plus modéré sur le manipulateur, l'utilisation d'un modèle dynamique pour ce dernier semble plus raisonnable, notamment pour des tâches d'interaction telles que la cueillette ou le désherbage ciblé. Dans le cadre de cette thèse, l'utilisation d'un modèle dynamique pour le manipulateur n'est pas abordée, car les tâches considérées relèvent principalement du positionnement de l'effecteur dans l'espace libre, ce point ne sera donc plus évoqué dans la suite de ce mémoire. Cependant, il est important de garder à l'esprit que ce type de couplage permet de garder cette souplesse si nécessaire. Ce même type d'argument a également été avancé par SIMETTI, CASALINO, TORELLI et al. (2014) concernant la période de commande des sous-systèmes pouvant différer selon leur dynamique et leurs capteurs.

Par ailleurs, une approche en couplage externe associée à un coordinateur générique, permet de faire face à la diversité des structures des manipulateurs mobiles présents dans ce milieu et évoqués au chapitre premier. De fait, la solution à une telle problématique semble difficile en utilisant un niveau de couplage plus élevé. De plus, il a été soulevé la difficulté d'utiliser les approches en couplage interne pour les mobiles possédant des roues directrices tandis que leur utilisation par un couplage externe est bien plus aisée du fait des nombreuses commandes existantes dans la littérature pour chaque type de mobilité.

2.3 Résolution de la redondance

La résolution de la redondance est le second aspect de la coordination des manipulateurs mobiles. En effet, ces derniers sont des systèmes hautement redondants devant leur tâche, leur permettant d'optimiser un critère lié à cette dernière ou de réaliser plusieurs tâches simultanément. L'étude de la redondance a fait l'objet de nombreux travaux dans la littérature scientifique et se trouve intimement liée au couplage choisi pour l'ensemble du système. Les couplages internes et systèmes holonomes ont la facilité de pouvoir facilement user des approches déjà décrites pour les manipulateurs, alors que les couplages externes doivent utiliser des coordinateurs dédiés pour cela. Les approches non coordonnées au contraire, sont dépourvues de toute possibilité d'utiliser cette redondance, ce qui est regrettable au vu des potentiels que permet cette dernière.

Deux importantes approches abordent ce problème. La recherche locale et la recherche globale. Dans le premier cas, les tâches et les contraintes associées sont optimisées localement autour du point de départ et se restreignent au premier minimum trouvé. Dans le second cas, les tâches sont optimisées de façon globale dans l'ensemble de l'espace de configuration du système et possiblement sur une fenêtre de temps donnée, permettant de trouver le minimum global de la fonction de coût associée à l'optimisation de la redondance.

2.3.1 Méthodes locales

Dans un premier temps, cette partie va s'intéresser et présenter les méthodes locales répondant à l'optimisation de la redondance pour un certain nombre de tâches. Ces dernières seront divisées en deux catégories, les méthodes analytiques et les méthodes numériques.

2.3.1.1 Méthodes analytiques

Les méthodes analytiques sont celles qui ne reposent pas sur le calcul numérique pour être résolues et donc la solution peut être formellement posée. Ces dernières traitent souvent la résolution de la redondance sous deux aspects. Le premier est associé à l'inversion du modèle permettant de trouver la solution du problème, une fois que ce dernier a été formellement posé, tandis que le second traite de la manière d'ajouter de nouvelles tâches dans

la formulation du problème. Le choix de cet ordre de présentation est tout d'abord historique car la question de l'inversion du modèle a été étudiée avant celle de l'ajout de nouvelles tâches, mais surtout car la compréhension des méthodes d'ajout de tâches est facilitée par celles des méthodes d'inversion.

2.3.1.1.a Inversion du modèle

Cette première partie est attachée à l'étude des différentes approches d'inversion du modèle analytique permettant de trouver une solution exacte au problème formulé. Concernant les manipulateurs mobiles, une étude analytique et comparative des différentes méthodes d'inversion du modèle a été proposée dans TCHOŃ et Janusz JAKUBIAK (2003).

2.3.1.1.a.a Inversion et transposée

Classiquement, la solution associée au modèle (2.30) est obtenue par l'utilisation d'une inverse matricielle. Cependant cette inverse est définie pour les matrices carrées uniquement, ce qui empêche toute utilisation sur un système redondant. De plus, elle est soumise à plusieurs singularités lorsque son déterminant s'annule, ce qui se traduit par une perte de rang du modèle sur la formulation mathématique et l'obtention d'une commande infinie sur le système physique.

$$\dot{x} = J\dot{q}. \quad (2.30)$$

Une autre méthode pour inverser le modèle cinématique est introduite dans BALESTRINO, DE MARIA et SCIAVICCO (1984) et WOLOVICH et ELLIOTT (1984) par l'utilisation de la transposée de la matrice jacobienne plutôt que son inverse selon la boucle fermée :

$$\dot{q} = \alpha J^t(q)Ke. \quad (2.31)$$

Avec e l'erreur de commande, K une matrice de gain négative et α un terme dépendant de K , e , J et la vitesse désirée \dot{x} assurant la stabilité via une preuve par Lyapunov¹¹.

Cette formulation a notamment l'avantage de ne pas nécessiter le calcul de l'inverse de la jacobienne, ce qui est consommateur en temps de calcul. De plus, elle n'occasionne pas de singularité. Cependant, comme mentionné dans Alessandro DE LUCA, Giuseppe ORIOLO et P. R. GIORDANO (2007) la commande générée converge asymptotiquement mais non exponentiellement, ce qui se traduit sur un temps de réponse plus lent du système.

2.3.1.1.a.b Pseudo inverse

L'utilisation de la pseudo-inverse permet d'une part l'obtention d'un système convergeant exponentiellement et d'autre part, l'inversion de robots redondants dont les modèles ne sont pas carrés. Cette dernière se définit comme :

$$J^+ = J(JJ^t)^{-1}. \quad (2.32)$$

Contrairement aux méthodes précédentes dont la solution était unique, le cas des systèmes redondants offre une infinité de solutions. La pseudo inverse sélectionne la solution permettant la réalisation de la tâche tout en minimisant la norme des vitesses articulaires $\|\dot{q}\|$. Dans ce cas, la redondance offerte par le système est utilisée à minimiser la quantité $\|\dot{x} - J(q)\dot{q}\|^2$ au sens des moindres carrés.

Cependant, comme pour l'inversion simple, la pseudo-inverse ne permet pas la génération de solutions évitant les singularités cinématiques du modèle qui déstabilisent le système BAILLIEUL (1985).

2.3.1.1.a.c Pseudo inverse pondérée

L'une des façons de pouvoir influencer sur la solution offerte par la pseudo inverse est l'utilisation d'une pondération. Pour cela, WHITNEY (1972) définit la pseudo-inverse pondérée pénalisant le mouvement de certaines articulations par rapport à d'autres, selon le facteur de poids. Elle utilise une matrice de pondération W symétrique

11. Voir BALESTRINO, DE MARIA et SCIAVICCO (1984) pour plus de détail.

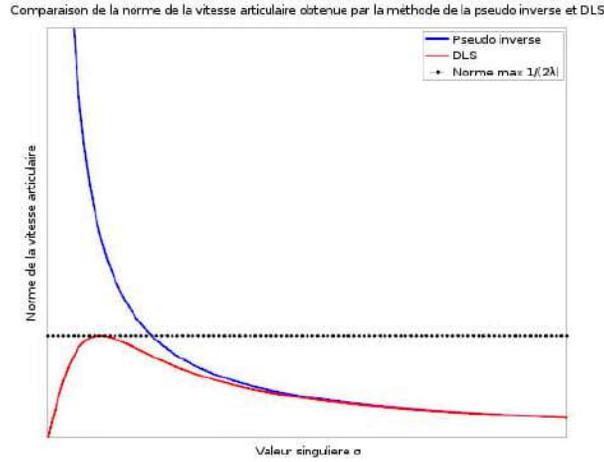


FIGURE 2.3 – Comparaison de la norme de la vitesse articulaire obtenue par la méthode de la pseudo inverse et pseudo inverse amortie

définie positive et diagonale dans la plupart des cas et s'introduit dans l'équation de la pseudo-inverse de la façon suivante :

$$\dot{q} = W^{-1} J^t [JW^{-1} J^t] \dot{x} = J_W^+ \dot{x}. \quad (2.33)$$

Cette solution a été de nombreuses fois utilisée dans le cas des manipulateurs mobiles, notamment afin de découpler les mouvements entre les articulations du manipulateur et celles du mobile SERAJI (1998) ; G. ANTONELLI et S. CHIAVERINI (2003) ; Glenn D. WHITE et al. (2009) ; Y. JIA et al. (2014).

2.3.1.1.a.d Pseudo inverse amortie (Methode DLS/SR-Robust)

Une façon de compenser les défauts de la pseudo inverse et de la pseudo inverse pondérée à l'approche des singularités passe par l'utilisation d'une autre méthode nommée DLS (Damped Least Square) WAMPLER (1986) ou encore Singularity Robust Inverse (SR-inverse) Yoshihiko NAKAMURA et Hideo HANAFUSA (1986). Cette approche permet de calculer une solution réalisable sur une singularité ou dans son voisinage en considérant la décomposition SVD (Voir Annexe.C.3.3) de la jacobienne $J(q) = \sum_{i=1}^m (\sigma_i u_i v_i^t)$ donnée telle que :

$$J^+(q) = \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{\sigma_i} v_i u_i^t \right). \quad (2.34)$$

Lorsque le système approche d'une position singulière, il existe une direction vers laquelle il ne peut plus se déplacer, ce qui se traduit sur la matrice jacobienne par une perte de rang. Cela implique que la dernière valeur singulière σ_m devient nulle et cause une division par zéro faisant tendre les valeurs de commande vers l'infini. Afin de limiter la divergence de \dot{q} , un facteur d'amortissement λ est ajouté qui remplace la quantité $\|\dot{p} - J(q)\dot{q}\|^2$ minimisée par la pseudo inverse, par $\|\dot{x} - J(q)\dot{q}\|^2 + \lambda^2 \|\dot{q}\|^2$ permettant d'exprimer la pseudo inverse amortie telle que :

$$J^{+\lambda}(q) = J^t(q)(J(q)J^t(q) + \lambda^2 I)^{-1} = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_i^2 + \lambda^2} v_i u_i^t \right). \quad (2.35)$$

Plus le facteur d'amortissement λ sera faible, plus les vitesses articulaires dans l'espace proche de la singularité seront importantes. Si λ est nul, on se retrouve dans le cas de la pseudo inverse simple. Plus le facteur d'amortissement λ sera important, plus les vitesses articulaires seront faibles dans l'espace proche de la singularité, mais plus la vitesse de convergence du système sera faible (Voir Fig.2.3). De plus, cet amortissement engendre une erreur dans la solution obtenue lorsqu'il s'approche de la zone de singularité.

Obtenir une solution réalisable tout en garantissant une vitesse de convergence rapide et une erreur de poursuite nulle loin des singularités, sont des objectifs contraires au regard du facteur d'amortissement. Si ce dernier est constant, il faut faire un compromis entre les deux. Une solution est alors d'utiliser un facteur d'amortissement variable, que ce dernier soit nul lorsque le bras est éloigné des singularités et qu'il soit plus fort lorsqu'il s'en approche.

Référence	Expression du critère	Commentaires
CACCAVALE, S. et CHIAVERINI SICILIANO (1997)	$\lambda^2 = \begin{cases} 0 & \text{si } \sigma_{min} \geq \sigma_{d1} \\ \lambda_M^2 \left(1 - \left(\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{d1}}\right)^2\right) & \text{si } \sigma_{min} < \sigma_{d1} \end{cases}$	Avec σ_{min} , la valeur singulière minimum de la jacobienne, σ_{d1} définit la taille de la région où se trouve la singularité et λ_M^2 la valeur maximum que peut prendre le facteur d'amortissement dans la singularité
Yoshihiko NAKAMURA et Hideo HANAFUSA (1986)	$\lambda^2 = \begin{cases} 0 & \text{si } w \geq w_0 \\ k_0 \left(1 - \frac{w}{w_0}\right)^2 & \text{si } w < w_0 \end{cases}$	Ce dernier s'appuie sur la définition de la manipulabilité w donnée en (2.1). w_0 est un seuil définissant l'entrée dans une région proche de la singularité, et k_0 la valeur maximum que peut prendre le facteur d'amortissement dans la singularité.
Paolo BAERLOCHER (2001)	$\lambda = \begin{cases} 0 & \text{si } \sigma_{min} > d \\ \sqrt{\sigma_{min}(d - \sigma_{min})} & \text{si } \frac{d}{2} < \sigma_{min} < d \\ \frac{d}{2} & \text{si } \sigma_{min} < \frac{d}{2} \end{cases}$	Avec $d = \frac{\ \dot{x}\ }{\ \dot{q}\ }$. L'intérêt de ce dernier facteur d'amortissement est sa dépendance aux vitesses du système lui permettant de varier dynamiquement selon la vitesse opérationnelle et articulaire du manipulateur

TABLE 2.2 – Tableau récapitulatif des facteurs d'amortissement λ proposés dans la littérature

L'article DI VITO, NATALE et Gianluca ANTONELLI (2017), propose une revue de différents facteurs d'amortissements retrouvés dans la littérature ainsi qu'une comparaison de leurs performances (Voir Tab.2.2).

De même que pour la pseudo inverse pondérée, ces approches ont ensuite été récupérées et étendues pour générer la commande des manipulateurs mobiles dans différents travaux FARELO, R. ALQASEMI et R. DUBEY (2010); M. MASHALI, R. ALQASEMI et R. DUBEY (2014); PATEL, PAN et AHMAD (2017); Heng ZHANG, Yichi ZHANG et al. (2019).

2.3.1.1.a.e Pseudo inverse amortie sélective

Une amélioration de la pseudo inverse amortie proposée dans MACIEJEWSKI et KLEIN (1988) consiste à amortir différemment la dernière valeur singulière, étant celle convergeant le plus rapidement vers zéro. Cet amortissement sélectif permet de limiter la valeur de λ . De fait, plus la valeur de λ est importante, plus la convergence est lente et plus les erreurs dans la commande sont importantes. Or, le facteur d'amortissement étant appliqué de façon uniforme à toutes les valeurs singulières, il amortit inutilement certaines composantes de la vitesse qui n'en auraient pas besoin, engendrant des erreurs importantes dans la solution et ralentissant le temps de convergence du système. Pour pallier à cela, il est pertinent d'amortir plus amplement la dernière valeur que les autres par un nouveau facteur d'amortissement α tel que :

$$J^{+(\alpha, \lambda)}(q_a) = J^t(q_a)(J(q_a)J^t(q_a) + \alpha^2 u_m u_m^t + \lambda^2 I)^{-1} = \sum_{i=1}^{m_a-1} \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_i^2 + \lambda^2} v_i u_i^t \right) + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_m^2 + \alpha^2 + \lambda^2} v_m u_m^t \right). \quad (2.36)$$

Une généralisation de la méthode DLS, nommée SDLS (Selectively damped Least Squares) a par la suite été proposée dans BUSS et J.-S. KIM (2005) et consiste à amortir différemment chaque vitesse articulaire en fonction de l'amplitude du mouvement qu'elles induisent sur le point de contrôle par rapport à la distance entre ce dernier et l'objectif.

2.3.1.1.b Prise en compte des tâches additionnelles

En second lieu, la question de la prise en compte de nouvelles tâches, ou contraintes supplémentaires dans le modèle, est développée dans cette partie qui présente les différentes méthodes de la littérature scientifique ayant

abordé ce sujet.

Une de ces méthodes est présentée dans MIKSCH et SCHROEDER (1992), où les auteurs utilisent la théorie de la commande optimale pour optimiser un ensemble de quatre critères. La commande est séparée en deux parties combinées, la première pour l'accomplissement de la tâche qui gère la redondance du système, et la seconde permettant de rejeter les perturbations.

Une autre méthode a été proposée dans PETERSON, AUSTIN et KRAGIC (2000) avec l'utilisation d'un automate hybride permettant de séquencer les différentes tâches d'ouverture d'une porte et de passer de l'une à l'autre selon les conditions déterminées par les relations de transitivité. Ceci posant alors la notion de pile de tâches ou de tâche séquentielle, qui sera largement reprise par la suite dans plusieurs travaux de recherche.

Ce même principe des machines d'état a été utilisé dans PADOIS (2005) qui propose un formalisme permettant un basculement dynamique entre différentes tâches du manipulateur mobile associées à un ensemble de contraintes secondaires dont la criticité est évaluée par un système d'arbitrage. Ce formalisme a été appliqué pour le changement de commande entre l'atteinte d'un point sur un tableau et le tracé d'une ligne nécessitant de maintenir le point de contact.

Plus récemment, une approche permettant d'incorporer de nouveaux critères fut proposée dans FARELO, R. ALQASEMI et R. DUBEY (2010) en se basant sur l'utilisation d'une pseudo inverse pondérée. Dans cette méthode, une fonction de tâche $H(q)$ est définie et son gradient sert de pondération à la pseudo inverse, permettant ainsi de privilégier les mouvements du système minimisant cette fonction. La méthode a été mise en œuvre sur un manipulateur mobile en considérant la formulation de la matrice de pondération suivante :

$$W = \begin{pmatrix} w_1 + \left| \frac{\partial H(q)}{\partial q_1} \right| & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & w_2 \left| \frac{\partial H(q)}{\partial q_2} \right| & \cdots & 0 & \\ \vdots & 0 & \ddots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & w_{n-1} + \left| \frac{\partial H(q)}{\partial q_{n-1}} \right| & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & w_n + \left| \frac{\partial H(q)}{\partial q_n} \right| \end{pmatrix}. \quad (2.37)$$

En dehors de ces quelques exemples, deux principaux formalismes se sont détachés au sein de la littérature. La première en contraignant les degrés de liberté du système en additionnant de nouvelles contraintes au modèle et la seconde en exploitant les noyaux des tâches principales pour en réaliser des secondaires. Cette deuxième méthode fut largement étudiée et développée et ses principes sont de nos jours encore utilisés avec de très nombreuses variantes tandis que la première n'est que peu utilisée.

2.3.1.1.b.a Addition de tâche/Augmentation de la Jacobienne

La première approche pour exploiter la redondance d'un système en y ajoutant des tâches secondaires consiste en l'augmentation de l'espace de la tâche en ajoutant un nombre de contraintes définies (représentant les nouvelles tâches) afin d'augmenter la dimension de l'espace de la tâche et de réduire le degré de redondance à zéro. Cette méthode a été présentée pour les manipulateurs dans BAILLIEUL (1985); SCIAVICCO et SICILIANO (1988); EGELAND (1987).

Dans le cas de la manipulation mobile, cette méthode est la base de l'approche en contrainte non-holonyme par tâche (Voir Sec.2.2.2.3.a) et a été utilisée pour la première fois par SERAJI (1998) afin d'introduire la contrainte de non-holonomie de la base mobile comme une tâche secondaire à réaliser. Mais elle peut également servir pour la résolution de la redondance du système par l'introduction de nouvelles tâches secondaires à la jacobienne.

Le modèle cinématique de la jacobienne étendue s'écrit alors :

$$J_e \dot{q} = \dot{X} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} J_1(q) \\ J_2(q) \end{pmatrix} \dot{q}_a = \begin{pmatrix} \dot{p}_1 \\ \dot{p}_2 \end{pmatrix}. \quad (2.38)$$

Avec J_e la jacobienne étendue, J_2 la jacobienne de la tâche supplémentaire et \dot{p}_2 le vecteur de tâche secondaire. Il est alors possible d'ajouter autant de tâches que voulu jusqu'à ce que la jacobienne soit de rang plein. Cependant, il est impossible d'ajouter des priorités aux tâches. Ainsi si le nombre de tâches surcontraint la jacobienne, il n'est pas possible de désigner des tâches à privilégier sur d'autres. L'inversion du modèle implique la recherche d'une solution résolvant au mieux et de manière équivalente l'ensemble des tâches définies. De fait, aucune tâche ne sera réalisée strictement ce qui peut poser des problèmes si l'une d'elles est critique.

2.3.1.1.b.b Méthode à noyaux

La seconde approche de résolution de la redondance se base sur l'exploitation du noyau de la jacobienne. L'idée de cette méthode consiste à réaliser les tâches de moindre importance dans le noyau de la tâche de plus haute importance. De cette façon, les tâches de moindre importance n'ont pas d'influence sur celles qui sont de plus haute importance. Ceci permet de créer une notion de priorité entre les tâches. L'idée sous-jacente à cela provient du fait que les vitesses articulaires présentes dans le noyau, n'ayant pas d'influence sur le mouvement final de l'effecteur, peuvent être exploitées pour réaliser une autre tâche en parallèle sans perturber le mouvement principal. Ce type de commande engendre des mouvements internes du système (Voir Annexe.D.6). Ceci est introduit pour la première fois dans GREVILLE (1959) qui donne la solution à l'équation du modèle cinématique telle que :

$$\dot{q} = J^+ \dot{p} + (I - J^+ J)z. \quad (2.39)$$

Où z est un vecteur arbitraire évoluant au sein du noyau de la jacobienne et $(I - J^+ J)$ le projecteur orthogonal dans le noyau de la jacobienne.

Gradient projeté

La première application de l'équation (2.39) pour l'utilisation des mouvements internes du système via le noyau apparaît dans LIEGEOIS (1977). Ces travaux utilisent le vecteur arbitraire z comme une fonction de tâche à minimiser au sein du noyau sous la forme :

$$z = \alpha \nabla H(q). \quad (2.40)$$

Une descente de gradient est opérée sur la fonction de tâche $H(q)$ afin de minimiser le critère qu'elle représente. De plus, l'utilisation de la projection orthogonale dans le noyau de J assure la diminution du critère.

Une extension des ces travaux fut présentée par CLEARY et TESAR (1990) qui montre la possibilité d'optimiser un ensemble c de n critères normalisés et pondérés par w avec l'utilisation d'une seule fonction de tâche définie telle que :

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n w_i c_i}{\sum_{i=1}^n w_i}. \quad (2.41)$$

Par la suite, la projection du gradient fut étendue et utilisée dans le cas des manipulateurs mobiles. On la retrouve dans B. BAYLE, J. -Y. FOURQUET et M. RENAUD (2003a) et Mustafa MASHALI, L. WU et al. (2018) qui l'utilisent afin de maximiser la manipulabilité du manipulateur mobile ou encore dans KANG et al. (2001) où elle minimise l'inertie du robot selon sa posture.

Cette approche de résolution de redondance appliquée aux manipulateurs mobiles fut également étudiée dans A. DE LUCA, G. ORIOLO et P. GIORDANO (2006) proposant une amélioration de la méthode en précisant qu'il faut prendre garde aux vitesses générées par la fonction du gradient pour qu'elles ne soient pas en contradiction avec la contrainte de non-holonomie. Pour cela, le terme z présent dans la formulation (2.40) doit être remplacé par :

$$z = \alpha \begin{pmatrix} B_m^t & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} \nabla H(q). \quad (2.42)$$

Le terme ajouté permet de représenter la projection dans le sous-espace des vitesses généralisées admissibles vis-à-vis de la contrainte de non-holonomie.

Plus tard, les travaux Huatao ZHANG, Yunyi JIA et Xi (2012) proposent l'utilisation du gradient projeté dans un contrôleur multi-critères sous la forme :

$$\dot{q} = J^+ \dot{p} + (I - J^+ J)(a_1 z_1 + a_2 z_2 + \dots + a_n z_n). \quad (2.43)$$

Avec $(a_1 \dots a_n)$ des gains de pondération constants et $(z_1 \dots z_n)$ l'ensemble des critères associés à la tâche du manipulateur mobile où chaque terme z_i s'exprime comme une fonction de tâche avec un gradient indépendant des autres sous la forme (2.42).

Gradient réduit

Cependant, comme indiqué dans A. DE LUCA et G. ORIOLO (1990), le principal défaut de la projection du gradient est la quantité de calculs réalisés qui nécessite un calcul de pseudo inverse pouvant être coûteux en temps. Ces travaux proposent une variante, appelée le gradient réduit (Méthode RG), basée sur un projecteur différent et ne faisant intervenir que le calcul d'une inverse de matrice carrée. Les différences de performances entre les deux méthodes ont été montrées dans BETTINI, Alessandro DE LUCA et Giuseppe ORIOLO (2000) où le temps de calcul moins élevé et un meilleur taux de convergence ont été démontrés. Cependant, la méthode peut également engendrer des discontinuités dans les vitesses articulaires.

Cette approche fut appliquée aux manipulateurs mobiles dans A. DE LUCA, G. ORIOLO et P. GIORDANO (2006) où les mêmes gains en terme des performances de calcul ont été observés.

Priorisation des tâches

Cette autre méthode à noyaux, à la différence des deux précédentes, ne cherche pas à minimiser une fonction de tâche, mais à résoudre une nouvelle tâche définie comme une contrainte cinématique en disposant des degrés de liberté restants au sein de la jacobienne de la tâche principale. Cette approche a été présentée dans H. HANAFUSA, T. YOSHIKAWA et Y. NAKAMURA (1981); MACIEJEWSKI et KLEIN (1985) pour un manipulateur seul avec une seconde tâche p_2 associée à la jacobienne J_2 définie telle que :

$$J_2(q)\dot{q} = \dot{p}_2. \quad (2.44)$$

L'idée de cette approche est de projeter le vecteur de la seconde tâche \dot{p}_2 dans le noyau de la matrice jacobienne de la tâche principale J_1 suivant le formalisme :

$$\dot{q} = J_1^+(q)\dot{p}_1 + [J_2(q)(I - J_1^+(q)J_1(q))]^+(\dot{p}_2 - J_2(q)J_1^+(q)\dot{p}_1). \quad (2.45)$$

Cette dernière formulation se trouve composée des termes suivants :

- $J_1^+(q)\dot{p}_1$: Partie de la solution devant résoudre la tâche principale qui garantit la vitesse exacte de l'effecteur pour la norme minimum des vitesses articulaires. Cependant, dans le cas où une tâche secondaire est ajoutée, ce minimum est sacrifié au profit de la réalisation de la tâche secondaire.
- $J_2(q)(I - J_1^+(q)J_1(q))$: Représente les degrés de liberté disponibles pour accomplir la seconde tâche sans créer de mouvements perturbateurs de la première tâche. Comme pointé dans Stefano CHIAVERINI (1994) ; S. CHIAVERINI (1997) c'est l'inversion de cette matrice qui engendre les problèmes de singularité algorithmique.
- $\dot{p}_2 - J_2(q)J_1^+(q)\dot{p}_1$: Vecteur qui décrit le mouvement demandé par la tâche secondaire en prenant en compte le mouvement induit par la réalisation de la tâche principale sur cette seconde tâche.

Cette solution (2.45) est généralisable à toutes autres tâches s'exprimant comme une contrainte cinématique (2.44). La méthode fut reprise dans SICILIANO et SLOTINE (1991) qui en définit un cadre général, basé sur une expression récursive, pour la réalisation d'un nombre de tâches quelconque en introduisant une relation de priorité entre elles.

Pour résoudre le problème de singularité algorithmique, Stefano CHIAVERINI (1994) ; S. CHIAVERINI (1997) ont présenté un second formalisme pour la priorisation des tâches évitant l'inversion de la matrice $J_2(q)(I - J_1^+(q)J_1(q))$ de l'équation (2.45) en proposant la solution :

$$\dot{q} = J_1^+(q)\dot{p}_1 + (I - J_1^+(q)J_1(q))J_2^+(q)\dot{p}_2. \quad (2.46)$$

De façon intuitive, cette méthode peut être expliquée comme une résolution indépendante de la tâche secondaire, puis un filtrage des composantes de vitesse induites par cette tâche qui influence la tâche principale.

Les versions généralisées des deux formalismes précédents ((2.45) et (2.46)) ont par la suite été comparées dans P. BAERLOCHER et BOULIC (1998) afin d'estimer leurs avantages et leurs défauts.

Le formalisme (2.45) cherche une solution optimale dans le sous-espace où les vitesses peuvent être réalisées sans affecter la première tâche, alors que le second formalisme prend le problème dans l'autre sens. Il cherche tout d'abord une solution optimale dans tout l'espace avant de filtrer les composantes pouvant influencer sur les tâches de plus haute priorité. De ce fait, ce second formalisme (2.46) cherche une solution dans le mauvais espace et son optimalité peut être remise en cause. Ainsi, les erreurs occasionnées peuvent être plus importantes. Ainsi, bien que la formulation de SICILIANO et SLOTINE (1991) soit sensible aux singularités algorithmiques, elle se trouve plus performante à partir du moment où un bon amortissement est réalisé.

Enfin une dernière précision est apportée concernant l'amortissement de l'inversion des jacobiniennes. Bien que cela permette d'atténuer les effets des singularités sur les systèmes, l'inverse amortie ne doit pas être utilisée au sein du projecteur dans le noyau, ceci afin d'assurer que $J(q)[(I - J^+(q)J(q)z] = 0, \forall z$ soit respectée. Dans le cas contraire, les tâches de basse priorité influenceront sur les tâches de haute priorité.

Les différentes approches de priorisation de tâches ont fortement été utilisées dans de nombreux travaux concernant la résolution de redondance des manipulateurs mobiles tels que G. ANTONELLI et S. CHIAVERINI (2003); NAIT-CHABANE (2006); Glenn D. WHITE et al. (2009); DIETRICH, WIMBOCK, ALBU-SCHAFFER et al. (2012); Heng ZHANG, Yichi ZHANG et al. (2019). Ainsi, Glenn D. WHITE et al. (2009) étudie la résolution de la redondance par des approches à projection dans le noyau pour un modèle dynamique du système. Ces derniers proposent par ailleurs l'utilisation d'une pseudo inverse pondérée par la matrice d'inertie du manipulateur pour minimiser l'énergie du système. On retrouve de tels méthodes également dans des travaux impliquant un robot humanoïde sur une base mobile à roues hautement redondant pour optimiser un ensemble de cinq critères DIETRICH, WIMBÖCK et ALBU-SCHÄFFER (2011). Le nombre de tâches sera ensuite étendu à neuf dans DIETRICH, WIMBOCK, ALBU-SCHAFFER et al. (2012) et un vecteur de pondération permettant l'activation et la désactivation des tâches sans discontinuité est ajouté dans la projection du noyau. Cette méthode est également utilisée dans NAIT-CHABANE (2006) conjointement avec des pondérations associées à chaque tâche afin d'en changer l'ordre de priorité. Cependant, l'échange des tâches dans l'ordre de priorité, tout comme l'ajout et le retrait de l'une d'entre elles dans la commande, peuvent induire des discontinuités dans cette dernière. KEITH et al. (2011) étudie ce problème et propose une interpolation linéaire entre les commandes construites par les différents ordres de priorité pour rendre la transition plus douce. Enfin, cette méthode fut également mise en œuvre dans les travaux Heng ZHANG, Yichi ZHANG et al. (2019) pour la gestion de la redondance des tâches dans une commande par asservissement visuel.

Addition et priorisation des tâches / Approche mixte

Par la suite des approches mixtes entre les méthodes d'addition de tâches au sein d'une jacobienne et les méthodes à noyaux ont été développées permettant de combiner les avantages des deux approches.

En premier lieu, les travaux P. BAERLOCHER et BOULIC (1998) généralisent l'utilisation des méthodes à noyaux en proposant une formulation générale. De fait, le comportement cinématique du système peut être complètement spécifié à travers l'inversion cinématique munie d'un nombre arbitraire de tâches $t_{i \in \mathbb{N}}$ associées à un ordre de priorité, défini pour chacune, soit par un vecteur vitesse dans l'espace opérationnel, soit par un vecteur dans l'espace articulaire. Les auteurs proposent alors une nouvelle formulation des équations de SICILIANO et SLOTINE (1991) et de S. CHIAVERINI (1997) en y ajoutant un critère d'optimisation scalaire $\alpha \nabla H(q)$ provenant des approches de projection du gradient :

$$\dot{q} = \left(\sum_{i=1}^{t-1} \dot{m}_i \right) + (I - J_t^+ J_t)z. \quad (2.47)$$

Avec $\dot{m}_i = (J_i(I - J_{i-1}^+ J_{i-1}))^+ \left(\dot{p}_i - J_i \sum_{j=1}^{i-1} \dot{m}_j \right)$ si l'on utilise le formalisme de SICILIANO et SLOTINE (1991) ou $\dot{m}_i = (I - J_{i-1}^+ J_{i-1})J_i^+ \dot{p}_i$ si l'on utilise le formalisme de S. CHIAVERINI (1997)

Ce formalisme permet de définir un ensemble de tâches et de critères organisés selon un ordre de priorité déterminé. La fonction d'optimisation scalaire est utilisée ici pour occuper l'ensemble des degrés de redondance laissés libres par les tâches de plus haute priorité dans la minimisation d'une fonction de tâche quelconque.

Ce premier formalisme fut par la suite appliqué aux manipulateurs mobiles M. MASHALI, R. ALQASEMI et R. DUBEY (2014) ; Mustafa MASHALI, Rdwan ALQASEMI et Rajiv DUBEY (2016) avec deux tâches correspondants au suivi de deux trajectoires et une fonction de tâche destinée à maximiser la manipulabilité du manipulateur. Elles furent également utilisées dans le contexte de la manipulation mobile sous-marine dans CIESLAK, RIDAO et GIERGIEL (2015).

En second lieu, les méthodes par addition de tâches ont également été conjointement utilisées avec les méthodes à noyaux permettant de réaliser un ensemble de tâches à différents niveaux de priorité. Ce type de mixité a par exemple été appliqué sur un manipulateur mobile dans B. BAYLE, J. FOURQUET, F. LAMIRAUX et al. (2002).

Plus récemment, K. LEE et al. (2017) présenta un formalisme similaire où l'approche d'addition de tâches est utilisée pour ajouter la tâche de non-holonomie du mobile à la tâche principale et le formalisme des méthodes à noyaux de MACIEJEWSKI et KLEIN (1985) est utilisé pour réaliser une tâche d'évitement d'obstacle par l'utilisation de champ de potentiel KHATIB (1990).

Tâche séquentielle

Une alternative à l'utilisation des précédentes approches est celle des tâches séquentielles. Cette dernière ne cherche pas à réaliser l'ensemble des tâches en même temps et en tenant compte des priorités, mais elle les effectue, les unes après les autres, séquentiellement. Pour cela, une pile de tâches est définie par priorité et la tâche suivante de la pile n'est commencée que si la tâche précédente est terminée. L'intérêt de cette alternative est qu'elle ne contraint pas tous les degrés de liberté du système en une seule fois mais petit à petit, à mesure que les tâches précédentes sont réalisées. De fait, cela ne force pas la trajectoire en une configuration unique pouvant mener sur des singularités N. MANSARD et F. CHAUMETTE (2004). De plus, la première tâche dispose de tous les degrés de liberté du système pour être réalisée, tandis que la seconde tâche sera achevée sous le rejet des perturbations et non pas de la réalisation de la première.

L'une de ces approches a été proposée dans Alessandro DE LUCA, Giuseppe ORIOLO et P. R. GIORDANO (2007) en exploitant le noyau de la jacobienne par une méthode de priorisation de tâches pour l'utilisation d'un asservissement visuel sur un manipulateur mobile. Dans ce cas, le formalisme utilisé est le même, mais la projection des tâches secondaires dans le noyau des tâches primaires n'est réalisée que lorsque l'erreur de la tâche primaire est suffisamment petite.

De telles approches ont été proposées dans N. MANSARD et F. CHAUMETTE (2004) où chaque tâche élémentaire est stockée dans une pile de tâches et est ajoutée selon l'avancement des tâches précédentes, contraignant petit à petit l'ensemble des degrés de liberté. Cependant, il n'est pas possible de modifier le vecteur de tâches directement sans créer de discontinuité Nicolas MANSARD, REMAZEILLES et François CHAUMETTE (2009). Pour éviter ces dernières à l'ajout des nouvelles contraintes N. MANSARD et F. CHAUMETTE (2004) utilise des fonctions de transition qui sont appliquées lors de l'ajout des tâches. Ces fonctions se présentent sous la forme d'une matrice de pondération ajoutée au sein de la commande la rendant ainsi continue. Cependant, l'ajout de cette matrice de pondération n'empêche pas les discontinuités de l'opérateur d'inversion de la matrice Jacobienne qui est discontinu lorsqu'elle change de rang. Un nouvel opérateur d'inversion a donc été proposé dans Nicolas MANSARD, REMAZEILLES et François CHAUMETTE (2009) permettant de garder la continuité de la loi de commande dans ces circonstances sous la forme suivante :

$$J^{\oplus H} = \sum_{\mathcal{P} \in \mathfrak{B}(m)} \left(\prod_{i \in \mathcal{P}} h_i \right) \prod_{i \notin \mathcal{P}} (1 - h_i) J_{\mathcal{P}}^+ \quad (2.48)$$

Où les éléments h_i représentent les poids d'activation (éléments de la diagonale d'une matrice d'activation H) des dimensions de la tâche représentée par J et $\mathfrak{B}(m)$ représente un sous-ensemble défini par les dimensions de la tâche à réaliser.

Ce même opérateur sera ensuite utilisé dans Nicolas MANSARD, KHATIB et KHEDDAR (2009) afin de proposer une solution générique à la construction d'une loi de contrôle comprenant des contraintes d'inégalité (ou unilatérales) de priorité arbitraire se présentant sous la forme :

$$\dot{e} = \begin{cases} -\lambda e & \text{si } e > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.49)$$

Les contraintes unilatérales permettent ainsi de prendre en compte des tâches telles que la manipulabilité ou les limites articulaires, sans avoir à utiliser une minimisation de fonction de coût qui fait irrémédiablement tendre la valeur du critère vers une valeur unique, alors que ces critères sont définis par une limite à ne pas dépasser plutôt qu'une valeur à atteindre. L'opérateur proposé (2.48) est alors généralisé pour n tâches et permet de s'affranchir des discontinuités provoquées par l'activation des contraintes, tandis que la construction d'une loi de commande usant de l'approche par DLS permet de passer les singularités cinématiques en toute sécurité.

Par la suite, le problème équivalent d'insertion de contrainte unilatérale dans l'inversion d'un modèle dynamique, pour le contrôle de robots humanoïdes, a été traité dans SAAB et al. (2013)

2.3.1.2 Méthode numérique

Le principal défaut des approches analytiques repose dans la difficulté à y intégrer des contraintes d'inégalité cinématique telles que les limites articulaires ou des distances à des obstacles. De fait, imposer une contrainte d'égalité peut-être très restrictif selon la tâche à accomplir, notamment lorsque l'on cherche uniquement à ne pas dépasser une certaine limite ou à rester dans un encadrement. Des méthodes basées sur les champs de potentiel KHATIB (1990) avaient été mises en œuvre pour résoudre ce problème mais elles peuvent être affectées par des problèmes de minimums locaux. De plus, de tels ajouts sous la forme d'une fonction de coût, intégrée dans la minimisation, ne garantit pas au système d'être toujours strictement en dehors de ces limites, notamment lorsque le nombre de degrés de liberté n'est plus suffisant pour l'ensemble des tâches. D'autres travaux Gianluca ANTONELLI, INDIVERI et Stefano CHIAVERINI (2009) proposèrent des facteurs de pondération variables pour les tâches afin de les stopper ou les ralentir en fonction d'une borne minimale et maximale, mais de telles méthodes demandent un fin réglage empirique que seule l'expérience permet d'obtenir. Pour répondre à ce problème d'autres approches préfèrent passer par des méthodes numériques¹² et la formulation du problème comme un problème non-linéaire.

2.3.1.2.a Problème non-linéaire

La résolution de la redondance via la mise en place d'un problème non-linéaire a ouvert la voie à de très nombreuses méthodes et approches de résolution au fur et à mesure des années. Cette partie aborde les différentes utilisations de solveurs non-linéaires permettant de résoudre ces problèmes localement et la partie suivante Sec.2.3.2 présentera ceux permettant une résolution globale. Cependant, quel que soit le solveur adopté, la formulation générale d'un problème non-linéaire est la suivante :

$$\begin{cases} \min_x f(x) \\ x \in A \end{cases} \quad (2.50)$$

Ici $f(x)$ est une fonction de coût à minimiser et A représente les différentes contraintes définies par différents critères (tâches définies dans la Sec.2.1)

Selon le type de fonction de coût, des variables ou des contraintes, le problème d'optimisation peut se diviser en différentes classes menant à l'utilisation de différents types de solveurs adaptés à chacune d'entre elles :

- Selon la nature des variables :
 - Variable continue : Problème d'optimisation continue.
 - Variable discrète : Problème d'optimisation combinatoire.
- Selon la nature de la fonction de coût :
 - Fonction de coût non-différentiable.

¹². Afin de ne pas alourdir cette partie, le lecteur intéressé pourra retrouver les principes des algorithmes d'optimisation décrits dans les paragraphes suivants en Annexe.E.

- Fonction de coût différentiable :
 - ◊ Problème d'optimisation linéaire : Problème où la fonction de coût est exprimée comme une combinaison linéaire de ses variables $f(x) = \sum_{i=1}^n c_i x_i$ (où les c_i sont des constantes et donc les contraintes d'égalité et d'inégalité sont linéaires. L'ensemble admissible forme alors un polyèdre convexe).
 - ◊ Problème d'optimisation quadratique.
 - ◊ Problème d'optimisation non-linéaire.
 - Fonction de coût convexe.
 - Fonction de coût non convexe.
- Selon la nature des contraintes admissibles :
 - Problème convexe.
 - Problème non convexe.

2.3.1.2.b Inversion parcimonieuse

Un premier exemple de l'utilisation d'un solveur pour la résolution d'un problème linéaire est l'inversion parcimonieuse. De fait, la formulation de la pseudo-inverse implique la minimisation du mouvement total et de l'énergie dissipée mais également que la vitesse de chaque articulation soit non nulle. Or, pour un système hautement redondant, l'ensemble des articulations peuvent être amenées à se déplacer sans que cela soit désiré. Pour répondre à cette problématique, les travaux sur les robots humanoïdes de GONÇALVES et al. (2016) proposent une inversion parcimonieuse, basée sur la résolution d'un problème linéaire par un algorithme de simplexe, visant à minimiser le nombre d'articulations impliquées dans la tâche. Ceci permet de réduire les perturbations ainsi que les effets dynamiques non pris en compte dans la modélisation cinématique dus aux déplacements de l'ensemble des articulations. Ces travaux seront par la suite développés afin de pouvoir appliquer l'approche de l'inversion parcimonieuse au sein d'un problème QP pour la commande bi-manipulateur TARBOURIECH (2019).

2.3.1.2.c Solveur non-linéaire

Très tôt, les solveurs non-linéaires ont été utilisés pour résoudre le problème de la redondance. Ainsi, dès la fin des années 80, certains auteurs CARRIKER, KHOSLA et KROGH (1989) proposent l'utilisation de l'algorithme NCONF¹³. Peu après, les travaux F. PIN et J.-C. CULIOLI (1990); F. G. PIN et Jean-Christophe CULIOLI (1992) résolvent la redondance d'un système plan par l'optimisation d'une fonction multicritères par l'algorithme de Newton, combiné à une méthode de tunneling LEVY et GÓMEZ (1985) pour éviter les minima locaux. Cette dernière approche fait néanmoins apparaître de nombreux paramètres de pondération, dont le réglage empirique peut être source de difficultés.

Ce type de résolution se retrouve également dans ANCONA (2017), utilisant un algorithme de simplexe pour optimiser un ensemble de trois fonctions objectifs sur un modèle générique de manipulateur mobile. La méthode présentée inverse le modèle géométrique du système et s'adapte facilement à différents types de manipulateurs mobiles. La méthode du simplexe dual est utilisée par ailleurs dans MARAIS, WILLIAMS et PIZARRO (2022) pour les problèmes de petites dimensions, les grandes étant résolues par un algorithme de recuit simulé, dans le but de maximiser la capacité de torsion d'un manipulateur mobile sous-marin.

Plus récemment, les travaux MINNITI et al. (2019) ont proposé une approche de contrôle optimal résolue par un algorithme SLQ (Sequential Linear Quadratic) pour la commande en force d'un manipulateur mobile avec une base en pendule inversé afin de réaliser l'ouverture d'une porte.

COLOMBO et al. (2019) propose également une approche de contrôle MPC non-linéaire permettant de réduire les temps de calcul en modélisant l'ensemble des entrées du système comme plusieurs trajectoires polynomiales paramétrisables. Le MPC intervient alors en optimisant un ensemble de cinq critères en générant les paramètres des polynômes des différentes entrées de commande.

RAKITA, MUTLU et GLEICHER (2018) propose la formulation du problème d'inverse cinématique sous la forme d'une fonction de somme pondérée où chaque terme représente un objectif spécifique. Le problème formulé est

13. Résolution générale d'un problème non-linéaire par utilisation successive de problèmes quadratiques.

suffisamment générique pour être résolu par un algorithme d'optimisation non-linéaire sans pour autant dépendre d'une technique précise.

2.3.1.2.d Solveur QP (Quadratic Programming)

Parmi les problèmes non-linéaires, la formulation de ce dernier comme un problème QP a motivé d'importantes recherches depuis de nombreuses années, tout d'abord dans le cas des manipulateurs seuls, puis dans le cas des manipulateurs mobiles, notamment des robots humanoïdes. La formulation QP permet de facilement intégrer des contraintes d'égalité et d'inégalité au problème DECRÉ et al. (2009) et dispose de différents types de solveurs pour obtenir une solution au problème Yunong ZHANG et MA (2007).

Un problème QP peut se mettre sous la forme :

$$\begin{cases} \min_{\dot{q}} \|J\dot{q} - \dot{p}\|_2 \\ A\dot{q} \leq b, C\dot{q} = d \end{cases} \quad (2.51)$$

Avec A et C des matrices de coefficients et b et d des vecteurs constants représentant les égalités et inégalités auxquelles est soumis le système.

Les travaux Yunong ZHANG, YAN et al. (2016) utilisent un solveur QP pour maximiser la manipulabilité du système, tout en tenant compte des limites articulaires du système.

Basé, sur ces mêmes types de solveurs, il est également possible de résoudre une séquence de tâches en tenant compte de priorités. De fait, KANOUN, Florent LAMIRAUX, WIEBER et al. (2009) ; KANOUN, Florent LAMIRAUX et WIEBER (2011) généralisent la notion de priorisation de tâches proposée par SICILIANO et SLOTINE (1991) afin de prendre en compte des contraintes d'inégalité. Les travaux présentés ici se basent sur la formalisation générale du problème sous la forme de contraintes linéaires et leurs résolutions successives (selon leur priorité) par un solveur QP. Une pile de tâches est définie et chaque tâche est résolue l'une après l'autre, en ajoutant au solveur pour chaque tâche inférieure une contrainte associée aux solutions des tâches supérieures.

Cependant, la résolution du problème est souvent coûteuse en temps et peut induire des problèmes au sein de la commande si cette dernière est à une fréquence trop élevée. Les travaux initiés par KANOUN, Florent LAMIRAUX, WIEBER et al. (2009) ont tout d'abord été améliorés par DE LASA, MORDATCH et HERTZMANN (2010) par la réduction du temps de calcul nécessaire au solveur en diminuant la taille du problème QP à résoudre à chaque nouvelle itération dans la résolution hiérarchique. Puis, ESCANDE, Nicolas MANSARD et WIEBER (2010) ; ESCANDE, Nicolas MANSARD et WIEBER (2014) ont largement amélioré le temps de résolution de l'approche initiale KANOUN, Florent LAMIRAUX, WIEBER et al. (2009) en proposant une solution permettant la résolution du problème en une seule itération plutôt que par une succession de résolutions de problèmes QP. Pour cela, ces travaux se basent sur les méthodes de programmation quadratique hiérarchique (HQP), présentant les priorités entre contraintes directement au sein de la résolution du problème, ainsi que l'utilisation d'une décomposition orthogonale hiérarchique dans l'algorithme d'inversion cinématique.

Les contraintes d'optimisation utilisées dans les travaux précédents furent reformulées dans DEL PRETE, Nicolas MANSARD et al. (2014) en proposant une solution analytique partielle, permettant de convertir le problème d'optimisation de départ en deux sous-problèmes indépendants plus petits, améliorant ainsi les performances de calcul lors de l'optimisation.

Cette méthode de ESCANDE, Nicolas MANSARD et WIEBER (2014) a été appliquée dans STAVRIDIS, FALCO et DOULGERI (2021) pour le pilotage d'un manipulateur mobile holonome bi-bras, pour des tâches de préhension avec l'ajout de l'évitement d'obstacles dynamiques permis par l'utilisation de capteurs de distance.

Les travaux de KANOUN, Florent LAMIRAUX et WIEBER (2011) ont par ailleurs été repris par SIMETTI, CASALINO, TORELLI et al. (2013) ; SIMETTI, CASALINO, TORELLI et al. (2014) qui proposent une amélioration de la méthode pour un calcul plus simple et plus rapide, en basant la résolution du problème sur une séquence de problèmes aux moindres carrés linéairement contraints. Par ailleurs, les auteurs proposent une seconde contribution par l'extension des approches de priorisation de tâches, au cas des manipulateurs mobiles, considérant leurs sous-parties indépendantes par une chaîne cinématique bras-mobile, en utilisant les techniques de programmation dynamique. La

poursuite de ces travaux est présentée dans SIMETTI et CASALINO (2016) et propose l'utilisation des priorisations de tâches dans le cadre de la coordination multi-manipulateurs mobiles en considérant un minimum d'échanges informationnels étant donné le contexte maritime dans lequel ces travaux ont été réalisés.

Une autre manière de résoudre le problème pour N tâches est l'utilisation de pondérations w au sein d'un seul problème QP se présentant sous la forme :

$$\begin{aligned} \min_{\dot{q}} \quad & \sum_{i=1}^N w_i \|J\dot{q} - \dot{p}\|_2. \\ & A\dot{q} \leq b, \quad C\dot{q} = d \end{aligned} \quad (2.52)$$

L'utilisation des pondérations permet de diminuer le temps de calcul imposé par la méthode HQP mais également de permettre une repriorisation des tâches avec des transitions douces en faisant évoluer les différents poids au cours du temps SALINI, PADOIS et BIDAUD (2011). Cependant, le choix des poids et de leurs profils de variation étant arbitraire, cela peut s'avérer complexe à mettre en place pour un bon fonctionnement. Ce même type de formulation QP pondérée est utilisé dans BOUYARMANE et KHEDDAR (2011) afin de réaliser le mouvement d'un robot humanoïde en fonction des ses différents points de contact au sol durant ce mouvement. L'ajout et le retrait de ses points de contact est alors considéré comme des tâches qui évoluent au fil du temps par le biais d'une machine d'état.

Considérant la problématique d'inversion du modèle cinématique, Nicolas MANSARD (2012) propose un comparatif entre l'utilisation de la pseudo inverse et les solveurs QP. La première méthode est rapide mais ne permet pas l'utilisation des contraintes d'inégalités, tandis que la seconde est plus générique mais son coût calculatoire est plus important, d'autant qu'elle souffre des problèmes de mauvais conditionnement lors de la formulation du problème. Les travaux présentent alors une solution basée sur un solveur HQP améliorant la rapidité des solveurs QP classiques et s'affranchissant des problèmes de conditionnement de matrices.

Plus récemment, des travaux Sanghyun KIM et al. (2019) proposent l'utilisation d'un contrôleur dynamique HQP en abordant le problème de la priorisation et repriorisation des tâches d'un manipulateur mobile. Ces derniers proposent l'utilisation de paramètres de transition venant pondérer les tâches au moment où ces dernières sont ajoutées ou supprimées de la pile, en utilisant un profil de variation sous la forme d'une sigmoïde. Ces paramètres de transition permettent d'interpoler les solutions avant et après la modification de la pile et ainsi de supprimer, ajouter ou échanger des tâches à la volée sans faire apparaître de discontinuité dans la commande du système.

Les solveurs QP ont également été utilisés dans la résolution de la formulation des problèmes de commande prédictive MPC IDE et al. (2011); AVANZINI, ZANCHETTIN et ROCCO (2015). Ces derniers permettent de réaliser des planificateurs en temps réel tout en prenant en compte des contraintes d'inégalité dans le contrôleur prédictif.

Une autre approche a été proposée dans DEL PRETE, ROMANO et al. (2014) mettant en œuvre la combinaison des approches de tâches hiérarchiques et la commande optimale. La formulation du problème est résolue par une cascade de problèmes QP. Combiner ces deux méthodes permet de hiérarchiser les différentes tâches sans avoir recours à des fonctions d'activation et de pondération, ainsi qu'à s'affranchir des problèmes de mauvais conditionnement de matrice. Un comparatif des méthodes a ainsi montré que cette approche était plus stable qu'une approche par priorisation de tâches et que la résolution du problème convergeait en moins d'itérations que celle de la commande optimale. Ces travaux ont été améliorés dans ROMANO et al. (2015) par l'utilisation des méthodes de programmation dynamiques afin d'améliorer les temps de résolution du problème.

2.3.2 Approches globales

La seconde grande catégorie d'approches de résolution de la redondance repose sur des approches globales qui tentent de résoudre le problème dans l'ensemble de l'espace afin de trouver une solution optimale à ce dernier. Beaucoup d'entre elles tentent de résoudre ce problème via la planification des actions ou trajectoires des sous-systèmes. De plus, ces dernières ne sont pas nouvelles et apparaissent très tôt dans la littérature¹⁴.

14. Les diverses approches présentées ici reposent pour la plupart sur des approches existantes dans le domaine de la planification et sans liens directs avec celui de la coordination de manipulateurs mobiles. Pour plus de clarté, les différents algorithmes de discrétisation de l'espace et de recherche de chemins, sur lesquels les travaux suivants reposent, ne seront pas présentés ici. Cependant, le lecteur intéressé pourra en retrouver un bref descriptif en Annexe.E

Ainsi, dès le début des années 90, les travaux W. CARRIKER, P. KHOSLA et B. KROGH (1990) tentent de résoudre le problème de la redondance par la planification d'un chemin pour le manipulateur mobile en utilisant un algorithme de recuit simulé METROPOLIS et al. (1953) permettant d'optimiser une fonction de coût mono-objective, puis multi-objective dans des travaux postérieurs W. F. CARRIKER, P. K. KHOSLA et B. H. KROGH (1991). Cette approche a l'avantage de pouvoir se sortir des minimums locaux et peut donc plus facilement atteindre le minimum global de la fonction de coût. Cependant, l'utilisation des méthodes de recuit simulé, basée sur une expérience empirique, nécessite un réglage fin des paramètres pouvant être complexe, pour obtenir un résultat satisfaisant

Outre le problème de résolution de la redondance, d'autres méthodes usent de la planification pour assurer un mouvement réalisable à la base mobile, soumise à des contraintes non-holonomes TANNER et KYRIAKOPOULOS (2000).

Dans BERENSON, James KUFFNER et CHOSET (2008), les auteurs proposent deux phases de planification, la première calcule la configuration optimale du robot à son point de départ et d'arrivée par l'intermédiaire d'un algorithme co-évolutionnaire. Cette optimisation est faite selon une fonction de coût dépendant de la qualité de préhension de la configuration finale, la manipulabilité et la proximité des obstacles. La seconde phase consiste à planifier le chemin entre ces deux configurations par un algorithme RRT.

Les travaux C. HU et al. (2016) traitent, quant à eux, de la génération de la trajectoire de la base mobile dans un environnement incertain, afin de maintenir un certain niveau de manipulabilité au bras tout en maximisant la localisabilité du système dans le but de faire passer le mobile dans les lieux de son espace de travail où ces incertitudes sont les plus faibles, afin que l'incertitude induite sur l'effecteur soit négligeable et que cela n'entrave pas la tâche du robot. Ces travaux génèrent cette trajectoire en optimisant ces deux critères par la méthode des filtres à particules.

Enfin, plus récemment KHAN et al. (2020) exprime le problème de contrôle du manipulateur mobile comme un problème d'optimisation sous contrainte et le résout par un algorithme basé sur un réseau de neurones récurrent (RNN) basé sur une métaheuristique dite "du scarabée" et montre de meilleures performances pour le suivi de trajectoire que les méthodes basées sur les essais particuliers.

2.3.2.1 Algorithmes génétiques

Ce même problème de planification de chemin sera étudié par M. ZHAO, ANSARI et E. S. H. HOU (1994) en utilisant un algorithme génétique permettant d'obtenir le chemin de la base mobile parmi différents ensembles de placements possibles. Dans ce contexte, le système n'est pas soumis à des obstacles ou à des contraintes de préhension, mais l'utilisation des algorithmes génétiques permet de s'absoudre des problèmes de minima locaux rencontrés classiquement avec les approches par gradient.

Dans les années suivantes, M. CHEN et ZALZALA (1997) propose l'utilisation du même type d'algorithme pour planifier la trajectoire optimale du mobile et du manipulateur, via l'optimisation des paramètres polynomiaux de ces dernières, en tenant compte de la dynamique du système et de la contrainte de non-holonomie de la base et en utilisant une fonction de coût basée sur la distance aux obstacles et la manipulabilité du bras.

Par la suite, X.-C. LI et al. (2005) présente une approche hiérarchique où l'ensemble de l'espace de configuration du système est décomposé dans une grille et intégré dans l'algorithme génétique devant optimiser les configurations successives du robot. Dans un premier temps, le chemin de la base mobile, supposée holonome, est réalisé à travers plusieurs obstacles, puis, selon cette première étape, la configuration du manipulateur est recherchée en fonction de sa manipulabilité et de la position du mobile.

Plus tard, VANNOY et XIAO (2006) présente le planificateur RAMP (Real-Time Adaptive Motion Planning) permettant la planification et replanification en temps réel des trajectoires du système, dans un environnement dynamique, en se basant sur un algorithme génétique et une population de trajectoires, qui sont croisées et évoluent en continu afin de respecter la fonction de coût dépendante de la manipulabilité, des obstacles et du temps de réalisation.

Par la suite, RODRIGUEZ et BANFIELD (2018) présente l'utilisation d'un algorithme génétique non-élitiste pour réaliser une optimisation multi-objective sur un manipulateur mobile sous-marin. Dans ce type d'algorithme, la diversité de population n'est pas uniquement maintenue par la mutation des solutions mais aussi par le maintien

d'une population loin de la solution optimale et la limitation de la population "élite" proche de la solution optimale.

Plus récemment, également appliqué au cas des manipulateurs mobiles sous-marins, BANFIELD et RODRIGUEZ (2020) propose une optimisation multi-critères de la manipulabilité et de la vitesse du mouvement du manipulateur, ainsi que des mouvements du sous-marin par l'intermédiaire d'un algorithme génétique hors-ligne pour la planification du chemin de l'effecteur.

Toujours dans le cas de la commande d'un manipulateur mobile sous-marin, TANG et al. (2017) use d'un algorithme génétique dans le but d'optimiser une matrice de pondération utilisée dans l'inversion cinématique afin de minimiser l'énergie consommée par le système. Un ensemble de simulations montre ensuite que cette approche permet un meilleur gain d'énergie que l'utilisation de la matrice d'inertie dans la pondération comme proposée dans Glenn D. WHITE et al. (2009).

2.3.2.2 Échantillonnage de l'espace

Une autre approche de planification se base sur l'échantillonnage de l'espace et la recherche d'un chemin au sein de ce dernier. Pour ce faire, l'espace articulaire ou opérationnel est divisé en un certain nombre de cellules qui sont ensuite connectées les unes aux autres pour former un chemin. La recherche de chemin dans ces espaces est un problème connu depuis longtemps et largement étudié dans le cas de la navigation des mobiles dans un milieu encombré. De ce fait, de très nombreux algorithmes de recherche de chemin, basés sur la théorie des graphes ou des approches stochastiques ont été développés dans ce sens. L'article TUDICO et al. (2017) propose un comparatif et une critique selon les situations d'une partie de ces algorithmes dans le cas de l'utilisation d'un manipulateur mobile holonome afin que ce dernier puisse traverser un environnement non structuré et saisir un objet.

Un premier comparatif des algorithmes de création de chemin en subdivisant l'espace des configurations est donné dans Giuseppe ORIOLO et MONGILLO (2005) qui compare les algorithmes gloutons, RRT-LIKE et RRT-bidirectionnel dans la génération de la trajectoire articulaire du système afin de permettre à l'effecteur de suivre une trajectoire opérationnelle. Il est alors montré que l'algorithme glouton est adapté uniquement aux cas simples et que ceux basés sur le RTT sont globalement plus performants.

La décomposition de l'espace de configuration du mobile sous la forme d'un graphe connecté est utilisée dans THAKAR, FANG et al. (2018) afin de déterminer une trajectoire admissible par le mobile garantissant le passage dans des zones d'intérêt du manipulateur. Pour cela, des zones de préhension admissibles sont définies selon la position de la base, les caractéristiques du manipulateur et la stratégie de préhension adoptée. La recherche de trajectoire optimise cette dernière pour assurer au manipulateur le temps de prendre l'objet avant que le mobile ne sorte de la zone, ceci dans le but de minimiser le temps de réalisation de la tâche du manipulateur mobile. Ces derniers seront poursuivis dans THAKAR, RAJENDRAN et al. (2019) afin de tenir compte dans la planification et la stratégie de préhension de l'incertitude sur la position de l'objet à saisir.

Les travaux de V. PILANIA et K. GUPTA (2014) proposent un planificateur consacré aux manipulateurs mobiles par une méthode hiérarchique. Cette approche se base sur l'utilisation d'un planificateur hiérarchique (HAMP) supposant la connaissance de l'environnement où évolue le manipulateur mobile. Il fonctionne en deux étapes. Premièrement, il utilise le principe de la PRM (Probabilistic roadmap KAVRAKI et al. (1996)) afin de planifier le chemin du mobile dans l'environnement. Dans une seconde étape, à chaque nœud de la route créée, la configuration du manipulateur est planifiée (également à l'aide de la PRM) de façon à éviter toute collision le long du prochain segment de route. Si aucune configuration n'est possible, alors le mobile change de chemin en empruntant un nouveau segment et la seconde étape est répétée. Ceci permet de créer une trajectoire pour le manipulateur mobile sans collision d'obstacles. Par ailleurs, ce planificateur est statistiquement complet et plus rapide que ceux cherchant une solution dans l'espace total de configuration du manipulateur mobile.

Un comparatif de cette approche a ensuite été proposé Vinay PILANIA et Kamal GUPTA (2015a) entre les approches HAMP basées PRM, HAMP basées RRT, HAMP basées BiRRT, RRT et BiRRT montrant ainsi le temps de calcul gagné lors de la planification et la réduction des mouvements inutiles du bras lors du déplacement de la base mobile. Une amélioration de ce planificateur, HAMP-U, a également été proposée dans ces travaux afin de prendre en compte les incertitudes sur la position de la base mobile dans la planification des trajectoires.

Plus récemment, ces travaux ont été complétés en considérant l'incertitude du manipulateur induite par celle de la base dans un nouveau planificateur HAMP-BUA Vinay PILANIA et Kamal GUPTA (2018). De plus, ce dernier se base sur une approche différente d'échantillonnage de l'espace Vinay PILANIA et Kamal GUPTA (2015b) et de recherche de chemin Vinay PILANIA et Kamal GUPTA (2017) permettant une planification plus rapide dans un environnement inconnu. Cependant, dans l'ensemble des travaux concernant le planificateur HAMP et ses dérivées, il n'y a pas de synchronisation de mouvements entre le mobile et le manipulateur, car ce dernier ne change de configuration qu'à chaque nœud de la trajectoire du mobile.

Cette idée de planification hiérarchique basée sur des algorithmes probabilistes a été reprise dans Q. LI et al. (2020) qui propose une approche de planification similaire, OHMP (Optimized Hierarchical Mobile Manipulator Planner), mais dont la stratégie d'échantillonnage de l'espace diffère afin d'en améliorer les performances. Dans ces travaux, une méthode d'échantillonnage hybride (HRBB Z. SUN et al. (2005)) est utilisée à la place d'une densité d'échantillonnage uniforme afin de faciliter la création de chemins dans les espaces de configuration étroits plus difficilement accessibles par les distributions normales utilisées par la PRM.

Une autre approche BURGET, BENNEWITZ et BURGARD (2016) génère les trajectoires des sous-systèmes en tenant compte des contraintes de la tâche en utilisant un algorithme de recherche Bi^2RRT^* et montre de meilleurs résultats que l'utilisation des approches plus classiques RRT^* et $BiRRT^*$.

D'autres types d'algorithmes de recherche probabilistes ont été proposés, tels que le RPA (Random Profil Approach) AKLI et al. (2011) qui génère aléatoirement des trajectoires permettant d'atteindre une configuration donnée du système (posture du mobile et pose du manipulateur) en prenant en compte certaines contraintes comme la manipulabilité du manipulateur et la contrainte de non-holonomie. Des travaux suivants AKLI (2021) ont étendu la méthode en proposant une nouvelle mesure, le MPI (Manipulability Percentage Index) permettant de quantifier en chaque point d'une zone d'arrivée (zone alentour du point objectif) un pourcentage de configuration finale possédant une forte manipulabilité sur l'ensemble des configurations possibles en ce point. Cette zone d'arrivée est entièrement évaluée afin de maximiser le placement de l'ensemble du système à ce point.

Une variante de la méthode PRM a été développée dans Y. YANG et BROCK (2007) ; Y. YANG et BROCK (2010) appelée ERF (Elastic Roadmap Framework) permettant au nœud du graphe et à ses connexions d'évoluer au cours du temps afin de respecter les différentes contraintes du système et de s'adapter à un environnement dynamique. Cependant, les approximations faites par la méthode lui font perdre le caractère statistiquement complet de la méthode PRM.

Plus récemment, le concept de carte de capacité ou CM (capability map) combinant les algorithmes d'optimisation aux algorithmes d'échantillonnage a été proposé dans Heng ZHANG, SHENG et al. (2020). Ce dernier se base sur une carte de capacité représentant la manipulabilité du robot en se basant sur la distribution de manipulabilité du bras autour du mobile appliquée à chaque posture possible du mobile dans l'espace. Une trajectoire pour le mobile et une pour le manipulateur sont ensuite générées par un algorithme de recherche de chemin au sein de la carte afin que le système réalise sa tâche en maximisant sa manipulabilité. Cette approche est également couplée aux méthodes de priorisation de tâches S. CHIAVERINI (1997) afin de pouvoir ajouter de nouvelles contraintes qui seront optimisées localement et non pas intégrées à l'échantillonnage de l'espace de configuration.

2.3.2.3 Méthodes exploitant l'intelligence artificielle

Un autre genre d'approche de résolution de la redondance appliquée au manipulateur mobile sont les méthodes d'intelligence artificielle. Très souvent, ces méthodes n'utilisent pas de modèle ou servent d'estimateurs pour leurs paramètres inconnus ou incertains¹⁵. Depuis plusieurs années déjà, avec l'essor grandissant du machine learning et notamment du deep learning, un ensemble de travaux abordant des méthodes de commande et d'optimisation a été proposé pour les manipulateurs mobiles en se basant sur ce genre de méthodes.

La plus simple des approches d'intelligence artificielle se base sur l'exploitation de systèmes experts. Par exemple, les travaux DEEPAK et PARHI (2016) introduisent l'idée de l'utilisation d'un ensemble d'actions/réponses prédéfinies pour le système. Pour chaque situation, un ensemble de réponses est possible dont le choix est fixé par un coefficient reliant l'action par rapport à la situation. Ce dernier évolue au cours du temps, mis à jour selon la perception du

15. Ce dernier point sera plus amplement détaillé dans la section Sec.2.4.2.11 portant sur l'estimation d'état.

robot.

De manière plus élaborée, d'autres travaux basent leur système de résolution de la redondance ou le choix des paramètres présents dans les méthodes de résolution interne à la commande, par des systèmes d'inférence flous. De tels travaux sont présentés dans G. ANTONELLI et S. CHIAVERINI (2003) où les auteurs proposent que chaque tâche additionnelle soit pondérée par un facteur $\alpha \in [0, 1]$ permettant d'activer, désactiver et changer l'ordre de priorité des tâches. Ceci étant motivé par le fait que certaines tâches peuvent être pertinentes dans certaines situations et non dans d'autres. De plus, l'importance des tâches les unes par rapport aux autres peut également devoir changer en fonction de l'environnement et des perturbations arrivant. Afin de sélectionner les facteurs de la méthode, les auteurs mettent en place un système d'inférence flou basé sur un ensemble de règles prenant en compte la manipulabilité du robot, la distance à ses limites articulaires et les angles de roulis et de tangage.

Parmi les méthodes d'intelligence artificielle, celles reposant sur l'utilisation des réseaux de neurones sont les plus populaires. Elles permettent aussi bien de prendre en compte des modèles cinématiques que dynamiques, ainsi que les différents types de couplages présentés. Cependant, bien que ces approches démontrent leur efficacité à la fois en simulation et de façon expérimentale, elles restent limitées par l'apprentissage réalisé pour une configuration de robot sur un terrain particulier.

Par ailleurs, un réseau de neurones représente par nature une fonction d'approximation adaptée à sa base d'apprentissage. Cependant pour être généralisable, le réseau ne doit pas être surentraîné. Ceci implique alors que les modèles issus de ce genre de réseaux, possèdent des approximations causant des erreurs dans le contrôle des systèmes. Pour pallier ce défaut, la plupart des approches présentées par la suite utilise conjointement un réseau de neurones et une approche adaptative (le plus souvent en utilisant une fonction de Lyapunov) pour construire le contrôleur. Cette dernière permet entre autres de corriger les erreurs d'approximation causées par le réseau.

Z. LI, C. YANG et GU (2007) propose un contrôleur force/mouvement basé sur un réseau de neurones adaptatif pour un manipulateur mobile soumis aux inexactitudes du modèle dynamique. De récents travaux TEKA et al. (2017); RAJA, DUTTA et DASGUPTA (2019) ont montré l'efficacité d'une architecture basée sur l'utilisation des cartes de Kohonen KOHONEN (1982) pour réaliser l'inversion cinématique d'un manipulateur mobile à quatorze degrés de liberté et sa navigation sur un terrain irrégulier. La base d'apprentissage de ces travaux a été générée par l'optimisation du modèle cinématique inverse du rover en s'assurant que pour un point donné sur le terrain, il y ait un point de contact entre ses roues et le terrain.

C.-Y. LEE et al. (2004) propose un contrôleur adaptatif basé sur un réseau de neurones dont les fonctions d'activation sont des fonctions à base radiale (RBFN). Ce type de réseau a également été utilisé sur un manipulateur mobile holonome dans X.-m. TAN, D. ZHAO, YI et D. XU (2008) proposant un contrôle adaptatif hybride entre un modèle cinématique pour le mobile et un modèle dynamique pour le bras ainsi que le réseau RBFN pour l'estimation des perturbations dynamiques et cinématiques non modélisées. Une procédure similaire est également donnée par X.-m. TAN, D. ZHAO, YI, Z.-G. HOU et al. (2007) en utilisant un modèle dynamique global du manipulateur mobile holonome. Ce type de réseau a également très rapidement été utilisé pour l'estimation des paramètres dynamiques du modèle du robot et des perturbations extérieures C. GAO, M. ZHANG et L. SUN (2006).

Au cours de ces dernières années, C.-Y. TSAI et al. (2019) propose l'utilisation d'un réseau de neurones convolutionnel (CNN) pour résoudre le problème de guidage et de préhension d'un manipulateur mobile holonome sans l'utilisation d'un modèle. L'approche se base sur une caméra stéréo comme seul capteur et utilise une base de données d'apprentissage formée par la téléopération d'un expert en milieu fermé. Le coordinateur est ainsi capable de prédire les mouvements à effectuer pour la réalisation de la tâche et affiche un taux de réussite proche de 80%.

Plus récemment, J. JIN et GONG (2021) propose un type de réseau de neurones pour résoudre le problème d'inversion du modèle dynamique sur un manipulateur mobile en exploitant de nouveaux types de fonction d'activation au sein du réseau.

Il existe également une hybridation entre les réseaux de neurones classiques et les systèmes d'apprentissage flous nommée systèmes neuro-flous (FNN). Cette dernière combine les capacités d'apprentissage d'un réseau de neurones mais possède une structure similaire au système flou, basée sur un ensemble de règles expertes qui facilitent l'interprétabilité du résultat CASILLAS et al. (2013); LUGHOFFER (2013). Les réseaux de neurones facilitent ainsi le réglage des gains des règles floues et de leurs fonctions.

Ce type de réseau est utilisé dans CHENG et C.-C. TSAI (2005) de manière hybride avec un contrôle par mode glissant (HSMFNN) dans le second étage dynamique d'une commande par backstepping d'un modèle en couplage interne. Ce réseau est développé pour simuler le contrôle par mode glissant en imposant une surface de glissement à la dynamique du système et satisfaire une stabilité asymptotique. Cette approche permet une bonne régulation du suivi de trajectoire sous l'effet des incertitudes du modèle dynamique et des perturbations externes du système.

Un contrôleur adaptatif par réseau de neurones flou a également été proposé par Y. LIU et Y. LI (2006) dans le cas d'un manipulateur mobile se déplaçant le long d'une pente sans avoir besoin de posséder une connaissance a priori sur les paramètres dynamiques du système et sans tenir compte des limites d'amplitude des perturbations externes.

Par ailleurs, les réseaux de neurones classiques possèdent une structure linéaire qui les contraint à une correspondance statique entre entrées et sorties durant l'apprentissage. Ce genre de structure demande un nombre de neurones très important pour capter le comportement dynamique d'un système. Pour répondre à cela, les réseaux de neurones récurrents (RNN) ont été développés en proposant un cycle dans leur structure. Ces derniers sont donc mieux adaptés à traiter des données variables ou des séries temporelles. Ainsi, ce type de réseau a été utilisé conjointement à une métaheuristique dans KHAN et al. (2020) pour résoudre le contrôle d'un manipulateur mobile exprimé comme un problème d'optimisation sous contraintes.

Un autre type de réseau de neurones s'est développé par la combinaison des réseaux de neurones et de la décomposition de fonctions par la transformation en ondelette (WNN) N. JIN et Derong LIU (2008). Ce dernier présente de meilleurs résultats que les réseaux NN et FNN, notamment en ce qui concerne les systèmes hautement non-linéaires. Il converge plus rapidement avec de plus faibles erreurs d'approximation et une structure de réseaux plus petite. Dans YaoNan WANG, MAI et MAO (2014), les auteurs proposent un nouveau réseau de neurones basé sur une structure récurrente combinant les approches floues et de décomposition en ondelette (RFWNN) et combine les avantages des précédents types de réseau afin de construire un contrôleur adaptatif force/mouvement pour un manipulateur mobile. De fait, ce contrôleur présente de plus faibles erreurs de suivi comparativement au réseau classique NN LIN et GOLDENBERG (2001) et FWNN X. WU, Yaonan WANG et DANG (2014).

2.3.3 Conclusion sur la gestion de la redondance des systèmes

Cette troisième partie a offert une revue des différentes méthodes et approches utilisées de manière générale au sein de la robotique pour la résolution de la redondance. Bien que toutes les méthodes présentées ici n'aient pas originellement été développées pour un manipulateur mobile, ce dernier étant un système hautement redondant peut tout autant en bénéficier. Ceci ouvre alors nombre de perspectives pour cette problématique des manipulateurs mobiles étant donné la diversité des méthodes et des recherches à ce sujet.

De manière générale, les méthodes de résolution de la redondance cherchent à résoudre un problème soumis à un ensemble de contraintes exprimées comme un ensemble d'inégalités ou d'égalités. La problématique de cette recherche se situe principalement dans la taille de l'espace de recherche qui croît d'autant plus que le système possède de nombreux degrés de redondance. Or, plus cet espace est grand, plus le temps de recherche est long. Il devient donc nécessaire de procéder à un compromis entre la qualité de la solution et le temps de calcul pour y accéder.

Deux grandes catégories d'approches se dessinent dans cette partie, les approches locales et les approches globales. Les premières résolvent le problème donné dans un espace restreint autour du point de départ, tandis que les secondes se permettent de chercher dans l'ensemble de l'espace de recherche. De fait, les secondes offrent de meilleurs résultats en terme d'optimalité du résultat que les premières, mais cela au sacrifice d'un temps de calcul important souvent non compatible avec des applications en temps réel ou des systèmes évoluant dans des milieux inconnus et variants. C'est ici le défaut des approches générant des trajectoires par échantillonnage de l'espace, leurs résultats sont souvent très bons, mais si l'espace varie à cause de l'apparition d'un obstacle par exemple, il est nécessaire de tout replanifier. Ce type d'approche, comme les approches génétiques, ne peuvent donc être mises en place de manière efficace que dans des environnements parfaitement structurés et connus.

Parmi les approches globales, les méthodes par intelligence artificielle donnent de bons résultats, pour peu de temps de calcul, une fois le processus d'apprentissage effectué. Par contre, elles nécessitent, soit une quantité de données d'apprentissage importante, soit la définition de règles expertes pouvant être complexes à formuler. Cela

limite fortement la capacité d’adaptabilité de ces approches sans avoir à redéfinir leur base d’apprentissage selon les différents contextes, tâches et plateformes utilisées.

C’est pour ces différentes raisons que les approches globales ne seront pas retenues pour la suite de ces travaux. Bien qu’elles offrent de très bons résultats, elles ne sont pas suffisamment adaptées pour fonctionner en temps réel dans un environnement inconnu et dynamique en considérant la versatilité nécessaire des plateformes pointées au Chapitre.1.

De leur côté, les approches locales souffrent souvent d’un défaut d’optimalité, car il est rare qu’elles parviennent à obtenir le minimum global du problème. En contrepartie, elles obtiennent des solutions bien plus rapidement et peuvent plus facilement s’exprimer de manière analytique. Ces dernières axent principalement leur développement sur les approches de projection dans les noyaux des jacobiniennes. Leur défaut réside dans leur difficulté à tenir compte des contraintes d’inégalité, qui doivent alors s’exprimer comme des fonctions de potentiel permettant la convergence vers un minimum ciblé au lieu de rester en dehors d’une limite. Les méthodes numériques, bien que plus coûteuses en temps de calcul, parviennent plus aisément à résoudre ce problème. Ce dernier point font que ces méthodes, et notamment celles basées sur les solveurs QP, sont les plus étudiées et utilisées de nos jours.

Dans les travaux présentés dans ce mémoire, le choix de la gestion de la redondance s’est porté sur une méthode basée sur la minimisation d’une fonction de coût exprimée comme la somme pondérée des tâches à accomplir. Ce choix est d’abord motivé par sa simplicité de mise en œuvre permettant d’implémenter facilement une approche coordonnée. De plus, la formulation de critères pondérés permet de facilement jouer sur les priorités des uns sur les autres et d’analyser le comportement du système lors des essais. Enfin, l’utilisation d’un solveur numérique non-linéaire facilite la formulation des critères qui n’ont pas besoin d’avoir une expression sous une forme spécifique. En contrepartie, ce choix impose des difficultés de réglage au niveau des pondérations de critères et une répétabilité des solutions qui ne peut être garantie car le solveur se base sur des approximations de l’espace de recherche. Mais cela permet de proposer une première solution simple et efficace permettant la mise en œuvre de l’approche coordonnée proposée dans ces travaux.

Le choix de l’approche de résolution de la redondance sera détaillé et discuté plus en avant dans le prochain chapitre, lorsque la structure de l’approche développée dans ce mémoire, et notamment la partie sur le coordinateur, sera présentée.

2.4 Coordination et navigation en milieu naturel

Les travaux abordant les manipulateurs mobiles en milieu naturel sont bien plus marginaux que ceux abordant ces derniers de manière générique. De fait, très souvent, les questions de dynamique de terrain, d’adhérence, de perturbation du milieu ne sont pas abordées dans les travaux traitant du sujet. De plus, classiquement, les recherches sont effectuées sur de petits robots possédant des actionneurs électriques à faible retard. Or, il est courant en dehors de l’industrie de trouver des systèmes beaucoup plus imposants, actionnés en hydraulique avec des dynamiques particulières VARGA, SHAHIRPOUR et al. (2019) ; VARGA, MEIER et al. (2019). Ainsi, l’utilisation de manipulateurs mobiles pour le domaine agricole impose que l’on s’intéresse à ces aspects. Par exemple, les travaux de VARGA, MEIER et al. (2019) s’intéressent aux manipulateurs mobiles pour des tâches en extérieur. Cependant, dans ce cas, le manipulateur est plan et les irrégularités du terrain ne sont pas prises en compte, simplifiant le système de façon importante. De plus, la linéarisation du système autour de la trajectoire permet de retomber sur un modèle d’état linéaire mais impose de fortes contraintes sur le système, notamment une erreur d’orientation inférieure à 20° qui est assez restrictive selon la vitesse du système, les variations de la trajectoire et les conditions d’adhérence du terrain pouvant amener à de forts glissements dans un tel cadre applicatif.

De fait, par rapport aux objectifs énoncés au chapitre précédent, il est primordial de pouvoir coordonner les manipulateurs mobiles dans ce genre de milieu. Cette dernière partie de l’état de l’art s’intéressera donc aux différents travaux qui ont été effectués sur ce sujet. Par ailleurs, étant donné que ces derniers sont peu nombreux, cette partie étudiera également la navigation des mobiles en milieu extérieur, ce domaine étant le plus exploré, notamment en ce qui concerne la modélisation et la compensation des glissements du terrain, cela permettra de poser une base de développement pour les approches présentées dans le Chapitre 4 de ce mémoire.

2.4.1 Modélisation pour la navigation en environnement naturel

Quel que soit le domaine et le type de robot, la modélisation est une étape cruciale du processus de commande. Cependant, pour être correctement menée, la modélisation nécessite une compréhension fine du fonctionnement du système et de ses interactions. Les modélisations les plus classiques font souvent de nombreuses hypothèses¹⁶ permettant de simplifier le système et par conséquent le modèle. Ainsi, les approches classiques de navigation autonome sont basées sur un mouvement purement cinématique CAMPION, BASTIN et D'ANDREA-NOVEL (1993). Fort heureusement, dans la plupart des cas, ces hypothèses sont vérifiées et les modèles qui en sont issus offrent une commande suffisamment précise des systèmes pour leur permettre d'atteindre leurs objectifs. Malgré tout, ces hypothèses sont souvent vérifiées à cause de l'hyperstructuration du milieu dans lequel évolue le robot. Le cas le plus étudié d'une telle hypothèse est celle du roulement sans glissements¹⁷, qui est aisément maintenu sur un sol plat d'usine, mais beaucoup moins au milieu d'un champ. Or, depuis que la robotique s'intéresse aux applications prévues en milieu extérieur ou naturel, les modèles associés à cette hypothèse deviennent caduques et provoquent d'importantes erreurs dans la commande des systèmes, les empêchant de réaliser leurs tâches.

Les modèles doivent alors évoluer et relâcher nombre de ces hypothèses trop simplificatrices pour de tels contextes d'utilisation. De fait, les modèles cinématiques souvent utilisés à basse vitesse, laissent leur place aux modèles dynamiques plus complets prenant en compte de nombreux effets jugés négligeables par les modèles cinématiques SHOJAEI et al. (2011); NI et J. HU (2017). La modélisation dynamique permet ainsi de prendre en compte la dynamique du robot mais également la dynamique du milieu dans lequel il évolue, ainsi que les interactions entre les deux (adhérence, stabilité, transfert de charge,...).

Ainsi, plusieurs types de modélisations dynamiques et leurs commandes associées ont déjà été proposés dans l'étude des manipulateurs mobiles. L'une d'entre elle a été présentée dans JAE H. CHUNG, STEVEN A. VELINSKY et HESS (1998) sur un système simple possédant un manipulateur plan en simulation. Par ailleurs, elle propose une étude de l'interaction dynamique des sous-systèmes du robot.

Une autre a été proposée dans les travaux YAMAMOTO et X. YUN (1992) où seule la dynamique du mobile était considérée dans le modèle. Ces derniers ont été repris par la suite dans YAMAMOTO et XIAOPING YUN (1996) où l'interaction dynamique des sous-systèmes est étudiée, montrant un gain de performance par la compensation de cette dernière. Les travaux YAMAMOTO et X. YUN (1992) ont également été repris par JIMENEZ-LOZANO et GOODWINE (2011) dans le cas de la navigation d'un manipulateur mobile en terrain irrégulier et étendu à la prise en compte des perturbations induites par la force gravitationnelle et mesurées lorsque le système est en mouvement.

Des travaux similaires N. HOOTSMANS et DUBOWSKY (1991); N. A. M. HOOTSMANS et al. (1992); N. HOOTSMANS, DUBOWSKY et MO (1992) ont été effectués pour la compensation des effets gravitationnels et dynamiques induits par un terrain irrégulier et l'influence réciproque des sous-systèmes par le développement d'un algorithme basé sur la transposée de la jacobienne¹⁸ et la dynamique du véhicule.

BOUKATTAYA, JALLOULI et DAMAK (2012) présente ensuite une commande adaptative passive pour le contrôle dynamique d'un manipulateur mobile. La propriété de passivité des robots rigides permet de ne pas inverser l'estimation de la matrice d'inertie et, de ne pas avoir besoin de mesurer les accélérations ce qui limite les problèmes de conditionnement, de bruit de mesure et de singularité lors de l'inversion. Par ailleurs, il développe une loi adaptative pour l'estimation des paramètres du modèle dynamique et démontre la stabilité de la commande obtenue par Lyapunov.

Plus récemment, les travaux AGUILERA-MARINOVIC, TORRES-TORRITI et AUAT-CHEEIN (2017) proposent la modélisation dynamique générique des manipulateurs mobiles avec un modèle de base en skid-steering extensible pour plusieurs manipulateurs. De plus, ces travaux prennent en compte dans leur modèle la dynamique imposée par les suspensions du système, la perte de contact entre une ou plusieurs roues avec le sol, ainsi que la déformation des roues en contact avec le terrain par l'intégration d'un modèle d'interaction roues/sol, basé sur le calcul de la force de réaction normale et des forces de traction sur chacun des points de contact actifs des roues.

Ces quelques exemples, ainsi que tous les autres déjà évoqués dans les sections précédentes de ce chapitre,

16. Exemple : Vitesse limite maximale, roulement sans glissement, sol plat et lisse,...

17. Voir annexe D.4.1.

18. Modèle statique, voir Annexe.D.8.

montrent l'intérêt que les modèles dynamiques ont suscité dans les travaux leur étant consacrés. Cependant, l'éternelle problématique de ces modèles est leur grande complexité. Plus ils tendent à décrire de façon précise le comportement du système dans son milieu, plus leur complexité et le nombre de paramètres qui les accompagne sont importants. Par ailleurs, nombre de ces paramètres sont souvent inconnus et non mesurables directement. De plus, même si certains estimateurs parviennent à en donner une valeur, les sensibilités des modèles ainsi que des erreurs de mesure peuvent les rendre instables et non utilisables en pratique. Ainsi, la mise en œuvre d'un modèle dynamique porte en elle le compromis entre la complexité du modèle pour être au plus proche de la réalité, et la complexité de mesure et d'estimation pour mettre en œuvre ces modèles de façon robuste.

Face à ce constat, les travaux ont orienté leurs recherches selon deux approches, souvent combinées, afin de tirer le meilleur parti des deux : l'estimation des paramètres pour mettre en œuvre le modèle, et la commande robuste pour pallier aux incertitudes d'estimation et à l'instabilité des modèles et de la mesure.

Or, il existe une seconde voie d'action, préférant la modélisation cinématique malgré ses importants défauts. De fait, l'utilisation des modèles dynamiques est lourde et complexe à mettre en œuvre et la difficulté d'une estimation robuste ne simplifie pas la tâche de construction d'une commande efficace. Par ailleurs, en milieu naturel, les paramètres nécessaires au modèle sont souvent variables temporellement et spatialement AMAR et BIDAUD (1997) et les modélisations telles que les modèles d'interaction roue-sol (dont le plus connu et utilisé est sans doute le modèle de Pacejka PACEJKA (2005)) sont construits empiriquement. Ces deux aspects rendent la tâche d'utilisation des modèles dynamiques en milieu naturel plus ardue encore. La proposition faite par certains travaux est de garder le modèle cinématique comme modèle de commande permettront de construire des commandes simples, tout en le complétant par des variables représentant les effets dynamiques sur le robot sans pour autant chercher à en connaître les causes. Ces approches usent alors d'estimateurs permettant de mesurer ces effets dynamiques pour les rentrer dans le modèle de commande et les compenser. Par rapport à la modélisation dynamique, ce type d'approche a l'avantage d'être bien plus simple et robuste, nécessitant un moins grand nombre de paramètres. En contrepartie, elle ne détaille et n'explique pas les origines des effets dynamiques constatés et sont sujettes à des erreurs de commande si l'estimateur ne parvient pas à une bonne estimation de l'effet dynamique ou s'il n'en mesure qu'une partie. De même, ce principe fonctionne tant que les effets dynamiques ne sont pas trop importants et peuvent être considérés comme des perturbations sur le système. Il n'est donc valable que pour des vitesses de déplacement faibles. Cependant, le cadre applicatif des travaux présentés ici permet de s'y intéresser, car les tâches agricoles sont rarement à vitesse importante.

2.4.2 Estimation des effets dynamiques sur le système

Les effets dynamiques impactant la commande des systèmes sont de différentes natures. Premièrement, il y a les effets propres au système, notamment à cause de la mise en œuvre de vitesses rapides ou de forces dans la tâche. Il y a également les effets d'interaction entre différentes parties du système, comme cela peut arriver entre la base mobile et le manipulateur sur un manipulateur mobile. Ces deux types d'effets dynamiques sont souvent ceux les plus étudiés par la littérature et les travaux fournissant des estimateurs.

Par ailleurs, lorsque le système est utilisé en milieu naturel, deux autres effets viennent s'ajouter aux précédents. Le premier concerne les irrégularités d'un environnement non structuré, provoquant des mouvements de roulis et de tangage, induits par le passage du robot sur des terrains en pente ou bosselés, influant sur la stabilité du système et sa précision. Généralement, cet effet est négligé en dehors d'un milieu naturel, on reste sous l'hypothèse d'un sol plat et lisse rencontré en milieu industriel. Le second effet est la violation de l'hypothèse de roulement sans glissement à cause des conditions d'adhérence du terrain. Ainsi, en milieu naturel, le terrain incohérent sous la dynamique du mobile bouge avec lui et lui impose différents glissements.

Afin de mesurer ces effets dynamiques, plusieurs types d'estimateurs ont été proposés dans la littérature scientifique et sont présentés dans la suite de cette partie¹⁹.

2.4.2.1 Estimation empirique

La première façon de réaliser un estimateur est l'utilisation d'une relation empirique donnée par l'expérience.

19. Plusieurs reviews plus complètes de ce genre d'estimateur peuvent être trouvées dans CHINDAMO, LENZO et GADOLA (2018); TIN LEUNG et al. (2011); RADKE et Z. GAO (2006); W.-H. CHEN, J. YANG et al. (2015).

Un premier estimateur est donné dans MOOSAVIAN et KALANTARI (2008) par l'utilisation d'une relation exponentielle empirique entre l'écart à la trajectoire et la courbure de la trajectoire suivie pour donner une estimation du glissement du véhicule.

Un second estimateur de ce genre est proposé dans YAMAUCHI, NAGATANI et al. (2017) où le glissement longitudinal est donné par une relation empirique reliant le taux de glissement à la vitesse du mobile. Le glissement latéral est fourni par une fonction de régression. Enfin, ces taux de glissement nourrissent un modèle cinématique étendu permettant la compensation de ces erreurs. Toutefois, cette approche ne fonctionne que tant que les conditions du sol restent identiques par rapport à l'apprentissage empirique fait préalablement.

Bien que ces méthodes aient montré des résultats, elles n'en restent pas moins très limitées, car adaptées uniquement à la situation pour laquelle la formulation empirique a été faite. De plus, de tels modèles ne garantissent en rien l'exactitude de l'estimation fournie.

2.4.2.2 Estimation par mesure directe

Une autre forme d'estimateur est proposée par la mesure directe des données nécessaires à l'obtention d'une valeur des paramètres de glissement.

Dans DAR et LONGORIA (2010) les auteurs proposent, dans une première partie, une estimation du glissement par comparaison entre la vitesse réelle du mobile et la vitesse mesurée des odomètres en se basant sur le modèle cinématique. Dans un second temps, les travaux GONZALEZ et al. (2009) formulent une extension de la cinématique d'un mobile à chenilles pour la compensation du glissement longitudinal. L'estimation du taux de glissement est faite par la méthode proposée dans WONG (2008) dont le principe d'estimation est similaire à DAR et LONGORIA (2010).

Trois autres approches basées sur les capteurs sont données dans FARRONI et al. (2015). La première déduit l'angle du glissement au centre du véhicule en comparant l'orientation du véhicule donné par le GPS et celle donnée par l'IMU. La seconde méthode, également présentée dans BEVLY, RYU et GERDES (2006) ; RYU, ROSSETTER et GERDES (2002), repose sur l'utilisation de deux antennes GPS dont la position relative est connue, permettant de déduire directement l'orientation du véhicule sans IMU. La dernière compare la position estimée en utilisant les odomètres et l'IMU, avec celle fournie par le modèle théorique.

Cependant, ce genre d'approches est souvent extrêmement sensible aux bruits de mesure qui ont tendance à les rendre non robustes. De plus, l'utilisation des filtres pour en améliorer les résultats induit des retards dans l'estimation.

2.4.2.3 Estimation par des méthodes de logique floue

Une autre façon d'estimer des paramètres est d'utiliser des méthodes de logique floue qui se basent sur un ensemble de règles empiriques formées par l'expérience. BOUKATTAYA et DAMAK (2019) ayant repris les travaux Glenn D WHITE, BHATT et KROVI (2007) ; Glenn D. WHITE et al. (2009) propose l'utilisation des méthodes à noyaux avec le modèle dynamique du robot pour contrôler un manipulateur mobile. Cependant, ces dernières approches sont sensibles aux incertitudes des paramètres dynamiques du robot, induisant des erreurs de suivi importantes en pratique. BOUKATTAYA et DAMAK (2019) propose de remplacer le contrôleur PD utilisé par un contrôleur PD paramétré par une approche floue, afin d'améliorer la robustesse de l'approche. Ce genre d'utilisation de la logique floue pour le réglage de paramètres a également été mis en œuvre dans B. XU, SAKAGAMI et al. (2005) dans le cadre des manipulateurs mobiles sous-marins.

2.4.2.4 Observateur de Luenberger

L'observateur de Luenberger est un estimateur d'état pour un système linéaire D . G. LUENBERGER (1964) ; D. LUENBERGER (1971). Ce dernier s'utilise lorsqu'une partie de l'état d'un système est inaccessible par la mesure directe mais peut s'obtenir de façon indirecte. Le système est alors dit observable. En pratique, ce n'est pas toujours possible et certains états ne peuvent pas être reconstruits de cette manière.

En considérant la représentation d'état classique d'un système linéaire²⁰, l'observateur de Luenberger se construit

20. Voir Annexe.D.5.

en venant corriger le modèle par la différence entre la sortie constatée et la sortie reconstruite par l'observateur de la manière suivante :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = C\hat{x} + Du \end{cases}. \quad (2.53)$$

Avec L la matrice de gain d'observation.

Avant d'arriver à cette forme, deux autres types d'observateurs, cas particulier de Luenberger, ont vu le jour RADKE et Z. GAO (2006). Le premier est l'estimateur OBE formé par l'équation $\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + L(y - \hat{y})$ qui s'apparente à un filtre passe-bas ou filtre $\alpha\beta\gamma$ et le second est l'estimateur IBE tel que $\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu$ difficilement utilisable en pratique par son absence de retour d'information.

Une version intégrale de l'observateur de Luenberger a également été proposée, le PIO (Proportional Integral Observer) BEALE et SHAFAI (1989); KOENIG et MAMMAR (2002) et GPIO (Generalized Proportional Integral Observer) SIRA-RAMIREZ et OLIVER-SALAZAR (2012) afin d'améliorer l'estimation par l'ajout d'un correctif intégral dans l'équation d'observation :

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) + L_i \int (y - \hat{y}). \quad (2.54)$$

En théorie, l'observateur de Luenberger s'applique à des systèmes linéaires mais une version étendue de l'observateur existe pour les systèmes non-linéaires sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) - L(h(x, u) - h(\hat{x}, u)) \\ \hat{y} = h(\hat{x}, u) \end{cases}. \quad (2.55)$$

Cependant, ce dernier ne possède pas les propriétés de convergence et de stabilité de sa forme linéaire. Il convient donc de passer par d'autres méthodes pour les obtenir, telles que les fonctions de Lyapunov, ou de linéariser localement le système pour retomber sur un système matriciel. Ainsi, pour un système non-linéaire, l'erreur d'estimation est donnée sous la forme :

$$x - \hat{x} = f(x, u) - f(\hat{x}, u) + L(h(x, u) - h(\hat{x}, u)). \quad (2.56)$$

En posant l'hypothèse que x et y peuvent être une approximation locale autour de l'état reconstruit \hat{x} , alors on a :

$$f(x, u) = f(\hat{x}, u) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} (x - \hat{x}), \quad h(x, u) = h(\hat{x}, u) + \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} (x - \hat{x}). \quad (2.57)$$

Les matrices A et C de la forme (2.53) sont alors respectivement calculées comme $\frac{\partial f}{\partial x}$ et $\frac{\partial h}{\partial x}$.

Cette forme se retrouve dans KIENCKE et DAISS (1997) pour l'estimation de l'accélération latérale et de l'angle de glissement d'un véhicule de type voiture. Encore sur un modèle voiture, il est utilisé par CHEROUAT, BRACI et DIOP (2005) pour obtenir une estimation de la vitesse du mobile, du taux de glissement de lacet et de l'angle de glissement latéral. Cependant l'approche proposée est soumise à plusieurs hypothèses et approximations qui rendent son utilisation pratique délicate.

La convergence de l'observateur de Luenberger linéarisé peut facilement être obtenue par un judicieux placement de pôles au sein de la matrice L . HIEMER et al. (2005) propose alors un comparatif avec un observateur avec adaptation d'une fonction de qualité (AQF), également étudié dans VIETINGHOFF, HIEMER et KIENCKE (2005). Dans ce cas, le gain d'observation est déterminé par l'adaptation de la dynamique de l'erreur d'estimation non-linéaire à celle de référence d'un système linéaire. Les travaux effectués ont montré des résultats extrêmement semblables entre les deux approches.

Ce même type d'observateur a été utilisé dans DING et al. (2014) afin d'estimer le coefficient de friction de l'interaction roue-sol et l'angle de glissement. La linéarisation du modèle permet de prouver la convergence du système par le critère de Routh-Hurwitz.

Cependant, les linéarisations locales peuvent amener les observateurs à des approximations sur leurs estimations et provoquer des erreurs dans la commande.

Un comparatif des observateurs de Luenberger avec un observateur HGO (High Gain Observer) KHALIL (2008) a été proposé dans X. GAO et al. (2010) et montre de meilleurs résultats avec l'observateur à grand gain. Cependant, ce type d'approche possède un pic à l'initialisation de l'observateur et le gain élevé provoque une amplification du bruit de mesure sur la sortie Delong LIU (2018).

2.4.2.5 Observateur de perturbations

Contrairement aux estimateurs d'état, les estimateurs de perturbation ne s'intéressent pas à venir estimer l'état réel du système, mais la perturbation qui agit sur ce dernier pour venir ensuite la compenser, souvent par le biais d'une commande adaptative.

Des premiers travaux dans ce domaine H. S. LEE et TOMIZUKA (1996) ; YUH, S. ZHAO et P.-M. LEE (2001) ; SCHRIJVER et VAN DIJK (2002) ont développé le DOB (Disturbance Observer) qui estime une perturbation par différence entre la commande envoyée au système et la commande reconstruite par la mesure de la sortie et le modèle inverse du système. Elle est ensuite réinjectée dans la commande pour être compensées. Les travaux HIRAMATSU et al. (2019) viennent estimer la position longitudinale du CIR à partir d'une commande adaptative basée sur une fonction de Lyapunov et utilisent deux DOB pour compenser les glissements sur les vitesses angulaire et linéaire d'un mobile à chenilles.

Une variation du DOB, le POB (Perturbation Observer) S. KWON et W. K. CHUNG (2003) estime à la fois les perturbations externes du système ainsi que ses erreurs de modèles.

L'observateur EID (Equivalent Input Disturbance) SHE et al. (2008) estime les perturbations du système en utilisant une estimation d'état produite par un observateur de Luenberger et non pas directement à partir du modèle inverse et de la mesure comme pour le DOB.

L'observateur UIO (Unknown Input Observer) HOSTETTER et MEDITCH (1973) utilise le concept du DOB avec la représentation d'état. Il se base sur un observateur de Luenberger avec un état étendu comprenant les variables de perturbation. De fait, l'observateur UIO estime à la fois l'état et la perturbation. Ce type d'observateur pose l'hypothèse de perturbation lentement variable et dont la dérivée peut être négligeable.

Afin d'estimer à la fois les perturbations externes ainsi que les erreurs de modèles (contenues dans les matrices A et B), ZHONG, KUPERMAN et STOBART (2011) propose l'observateur UDE (Uncertainty Disturbance Estimator) de manière similaire au DOB avec l'utilisation d'un filtre pour l'estimation.

Plus récemment, l'observateur ESO (Extended State Observer) a été proposé. Ce dernier, contrairement au précédent, ne repose pas sur l'utilisation d'un modèle et propose une formulation récursive en réinjectant à chaque itération les dynamiques non modélisées du système. La formulation est ainsi plus simple et générique que les observateurs précédents. L'observateur ESO rejoint le paradigme ADRC (Active Disturbance Rejection Control) proposé par Z. GAO (2006) ; J. HAN (2009) qui promeut l'utilisation des observateurs d'état pour la création de commande robuste en lieu et place du traditionnel PID. Une amélioration de l'observateur ESO, le GESO (General Extended State Observer) MIKLOSOVIC, RADKE et Z. GAO (2006) à été proposé afin d'inclure l'estimation de la dérivée des perturbations. L'estimateur ESO a été mis en œuvre plus tard pour le suivi de trajectoire d'un manipulateur mobile NINGYUE, LIYAN et LIUKEPING (2015). Une version améliorée de l'observateur ESO, le IESO a également été proposée par DIAN-SHENG et YJ ZHANG (2017) afin de réduire les problèmes de pic au démarrage de l'observateur et améliorer les performances d'estimation. Ce dernier a été mis en œuvre pour le suivi de trajectoire d'un manipulateur mobile holonome dans C. LI et al. (2021). Dans ces travaux, le IESO est chargé de l'estimation des incertitudes de modèle et des perturbations extérieures tandis que la commande est basée sur un contrôleur par mode glissant.

Parmi les observateurs présentés auparavant, beaucoup d'entre eux sont fondés sur l'utilisation d'un modèle linéaire. Or, bien que la linéarisation reste possible, elle nécessite un important effort de calcul et se trouve source d'erreur lors de l'estimation. Ainsi, une version non-linéaire du DOB, le NDOB est donnée dans W.-H. CHEN, BALLANCE et al. (2000) par l'utilisation de fonctions de Lyapunov ou dans W.-H. CHEN (2004) par la construction

d'une fonction de gain d'observation non-linéaire. Plus récemment une version généralisée du DOB a été construite K.-S. KIM, REW et Soohyun KIM (2010) pour l'estimation de perturbations d'ordre supérieur. On le retrouve également combiné à des méthodes par logique floue E. KIM (2002) ou par réseau de neurones KO et B.-M. HAN (2005); KUWAHARA et MURAKAMI (2022). Un observateur composite, formé par un DOB et un contrôle H_∞ , a également été présenté dans X. WEI et L. GUO (2010). Le contrôle H_∞ permet d'atténuer les perturbations selon une amplitude limite et le DOB se charge de rejeter l'influence des autres.

Une autre approche d'observateur, associée à des systèmes non-linéaires, est proposée dans LENAIN, THUILOT, CARIOU et al. (2006) pour un véhicule à deux trains directeurs. Il intègre au vecteur d'état deux angles de glissement, respectivement sur les trains arrière et avant du véhicule. Cependant cette stratégie fait apparaître une matrice pouvant être facilement singulière, rendant complexe le réglage des gains. Une poursuite de ces travaux est donnée dans LENAIN (2011) en linéarisant le système sous l'hypothèse qu'à basse vitesse, les dérives ne peuvent pas dépasser une dizaine de degrés. Dans les deux cas, une dynamique de décroissance exponentielle est donnée à l'erreur d'estimation afin de forcer l'observateur à converger vers la bonne valeur. Ces travaux sont étendus dans LENAIN, THUILOT, CARIOU et al. (2010) à l'estimation des dérives pour une dynamique rapide du véhicule, l'estimation se base alors sur les dérives cinématiques obtenues par les approches précédentes et le modèle dynamique du système. Une seconde méthode d'estimation est proposée dans LENAIN, THUILOT, HACH et al. (2011) afin de pallier aux singularités qui peuvent survenir dans la précédente méthode lors du déplacement en ligne droite. Par ailleurs, LENAIN, THUILOT, HACH et al. (2011) use de la dynamique des systèmes pour étendre ces observateurs à l'estimation des dérives à haute vitesse. L'approche proposée dans ces différents travaux est reprise dans BAYAR, BERGERMAN, Ahmet B KOKU et al. (2016) pour estimer les vitesses de glissement latéral et longitudinale servant à reconstruire les angles de dérive par la suite.

Plus récemment, LENAIN, DEREMETZ et al. (2017) propose l'estimation des angles de glissement avant et arrière par un observateur non-linéaire, basé sur l'introduction des dérives au sein de son état et une fonction de Lyapunov.

2.4.2.6 Filtre de Kalman

Une méthode populaire pour l'estimation des glissements est l'utilisation d'un filtre de Kalman KALMAN (1960), notamment à cause de sa capacité à prendre en compte les bruits de mesure dans l'estimation.

Alors que les observateurs sont portés sur la reconstruction d'état, les filtres de Kalman sont orientés sur la mesure et le traitement du signal. Fondamentalement, les deux méthodes sont proches. La première se concentre sur les systèmes dynamiques invariants dans le temps, tandis que la seconde est tournée vers les systèmes variables. Le paradigme du filtre de Kalman est la mesure et le filtrage des données. De fait, contrairement à l'observateur de Luenberger, il prend en compte la covariance de la mesure dans la reconstruction de la mesure pour faire une prédiction de l'état futur là où l'observateur ne se base que sur l'erreur d'estimation. Il offre ainsi une matrice de gain d'estimation L variable dans le temps.

Cependant, le filtre de Kalman repose sur de nombreuses hypothèses pour fonctionner correctement, la première étant la forme linéaire du système. Par ailleurs, les bruits de mesure sont supposés blancs et Gaussiens.

Le filtre de Kalman utilise le modèle d'état sous la forme discrétisée suivante :

$$\begin{cases} x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \\ y_k = Cx_k + v_k \end{cases} \quad (2.58)$$

Avec w_{k-1} et v_k respectivement les bruits de processus et de mesure. Ils représentent la confiance portée, soit aux modèles, soit aux mesures effectuées.

Un comparatif entre l'utilisation d'un filtre de Kalman et d'un filtre robuste pour l'estimation d'état dynamique peut être trouvé dans SATTRIA et BEST (2002).

2.4.2.6.a Filtre de Kalman étendu (EKF)

Le filtre EKF est un filtre de Kalman adapté aux systèmes non-linéaires en procédant à une linéarisation autour du point de fonctionnement de manière similaire à ce qui est proposé par l'observateur de Luenberger

étendu. Le filtre EKF est utilisé pour l'estimation de l'angle de glissement du véhicule dans SEN, CHAKRABORTY et SUTRADHAR (2015).

Par ailleurs, on le retrouve dans DAR et LONGORIA (2010) pour l'estimation de l'angle de glissement, de l'orientation et du glissement des deux chenilles d'un véhicule de type char. Afin de s'affranchir des erreurs d'estimation dues aux inconnues du modèle et de ses non-linéarités, la linéarisation dynamique du modèle est approchée par une méthode SNC (State Noise Compensation) SCHUTZ, TAPLEY et BORN (2004).

L'approche B.-C. CHEN et HSIEH (2008) repose sur l'observateur de Luenberger proposé dans FARRELLY et WELLSTEAD (1996) pour l'estimation de la vitesse latérale du mobile en y ajoutant un EKF permettant d'estimer la matrice de gains d'observation, à partir de ses composants soumis à des bruits de mesure et de processus.

Deux autres approches d'estimation des angles de glissement du modèle dynamique par EKF sont proposées dans PIERALICE et al. (2018). La première utilise le modèle de Pacejka pour le calcul des forces latérales, tandis que la seconde traite les forces latérales comme un état caché mais obéissant à une dynamique bruitée et donc un processus de marche aléatoire.

Dans JIANG, VICTORINO et CHARARA (2015) un EKF combiné à un algorithme RLS est développé pour l'estimation des forces verticales appliquées sur les roues d'un véhicule.

Les travaux SEBASTIAN et BEN-TZVI (2019) proposent une estimation des paramètres de glissement génériques pour un mobile à chenilles par un EKF.

Cependant, la linéarisation du système requiert un coût calculatoire important et peut mener à des erreurs d'approximation, ce qui peut limiter l'utilisation pratique des EKF.

2.4.2.6.b Filtre de Kalman sans parfum (UKF)

Pour éviter les différents problèmes liés à la linéarisation des EKF, l'utilisation du filtre de Kalman sans parfum a été proposée JULIER et UHLMANN (2004) car il ne requiert pas de linéarisation explicite du système. A la place, il utilise un ensemble de sigma points propagé par les équations du système non-linéaire. Par ailleurs, il est plus performant en termes de précision, rapidité et de convergence pour un coût calculatoire similaire KANDEPU, FOSS et IMSLAND (2008). C'est pour cette raison que l'UKF a supplanté l'utilisation de l'EKF pour l'estimation des paramètres ces dernières années CHINDAMO, LENZO et GADOLA (2018). Cependant, l'UKF nécessite un réglage fin de plusieurs paramètres concernant les sigma-points (position, nombre, poids,...) pour fonctionner correctement CHINDAMO, LENZO et GADOLA (2018); ANTONOV, FEHN et KUGI (2011).

Un exemple d'utilisation du filtre UKF comparativement à l'EKF pour l'estimation de paramètres dynamiques pour un véhicule lourd est donné dans DAKHLALLAH et al. (2007). Il est également utilisé pour compenser les incertitudes du modèle dynamique dans J. CHEN et al. (2016) ou pour estimer l'état d'un véhicule ANTONOV, FEHN et KUGI (2011); REN et al. (2014). Combiné à un système ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), il permet d'estimer l'angle de glissement d'un véhicule B. L. BOADA, M. J. L. BOADA et DIAZ (2016).

2.4.2.7 Mode glissant

La commande par mode glissant ou à structure variable est une commande robuste non-linéaire basée sur la commutation d'une fonction de variables d'état, permettant de créer une surface de glissement (variété) imposant une dynamique particulière au système correspondant à l'équation de la surface. Une fois le système sur la surface, il "glisse" dessus jusqu'à son point de convergence, en rejetant toute perturbation extérieure le repoussant de sa surface. Ceci tant que les conditions de glissement sont remplies.

Un observateur d'angle de braquage par mode glissant est proposé en simulation dans STOTSKY et HU (1997) sur un véhicule de type voiture sous l'hypothèse d'une amplitude de perturbation limitée. Ces premiers travaux se basent sur un observateur simple avec une fonction de commutation de type *sign*.

Les travaux J. H. CHUNG et S. A. VELINSKY (1998) proposent la modélisation dynamique d'un manipulateur mobile unicycle dans lequel est incorporé le modèle de friction de roue de Dugoff DUGOFF, FANCHER et SEGEL (1970).

Ces travaux font appel à une commande par mode glissant pour venir rejeter les perturbations du système et notamment le glissement des roues.

Les travaux de BOUKATTAYA, DAMAK et JALLOULI (2011) proposent l'utilisation d'un contrôleur adaptatif robuste par mode glissant, sur un modèle dynamique d'un manipulateur mobile plan, afin de rendre le système insensible aux incertitudes du modèle et perturbations extérieures. Par ailleurs, pour limiter les effets de chattering, la fonction de commutation est remplacée par une fonction sigmoïde qui permet une approximation continue du voisinage de la surface de glissement. De plus, pour améliorer les performances du mode glissant, les paramètres inconnus et perturbations sont estimés à travers une loi adaptative basée sur un régulateur PD.

Un observateur par mode glissant du premier ordre est mis en œuvre dans Z. SONG et al. (2008) pour l'estimation des paramètres de glissement sur un véhicule à chenilles. Ce même article propose un comparatif avec un EKF et montre que le mode glissant permet l'obtention de meilleurs résultats.

Les contrôleurs par mode glissant ont également été mis en œuvre dans le domaine de la robotique sous-marine D.-S. KWON et al. (2000) ; G. XU et al. (2007) pour améliorer la robustesse des approches basées sur les modèles dynamiques.

Une combinaison d'un observateur par mode glissant et d'un EKF est donnée dans BAFFET, CHARARA et LECHNER (2009), où le premier est chargé de déterminer les forces sur les roues du véhicule et le second l'angle de glissement de ce dernier.

Un observateur par mode glissant a été mis en œuvre sur un véhicule de type voiture dans W. LIU et al. (2012) pour l'estimation de l'angle de glissement de ce dernier.

2.4.2.8 Commande H_∞

La commande H_∞ fait partie de la catégorie des commandes robustes, capables de rejeter les perturbations appliquées à son système. Le principe de cette commande est la synthèse d'un contrôleur garantissant que la norme de l'erreur de commande (ou de l'erreur d'estimation pour un estimateur H_∞) est inférieure à une limite donnée.

Un exemple d'application de cette commande se retrouve dans RIGOTTI-THOMPSON, TORRES-TORRITI, CHEEIN et al. (2018) s'intéressant à la compensation des perturbations induites par le mouvement d'un mobile sur son chargeur, en comparant trois contrôleurs SISO différents : un contrôleur PD, un contrôleur ADRC basé sur la synthèse d'un observateur de Luenberger, et une commande H_∞ additionnée d'un terme anticipatif sur la vitesse angulaire de tangage. Ces contrôleurs s'intéressent notamment à la compensation de l'angle du chargeur, actionné hydrauliquement, lors du déplacement du système en terrain irrégulier. Le contrôleur H_∞ montre de meilleures performances notamment pour des perturbations à des fréquences importantes.

Ces travaux sont approfondis dans RIGOTTI-THOMPSON, TORRES-TORRITI, AUAT CHEEIN et al. (2020) où deux nouveaux contrôleurs H_∞ sont détaillés et comparés au précédent. Ces deux derniers n'utilisent plus de terme anticipatif et intègrent la mesure de la vitesse angulaire de tangage dans le vecteur d'entrée de la commande H_∞ . Le premier contrôleur, MISO, ne contrôle que l'angle d'inclinaison du godet, tandis que le second contrôleur, MIMO, permet le contrôle de l'épaule et intègre dans la commande les informations angulaires de l'ensemble des articulations. Les résultats expérimentaux obtenus montrent que l'approche SISO avec un terme anticipatif est finalement plus performante que les contrôleurs uniquement basés sur la synthèse d'une commande H_∞ proposée par l'article.

2.4.2.9 Filtre à particules

L'approche proposée dans YAMAUCHI, SUZUKI et NAGATANI (2016) se base sur un modèle de glissement longitudinal pour le déplacement d'un robot en pente, dont les paramètres sont estimés en ligne grâce à un filtre à particules.

2.4.2.10 Estimateur prédictif

D'autres types d'estimateurs, plus rares, passent par l'utilisation de solveurs pour la minimisation de fonctions sur un horizon temporel. C'est le cas notamment de KAYACAN et al. (2018) qui estime les coefficients de traction

en vitesse linéaire et vitesse de lacet à partir d'une minimisation à chaque itération sur un horizon de temps fixe. Une approche similaire est utilisée dans KRAUS et al. (2013) pour l'estimation du coefficient de traction pour un véhicule à un train directeur. La même méthode est utilisée dans FRASCH et al. (2013) pour l'estimation des deux angles de dérive sur les trains avant et arrière d'un véhicule de type voiture.

Cependant, ce type d'estimateur faisant appel à des solveurs pour la minimisation, se révèlent souvent gourmands en puissance de calcul.

2.4.2.11 Estimation par réseau de neurones

Dans ces dernières années, un nouveau type d'estimateur s'est popularisé grâce aux réseaux de neurones, permettant d'estimer les paramètres incertains des manipulateurs mobiles. Mais de tels réseaux ont également été utilisés pour venir estimer les vitesses de mobiles KUWAHARA et MURAKAMI (2022) pour nourrir un observateur de glissement, afin de limiter l'impact des bruits de mesure dans l'estimation du taux de glissement.

Dans le début des années 2000, les travaux LIN et GOLDENBERG (2001) proposent l'utilisation d'un réseau de neurones pour estimer les paramètres dynamiques du manipulateur mobile qui sont considérés comme totalement inconnus.

Plus récemment, MELZI et SABBIONI (2011) propose un réseau de neurones pour venir estimer l'angle de glissement latéral d'un mobile.

R. YU et XIA (2015); W. WEI et al. (2016) proposent ensuite un réseau de neurones à régression générale (GRNN) qui est une forme spécifique des réseaux RBF possédant de bonnes capacités d'apprentissage et d'approximation. Ces derniers obtiennent de bons résultats en terme de précision et de vitesse de calcul, mais la robustesse au changement de condition du sol et de vitesse n'est pas abordée dans ces travaux.

D'autres travaux Y. LIU et Y. LI (2005) utilisent un réseau perceptron multi-couche (MLP) pour estimer le modèle dynamique du manipulateur mobile ainsi qu'un ensemble de gains. Ces derniers sont ensuite combinés à un contrôleur par mode glissant et à des méthodes adaptatives afin de supprimer les perturbations et les erreurs de modèle.

L'un des défauts des contrôles par mode glissant au premier ordre est la nécessité de poser une limite aux perturbations maximales acceptées par le contrôleur. En théorie, cette limite doit être la plus importante possible pour que le régulateur puisse faire face aux perturbations en toutes circonstances mais en pratique, plus cette limite est haute, plus le contrôleur est instable et sensible au bruit. Ce problème fut tout d'abord traité par M. LEE et CHOI (2000) en utilisant un réseau de neurones multi-couches, puis il fut repris par D. XU et al. (2009) en proposant l'utilisation d'un réseau de neurones RBF afin d'estimer la dynamique du système ainsi que les limites de perturbation de l'approche en mode glissant. Il permet ainsi de rejeter les perturbations en présence de limite inconnue. Cependant, il reste soumis à des hypothèses de paramètres fixes et limités, ainsi qu'aux erreurs d'approximation du réseau YaoNan WANG, MAI et MAO (2014).

Cependant, à cause de la nature des réseaux de neurones, la stabilité et la convergence de ces approches ne peuvent être prouvées et garanties. De plus, les performances obtenues sont dépendantes des scénarios d'apprentissage MELZI et SABBIONI (2011); CHINDAMO, LENZO et GADOLA (2018), ce qui limite leur utilisation de façon générique en cas réel. Enfin, elles sont informatiquement coûteuses en ressource afin de mener leur apprentissage BOUKATTAYA, DAMAK et JALLOULI (2011).

2.4.3 Conclusion sur la navigation des robots en milieu naturel

Cette dernière partie a permis un tour d'horizon des différentes approches utilisées pour la navigation en milieu naturel. Ces dernières permettent de robustifier les commandes des robots par l'estimation des incertitudes de modèles, des paramètres dynamiques ou des perturbations extérieures. Ce type d'estimation permet ainsi de pallier aux simplifications mises en œuvre au sein des modèles cinématiques et à la difficulté d'obtention des paramètres dynamiques.

Beaucoup d'entre elles ont été développées pour l'estimation des paramètres dynamiques d'un modèle. Or, en milieu naturel, ce type de paramètres est très souvent variable dans le temps et dans l'espace, ce qui rajoute une difficulté à l'estimation. De plus, nombre de ces approches viennent estimer un paramètre d'adhérence, ou de conditions du sol, ou un paramètre inclus dans un modèle d'interaction roue-sol pour l'estimation des forces de glissement. Or, ces paramètres seuls ne peuvent conduire à une commande précise des systèmes, car ils ne tiennent pas compte des autres incertitudes présentes sur le modèle ou sur le système. Ainsi, les observateurs de perturbations sont plus intéressants que les observateurs de paramètres, car même s'ils n'identifient pas clairement l'origine de la perturbation observée, ils sont capables de la rejeter entièrement et d'assurer une commande précise du système. Or, ce type d'observateur est plus généralement développé pour les modèles cinématiques, alors que les modèles dynamiques sont plus associés à des estimateurs pour l'identification de paramètres.

De fait, les travaux LENAÏN, THUILOT, CARIOU et al. (2006) donnent un exemple de cet argument. L'approche présentée propose l'estimation d'angles de glissement utilisés ensuite dans un modèle cinématique étendu pour corriger la commande. Cependant, l'origine de la perturbation provoquant ces angles de glissement est multiple, provenant à la fois des conditions du sol et de la dynamique du véhicule mais également des erreurs géométriques du mobile (biais dans l'angle du braquage) ou encore des erreurs situées dans le contrôle bas-niveau du robot.

De plus, parmi les nombreuses déclinaisons des observateurs présentés, beaucoup d'entre elles se basent sur un modèle d'état linéaire qui, dans les faits, est difficilement applicable à un robot naviguant en milieu naturel. Il est bien entendu, toujours possible d'user d'une linéarisation en un point particulier, cependant cela impose des temps de calcul plus longs et peut être potentiellement source d'erreurs au sein de l'estimation si la non-linéarité du système est trop importante ou s'il se trouve trop loin de son point de linéarisation.

Ce même constat se retrouve avec les méthodes par filtre de Kalman, qui nécessitent l'utilisation d'un EKF pour les systèmes non-linéaires mais provoquent des erreurs d'estimation. De plus, les UKF n'étant pas soumis à ce problème sont des systèmes complexes à paramétrer, du fait de leurs nombreux réglages. Par ailleurs, ces derniers nécessitent aussi un temps de calcul long.

Ce problème lié au temps de calcul, se retrouve également pour les estimateurs prédictifs ou les filtres à particules malgré les bons résultats qu'ils obtiennent.

Les estimations empiriques et par mesure directes ont l'intérêt d'être extrêmement simples à mettre en œuvre mais elles souffrent, soit du défaut dû à l'imperfection du modèle empirique qu'elles utilisent (ou trop contraint sur ses hypothèses), soit de l'influence des bruits de mesure qui imposent l'utilisation d'un filtrage important pour des résultats assez faibles.

Les estimateurs par réseaux de neurones ont montré de très bons résultats dans les estimations mais souffrent du défaut de généralisation dû à leur méthode d'apprentissage et à la quantité de données nécessaires pour nourrir ces réseaux. Ils ne sont donc pas utilisables en milieu naturel où l'ensemble des conditions d'utilisation est très variable et qui ne peut garantir que le robot évoluera à tout instant dans un contexte proche de sa base d'apprentissage.

Enfin, les méthodes par mode glissant ou H_∞ liées aux approches robustes sont limitées par des hypothèses sur l'amplitude maximale des perturbations rejetées. De plus, leur nature discontinue provoque des phénomènes de chattering qu'il est difficile d'éliminer sans réaliser une approximation au sein de l'estimation.

Ainsi, aucune méthode parmi celles présentées n'est parfaite et ces dernières doivent souvent faire un compromis entre précision de l'estimation et temps de calcul. De plus, parmi les méthodes présentées, peu d'entre elles ont fait leurs preuves de façon expérimentale et encore moins sur des systèmes naviguant en milieu naturel, ce qui permet plus difficilement de conclure sur la pertinence de chacune d'entre elles. Par ailleurs, par rapport aux objectifs présentés dans le premier chapitre de ce mémoire, aucune des méthodes présentées ici n'a montré sa capacité à s'adapter à différents types de modèle de systèmes. De fait, la généralisation souhaitée dans la méthode de coordination doit aussi s'accompagner de généricité au sein de la navigation pour rester dans un paradigme aussi large que possible. Enfin, beaucoup des méthodes présentées ici s'intéressent aux robots mobiles qui sont les systèmes les plus soumis aux perturbations, notamment ceux évoluant en extérieur, mais aucune ne propose d'approche pour les manipulateurs. Ce dernier point peut se comprendre du fait que, traditionnellement, ces systèmes sont dans des environnements hyperstructurés, sans aucune perturbation extérieure. Mais la présence d'un manipulateur sur un

robot mobile pour travailler dans le milieu agricole rend ce point de vue caduque.

Ainsi, pour ces raisons et pour garder la simplicité des modèles, les méthodes de navigation présentées en chapitre.4 se baseront sur des modèles cinématiques. Par ailleurs, les méthodes d'observation retenues seront portées sur les observateurs de perturbations non-linéaires tels que ceux proposés dans LENAIN, THUILOT, CARIOU et al. (2006) ; LENAIN, DEREMETZ et al. (2017) qui, en plus de leur simplicité de mise en œuvre, ont fait leurs preuves à de nombreuses reprises dans le cadre du suivi de trajectoire en milieu naturel.

2.5 Conclusion générale sur l'état de l'art

Dans ce chapitre, une revue globale de l'état de l'art concernant les manipulateurs mobiles a été présentée. Cette dernière s'est structurée selon quatre axes. Le premier concerne la notion de tâche pour un robot et celles, plus spécifiquement, qui ont été développées pour les manipulateurs mobiles. Le second concerne les degrés de couplage des différentes méthodes de coordination des manipulateurs mobiles présentes dans la littérature. Sur ce point, un manque dans la littérature est apparu et une classification de ces méthodes selon leur degré de couplage a été proposée afin de le combler. Une troisième partie a ensuite été consacrée aux méthodes de résolution de la redondance pour les systèmes hautement redondants. Enfin, la dernière partie s'est intéressée à la navigation des manipulateurs mobiles en milieu naturel et plus largement, aux méthodes d'estimation permettant de compenser les incertitudes de modèle, les dynamiques inconnues et les perturbations extérieures. La littérature étant assez faible à ce sujet concernant les manipulateurs mobiles, l'état de l'art s'est davantage ouvert à la robotique en général et notamment, la robotique mobile, afin d'offrir un panel de méthodes pouvant se transposer aux manipulateurs mobiles.

Comme cela a été étudié dans les parties précédentes, la littérature scientifique proposant des contributions à la résolution des problématiques exposées dans le chapitre précédent (Sec.1.5.2) est vaste. Afin de ne pas surcharger cette dernière conclusion, une conclusion intermédiaire pour chaque partie de la bibliographie a été proposée, afin de discuter des différents points concernant uniquement ces parties. Cependant, de manière générale, deux importantes critiques pourront être faites à la littérature scientifique attachée au sujet des manipulateurs mobiles.

La première concerne la validation des approches proposées. De fait, une grande partie des approches proposées a été validée uniquement par la simulation et n'a pas été appliquée de façon expérimentale sur une machine. Cela est notamment vrai pour les approches utilisant des modélisations dynamiques des différents systèmes du robot. Ceci se remarque également pour les méthodes d'estimation où beaucoup de travaux proposent des résultats simulés. Ainsi, il est raisonnable de questionner la pertinence de ces approches et de leurs performances annoncées alors qu'elles n'ont pas été validées de façon expérimentale. Or, ce point est crucial dans la problématique qui encadre les travaux présentés dans ce manuscrit, car la différence existante entre un modèle de simulation et les conditions expérimentales d'un robot travaillant en environnement agricole peut être très importante. Ainsi, nombre de ces approches ne proposent pas d'évaluation de leurs performances sous l'influence d'un robot possédant des dynamiques lentes (voire très lente dans le cas d'actionnement hydraulique par exemple), ou encore sous l'influence d'un terrain glissant et irrégulier, ainsi que les erreurs occasionnées par les mesures capteurs.

La seconde critique apportée sur ces différents travaux se situe sur le choix des plateformes d'essais dans le cas d'études des manipulateurs mobiles à roues non-holonomes. De fait, la quasi-totalité des approches développées et reportées dans ce document, ont été appliquées directement sur une unique et même structure de manipulateur mobile : un manipulateur sériel (de six ou sept degrés de liberté) sur une base mobile de type unicycle. De fait, ce point est problématique au vu des enjeux présentés en introduction sur le besoin de manipulateurs mobiles de structures diverses, voire de structure variable ou mêmes de système multi-robots, pour les besoins de la robotique agricole. Ce point est néanmoins compréhensible au vu de la majorité des travaux effectués sur des approches en couplage interne, car ces dernières sont naturellement applicables au manipulateur mobile possédant une base de type unicycle.

Ainsi, après l'étude de l'ensemble des travaux présentés dans ce chapitre, il est possible de pointer plusieurs manques dans la littérature scientifique à ce jour :

- Une classification complète concernant la coordination des manipulateurs mobiles. Pour ce point, une proposition de classification a été faite dans la seconde partie de ce chapitre Sec.2.2.

- De manière plus générale, aucun des travaux réalisés à ce jour ne s'est intéressé à la coordination d'un manipulateur mobile naviguant dans un milieu naturel, en proposant des résultats expérimentaux, et aucun ne présente d'utilisation de ce type de robot dans un cas applicatif.
- Les travaux s'intéressant à la généralisation des méthodes de coordination pour des robots de structure diverse ou de structure variable sont quasiment inexistantes. De plus, le peu de travaux ayant amorcé un début de réponse à cette problématique ne sont pas allés au bout du problème et ont, encore moins, proposé de résultats expérimentaux, que ce soit sur une ou plusieurs plateformes.
- Il n'existe pas à ce jour de travaux comparatifs concernant les approches de coordination selon la classification présentée en Sec.2.2.

L'objectif principal des travaux présentés dans la suite de ce mémoire est de proposer des réponses ou des éléments de réponse pour ces différents manques en fonction des contraintes, attentes et problématiques précédemment décrites en introduction. Le premier de ces points ayant déjà été abordé dans le début de ce chapitre, le reste de ce mémoire se focalisera sur le second et troisième point, en proposant des approches validées expérimentalement. Le dernier point n'a pas été abordé dans ces travaux et reste une question ouverte à ce jour.

Chapitre 3

Approche de coordination générique pour un manipulateur mobile

SOMMAIRE DU CHAPITRE

3.1	Approche de coordination	106
3.1.1	Architecture de la coordination	106
3.1.1.1	Définition des écarts ε	106
3.1.1.2	Principe de coordination	106
3.1.2	Etage de coordination : Optimisation des écarts aux trajectoires	108
3.1.2.1	Définition des critères de coordination	109
3.1.2.2	Fonction de coordination	110
3.1.2.3	L'hypothèse de convergence des sous-systèmes	111
3.2	Modélisation des sous-systèmes	112
3.2.1	Notations	112
3.2.2	Modélisation d'un mobile dans le repère de Frenet	112
3.2.2.1	Cas de la vitesse linéaire	113
3.2.2.2	Cas de la vitesse angulaire	115
3.2.2.3	Modèle au point M	115
3.2.3	Modélisation des manipulateurs dans le repère de Frenet	117
3.2.3.1	Vitesse de rotation du repère de Frenet dans le repère monde	117
3.2.3.2	Calcul de la vitesse linéaire	118
3.2.3.3	Calcul de la vitesse angulaire	121
3.2.3.4	Modèle final	122
3.3	Résultats en simulation et expérimentaux	123
3.3.1	Présentation des essais canoniques	123
3.3.1.1	Présentation des manipulateurs mobiles	124
3.3.1.2	Présentation des scénarios	124
3.3.2	Expérimentations et simulations	125
3.3.2.1	Scénario n°1 sur le MM1 : Expérimentation	125
3.3.2.2	Scénario n°1 avec différentes structures de manipulateur mobile	128
3.3.2.3	Influence des critères	131
3.3.2.4	Variation de la méthode	135
3.3.2.5	Scénario n°5 sur le MM4	137
3.4	Conclusion	141

Ce troisième chapitre aborde le premier des deux axes importants autour desquels s'articulent ces travaux de thèse. Il traite de la mise en œuvre d'une approche de coordination adaptable à différentes structures de manipulateur mobile en se basant sur les considérations développées dans les chapitres précédents. Il détaillera l'approche retenue ainsi que les modélisations nécessaires à sa mise en œuvre. Une troisième partie présentera les différents résultats

obtenues en simulation et de façon expérimentale afin de mesurer l'intérêt et les performances de l'approche dans différents contextes et situations.

3.1 Approche de coordination

3.1.1 Architecture de la coordination

Comme il a été discuté dans la conclusion de l'état de l'art sur les approches de coordination Sec.2.2.3, l'approche proposée dans ce mémoire pour développer une coordination générique des manipulateurs mobiles repose sur une méthode en couplage externe, et plus particulièrement en approche par modèle générique. De plus, comme détaillé à la Sec.2.3.3, le choix de la méthode de résolution de la redondance s'est porté sur un solveur numérique pour la minimisation d'une fonction de coordination où chaque tâche est représentée comme un critère pondéré au sein de cette fonction.

L'architecture de coordination proposée dans ces travaux est inspirée des travaux ANCONA (2017) qui pointent ce besoin de généralité évoqué précédemment et posent les bases des approches permettant de la rendre possible. Cependant plusieurs lacunes, notamment sur la prise en compte de la non-holonomie de la base mobile, la gestion des contrôleurs des sous-parties, ou le contrôle de plusieurs manipulateurs, empêchent les travaux en question de les rendre réalisables en pratique. Ils n'en posent pas moins les principes sur lesquels s'appuie l'architecture de coordination proposée ici.

3.1.1.1 Définition des écarts ε

Ainsi les travaux ANCONA (2017) introduisent le concept de paramètres de redondance généralisés dont on retrouve une expression particularisée dans les travaux M. MASHALI, R. ALQASEMI et R. DUBEY (2014). Ces derniers peuvent être assimilés aux paramètres permettant de contraindre totalement le système dans son espace opérationnel. Bien entendu, le choix d'un ensemble de ces paramètres n'est pas absolu et plusieurs combinaisons possibles permettent de répondre au critère de contrainte. De fait, pour les travaux présentés dans la suite, le choix de ces paramètres s'est porté sur le plus simple possible : les coordonnées opérationnelles de chacun des sous-systèmes dans leur espace de référence propre.

Par la suite, ces coordonnées seront appelées écarts et notées ε , car elles correspondent à l'écart entre la pose du point de contrôle courant et celle du repère de référence. L'appellation "écart" se justifie notamment par l'utilisation du repère de Frenet¹ (Voir Fig.3.1), où classiquement la commande emmène le point de contrôle à se confondre avec l'origine du repère. De fait, dans ces commandes, déplacer le point de contrôle en dehors de ces origines implique de définir un écart désiré. L'appellation peut ensuite se généraliser à tout type de repère en définissant l'écart nul comme le point d'origine et tout autre écart comme une position arbitraire dans l'espace.

Chaque sous-système est alors caractérisé par la position de son point de contrôle dans son espace de référence grâce un ensemble d'écarts. Ces derniers servent ici de base à la résolution de la redondance du système. Il sont considérés comme des paramètres de redondance génériques, car la position du point de contrôle du système n'est pas directement dépendante des capacités de mobilité des sous systèmes. De fait, tous les sous-systèmes peuvent s'envisager sous la représentation de leur point de contrôle respectif sans avoir à en détailler les caractéristiques particulières. L'objectif de l'architecture proposée est donc de coordonner l'ensemble des points de contrôle des sous-systèmes, sans avoir à en connaître leurs spécificités, ces dernières étant alors laissées à la gestion des contrôleurs dédiés.

3.1.1.2 Principe de coordination

La coordination proposée reprend le principe de suivi multi-trajectoire présenté dans MAZUR et PŁASKONKA (2012); M. MASHALI, R. ALQASEMI et R. DUBEY (2014); VARGA, SHAHIRPOUR et al. (2019) permettant de faire varier l'importance d'un sous-système par rapport à un autre en fonction du besoin. Par ailleurs, le choix d'un suivi de trajectoire dans le repère de Frenet, assumé pour les travaux de cette thèse, est purement arbitraire et n'est imposé

1. Pour rappel, le repère de Frenet est le repère attaché à la trajectoire suivi par le robot. Il se déplace le long de la trajectoire selon une abscisse curviligne s . Pour plus de détails, voir annexeC.4.4.1

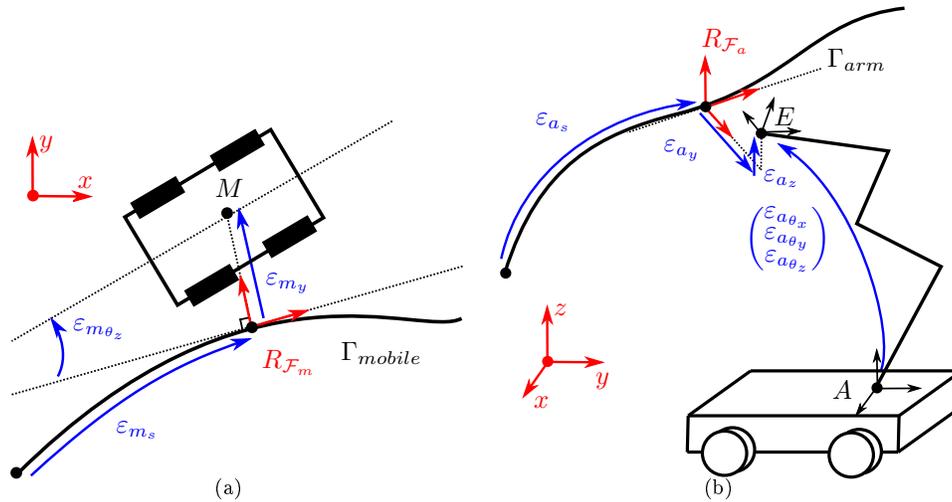


FIGURE 3.1 – (a) Représentation schématique des écarts ε_m du mobile dans le repère de Frenet. (b) Représentation schématique des écarts ε_a du manipulateur dans le repère de Frenet.

que par les commandes et modèles choisis pour chacun des sous-systèmes. Dans le cas d'études présenté ici, la commande du mobile est une commande par backstepping associée à sa trajectoire dans le repère de Frenet et celle du manipulateur, une commande par retour d'état attachée à sa trajectoire dans le repère de Frenet. Cependant, la souplesse de l'approche permet d'envisager d'autres commandes dans d'autres repères de référence tels qu'une commande par fonction transverse dans le repère absolu pour le mobile ou par retour d'état dans le repère absolu pour le manipulateur. Pour la suite de ce chapitre, les espaces de référence seront considérés par rapport à un repère de Frenet attaché à une trajectoire pour chacun des systèmes mais il est important de garder à l'esprit que rien ne contredit l'utilisation d'une autre référence si désiré.

Le schéma de l'architecture dans son ensemble est représenté en Fig.3.2(a) et son principe suit les points suivants :

- Dans un premier temps, une trajectoire de référence est assignée à chaque sous-système du manipulateur mobile à partir desquels sont définis les ensembles d'écarts associés à chaque point de contrôle des sous-parties (Voir Fig.3.1).
- Par ailleurs, un ensemble de critères est proposé pour la réalisation de la tâche souhaitée.
- Une fois les espaces de référence et les critères définis, ils sont envoyés au sein de l'étage de coordination. Ce dernier est le cœur de l'approche et fournit au système un comportement global cohérent. Pour ce faire, il opère une optimisation de l'ensemble des critères en fournissant des écarts désirés pour chaque sous-système à partir des écarts courants dans leur espace de référence.
- Enfin, lorsque les écarts désirés de chaque système sont déterminés par l'étage de coordination, ils sont envoyés à leurs commandes respectives, chargées de réguler le mieux possible la position du point de contrôle de chacun des sous-systèmes sur l'écart désiré en tenant compte de leur spécificités propres.

Le premier des avantages d'une telle architecture réside dans sa réactivité. De fait, la trajectoire donnée par le système donne une direction de déplacement grossière au système qui adapte sa position par rapport à cette dernière en fonction des circonstances. Par exemple, si le système rencontre un obstacle, il suffit que le coordinateur fasse varier l'écart désiré dans la commande du sous-système concerné pour réussir à l'éviter. Il n'est donc pas nécessaire de devoir recalculer la trajectoire si la planification originale est mise en défaut.

Par ailleurs, la variation des écarts désirés de la commande par le coordinateur crée une frontière entre la coordination et la commande des sous-systèmes. De fait, quel que soit le type de coordinateur utilisé, il n'intervient pas au sein de la commande et ne remet pas en cause sa stabilité ou ses performances de convergence, si ces dernières ont été établies. Ainsi, si l'on borne les écarts admissibles à la sortie de l'étage de coordination, le comportement des

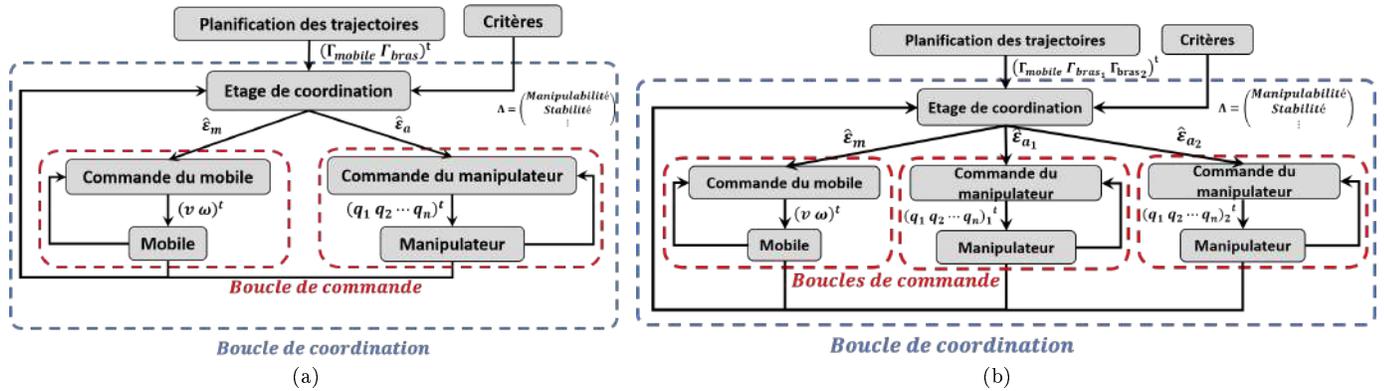


FIGURE 3.2 – (a) Schéma de principe de l'approche de coordination pour un manipulateur mobile mono-bras. (b) Schéma de principe de l'approche de coordination pour un manipulateur mobile bi-bras.

sous-systèmes reste déterministe, même si la coordination globale est en échec. Cet aspect concernant la stabilité est également à l'avantage des approches en couplage externe car la stabilité des approches en couplage interne peut être directement impactée par le type de commande choisi. Pour certaines approches de résolution de redondance, notamment numérique ou basées sur des méthodes d'apprentissage, il peut devenir délicat d'obtenir une preuve de stabilité.

Enfin, l'approche proposée présente autant de boucles de commande que de sous-systèmes mais une unique boucle de coordination. Le dernier intérêt de cette architecture réside alors dans cette structure qui, par nature, est très flexible. Le rajout d'un nouveau manipulateur, par exemple, ne nécessite que le rajout de sa boucle de commande propre, d'une nouvelle trajectoire de référence et de l'augmentation de la dimension de l'optimisation de l'étage de coordination comme montré sur la figure Fig.3.2(b). Ainsi, ce type d'architecture de coordination répond amplement aux besoins de flexibilité des manipulateurs mobiles agricoles pointés en introduction.

3.1.2 Etage de coordination : Optimisation des écarts aux trajectoires

Cette section aborde plus précisément le fonctionnement du coordinateur (Voir Fig.3.3) formant le cœur de la boucle de coordination, ainsi que la définition de plusieurs critères et de la fonction de coordination formant le socle de l'optimisation permettant la résolution de la redondance du système. Ce derniers nécessitent trois entrées :

- Un ensemble de n critères notés $\Lambda = (\lambda_1 \ \lambda_2 \ \dots \ \lambda_n)^t$ qui se divisent en deux catégories :
 - ◊ Les critères de sécurité qui ne sont là que pour assurer la sécurité des sous-systèmes et du manipulateur mobile. Ces derniers forment un socle indépendant de la tâche qu'il convient de conserver pour garantir l'intégrité du robot. On y retrouvera, par exemple, la limite articulaire du manipulateur, sa manipulabilité, l'évitement d'obstacles, le maintien de stabilité... Ces derniers ne sont pas bornés afin de pouvoir prendre le pas sur les critères de tâche si nécessaire.
 - ◊ Les critères de tâche qui peuvent aisément évoluer au long d'une même tâche en étant activés ou désactivés voire même priorisés les uns par rapport aux autres. On y retrouvera, par exemple, des critères de positionnement ou d'orientation. Ces derniers sont bornés à l'unité, afin de pouvoir être surpassés par les critères de sécurité en cas de problème et de pouvoir les homogénéiser pour les prioriser.
- L'espace de référence (associé ici à des trajectoires) de chacun des sous-systèmes servant de référence à la génération des écarts.
- L'état courant du système noté Q dont l'étage de coordination va se servir pour optimiser au mieux l'ensemble des critères donnés selon la situation actuelle du robot et fournir ensuite un état désiré \hat{Q} .

Ainsi, à partir de l'état du système Q et des critères Λ , le coordinateur génère un état optimal \hat{Q} exprimé selon les coordonnées généralisées du système. Cet état est ensuite exprimé selon un ensemble de points désirés correspondant chacun à une sous-partie du système et une trajectoire de référence. Ces points de contrôle exprimés comme un vecteur d'écart par rapport à la référence sont ensuite envoyés à la commande comme consigne.

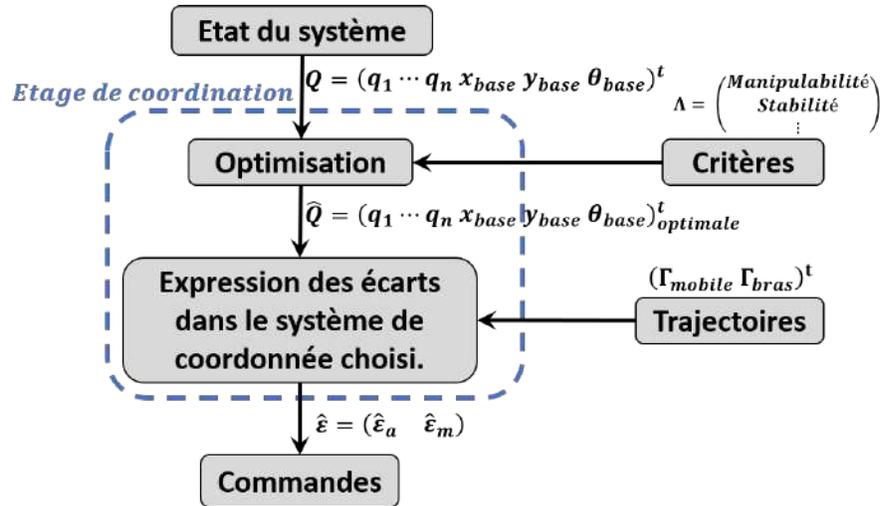


FIGURE 3.3 – Schéma de principe du coordinateur

3.1.2.1 Définition des critères de coordination

Dans la suite de cette partie sont présentés différents critères qui ont été utilisés tout au long des travaux de thèse. Ces derniers forment un socle de critères minimal permettant à l'architecture de fonctionner bien que d'autres ont été ajoutés par la suite pour certains cas particuliers². Ainsi, les différents critères présentés ici serviront de base de travail pour les différentes simulations et expérimentations présentés dans les prochaines parties et permettront l'analyse du comportement du robot selon les différents cas. L'ensemble minimal défini ici propose les trois critères définis dans les paragraphes ci-dessous³.

3.1.2.1.a Limite articulaire

Le premier des critères de cet ensemble est celui des limites articulaires du manipulateur. Il est absolument nécessaire afin de garantir l'intégrité du bras et ne pas risquer de dépasser ses limites physiques. Ce critère ne devant prendre une importance prépondérante que lors de l'approche d'une limite et ne devant pas affecter la tâche en deçà de cette limite, il est exprimé selon l'équation suivante (3.1) et représenté sur la figure Fig.3.4(c) :

$$\lambda_l = \sum_{i=0}^n \left(\frac{\sinh(b_1(q_i - q_{m_i}))}{\sinh(b_1 q_{l_i})} \right)^2. \quad (3.1)$$

Avec $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$, $q_{m_i} = cst = (q_{max_i} + q_{min_i})/2$, $q_{l_i} = cst = (q_{max_i} - q_{min_i})/2$ et $2b_1$ (avec $b_1 > 0$) la valeur de la tangente au point ($q = q_{max}$, $\lambda_l = 1$). q_{max_i} et q_{min_i} sont similaires aux valeurs maximale et minimale des limites articulaires définies par l'utilisateur, au delà la valeur du critère dépasse 1 et prend le pas sur les critères de tâche. Selon cette formulation, lorsque $q_i = q_{m_i}$, donc que la valeur articulaire courante se trouve au centre des deux limites, le critère est nul. L'intérêt de cette formulation pour ce critère est de former une vallée relativement plate pour que l'optimisation ne force pas l'articulation vers le centre de sa plage limites.

3.1.2.1.b Manipulabilité

Le second critère de cet ensemble est la manipulabilité du bras comme défini dans Tsuneo YOSHIKAWA (1985) tel que $w = \sqrt{\det(JJ^t)}$ avec J la Jacobienne du manipulateur. Il représente la mesure de dextérité du manipulateur.

². Les expressions de ces derniers seront alors abordés au moment de leur utilisation. Cependant bien qu'ils ne soient pas détaillés ici, ils suivent les mêmes principes que ceux formés par le socle minimal

³. Par ailleurs, l'ensemble minimal présenté ici n'est pas exhaustif et peut varier selon les besoins de la tâche et la nature des sous-systèmes.

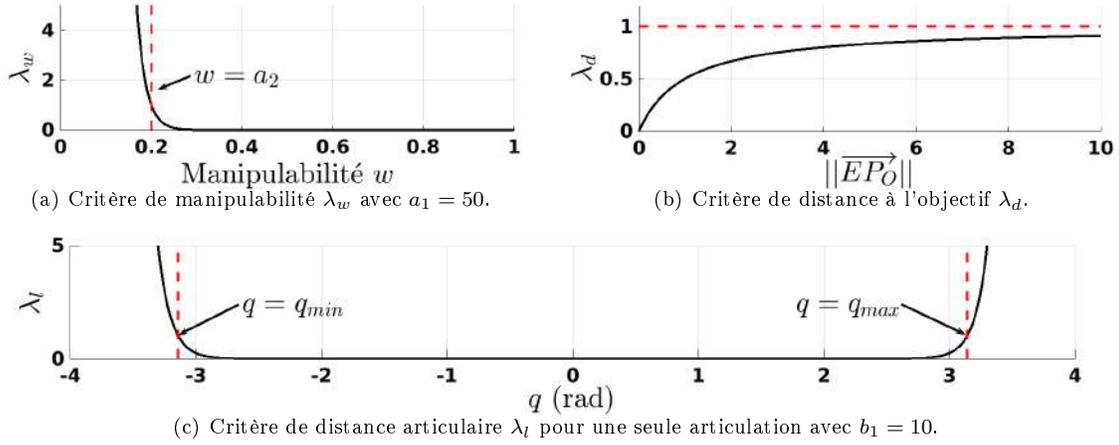


FIGURE 3.4 – Aspect des différents critères proposés pour la fonction de coordination.

Lorsque la mesure s'approche de zéro, l'espace de contrôle du manipulateur perd une dimension induisant une singularité mathématique et la perte du contrôle du manipulateur. Il est donc primordial de garder cette valeur constamment au-dessus d'un certain seuil afin de pouvoir contrôler le manipulateur. Également, loin des singularités, ce critère ne doit pas impacter la tâche et laisser le manipulateur libre de ses mouvements. Dans ce but, l'expression donnée à ce critère est la suivante :

$$\lambda_w = e^{-a_1(w-a_2)}. \quad (3.2)$$

Avec a_1 le paramètre influençant la pente du critère et a_2 la valeur de manipulabilité au-delà de laquelle le critère va croître de façon exponentielle et dépasser les critères de tâche. Il est donc similaire à la limite minimale de manipulabilité autorisée par le système. L'allure obtenue du critère est donnée en figure Fig.3.4(a).

3.1.2.1.c Distance à l'objectif

Le dernier critère de cet ensemble est un critère de tâche et non de sécurité. En effet, toute tâche nécessite un objectif qui motive le mouvement pour sa réalisation (suivre des trajectoires GPS, suivre des contours ou des formes, atteindre des objets en évitant des obstacles,...) Un point objectif est défini comme étant un point à atteindre ou suivre pour réaliser correctement la tâche. Pour assurer au système de suivre ce point, un dernier critère de distance à l'objectif est donc ajouté à l'ensemble minimal forçant l'effecteur à maintenir la distance minimale entre lui et l'objectif autant que possible (voir Fig.3.4(b)). Afin de borner l'expression de ce critère, il est défini de la façon suivante :

$$\lambda_d = 1 - \frac{1}{1 + \|\overrightarrow{EP_O}\|}. \quad (3.3)$$

Dans ce dernier, $\|\overrightarrow{EP_O}\|$ est la distance Euclidienne entre la position de l'effecteur E et le point objectif P_O .

3.1.2.2 Fonction de coordination

Une fois les critères définis, ils sont intégrés dans la fonction de coordination définie comme une somme pondérée :

$$\mathcal{F}_c = \alpha_w \lambda_w + \alpha_l \lambda_l + \alpha_d \lambda_d. \quad (3.4)$$

Cette forme, tirée de CLEARY et TESAR (1990), permet de très facilement ajouter ou retirer des critères de la fonction en réglant la valeur de leur α respectif à 1 ou 0 mais aussi de prioriser les critères entre eux en réglant différemment les poids α de cette fonction. Similairement à ce qui a été proposé dans Uwe M NASSAL (1996); RAKITA, MUTLU et GLEICHER (2018), cette fonction est ensuite optimisée par un algorithme d'optimisation non linéaire basé sur une descente de gradient afin d'obtenir un minimum à l'ensemble des critères proposés.

3.1.2.3 L'hypothèse de convergence des sous-systèmes

Il est important de retenir que l'architecture de coordination proposée ici se base sur l'hypothèse suivante :

Hypothesis 3.1. *Chaque commande de sous-système composant le manipulateur mobile est capable de faire converger le point de contrôle de ce dernier sur le point désiré fourni par le coordinateur dans un temps minimal.*

De fait, il a été mentionné que le coordinateur s'occupait de la gestion des points de contrôle de chaque sous-système et que leurs lois de contrôle respectives devaient s'efforcer de faire converger le système sur ce point de contrôle en prenant en compte leurs spécificités propres⁴.

Afin de garantir formellement cette hypothèse, il serait nécessaire que le temps de convergence de chaque sous-système soit inférieur à une boucle de coordination, ce qui peut engendrer des temps trop courts pour être réalisables notamment sur des systèmes lents ou possédant de fortes contraintes⁵. Il est alors nécessaire d'assumer que la position de l'ensemble des sous-systèmes ne peut avoir exactement convergé sur son point de contrôle à chaque pas de la boucle de coordination. Ainsi, rien ne garantit formellement que cette hypothèse soit vérifiée en toutes circonstances ce qui peut amener à mettre en défaut l'approche de coordination.

En effet, les critères donnés au coordinateur sont optimisés par ce dernier pour les positions qu'il obtient à la fin de l'optimisation, et donc pour les positions désirées de chacun des sous-systèmes et uniquement pour cette configuration des points de contrôle. Ainsi, plus les sous-systèmes seront éloignés de leurs positions désirées, plus les critères optimisés par le coordinateur seront en réalité dégradés. Il est donc primordial que chaque sous-système reste proche de son point désiré pour maintenir les critères proches des niveaux désirés sans les dégrader de façon à mettre en défaut la tâche ou le système.

L'exemple de la manipulabilité peut être pris afin de montrer ce problème. Dans le cas où la position réelle et la position désirée du mobile seraient différentes, la manipulabilité peut diminuer voire devenir nulle alors même que le critère optimisé reste élevé. En effet, la position optimale de l'effecteur \hat{E} est calculée depuis la position optimale du mobile \hat{M} à partir de l'ensemble des coordonnées généralisées optimales \hat{q} du manipulateur. Or, pour que la valeur réelle de la manipulabilité soit en accord avec le critère λ_w , lui-même basé sur la valeur de \hat{q} , cela implique que le mobile soit parfaitement positionné sur \hat{M} et l'effecteur sur \hat{E} . Ceci est largement accessible pour l'effecteur grâce à la haute dynamique et l'holonomie du manipulateur. Cependant, le mobile converge lentement et peut être loin de son point d'arrivée tandis que le manipulateur a atteint le sien. Il se crée alors un décalage entre la configuration des points de contrôle réels et la configurations des points de contrôle désirés obtenu par le coordinateur. Une telle distance peut alors engendrer une singularité pour le manipulateur.

Néanmoins, bien que cette position semble assez restrictive, elle doit être nuancée. De fait, même si l'ensemble des sous-systèmes n'a pas convergé parfaitement, cela n'implique pas une mise en défaut complète de la coordination. En effet, cette dernière possède une certaine robustesse à l'imprécision de ses sous-systèmes. Ainsi, dans l'exemple précédent, le manipulateur entrera en singularité uniquement si la base mobile est très éloignée de son point désiré. Si elle n'est que peu éloignée, la manipulabilité sera dégradée mais n'empêchera pas le système de se comporter de façon adéquate. Ainsi, la configuration optimale du manipulateur mobile fournie par le coordinateur n'a pas la nécessité d'être strictement respectée pour que la tâche finale du système soit réalisés. Seule l'optimalité en sera dégradée.

Cependant, même si la coordination peut être robuste face à ce type de problème, il convient de trouver des solutions pour le cas où la convergence ne peut être réalisée dans un temps suffisant et où la position des sous-systèmes se retrouve trop éloignée de leur position initialement désirée. Dans le cadre de cette thèse, deux solutions différentes ont été proposées et mises en œuvre :

- La première solution est le calcul de la position désirée de l'effecteur (ou l'expression de ses écarts) ε_a^d sur la position réelle du mobile M et non pas sur sa position optimale \hat{M} fournie par l'optimisation. Ainsi, la position du manipulateur utilisera la configuration optimale \hat{Q} fournie par le coordinateur pour ses positions articulaires (donc le critère optimal de λ_w calculé) mais en prenant en compte la position réelle du mobile. De fait, il est garanti que le manipulateur ne tombera pas en singularité car le point désiré ε_a^d sera forcément

4. Ce qui justifie d'autant plus l'utilisation de commandes séparées où chacune est adaptée à son propre sous-système et ses caractéristiques pour respecter au mieux cette hypothèse

5. Cette hypothèse est plus facilement respectée par le manipulateur qui est un système rapide et sans contrainte, que par le mobile soumis à la contrainte de non-holonomie et possédant des dynamiques lentes

accessible avec la valeur du critère λ_w obtenue par l'optimisation. Cependant, cela décale le point ε_a^d d'aussi loin que M et \hat{M} sont éloignés et dégrade donc la précision du suivi tant que M et \hat{M} ne sont pas en parfait accord.

Cette première solution a été mise en œuvre dans la dernière partie de ce chapitre sur les expérimentations et simulations canoniques démontrant le fonctionnement et l'intérêt de l'architecture de coordination proposée.

- La seconde solution consiste à limiter l'exploration de chacun des sous-systèmes dans leur espace de référence. Cela revient donc à restreindre le prochain point désiré à une certaine distance du point désiré précédent. Ceci n'est pas restrictif du fait que les sous-systèmes ne sont pas en mesure de se déplacer très loin de leur position courante en un laps de temps très court, même pour des systèmes avec une bonne dynamique. Par ailleurs, cela contraint l'espace de recherche de l'optimisation et réduit son temps de calcul. De plus, cela empêche les sauts alternés entre deux minimums locaux (notamment dans le cas de positions miroir) qui tendent à faire osciller le manipulateur mobile. Pour finir, restreindre l'exploration de ces points permet à la coordination de rester dans la zone où sa robustesse à l'imprécision suffit pour que la tâche finale soit réalisée. Cette seconde solution a été mise en œuvre dans les expérimentations et essais présentés dans le cas applicatif du Chapitre.5. Elle est également expérimentée et discutée dans la dernière partie de ce chapitre.

3.2 Modélisation des sous-systèmes

Cette seconde partie présente la modélisation des sous-systèmes du manipulateur mobile dans le repère de Frenet ayant servi à la mise en place des différentes commandes pour les expérimentations et simulations présentées à la fin de ce chapitre. Pour cela, elle fait appel aux notions liées au repère de Frenet telles que la base de Frenet, les vecteurs tangents, normaux et binormaux ainsi que la torsion et la courbure. L'ensemble de ces notions sont rappelées et définies en annexe.C.4. Les commandes associées aux différents sous-systèmes n'étant pas directement liées à l'architecture de coordination et étant issues de la littérature scientifique, elles sont présentées en annexe A.

3.2.1 Notations

Avant d'aborder la modélisation des systèmes, cette partie présente les différentes notations utilisées dans cette section.

- Matrice de passage : la matrice de passage d'un repère R_1 exprimée dans un repère R_2 sera notée $P_{R_2}^{R_1}$.
- Matrice de rotation : la matrice de rotation d'un repère R_1 exprimée dans un repère R_2 sera notée $R_{R_2}^{R_1}$.
- Repère d'écriture : La notation $a|_{R_1}$ signifie que la quantité a (position, vitesse,...) est exprimé dans le repère R_1 .
- Repère de référence : La notation de vitesse d'un point P écrite $v_{P \in R_1/R_2}$ signifie que l'on considère la vitesse de translation du point P , appartenant à R_1 , par rapport à R_2 . La vitesse de rotation est notée ω .
- Abscisse curviligne : L'abscisse curviligne de la trajectoire est notée s .
- Courbure : La courbure de la trajectoire est notée c . La courbure de la trajectoire à un abscisse curviligne s est notée $c(s)$.
- Torsion : La torsion de la trajectoire est notée τ . La torsion de la trajectoire à un abscisse curviligne s est notée $\tau(s)$.

3.2.2 Modélisation d'un mobile dans le repère de Frenet

Cette première section aborde la modélisation générale d'un mobile dans le repère de Frenet. Pour ce faire, cette dernière se basera sur le schéma présenté à la figure Fig.3.5 avec les notations suivantes :

- Γ : Trajectoire à suivre.
- R : Le point d'application de la vitesse du mobile.

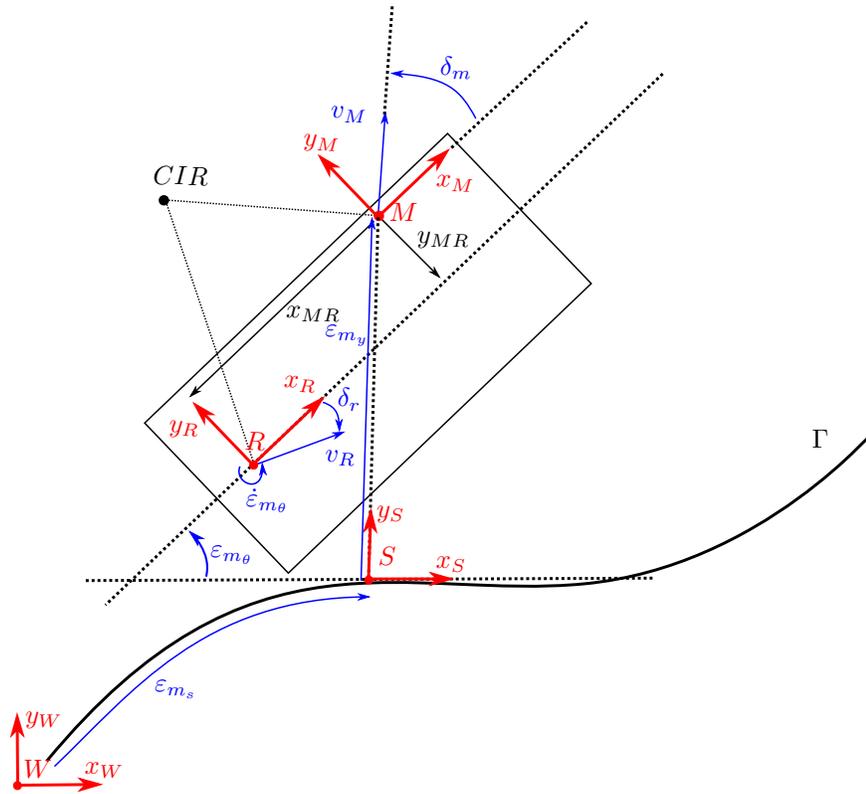


FIGURE 3.5 – Schéma générique de modélisation du point de contrôle d'un mobile dans le repère de Frenet.

- M : point de contrôle du mobile.
- S : Point de la trajectoire le plus proche du point de contrôle M du mobile.
- $R_W = (W, x_W, y_W)$: Repère monde.
- $R_R = (R, x_R, y_R)$: Repère associé au point R .
- $R_S = (S, x_S, y_S)$: Repère de Frenet au point S de la trajectoire.
- $R_M = (M, x_M, y_M)$: Repère associé au point M .
- $\dot{\epsilon}_{m\theta}$: Vitesse angulaire du mobile dans le repère de Frenet
- $\epsilon_{m\theta}$: Écart angulaire du véhicule entre son orientation et le repère de Frenet.
- ϵ_{my} : Écart latéral à la trajectoire du mobile suivant l'axe y_S .
- δ_r Angle apparent de la vitesse du point R dans le repère R_R .
- δ_m Angle apparent de la vitesse du point M dans le repère R_M .
- x_{MR} : Position du repère R_R dans le repère R_M projeté sur l'axe x_R .
- y_{MR} : Position du repère R_R dans le repère R_M projeté sur l'axe y_R .
- v_R : Vitesse linéaire du véhicule au point R .
- v_M : Vitesse linéaire du véhicule au point M .

Dans un premier temps, il est nécessaire d'établir la relation entre les vitesses de l'état du système ainsi que les vitesses angulaires et linéaires du mobile au point M . Pour plus de simplicité, cette relation sera étudiée en deux parties séparées, l'une traitant de la vitesse linéaire et l'autre de la vitesse angulaire. Le modèle complet sera finalement présenté en fin de partie.

3.2.2.1 Cas de la vitesse linéaire

Premièrement, la vitesse linéaire du point M peut s'exprimer comme :

$$v_{M \in R_M / R_W} \Big|_{R_W} = \frac{d\overrightarrow{WM}}{dt} \Big|_{R_W} . \quad (3.5)$$

Or, par composition des vitesses, il est obtenu :

$$\overrightarrow{WM} \Big|_{R_W} = \overrightarrow{WS} \Big|_{R_W} + \overrightarrow{SM} \Big|_{R_W} = \overrightarrow{WS} \Big|_{R_W} + R_{R_W}^{R_S} \overrightarrow{SM} \Big|_{R_S}. \quad (3.6)$$

D'où finalement :

$$\begin{aligned} v_{M \in R_M / R_W} \Big|_{R_W} &= \frac{d\overrightarrow{WM}}{dt} \Big|_{R_W} \\ &= \frac{d\overrightarrow{WS}}{dt} \Big|_{R_W} + \frac{d}{dt} \left(R_{R_W}^{R_S} \overrightarrow{SM} \Big|_{R_S} \right) \\ &= \frac{d\overrightarrow{WS}}{dt} \Big|_{R_W} + \frac{d}{dt} \left(R_{R_W}^{R_S} \right) \overrightarrow{SM} \Big|_{R_S} + R_{R_W}^{R_S} \frac{d\overrightarrow{SM}}{dt} \Big|_{R_S}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Le premier terme de cette expression peut aussi s'écrire comme :

$$\frac{d\overrightarrow{WS}}{dt} \Big|_{R_S} = \begin{pmatrix} \dot{s} \\ 0 \end{pmatrix} \implies \frac{d\overrightarrow{WS}}{dt} \Big|_{R_W} = R_{R_W}^{R_S} \begin{pmatrix} \dot{s} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (3.8)$$

De plus, il est connu que :

$$\overrightarrow{SM} \Big|_{R_S} = \begin{pmatrix} 0 \\ \varepsilon_{m_y} \end{pmatrix} \implies \frac{d\overrightarrow{SM}}{dt} \Big|_{R_S} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\varepsilon}_{m_y} \end{pmatrix}. \quad (3.9)$$

Enfin, d'après l'annexe C.2, il est également établi que :

$$\frac{d}{dt} \left(R_{R_W}^{R_S} \right) = [\omega_{R_S / R_W} \Big|_{R_W}]_{\times} R_{R_W}^{R_S}. \quad (3.10)$$

De ce fait, d'après les équations (3.7), (3.8), (3.9) et (3.10) la vitesse du point M dans le repère monde peut s'écrire :

$$\begin{aligned} \frac{d\overrightarrow{WM}}{dt} \Big|_{R_W} &= R_{R_W}^{R_S} \begin{pmatrix} \dot{s} \\ 0 \end{pmatrix} + R_{R_W}^{R_S} \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\varepsilon}_{m_y} \end{pmatrix} + R_{R_W}^{R_S} R_{R_S}^{R_W} [\omega_{R_S / R_W} \Big|_{R_W}]_{\times} R_{R_W}^{R_S} \frac{d\overrightarrow{SM}}{dt} \Big|_{R_S} \\ &= R_{R_W}^{R_S} \left(\begin{pmatrix} \dot{s} \\ \dot{\varepsilon}_{m_y} \end{pmatrix} + [\omega_{R_S / R_W} \Big|_{R_S}]_{\times} \frac{d\overrightarrow{SM}}{dt} \Big|_{R_S} \right) \\ &= R_{R_W}^{R_S} \left(\begin{pmatrix} \dot{s} \\ \dot{\varepsilon}_{m_y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -c\dot{s} \\ c\dot{s} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \varepsilon_{m_y} \end{pmatrix} \right) \\ &= R_{R_W}^{R_S} \begin{pmatrix} \dot{s}(1 - c\varepsilon_{m_y}) \\ \dot{\varepsilon}_{m_y} \end{pmatrix} \\ &= R_{R_W}^{R_S} \begin{pmatrix} 1 - c\varepsilon_{m_y} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{s} \\ \dot{\varepsilon}_{m_y} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Par ailleurs, la vitesse au point M dans le repère mobile peut aussi s'écrire comme :

$$v_{M \in R_M / R_W} \Big|_{R_R} = R_{R_M}^{R_W} v_{M \in R_M / R_W} \Big|_{R_W} = \begin{pmatrix} v_M \cos(\delta_m) \\ v_M \sin(\delta_m) \end{pmatrix}. \quad (3.12)$$

Il est donc possible d'en déduire que :

$$\begin{aligned}
\begin{pmatrix} v_M \cos(\delta_m) \\ v_M \sin(\delta_m) \end{pmatrix} &= R_{R_M}^{R_W} R_{R_S}^{R_S} \begin{pmatrix} 1 - c\varepsilon_{m_y} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{s} \\ \dot{\varepsilon}_{m_y} \end{pmatrix} \\
\begin{pmatrix} \dot{s} \\ \dot{\varepsilon}_{m_y} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \frac{1}{1 - c\varepsilon_{m_y}} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} R_{R_S}^{R_M} \begin{pmatrix} v_M \cos(\delta_m) \\ v_M \sin(\delta_m) \end{pmatrix} \\
\begin{pmatrix} \dot{s} \\ \dot{\varepsilon}_{m_y} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \frac{1}{1 - c\varepsilon_{m_y}} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\varepsilon_{m_\theta}) & -\sin(\varepsilon_{m_\theta}) \\ \sin(\varepsilon_{m_\theta}) & \cos(\varepsilon_{m_\theta}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_M \cos(\delta_m) \\ v_M \sin(\delta_m) \end{pmatrix}.
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Avec $R_{R_S}^{R_M} = \begin{pmatrix} \cos(\varepsilon_{m_\theta}) & -\sin(\varepsilon_{m_\theta}) \\ \sin(\varepsilon_{m_\theta}) & \cos(\varepsilon_{m_\theta}) \end{pmatrix}$ la matrice de rotation entre le repère de Frenet et le repère mobile.

3.2.2.2 Cas de la vitesse angulaire

Par composition des vitesses, la vitesse angulaire du point M peut s'écrire :

$$\omega_{R_R/R_W} = \omega_{R_R/R_S} + \omega_{R_S/R_W} \iff \omega = \dot{\varepsilon}_{m_\theta} + c\dot{s}. \tag{3.14}$$

Cette dernière équation peut alors se réécrire :

$$\omega = \begin{pmatrix} c & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{s} \\ \dot{\varepsilon}_{m_y} \\ \dot{\varepsilon}_{m_\theta} \end{pmatrix}. \tag{3.15}$$

Avec la commande de vitesse angulaire ω et la vitesse angulaire du repère de Frenet $c\dot{s}$.

3.2.2.3 Modèle au point M

Finalement, en rassemblant les équations (3.13) et (3.15) le modèle cinématique au point M peut s'écrire :

$$\begin{pmatrix} v_M \cos(\delta_m) \\ v_M \sin(\delta_m) \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{R_S}^{R_M} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 - c\varepsilon_{m_y} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ c & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{s} \\ \dot{\varepsilon}_{m_y} \\ \dot{\varepsilon}_{m_\theta} \end{pmatrix}. \tag{3.16}$$

Autrement écrite, cette équation peut prendre la forme :

$$\begin{pmatrix} \dot{s} \\ \dot{\varepsilon}_{m_y} \\ \dot{\varepsilon}_{m_\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{v_M}{1 - c\varepsilon_{m_y}} \cos(\delta_m + \varepsilon_{m_\theta}) \\ v_M \sin(\delta_m + \varepsilon_{m_\theta}) \\ \omega - \frac{c v_M}{1 - c\varepsilon_{m_y}} \cos(\delta_m + \varepsilon_{m_\theta}) \end{pmatrix}. \tag{3.17}$$

Sachant que la vitesse commandée est appliquée au point R , il est nécessaire d'établir la relation entre les vitesses au point R et au point M afin de compléter ce modèle. Pour cela, il est possible d'exprimer :

$$\dot{X}_{M \in R_R/R_W} \Big|_{R_M} = R_{R_R}^{R_M} \dot{X}_{M \in R_R/R_W} \Big|_{R_R}. \tag{3.18}$$

Ensuite, par composition des vitesses :

$$\begin{aligned}
\dot{X}_{M \in R_R/R_W} \Big|_{R_R} &= \begin{pmatrix} v_{R \in R_R/R_W} \Big|_{R_R} + \begin{pmatrix} y_{MR} \\ -x_{MR} \end{pmatrix} \omega_{R_R/R_W} \Big|_{R_R} \\ \omega_{R_R/R_W} \Big|_{R_R} \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} 1 & 0 & y_{MR} \\ 0 & 1 & -x_{MR} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{R \in R_R/R_W} \Big|_{R_R} \\ \omega_{R_R/R_W} \Big|_{R_R} \end{pmatrix} \\
&= \mathcal{B} \dot{X}_{R \in R_R/R_W} \Big|_{R_R}.
\end{aligned} \tag{3.19}$$

Donc

$$\dot{X}_{M \in R_R/R_W} \Big|_{R_M} = R_{R_R}^{R_M} \mathcal{B} \dot{X}_{R \in R_R/R_W} \Big|_{R_R}. \quad (3.20)$$

Et finalement

$$\begin{pmatrix} v_M \cos(\delta_m) \\ v_M \sin(\delta_m) \\ \omega \end{pmatrix} = R_{R_R}^{R_M} \mathcal{B} \begin{pmatrix} v_R \cos(\delta_r) \\ v_R \sin(\delta_r) \\ \omega \end{pmatrix}. \quad (3.21)$$

A partir de ce point et sans perdre en généralité, l'hypothèse de l'angle nul entre le repère du point M et le repère du point R est posée. Cela peut se justifier car les deux repères étant rigidement liés, il n'y a que peu d'intérêt, a priori, à avoir un repère au point M possédant une orientation non nulle par rapport au repère attaché au point R .

Ainsi, en prenant compte de cette nouvelle hypothèse, l'équation (3.21) peut être réécrite comme :

$$\begin{pmatrix} v_M \cos(\delta_m) \\ v_M \sin(\delta_m) \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_R \cos(\delta_r) + \omega y_{MR} \\ v_R \sin(\delta_r) - \omega x_{MR} \\ \omega \end{pmatrix}. \quad (3.22)$$

De l'équation (3.22), il est possible d'extraire :

$$\begin{cases} v_M &= \frac{v_R \cos(\delta_r) + \omega y_{MR}}{\cos(\delta_m)} \\ v_M &= \frac{v_R \sin(\delta_r) - \omega x_{MR}}{\sin(\delta_m)} \end{cases}. \quad (3.23)$$

La première de ces deux équations est ensuite réinjectée dans (3.17). En effet, si l'on considère que le robot ne sera pas amené à réaliser des courbes trop serrées lors de son déplacement, la valeur de δ_m reste suffisamment éloignée de $\frac{\pi}{2}$ pour éviter la singularité.

Le modèle cinématique au point M est alors obtenu par l'ensemble d'équations :

$$\dot{\varepsilon}_m = \begin{pmatrix} \dot{s} \\ \dot{\varepsilon}_{m_y} \\ \dot{\varepsilon}_{m_\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_{m_s} \\ \dot{\varepsilon}_{m_y} \\ \dot{\varepsilon}_{m_\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{(v_R \cos(\delta_r) + \omega y_{MR}) \cos(\delta_m + \varepsilon_{m_\theta})}{\cos(\delta_m)(1 - c\varepsilon_{m_y})} \\ \frac{(v_R \cos(\delta_r) + \omega y_{MR}) \sin(\delta_m + \varepsilon_{m_\theta})}{\cos(\delta_m)} \\ \omega - \frac{c(v_R \cos(\delta_r) + \omega y_{MR}) \cos(\delta_m + \varepsilon_{m_\theta})}{\cos(\delta_m)(1 - c\varepsilon_{m_y})} \end{pmatrix}. \quad (3.24)$$

Avec $\dot{\varepsilon}_m = (\dot{s} \ \dot{\varepsilon}_{m_y} \ \dot{\varepsilon}_{m_\theta})^t$. Afin de plus d'homogénéité dans la notation, pour la suite \dot{s} sera noté $\dot{\varepsilon}_{m_s}$. Une telle notation est pertinente si l'on considère que ε_{m_s} représente l'écart longitudinal sur la trajectoire entre un point de référence fixe et la position courante du repère de Frenet.

Enfin, des deux premières lignes du système (3.23) on peut également obtenir :

$$\tan(\delta_m) = \frac{(v_R \sin(\delta_r) - x_{MR}\omega)}{(v_R \cos(\delta_r) + y_{MR}\omega)}. \quad (3.25)$$

Avec la précaution que cette expression possède une singularité à l'arrêt, du fait qu'il est impossible dans ce cas de donner une direction à la vitesse au point de contrôle.

Le modèle (3.24) fournit finalement le modèle cinématique générique d'un mobile dans le repère de Frenet pour un point de contrôle quelconque.

3.2.2.3.a Cas des mobiles possédant des roues directrices

Dans le cas des mobiles possédant un ou plusieurs trains directeurs, avec un empattement d'une longueur L , il est possible d'exprimer δ_m de façon géométrique, à travers les angles de braquage avant δ_f et arrière δ_r . De fait, classiquement, la vitesse de rotation des mobiles possédant cette cinématique s'exprime telle que :

$$\omega = v_R \cos(\delta_r) \frac{\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r)}{L}. \quad (3.26)$$

Ceci en considérant les points R et F respectivement au centre des essieux arrière et avant du véhicule. En combinant les équations (3.26) et (3.25) il apparaît que :

$$\tan(\delta_m) = \frac{\tan(\delta_r)(L + x_{MR}) - x_{MR} \tan(\delta_f)}{L + y_{MR}(\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r))}. \quad (3.27)$$

3.2.2.3.b Choix de la position du point M sur le mobile

Dans les équations présentées auparavant, le choix de la position du point de contrôle M est laissé libre et spécifié par les coordonnées $(x_{MR} \ y_{MR})^t$. Communément, la commande des mobiles dirige le point milieu de l'essieu arrière pour les mobiles à un ou deux trains directeurs ou le centre du mobile pour les modèles en skid steering⁶. Ainsi, en confondant le point M au point R , l'équation (3.24) retombe sur la modélisation classique de ce type de mobile au sein du repère de Frenet⁷.

3.2.3 Modélisation des manipulateurs dans le repère de Frenet

Cette seconde section aborde la modélisation d'un manipulateur dans le repère de Frenet associée à une trajectoire Γ . Pour cette modélisation, un ensemble de plusieurs repères liés au manipulateur (Voir Fig.3.6) est défini ci-dessous :

- R_S : Repère de Frenet de la trajectoire du manipulateur.
- R_G : Repère de mesure des vitesses de translation de la base du manipulateur.
- R_I : Repère de mesure des vitesses de rotation de la base du manipulateur.
- R_R : Repère associé au point d'application de la vitesse du mobile.
- R_A : Repère de la base du manipulateur.
- R_E : Repère de l'effecteur.
- R_W : Repère monde.
- ε_{a_s} : Valeur de l'abscisse curviligne du repère de Frenet sur la trajectoire du manipulateur
- ε_{a_y} : Écart latéral à la trajectoire du manipulateur suivant l'axe y_S .
- ε_{a_z} : Écart d'altitude à la trajectoire du manipulateur suivant l'axe z_S .
- $\varepsilon_{a_{\theta_x}}$: Écart angulaire entre le repère de l'effecteur et le repère de Frenet selon l'axe x_S ⁸.
- $\varepsilon_{a_{\theta_y}}$: Écart angulaire entre le repère de l'effecteur et le repère de Frenet selon l'axe y_S ⁸.
- $\varepsilon_{a_{\theta_z}}$: Écart angulaire entre le repère de l'effecteur et le repère de Frenet selon l'axe z_S ⁸.

Les repères R_G , R_I , R_R et R_A sont supposés rigidement liés ensemble.

3.2.3.1 Vitesse de rotation du repère de Frenet dans le repère monde

Avant d'aller plus en avant, il est nécessaire de présenter un résultat intermédiaire concernant la vitesse de rotation de la base de Frenet exprimée dans le repère monde.

Pour cela, il est possible d'écrire :

$$\frac{d}{ds} \left(R_{R_W}^{R_S} \right) = \frac{d}{ds} \begin{pmatrix} \vec{x}_s \\ \vec{y}_s \\ \vec{z}_s \end{pmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \vec{x}_s \\ \vec{y}_s \\ \vec{z}_s \end{pmatrix} \frac{dt}{ds} = \left[\omega_{R_S/R_W} \Big|_{R_S} \right]_{\times} \begin{pmatrix} \vec{x}_s \\ \vec{y}_s \\ \vec{z}_s \end{pmatrix} \frac{1}{\dot{s}}. \quad (3.28)$$

6. Ce qui revient finalement au centre de l'essieu virtuel du mobile

7. Ces diverses modélisations sont données en annexe D.1

8. Pour plus de clarté sur la figure Fig.3.6 seuls les écarts en translation sont représentés.

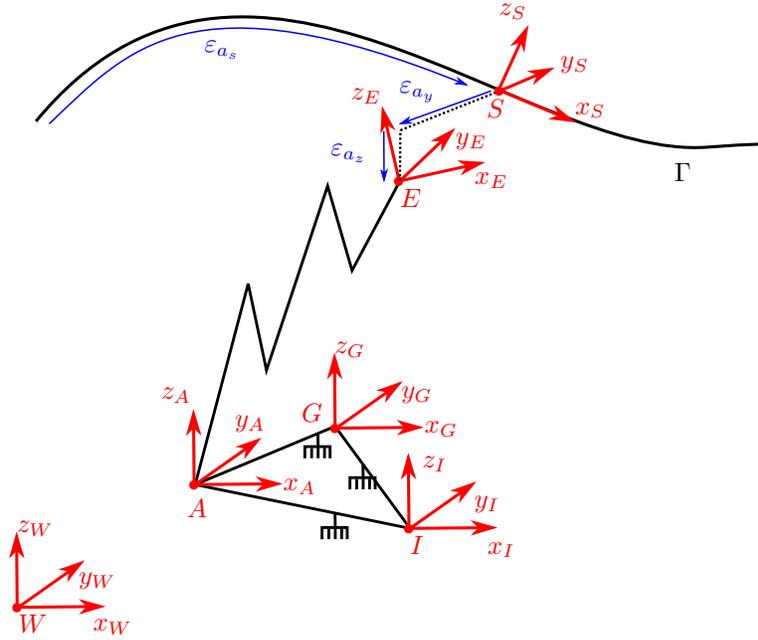


FIGURE 3.6 – Schéma de modélisation du point de contrôle de l'effecteur d'un manipulateur dans le repère de Frenet.

Avec la dérivée de la matrice de rotation⁹ $\frac{d}{ds} \left(R_{R_W}^{R_S} \right)$, notée également $\frac{d}{ds} \begin{pmatrix} \vec{x}_s \\ \vec{y}_s \\ \vec{z}_s \end{pmatrix}$, donnée par les formules de Frenet¹⁰ qui s'exprime telle que :

$$\frac{d}{ds} \begin{pmatrix} \vec{x}_s \\ \vec{y}_s \\ \vec{z}_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & c(s) & 0 \\ -c(s) & 0 & \tau(s) \\ 0 & -\tau(s) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{x}_s \\ \vec{y}_s \\ \vec{z}_s \end{pmatrix}. \quad (3.29)$$

Sachant que la matrice antisymétrique¹¹ $\left[\omega_{R_S/R_W} \middle|_{R_S} \right]_{\times}$ est égale à :

$$\left[\omega_{R_S/R_W} \middle|_{R_S} \right]_{\times} = \begin{pmatrix} 0 & -w_{z_s} & w_{y_s} \\ w_{z_s} & 0 & -w_{x_s} \\ -w_{y_s} & w_{x_s} & 0 \end{pmatrix}. \quad (3.30)$$

alors, par identification, il résulte l'équation :

$$\omega_{R_S/R_W} \middle|_{R_S} = \begin{pmatrix} w_{x_s} \\ w_{y_s} \\ w_{z_s} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau(s) \\ 0 \\ c(s) \end{pmatrix} \dot{s}. \quad (3.31)$$

3.2.3.2 Calcul de la vitesse linéaire

La partie suivante traitera de la modélisation cinématique de l'effecteur du manipulateur le long de la trajectoire. Afin de traiter le sujet le plus clairement possible, cette modélisation sera réalisée en deux étapes, la première qui s'intéresse uniquement au cas de la vitesse linéaire et la seconde qui s'intéresse au cas des vitesses de rotation. Le modèle final sera donné dans un dernier temps.

En premier lieu, il est nécessaire d'exprimer la vitesse linéaire de l'effecteur par rapport à la base du manipulateur, dans le repère de Frenet, soit $v_{E \in R_E/R_A} \middle|_{R_S}$.

9. Voir le résultat en annexe.C.1.1.3

10. Voir le résultat en annexe C.4.5.3

11. Voir le résultat en annexe C.3.1

$$\begin{aligned}
v_{E \in R_E/R_A} \Big|_{R_S} &= R_{R_S}^{R_W} v_{E \in R_E/R_A} \Big|_{R_W} \\
&= R_{R_S}^{R_W} \left(v_{E \in R_E/R_W} \Big|_{R_W} - v_{E \in R_A/R_W} \Big|_{R_W} \right).
\end{aligned} \tag{3.32}$$

Or dans (3.32) le terme $v_{E \in R_A/R_W} \Big|_{R_W}$ peut être assimilé à une vitesse extérieure au système appliqué sur l'effecteur¹². Cette vitesse étant accessible par mesure capteur, deux nouveaux repères sont introduits ici, le repère de mesure lié à la vitesse de translation R_G et le repère de mesure lié à la vitesse de rotation R_I ¹³. Or, le repère R_A étant rigidement lié au repère R_G et R_I , alors $v_{E \in R_A/R_W} \Big|_{R_W} = v_{E \in R_G/R_W} \Big|_{R_W} = v_{E \in R_I/R_W} \Big|_{R_W}$ et $\omega_{R_A/R_W} \Big|_{R_R} = \omega_{R_G/R_W} \Big|_{R_R} = \omega_{R_I/R_W} \Big|_{R_R}$. Ceci permet alors d'introduire deux points de mesure indépendants de la position de la base du manipulateur sur le mobile.

En considérant les équations classiques de composition des vitesses, il est ensuite possible d'écrire :

$$\begin{aligned}
v_{E \in R_E/R_A} \Big|_{R_S} &= R_{R_S}^{R_W} v_{E \in R_E/R_A} \Big|_{R_W} \\
&= R_{R_S}^{R_W} \left(v_{E \in R_E/R_W} \Big|_{R_W} - v_{E \in R_A/R_W} \Big|_{R_W} \right) \\
&= R_{R_S}^{R_W} \left(v_{E \in R_E/R_W} \Big|_{R_W} - v_{E \in R_G/R_W} \Big|_{R_W} \right) \\
&= R_{R_S}^{R_W} \left(v_{E \in R_E/R_W} \Big|_{R_W} - v_{G \in R_G/R_W} \Big|_{R_W} - \overrightarrow{EG} \Big|_{R_W} \wedge \omega_{R_G/R_W} \Big|_{R_W} \right) \\
&= R_{R_S}^{R_W} \left(v_{E \in R_E/R_W} \Big|_{R_W} - v_{G \in R_G/R_W} \Big|_{R_W} - \overrightarrow{EG} \Big|_{R_W} \wedge \omega_{R_I/R_W} \Big|_{R_W} \right) \\
&= R_{R_S}^{R_W} v_{E \in R_E/R_W} \Big|_{R_W} - R_{R_S}^{R_R} \left(v_{G \in R_G/R_W} \Big|_{R_R} + \overrightarrow{EG} \Big|_{R_R} \wedge \omega_{R_I/R_W} \Big|_{R_R} \right).
\end{aligned} \tag{3.33}$$

Dans l'équation (3.33), trois termes se distinguent :

- $v_{E \in R_E/R_A} \Big|_{R_S}$: Vitesse de translation de l'effecteur par rapport à la base du manipulateur.
- $R_{R_S}^{R_W} v_{E \in R_E/R_W} \Big|_{R_W}$: Vitesse de translation de l'effecteur le long de sa trajectoire par rapport au repère monde.
- $R_{R_S}^{R_R} \left(v_{G \in R_G/R_W} \Big|_{R_R} + \overrightarrow{EG} \Big|_{R_R} \wedge \omega_{R_G/R_W} \Big|_{R_R} \right)$: Vitesse de perturbation en translation de l'effecteur du manipulateur appliquée au niveau de sa base. Dans le cas du manipulateur simple attaché à un socle, cette vitesse est nulle car la base du manipulateur ne se déplace pas dans son repère monde. Dans le cas du manipulateur mobile, cette vitesse est non nulle et assimilée directement au mouvement de la base mobile à laquelle est attaché le bras.

Afin d'exprimer $v_{E \in R_E/R_W} \Big|_{R_W}$ il est connu que :

$$v_{E \in R_E/R_W} \Big|_{R_W} = \frac{d\overrightarrow{WE}}{dt} \Big|_{R_W}. \tag{3.34}$$

Or :

$$\overrightarrow{WE} \Big|_{R_W} = \overrightarrow{WS} \Big|_{R_W} + R_{R_W}^{R_S} \overrightarrow{SE} \Big|_{R_S}. \tag{3.35}$$

donc :

$$v_{E \in R_E/R_W} \Big|_{R_W} = \frac{d\overrightarrow{WS}}{dt} \Big|_{R_W} + \frac{d}{dt} \left(R_{R_W}^{R_S} \overrightarrow{SE} \Big|_{R_S} \right) \Big|_{R_W}. \tag{3.36}$$

12. Dans le cas d'un manipulateur mobile cette vitesse est principalement la conséquence des mouvements du mobile.

13. Dans le cas de ce mémoire le repère R_G sera assimilé au repère de mesure de vitesse GPS et le repère R_I au repère de mesure de la centrale inertielle.

On a alors $\left. \frac{d\vec{W}\vec{S}}{dt} \right|_{R_W} = v_{S \in R_S/R_W} \Big|_{R_W}$. Or ce terme correspond à la vitesse du repère de Frenet par rapport au repère monde, qui est égale à $(\dot{s} \ 0 \ 0)^t$. Ce qui donne :

$$\left. \frac{d\vec{W}\vec{S}}{dt} \right|_{R_W} = R_{R_W}^{R_S} \begin{pmatrix} \dot{s} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (3.37)$$

Par ailleurs :

$$\left. \frac{d}{dt} \left(R_{R_W}^{R_S} \vec{S}\vec{E} \Big|_{R_S} \right) \right|_{R_W} = \left. \frac{d}{dt} \left(R_{R_W}^{R_S} \right) \right|_{R_W} \vec{S}\vec{E} \Big|_{R_S} + R_{R_W}^{R_S} \left. \frac{d}{dt} \left(\vec{S}\vec{E} \Big|_{R_S} \right) \right|_{R_W}. \quad (3.38)$$

Or,

$$\vec{S}\vec{E} \Big|_{R_S} = \begin{pmatrix} 0 \\ \varepsilon_{a_y} \\ \varepsilon_{a_z} \end{pmatrix}. \quad (3.39)$$

De plus, sachant que¹⁴ :

$$\left. \frac{d}{dt} \left(R_{R_W}^{R_S} \right) \right|_{R_W} = \left[\omega_{R_S/R_W} \Big|_{R_W} \right]_{\times} R_{R_W}^{R_S}. \quad (3.40)$$

L'équation (3.36) peut alors se réécrire :

$$v_{E \in R_E/R_W} \Big|_{R_W} = R_{R_W}^{R_S} \begin{pmatrix} \dot{s} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + R_{R_W}^{R_S} \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\varepsilon}_{a_y} \\ \dot{\varepsilon}_{a_z} \end{pmatrix} + R_{R_W}^{R_S} R_{R_S}^{R_W} \left[\omega_{R_S/R_W} \Big|_{R_W} \right]_{\times} R_{R_W}^{R_S} \vec{S}\vec{E} \Big|_{R_S}. \quad (3.41)$$

Or, les matrices antisymétriques ont la propriété suivante¹⁵ :

$$R[a]_{\times} R^t = [Ra]_{\times}. \quad (3.42)$$

Où R est une matrice de rotation et a un vecteur de dimension trois. On obtient alors, avec l'équation (3.31) et (3.41) :

$$\begin{aligned} v_{E \in R_E/R_W} \Big|_{R_W} &= R_{R_W}^{R_S} \left[\begin{pmatrix} \dot{s} \\ \dot{\varepsilon}_{a_y} \\ \dot{\varepsilon}_{a_z} \end{pmatrix} + \left[R_{R_S}^{R_W} \omega_{R_S/R_W} \Big|_{R_W} \right]_{\times} \vec{S}\vec{E} \Big|_{R_S} \right] \\ &= R_{R_W}^{R_S} \left[\begin{pmatrix} \dot{s} \\ \dot{\varepsilon}_{a_y} \\ \dot{\varepsilon}_{a_z} \end{pmatrix} + \left[\omega_{R_S/R_W} \Big|_{R_S} \right]_{\times} \vec{S}\vec{E} \Big|_{R_S} \right] \\ &= R_{R_W}^{R_S} \left[\begin{pmatrix} \dot{s} \\ \dot{\varepsilon}_{a_y} \\ \dot{\varepsilon}_{a_z} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tau \dot{s} \\ 0 \\ c \dot{s} \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} 0 \\ \varepsilon_{a_y} \\ \varepsilon_{a_z} \end{pmatrix} \right] \\ &= R_{R_W}^{R_S} \left[\begin{pmatrix} \dot{s} \\ \dot{\varepsilon}_{a_y} \\ \dot{\varepsilon}_{a_z} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -c \dot{s} \varepsilon_{a_y} \\ -\tau \dot{s} \varepsilon_{a_z} \\ \tau \dot{s} \varepsilon_{a_y} \end{pmatrix} \right] \\ &= R_{R_W}^{R_S} \begin{pmatrix} \dot{s} - c \dot{s} \varepsilon_{a_y} \\ \dot{\varepsilon}_{a_y} - \tau \dot{s} \varepsilon_{a_z} \\ \dot{\varepsilon}_{a_z} + \tau \dot{s} \varepsilon_{a_y} \end{pmatrix} \\ &= R_{R_W}^{R_S} \begin{pmatrix} 1 - c \varepsilon_{a_y} & 0 & 0 \\ -\tau \varepsilon_{a_z} & 1 & 0 \\ \tau \varepsilon_{a_y} & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{s} \\ \dot{\varepsilon}_{a_y} \\ \dot{\varepsilon}_{a_z} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (3.43)$$

14. Voir le résultat en annexe C.1.1.3

15. Voir le résultat en annexe C.3.1

On pose $\mathcal{C}_1 = \begin{pmatrix} 1 - c\varepsilon_{a_y} & 0 & 0 \\ -\tau\varepsilon_{a_z} & 1 & 0 \\ \tau\varepsilon_{a_y} & 0 & 1 \end{pmatrix}$ la matrice de torsion-courbure pour la vitesse linéaire.

A l'aide des équations (3.33) et (3.43), le modèle pour la vitesse de translation peut finalement s'écrire :

$$v_{E \in R_E/RA} |_{R_S} = \mathcal{C}_1 \begin{pmatrix} \dot{s} \\ \dot{\varepsilon}_{a_y} \\ \dot{\varepsilon}_{a_z} \end{pmatrix} - R_{R_S}^{R_R} \left(v_{G \in R_G/RW} |_{R_R} + \overrightarrow{EG} |_{R_R} \wedge \omega_{R_G/RW} |_{R_R} \right). \quad (3.44)$$

3.2.3.3 Calcul de la vitesse angulaire

Cette partie traite le cas de la modélisation de la vitesse de rotation de l'effecteur du manipulateur dans le repère de Frenet évoluant le long d'une trajectoire 3D. Pour ce faire, on cherche à exprimer la vitesse angulaire de l'effecteur par rapport à la base du manipulateur dans le repère de Frenet, soit :

$$\begin{aligned} \omega_{R_E/RA} |_{R_S} &= R_{R_S}^{R_W} \omega_{R_E/RW} |_{R_W} - R_{R_S}^{R_R} \omega_{R_A/RW} |_{R_R} \\ &= R_{R_S}^{R_W} \omega_{R_E/RW} |_{R_W} - R_{R_S}^{R_R} \omega_{R_I/RW} |_{R_R}. \end{aligned} \quad (3.45)$$

Dans l'équation (3.45), similairement à la vitesse linéaire, trois termes se distinguent également :

- $\omega_{R_E/RA} |_{R_S}$: Vitesse de rotation du repère de l'effecteur par rapport au repère de la base du manipulateur.
- $R_{R_S}^{R_W} \omega_{R_E/RW} |_{R_W}$: Vitesse de rotation du repère de l'effecteur le long de sa trajectoire par rapport au repère monde.
- $R_{R_S}^{R_R} \omega_{R_I/RW} |_{R_R}$: Vitesse de perturbation en rotation du repère de l'effecteur du manipulateur appliquée au niveau de sa base. De façon homogène au terme en translation, ce terme est induit par le mouvement du mobile venant perturber le suivi de trajectoire du manipulateur.

On cherche maintenant à exprimer $\omega_{R_E/RW} |_{R_W}$, qui par composition des vitesses de rotation s'écrit :

$$\omega_{R_E/RW} |_{R_W} = R_{R_W}^{R_S} \left(\omega_{R_E/RS} |_{R_S} + \omega_{R_S/RW} |_{R_S} \right). \quad (3.46)$$

Or, $\omega_{R_E/RS} |_{R_S} = \begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_{a_{\theta_x}} \\ \dot{\varepsilon}_{a_{\theta_y}} \\ \dot{\varepsilon}_{a_{\theta_z}} \end{pmatrix}$ et $\omega_{R_S/RW} |_{R_S}$ est donnée par l'équation (3.31). Donc finalement :

$$\omega_{R_E/RW} |_{R_W} = R_{R_W}^{R_S} \begin{pmatrix} \varepsilon_{a_{\theta_x}} + \tau\dot{s} \\ \varepsilon_{a_{\theta_y}} \\ \varepsilon_{a_{\theta_z}} + c\dot{s} \end{pmatrix} = R_{R_W}^{R_S} \begin{pmatrix} \tau & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ c & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{s} \\ \dot{\varepsilon}_{a_y} \\ \dot{\varepsilon}_{a_z} \\ \dot{\varepsilon}_{a_{\theta_x}} \\ \dot{\varepsilon}_{a_{\theta_y}} \\ \dot{\varepsilon}_{a_{\theta_z}} \end{pmatrix}. \quad (3.47)$$

Afin de rester synthétique, la matrice de torsion-courbure pour la vitesse angulaire \mathcal{C}_2 est définie telle que :

$$\mathcal{C}_2 = \begin{pmatrix} \tau & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ c & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.48)$$

Finalement :

$$\omega_{R_E/RA} |_{R_S} = \mathcal{C}_2 \begin{pmatrix} \dot{s} \\ \dot{\varepsilon}_{a_y} \\ \dot{\varepsilon}_{a_z} \\ \dot{\varepsilon}_{a_{\theta_x}} \\ \dot{\varepsilon}_{a_{\theta_y}} \\ \dot{\varepsilon}_{a_{\theta_z}} \end{pmatrix} - R_{R_S}^{R_R} \omega_{R_I/RW} |_{R_R}. \quad (3.49)$$

3.2.3.4 Modèle final

Le modèle complet du manipulateur dans le repère de Frenet est présenté dans cette dernière partie. En rassemblant les équations (3.44) et (3.49), et en les exprimant dans le repère de Frenet, il est possible d'écrire :

$$\begin{pmatrix} v_{E \in R_E / R_A} |_{R_S} \\ \omega_{E \in R_E / R_A} |_{R_S} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathcal{C}_1 \begin{pmatrix} \dot{s} \\ \dot{\varepsilon}_{a_y} \\ \dot{\varepsilon}_{a_z} \end{pmatrix} - R_{R_S}^{R_R} (v_{G \in R_G / R_W} |_{R_R} + \overrightarrow{EG} |_{R_R} \wedge \omega_{R_I / R_W} |_{R_R}) \\ \mathcal{C}_2 \begin{pmatrix} \dot{s} \\ \dot{\varepsilon}_{a_y} \\ \dot{\varepsilon}_{a_z} \\ \dot{\varepsilon}_{a_{\theta_x}} \\ \dot{\varepsilon}_{a_{\theta_y}} \\ \dot{\varepsilon}_{a_{\theta_z}} \end{pmatrix} - \omega_{R_I / R_W} |_{R_R} \end{pmatrix}. \quad (3.50)$$

Après quelques manipulations, l'équation peut se reformuler :

$$\begin{pmatrix} v_{E \in R_E / R_A} |_{R_S} \\ \omega_{E \in R_E / R_A} |_{R_S} \end{pmatrix} = \mathcal{C} \dot{\varepsilon}_a - \begin{pmatrix} R_{R_S}^{R_R} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & R_{R_S}^{R_R} \end{pmatrix} B \dot{X}_{E / R_W} |_{R_R}. \quad (3.51)$$

Avec $\dot{\varepsilon}_a = (\dot{s} \ \dot{\varepsilon}_{a_y} \ \dot{\varepsilon}_{a_z} \ \dot{\varepsilon}_{a_{\theta_x}} \ \dot{\varepsilon}_{a_{\theta_y}} \ \dot{\varepsilon}_{a_{\theta_z}})^t$. Afin d'apporter plus d'homogénéité dans la notation, pour la suite \dot{s} sera noté $\dot{\varepsilon}_{a_s}$. Par ailleurs une telle notation est pertinente si l'on considère que ε_{a_s} représente l'écart longitudinal sur la trajectoire entre un point de référence fixe et la position courante du repère de Frenet. Par ailleurs, la matrice de torsion-courbure \mathcal{C} est introduite pour assurer la prise en compte de la torsion et de la courbure de la trajectoire pour le calcul des vitesses. Cette dernière s'exprime comme suit :

$$\begin{pmatrix} 1 - c\varepsilon_{a_y} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\tau\varepsilon_{a_z} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \tau\varepsilon_{a_y} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \tau & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ c & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.52)$$

De plus, la notation B est introduite pour définir la matrice de "bras de levier" pour la prise en compte de la distance entre le point de mesure de la vitesse du robot et l'effecteur du manipulateur. Elle s'écrit :

$$B = \begin{pmatrix} I_{3 \times 3} & \left[\overrightarrow{EG} |_{R_R} \right]_{\times} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \end{pmatrix}. \quad (3.53)$$

Enfin $\dot{X}_{E / R_W} |_{R_R}$ est vu comme les vitesses extérieurs au système influençant le système. Il s'exprime comme :

$$\dot{X}_{E / R_W} |_{R_R} = \begin{pmatrix} v_{G \in R_G / R_W} |_{R_R} \\ \omega_{R_I / R_W} |_{R_R} \end{pmatrix}. \quad (3.54)$$

Pour terminer la construction du modèle, il est nécessaire d'introduire le modèle cinématique du manipulateur¹⁶. Ce dernier s'exprime tel que :

$$\dot{X}_{E \in R_E / R_A} |_{R_A} = J \dot{q} = \begin{pmatrix} v_{E \in R_E / R_A} |_{R_S} \\ \dot{\Theta}_{R_E / R_A} |_{R_S} \end{pmatrix}. \quad (3.55)$$

On note ici $\dot{\Theta}_{R_E / R_A} |_{R_S}$ la vitesse de rotation des angles d'Euler. Afin d'exprimer cette vitesse comme un vecteur vitesse de rotation¹⁷ $\omega_{R_E / R_A} |_{R_S}$ l'équation se réécrit :

16. Voir le résultat en annexe F.2.2

17. Voir le résultat en annexe C.2. Par ailleurs le détail de la matrice U introduite ici se trouve dans cette même annexe. Il s'agit d'une transformation permettant le passage des vitesses des angles d'Euler au vecteur vitesse

$$\begin{pmatrix} v_{E \in R_E/R_A} |_{R_A} \\ \omega_{E \in R_E/R_A} |_{R_A} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & U_{R_A}^{R_E} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{E \in R_E/R_A} |_{R_S} \\ \dot{\theta}_{E \in R_E/R_A} |_{R_S} \end{pmatrix} = E_{R_A}^{R_E} J \dot{q}. \quad (3.56)$$

Pour plus de concisions, les notations génériques suivantes $I_{R_{R_1}^{R_2}}$ et $E_{R_1}^{R_2}$ sont introduites ici et exprimées telles que :

$$I_{R_{R_1}^{R_2}} = \begin{pmatrix} R_{R_1}^{R_2} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & R_{R_1}^{R_2} \end{pmatrix} \quad E_{R_1}^{R_2} = \begin{pmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & U_{R_1}^{R_2} \end{pmatrix}. \quad (3.57)$$

Par changement de repère R_A vers le repère de Frenet R_S :

$$\begin{pmatrix} v_{E \in R_E/R_A} |_{R_S} \\ \omega_{E \in R_E/R_A} |_{R_S} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{R_S}^{R_A} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & R_{R_S}^{R_A} \end{pmatrix} E_{R_A}^{R_E} J \dot{q} = I_{R_{R_S}^{R_A}} E_{R_A}^{R_E} J \dot{q}. \quad (3.58)$$

En utilisant les équations (3.58) et (3.51), le modèle complet du manipulateur peut alors s'écrire de la façon suivante :

$$I_{R_{R_S}^{R_A}} E_{R_A}^{R_E} J \dot{q} = \mathcal{C} \dot{\varepsilon}_a - I_{R_{R_S}^{R_R}} B \dot{X}_{E \in R_R/R_W} |_{R_R}. \quad (3.59)$$

En posant $J_t = I_{R_{R_S}^{R_A}} E_{R_A}^{R_E} J$, $\dot{X}_{E \in R_R/R_W} |_{R_R} = v_{ext}$ et $\mathcal{B} = I_{R_{R_S}^{R_R}} B$, l'équation (3.59) peut être mis sous la forme synthétique suivante :

$$J_t \dot{q} = \mathcal{C} \dot{\varepsilon}_a - \mathcal{B} v_{ext}. \quad (3.60)$$

Avec J_t la Jacobienne exprimée par rapport au repère de Frenet R_S de la trajectoire Γ , \mathcal{C} la matrice de torsion-courbure, \mathcal{B} la matrice de bras de levier et v_{ext} la vitesse de perturbation appliquée sur la base du manipulateur. Dans notre cas d'étude sur les manipulateurs mobiles, cette vitesse est assimilable aux mouvements induits par le déplacement de la plateforme où se trouve fixé le manipulateur.

3.3 Résultats en simulation et expérimentaux

Dans cette partie, un ensemble de simulations et d'expérimentations est proposé afin de démontrer l'intérêt et la performance de l'architecture de coordination proposée dans la Section.3.1 sur différentes structures de manipulateurs mobiles.

Les vidéos associées aux essais présentés ici peuvent être trouvées à l'adresse : <https://nextcloud.inrae.fr/s/Rm5LQH7oGew9qdA>. L'ensemble des erreurs et écarts présentés est exprimé en m pour les distances et en $^\circ$ pour les rotations.

3.3.1 Présentation des essais canoniques

Dans une première partie, l'ensemble des expérimentations et du matériel utilisé est présenté. Les expérimentations sont basées principalement autour de trois scénarios et trois structures de manipulateurs mobiles différentes permettant de démontrer l'argument de généralité de l'approche proposée par ces travaux. Les résultats seront donnés et analysés dans un second temps.

Les essais présentés dans cette partie utilisent volontairement des configurations de critères et de trajectoires simplistes par rapport à ce qu'une tâche agricole nécessiterait. Ceci, dans le but de permettre de démontrer la preuve de concept autour de l'architecture proposée, ainsi que pour faciliter l'analyse des différents résultats qui sont présentés. D'autres expérimentations, plus complètes, associées à des cas applicatifs, seront présentées dans le dernier chapitre de la thèse.

Le détail des commandes des sous-systèmes utilisés ici est donné en annexe A.

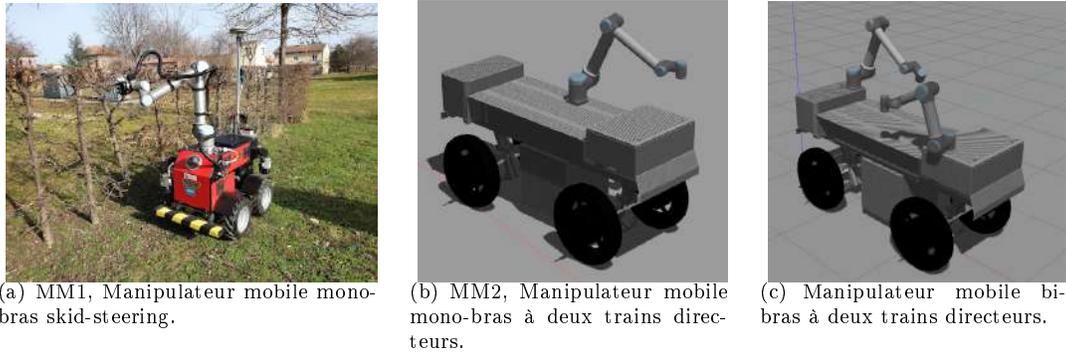


FIGURE 3.7 – Structures des manipulateurs mobiles utilisés pour les essais canoniques.

a_1 (Ur10)	a_2 (Ur10)	a_1 (Ur5)	a_2 (Ur5)	b_1
50	0.2	50	0.03	10

TABLE 3.1 – Valeur des paramètres des critères de l'ensemble minimal

3.3.1.1 Présentation des manipulateurs mobiles

Les essais sont réalisés avec trois structures de manipulateurs mobiles différentes présentées en Fig.3.7. La première, dénommée MM1, est un manipulateur mobile mono-bras utilisant une plateforme en skid steering. La seconde plateforme, nommée MM2, est un manipulateur mobile mono-bras avec une base mobile à deux trains directeurs. Ce type de base mobile a l'intérêt de pouvoir interchanger deux configurations cinématiques possibles (voiture ou deux trains directeurs) ce qui permet d'étendre les essais présentés sur l'aspect générique de l'approche. Enfin, la dernière plateforme est un manipulateur mobile bi-bras possédant les mêmes cinématiques que le MM2. Les plateformes MM1 et MM2 sont surmontées d'un bras Ur10, tandis que la plateforme MM3 est surmontée d'un bras Ur10 et d'un bras Ur5 de la société *Universal Robot*. Chacune des plateformes possède son modèle de simulation et seules les plateformes MM1 et MM2 ont pu être utilisées de façon expérimentale.¹⁸ L'ensemble des plateformes fonctionne sous ROS et sont simulées sous Gazebo¹⁹.

Le choix de l'algorithme d'optimisation s'est porté sur l'algorithme SLSQP (Sequential Least-Squares Quadratic Programming) KRAFT (1994) de la library Nlopt NLOPT (2020)²⁰. Ce dernier est un algorithme d'optimisation non-linéaire basé sur la descente d'un gradient à travers une séquence de problèmes QP. Il optimise successivement des approximations du second ordre de la fonction objectif, avec des approximations au premier ordre des contraintes ajoutées. Sa complexité spatiale est de l'ordre de $O(n^2)$ et sa complexité temporelle de l'ordre de $O(n^3)$.

Le temps maximal alloué à l'optimisation est limité au pas de contrôle du robot (0.1s). Par ailleurs, dans un premier temps, l'ensemble des poids α de la fonction de coordination est égal à 1. Les paramètres des différents critères formant l'ensemble minimal ont été définis empiriquement (Voir Tab.3.1) de manière à trouver un bon compromis entre la précision et la sécurité du système.

Les gains de commande du manipulateur²¹ sont réglés pour obtenir un temps de convergence de 3s pour chaque écart. Les temps et distances de convergence du mobile sont donnés dans le tableau Tab.3.2 en fonction des ε . Enfin, le tableau Tab.3.3 récapitule la position du bras et le point de départ de l'effecteur dans le repère du mobile pour chacune des plateformes lors des essais.

3.3.1.2 Présentation des scénarios

L'ensemble des essais proposés est basé sur 3 scénarios différents (voir Fig.3.8) incluant des cas très simples de suivi de trajectoire, mais permettant de comparer les comportements des différents systèmes.

18. Le détail technique des différentes sous-parties des manipulateurs mobiles utilisés se trouve en annexe F et annexe G.

19. Voir <https://www.ros.org/>

20. Voir <https://nlopt.readthedocs.io/en/latest/>

21. Dont le détail est donné en annexe A.

\	ε_{m_s}	ε_{m_y}	ε_{m_θ}
MM1	6s	3m	\
MM2	6s	6m	15m
MM3	6s	6m	15m

TABLE 3.2 – Temps et distance de convergence du mobile.

\	Position de A dans R_R (m)	Position de départ de E dans R_A (m)
MM1	$a_1 = (0.215 \ 0)$	$E_1 = (0.8 \ 0 \ 0.5)$
MM2	$a_1 = (0 \ 0.2)$	$E_1 = (0.8 \ -0.2 \ 0.5)$
MM3	$a_1 = (-0.9 \ 0.25)$	$E_1 = (1.2 \ 0.1 \ 0.3)$
	$a_2 = (0.8 \ -0.25)$	$E_2 = (0.5 \ 0.1 \ 0.2)$

TABLE 3.3 – Paramètres géométriques des plateformes.

Le premier de ces scénarios est appliqué aux manipulateurs mobiles mono-bras tandis que les deux autres sont dédiés aux manipulateurs mobiles multi-bras. Dans les trois cas de figure, le mobile est référencé par une trajectoire droite tandis que les bras doivent suivre une trajectoire droite possédant une discontinuité. Pour chaque effecteur, un point objectif est défini sur sa trajectoire respective et se déplace à vitesse constante de $0.4m/s$. Le choix de la vitesse est également arbitraire et il sera montré dans les expérimentations du dernier chapitre que la coordination fonctionne également pour des vitesses plus importantes.

3.3.2 Expérimentations et simulations

Les résultats des différents scénarios présentés précédemment sont détaillés dans la partie suivante. Une partie de ces essais a été réalisée de façon expérimentale et une autre uniquement en simulation, ceci pour plusieurs raisons. Tout d'abord, toutes les plateformes disponibles en simulation n'ont pas de jumeaux pour l'expérimentation, par manque de matériel au sein du laboratoire, c'est le cas de la plateforme MM3. En second lieu, selon les systèmes utilisés et la qualité du simulateur, les résultats en simulation et expérimentaux peuvent être différents, c'est le cas pour la plateforme MM2 où le cas expérimental sera détaillé précisément à la fin de cette partie. Ainsi, du fait de son caractère "parfait" l'utilisation de simulations permet une analyse plus simple du comportement des robots sans être gênée par des effets dus à l'expérimentation. Dans la suite, il sera précisé pour chaque essai si ce dernier est tiré de données simulées ou obtenu de manière expérimentale.

3.3.2.1 Scénario n°1 sur le MM1 : Expérimentation

Les premiers essais présentés ici sont basés sur le scénario n°1 et la plateforme MM1. Ils ont pour objectif de démontrer la capacité de l'approche à coordonner le manipulateur mobile en adaptant la position du mobile pour permettre le suivi de l'objectif au plus près, tout en conservant le bras dans une configuration de sécurité. Cet aspect a été abordé à la fois en simulation et de façon expérimentale, cependant, dans cette partie, seuls les résultats d'expérimentation sont détaillés. En plus de démontrer l'efficacité de la méthode, ils permettent de montrer le fonctionnement de l'approche sur un robot en conditions réelles. Les données de cet essai en simulation seront

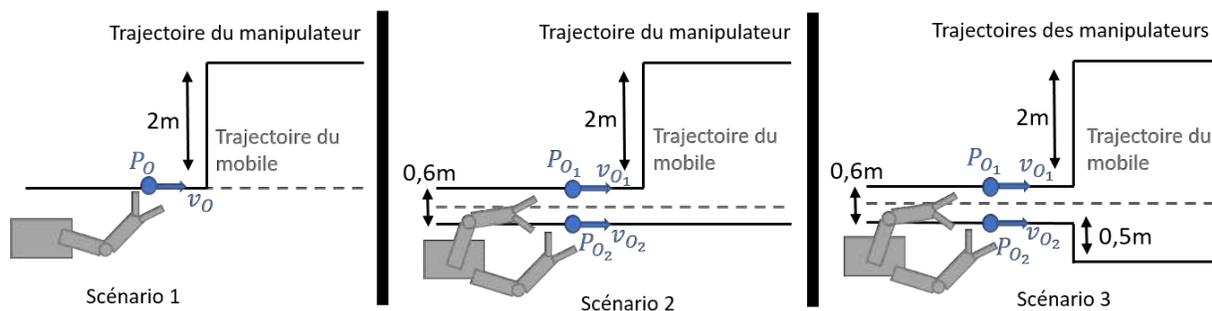


FIGURE 3.8 – Ensemble des scénarios expérimentaux et de simulation proposés.

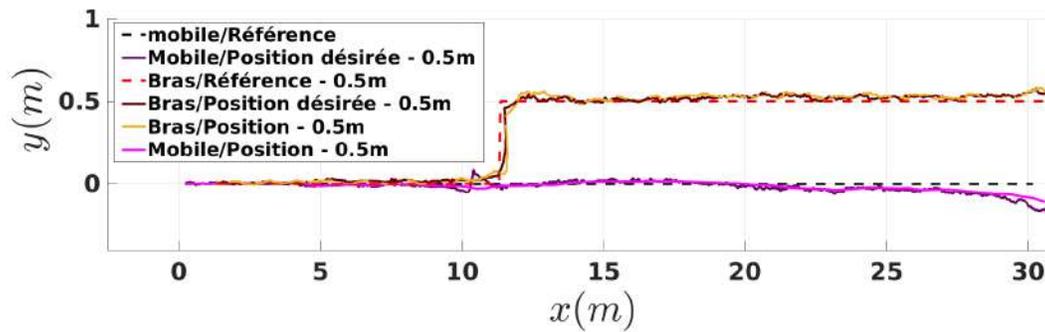


FIGURE 3.9 – Position de l'effecteur et du mobile par rapport à leurs trajectoires de référence pour une discontinuité de 0,5m.

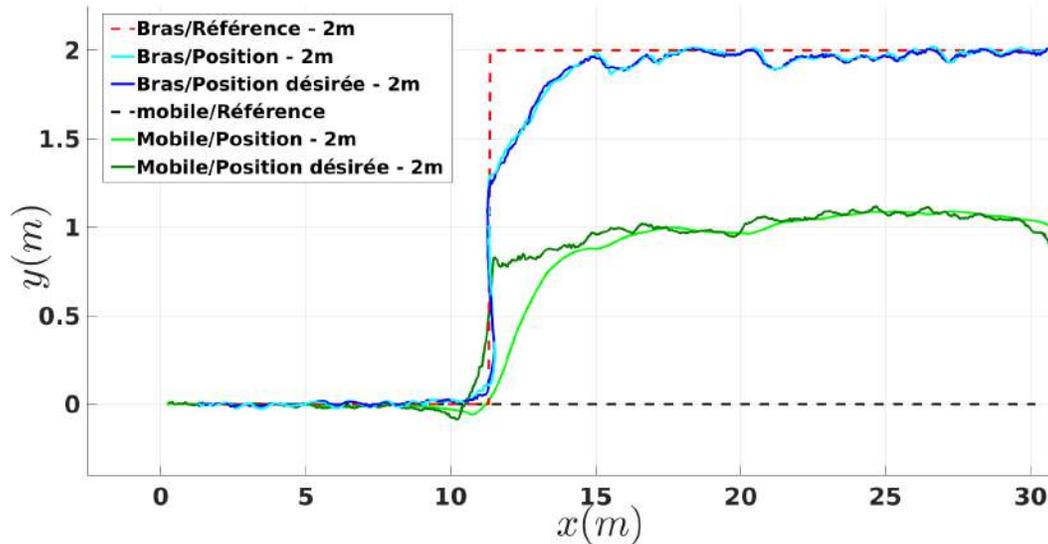


FIGURE 3.10 – Position de l'effecteur et du mobile par rapport à leurs trajectoires de référence pour une discontinuité de 2m.

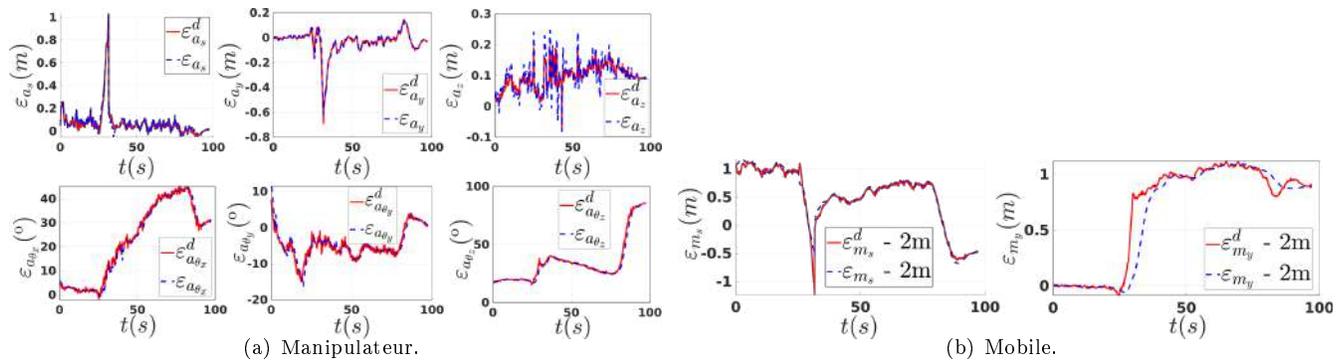
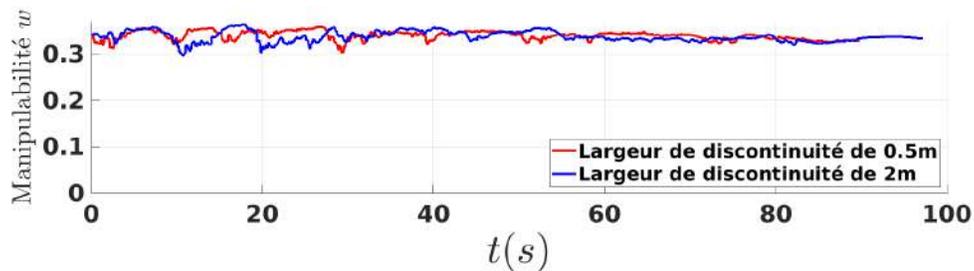
utilisées dans les sections suivantes lors des comparatifs avec d'autres structures de robot.

Deux expérimentations ont été menées avec des largeurs de discontinuité différentes sur la trajectoire de référence du manipulateur. Dans le premier cas, cette largeur était de 0,5m, suffisamment petite pour que l'effecteur puisse atteindre son objectif sans que le mobile n'ait à dévier significativement de sa trajectoire. Dans le second cas, la largeur de discontinuité était de 2m. Dans ce cas de figure, la base mobile est contrainte de se déporter sur sa gauche pour permettre à l'effecteur d'atteindre son point objectif.

Les figures Fig.3.9 et Fig.3.10 présente la position de l'effecteur et du point de contrôle du mobile par rapport à leurs trajectoires de référence durant les deux expérimentations menées.

Dans le cas de la discontinuité de 0,5m, il est apparent que l'effecteur arrive à suivre sa trajectoire de référence sans que l'écart latéral du mobile ne varie de façon significative. Au moment de la discontinuité, le mobile ralentit, le bras se déporte sur la gauche et l'ensemble repart sans plus de mouvements.

Au contraire, dans le cas de la discontinuité de 2m, lorsque le manipulateur atteint ce point, le mobile s'arrête et le manipulateur se déporte à gauche. Ce dernier s'étend jusqu'à ce que la manipulabilité lui impose de se stopper afin de le garder en position de sécurité. Alors que le point avance, le critère de distance à l'objectif augmente et force le mobile à dévier en latéral pour diminuer cet écart. Ceci se remarque sur la figure Fig.3.10 à l'endroit où l'écart latéral désiré du mobile forme un échelon. Le mobile converge alors sur cette nouvelle position où l'effecteur peut rattraper son point objectif en toute sécurité.

FIGURE 3.11 – Écarts ε réels et désirés des sous-systèmes.FIGURE 3.12 – Manipulabilité w du manipulateur dans les deux cas de largeur de discontinuité

La figure suivante Fig.3.11 permet de valider l'idée que chaque sous-système peut être coordonné par le pilotage de son écart par rapport à sa référence. De fait, cette figure montre l'ensemble des écarts réels convergeant vers les écarts désirés fournis par le coordinateur. Par ailleurs, dans ce cas de figure, l'hypothèse de convergence des sous-systèmes (Voir Sec.3.1.2.3) est remplie car chaque écart converge rapidement de sa valeur réelle à sa valeur désirée. Seul, l'écart latéral du mobile présente une erreur au moment de la discontinuité notamment à cause de la contrainte de non-holonomie.

On remarque également sur la figure Fig.3.10 des erreurs entre la position réelle de l'effecteur et la position de la trajectoire de référence. Ces dernières sont dues au fait que le mobile ne converge pas parfaitement sur son point désiré à cause de sa non-holonomie et de sa dynamique lente (Voir Fig.3.11(b)). Ainsi, dans les endroits où l'écart réel n'a pas encore eu le temps de converger sur l'écart désiré, notamment lors de la discontinuité, la précision de l'effecteur sur sa trajectoire est dégradée. Cette dégradation provient du calcul de l'objectif sur la position réelle du mobile et non pas sur sa position désirée. La raison de ce calcul a été détaillée dans la section Sec.3.1.2.3 comme une solution possible dans le cas où l'hypothèse de non-convergence risque de ne pas être respectée. Cependant, comme le montre cette expérimentation, cette solution dégrade la précision de l'effecteur même dans le cas où l'hypothèse reste valide et où les erreurs du mobile sont faibles, notamment lors du régime permanent. Il sera montré à la fin de cette section que la seconde solution donnée en Sec.3.1.2.3 n'est pas soumise à cette limite et offre, par conséquent, de meilleures performances de suivi au système.

Cependant malgré ce défaut de performance, la sécurité de l'ensemble est maintenue en permanence, même dans la zone de la discontinuité. De fait, la figure Fig.3.12 montre la manipulabilité du bras dans le cas des deux expérimentations avec les deux largeurs de discontinuité. Dans les deux cas, cette dernière se maintient constante, ce qui démontre bien la capacité de l'étage de coordination à maintenir le bras dans une position de sécurité tout au long de la tâche.

Cette première expérimentation permet de démontrer le fonctionnement réel de l'architecture proposée au début de ce chapitre. Elle montre que le système est capable de s'adapter en temps réel pour garantir sa sécurité tout en réalisant la tâche souhaitée. Ce premier essai démontre ainsi la preuve de concept de l'approche. Les essais suivants porteront sur la généralité de l'approche et l'étude des différents comportements des plateformes selon les scénarios afin de pouvoir explorer la généralité du paradigme.

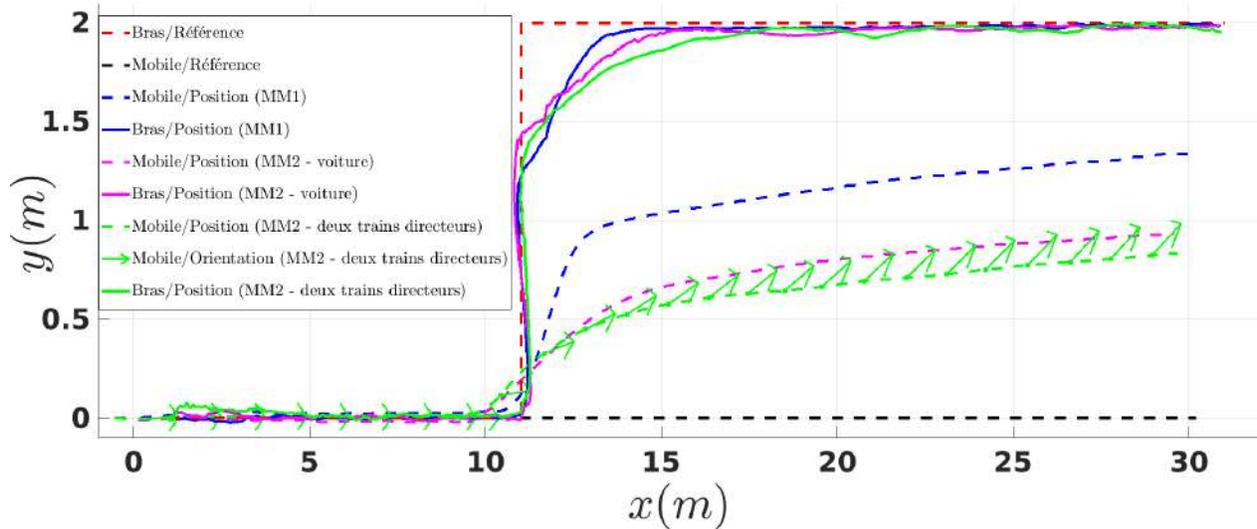


FIGURE 3.13 – Position de l'effecteur et du mobile par rapport à leurs trajectoires de référence pour les trois types de base mobile

3.3.2.2 Scénario n°1 avec différentes structures de manipulateur mobile

Dans un second temps, une série de simulations est présentée, chacune avec une structure de manipulateur mobile ou une cinématique de mobile différente, permettant de valider la généricité de la coordination, tout en comparant les performances des résultats selon la structure utilisée. Toutes les données présentées ici sont issues de simulations.

3.3.2.2.a Adaptation à la cinématique du mobile

La première simulation proposée compare trois types de manipulateurs mobiles. La simulation est réalisée sur le scénario n°1 avec les plateformes MM1 et MM2. Le seul facteur variant dans les simulations se trouve être la cinématique de la base mobile du robot.

Dans le cas du MM2 en configuration deux trains directeurs, le degré de manœuvrabilité offert par le second train permet le contrôle de l'orientation du mobile ε_θ . Ainsi, pour cette simulation, l'orientation du mobile est également donnée dans les résultats.

La première figure Fig.3.13 présente la position de l'effecteur et du point de contrôle du mobile pour les trois simulations réalisées. La seconde figure Fig.3.14 présente la valeur de manipulabilité des manipulateurs et de distances à l'objectif des trois simulations. Avant la discontinuité ($x < 11m$), les performances des trois plateformes sont similaires avec des valeurs semblables de manipulabilité et de distance à l'objectif. Au moment de la discontinuité, les performances des plateformes changent, principalement à cause de leur capacité de mobilité différente. La plateforme en skid steering, étant capable de tourner sur elle-même, limite la distance à son objectif. Au contraire, les temps de convergence plus longs de la base mobile à deux trains directeurs, impliquent une décroissance plus longue du pic de distance. Mais le degré de manœuvrabilité supplémentaire offre une meilleure redondance au système, qui permet un meilleur maintien de la manipulabilité.

Par ailleurs, il est intéressant de noter que l'écart latéral désiré du modèle voiture est plus important que celui du modèle à deux trains directeurs (alors que leurs structures sont identiques) car ce dernier use de sa capacité à contrôler son orientation pour se déplacer en crabe et atteindre son objectif.

Ainsi, en dehors du transitoire, les performances de suivi au vu de la distance à l'objectif et de la manipulabilité de l'effecteur sont les mêmes. Cela appuie l'argument de généricité de l'approche proposée par son adaptabilité à des cinématiques de mobile différentes afin d'user au mieux de leurs capacités respectives. Par ailleurs, le comportement

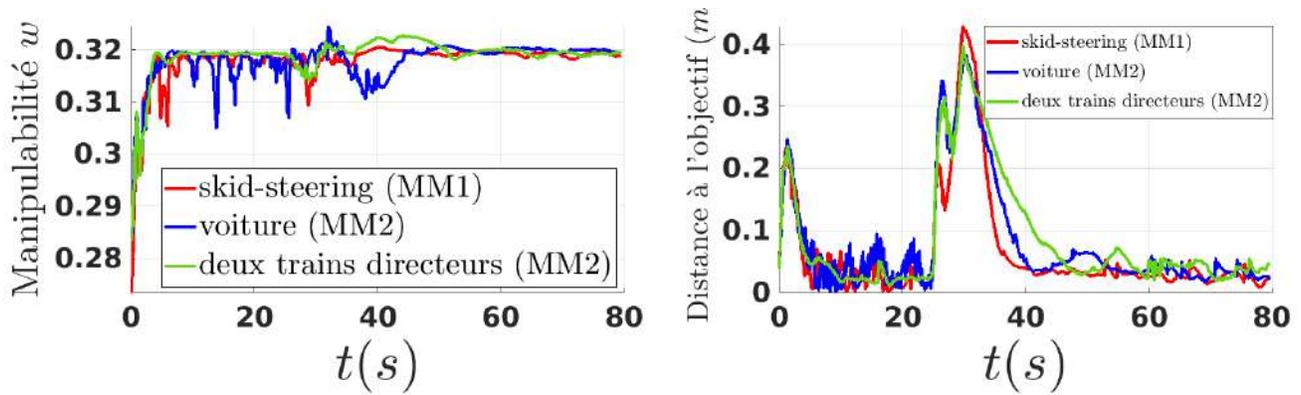
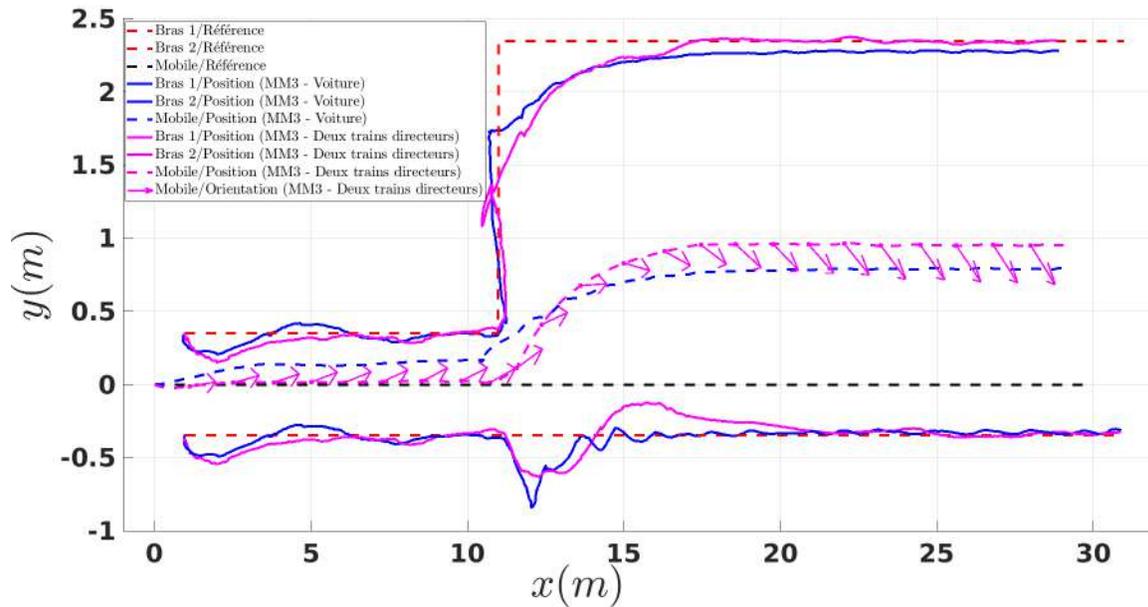
FIGURE 3.14 – Manipulabilité w du manipulateur et distance à l'objectif de l'effecteur pour les trois types de base mobile

FIGURE 3.15 – Position des effecteurs et du mobile par rapport à leurs trajectoires de référence pour les deux configurations possibles de la base mobile du MM3

lors du transitoire est nécessairement différent en fonction des bases mobiles car les systèmes étant différents, leurs réponses à une même perturbation seront différentes et proportionnées face à leurs capacités respectives.

3.3.2.2.b Adaptation à la redondance du robot

Une deuxième série de simulations a été menée sur la capacité de l'approche à s'adapter au degré de redondance offert par le système afin de résoudre les tâches attribuées. Ces expérimentations se basent sur le second scénario avec le manipulateur MM3. Dans ce scénario, deux trajectoires sont suivies indépendamment par les deux effecteurs du système. La première simulation est réalisée avec la plateforme configurée en modèle voiture tandis que la seconde est menée avec la plateforme en modèle deux trains directeurs. Ainsi, la seule différence entre les deux simulations est la dimension du problème qui change d'une variable de contrôle. De plus, les deux trajectoires sont placées de manière à ce que le mobile en modèle voiture ne puisse pas exactement atteindre ses deux objectifs. L'une des trajectoires est droite tandis que l'autre possède la discontinuité de 2m. Ceci implique que le point objectif de la seconde trajectoire prenne de l'avance par rapport à celui de la première, devant parcourir une distance plus grande avant d'achever son parcours. Ainsi, le seul moyen pour le système de remplir ses deux objectifs simultanés est de se déplacer en crabe, ce que ne peut pas faire le mobile en configuration voiture.

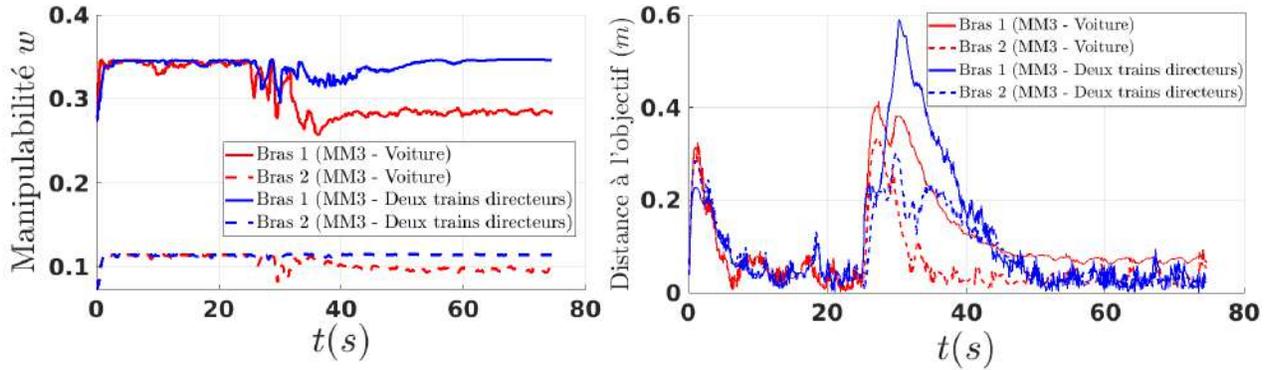


FIGURE 3.16 – Manipulabilité w des manipulateurs et distance à l'objectif des effecteurs pour les deux configurations possibles de la base mobile du MM3

Les positions des effecteurs et du mobile sont données sur la figure Fig.3.15. Dans le cas du modèle voiture, les deux effecteurs convergent au mieux vers les deux trajectoires sans qu'ils n'arrivent à les atteindre totalement. Ce constat se retrouve également sur la figure Fig.3.16 où, d'une part, il est visible que les distances à l'objectif ne convergent pas à zéro, mais également que la manipulabilité des deux bras diminue après la discontinuité. En effet, l'impossibilité d'atteindre leurs objectifs les forcent à se tendre au maximum avant d'être arrêtés par l'étage de coordination qui tolère une erreur de distance à l'objectif pour maintenir l'ensemble en sécurité.

Dans le cas de la plateforme en modèle deux trains directeurs, l'étage de coordination use du degré de manœuvrabilité supplémentaire pour contrôler l'orientation du mobile et le faire se déplacer en crabe (Voir orientation du mobile sur la figure Fig.3.15). De ce fait, les deux effecteurs arrivent à converger sur leurs objectifs respectifs, ce qui est confirmé par la figure Fig.3.16 où l'on observe les deux courbes de distance à l'objectif. De plus, après une dégradation de la manipulabilité sur le transitoire, les deux courbes reviennent à leurs valeurs d'avant.

Ces simulations permettent de démontrer la capacité de l'architecture proposée à user au mieux de l'ensemble de la redondance que lui offrent les capacités du système afin de résoudre les différentes tâches spécifiées. Une fois de plus, cela montre la versatilité de l'approche face à des structures différentes. De fait, elle s'est adaptée à l'ajout d'un nouveau manipulateur sans avoir eu à changer les modèles et les commandes des autres sous-systèmes. En outre, elle s'est adaptée aux capacités du robot afin de remplir de la meilleure façon possible les tâches spécifiées dans les deux exemples.

3.3.2.3 Influence des critères

Les expérimentations et simulations précédentes ont montré, le fonctionnement, l'intérêt et la versatilité de l'approche. Les simulations présentées dans la partie suivante sont axées sur les critères donnés au coordinateur, afin de montrer l'adaptation du comportement de la plateforme selon les critères choisis.

3.3.2.3.a Ajout, retrait, changement d'un critère

Un premier ensemble de simulations est proposé afin de comparer les comportements et performances de la méthode avec différents critères. Ces simulations se baseront sur le scénario n°1 avec la plateforme MM1. Trois ensembles de critères sont proposés :

- $\lambda_d + \lambda_l$: Ensemble composé du critère de distance à l'objectif et de la limite articulaire.
- $\lambda_d + \lambda_l + \lambda_w$: Ensemble de critères minimaux présentés précédemment.
- $\lambda_d + \lambda_l + \lambda_w + \lambda_\theta$: Ensemble composé des critères minimaux auxquels est ajouté un nouveau critère de tâche destiné à gérer l'orientation de l'effecteur.

Ce dernier ensemble est défini pour démontrer la possibilité de rajouter des critères au-delà de l'ensemble minimal. Ce dernier porte sur l'orientation de l'effecteur et se forme de la même façon que le critère λ_d :

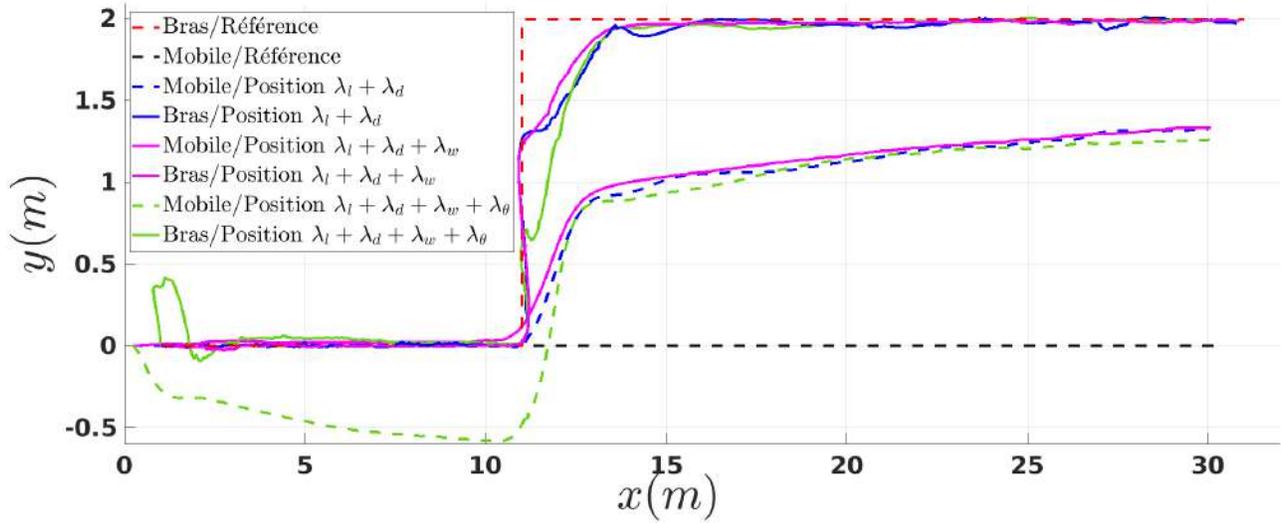


FIGURE 3.17 – Position de l'effecteur et du mobile par rapport à leurs trajectoires de référence pour les différents ensembles de critères proposés.

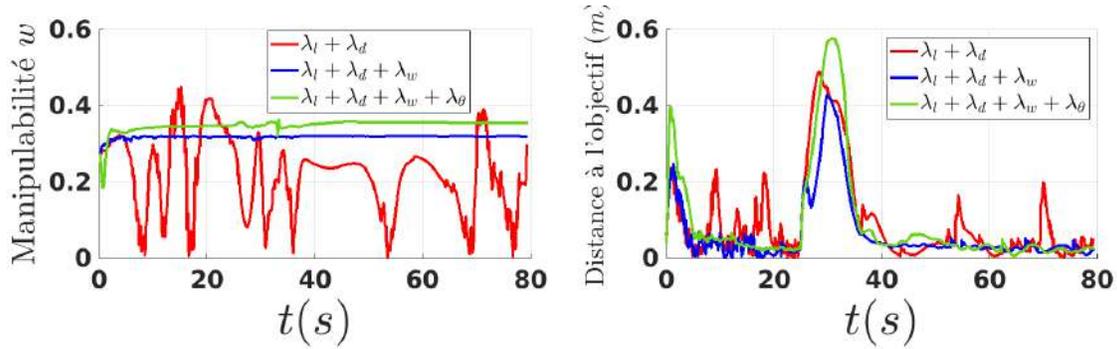


FIGURE 3.18 – Manipulabilité w du manipulateur et distance à l'objectif de l'effecteur pour les différents ensembles de critères proposés

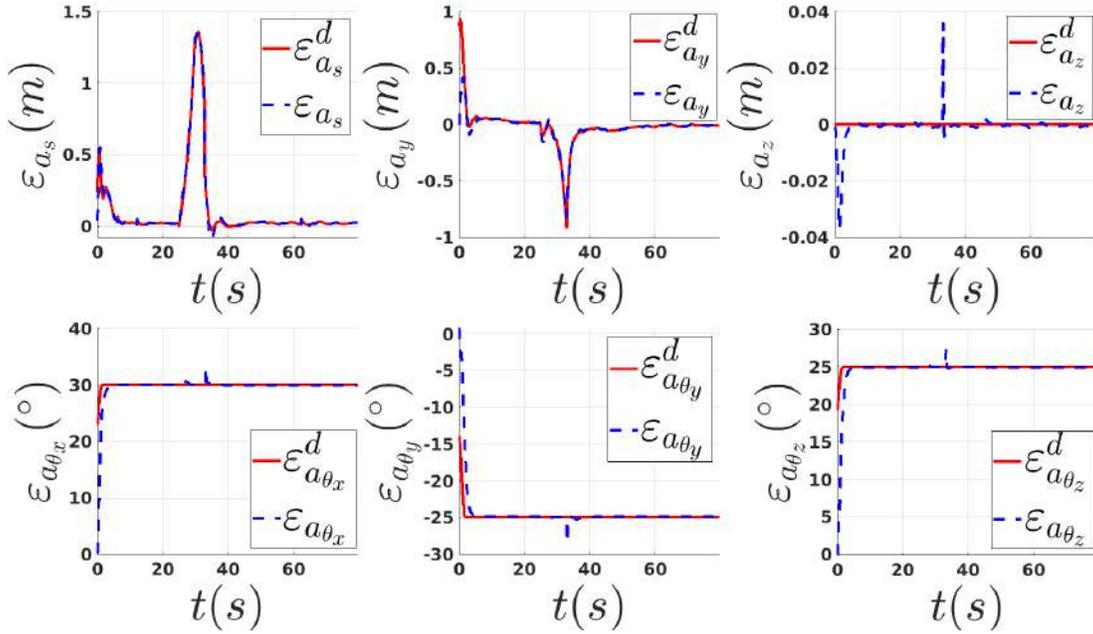
$$\lambda_\theta = 1 - \frac{1}{1 + \|\Theta_a - \Theta_a^d\|}. \quad (3.61)$$

Θ_a est l'orientation du repère de l'effecteur et Θ_a^d son orientation désiré. Dans le cas présenté ici, l'orientation désiré sera contrainte de rester nulle dans le repère du mobile.

Les résultats des trois simulations sont proposés sur la figure Fig.3.17 où sont représentées les positions de l'effecteur et du mobile pour les différentes simulations réalisées. La manipulabilité et la distance à l'objectif sont données en figure Fig.3.18.

Concernant le premier essai, le retrait du critère de manipulabilité entraîne une forte dégradation de la distance à l'objectif, ce qui correspond aux brefs instants de perte de contrôlabilité du manipulateur lorsqu'il atteint la singularité (moment où la valeur devient nulle sur la figure Fig.3.18 à gauche). Bien que la tâche soit réalisée entièrement, le suivi est fortement dégradé, et l'utilisation d'un tel ensemble de critères sur un système réel aurait de fortes chances de mettre en danger son intégrité.

En second lieu, les performances en terme de distance à l'objectif et de manipulabilité sont très similaires pour les deux autres simulations. Ainsi, la tâche est achevée tout en garantissant l'intégrité du système grâce à l'introduction du critère de manipulabilité. De plus, dans le cas de l'ensemble augmenté du critère d'orientation, la figure Fig.3.19 permet de constater que la régulation est correctement réalisée et que l'effecteur se positionne dans l'orientation désirée sans pour autant dégrader la performance du suivi ou la sécurité de l'ensemble.

FIGURE 3.19 – Écarts de l'effecteur à sa trajectoire pour l'ensemble des critères λ_w , λ_d , λ_l et λ_θ .

Cette série de simulations permet ainsi de démontrer que l'ajout ou le retrait d'un critère ne sont pas directement liés à la bonne réalisation de la coordination, sous la condition que les critères minimums de sécurité soient pris en compte. Ainsi, le coordonnateur est apte à s'adapter aux différentes tâches qui lui sont demandées. Les principales différences observées se situant au niveau des transitoires (au départ et sur la discontinuité). Dans le cas du troisième ensemble de critères, le coordonnateur doit faire un compromis entre deux critères à certains moments. Par exemple, celui de distance à l'objectif est dégradé pour permettre à celui d'orientation de se maintenir. La différence visible au niveau de la manipulabilité peut s'expliquer par le remplacement de l'effecteur au début de la troisième simulation pour satisfaire le critère d'orientation. Cette position étant une meilleure position de manipulabilité, le critère associé augmente légèrement. Dans le cas de la seconde simulation, le système ne converge pas de lui-même vers cette position car elle est en deçà de la limite de manipulabilité du critère. Ce dernier est très écrasé, donc avec un gradient très faible, qui ne pousse pas l'optimisation vers cette valeur.

3.3.2.3.b Priorité des sous-systèmes

Une dernière série de simulations a été effectuée concernant la priorisation des critères entre eux. Dans l'ensemble des simulations et expérimentations présentées auparavant, les critères étaient pondérés de la même façon. Dans la série de simulations suivante, les pondérations du critère de distance à l'objectif α_d seront ajustées afin d'en déterminer l'influence et les intérêts.

Ces simulations sont découpées en deux parties, la première avec le MM3 sur le scénario n°2 et la seconde avec le MM3 sur le scénario n°3. Dans les deux cas, l'objectif des effecteurs est de suivre au mieux leurs points objectifs. De plus, la configuration du MM3 étant choisie en modèle voiture, il est impossible au système, dans les deux scénarios, de compléter pleinement sa tâche. Une pondération sur les deux critères de distance à l'objectif des effecteurs est ajoutée afin de prioriser le suivi d'une trajectoire par rapport à l'autre.

Dans la première partie, trois simulations sont proposées, la première sans priorité ($\alpha_{d_1} = \alpha_{d_2} = 1$), la seconde en priorisant la trajectoire du premier manipulateur ($\alpha_{d_1} = 1$, $\alpha_{d_2} = 0.5$) et la troisième en priorisant la trajectoire du second manipulateur ($\alpha_{d_1} = 0.5$, $\alpha_{d_2} = 1$). Les résultats de ces simulations peuvent se trouver sur la figure Fig.3.20 où sont tracées les positions des effecteurs et du mobile dans les trois simulations.

Ces différents résultats montrent alors la capacité de la pondération à prioriser une tâche sur une autre. Ainsi,

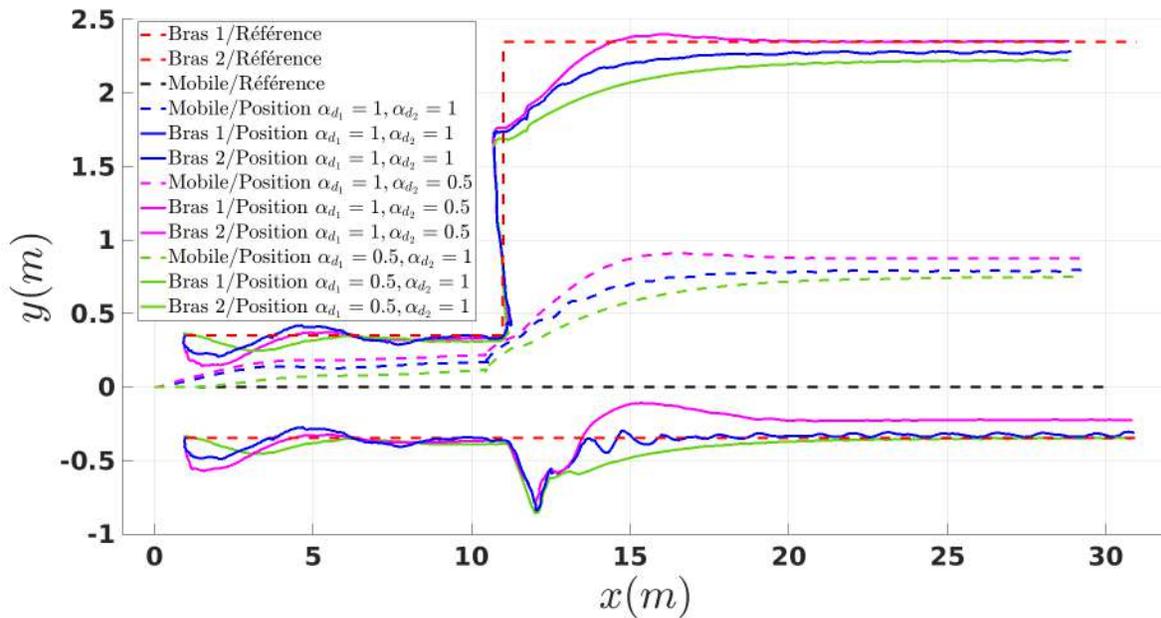


FIGURE 3.20 – Position des effecteurs et du mobile par rapport à leurs trajectoires de référence pour différentes valeurs de α_d avec le robot MM3 sur le scénario 2.

dans le cas où les priorités sont distinctes, la tâche prioritaire est menée à bien de façon optimale. L'effecteur se colle à la trajectoire prioritaire et le second s'adapte pour aller au plus proche de la seconde sans pour autant réussir à l'atteindre à cause du critère de manipulabilité. Ceci est également illustré par la figure Fig.3.21 où les valeurs de distance à l'objectif des effecteurs sont plus ou moins importantes selon leurs priorités respectives. De plus, dans les deux cas, l'impossibilité d'atteindre les deux objectifs, force les bras à s'étendre donc le critère de manipulabilité diminue légèrement tout en gardant une valeur identique quel que soit l'effecteur prioritaire.

Au contraire, dans le cas où il n'y a pas de priorité, la distinction est moins nette entre, les valeurs de distance à l'objectif qui ont tendance à osciller et être plus importantes en moyenne. Ceci se ressent également sur le critère de manipulabilité qui est dégradé par rapport aux deux autres essais. La fonction de coordination sans priorité se retrouve à posséder deux minimums locaux proches séparés par un faible maximum local. De ce fait, l'optimisation, peut sauter d'un minimum à l'autre, induisant de brusques variations de l'écart latéral désiré du mobile, amenant à de brusques déplacements du mobile et de l'effecteur, d'où une convergence moins bonne des systèmes et des critères dégradés. Ces oscillations entre les minimums locaux s'observent sur la figure Fig.3.22 représentant les écarts latéraux désirés du mobile dans les trois cas. On observe nettement les valeurs d'écarts constantes pour les critères priorisés et un écart fluctuant entre ses deux limites pour les critères non priorisés. Cette fluctuation provoque alors une oscillation des positions objectif des effecteurs entre la position sur la trajectoire et la position de sécurité à côté de la trajectoire qui tend à étendre davantage les manipulateurs et ainsi dégrader leurs manipulabilités.

3.3.2.3.c Limite de la pondération au sein de la fonction objectif

Ces simulations ont montrés que l'ajout d'une pondération à l'un des critères permet d'abaisser l'un des minimas locaux pour que l'optimisation ne puisse pas franchir le maximum local qui les sépare. Cependant, la valeur de la pondération est importante et doit être choisie avec soin. Une dernière simulation a été effectuée en utilisant le MM3 sur le scénario n°3 en comparant trois valeurs de pondération différentes : la même pondération entre les critères, la pondération à 0.5 et la pondération à 0.25. Les résultats de cette simulation sont donnés sur la figure Fig.3.23 . Cette dernière montre que si la valeur de la pondération utilisée est la même que précédemment (à 0.5), cela ne permettra pas d'empêcher quelques oscillations au niveau du transitoire (voir courbe jaune Fig.3.23). Dans ce cas, la priorité n'est pas assez forte pour empêcher le saut d'un minimum à l'autre. Au contraire, en diminuant la valeur du poids de priorité sur la trajectoire de moindre importance, le saut est plus net et l'on retrouve un comportement stable du robot.

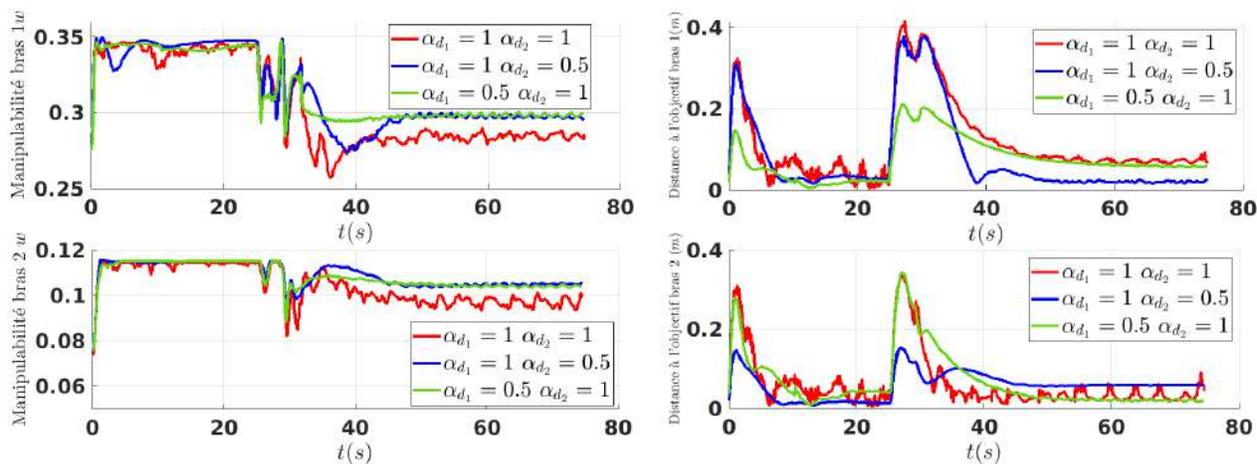


FIGURE 3.21 – Manipulabilité w des manipulateurs et distance à l'objectif des effecteurs pour différentes valeurs de α_d avec le robot MM3 sur le scénario 2.

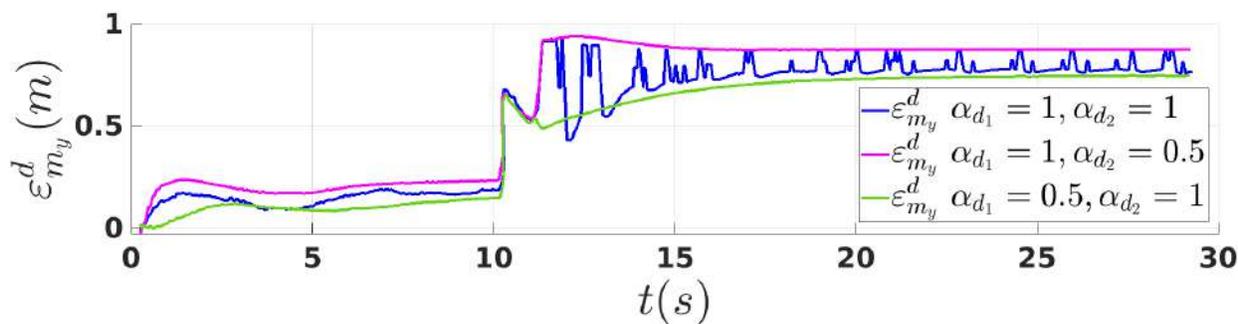


FIGURE 3.22 – Écart latéral du mobile pour différentes valeurs de α_d avec le robot MM3 sur le scénario 2.

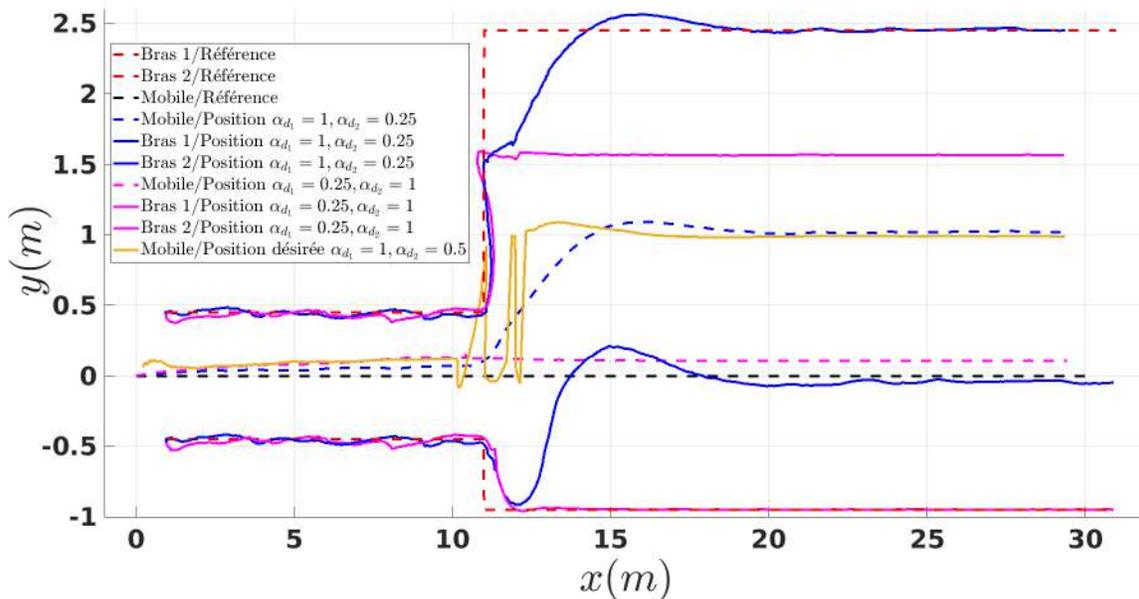


FIGURE 3.23 – Position des effecteurs et du mobile par rapport à leurs trajectoires de référence pour différentes valeurs de α_d avec le robot MM3 sur le scénario 3.

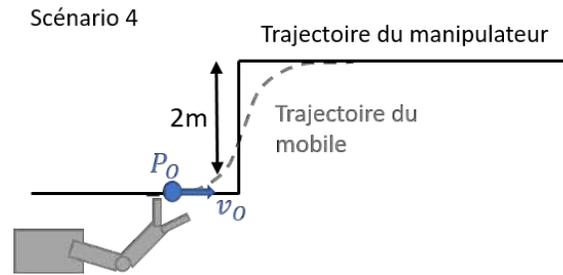


FIGURE 3.24 – Illustration du quatrième scénario de simulation, utilisant une trajectoire de référence du mobile sous forme de sigmoïde.

Les simulations présentées dans cette dernière partie ont montré l'intérêt de la pondération au sein de la fonction de coordination pour la priorisation des tâches, ce qui appuie la flexibilité de l'approche proposée et son intérêt. Cependant, il est à noter que l'utilisation de telles pondérations dans les fonctions d'optimisation est complexe à mettre en œuvre de par leur réglage qui nécessite une forte expérience empirique.

3.3.2.4 Variation de la méthode

Maintenant que la méthode a été bien établie sur ces scénarios très simplistes et que ses intérêts et performances ont été démontrés, cette partie propose deux variations permettant de l'améliorer. Ces deux variations concernent la trajectoire de référence du mobile et le maintien de l'hypothèse de convergence des sous-systèmes.

De fait, jusqu'à présent, la trajectoire de référence du mobile était considérée comme une simple ligne droite. Cependant, cette vision très simple pose de nombreux problèmes dans le cas de scénarios applicatifs plus aboutis :

- Premièrement, si la trajectoire du manipulateur présentait une discontinuité beaucoup plus grande, le système aurait tendance à forcer le mobile à se mettre à la perpendiculaire de sa propre trajectoire de référence. Or, une telle configuration est singulière dans le cas de la commande par backstepping choisie pour ces essais²². Ceci n'est donc pas envisageable pour le maintien de l'intégrité du système.
- En second lieu, l'idée d'une trajectoire continuellement droite pour le mobile semble très limitante. De fait, si la trajectoire possède une courbure, ce dernier terme va intervenir au sein de la commande et pousser le mobile à tourner sur lui-même plus rapidement, ce qui favorisera la convergence de chacun des sous-systèmes ainsi que la réalisation de la tâche. Afin de démontrer cela, les prochains essais proposeront l'utilisation d'une trajectoire sous la forme d'une fonction sigmoïde d'une amplitude de 2m (largeur de la discontinuité) comme trajectoire de référence du mobile (Voir Fig.3.24).
- Enfin, la dernière réserve émise concerne le caractère local de la trajectoire. Ainsi, même si en théorie l'utilisation d'une trajectoire fixée dans l'espace comme référence ne pose pas de problème, il apparaît en pratique que plus le sous-système s'en éloigne, plus une simple variation de mouvement de sa part peut faire évoluer le point associé sur la trajectoire de façon importante, pouvant engendrer des oscillations et des amplitudes de commande brusques. Ainsi, pour garantir un bon fonctionnement, il est préférable que les systèmes restent proches de leur trajectoire. Ce dernier point sur l'évolution de la trajectoire de référence sera abordé plus en détails dans le dernier chapitre (Chapitre.5) sur le cas applicatif du suivi de végétation.

La seconde variation abordée ici concerne l'hypothèse de convergence des sous-systèmes et notamment la mise en défaut de l'approche si l'un des sous-systèmes n'a pas suffisamment bien convergé par rapport aux autres. Dans les essais précédents, et conformément à ce qui avait été présenté à la fin de la section Sec.3.1.2.3, l'hypothèse de convergence est résolue en utilisant les positions réelles des sous-systèmes pour le calcul du point désiré de ceux qui leur sont dépendants (bras sur le mobile par exemple). Cependant, cette solution n'est pas satisfaisante du fait qu'elle engendre des erreurs importantes dans la tâche principale, dès que les sous-systèmes n'ont pas parfaitement convergé. Ce problème peut être résolu par l'introduction de deux nouveaux critères visant à restreindre les positions désirées futures des points de contrôle des sous-systèmes autour de leur position courante. L'idée est donc

22. Pour plus de détails sur la commande du mobile, voir annexe A.1.2.

de venir mettre un critère sur l'exploration des configurations possibles du système pour l'itération suivante. Ceci a l'avantage de ne pas créer de brusques variations entre la position courante du point de contrôle et la position désirée à l'itération suivante et de respecter l'hypothèse de convergence.

Pour cela, deux critères sont ajoutés, le premier qui limite la position désirée du mobile à l'itération suivante à une certaine distance autour de sa position courante, et le second qui limite l'extension maximale du bras de sorte que même si le mobile n'est pas sur sa position désirée, l'extension supplémentaire provoquée sur le manipulateur pour atteindre son objectif ne l'emmènera pas en position singulière. Ainsi, il est possible d'utiliser les positions désirées des sous-systèmes pour calculer celles des sous-systèmes dépendants (le bras sur le mobile) et ainsi améliorer les performances de suivi.

Le critère concernant la limite d'exploration du mobile est noté λ_e et s'exprime tel que :

$$\lambda_e = \left(\frac{\sinh(c_1 x)}{\sinh(c_1 c_2)} \right)^2 \quad (3.62)$$

Dans cette dernière équation, x exprime la norme entre le point désiré de l'itération suivante et le point courant du mobile. L'utilisation de la fonction \sinh permet de créer une vallée relativement plane pour que l'optimisation ne force pas le mobile à faire de petit déplacement. Cela lui laisse plus de marge de manœuvre. Dans ce critère c_2 représente la distance de parcours autorisée pour le mobile autour de son point courant et c_1 la pente du critère proche de sa limite.

Le critère concernant la limite d'extension du bras est noté λ_{ext} et s'exprime tel que :

$$\lambda_{ext} = e^{-d_1(|\overrightarrow{AE}| - d_2)}. \quad (3.63)$$

Dans cette expression d_2 représente la limite d'extension du manipulateur et d_1 représente la pente du critère proche de cette limite.

De manière empirique, les paramètres ont été choisis tels que $c_1 = 20$, $c_2 = 0.35$, $d_1 = 50$ et $d_2 = 1.1$.

Quatre simulations ont été proposées dans cette partie avec chacune une combinaison des deux variations présentées dans cette dernière partie afin d'en mesurer les intérêts. Les résultats de ces différentes simulations sont donnés sur la figure Fig.3.25. Par ailleurs, les critères de distance à l'objectif et de manipulabilité pour les quatre essais sont donnés en figure Fig.3.26.

La première de ces simulations, Fig.3.25(a) se base sur le même scénario et les mêmes critères que celles présentées précédemment et servira d'étalon comparatif aux autres méthodes.

La seconde simulation, Fig.3.25(b) présente l'utilisation des critères d'exploration comme solution à l'hypothèse de convergence. Cette figure permet de pointer deux choses induites par ces critères. Premièrement, le critère limitant le point désiré à l'itération suivante cause une plus grande erreur sur la tâche de l'effecteur au sein de la discontinuité. De fait, l'écart latéral désiré du mobile n'évolue plus comme un échelon tel qu'en figure Fig.3.25(a) mais comme une rampe dont la pente est réglée par ce critère. Ceci ralentit alors la rotation du mobile sur lui-même et limite donc la réalisation de la tâche de l'effecteur. Cependant, l'erreur du mobile est limitée à de faibles variations, ce qui permet de garantir à tout instant qu'il soit proche de son point désiré et ne met ainsi pas le système en défaut. Par ailleurs, l'erreur de l'effecteur ne dépend plus de la convergence du mobile et en dehors de la discontinuité, les performances de suivi en sont meilleures. Ceci se confirme à la lecture de la figure Fig.3.26 qui met en évidence une amélioration de la distance à l'objectif en dehors de la discontinuité. Sur la même figure, il est également possible de remarquer, lors de l'engagement de la discontinuité, une dégradation de la manipulabilité sans pour autant mettre en défaut le manipulateur ceci étant induit par les variations de convergence des sous-systèmes autour de leurs points désirés.

La troisième simulation (Fig.3.25(c)) n'utilise pas les critères d'exploration, mais se base sur le scénario n°4 présenté en figure Fig.3.24. Elle permet ainsi de mettre en évidence ce qui avait été décrit précédemment sur l'intérêt de l'utilisation d'une trajectoire plus élaborée pour la référence du mobile. Dans ce cas de figure, la courbure de la trajectoire permet au mobile de se tourner plus rapidement sur lui-même en limitant les variations d'écarts

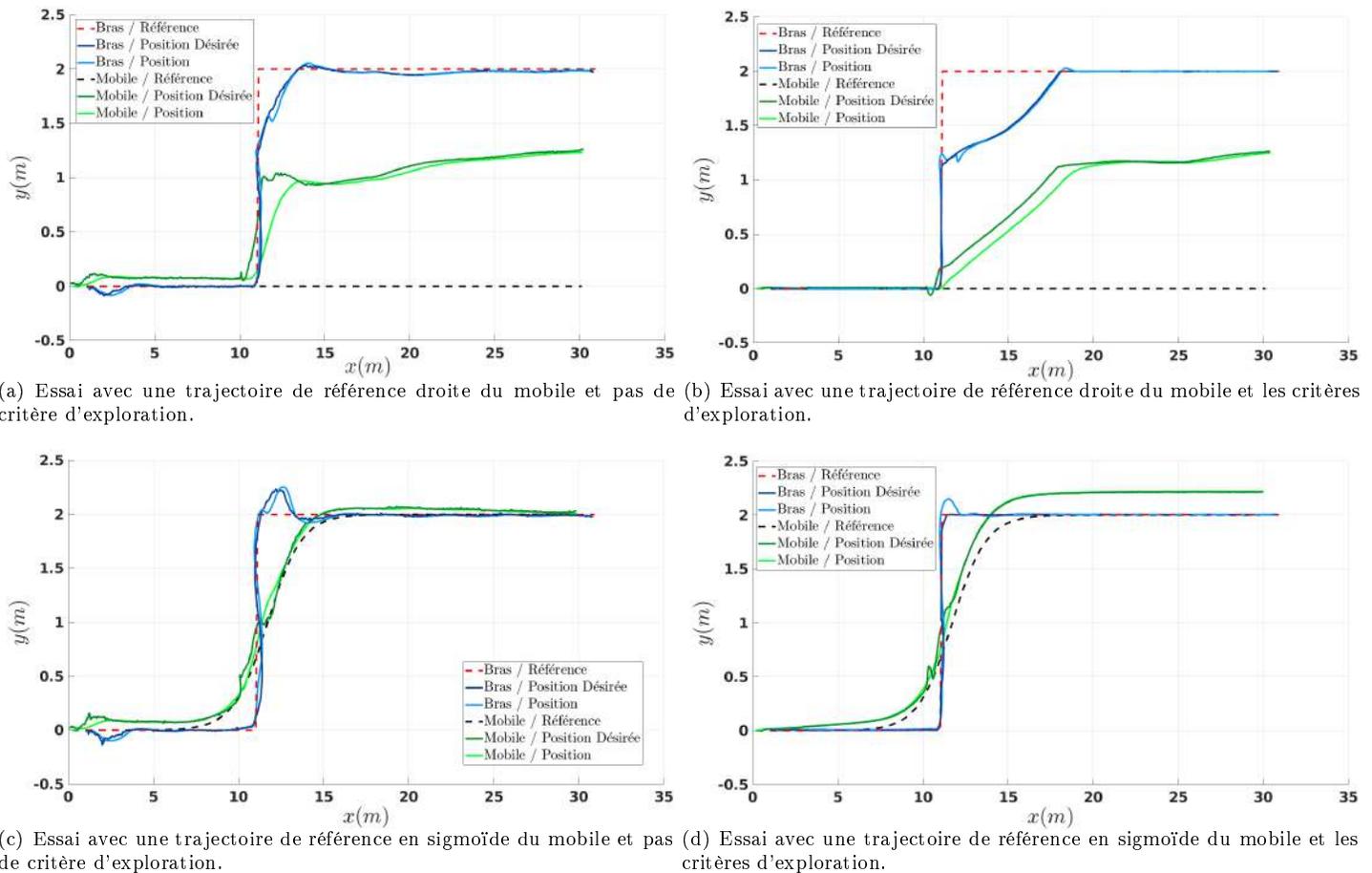


FIGURE 3.25 – Résultats des simulations présentant les variations de méthodes sur la trajectoire de référence et l'hypothèse de convergence.

latéraux du mobile. Ainsi l'erreur de l'effecteur (voir Fig.3.26) dans la discontinuité est réduite grâce à une meilleure réactivité du mobile.

Enfin, la dernière simulation présente l'utilisation des deux variations avec de très bonnes performances de suivi de trajectoire sur l'ensemble de la trajectoire de l'effecteur. Seul un faible dépassement du manipulateur est observé à la sortie de la discontinuité. Cette dernière simulation illustre alors très bien les intérêts que peuvent offrir ces deux variations. Elles seront ainsi ajoutées à la méthode pour le cas applicatif présenté au dernier chapitre de ce mémoire.

A ce stade, il est important de prendre quelques lignes pour discuter du choix des trajectoires de références des sous-systèmes. Comme il a été indiqué, en théorie la méthode veut laisser ce choix très large car les trajectoires ne servent que de support à la commande du système et les variations d'écarts autour d'elles suffisent à coordonner le système. Cependant en pratique, les contraintes et les dynamiques des systèmes ne permettent pas de laisser ce choix arbitraire. Concernant la trajectoire de référence du manipulateur, il est simple car il consiste au choix de la tâche à réaliser. Pour le mobile, le choix de la trajectoire est important car il permet d'aider ce système non-holonome et à dynamique lente à atteindre ses objectifs de la meilleure façon possible. Les manières de réaliser ce choix sont multiples. L'une d'entre elles, basée sur un retour capteur, sera présentée dans le Chapitre.4. Une autre manière serait l'utilisation conjointe d'un planificateur et du coordinateur pour la coordination. Le premier servirait à donner grossièrement une trajectoire aux sous-systèmes sans chercher à obtenir une optimalité longue et coûteuse²³. Le coordinateur se chargerait de l'adaptation locale du comportement des sous-systèmes en les faisant évoluer autour de ce premier chemin grossier. Cette évolution de l'architecture n'a cependant pas pu être testée et éprouvée durant les travaux de cette thèse et reste une porte ouverte pour des travaux futurs visant à améliorer l'approche proposée

23. De fait, il est souvent nécessaire de replanifier les trajectoires lors de la réalisation de la tâche, ce qui est coûteux en ressources et temps de calcul, et qui peut arriver de façon répétée dans un milieu aussi variable que le milieu naturel.

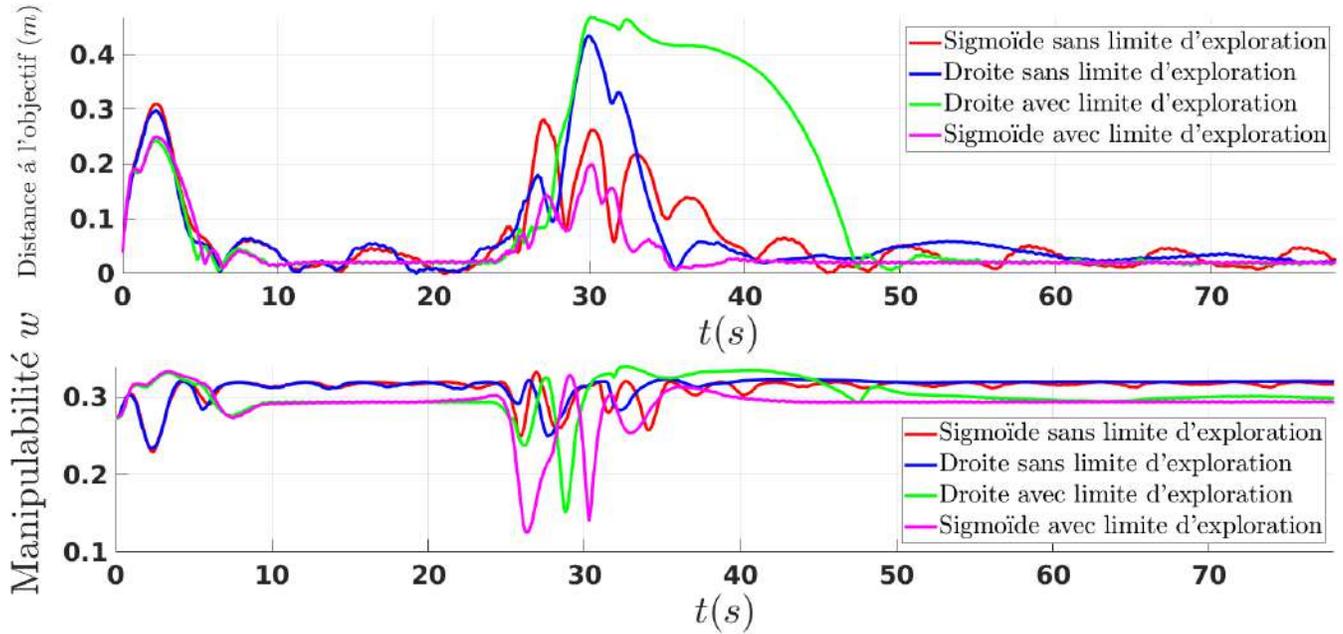


FIGURE 3.26 – Manipulabilité et distance à l'objectif lors des simulations utilisant les variations sur la trajectoire de référence du mobile et les critères d'exploration.

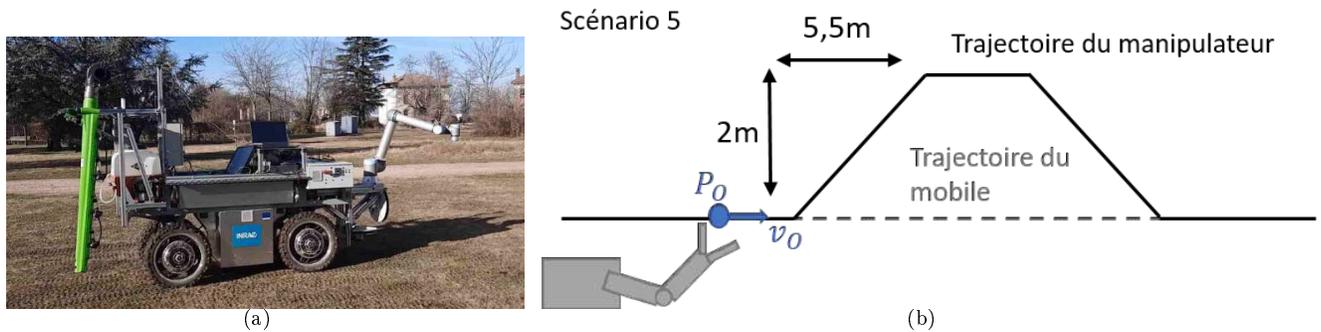


FIGURE 3.27 – Essais expérimentaux sur un manipulateur mobile à roues directrices. (a) : MM4, Manipulateur mobile mono-bras à deux trains directeurs. (b) : Scénario expérimental du MM4.

ici. Néanmoins, il reste possible de donner une règle empirique sur le choix de la trajectoire du mobile qui a été mise en œuvre plusieurs fois au cours de ces travaux de thèse en offrant des résultats satisfaisants. Cette dernière consiste à choisir une version admissible par le mobile du projeté au sol de la trajectoire du manipulateur.

3.3.2.5 Scénario n°5 sur le MM4

Finalement, cette dernière partie présente deux expérimentations réalisées sur le manipulateur mobile MM4 (Voir Fig.3.27(a)) associées à un cinquième scénario (Voir Fig.3.27(b)). Le MM4 est très similaire au MM2, mais il est pourvu d'un bras de type *Ur10e* (Voir annexe F.1) à la position $(1.53 \ 0 \ 0.83)^t$ dans le repère du mobile. Tout comme lors des simulations, la base mobile possède deux cinématiques, le modèle voiture et le modèle à deux trains directeurs.

Cette dernière série d'expérimentations est présentée à la fin de cette partie car elle permet, à la fois de conclure sur certains aspects déjà évoqués précédemment, mais aussi de mettre en lumière certaines limites de l'approche qui n'apparaissent ni en simulation ni sur le MM1, et ainsi d'ouvrir sur les différentes perspectives d'évolution pour l'approche de coordination.

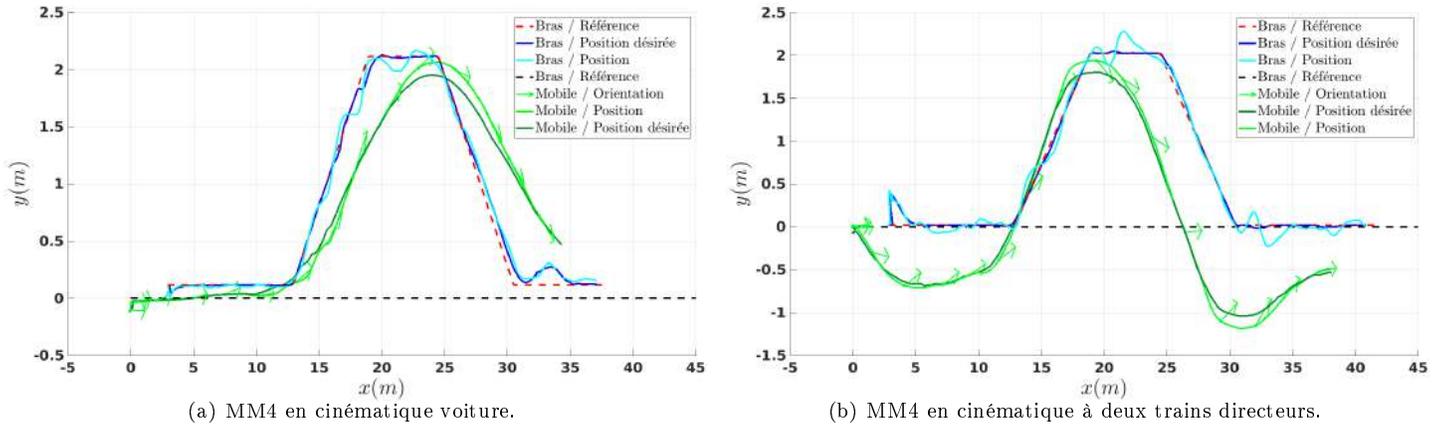


FIGURE 3.28 – Position dans l'espace des sous-systèmes du MM4 lors des deux essais en cinématique voiture et deux trains directeurs.

La difficulté des expérimentations menées par la suite réside dans la dynamique de la base mobile. De fait, la base Adap2e possède des dynamiques très lentes que ce soit en terme de temps de réaction sur la vitesse longitudinale de ses roues ou sur le braquage de ses trains avant et arrière, supérieurs à la seconde. Par ailleurs, les saturations basses des moteurs en vitesse longitudinale sont importantes et se situent aux alentours de $0.3 - 0.4m/s$ ²⁴. Ainsi les conditions d'expérimentation sur ce robot sont plus dégradées que celles présentes sur le MM1 ou bien sur son équivalent numérique.

L'ensemble de ces raisons a également justifié le choix d'un cinquième scénario (Voir Fig.3.27(b)). Ce dernier est un peu plus long et possède deux discontinuités. Cependant elles ont été adoucies en ajoutant des pentes de progression pour limiter les amplitudes de commande envoyées au robot. De même, à cause des saturations, les expérimentations ont été menées pour une vitesse de $1m/s$. Enfin, également pour limiter les amplitudes brusques, les critères d'exploration ont été mis en place lors de ces essais.

Deux expérimentations ont été menées sur ce scénario, chacune en exploitant une cinématique différente de la base mobile. Les résultats de position pour les deux expérimentations sont donnés sur la figure Fig.3.28. Par ailleurs, la figure Fig.3.29 présente la manipulabilité et la distance à l'objectif pour les deux essais.

Dans un premier temps, il apparaît que les résultats sont nettement moins performants que ceux présentés auparavant. L'erreur de l'effecteur est importante dans les deux cas et centrée autour de 20 cm. De plus, les manipulabilités sont oscillantes et celle de l'essai avec la cinématique à deux trains directeurs présente plusieurs pointes vers des valeurs faibles. De plus, la dynamique du robot assujéti à la commande coordonnée provoque des oscillations indésirées sur la plateforme et notamment des effets de "pompage" entre le mobile et le manipulateur. Ces effets oscillants peuvent se retrouver sur les figures Fig.3.30 et Fig.3.31 présentant respectivement les écarts réels et désirés du mobile et du manipulateur. Ces dernières montrent les oscillations présentes sur les écarts réels et non sur les écarts désirés, ce qui démontre la difficulté de la commande à réguler les variations d'écarts désirés, à cause de la dynamique de la base mobile. Il apparaît alors des erreurs importantes dans les différents écarts, qui causent la baisse de performance observée. Ceci est notamment vrai pour le cas de la cinématique à deux trains directeurs qui montre d'importantes erreurs sur la régulation en angle du mobile et induit alors les baisses de la manipulabilité observée.

Néanmoins, ces résultats sont à nuancer. De fait, bien que les performances soient dégradées, la coordination fonctionne sur ce système et l'effecteur tend à suivre sa trajectoire. La régulation des écarts est imparfaite mais le coordinateur s'adapte à la cinématique de la plateforme de manière similaire à ce qui a été observé en simulation. Ainsi, ces essais démontrent une fois de plus l'argument de généricité de l'architecture proposée étayée par des résultats expérimentaux. Par ailleurs, le système parvient à maintenir son intégrité malgré les fortes contraintes auxquelles il est soumis et la vitesse supérieure du point objectif présent dans le scénario. L'ensemble de ces raisons

²⁴. Ces dernières varient selon le terrain, car les moteurs possèdent peu de couple et une simple bosse sur le terrain peut faire buter le robot lors du démarrage.

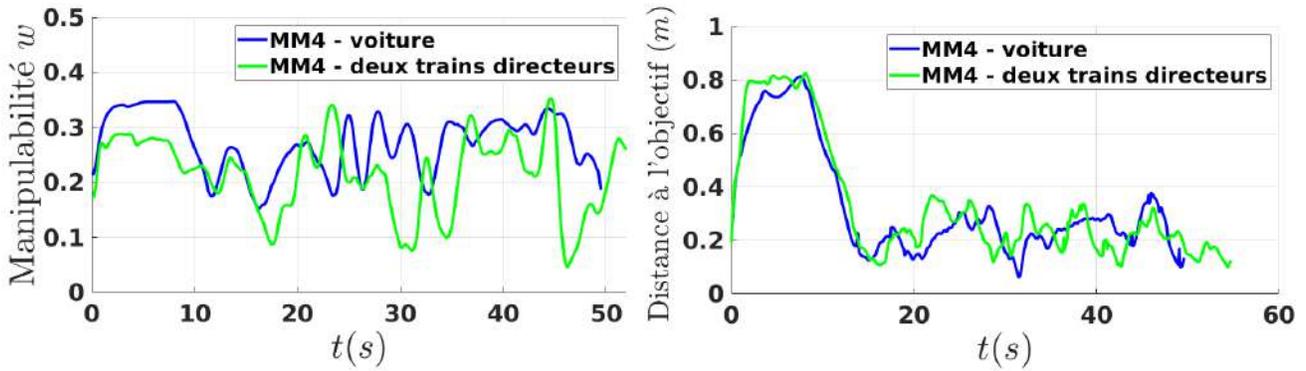


FIGURE 3.29 – Manipulabilité et distance à l’objectif lors des expérimentations du MM4 en cinématique voiture et cinématique à deux trains directeurs.

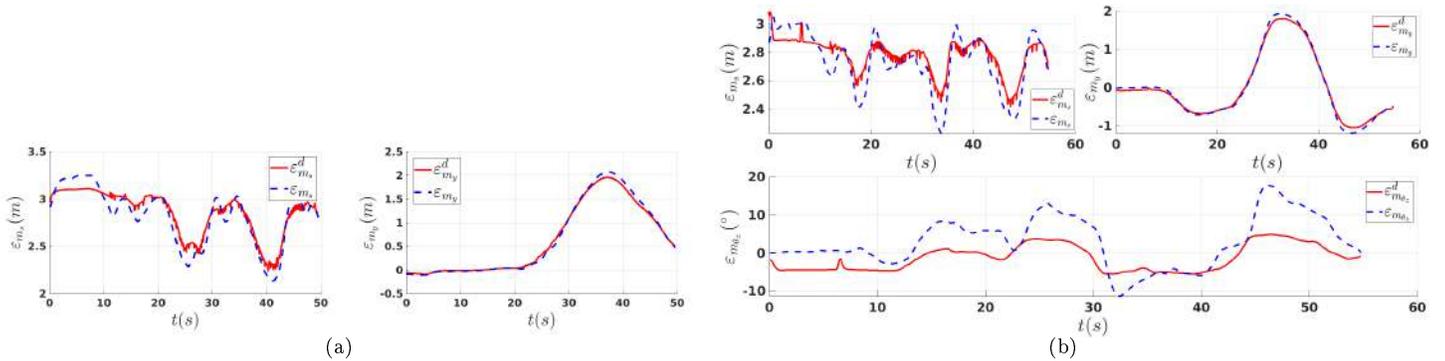


FIGURE 3.30 – Ecarts réels et désirés du MM4 lors des deux essais en cinématique voiture et deux trains directeurs. (a) : Ecarts du mobile composant le MM4 en cinématique voiture. (b) : Ecarts du mobile composant le MM4 en cinématique à deux trains directeurs.

tend alors à démontrer la robustesse de l’approche.

Par ailleurs, la limite qui se présente ici, concerne la commande du mobile qui peine à réguler correctement les écarts à cause de la dynamique complexe de la base. Ceci démontre alors que dans ce cas de figure, la commande choisie est inadaptée au pilotage de la base mobile. Cela motive l’idée que l’utilisation d’une commande prédictive, similairement à ce qui a été proposé dans LENAIN, THUILOT, CARIOU et al. (2007), prenant compte des dynamiques de la base au sein de la commande, pourrait améliorer les résultats obtenus en améliorant la régulation du mobile. Ce type de commande n’a pas pu être implémenté durant les travaux de cette thèse mais font partie des perspectives à travailler pour pouvoir coordonner des plateformes avec des dynamiques lentes souvent présentes en milieu agricole. Par ailleurs, même si les résultats sont imparfaits dans l’état, ils permettent d’ouvrir la voie à une méthode de coordination fonctionnelle (en simulation et de façon expérimentale) pour les cinématiques utilisant des trains directeurs.

3.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter une nouvelle architecture de coordination pour les manipulateurs mobiles en se basant sur une approche en couplage externe et un coordinateur permettant de réaliser un pilotage de chaque sous-système par la variation de leurs écarts respectifs à une trajectoire de référence. L’architecture présentée prend ici tout son sens, du fait qu’elle tire parti du meilleur du couplage interne et du couplage externe. Le premier, par son utilisation au sein du coordinateur sous la forme d’un modèle holonome, qui permet la résolution simple de la redondance, tandis que le second permet la prise en compte des spécificités de chaque sous-système à un plus bas niveau. Présenter le système sous une forme à deux niveaux avec une boucle de coordination permet de décorréler les décisions de coordination des décisions de commande qui, au sein de la tâche, ne se situent pas au même niveau d’abstraction. Le niveau de coordination peut ainsi piloter la tâche sans se soucier des contraintes particulières de chaque partie, tandis que le niveau de commande se charge que chaque sous-système accomplisse ses consignes pour

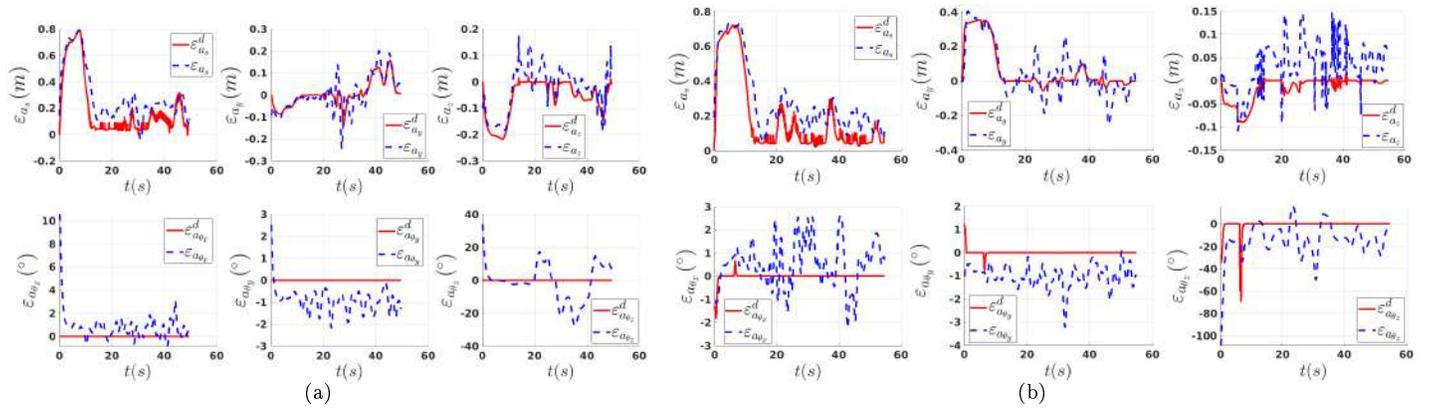


FIGURE 3.31 – Ecarts réels et désirés du manipulateur composant le MM4 lors des deux essais en cinématique voiture et deux trains directeurs. (a) : Ecarts du manipulateur composant le MM4 en cinématique voiture. (b) : Ecart du manipulateur composant le MM4 en cinématique à deux trains directeurs.

la bonne résolution de la tâche, en tenant compte de leurs spécificités propres. Une telle architecture se montre alors très versatile face à la diversité des structures de manipulateurs mobiles et peut très bien s’y adapter sans avoir à changer de modèle ou de commande de façon globale. Par ailleurs, cette généricité lui permet de coordonner également des manipulateurs mobiles composés d’une base mobile possédant des trains directeurs, plus facilement que par l’utilisation des méthodes déjà développées dans la littérature scientifique.

Ce chapitre a également permis de mettre en lumière les nombreux avantages, ainsi que les limites de l’approche proposée par de nombreuses simulations et essais expérimentaux. Ces derniers ont démontré le caractère versatile de l’approche par sa mise en œuvre sur quatre structures de manipulateurs mobiles différentes avec des cinématiques de base mobile variables. De plus, elles ont montré la réalisation effective de cette approche par plusieurs essais expérimentaux, défaut dont souffrent beaucoup d’approches de l’état de l’art qui s’arrêtent à la simulation.

A ce stade cependant, l’architecture proposée n’est encore qu’à l’état de preuve de concept et beaucoup de choses peuvent être améliorées pour en augmenter les performances. Malgré cela, la mise en œuvre de ce concept ouvre la voie à une nouvelle manière d’aborder la coordination qui soit centralisée mais sans être globalisée sous un unique modèle.

Parmi les différentes perspectives qui peuvent être envisagées pour compléter et faire évoluer ces travaux, se trouve la mise en place d’un planificateur permettant de donner une direction globale aux trajectoires de référence, notamment celle du mobile, afin d’améliorer les résultats obtenus, comme il a été montré dans la partie précédente.

Par ailleurs, il a également été discuté de l’utilisation d’une commande prédictive au sein des commandes des sous-systèmes, afin d’offrir une meilleure régulation des écarts désirés, par la prise en compte de la dynamique propre du mobile mais également des variations de courbure de la trajectoire de référence qui peuvent induire localement des dépassements.

De plus, l’utilisation de la fonction de coordination présentée ici dans un algorithme d’optimisation est complexe, notamment à cause du réglage des poids et des paramètres des critères présentés, qui nécessite une réelle expérience empirique afin d’être adapté au mieux selon le contexte et le matériel utilisé. Ce point constitue une limite forte à l’architecture proposée dans ce chapitre. Cependant, il est nécessaire de la nuancer pour deux raisons principales :

- La première est que le réglage fin des paramètres d’une fonction assuré par un expert peut s’envisager dans l’avenir comme étant réalisé par un système expert porté par les méthodes d’apprentissage. Des travaux similaires ont été produits pour le réglage des gains de commande d’un mobile en utilisant un algorithme de deep learning HILL et al. (2020) ou des approches par mode glissant et logique floue B. XU, PANDIAN et PETRY (2005).
- La seconde raison réside dans la décorrélation du coordinateur par rapport à l’architecture. Le choix qui a été

fait sur un coordinateur basé sur une fonction de coordination similaire à une fonction de coût à minimiser, a largement été motivé par sa simplicité de mise en œuvre afin de faire la preuve de concept de l'architecture et de démontrer son fonctionnement et notamment sa versatilité. Cependant, le choix du coordinateur ne s'arrête pas à cette seule fonction de coordination. De fait, n'importe quelle méthode permettant d'obtenir des écarts désirés pour les sous-systèmes à partir d'un modèle générique, d'un ensemble de critères et d'une référence, pourrait remplacer ce coordinateur. Une des façons d'envisager cela serait d'utiliser le modèle générique de la plateforme²⁵ associé à la méthode de résolution à noyaux ou à des méthodes de résolution numérique plus récentes telles que les solveurs QP utilisés principalement dans les couplages internes. Le coordinateur bénéficierait alors des avantages des méthodes en couplage interne sans que la versatilité de l'architecture soit remise en cause.

Pour aller plus loin, il semble pertinent de se pencher également vers un coordinateur prédictif pour l'ensemble de la coordination, capable de former une trajectoire d'écarts désirés localement sur un court horizon de prédiction. Le coordinateur serait alors formé de deux étages, l'un composé par un planificateur global orientant les principales actions directrices du système et le second par un planificateur local capable de moduler les actions du manipulateur mobile autour des actions principales.

Une telle vision d'un coordinateur formé par deux étages, un global et l'autre local, se rapproche des méthodes utilisées pour la gestion d'une flotte mobile, permettant de coordonner leur déplacement pour éviter les collisions tout en assurant la meilleure réalisation possible de leurs objectifs. Cela montre que l'architecture ainsi pensée, peut permettre non seulement la coordination de robots possédant une structure rigide entre leurs sous-parties (comme ceux étudiés dans ce mémoire) mais aussi ceux dont la structure entre sous-parties est flexible voire virtuelle. De fait, l'une des perspectives d'évolution de l'architecture présentée ici est la coordination de flottes de manipulateurs mobiles non homogènes en considérant des liens rigides, flexibles ou virtuels entre l'ensemble des sous-parties du système robotisé. Cette capacité de mise à l'échelle du coordinateur est due uniquement à sa versatilité lui offrant la capacité d'ajouter ou de retirer des sous-systèmes à loisir, tout en faisant varier la nature du lien qui unit les sous-structures. Un exemple d'un tel système est l'utilisation de deux manipulateurs mobiles mono-manipulateur et mono-base pour le transport de charges lourdes en coopération. Avant la saisie de l'objet, un lien virtuel existe entre les sous-systèmes. Une fois l'objet saisi, ce lien devient rigide par l'intermédiaire de l'objet d'intérêt et les deux manipulateurs mobiles sont alors traités comme un seul manipulateur mobile, bi-manipulateur et bi-base.

Ainsi, l'approche proposée ici répond aux différents enjeux de la robotique dans le monde agricole, abordés dans le premier chapitre de ce mémoire, notamment par son caractère adaptable. Le prochain chapitre abordera plus spécifiquement le cas de la navigation du manipulateur mobile en milieu naturel qui pose de nouveaux défis eux-mêmes impactant les différentes commandes des sous-systèmes et par conséquent la coordination du manipulateur mobile.

25. Voir Sec.2.2.2.2.b.b.

Chapitre 4

Navigation d'un manipulateur mobile en environnement naturel

SOMMAIRE DU CHAPITRE

4.1	Adaptation aux irrégularités du terrain	146
4.1.1	Résultats en simulation	146
4.1.2	Résultats expérimentaux	147
4.2	Adaptation aux perturbations du milieu extérieur	149
4.2.1	Observateur pour le mobile	150
4.2.1.1	Repère de référence	150
4.2.1.2	Observateurs spécifiques	151
4.2.1.3	Équivalences	155
4.2.1.4	Observateur générique	156
4.2.2	Observateur pour le manipulateur	160
4.2.3	Résultats expérimentaux	160
4.2.3.1	Présentation des essais expérimentaux	160
4.2.3.2	Résultat des essais sur les observateurs du mobile	162
4.2.3.3	Résultats des essais concernant l'équivalence	165
4.2.3.4	Résultats des essais sur l'application de l'observateur générique au manipulateur	166
4.3	Expérimentations en milieu naturel	167
4.4	Conclusion	172

Ce quatrième chapitre aborde le deuxième axe des travaux menés durant cette thèse concernant la navigation des manipulateurs mobiles en milieu naturel. Il traite de la mise en œuvre de méthodes permettant de compenser les irrégularités du terrain ainsi que ses dynamiques s'exprimant notamment à travers le glissement des roues de la base mobile.

De fait, la méthode de coordination proposée dans le chapitre précédent repose sur une navigation fiable et robuste pour converger le plus rapidement possible sur les écarts désirés et satisfaire l'hypothèse de convergence des sous-systèmes. Or l'ensemble des perturbations induites par le milieu extérieur détériore la qualité de la navigation, ce qui entrave également la bonne réalisation de la coordination du manipulateur mobile. Il est alors nécessaire de corriger ces perturbations pour rendre robuste la navigation et ainsi faciliter la coordination du système.

Ce chapitre sera divisé en deux parties, la première abordant la méthode de compensation des irrégularités du terrain et la seconde sur la synthèse des observateurs de glissement. Chacune de ces parties sera accompagnée d'une section abordant les essais simulés et expérimentaux permettant de valider les approches. Enfin, une dernière partie mettra en avant les résultats expérimentaux de navigation d'un manipulateur mobile en milieu naturel obtenues

avec les approches proposées précédemment.

4.1 Adaptation aux irrégularités du terrain

Le premier problème abordé dans ce chapitre est celui de l'adaptation du manipulateur aux irrégularités et dévers du terrain, mais également des mouvements du mobile qui peuvent être vus, du point de vue du manipulateur, comme un mouvement parasite à compenser. Pour cela, l'approche de coordination proposée au Chapitre 3 est adjointe d'une approche par compensation déjà abordée dans la Sec.2.2.2.1.b.

Pour réaliser cette compensation, une approche par mesure capteur et modèle est proposée dans ce chapitre à partir de la modélisation du manipulateur présentée en Sec.3.2.3 et rappelée par la relation (4.1).

$$J_t \dot{q} = C \dot{e}_a - \mathcal{B} v_{ext}. \quad (4.1)$$

Lors de la formulation de cette équation, le terme $\mathcal{B} v_{ext}$ avait été expliqué comme le terme compensatif des mouvements de la base mobile sur l'effecteur, qui se traduisait comme un mouvement de perturbations extérieures. Pour aller plus en avant, ce terme permet plus généralement de prendre en compte tout type de perturbation extérieure par l'intermédiaire de mesures capteur.

Deux méthodes seront comparées, la première en mesurant complètement le vecteur v_{ext} par l'intermédiaire des mesures GPS, odométriques et de la centrale inertielle présente sur le mobile. La seconde en utilisant le modèle du mobile pour la partie du vecteur v_{ext} sur lequel il induit des perturbations et en utilisant la mesure capteur pour les termes sur lesquels le mobile n'influe pas directement.

Les vidéos associées aux essais présentés ici peuvent être trouvées à l'adresse : <https://nextcloud.inrae.fr/s/Rm5LQH7oGew9qdA>. L'ensemble des erreurs et écarts présentés est exprimé en m pour les distances et en $^\circ$ pour les rotations.

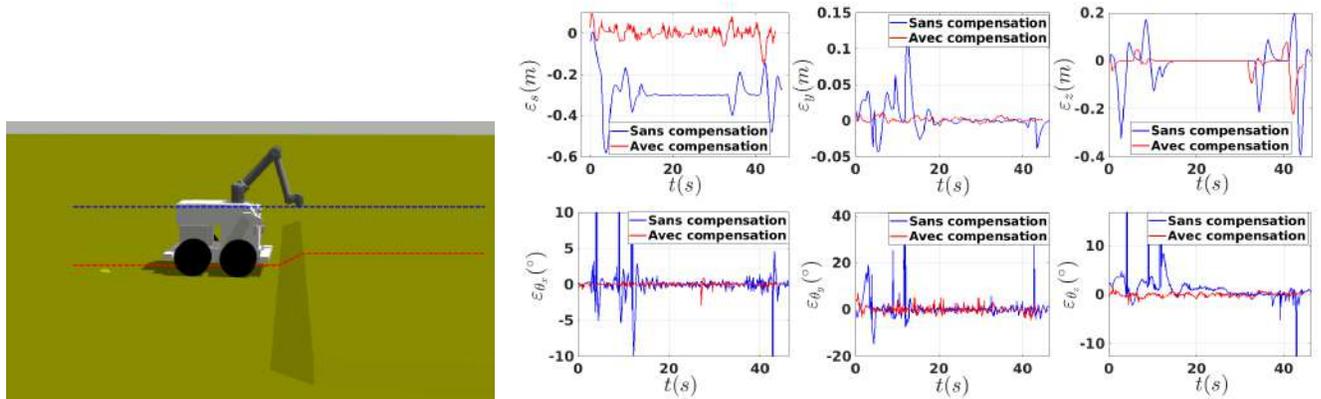
L'utilisation de méthodes plus avancées pour le rejet de perturbation, telles que les approches robustes, n'a pas été choisie dans notre cas d'étude pour plusieurs raisons. Premièrement, pour une raison technique car le robot (manipulateur mobile MM1¹) utilisé dans nos essais expérimentaux est un robot à commande électrique avec une dynamique relativement rapide et avec peu de latence. Ainsi, la complexité de la compensation est relativement faible et ne justifie pas l'utilisation de méthodes plus poussées comme celle RIGOTTI-THOMPSON, TORRES-TORRITI, CHEEIN et al. (2018). Ainsi la première raison est la simplicité et la seconde est donnée par le développement d'une approche adaptative dans la seconde partie de ce chapitre par l'intermédiaire d'un observateur de perturbation. Ce dernier sera en charge de compenser les dynamiques induites par le milieu extérieur mais permettra également de venir compenser les erreurs restantes de la méthode de compensation des irrégularités. Une dernière raison pour ce choix est motivée par la versatilité de cette approche qui ne prend en compte ni le type du bras ni celui de la base mobile et peut très facilement s'appliquer à n'importe quelle structure de manipulateur mobile et s'inscrit donc dans l'orientation des travaux portés dans cette thèse.

4.1.1 Résultats en simulation

Dans un premier temps, une simulation a été menée avec et sans le terme de compensation afin de comparer les performances de suivi de trajectoire pour l'effecteur dans les deux cas. La simulation décrite sur la figure Fig.4.1(a) est un suivi en ligne droite (à $0.6m/s$) sur un terrain présentant une variation d'altitude. Le cas d'étude est volontairement simpliste pour distinguer aisément les effets de la compensation dans les erreurs de suivi. Dans ce cas, seules les mesures capteurs ont été utilisées pour la compensation. Par ailleurs, le coordinateur n'intervient pas et l'ensemble des écarts doit se réguler à une erreur nulle par rapport au point objectif. La régulation des angles a été réalisée pour garder l'effecteur avec la même assiette que la base mobile.

Les lois de commandes utilisés sont les mêmes que celles utilisées dans les essais du chapitre 3, une commande par backstepping pour le mobile et une commande par retour d'état pour le manipulateur. Le détail est rappelé en

1. Voir annexe G.1 déjà présentées dans le chapitre 3.



(a) Environnement de simulation du robot pour la (b) Comparatif des écarts à la trajectoire de l'effecteur pour un suivi avec et sans compensation des vitesses de déplacement du mobile.

FIGURE 4.1 – Essais de la compensation des irrégularités terrain en simulation.

annexe A. Le choix avec ou sans compensation fait dans les essais suivante se joue sur la présence ou non du terme $\mathcal{B}_{\square} \mathbb{1}_{\square}$ dans le modèle (4.1) et donc dans la commande par retour d'état associée (A.4).

Les résultats de la simulation sont donnés sur la figure Fig.4.1(b). On y trouve l'ensemble des six écarts au repère de Frenet devant se réguler à 0. Ces dernières montrent une forte amélioration du suivi sur l'ensemble des écarts notamment aux deux endroits (à $t \approx 5s$ et $t \approx 10s$ sur la figure Fig.4.1) qui représentent les deux ruptures de pente du terrain. Ceci se remarque très nettement sur l'écart longitudinale avec un écart statique important qui apparaît sans l'utilisation de la compensation. De même, l'écart latéral ε_y et d'altitude ε_z convergent beaucoup plus rapidement avec la compensation. Concernant les écarts angulaires, la compensation permet de limiter les fortes poussées, pouvant atteindre 40° pour ε_{θ_y} .

Il est important de noter que pour toutes les directions, sauf la direction d'avance (écart longitudinal), il s'agit bel et bien de rejeter une perturbation induite par le milieu extérieur. Dans le cas de la direction longitudinale, la compensation est due principalement au mouvement propre du mobile. En effet, la principale perturbation du manipulateur dans le sens de sa vitesse longitudinale est induit par le mobile qui se déplace selon cette axe. L'effecteur doit alors compenser ce mouvement dans l'autre sens. Sans la présence du terme de compensation, il apparaît alors un écart statique important dans cette direction, avec ou sans la présence d'une perturbation. La présence de la compensation permet d'annuler complètement cet écart.

Dans les expérimentations présentées dans la suite de ce chapitre, lorsqu'il sera précisé que l'essai est fait sans la compensation, en réalité la composante longitudinale sera gardée tandis que les autres seront enlevées. Ceci, parce que ce terme est davantage dû au mouvement du mobile qu'aux réelles perturbations du terrain, donc il a trait davantage à un problème de coordination qu'au problème de navigation qui nous intéresse ici. Par ailleurs, l'écart longitudinal statique pouvant être important selon la vitesse donnée au mobile, il était préférable de limiter l'amplitude du mouvement causé par cette erreur pour éviter que le manipulateur ne rentre en singularité ou en collision avec lui-même².

4.1.2 Résultats expérimentaux

Cette seconde partie propose une mise en pratique expérimentale de la compensation d'irrégularité. L'essai est également réalisé avec des écarts désirés constants et nuls pour ne pas induire de phénomènes extérieurs dus à la coordination du système. Dans cette partie sera présenté un comparatif entre l'approche de compensation usant uniquement de la mesure et celle utilisant également les données du modèle.

2. Il est rappelé que pour ces essais le coordinateur ne sera pas mis en marche pour ne pas biaiser les résultats avec des écarts désirés variables, le robot n'est donc soumis à aucune sécurité. L'intégration du coordinateur avec les approches de navigation sera abordée dans le chapitre suivant Chapitre.5.



FIGURE 4.2 – Terrain pour les essais expérimentaux de la compensation d'irrégularités. (a) : Trajectoire des expérimentations sur le terrain. (b) : Image du terrain lors des expérimentations.

Ces expérimentations ont été menées sur le manipulateur mobile MM1³ dans un terrain en pente (Voir Fig.4.2) à une vitesse de 1m/s.

Les résultats des expérimentations menées sont donnés en Fig.4.3 ainsi que dans le tableau Tab.4.1. Il apparaît donc, comme en simulation, que la compensation améliore nettement le suivi de trajectoire sur ce type de terrain, notamment sur les axes longitudinal, latéral et de lacet. De fait, ce sont les axes les plus soumis à des mouvements de perturbation à cause du mouvement de la base mobile. Sur les axes d'altitude, de roulis et de tangage, la commande arrive mieux à réguler ces erreurs seule, du fait que les perturbations sont plus lentes. L'ajout de la compensation permet toutefois une légère amélioration sur ces axes, même si cela est moins tranché. Par ailleurs, dans ce cas de figure, l'introduction de données modèle ou de mesures introduit du bruit dans le système pouvant engendrer une dégradation du suivi. Cela est notamment vrai pour le roulis et le tangage avec la compensation capteur. Ceci étant dit, étant donné les ordres de grandeur en jeu dans ces données, ces erreurs ne sont pas significatives.

Dans le cas des axes longitudinal, latéral et de lacet, les améliorations apportées par la compensation sont sans équivoque. Par ailleurs, les performances entre la compensation modèle et la compensation capteur sont très proches. Toutefois, la compensation par modèle est légèrement dégradée par rapport à la compensation capteur sur les axes longitudinal et latéral. Ceci peut s'expliquer du fait qu'en terrain naturel, le système est soumis au glissement, qui n'est pas inclus dans les données modèle mais qui est imparfaitement contenu dans les données de mesure permettant alors d'en compenser une partie. Au contraire, les données modèle contiennent moins de bruit et offrent donc de meilleurs écarts-type. Ceci se remarque plus nettement sur l'erreur d'angle de lacet⁴.

Sans compensation

	e_{a_s}	e_{a_y}	e_{a_z}	$e_{a_{\theta_x}}$	$e_{a_{\theta_y}}$	$e_{a_{\theta_z}}$
\bar{x}	0.079	0.051	-0.052	0.150	-0.033	3.801
σ	0.077	0.188	0.082	2.387	2.082	14.42

Avec compensation capteur

	e_{a_s}	e_{a_y}	e_{a_z}	$e_{a_{\theta_x}}$	$e_{a_{\theta_y}}$	$e_{a_{\theta_z}}$
\bar{x}	0.036	0.009	-0.045	0.348	0.087	0.805
σ	0.047	0.081	0.078	2.049	2.345	4.355

Avec compensation modèle

	e_{a_s}	e_{a_y}	e_{a_z}	$e_{a_{\theta_x}}$	$e_{a_{\theta_y}}$	$e_{a_{\theta_z}}$
\bar{x}	0.047	-0.013	-0.042	0.070	-0.138	0.072
σ	0.045	0.083	0.076	1.628	1.644	2.568

TABLE 4.1 – Moyenne et écart-type des erreurs à la trajectoire de l'effecteur avec et sans la compensation des irrégularités du terrain.

3. Voir annexe G.1 et déjà présenté dans le chapitre 3.

4. Dans ce dernier cas, contrairement aux axes longitudinal et latéral, le glissement n'intervient que très peu pour biaiser les données modèle. En effet, comme nous le verrons dans la section suivante, le glissement en lacet des mobiles est très faible et ne joue que de façon mineure sur les erreurs de navigation en terrain naturel pour le domaine de vitesse qui nous intéresse ici.

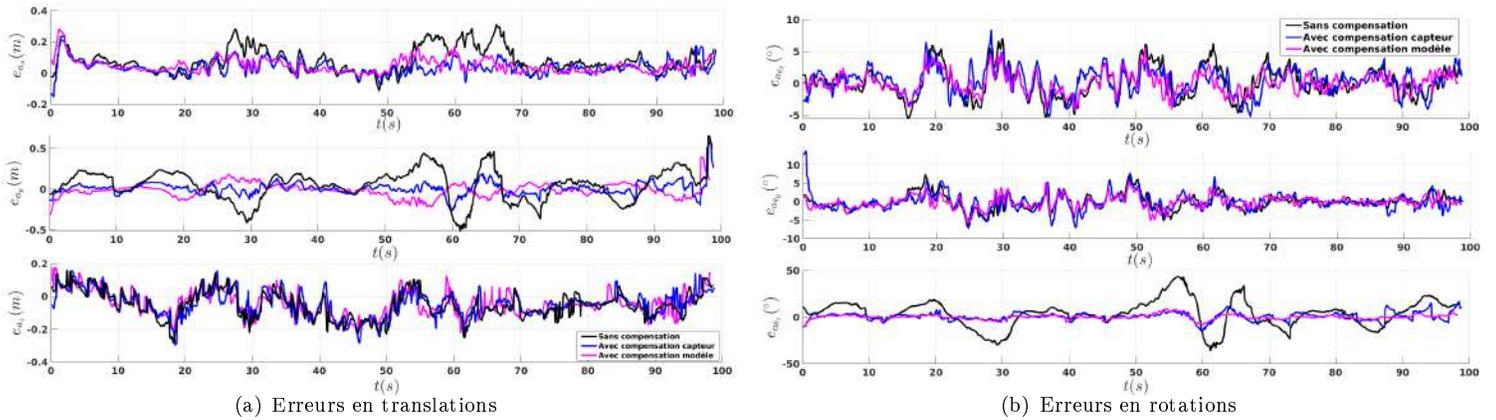


FIGURE 4.3 – Erreur à la trajectoire de l'effecteur lors des essais expérimentaux, sans la compensation, avec la compensation utilisant les données capteurs et avec la compensation utilisant le modèle du mobile.

Cette première partie permet de conclure sur l'intérêt d'un terme de compensation dans les modèles des parties d'un manipulateur mobile pour prendre en compte à la fois des perturbations engendrées par le terrain mais également des interactions entre sous-systèmes⁵.

Par ailleurs, la question de la coordination n'étant pas abordée ici, ce terme n'est pas directement lié à ce paradigme et est nécessaire pour tout type de système navigant dans ces milieux qu'ils soient ou non coordonnés.

4.2 Adaptation aux perturbations du milieu extérieur

Par sa nature propre, le terrain naturel, qu'il soit meuble, sec, humide,... peut être très variable, même dans un lieu localisé. L'attitude du robot ainsi que sa vitesse et ses variations d'adhérence sur de tels terrains entraînent des effets dynamiques perturbant sa navigation. La seconde partie de ce chapitre s'intéresse donc à la compensation de ces derniers dans la commande du robot.

Ces effets sont dépendants en partie de la nature du terrain et des conditions d'adhérence et sont modélisables par des paramètres variables au cours du temps, mais également incertains et complexes à estimer. En pratique, les modèles dynamiques demandent un nombre important de ces paramètres tombent en défaut devant la difficulté d'accès aux valeurs réelles. Il est alors plus pertinent de s'orienter vers des modèles cinématiques étendus faisant intervenir un ensemble de variables prenant en compte ces effets, sans avoir à passer par la connaissance des paramètres dynamiques du terrain et du robot LENAIN (2011).

Ces variables d'extension doivent alors être estimées et intégrées dans la commande cinématique du robot. La contrepartie de telles approches est que l'ensemble des effets dynamiques se retrouve confondu au sein de quelques variables cinématiques sans que l'on puisse les identifier séparément. Cependant, cette limite n'est aucunement dérangeante pour corriger les erreurs induites par ces effets et obtenir une commande plus performante.

Dans ce but, les approches proposées dans la suite de ce chapitre se baseront sur les observateurs de perturbation abordés dans la dernière partie de l'état de l'art de ce mémoire, Sec.2.4. Dans un premier temps, différents observateurs seront construits et adaptés chacun à un type de cinématique du mobile. Dans un second temps, un observateur générique sera construit, suffisamment versatile pour s'adapter à la fois à tout type de cinématique du mobile, mais également du manipulateur. Enfin, une dernière partie présentera les résultats expérimentaux obtenus avec ces différents observateurs pour un suivi de trajectoire avec plusieurs types de base mobile et un manipulateur.

5. A ce titre, il aurait été justifié d'utiliser également un terme de compensation du manipulateur dans le modèle du mobile pour venir contrebalancer ses effets sur la navigation. Cependant, au vu de la masse de notre manipulateur par rapport à celle du mobile et des vitesses mises en jeu, ces effets sont négligeables. Dans le cas d'un manipulateur mobile comme les engins agricoles ou de chantier portant des charges significatives, un terme de compensation de ce type pourrait être bénéfique au système.

4.2.1 Observateur pour le mobile

Comme il a été discuté en conclusion de la Sec.2.4, il semble intéressant de baser l'estimation des paramètres de perturbations extérieures sur une approche d'observateur de perturbation. Dans ce domaine, les travaux LENAIN, THUILOT, CARIOU et al. (2006); LENAIN, DEREMETZ et al. (2017) ont fait leurs preuves sur cette problématique de navigation en proposant deux conceptions différentes d'observateur permettant de venir estimer des angles de glissement. Ces travaux se base sur un modèle de robot mobile à deux trains directeurs en considérant un modèle étendu (Fig.4.5(b)) par deux angles de dérive (β_f, β_r) et ont montré leur efficacité lors d'expérimentation en milieu naturel en réduisant les erreurs de guidage. C'est pour ces raisons que les travaux présentés dans cette section sont basés sur la synthèse d'observateurs pour la navigation d'un manipulateur mobile en milieu naturel.

Les deux stratégies d'observation proposées utilisent des principes bien distincts. La première propose une méthode par backstepping dans le repère de Frenet et la seconde est basée sur une méthode de Lyapunov dans le repère absolu. Il a été montré dans LENAIN, DEREMETZ et al. (2017) que la seconde semble plus pertinente car elle retire les singularités que l'on trouve dans la première. De plus, les résultats qu'elle offre ne nécessitent pas de filtrage pour être exploités en pratique. En revanche, elle requiert de se localiser dans un repère absolu.

Cependant, les travaux précédents étaient effectués pour des robots évoluant à vitesse constante, contrairement à notre système qui peut faire évoluer sa vitesse longitudinale au cours de sa tâche, par le biais de son écart désiré longitudinal, et cela même si la vitesse de son point objectif reste constante. Dans les observateurs précédents, il manque alors le terme de glissement longitudinal qu'il convient de rajouter pour obtenir un observateur complet. Ce point reflète par ailleurs une critique pouvant être faite à beaucoup des approches d'observation citées en Sec.2.4. En effet, la plupart de ces approches sont incomplètes et ne s'intéressent qu'à une partie des perturbations induites par le milieu. C'est notamment le cas des méthodes développées dans le cadre de l'estimation de l'angle de glissement d'un véhicule, qui ne s'intéressent qu'à l'angle de glissement au centre de ce dernier, avant tout pour des questions de sécurité. Cependant, cet angle ne représente pas la totalité des perturbations appliquées au système. De même dans LENAIN, THUILOT, CARIOU et al. (2006); LENAIN, DEREMETZ et al. (2017), les angles de glissement ne peuvent pas représenter les glissements longitudinaux ou les erreurs de modèle liées à cette dimension comme l'erreur associée à l'écrasement des roues par exemple.

Par ailleurs, les observateurs existants ont été conçus pour des modèles cinématiques spécifiques, notamment le modèle à deux trains directeurs et le modèle unicycle. Bien qu'une équivalence de commande pour l'utilisation de ces angles de dérive sur un modèle en skid-steering ait été proposée dans TOURRETTE et al. (2017), il n'existe pas à ce jour de comparatif permettant de démontrer l'efficacité de l'équivalence et donc son utilisation possible pour un système générique.

La première partie des travaux présentés dans cette section a donc été consacrée à l'extension des observateurs existants, pour obtenir la vitesse de dérive longitudinale pour un modèle à deux trains directeurs, ainsi qu'à la conception d'un observateur dédié à un modèle skid-steering. Dans une seconde partie, la pertinence de l'équivalence donnée dans TOURRETTE et al. (2017) sera étudiée et démontrée expérimentalement. Enfin, basé sur ces travaux, un observateur générique sera construit, indépendant du modèle et applicable à une large gamme de systèmes.

4.2.1.1 Repère de référence

Les travaux présentés sont abordés selon deux repères de référence possibles, le repère de Frenet ou le repère absolu (Voir Fig.4.4). L'utilisation de l'un et de l'autre sera détaillée dans les sections qui vont suivre. Afin de rester concis, les différentes notations associées à ces deux repères sont présentées ci-dessous :

Le premier est le repère de Frenet, déjà abordé dans le chapitre précédent, et dont les notations pour le mobile sont reprises ci-dessous :

- ε_s , l'abscisse curviligne du robot dans le repère de Frenet.
- ε_y , la position latérale dans le repère de Frenet.
- ε_θ , l'angle d'orientation par rapport à la tangente au point F de la trajectoire le plus proche du mobile.
- $\varepsilon_f = (\varepsilon_s \ \varepsilon_y \ \varepsilon_\theta)^t$, le vecteur d'état du mobile dans le repère de Frenet (Voir Fig.4.4(a)).

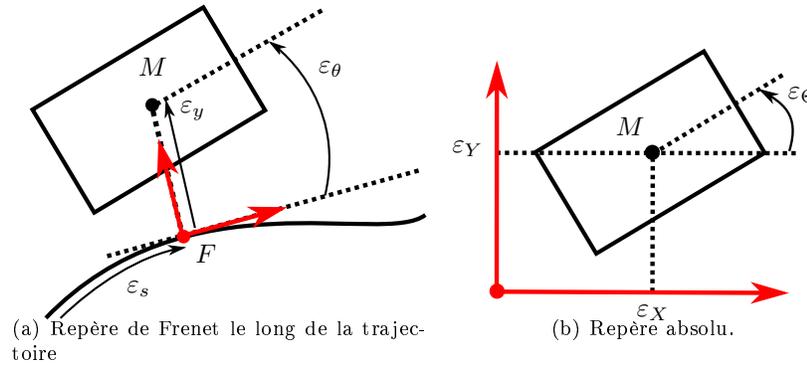


FIGURE 4.4 – Repère de modélisation classique des robots mobiles.

Le second repère abordé est le repère absolu avec les notations suivantes :

- ε_X , la position du robot sur l'axe x du repère absolu.
- ε_Y , la position du robot sur l'axe y du repère absolu.
- ε_Θ , l'angle d'orientation du mobile par rapport à l'axe x du repère absolu.
- $\varepsilon_A = (\varepsilon_X \ \varepsilon_Y \ \varepsilon_\Theta)^t$, le vecteur d'état du robot dans le repère absolu (Voir Fig.4.4(b)).

Une troisième notation générique est également donnée. Certains travaux présentés dans la suite ne nécessitent pas de spécifier dans quel repère de référence le mobile est placé. Pour ces derniers, les notations suivantes seront adoptées :

- ★ ε_α , la position sur l'axe de la première direction dans un repère de référence quelconque.
- ★ ε_β , la position sur l'axe de la seconde direction dans un repère de référence quelconque.
- ★ ε_γ , l'angle d'orientation du mobile par rapport à l'axe de la première direction d'un repère de référence quelconque.
- ★ $\varepsilon_\Delta = (\varepsilon_\alpha \ \varepsilon_\beta \ \varepsilon_\gamma)^t$, le vecteur d'état du robot dans n'importe quel repère de référence.

Enfin, la notation $\hat{}$ sera utilisée dans la suite de cette partie pour désigner une variable observée.

4.2.1.2 Observateurs spécifiques

Dans cette première partie sont abordées l'étude et la mise en œuvre des observateurs dédiés à un modèle spécifique en se basant sur les travaux fournis par LENAIN, THUILOT, CARIOU et al. (2006) ; LENAIN, DEREMETZ et al. (2017). Dans ce but, les paramètres de perturbations seront mis en place dans deux modélisations étendues, la première pour le modèle à deux trains directeurs et la seconde pour le modèle en skid-steering. Dans un second temps, deux méthodes d'observation seront proposées pour chaque modèle. Enfin, une dernière partie étudiera les équivalences possibles entre les observateurs, les modèles et la commande des mobiles.

Avant d'aller plus loin dans cette partie, une précision est à faire sur les modèles utilisés lors de la synthèse des observateurs. Dans le chapitre précédent, un modèle du mobile dans le repère de Frenet avec un point de contrôle quelconque a été proposé Sec.3.2.2. Cependant, afin de ne pas surcharger les équations, de rester dans la ligne des travaux précédemment établis et de fournir un comparatif simple, les modèles utilisés ici seront ceux classiquement admis, où le point M est au centre de l'essieu arrière du véhicule à deux trains directeurs ou au centre du véhicule en skid-steering (situations étant toutes deux un cas particulier du modèle présenté en Sec.3.2.2). Cependant, cela n'affecte en rien la synthèse des observateurs, les mêmes principes et raisonnements peuvent s'appliquer aux modèles présentés Sec.3.2.2. Par ailleurs, les commandes des sous-systèmes utilisant les modélisations étendues sont présentées dans la seconde partie de l'Annexe A. Elles seront présentées sous la forme des modèles classiques pour rester homogène avec les observateurs et les paramètres d'observation présentés ici.

4.2.1.2.a Modélisation étendue

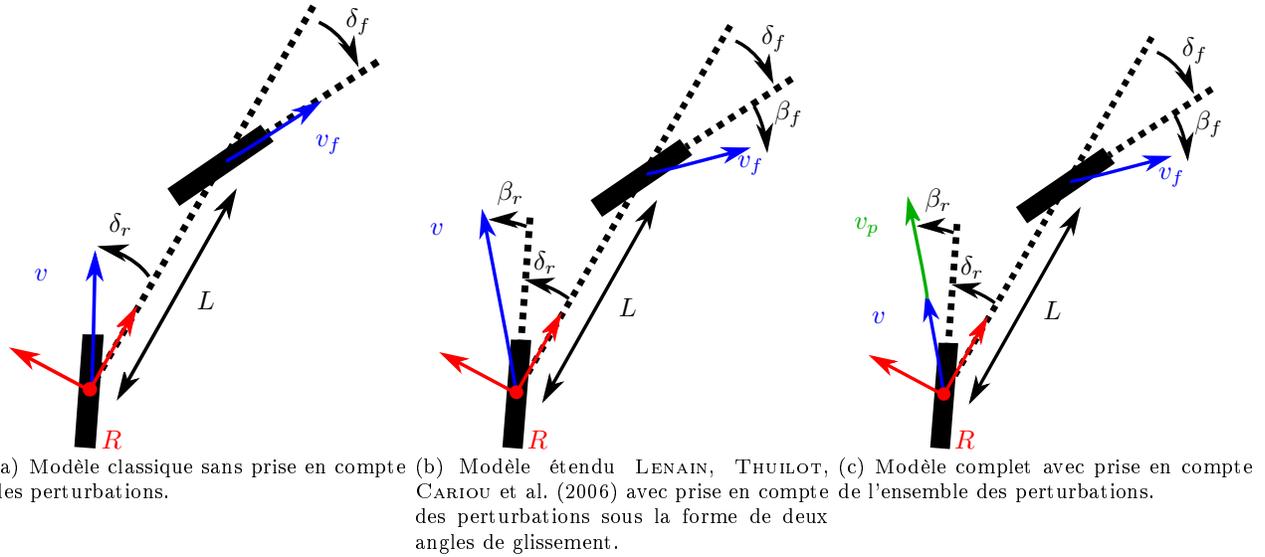


FIGURE 4.5 – Différents modèles cinématiques d'un mobile à deux trains directeurs selon leur prise en compte des perturbations extérieures.

4.2.1.2.a.a Paramètres de glissement du mobile à deux trains directeurs

Le cas du mobile à deux trains directeurs (Voir modèle classique Fig.4.5(a)) a été étudié dans LENAIN, THUILOT, CARIU et al. (2006); LENAIN, DEREMETZ et al. (2017). Dans ces travaux, les auteurs ont modélisé les perturbations du système sous la forme de deux angles de glissement (β_f et β_r) sur les trains avant et arrière du mobile (Voir Fig.4.5(b)). Cependant, dans ces travaux, les mobiles avançaient à vitesse constante et les auteurs s'intéressaient davantage aux écarts latéraux du mobile à la trajectoire, qu'à son écart longitudinal par rapport à son objectif. De fait, les observateurs proposés n'étaient pas complets. Afin de remédier à ce manque, un modèle étendu complet est proposé en Fig.4.5(c) en ajoutant un paramètre de glissement longitudinal sous la forme d'une vitesse de perturbation v_p . Cette vitesse peut être due à la fois au modèle bas-niveau s'il n'arrive pas à réguler correctement la vitesse des roues du mobile, aux glissements si la roue est amenée à patiner dans une pente ou encore à l'écrasement du pneumatique sous le poids du véhicule.

Cette modélisation étendue complète peut finalement s'exprimer par les équations présentées dans la table Tab.4.2 selon le repère de référence choisi.

Repère de Frenet	Repère absolu
$\begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_s \\ \dot{\varepsilon}_y \\ \dot{\varepsilon}_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{(v + v_p) \cos(\varepsilon_\theta + \delta_r + \beta_r)}{1 - c\varepsilon_y} \\ (v + v_p) \sin(\varepsilon_\theta + \delta_r + \beta_r) \\ (v + v_p) \cos(\delta_r + \beta_r) \frac{\tan(\delta_f + \beta_f) - \tan(\delta_r + \beta_r)}{L} \dots \\ \dots - \frac{c(v + v_p) \cos(\varepsilon_\theta + \delta_r + \beta_r)}{1 - c\varepsilon_y} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_X \\ \dot{\varepsilon}_Y \\ \dot{\varepsilon}_\Theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (v + v_p) \cos(\varepsilon_\theta + \delta_r + \beta_r) \\ (v + v_p) \sin(\varepsilon_\theta + \delta_r + \beta_r) \\ (v + v_p) \cos(\delta_r + \beta_r) \frac{\tan(\delta_f + \beta_f) - \tan(\delta_r + \beta_r)}{L} \end{pmatrix}$

TABLE 4.2 – Équation des modèles étendus complets du mobile à deux trains directeurs dans le repère de Frenet et dans le repère absolu.

4.2.1.2.a.b Paramètres de glissement du mobile skid-steering

Le même type de modélisation étendue (voir Fig.4.6(b)) est proposé ici pour le mobile en modèle skid-steering (voir modèle classique Fig.4.6(a)). Dans ce cas de figure, le glissement longitudinal sous la forme v_p est conservé. Cependant, le mobile ne possédant qu'un seul train⁶, un seul angle de glissement β est défini. Le dernier paramètre

6. Dans le sens où, ramené à un modèle unicycle, il ne possède qu'un seul train virtuel.

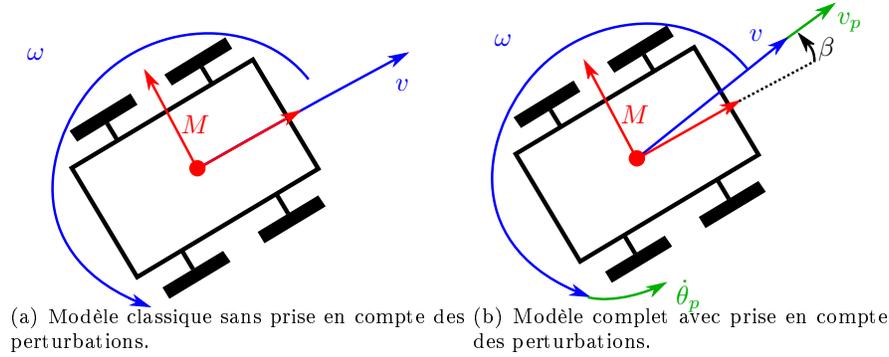


FIGURE 4.6 – Modèles cinématiques d'un mobile skid-steering avec et sans la prise en compte des perturbations externes

de glissement est alors vu comme une perturbation sur la vitesse de rotation du mobile $\dot{\theta}_p$.

Ce modèle étendu mène alors aux équations présentées en Tab.4.3 dans le repère de référence choisi.

Repère de Frenet	Repère absolu
$\begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_s \\ \dot{\varepsilon}_y \\ \dot{\varepsilon}_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{(v + v_p) \cos(\varepsilon_\theta + \beta)}{1 - c\varepsilon_y} \\ (v + v_p) \sin(\varepsilon_\theta + \beta) \\ \omega - \frac{c(v + v_p) \cos(\varepsilon_\theta + \beta)}{1 - c\varepsilon_y} + \dot{\theta}_p \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_X \\ \dot{\varepsilon}_Y \\ \dot{\varepsilon}_\Theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (v + v_p) \cos(\varepsilon_\theta + \beta) \\ (v + v_p) \sin(\varepsilon_\theta + \beta) \\ \omega + \dot{\theta}_p \end{pmatrix}$

TABLE 4.3 – Équation des modèles étendus complets du mobile skid-steering dans le repère de Frenet et dans le repère absolu.

4.2.1.2.b Observateurs par backstepping dans le repère de Frenet

Une fois les modèles étendus présentés, il est possible de construire un observateur spécifique pour chaque type de véhicule. Ces derniers utilisent les variables d'état observées $\hat{\varepsilon}$ pour estimer les dérivées. Ces variables seront obtenues par intégration numérique⁷ de la dynamique des équations d'état observées $\dot{\varepsilon}$.

Une première méthode par backstepping est proposée dans cette partie. Cette stratégie d'observation se rapproche de celle utilisée pour la commande par backstepping. Dans un premier temps, une erreur d'observation $e^o = \hat{\varepsilon} - \varepsilon$ est définie entre la variable observée $\hat{\varepsilon}$ et la variable mesurée ε . On impose ensuite une dynamique décroissante à cette erreur en posant $\dot{e}^o = k^o e^o = \dot{\hat{\varepsilon}} - \dot{\varepsilon}$ qui garantit la convergence de l'état observé vers l'état mesuré tant que $k^o < 0$. Dans ce cas, $\dot{\varepsilon}$ n'est pas connu car il n'est pas possible d'accéder à la valeur réelle des dérivées, seulement leurs valeurs estimées. Ce terme est donc calculé par dérivation numérique au sein de l'algorithme d'observation ou peut être négligé. Le terme $\dot{\hat{\varepsilon}}$ est ensuite obtenu à partir du modèle choisi pour le robot. En pratique, l'utilisation de cette approche d'observation nécessite un filtrage important des dérivées observées pour que ces dernières soient exploitables au sein de la commande.

4.2.1.2.b.a Glissement latéral β ou β_r

Dans un premier temps, l'erreur d'observation est définie telle que :

$$e_{\varepsilon_y}^o = \hat{\varepsilon}_y - \varepsilon_y. \quad (4.2)$$

Pour éviter de tomber dans une singularité à vitesse nulle ($v + v_p = 0$), la dynamique imposée à l'observateur ne sera pas une dynamique temporelle mais une dynamique spatiale par rapport à l'abscisse curviligne de la trajectoire $d/d\varepsilon_s$. Ceci n'est pas restrictif car le glissement est nul à vitesse nulle.

7. En pratique une intégration d'ordre 1 est nécessaire pour une bonne estimation des dérivées.

$$e_{\varepsilon_y}^{\prime} = \frac{de_{\varepsilon_y}^o}{d\hat{\varepsilon}_s} = k_{\varepsilon_y}^o e_{\varepsilon_y}^o. \quad (4.3)$$

Avec $k_{\varepsilon_y}^o < 0$ garantissant une stricte décroissance de l'erreur. En combinant les équations (4.2) et (4.3), la loi d'observation est donnée par :

$$\hat{\varepsilon}_y' = \frac{d\hat{\varepsilon}_y}{d\hat{\varepsilon}_s} = k_{\varepsilon_y}^o e_{\varepsilon_y}^o + \varepsilon_y'. \quad (4.4)$$

Du fait que β ne peut pas être mesuré directement, il n'est pas possible d'évaluer ε_y' bien que ε_y soit mesuré. Pour contourner ce problème, une dérivation numérique peut être utilisée.

Partant de $\hat{\varepsilon}_y' = \dot{\hat{\varepsilon}}_y / \dot{\hat{\varepsilon}}_s$, il est possible d'isoler β (Voir Tab.4.4 à gauche) dans l'équation du modèle de Frenet de la table Tab.4.3. La même méthode permet d'isoler β_r (Voir Tab.4.4 à droite) dans les équations du modèle de Frenet de la table Tab.4.2 pour le modèle à deux trains directeurs.

skid-steering	Deux trains directeurs
$\hat{\beta} = \arctan\left(\frac{k_{\varepsilon_y}^o e_{\varepsilon_y}^o + \varepsilon_y'}{1 - c\hat{\varepsilon}_y}\right) - \hat{\varepsilon}_\theta$	$\hat{\beta}_r = \arctan\left(\frac{k_{\varepsilon_y}^o e_{\varepsilon_y}^o + \varepsilon_y'}{1 - c\hat{\varepsilon}_y}\right) - \hat{\varepsilon}_\theta - \delta_r$

TABLE 4.4 – Paramètres de glissement $\hat{\beta}$ and $\hat{\beta}_r$ donnés par l'observateur par backstepping.

4.2.1.2.b.b Glissement longitudinal v_p

Dans le cas de la vitesse de glissement longitudinal, l'erreur d'observation est définie telle que : $e_{\varepsilon_s}^o = \hat{\varepsilon}_s - \varepsilon_s$. La dynamique de l'observation impose la décroissance de l'erreur telle que :

$$\dot{\hat{\varepsilon}}_s = k_{\varepsilon_s}^o e_{\varepsilon_s}^o + \dot{\varepsilon}_s. \quad (4.5)$$

Dans ce cas, la dynamique peut rester temporelle sans impliquer de singularité. Ici, $k_{\varepsilon_s}^o < 0$ et $\dot{\varepsilon}_s$ est évalué numériquement. En combinant l'équation (4.5) avec les modèles de Frenet des Tables Tab.4.3 et Tab.4.2 et en utilisant les valeurs de β et β_r obtenues dans la table Tab.4.4, il est possible d'obtenir le paramètre v_p pour les deux véhicules présenté dans le tableau Tab.4.5.

skid-steering	Deux trains directeurs
$\hat{v}_p = \frac{(1 - c\hat{\varepsilon}_y)(\dot{\hat{\varepsilon}}_s + k_{\varepsilon_s}^o e_{\varepsilon_s}^o)}{\cos(\hat{\beta} + \hat{\varepsilon}_\theta)} - v$	$\hat{v}_p = \frac{(1 - c\hat{\varepsilon}_y)(\dot{\hat{\varepsilon}}_s + k_{\varepsilon_s}^o e_{\varepsilon_s}^o)}{\cos(\delta_r + \hat{\beta}_r + \hat{\varepsilon}_\theta)} - v$

TABLE 4.5 – Paramètre de glissement v_p donné par l'observateur par backstepping.

4.2.1.2.b.c Glissement de l'angle d'orientation $\hat{\theta}_p$ ou β_f

Pour le dernier paramètre de glissement, l'erreur d'observation suivante est définie : $e_{\varepsilon_\theta}^o = \hat{\varepsilon}_\theta - \varepsilon_\theta$. Comme précédemment, la loi d'observation construite impose une dynamique de décroissance exponentielle à l'erreur d'observation en posant : $\dot{e}_{\varepsilon_\theta}^o = \dot{\hat{\varepsilon}}_\theta - \dot{\varepsilon}_\theta = k_{\varepsilon_\theta}^o e_{\varepsilon_\theta}^o$ avec le gain $k_{\varepsilon_\theta}^o$ négatif. En combinant cette relation aux modèles de Frenet des deux tables Tab.4.3 et Tab.4.2 et en utilisant les valeurs de β , β_r et v_p obtenues dans les tables Tab.4.4 et Tab.4.5, les paramètres de glissement $\hat{\theta}_p$ et β_f sont donnés ceux en Tab.4.6.

skid-steering	Deux trains directeurs
$\hat{\theta}_p = \dot{\hat{\varepsilon}}_\theta + k_{\varepsilon_\theta}^o e_{\varepsilon_\theta}^o - \omega + \frac{c(v + \hat{v}_p) \cos(\hat{\beta}_r + \hat{\varepsilon}_\theta)}{1 - c\hat{\varepsilon}_y}$	$\hat{\beta}_f = \arctan\left[\left(\dot{\hat{\varepsilon}}_\theta + k_{\varepsilon_\theta}^o e_{\varepsilon_\theta}^o + \frac{c(v + \hat{v}_p)(\cos(\delta_r + \hat{\beta}_r + \hat{\varepsilon}_\theta))}{(1 - c\hat{\varepsilon}_y)}\right) \dots \dots \frac{L}{(v + \hat{v}_p) \cos(\hat{\beta}_r + \delta_r)} + \tan(\hat{\beta}_r + \delta_r)\right] - \delta_f$

TABLE 4.6 – Paramètre de glissement $\hat{\theta}_p$ et β_f donnés par l'observateur par backstepping.

4.2.1.2.c Observateurs par Lyapunov dans le repère absolu

Cette seconde partie définit un autre type d'observateur pour estimer les glissements définis précédemment. Ce dernier se base sur une fonction de Lyapunov et a l'avantage d'être indépendant de la trajectoire, car il ne nécessite qu'une localisation dans le repère absolu. Ainsi, dans le cas où les trajectoires sont variables⁸ ou présentent des discontinuités, les observateurs par backstepping sont mis en défaut, tandis que ceux présentés ici restent performants. De plus, ils ne nécessitent pas de filtrage supplémentaire pour être exploitables au sein de la commande. Ce type d'observateur se base sur les précédents travaux LENAIN, DEREMETZ et al. (2017) en étendant l'observateur pour les modèles skid-steering et la vitesse de glissement longitudinal.

Dans un premier temps, le vecteur d'état du mobile est étendu tel que : $X = [\varepsilon_A \ \varepsilon_o]^t$ avec ε_o la partie de l'état contenant les variables inconnues à observer⁹. La dérivée par rapport au temps de ce nouvel état peut s'écrire :

$$\dot{X} = \begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_A \\ \dot{\varepsilon}_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(X, u) \\ 0_{3 \times 1} \end{pmatrix}. \quad (4.6)$$

Dans l'expression (4.6), u représente le vecteur de contrôle¹⁰. Le modèle de mouvement $f(X, u)$ est donné par les équations du repère absolu des tables Tab.4.3 et Tab.4.2 selon le modèle du robot. Par ailleurs, la représentation cinématique de l'état ne dispose pas de modèle d'évolution pour l'état additionnel ε_o . En conséquence, ε_o est supposé lentement variable pour que la dérivée $\dot{\varepsilon}_o$ soit petite et considérée comme négligeable. Cette hypothèse peut être assurée par un temps de convergence rapide des observateurs et une vitesse modérée du mobile. A partir de l'équation (4.6), l'observateur suivant est proposé :

$$\dot{\hat{X}} = \begin{pmatrix} \dot{\hat{\varepsilon}}_A \\ \dot{\hat{\varepsilon}}_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(\varepsilon_A, \hat{\varepsilon}_o, u) + \alpha_A \\ \alpha_o \end{pmatrix}. \quad (4.7)$$

Avec \hat{X} l'état observé et les paramètres α_A et α_o étant deux fonctions à trois dimensions. Pour imposer la convergence de l'erreur $e^o = \hat{X} - X = \begin{pmatrix} e_A^o \\ e_o^o \end{pmatrix}$ à zéro, ces fonctions sont définies telles que :

$$\begin{cases} \alpha_A = K_A e_A^o \\ \alpha_o = K_o \left(\frac{\partial f(\varepsilon_A, \hat{\varepsilon}_o, u)}{\partial \varepsilon_o} \right)^t e_A^o \end{cases}. \quad (4.8)$$

Avec K_A et K_o deux matrices carrées diagonales de la dimension respective de e_A et e_o et formées d'une diagonale $(K_{A_{\varepsilon_x}} \ K_{A_{\varepsilon_y}} \ K_{A_{\varepsilon_\theta}})$ et $(K_{o_{v_p}} \ K_{o_{\beta_r}} \ K_{o_{\beta_f}})$ strictement positive, permettant d'assurer la convergence des variables observées vers leurs valeurs réelles. La preuve de convergence et de stabilité de l'observateur proposé se trouve en annexe.B.

4.2.1.3 Équivalences

Dans la partie précédente, deux observateurs ont été construits en utilisant deux approches différentes. Chacun d'entre eux possède deux expressions, du fait que les paramètres d'observation sont intrinsèquement liés au modèle du robot. Or, TOURRETTE et al. (2017), propose l'idée qu'il est possible de trouver une équivalence à vitesse non nulles, entre le modèles skid-steering et deux trains directeurs, qui permettrait d'interchanger les lois de commande et d'observation sans se soucier du modèle du mobile.

Cette idée repose sur le schéma donné en Fig.4.7. Pour construire une équivalence, il est possible de placer arbitrairement les roues avant et arrière virtuelles dans le cas d'un mobile le skid-steering. La roue avant est placée dans l'axe du mobile à une distance L non nulle de la roue arrière. Par ailleurs, l'équivalence n'a pas besoin des deux angles de braquage virtuels δ_{f_v} et δ_{r_v} ¹¹. Par souci de simplicité, δ_{r_v} sera donc considéré comme nul.

Cette partie propose donc de donner les équations d'équivalence, à la fois des paramètres d'observation, mais aussi des modèles de commande qui seront utilisés expérimentalement pour montrer leur pertinence.

8. Ce type de cas sera vu dans le prochain chapitre

9. $\varepsilon_o = [v_p \ \beta \ \dot{\theta}_p]^t$ pour le modèle skid-steering et $\varepsilon_o = [v_p \ \beta_r \ \beta_f]^t$ pour le modèle à deux trains directeurs.

10. $u = [v \ \omega]^t$ pour le modèle skid-steering or $u = [v \ \delta_r \ \delta_f]^t$ pour le modèle à deux trains directeurs.

11. Ceci est dû au fait que le modèle skid-steering n'a besoin que d'un seul braquage virtuel pour tourner, car ses capacités physiques réelles ne lui permettent pas un déplacement en crabe.

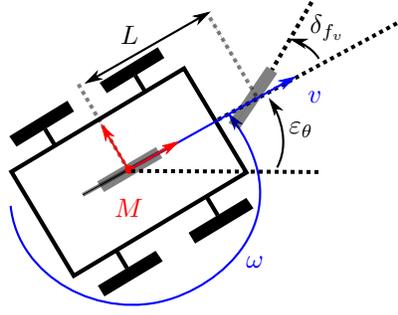


FIGURE 4.7 – Modèle cinématique équivalent entre un mobile skid-steering et un mobile de type voiture.

4.2.1.3.a Équivalence des observateurs

Dans un premier temps, les équivalences entre les observateurs liés à un modèle skid-steering et à un modèle à deux trains directeurs sont proposées. Pour cela, il est déjà possible d'observer deux choses :

- Dans les deux modèles, le glissement longitudinal v_p représente le même glissement au point de contact de la roue avec le sol, dans la direction du déplacement du robot. Ils sont donc équivalents.
- Tant que le point de contrôle du modèle skid-steering est considéré au centre du train arrière virtuel du modèle à deux trains directeurs équivalent et que l'angle de braquage arrière δ_{r_v} est nul¹², les paramètres β et β_r sont homogènes et donc équivalents.

Ensuite, en combinant les équations du modèle dans le repère absolu des deux mobiles (Tab.4.3 et Tab.4.2), il est possible de montrer qu'il existe une correspondance entre β_f et $\hat{\theta}_p$ sous la forme :

$$\beta_f = \arctan \left(\frac{(\omega + \dot{\theta}_p)L}{(v + v_p) \cos(\delta_r + \beta_r)} + \tan(\delta_r + \beta_r) \right) - \delta_f. \quad (4.9)$$

A partir de ces constatations, un observateur créé pour un modèle à deux trains directeurs peut également être utilisé sur un modèle skid-steering et vice-versa.

4.2.1.3.b Équivalence des modèles de contrôle

Cependant, il est possible d'aller plus loin du fait qu'il existe une équivalence également sur la commande du mobile. En conséquence, il devient alors possible d'utiliser une commande et un observateur créés pour un modèle de robot spécifique sur un autre modèle de robot, sans plus d'adaptations que le modèle d'équivalence.

Pour cela, l'angle de braquage virtuel δ_{f_v} (Voir Fig.4.7) peut être défini sous la forme :

$$\omega = \frac{v \tan(\delta_{f_v})}{L} \quad \longleftrightarrow \quad \delta_{f_v} = \arctan \left(\frac{\omega L}{v} \right). \quad (4.10)$$

Cet angle de braquage virtuel est ensuite utilisé pour nourrir les observateurs fournissant les angles de glissement β_f et β_r . Ces angles de glissement sont ensuite exploités au sein de la commande du mobile à deux trains directeurs, pour produire un angle de braquage de contrôle δ_{f_c} (angle fourni en sortie de la commande virtuelle du mobile à deux trains directeurs). Finalement, l'équivalence (4.10) permet de repasser de l'angle de braquage δ_{f_c} produit, à la commande w permettant de piloter le robot.

4.2.1.4 Observateur générique

Les équivalences présentées précédemment sont très intéressantes du point de vue de la généricité recherchée dans ces travaux. Elles permettent de passer d'un modèle à un autre sans avoir à changer, ni d'observateur, ni de commande. Cependant, elles restent un artifice mathématique qui nécessite de définir l'ensemble des équivalences

¹². Ces deux hypothèses ne sont absolument pas restrictives. Comme détaillé auparavant, le choix de $\delta_{r_v} = 0$ est arbitraire et le placement du point de contrôle par rapport au modèle équivalent est sans importance tant que les passages vers le modèle équivalent et le retour vers le modèle réel du robot se font avec le même modèle d'équivalence.

entre modèles pour utiliser un seul type d'observateur pour tout autre type de mobile. Par ailleurs, l'équivalence de ces observateurs montre qu'il existe un lien fort entre ces différents paramètres qui servent à traduire les mêmes phénomènes physiques. Cela montre qu'il est raisonnable de penser qu'il puisse exister un observateur plus global permettant d'être applicable à tout type de robot mobile sans avoir à utiliser de modèle d'équivalence.

Cette partie propose alors la construction d'un tel observateur, indépendant du modèle du robot utilisé. Par ailleurs, il sera montré que l'observateur proposé est non seulement adaptable à tout type de base mobile sans utiliser d'équivalence, mais également extensible à d'autres formes de robot tels que les manipulateurs. Ceci apporte donc un complément supplémentaire aux travaux de cette thèse sur l'aspect générique des approches mises en œuvre pour une coordination précise et robuste.

4.2.1.4.a Modélisation des perturbations

Pour construire cet observateur, il est nécessaire de modifier la représentation des perturbations. Jusqu'à maintenant, les paramètres de glissement estimés dans les observateurs sont liés à un modèle de robot spécifique, tout en traduisant un phénomène physique particulier. Par exemple, l'angle de glissement β_f lié à un mobile à deux trains directeurs, n'est pas traduisible (sans équivalence) sur un mobile skid-steering, parce qu'il représente un phénomène de glissement sur le braquage du train avant, or le mobile skid-steering est dépourvu de ce braquage.

L'utilisation de ce type de paramètre de glissement est souvent justifié du point de vue de sa représentation physique car il est associé à un phénomène quantifiable. Cependant, cette représentation est biaisée du fait que, très souvent, d'autres phénomènes viennent s'ajouter dans le paramètre estimé sans avoir de rapport direct avec ce que l'on cherche à estimer. Par exemple, les angles de glissement β_f et β_r représentent un glissement latéral du mobile, mais ils prennent également en compte d'autres perturbations telles que les erreurs de régulation du bas-niveau du robot ou encore les erreurs de modélisation. De même, la vitesse de perturbation v_p estimée pour le modèle skid-steering et le modèle à deux trains directeurs peut s'associer à plusieurs phénomènes physiques différents tels que la diminution du rayon des roues à cause de l'écrasement du pneumatique, le patinage de la roue sur un sol boueux ou encore le glissement de cette dernière sur un sol en pente... Enfin, de part leur lien fort au modèle, tous les paramètres sont fortement couplés les uns aux autres, ce qui rend plus difficile de distinguer quel paramètre modélise quel phénomène.

Pour ces différentes raisons, l'idée proposée ici est de représenter les perturbations extérieures par des termes qui ne cherchent pas à isoler les phénomènes physiques en jeu, mais qui soient communs à l'ensemble des robots existants. Pour cela, ces paramètres doivent être indépendants du modèle proposé. Le paradigme est ainsi changé. Les observateurs précédents considéraient le modèle imparfait en estimant des dérives internes à ce dernier pour les corriger, tandis que l'observateur proposé ici considère le modèle parfait et que toute erreur provient d'une action extérieure que l'on cherche à estimer à travers des perturbations.

Afin d'introduire ces nouveaux paramètres, l'ensemble des modèles de mobile sera uniformisé sous la notation commune f . Le point de contrôle M de tout robot mobile est soumis à la vitesse décrite par la fonction f qui peut se décomposer sur les axes de son repère de référence (voir Fig.4.8(a)) telle que :

$$f = f(\varepsilon_\Delta, u) = \begin{pmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_\gamma \end{pmatrix}. \quad (4.11)$$

Cependant, pour diverses raisons, le robot est soumis à des perturbations induisant une erreur entre la vitesse réelle et la vitesse commandée f . Cette erreur est exprimée à travers une vitesse de perturbation f_p décomposée également selon les axes du repère de référence (voir Fig.4.8(b)). La dérivée du vecteur d'état peut alors s'exprimer comme :

$$\dot{\varepsilon}_\Delta = f + C f_p = \begin{pmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_\gamma \end{pmatrix} + C \begin{pmatrix} f_{p\alpha} \\ f_{p\beta} \\ f_{p\gamma} \end{pmatrix}. \quad (4.12)$$

Cette dernière formulation (4.12) décompose le nouveau modèle étendu en deux parties. La première représente la vitesse obtenue à partir du modèle du robot et la seconde représente les perturbations. La matrice C représente

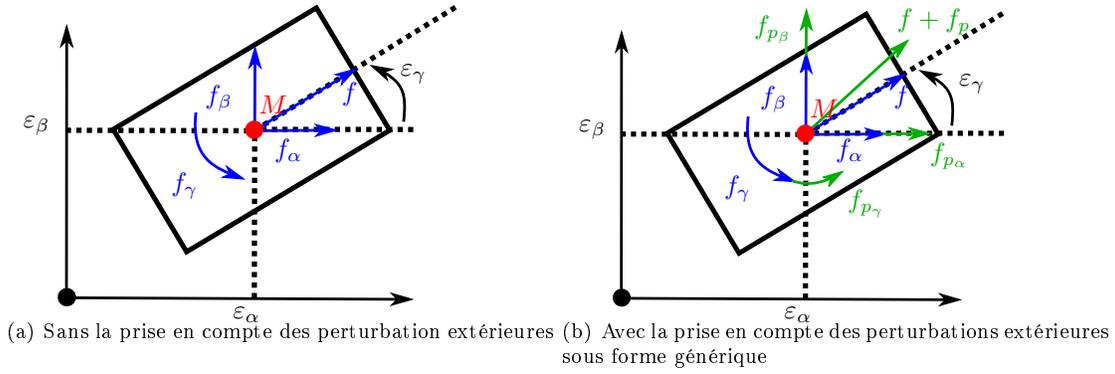


FIGURE 4.8 – Modèle cinématique d'un mobile quelconque avec et sans la prise en compte des perturbations externes sous forme générique.

le couplage entre les perturbations. Si elles sont indépendantes alors C est la matrice identité.

4.2.1.4.b Repère de référence

A ce stade de la construction du nouveau modèle étendu, aucun repère de référence n'a été spécifié. La vitesse contrôlée du mobile f est calculée à travers le repère de Frenet ou le repère absolu selon le modèle associé (voir Tab.4.3 et Tab.4.2). La matrice C est considérée comme une entrée de l'observateur et dépend du repère d'observation.

- **Repère de Frenet :** Le premier élément de f est couplé au troisième¹³. Ainsi f_{p_s} est également couplé à f_{p_θ} . Avec c la courbure de la trajectoire, la matrice C s'exprime alors :

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -c & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4.13)$$

- **Repère absolu :** Dans ce repère de référence, les vitesses des modèles comme celles des perturbations sont découplées. Ainsi $C = I_{3 \times 3}$.

4.2.1.4.c Construction de l'observateur générique

Une fois le nouveau modèle étendu développé, la construction de l'observateur est très similaire à celle basée sur Lyapunov, proposée précédemment pour les observateurs spécifiques (voir Sec.4.2.1.2.c). Les équations d'observations sont les mêmes que celles proposées (4.7) et (4.8) avec $\varepsilon_o = f_p$. Par ailleurs, du fait de l'indépendance des perturbations au modèle, le terme $f(\varepsilon_A, \hat{\varepsilon}_o, u)$ présent dans l'observateur de Lyapunov dédié, peut se réécrire¹⁴ :

$$f(\varepsilon_\Delta, \hat{\varepsilon}_o, u) = f(\varepsilon_\Delta, u) + C \hat{f}_p \implies \frac{\partial f(\varepsilon_\Delta, \hat{\varepsilon}_o, u)}{\partial \varepsilon_o} = \frac{\partial f(\varepsilon_\Delta, u) + C \hat{f}_p}{\partial f_p}. \quad (4.14)$$

Cette dernière équation permet alors de simplifier le terme $\partial f(\varepsilon_\Delta, \hat{\varepsilon}_o, u) / \partial \varepsilon_o$ présent dans l'équation (4.8) :

$$\frac{\partial f(\varepsilon_\Delta, u) + C \hat{f}_p}{\partial f_p} = C. \quad (4.15)$$

Ce qui mène à l'équation d'observation :

$$\dot{X} = \begin{pmatrix} \dot{\hat{\varepsilon}}_\Delta \\ \dot{\hat{f}}_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(\varepsilon_\Delta, u) + C \hat{f}_p + K_\Delta e_\Delta^o \\ K_o C^t e_\Delta^o \end{pmatrix}. \quad (4.16)$$

13. La quantité \dot{s} est incluse dans la quantité $\dot{\varepsilon}_\theta$

14. A partir de maintenant et pour souligner l'indépendance de l'observateur au repère de référence, la notation ε_Δ sera utilisée en lieu et place de ε_A associé aux observateurs par Lyapunov dédié au modèle et construit dans le repère absolu.

Avec K_Δ et K_o deux matrices carrées diagonales de la dimension respective de e_Δ et e_o et formées d'une diagonale ($K_{\Delta\varepsilon_\alpha}$ $K_{\Delta\varepsilon_\beta}$ $K_{\Delta\varepsilon_\gamma}$) et ($K_{o\varepsilon_\alpha}$ $K_{o\varepsilon_\beta}$ $K_{o\varepsilon_\gamma}$) strictement positive, permettant d'assurer la convergence des variables observées vers leurs valeurs réelles.

Avec cette construction, l'observateur (4.16) est complètement indépendant du modèle du robot et du repère de référence. Il nécessite seulement les données de f et C comme entrée.

La preuve de stabilité et de convergence de l'observateur suit exactement le même schéma que celle fournie pour les observateurs spécifiques (voir Annexe B). Par ailleurs, lorsque le terme $\partial f(\varepsilon_\Delta, \hat{\varepsilon}_o, u)/\partial \varepsilon_o = C$ est égal à la matrice identité (cas de l'observation dans le repère absolu), la première hypothèse concernant le développement de la série de Taylor dans la preuve de convergence est levée. La seule limite de l'observateur générique proposé ici se situe dans le couplage des perturbations. Seuls les couplages linéaires peuvent être traités au sein de la matrice C . Dans le cas de couplages non-linéaires, l'observateur est mis en défaut. Toutefois, tous les modèles classiques ne possèdent pas de couplage où ce dernier est non-linéaire. Ce n'est donc pas une forte restriction à son usage.

4.2.1.4.d Modèle hybride

L'une des qualités de l'observateur (4.16) est sa versatilité et notamment son indépendance au repère de référence par l'ajustement de f selon le repère choisi. Par ailleurs, il est également capable de s'adapter à un modèle hybride tel que présenté en table Tab.4.7. Ce dernier est une hybridation du repère de Frenet et du repère absolu.

Son intérêt se situe principalement dans l'implémentation de l'observateur et de la commande sur le robot en évitant des multiple changements de repère des estimations entre les repères d'observations et de commande¹⁵. De plus, étant donné que la perturbation de vitesse de lacet est la même dans le repère de Frenet et dans le repère absolu, favoriser l'expression du modèle absolu permet une plus grande robustesse lors d'importantes variations de courbure¹⁶. Enfin, ceci appuie un peu plus sur sa flexibilité d'utilisation.

Ce modèle a été utilisé dans les expérimentations qui seront proposées dans la partie suivante.

/	skid-steering	Deux trains directeurs
$\begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_s \\ \dot{\varepsilon}_y \\ \dot{\varepsilon}_\Theta \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \frac{v \cos(\varepsilon_\theta)}{1 - c\varepsilon_y} \\ v \sin(\varepsilon_\theta) \\ \omega \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \frac{v \cos(\varepsilon_\theta + \delta_r)}{1 - c\varepsilon_y} \\ v \sin(\varepsilon_\theta + \delta_r) \\ v \cos(\varepsilon_\theta + \delta_r) \left(\frac{\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r)}{L} \right) \end{pmatrix}$

TABLE 4.7 – Hybridation du modèle dans le repère de Frenet ($\dot{\varepsilon}_s$ et $\dot{\varepsilon}_y$) et dans le repère absolu ($\dot{\varepsilon}_\Theta$).

4.2.1.4.e Équivalence avec les observateurs classiques

Cette dernière partie consacrée à la synthèse de l'observateur générique montre qu'il existe des équivalences entre les perturbations pour les observateurs de dérivées de modèle et l'observateur générique. Par exemple, en prenant le modèle étendu hybridé de la table Tab.4.7 et le modèle équivalent donné par la table Tab.4.3, il est possible d'écrire :

$$\begin{pmatrix} \hat{\varepsilon}_s \\ \hat{\varepsilon}_y \\ \hat{\varepsilon}_\Theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{v \cos(\varepsilon_\theta)}{1 - c\varepsilon_y} + \hat{f}_{p_s} \\ v \sin(\varepsilon_\theta) + \hat{f}_{p_y} \\ \omega + \hat{f}_{p_\Theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{(v + \hat{v}_p) \cos(\varepsilon_\theta + \hat{\beta})}{1 - c\varepsilon_y} \\ (v + \hat{v}_p) \sin(\varepsilon_\theta + \hat{\beta}) \\ \omega + \hat{\theta}_p \end{pmatrix}. \quad (4.17)$$

- En divisant la seconde ligne dans (4.17) par la première, il suit :

15. Étant donné que pour l'observateur générique, les perturbations observées dans le repère absolu ne sont pas les même que dans le repère de Frenet.

16. Dans le cas du modèle hybride proposé, la matrice C est égale à l'identité et l'observateur est indépendant de la courbure c .

$$\hat{\beta} = \arctan \left(\frac{v \sin(\varepsilon_\theta) + \hat{f}_{p_y}}{v \cos(\varepsilon_\theta) + \hat{f}_{p_s}(1 - c\varepsilon_y)} - \varepsilon_\theta \right). \quad (4.18)$$

- Ensuite, combiner (4.17) avec (4.18) permet l'obtention de :

$$\hat{v}_p = \left(\frac{v \cos(\varepsilon_\theta)}{1 - c\varepsilon_y} + \hat{f}_{p_s} \right) \frac{1 - c\varepsilon_y}{\cos(\varepsilon_\theta + \hat{\beta})} - v. \quad (4.19)$$

- Finalement, la dernière ligne donne :

$$\hat{f}_{p_\Theta} = \dot{\hat{\theta}}_p. \quad (4.20)$$

Le même principe d'équivalence peut être appliqué pour tous types de modèle. Ceci montre bien que l'observateur proposé est également très lié aux autres observateurs présentés précédemment et que seule la forme des paramètres choisis lui donne sa capacité de généralisation. Ce genre d'équivalence sera utilisé dans la partie suivante de ce chapitre pour comparer expérimentalement les différents résultats des observateurs obtenus.

4.2.2 Observateur pour le manipulateur

L'observateur proposé selon le modèle étendu (4.12) possède une structure suffisamment versatile pour s'adapter à d'autres types de robots en dehors des mobiles, notamment à des manipulateurs. Bien entendu, sur un manipulateur mobile, le bras n'est pas soumis à des perturbations liées au sol, mais à des perturbations induites par son interaction avec le mobile, liées à son propre bas-niveau à ses erreurs de régulation... De fait, il est tout aussi pertinent de vouloir compenser ces erreurs pour améliorer le suivi de trajectoire. En partant de cette idée et du modèle du manipulateur (3.60), il est possible d'écrire¹⁷ :

$$J_t \dot{q} = \mathcal{C} \dot{\varepsilon}_a - \mathcal{B} v_{ext} \iff \dot{\varepsilon}_a = \mathcal{C}^{-1} [J_t \dot{q} + \mathcal{B} v_{ext}]. \quad (4.21)$$

En ajoutant les perturbations pour obtenir un modèle étendu, le système d'équations est donné par :

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_a &= \mathcal{C}^{-1} [J_t \dot{q} + \mathcal{B} v_{ext}] + \hat{f}_{p_a} \\ &= f_a + \hat{f}_{p_a}. \end{aligned} \quad (4.22)$$

L'équation (4.22) retombe sur la structure de l'observateur générique permettant d'en estimer les dérivées et de les intégrer à la commande¹⁸.

4.2.3 Résultats expérimentaux

Cette partie s'attache à la présentation des résultats expérimentaux concernant les observateurs dédiés à des modèles, l'observateur générique et les équivalences de modèle présentées dans cette partie. Toutes les données présentées ici sont issues d'essais réels et aucune simulation n'est présentée.

Les vidéos associées aux essais présentés ici peuvent être trouvées à l'adresse : <https://nextcloud.inrae.fr/s/Rm5LQH7oGew9qdA>. L'ensemble des erreurs et écarts présentés sont exprimés en m pour les distances et en $^\circ$ pour les rotations.

4.2.3.1 Présentation des essais expérimentaux

Afin de démontrer l'intérêt des observateurs proposés, les expérimentations ont été menées avec deux robots mobiles, le robot Campero en skid-steering et le robot Adap2e à deux trains directeurs¹⁹. L'ensemble des essais a été mené sous ROS à une fréquence de contrôle de $10Hz$. Les robots étaient équipés d'odomètres, de GPS RTK

17. La notation ε_a utilisée dans cette équation représente le vecteur d'état du manipulateur.

18. Le détail de la commande du manipulateur avec les dérivées est donné en Annexe A.2.

19. Voir Annexe G pour plus de détails sur les plateformes.

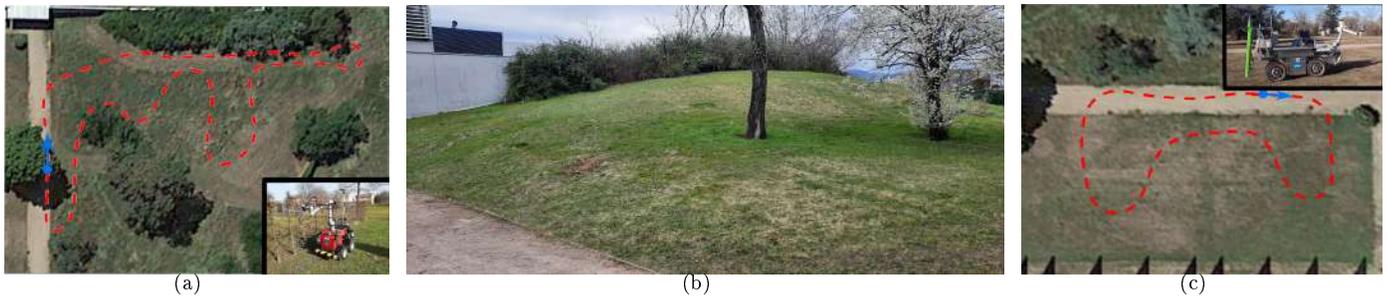


FIGURE 4.9 – Présentation des terrains d'essais expérimentaux. (a) : Trajectoire des essais sur le mobile skid-steering. (b) : Photos du terrain en pente sur lequel évoluait le mobile skid-steering lors des expérimentations. (c) : Trajectoire des essais sur le mobile voiture et le mobile à deux trains directeurs.

et d'une centrale inertielle. Un algorithme de localisation basé sur un filtre de Kalman fournissait une localisation absolue des mobiles. L'ensemble des essais a été mené à 1m/s .

Les terrains et trajectoires des mobiles pour les essais sont donnés en figure Fig.4.9. Pour le robot en skid-steering, qui est très stable, la trajectoire a dû être dessinée sur un terrain en pente afin de maximiser ses chances de glissement pour mettre en évidence les influences des observateurs. Au contraire, dans le cas du robot Adap2e, la trajectoire a été dessinée sur un sol plat afin de garantir son intégrité physique²⁰.

L'objectif des essais présentés est de comparer les performances de suivi de trajectoire des mobiles avec et sans l'utilisation des observateurs, mais également de comparer les performances des observateurs entre eux. Dans tous les essais, deux tours de circuit sont effectués afin de montrer la répétabilité des résultats obtenus. Dans le cas du mobile à deux trains directeurs, les essais sont divisés en deux parties, la première où le modèle du robot est le modèle voiture et la seconde avec le modèle à deux trains directeurs, ceci afin de montrer davantage la versatilité des approches présentées. Par ailleurs, pour obtenir une représentation plus simple du glissement longitudinal et pour être homogène aux paramètres géométriques β , une représentation géométrique équivalente de v_p est utilisée dans les résultats ci-dessous, sous la forme d'un rayon de compression de roue r tel que : $r = r_t(v + v_p)/v - r_t$ avec r_t le rayon de roue théorique.

Le tableau Tab.4.8 présente les gains de commande et d'observation sélectionnés empiriquement lors des essais présentés dans cette partie. Par ailleurs, les dérives de l'observateur par backstepping étaient filtrées par un filtre passe-bas de Butterworth pour être exploitables dans la commande.

²⁰. Le robot ayant été profilé pour se déplacer dans un rang de vigne, sa voie est très étroite ce qui le rend instable et inapte à rouler sur un terrain très pentu, contrairement au Campero qui est proche du sol et très stable. D'autres résultats post-thèse seront mis en œuvre sur sa version à voie large.

/	Observateur de dérive par backstepping					
	$k_{\varepsilon_s}^o$	$k_{\varepsilon_y}^o$	$k_{\varepsilon_\theta}^o$			
skid steering	-8.5	-6	-6			
Voiture	-3	-6	-6			
Deux trains directeurs	-3	-6	-6			
/	Observateur de dérive par Lyapunov					
	$K_{A_{\varepsilon_x}}$	$K_{A_{\varepsilon_y}}$	$K_{A_{\varepsilon_\theta}}$	$K_{O_{v_p}}$	$K_{O_{\beta_f}}$	$K_{O_{\beta_r}}$
skid-steering	-5	-5	-5	-3	-4	-4
Voiture	-3	-3	-3	-1	-2	-2
Deux trains directeurs	-3	-3	-3	-1	-2	-2
/	Observateur Générique					
	$K_{\Delta_{\varepsilon_s}}$	$K_{\Delta_{\varepsilon_y}}$	$K_{\Delta_{\varepsilon_\theta}}$	$K_{O_{\varepsilon_s}}$	$K_{O_{\varepsilon_y}}$	$K_{O_{\varepsilon_\theta}}$
skid-steering	-4	-4	-4	-8	-8	-8
Voiture	-5	-5	-5	-3	-3	-3
Deux trains directeurs	-5	-5	-5	-3	-3	-3
/	Loi de contrôle (voir Annexe.A)					
	k_{ε_s}	k_{ε_y}	k_w			
skid-steering	-0.5	-0.5	-1.25			
Voiture	-0.3	-0.3	-1			
Deux trains directeurs	-0.3	-0.3	-1			

TABLE 4.8 – Gain de contrôle et d'observation pour les trois mobiles lors des expérimentations.

4.2.3.2 Résultat des essais sur les observateurs du mobile

4.2.3.2.a Expérimentation sur un robot skid-steering

La première figure Fig.4.10 montre les dérives obtenues avec les trois observateurs proposés lors de l'essai avec le mobile en skid-steering. Afin d'être comparables, les différentes équivalences proposées dans ce chapitre ont été utilisées pour ramener chaque dérive à une quantité géométrique commune facilement interprétable. Il apparaît alors que les trois observateurs ont exactement les mêmes capacités d'estimation des perturbations extérieures au système. Cela démontre la pertinence des deux approches différentes pour les observateurs spécifiques au modèle mais surtout le fonctionnement de l'observateur générique qui s'adapte très bien au modèle du robot.

La figure Fig.4.11 détaille les dérives brutes obtenues à la sortie de l'observateur générique sans les avoir exprimées selon une dérive géométrique contrairement à la figure Fig.4.10. Sur cette dernière, il est intéressant de remarquer que, globalement, le glissement sur la vitesse de lacet ($\dot{\varepsilon}_\Theta$) est très faible et n'impacte donc pas, ou très peu, la navigation en milieu naturel. Ceci est également décelable d'après l'allure des courbes de β_f et β_r sur la figure Fig.4.10. En effet, d'après l'équation d'équivalence (4.9), β_f dépend de β_r mais aussi de la vitesse de glissement en lacet, or cette dernière étant très faible, cela justifie que l'allure des deux courbes soit similaire. Cela montre qu'aux vitesses envisagées ici, hormis lors des virages très serrés, le mobile ne glisse pas sur cet axe et que la quasi-totalité des perturbations appliquées au mobile sont dues aux glissements latéral et longitudinal²¹.

Une fois ces dérives introduites dans la commande du mobile, la figure Fig.4.12 présente les erreurs longitudinales et latérales lors du suivi de la trajectoire avec ces différents observateurs. Cette dernière appuie les résultats énoncés auparavant, en montrant une amélioration des performances de suivi par l'utilisation d'un observateur quel qu'il soit. Le plus notable cependant est que l'amélioration des performances est la même pour chaque observateur. Ceci est appuyé par les données statistiques des erreurs fournies dans le tableau Tab.4.9. Ce dernier constat appuie davantage l'argument d'équivalence des différents observateurs et des dérives qu'ils mesurent.

Cette même figure montre également la pertinence de l'extension des observateurs à la vitesse longitudinale, qui sinon, est teintée d'une erreur statique assez importante qu'il convient d'éliminer notamment lorsque le mobile se déplace à vitesse variable sur sa trajectoire ou sur des terrains naturels.

21. Cette dernière affirmation serait fausse dans le cas où le mobile irait à des vitesses plus hautes. En effet, ce glissement provient du "drift" du mobile qui n'apparaît que très peu aux vitesses expérimentales présentées ici.

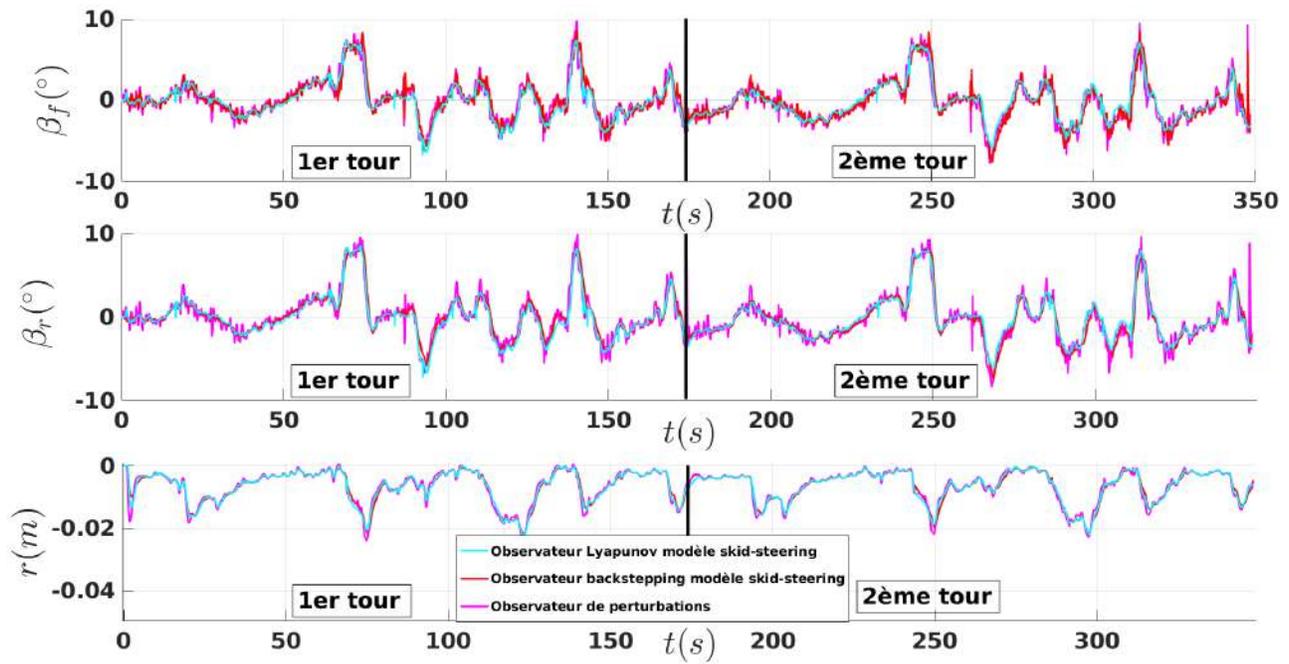


FIGURE 4.10 – Comparaison des dérives des différents observateurs spécifiques et de l'observateur générique sur un robot skid-steering.

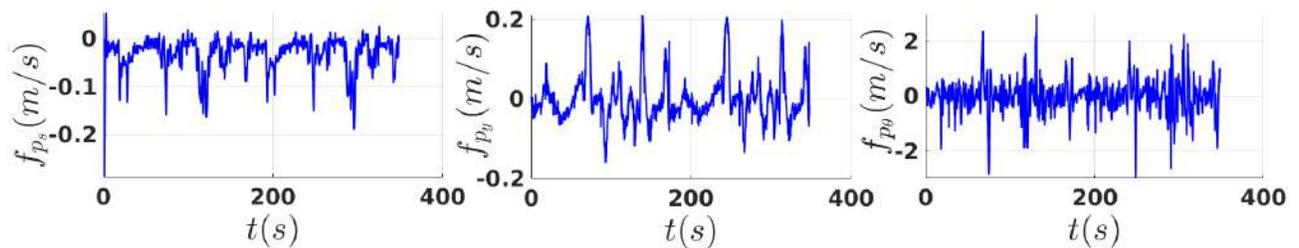


FIGURE 4.11 – Perturbations obtenues en sortie de l'observateur générique.

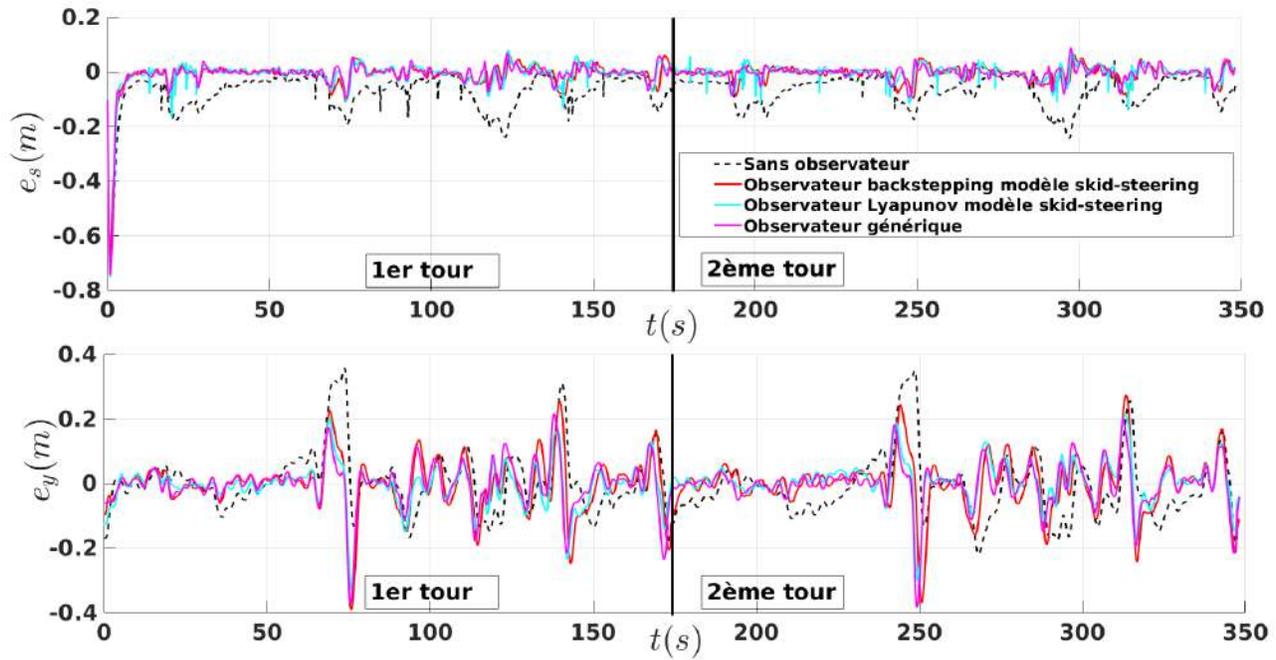


FIGURE 4.12 – Comparaison des erreurs de suivi de trajectoire obtenues en utilisant les observateurs spécifiques et l’observateur générique sur un robot skid-steering.

4.2.3.2.b Expérimentations sur un robot à un et deux trains directeurs

Cette première série d’expérimentations a montré la performance et l’équivalence des trois observateurs étudiés dans le cas d’un mobile skid-steering. Cette seconde série d’essais s’intéresse au cas du mobile à un et deux trains directeurs. Les figures représentant les erreurs lors du suivi de la trajectoire sont données en Fig.4.13. De manière similaire à ce qui a été présenté dans les expérimentations précédentes, les observateurs permettent une amélioration notable des performances de suivi du mobile. Ceci démontre la versatilité de l’observateur générique sur différents types de mobile et la pertinence de son utilisation, du fait que les performances qu’il offre sont les mêmes que celles des observateurs spécifique à un modèle.

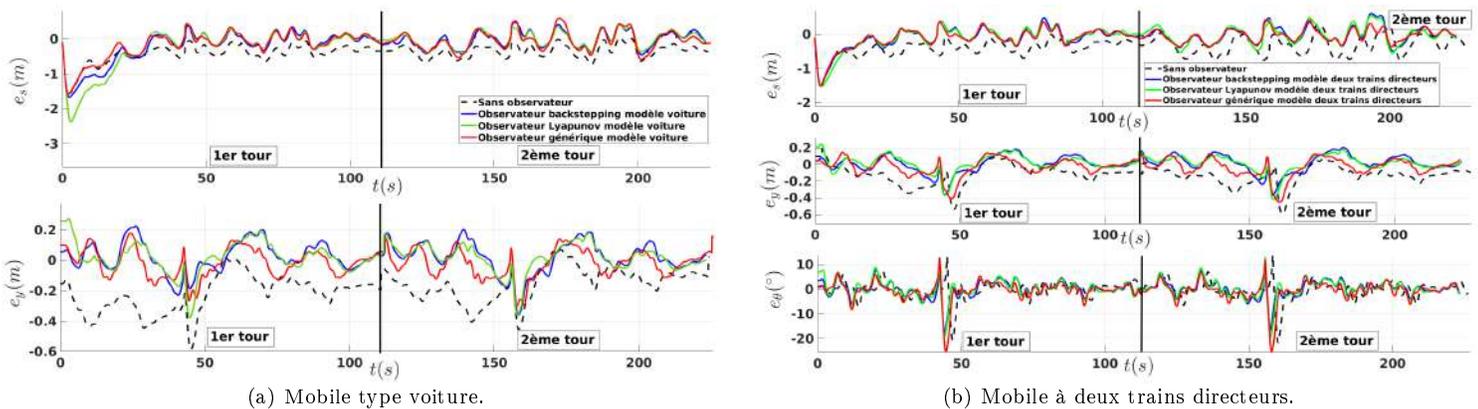


FIGURE 4.13 – Erreurs de suivi de trajectoire sans observateur, avec les observateurs dédiés modèle et avec l’observateur générique sur un robot à un ou deux trains directeurs.

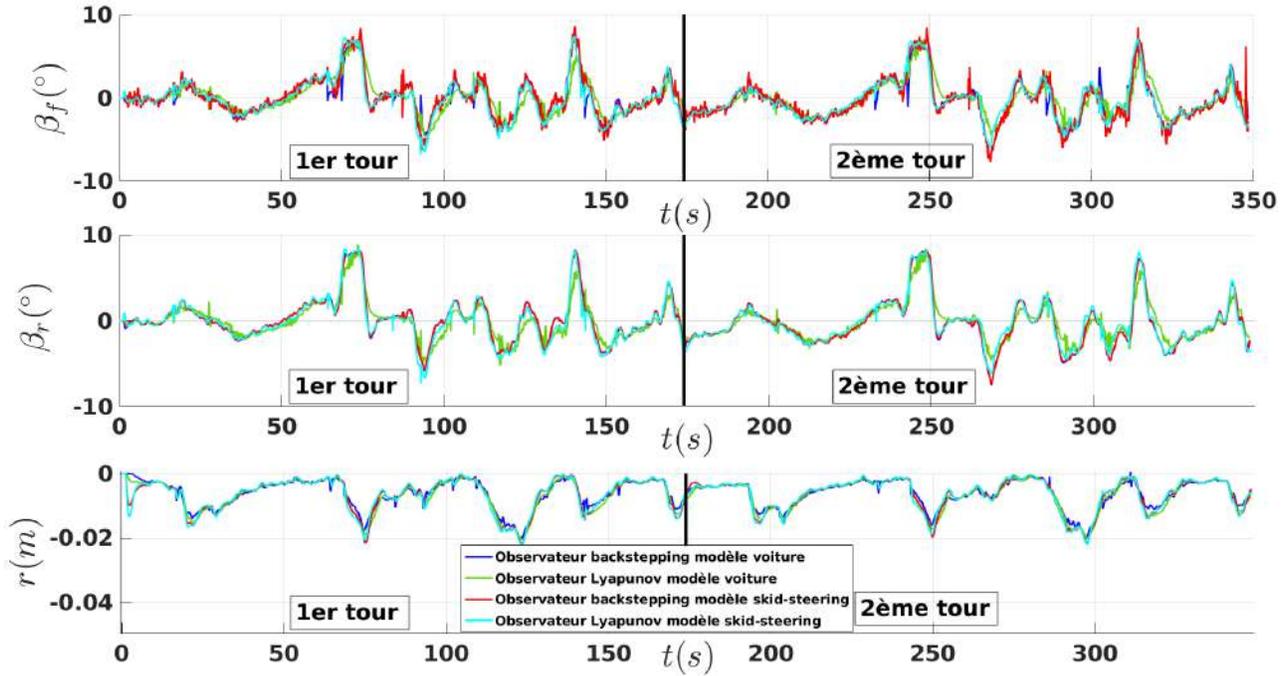


FIGURE 4.14 – Comparaison des dérives obtenues par différents observateurs spécifiques et avec les dérives obtenues par l'utilisation d'un modèle d'équivalence voiture sur un robot skid-steering.

	Skid-steering		Voiture		Deux trains directeurs					
	e_s	e_y	e_s	e_y	e_s	e_y	e_θ			
Sans observateur	\bar{x}	-0.068	-0.003	\bar{x}	-0.333	-0.188	\bar{x}	-0.321	-0.124	-0.206
	σ	0.051	0.098	σ	0.161	0.124	σ	0.230	0.118	3.461
Observateur backstepping	\bar{x}	-0.006	-0.002	\bar{x}	-0.003	-0.022	\bar{x}	-0.007	0.008	0.209
	σ	0.027	0.084	σ	0.209	0.101	σ	0.217	0.106	3.235
Observateur Lyapunov	\bar{x}	-0.005	0.000	\bar{x}	0.003	0.017	\bar{x}	-0.004	0.015	0.291
	σ	0.027	0.064	σ	0.195	0.100	σ	0.223	0.099	3.541
Observateur générique	\bar{x}	-0.004	0.000	\bar{x}	-0.015	-0.017	\bar{x}	-0.013	-0.036	-0.050
	σ	0.023	0.073	σ	0.231	0.093	σ	0.175	0.111	4.029

TABLE 4.9 – Moyenne et écart-type des erreurs des trois modèles de robots avec et sans les différents observateurs.

4.2.3.3 Résultats des essais concernant l'équivalence

Une dernière série d'expérimentations consacrée au mobile est présentée dans cette partie, afin d'étudier les équivalences sur l'utilisation des observateurs et des lois de commande associés au modèle. Pour cela, quatre essais ont été menés, les deux premiers utilisent les observateurs et commandes dédiés au modèle skid-steering sur un robot de type skid-steering, tandis que les deux suivants utilisent des observateurs et commandes dédiés au modèle d'un véhicule à deux trains directeurs sur un robot de type skid-steering. Les dérives fournies par les observateurs dans ces quatre essais sont données en figure Fig.4.14. Il apparaît que l'équivalence proposée pour l'utilisation d'un observateur dédié à un modèle sur un autre modèle est tout à fait pertinente pour estimer les dérives.

La figure Fig.4.15 présente les erreurs de suivi lors des quatre expérimentations. Les données statistiques de ces dernières sont données dans le tableau Tab.4.10. Ces résultats démontrent la validité de l'équivalence de commande initialement proposée dans TOURRETTE et al. (2017). De fait, dans les quatre expérimentations, l'utilisation des observateurs améliore les performances de manière similaire, quel que soit le type de modèle de mobile utilisé dans

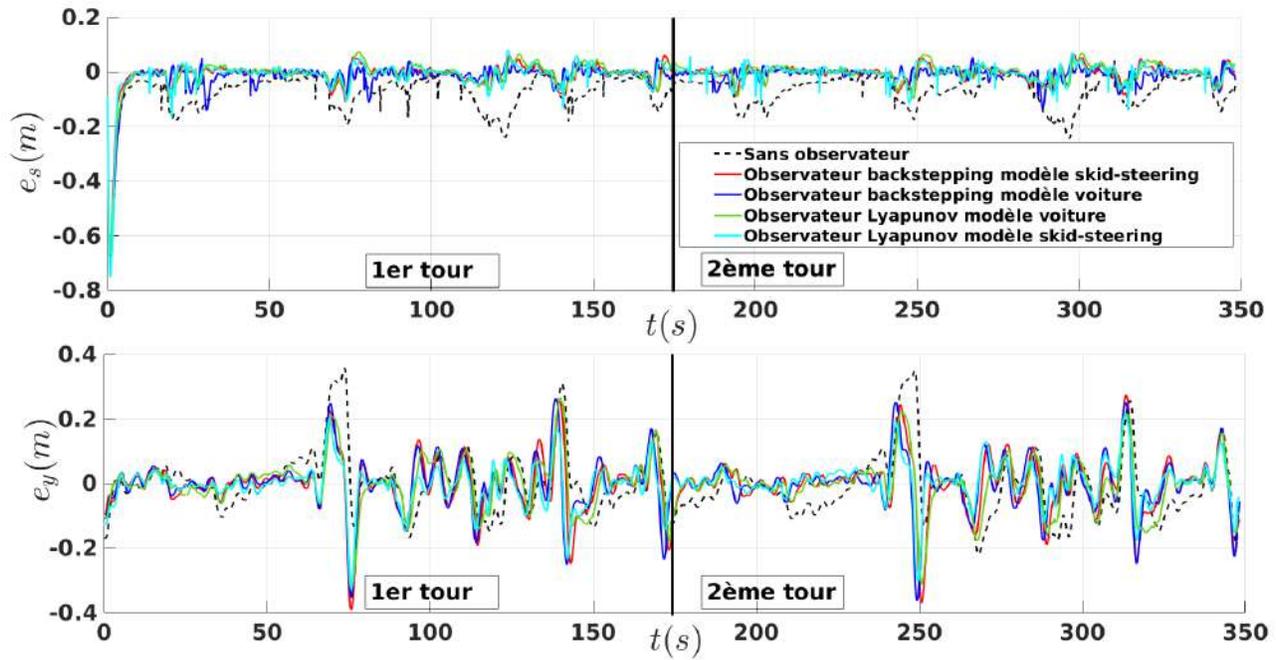


FIGURE 4.15 – Comparaison des erreurs de suivi de trajectoire obtenues en utilisant les observateurs dédiés modèle ou par l'utilisation d'un modèle d'équivalence sur les lois de commande et d'observation d'un modèle voiture sur un robot skid-steering.

le modèle d'observation ou de commande.

Durant les deux tours, un important dépassement apparaît aux alentours de 75s. Ce dernier est causé par un demi-tour serré du mobile, tout en suivant un demi-cercle le long de sa trajectoire (voir Fig.4.9(a) à la droite de la trajectoire). Avec les observateurs, le pic inférieur dépasse celui ne possédant aucun observateur, tandis que la partie supérieure est diminuée. Dans ce cas de figure, l'observateur corrige la moyenne de l'erreur sans atténuer son amplitude, le pic est donc simplement déplacé vers le bas pour centrer sa moyenne à zéro. Pour corriger totalement ce dépassement, une action prédictive similaire à LENAIN, THUILOT, CARIOU et al. (2007) est nécessaire afin d'anticiper la variation de courbure de la trajectoire à l'entrée et à la sortie du virage. L'observateur seul n'est pas apte à corriger ce type d'erreur. Ce dernier constat motive une fois de plus à se tourner vers la commande prédictive pour les perspectives de ces travaux de thèse.

Modèle Robot	skid-steering		Voiture			
	skid-steering		skid-steering			
Observateur Backstepping	e_s	e_y	e_s	e_y		
	\bar{x}	-0.006	-0.002	\bar{x}	-0.010	0.001
	σ	0.027	0.084	σ	0.023	0.080
Observateur Lyapunov	e_s	e_y	e_s	e_y		
	\bar{x}	-0.005	0.000	\bar{x}	0.002	-0.001
	σ	0.027	0.064	σ	0.028	0.079

TABLE 4.10 – Moyenne et écart-type des erreurs de suivi de trajectoire avec le mobile en skid-steering selon le type de modèle utilisé pour la commande et l'observation.

4.2.3.4 Résultats des essais sur l'application de l'observateur générique au manipulateur

Comme cela avait été souligné précédemment, l'un des autres intérêts de l'observateur générique proposé est sa capacité à s'adapter à d'autres types de robot et notamment aux manipulateurs. Afin de valider cette hypothèse, une expérimentation a été menée sur le suivi de trajectoire de l'effecteur à la vitesse de $0.6m/s$. Dans ce contexte, le bras suit une trajectoire en "S" (voir Fig.4.16) en étant monté sur la base mobile qui suit le même profil projeté au sol. Le mobile ne bénéficie pas de l'observation dans cet essai. Les gains de commande et d'observation du

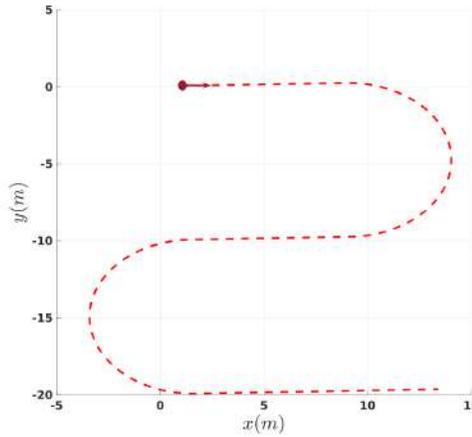


FIGURE 4.16 – Trajectoire du manipulateur pour le suivi avec et sans observateur.

manipulateur sont donnés dans la table Tab.4.11.

Gains de commande	$k_{\varepsilon_{a_s}}$	$k_{\varepsilon_{a_y}}$	$k_{\varepsilon_{a_z}}$	$k_{\varepsilon_{a_{\theta_x}}}$	$k_{\varepsilon_{a_{\theta_y}}}$	$k_{\varepsilon_{a_{\theta_z}}}$
	-0.5	-1	-1	-1	-1	-1
Gains d'observation	$K_{a_{\varepsilon_s}}$	$K_{a_{\varepsilon_y}}$	$K_{a_{\varepsilon_{\theta}}}$	$K_{a_{\varepsilon_{\theta_x}}}$	$K_{a_{\varepsilon_{\theta_y}}}$	$K_{a_{\varepsilon_{\theta_z}}}$
	-3	-3	-3	-10	-10	-10
	$K_{o_{\varepsilon_s}}$	$K_{o_{\varepsilon_y}}$	$K_{o_{\varepsilon_{\theta}}}$	$K_{o_{\varepsilon_{\theta_x}}}$	$K_{o_{\varepsilon_{\theta_y}}}$	$K_{o_{\varepsilon_{\theta_z}}}$
	-2	-2	-2	-5	-5	-5

TABLE 4.11 – Gains de commande et d'observation du manipulateur lors des expérimentations.

Les résultats de cet essai sont donnés en Fig.4.17 et Fig.4.18. Il apparaît dans ces dernières que l'utilisation de l'observateur améliore les performances de suivi du manipulateur. Cela se retrouve également dans le tableau Tab.4.12 qui montre une diminution de l'erreur moyenne, notamment sur les axes longitudinaux et latéraux. Ces résultats mettent en évidence la pertinence de l'utilisation de ce genre d'observateur pour améliorer les performances du manipulateur. Il appuie également la versatilité de l'observateur proposés et son intérêt pour les travaux génériques sur la coordination proposée dans ce mémoire.

Sans observateur	/	e_{a_s}	e_{a_y}	e_{a_z}	$e_{a_{\theta_x}}$	$e_{a_{\theta_y}}$	$e_{a_{\theta_z}}$
	\bar{x}	0.026	-0.014	0.004	0.001	0.005	0.035
	σ	0.027	0.039	0.023	0.946	1.041	4.678
Avec observateur	/	e_{a_s}	e_{a_y}	e_{a_z}	$e_{a_{\theta_x}}$	$e_{a_{\theta_y}}$	$e_{a_{\theta_z}}$
	\bar{x}	0.004	-0.002	-0.004	-0.011	0.086	-0.032
	σ	0.030	0.028	0.023	0.973	1.151	1.445

TABLE 4.12 – Moyenne et écart-type des erreurs de suivi de trajectoire du manipulateur avec et sans observateur.

4.3 Expérimentations en milieu naturel

Cette dernière partie présente des résultats plus généraux concernant la navigation en milieu naturel d'un manipulateur mobile²². Ils capitalisent sur les méthodes de compensation des irrégularités et les méthodes d'observation vues dans ce dernier chapitre pour offrir une commande robuste au manipulateur mobile dans de tels environnements. Les expérimentations présentées ici sont basées sur le manipulateur mobile MM1²³ sur les mêmes terrain et

22. Dans cette partie, afin de ne pas confondre les notations entre manipulateur et mobile, un indice a est associé au manipulateur et un indice m est associé au mobile.

23. Voir annexe G.1 et déjà présenté dans le chapitre 3.

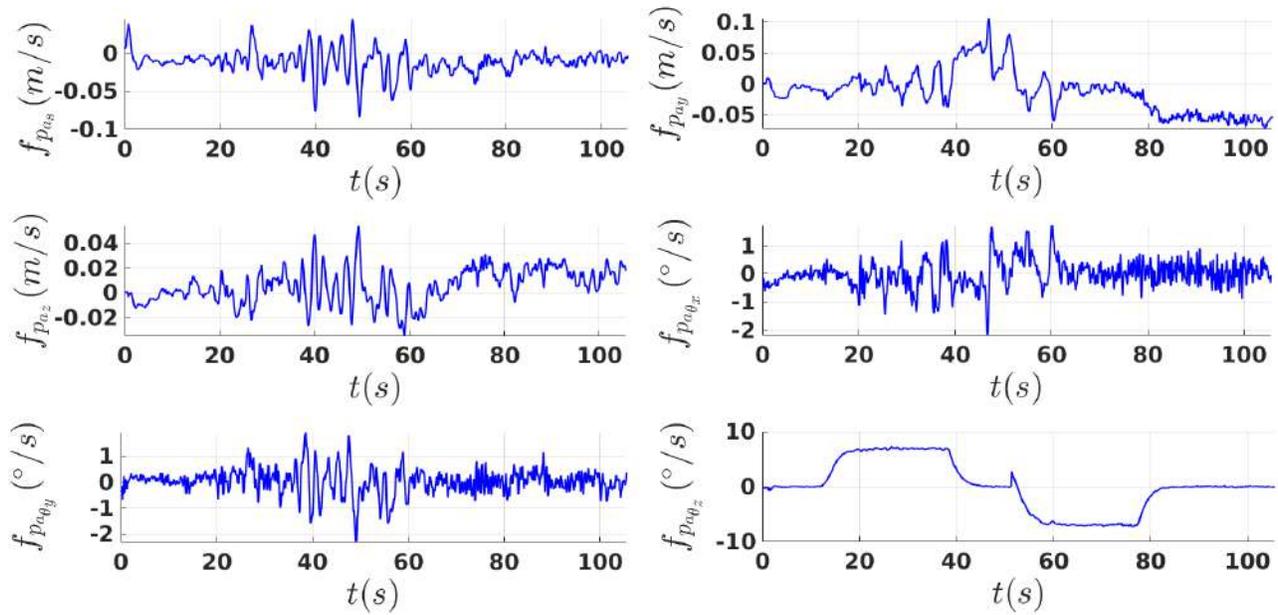


FIGURE 4.17 – Dérives estimées par l'observateur générique sur l'effecteur lors du suivi de trajectoire.

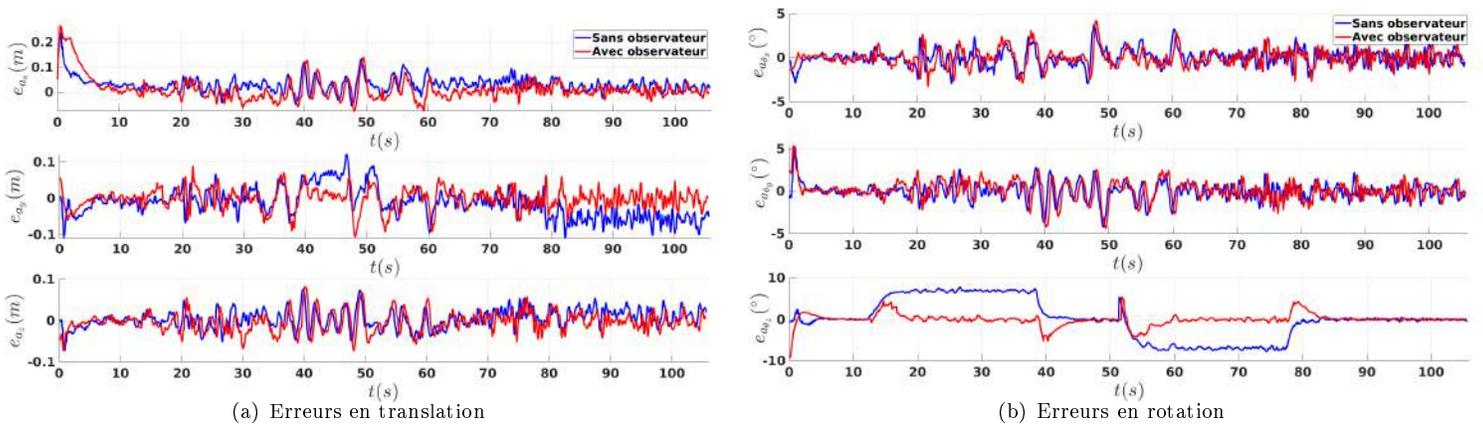


FIGURE 4.18 – Erreurs de l'effecteur par rapport à la trajectoire lors du suivi du manipulateur avec et sans observateur.

Sans compensation							Compensation capteur						
	e_{a_s}	e_{a_y}	e_{a_z}	$e_{a_{\theta_x}}$	$e_{a_{\theta_y}}$	$e_{a_{\theta_z}}$		e_{a_s}	e_{a_y}	e_{a_z}	$e_{a_{\theta_x}}$	$e_{a_{\theta_y}}$	$e_{a_{\theta_z}}$
\bar{x}	0.079	0.051	-0.052	0.150	-0.033	3.801	\bar{x}	0.036	0.009	-0.045	0.348	0.087	0.805
σ	0.077	0.188	0.082	2.387	2.082	14.42	σ	0.047	0.081	0.078	2.049	2.345	4.355

Sans compensation avec l'observateur du manipulateur							Compensation capteur avec l'observateur du manipulateur						
	e_{a_s}	e_{a_y}	e_{a_z}	$e_{a_{\theta_x}}$	$e_{a_{\theta_y}}$	$e_{a_{\theta_z}}$		e_{a_s}	e_{a_y}	e_{a_z}	$e_{a_{\theta_x}}$	$e_{a_{\theta_y}}$	$e_{a_{\theta_z}}$
\bar{x}	0.018	0.004	-0.002	0.075	-0.152	-0.035	\bar{x}	0.014	-0.004	-0.001	0.038	-0.150	0.051
σ	0.060	0.162	0.073	2.086	2.245	5.982	σ	0.045	0.072	0.063	1.777	1.865	2.493

Sans compensation avec l'observateur du manipulateur et du mobile							Compensation capteur avec l'observateur du manipulateur et du mobile						
	e_{a_s}	e_{a_y}	e_{a_z}	$e_{a_{\theta_x}}$	$e_{a_{\theta_y}}$	$e_{a_{\theta_z}}$		e_{a_s}	e_{a_y}	e_{a_z}	$e_{a_{\theta_x}}$	$e_{a_{\theta_y}}$	$e_{a_{\theta_z}}$
\bar{x}	0.016	-0.001	-0.005	0.022	-0.130	-0.305	\bar{x}	0.021	-0.001	-0.003	0.142	-0.342	-0.046
σ	0.083	0.185	0.079	2.346	2.262	6.404	σ	0.051	0.079	0.073	2.371	2.201	3.434

Compensation modèle						
	e_{a_s}	e_{a_y}	e_{a_z}	$e_{a_{\theta_x}}$	$e_{a_{\theta_y}}$	$e_{a_{\theta_z}}$
\bar{x}	0.047	-0.013	-0.042	0.070	-0.138	0.072
σ	0.045	0.083	0.076	1.628	1.644	2.568

Compensation modèle avec l'observateur du manipulateur						
	e_{a_s}	e_{a_y}	e_{a_z}	$e_{a_{\theta_x}}$	$e_{a_{\theta_y}}$	$e_{a_{\theta_z}}$
\bar{x}	0.011	-0.006	-0.001	-0.101	-0.077	0.184
σ	0.046	0.067	0.059	1.573	1.644	2.167

Compensation modèle avec l'observateur du manipulateur et du mobile						
	e_{a_s}	e_{a_y}	e_{a_z}	$e_{a_{\theta_x}}$	$e_{a_{\theta_y}}$	$e_{a_{\theta_z}}$
\bar{x}	0.014	-0.007	-0.002	0.077	-0.046	-0.066
σ	0.051	0.067	0.064	1.624	1.603	2.092

TABLE 4.13 – Moyenne et écart-type des erreurs à la trajectoire de l'effecteur selon les différentes expérimentations menées avec/sans la compensation/l'observateur du mobile/l'observateur du manipulateur.

trajectoire déjà présentés pour les essais sur la compensation des irrégularités (voir Sec.4.1.2 Fig.4.2) à une vitesse de $0.6m/s$. Toutes les expérimentations avec observateur et présentées dans cette partie, utilisent l'observateur générique. De plus, n'étant pas encore dans le cadre de la coordination, tous les écarts désirés sont fixés à zéro et sont invariants.

Les vidéos associées aux essais présentés ici peuvent être trouvées à l'adresse : <https://nextcloud.inrae.fr/s/Rm5LQH7oGew9qdA>. L'ensemble des erreurs et écarts présentés sont exprimés en m pour les distances et en $^\circ$ pour les rotations.

Au total, neuf expérimentations sont détaillées dans la suite de cette partie. Ces dernières se différencient selon le type de compensation utilisé (capteur ou modèle), si elles utilisent une compensation, si elles utilisent un observateur et sur quelle partie du manipulateur mobile ce dernier est utilisé. L'ensemble des résultats obtenus est présenté dans le tableau Tab.4.13 qui présente les moyennes et écart-types des erreurs de suivi de l'effecteur.

La première série d'expérimentations reportée en Fig.4.20 concerne l'utilisation d'un observateur sur le manipulateur seul, sur le manipulateur et le mobile, ou sans l'utilisation d'un observateur. Dans tous les cas, aucune compensation n'est utilisée. Comme cela avait déjà été remarqué dans la partie consacrée aux observateurs, leur utilisation améliore de façon importante les performances du suivi de trajectoire. L'utilisation d'un observateur seulement sur le bras permet même de meilleurs résultats que l'utilisation de la compensation quel que soit son type (voir données Tab.4.13).

Il est également notable que l'utilisation d'un observateur sur le mobile, en même temps que sur le manipulateur,

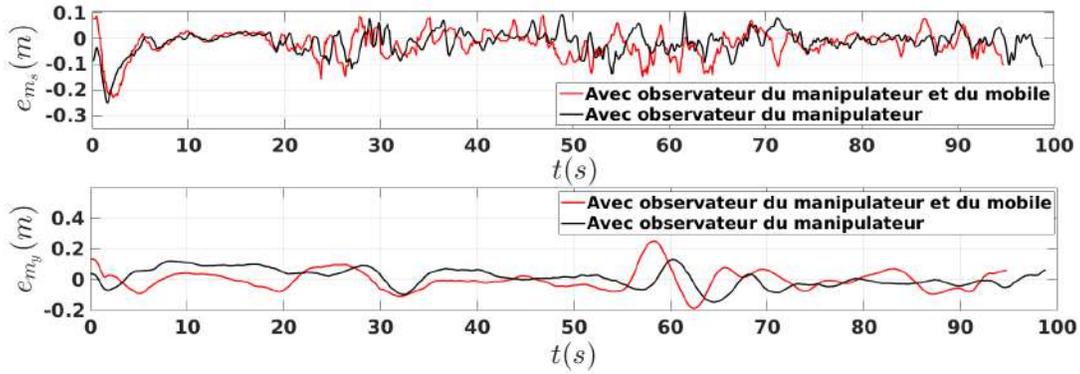


FIGURE 4.19 – Erreurs de suivi de trajectoire du mobile avec et sans l'observateur. Haut : erreur longitudinale. Bas : erreur latérale.

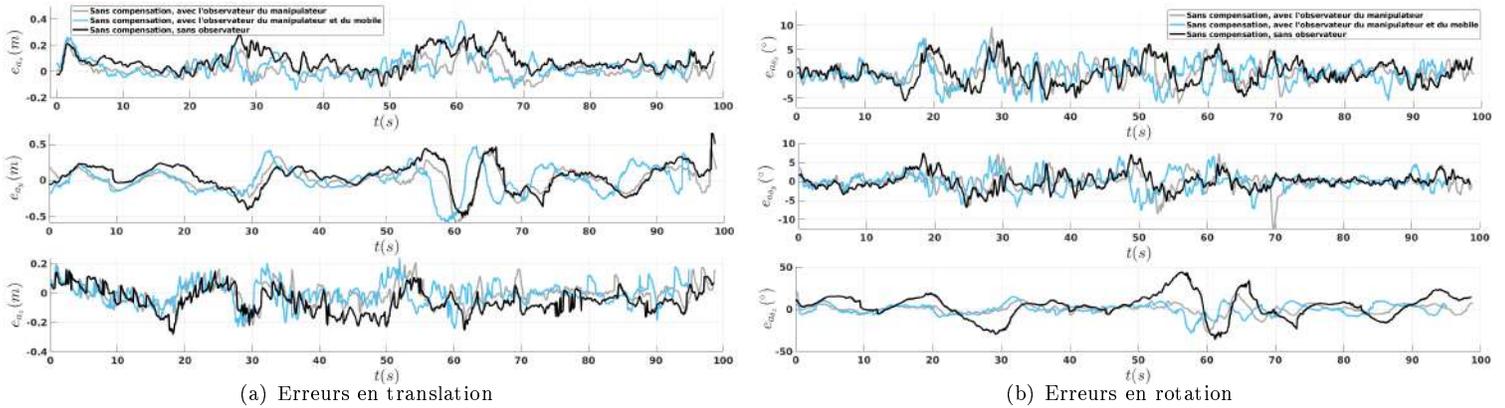


FIGURE 4.20 – Erreurs de l'effecteur par rapport à la trajectoire lors des expérimentations sans ajout de la compensation.

n'a qu'une très faible influence sur les performances de suivi de l'effecteur. Toutefois, cela s'explique par les faibles correctifs qu'induit l'observateur dans ce cas de figure (voir Fig.4.19). En effet, la vitesse est ici réduite par rapport aux expérimentations avec le mobile présentées dans la partie précédente. De plus, le terrain est moins accidenté sur le passage du mobile. En conséquence, ce dernier glisse peu. Cela s'observe sur la figure Fig.4.19 où la différence longitudinale est négligeable et seule une légère amélioration de l'erreur latérale apparaît avec une moyenne passant de 14mm à 1mm. Par ailleurs, la correction de la base mobile n'a pas d'influence directe sur la position de l'effecteur tant que le système n'est pas coordonné²⁴ Les perturbations externes auxquelles est soumise la base mobile ne sont pas les mêmes que celles impactant le manipulateur. Ainsi, même si le mobile était soumis à plus de glissement, il ne serait pas plus impactant tant que la coordination n'est pas réalisée.

Les Fig.4.21 et Fig.4.22 montrent les résultats obtenus en utilisant la compensation capteur ou la compensation par modèle. Dans les deux cas, il s'avère que l'ajout des observateurs permet une amélioration des performances par rapport à la compensation seule. Par ailleurs, l'ajout de l'observation tend à effacer les différences de performance entre les deux types de compensation qui avait été pointées en Sec.4.1.2. Cela est notamment vrai pour les moyennes qui, seules, ne permettent pas de trancher sur un type de compensation ou un autre. En revanche, il apparaît que les écarts-types des deux essais (utilisant un ou deux observateurs) avec la compensation par modèle sont légèrement meilleurs que ceux avec la compensation capteur. Cela peut s'expliquer du fait que la compensation par modèle introduit moins de bruit capteur dans le système, ce qui minimise l'écart-type de l'erreur. De plus, les erreurs engendrées par la compensation modèle (dues au manque d'informations externes) sont compensées par l'ajout de l'observateur qui gère très bien ce genre de biais, contrairement au bruit de mesure.

Cette dernière constatation est visible sur la Fig.4.23 comparant les deux types de compensation avec l'observateur sur le mobile et sur le manipulateur. Enfin, même si l'utilisation des observateurs sans la compensation donne

24. En effet, il n'y a pas de critère qui va contraindre le bras dans une position ou une autre selon les erreurs de position de la base mobile.

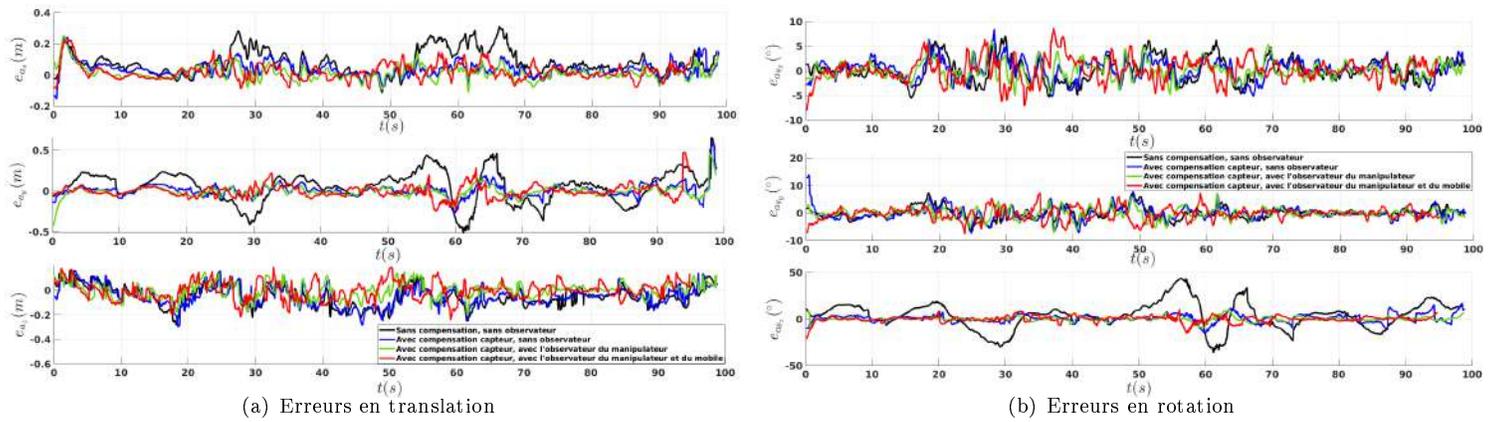


FIGURE 4.21 – Erreurs de l'effecteur par rapport à la trajectoire lors des expérimentations avec la compensation utilisant les données capteurs.

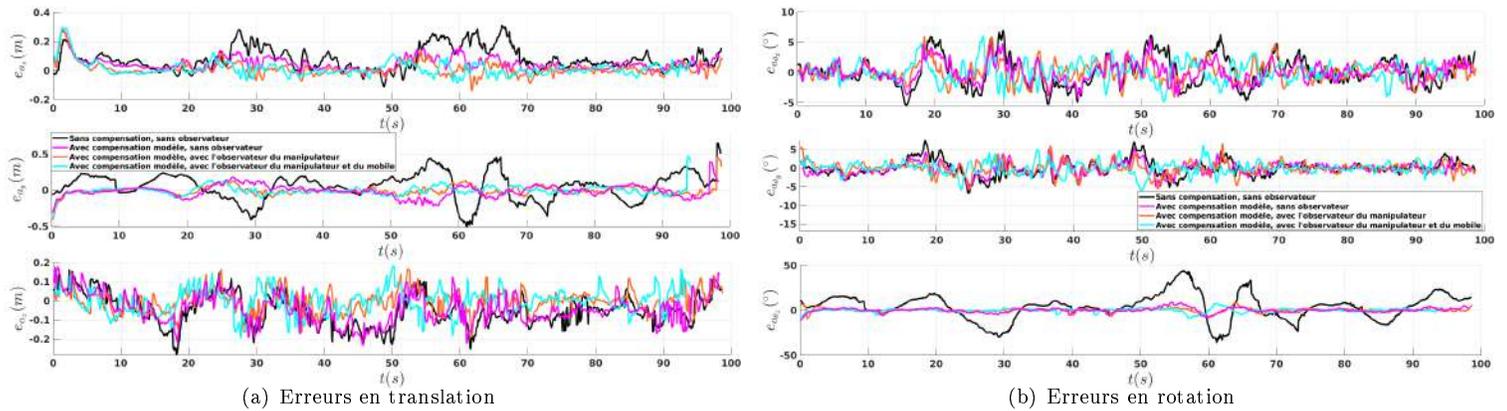


FIGURE 4.22 – Erreurs de l'effecteur par rapport à la trajectoire lors des expérimentations avec la compensation utilisant les données modèles.

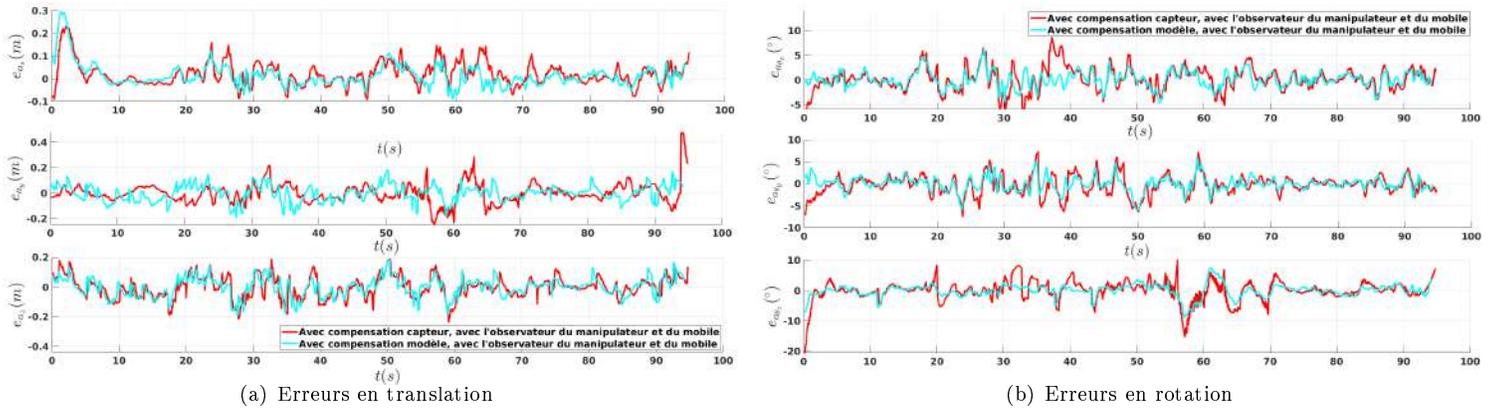


FIGURE 4.23 – Comparaison des erreurs de suivi de l'effecteur avec l'observateur du manipulateur et du mobile selon le type de compensation utilisé : modèle ou capteur.

de très bons résultats, il apparaît que l'utilisation de la compensation offre un gain de performance supplémentaire, notamment au niveau des écarts-types des erreurs. Ce dernier point peut s'expliquer par l'hypothèse de perturbation lentement variable posée lors de la construction des observateurs. De part cette hypothèse, toute la partie statique des perturbations (comme les biais de modèles) sera parfaitement compensée, tandis que plus la fréquence de la perturbation augmente, plus son estimation en sera détériorée. Ainsi, il apparaît que la meilleure combinaison pour le suivi de trajectoire d'un manipulateur mobile en milieu naturel est l'utilisation d'un observateur sur chaque partie de ce dernier, combiné au terme de compensation utilisant les données modèles de chaque sous-partie du système.

4.4 Conclusion

Ce chapitre a délaissé la notion de coordination des manipulateurs mobiles pour se pencher sur l'autre problématique de ces systèmes dans un cadre agricole, la navigation en milieu naturel. Pour ce faire, plusieurs pistes ont été étudiées :

- La première concerne la compensation des mouvements perturbateurs induits sur l'effecteur du manipulateur, que ce soit par le mobile ou des causes externes au système.
- La seconde piste étudiée se consacrait à l'estimation de dérives induites par les perturbations extérieures via la construction d'observateurs.

L'étude du terme de compensation, proposée dans la première partie de ce chapitre, s'est construite autour de deux approches, la première basée sur les données capteurs du système permettant de rejeter toute perturbation mesurée du milieu extérieur ou induite par d'autres sous-systèmes, la seconde utilisant les données modèles des sous-systèmes pour venir compenser les perturbations induites de leur fait sur l'effecteur final du système. Il a finalement été montré que l'utilisation des données modèles possédait un intérêt légèrement supérieur si elle était conjointement utilisée avec un observateur. Cependant, les différences de performance entre les deux méthodes sans observateurs sont à l'avantage de la méthode par capteurs. L'utilisation de la compensation est donc à manier avec soin selon le contexte envisagé, même si dans les deux cas sa pertinence est démontrée par l'expérimentation.

Toutefois, les expérimentations ont également montré que la part des erreurs rejetées par le système est principalement liée à la présence d'observateurs sur les sous-systèmes et surtout sur le manipulateur. Dans ce chapitre, une étude importante a été consacrée à la synthèse et la comparaison d'observateurs de perturbation qui forment les principales contributions de cette partie. Tout d'abord, les observateurs existants dans la littérature scientifique et utilisés dans le cadre d'applications agricoles ont été étendus par la prise en compte du glissement longitudinal selon deux méthodes de construction, la première par backstepping et la seconde par Lyapunov. Puis, une variation de ces observateurs étendus a été proposée pour le mobile skid-steering. Enfin dans un dernier temps, un observateur générique, indépendant du modèle, a été formalisé avec l'avantage de pouvoir s'adapter aussi bien à un modèle de mobile qu'à un autre, mais également à un autre type de robot tel que les manipulateurs.

Par la suite, ces trois observateurs ont été validés et comparés expérimentalement sur trois types de robots mobiles : le skid-steering, la voiture et le mobile à deux trains directeurs. De plus, l'observateur générique a validé sa capacité de versatilité en démontrant sa pertinence sur un bras manipulateur lors d'un suivi de trajectoire. Ces expérimentations ont permis de démontrer l'intérêt des extensions proposées sur la vitesse longitudinale pour l'amélioration du suivi de trajectoire. De plus, elles ont permis de démontrer la versatilité de l'observateur générique sur plusieurs robots, mais surtout de démontrer l'équivalence en termes de performance entre l'observateur générique et ceux dédiés à un modèle. Ceci appuie l'intérêt de l'observateur générique, car son indépendance au modèle ne lui induit pas de baisse de performances par rapport aux autres.

Enfin, il a également été démontré de façon expérimentale la validité des équivalences d'observation et de commande, quel que soit le modèle de robot utilisé par rapport au type de robot réel. De fait, un robot d'un certain type peut être contrôlé par une loi de commande dédiée à un autre modèle de robot, tout en utilisant un modèle d'observation différent sans induire de baisse de performance au sein du suivi de trajectoire. Cette équivalence, tout d'abord démontrée entre les observateurs, a suscité l'idée que les observateurs construits préalablement pouvaient être généralisés sous un observateur générique commun à tous types de robot mobile. Le fait que l'équivalence en terme de commande soit démontrée, pourrait également motiver l'idée, dans de futurs travaux, qu'une commande plus générique des robots mobiles puisse voir le jour.

Dans une dernière partie, il a été montré, également de façon expérimentale, que les propositions faites dans ce chapitre permettaient un véritable gain pour la conduite d'un manipulateur mobile en milieu naturel lors d'un simple suivi de trajectoire non coordonnée. L'objectif du chapitre prochain sera alors de voir comment ces contributions influent sur le schéma de coordination proposé au chapitre 3 dans le cas de la réalisation d'une tâche agricole en milieu naturel.

Chapitre 5

Cas applicatif de coordination d'un manipulateur mobile en environnement naturel : le suivi de structure

SOMMAIRE DU CHAPITRE

5.1	Suivi de structure végétale	176
5.1.1	Présentation de la tâche	176
5.1.2	Suivi de structure en robotique mobile	176
5.1.3	Présentation des scénarios expérimentaux	177
5.1.4	Présentation de la plateforme d'expérimentation	178
5.1.5	Paramètres du manipulateur mobile liés à la tâche	178
5.1.5.1	Critère d'évitement d'obstacle	178
5.1.5.2	Changement de référence	180
5.2	Résultats expérimentaux de suivi de structure	180
5.2.1	Suivi de structure sur sol plat	180
5.2.1.1	Variation de la trajectoire du mobile	180
5.2.1.2	Transition de trajectoire et changement de tâche	182
5.2.1.3	Régulation de l'orientation de l'effecteur en simulation	184
5.2.1.4	Suivi de haie végétale	184
5.2.2	Suivi de structure sur sol irrégulier	186
5.2.3	Suivi de structure rectiligne à $1m/s$	190
5.3	Conclusion	191

Ce dernier chapitre présente l'utilisation des différentes contributions apportées par cette thèse en termes de coordination et de navigation de manipulateur mobile dans le cas applicatif d'une tâche agricole effectuée en milieu naturel. Dans un premier temps, la tâche retenue sera détaillée et la coordination proposée au chapitre 3 sera adaptée à cette dernière. Enfin, plusieurs séries d'expérimentations seront présentées pour plusieurs contextes différents afin de montrer la pertinence des solutions proposées par les travaux de ce mémoire au-delà des essais basiques permettant d'en valider les principes présentés jusqu'ici. Ce chapitre sert donc de conclusion finale à l'ensemble des travaux fournis dans ce mémoire.

5.1 Suivi de structure végétale

5.1.1 Présentation de la tâche

La tâche qui a été retenue est une tâche de suivi de structure végétale pouvant se décliner en différentes utilisations telles que la taille le long d'une haie, la pulvérisation sur un rang de végétation ou encore la surveillance des cultures. Cette tâche a été retenue pour plusieurs raisons :

- Une première raison pratique est que la tâche de suivi de structure exploite des algorithmes de détection de rang de végétation, déjà mis au point et éprouvés au sein de la littérature scientifique PIERRE et al. (2022) et facilement adaptables aux manipulateurs mobiles utilisés ici.
- Une deuxième raison pratique à ce choix est l'absence d'interaction entre l'effecteur et l'objet d'intérêt (contrairement à une tâche de préhension). De fait, cela simplifie les critères de coordination à développer pour la tâche et ne nécessite pas de se pencher sur la question du modèle dynamique du manipulateur. Ainsi, la question de l'interaction du manipulateur au sein du schéma de coordination et, plus généralement, au sein d'un milieu naturel est une large voie de perspectives pour de futurs travaux.
- Enfin, la question de ce genre de tâche dans le milieu agricole est aujourd'hui largement posée à travers des projets concernant la pulvérisation de précision DANTON et al. (2020) ou encore la surveillance de départ de maladie JOUDELAT (2019).

5.1.2 Suivi de structure en robotique mobile

Traditionnellement en robotique, et notamment concernant le domaine agricole, les tâches des robots étaient réalisées grâce à une localisation absolue fournie par un GPS centimétrique CARIOU, LENAIN et al. (2010); LENAIN (2011) et beaucoup d'applications commerciales, spécialement dans les grandes cultures, se basent encore sur ce type de technologie¹. Par ailleurs, de nombreuses recherches vont encore dans ce sens pour l'amélioration de la navigation dans ce paradigme LENAIN, DEREMETZ et al. (2017). Cependant, il s'avère que dans beaucoup de cas où l'environnement est peu structuré ou encombré, l'approche GPS est mise en défaut par une perte de précision pouvant aller de quelques centimètres à plusieurs mètres. Ainsi, ces approches ne sont pas applicables dans les vergers, forêts, aux abords des haies ou des bâtiments agricoles KOS, MARKEZIC et POKRAJIC (2010). De même, dès que le système est sous un bâtiment, la précision est perdue. Ceci pose alors de nombreux problèmes, notamment dans les bâtiments d'élevage où d'autres types de localisation doivent être envisagés. Par ailleurs, dans le cas d'une végétation changeante, la trajectoire GPS créée à un instant donné peut se retrouver inutilisable plus tard.

Afin de résoudre cette problématique, la question de la navigation relative à une structure proche est de plus en plus étudiée dans les travaux de recherche en robotique de manière générale. Pour cela des approches basées sur la vision artificielle CHERUBINI et François CHAUMETTE (2013), sur la reconstruction par SLAM visuelle LEMAIRE et al. (2007), sur le Lidar BAYAR, BERGERMAN, A Bugra KOKU et al. (2015) ou sur la combinaison Lidar-Caméra ÅSTRAND et BAERVELDT (2005); MOGHADAM, WIJESOMA et FENG (2008) ont été développées. Cependant, en milieu extérieur, l'utilisation de caméras se révèle délicate à cause des variations de luminosité et les approches Lidar sont préférées pour leur robustesse. Plusieurs algorithmes ont été développés dans ce sens, basés sur le SLAM Lidar TREHARD et al. (2014) ou des grilles d'occupation MORAS, CHERFAOUI et BONNIFAIT (2011). Cependant, de telles approches nécessitent la présence de repères (ou amers) souvent bien visibles en milieu urbain CHONG et al. (2013), or la végétation changeante des milieux naturels rend plus difficile cette approche. Par ailleurs, elle nécessite souvent d'importants coûts de calcul et de place en mémoire pour former la carte et la maintenir à jour.

D'autres approches, développées au sein de l'équipe ROMEA, se réfèrent grâce à des données capteur relativement à une structure proche sans maintenir de carte globale de leur environnement. C'est le cas de TOURRETTE et al. (2017) utilisant un Lidar pour suivre une planche de maraîchage en détectant les passages de roues plus enfoncés au niveau du sol. Sur le même principe IBERRAKEN et al. (2022) propose la navigation dans les vignes en venant détecter et suivre les rangs grâce à un Lidar incliné, situé au-dessus de la végétation. Dans DEREMETZ et al. (2019), une structure végétale est suivie latéralement grâce à la reconstruction Lidar de son profil et une loi

1. Voir chapitre 1

de commande par backstepping. Cette approche de suivi a ensuite été améliorée en lui ajoutant une composante prédictive permettant d'ajuster l'écart latéral désiré PICARD et al. (2020). De même, l'ajout d'un second Lidar DANTON et al. (2020) ou d'un miroir rotatif déviant une partie des rayons CARIOU, ROUX et LENAIN (2021) permet la détection de la densité de la structure végétale suivie afin de réguler la pulvérisation suivant les besoins en synchronisant la conduite du mobile avec le pilotage du pulvérisateur. Plus récemment, PIERRE et al. (2022) propose une stratégie de sélection d'approches en fonction du contexte de travail. Ainsi, selon la présence de structure ou non, le robot est capable de changer de comportement entre le suivi de trajectoire GPS préalablement enregistrée, le suivi de structure latérale et le suivi de structure au sol (dans ce cas, les rangs de végétation d'une planche de maraîchage). Par ailleurs, dans ce dernier cas, l'approche de suivi de structure latérale DEREMETZ et al. (2019) est améliorée par l'utilisation de cercles venant épouser la forme de la structure.

Les expérimentations proposées dans ce chapitre s'inscrivent dans ces dernières approches et se basent sur la méthode de suivi de structure latérale proposée dans PIERRE et al. (2022) adaptée à deux Lidar pour le suivi de structure.

5.1.3 Présentation des scénarios expérimentaux

Plusieurs scénarios différents sont envisagés par rapport à la tâche de suivi de structure (voir Fig.5.1). Dans chacun d'entre eux, l'objectif est de suivre le profil de la structure à une distance de 30cm de cette dernière et à une hauteur fixe de 1.2m. Par ailleurs, le point de contrôle du mobile est contraint à rester au delà d'une distance limite de 0.8m de la structure. Le profil est issu de la reconstruction obtenue par les Lidars et sera donné comme la trajectoire de référence du manipulateur dans le schéma de coordination. De plus, l'orientation de l'effecteur est régulée pour que l'outil reste en permanence face à la structure.

Dans le scénario n°1, la trajectoire du mobile est une référence droite similaire à ce qui avait été présenté dans les essais du chapitre 3. Dans le scénario n°2, la référence du mobile est donnée comme la référence du manipulateur projetée sur le sol². Ces deux premiers scénarios permettront de discuter de l'importance du choix de la trajectoire de référence du mobile dans un cas concret (similairement à ce qui avait été fait dans le chapitre 3 dans un cas canonique simulé).

Le troisième scénario est une variation du premier avec l'utilisation supplémentaire d'une caméra 3D sur l'effecteur permettant de détecter l'orientation relative de la structure pour garantir de conserver l'effecteur face à cette dernière. Ce genre de scénario est tout à fait pertinent dans le cadre de la pulvérisation de précision dans un environnement escarpé où les angles de roulis du mobile peuvent impacter l'orientation de l'outil. Dans ce but, un algorithme a été développé pour estimer le plan de la structure en se basant sur les nuages de point 3D recoupés avec les données Lidar et la centrale inertielle du mobile. Cependant, par manque de temps permettant de rendre robuste la détection caméra dans un environnement naturel, seules des simulations de principe seront proposées pour ce scénario.

Les scénarios n°4 et n°5 sont des variations des deux premiers en ajoutant un changement de référence avant la structure. Dans ces deux cas, le système commence un suivi de trajectoire droite enregistrée par GPS, sans régulation de l'orientation. Lorsque les Lidars détectent la structure végétale, la référence du manipulateur change pour réaliser la tâche de suivi de structure et la tâche d'orientation de l'effecteur est ajoutée dans la coordination. Ces scénarios ont pour idée de simuler la tâche d'un système qui arriverait dans son rang par GPS et réaliserait la tâche en utilisant la structure végétale.

Afin de pouvoir offrir un comparatif entre les différents résultats, la notion d'erreur à l'objectif, notée o , sera utilisée tout au long de ce chapitre. Cette dernière est différente des erreurs de régulation, car elle représente l'erreur entre la position courante de l'effecteur et le point objectif se déplaçant le long de la trajectoire. Ainsi, même si les erreurs de régulation sont nulles car le sous-système régule très bien sur ces écarts désirés, il se peut que ces derniers déplacent le système loin de l'objectif selon les critères et le contexte. Cette erreur permettra ainsi de qualifier les performances de la coordination.

Selon les différentes expérimentations, plusieurs contextes ont été mis en place avec des formes de structure et

2. Ceci ne pose pas de problème tant que la structure est continue avec des courbures peu importantes. Ceci n'est pas restrictif car en environnement agricole, ces genres de structures sont souvent droites ou ne possèdent pas de variations brusques.

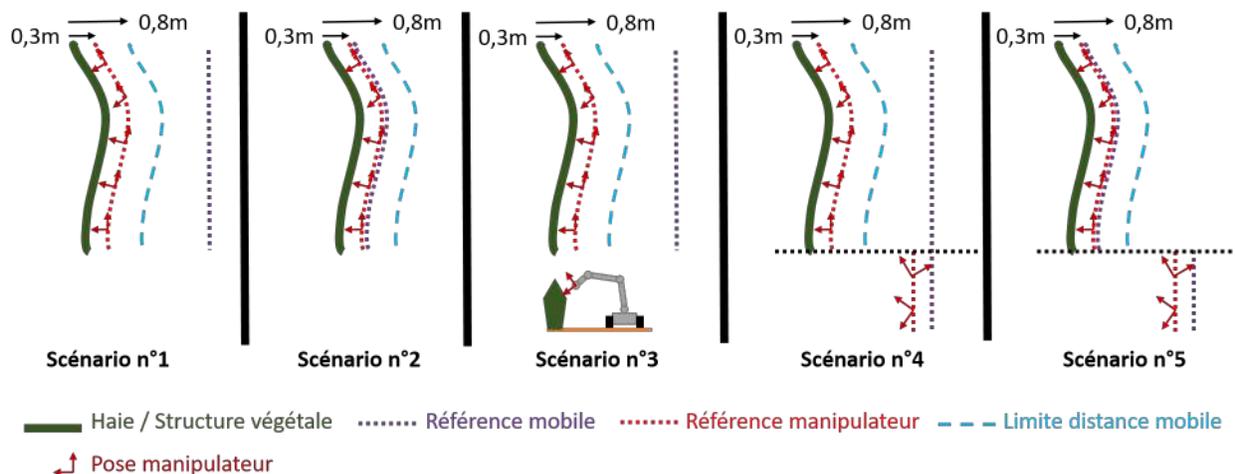


FIGURE 5.1 – Scénarios expérimentaux proposés sur la tâche applicative de suivi de structure.

des vitesses d'avance différentes. Ces dernières sont données sur la figure Fig.5.2. Afin de simplifier la mise en place des expérimentations selon les différentes formes de structures souhaitées, elles ont été menées en plantant une haie artificielle alignée sur une rangée de poteaux plantés dans le sol. Une expérimentation sera néanmoins proposée sur le suivi d'une haie naturelle Fig.5.2(b). Cependant, cette dernière étant parfaitement rectiligne sur sol plat, son intérêt en dehors de la démonstration de fonctionnement est limité.

Parmi ces différentes expérimentations, plusieurs d'entre elles seront menées à vitesse basse et d'autres à vitesse plus élevée ($> 0.8m/s$). Concernant les essais à vitesse plus élevée, une mécanique est ajoutée au point objectif : lorsque ce dernier s'éloigne de plus de $0.5m$ de l'effecteur, le point est ralenti jusqu'à un minimum de $0.1m/s$. Ceci permet, notamment lors du démarrage, que le point objectif ne prenne pas trop d'avance, ce qui engendrerait alors d'importantes commandes envoyées au mobile pour le rattraper. Cela permet d'avoir une commande plus souple jusqu'à ce que le système ait atteint sa vitesse de croisière.

5.1.4 Présentation de la plateforme d'expérimentation

Ces essais se dérouleront sur le manipulateur mobile MM1 déjà rencontré dans les chapitres précédents. Par ailleurs, pour réaliser le suivi de structure, le système (voir Fig.5.3) sera équipé de deux Lidar Sick, à chaque coin du mobile à une hauteur d'environ $30cm$ du sol. De plus, le système est équipé d'une caméra 3D RealSense permettant de venir détecter l'orientation relative de la structure pour contraindre l'effecteur à la suivre.

5.1.5 Paramètres du manipulateur mobile liés à la tâche

Pour réaliser les différents scénarios présentés, le schéma de coordination donné au chapitre 3 doit évoluer, notamment sur les tâches à remplir. L'ensemble des tâches minimales concernant le maintien de la manipulabilité, les limites articulaires et la distance à l'objectif est conservé. Par ailleurs, les tâches de limite d'exploration du mobile et d'extension maximale du manipulateur sont conservées pour les raisons évoquées en Sec.3.3.2.4. Enfin, la tâche de minimisation de l'écart angulaire déjà présentée Sec.3.3.2.3 est ajoutée afin de réguler l'orientation de l'effecteur.

5.1.5.1 Critère d'évitement d'obstacle

Une dernière tâche d'évitement d'obstacle pour le mobile est ajoutée pour limiter la distance du mobile à la haie à $80cm$. Le critère d'évitement de la structure utilisé dans ces expérimentations est très simple³. Il se base sur la

3. Ce critère a été créé de manière à obtenir un algorithme fonctionnel de façon rapide. Cependant la création d'un critère plus pertinent, notamment à base de boîte englobante, pour l'évitement de collision pour le manipulateur fait partie des perspectives de ces travaux de thèse.

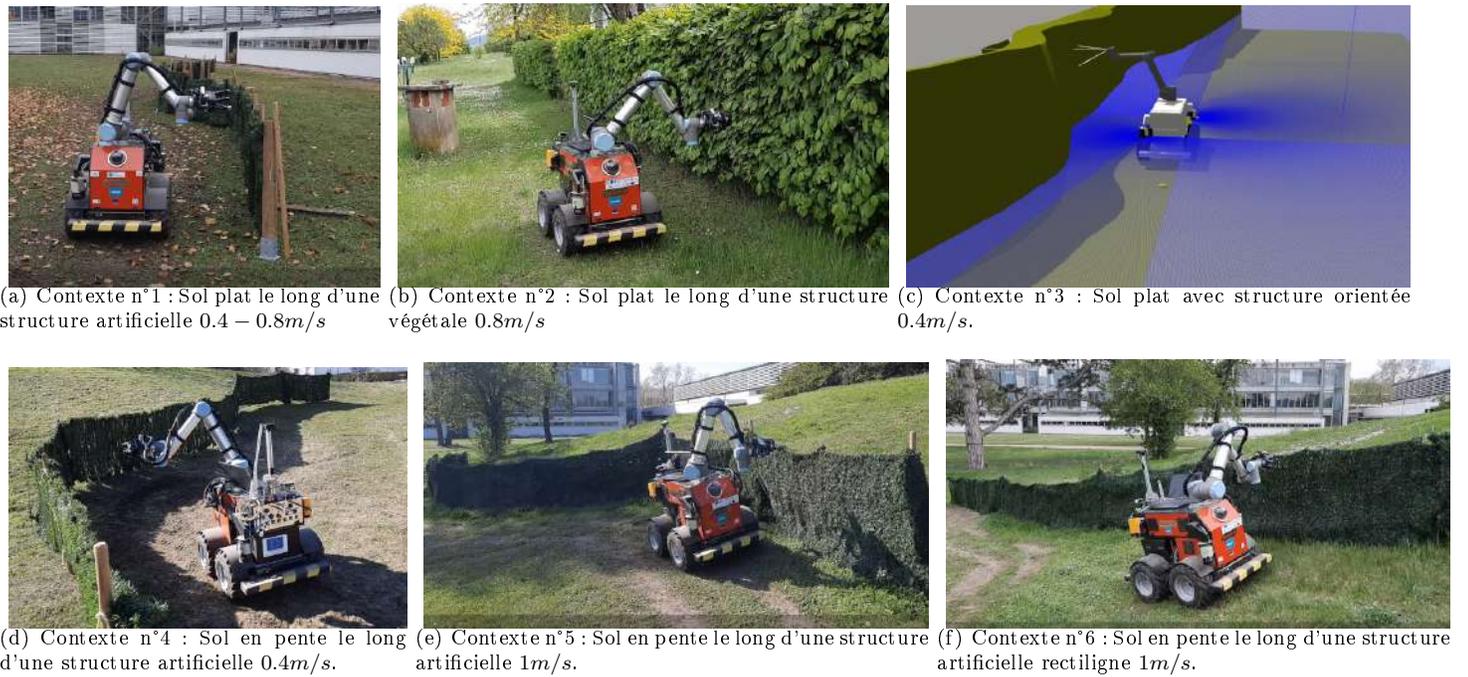


FIGURE 5.2 – Contexte de suivi de structure.

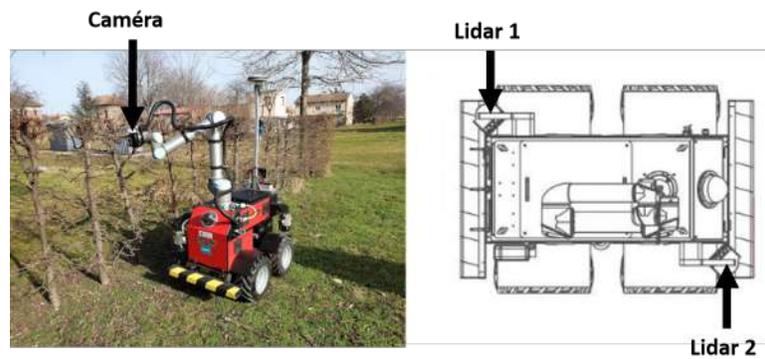


FIGURE 5.3 – Plateforme utilisée lors des expérimentations de suivi de structure.

minimisation d'un critère exponentiel écrit sous la forme :

$$e^{-d_1(\|\overline{MS}\|-d_2)}. \quad (5.1)$$

d_1 est un paramètre de pente choisi empiriquement tel que $d_1 = -30$ pour ces expérimentations. d_2 représente la limite de distance à ne pas dépasser et au-delà de laquelle le critère prend le pas sur les autres. M est le point de contrôle du mobile et S un point sur le profil de la structure avancé d'une certaine distance d_3 par rapport au point le plus proche du mobile sur le profil de la structure. De fait, la tâche étant à vitesse constante, regarder la distance avec un peu d'avance sur le profil de la structure permet d'anticiper sa courbure à droite ou à gauche pour faciliter la mobilité du mobile⁴. Empiriquement, la distance d_3 est estimée à 1.5m.

5.1.5.2 Changement de référence

Un point intéressant montré lors de ces expérimentations est le changement de référence du manipulateur durant la tâche symbolisant le changement d'objectif (scénarios n°4 et n°5 (voir Fig.5.1)). Les essais présentés jusqu'ici montraient la capacité de l'approche à prendre en compte un ou plusieurs critères. Ce qui est proposé ici montre la capacité de l'approche à changer de tâche à la volée en fonction du contexte. Ainsi, la tâche première est un suivi de trajectoire GPS sans régulation de l'orientation de l'effecteur pour une manipulabilité optimale lors du déplacement. Lorsque la structure est détectée, la tâche change. La référence du manipulateur est donc modifiée pour correspondre à la nouvelle tâche tandis que la tâche d'orientation est ajoutée à la volée. Il y a donc une reconfiguration du manipulateur mobile pour correspondre à ces nouvelles contraintes et répondre à son objectif en suivant la structure.

5.2 Résultats expérimentaux de suivi de structure

Les expérimentations présentées ci-dessous sont divisées en deux parties, la première sur sol plat et la seconde sur un sol en pente (voir Fig.5.2). Dans la première partie, l'accent est porté sur l'aspect de la coordination. La question de la navigation avec les observateurs et la compensation sera abordée dans la seconde partie.

Les vidéos associées aux essais présentés ici peuvent être trouvées à l'adresse : <https://nextcloud.inrae.fr/s/Rm5LQH7oGew9qdA>. L'ensemble des erreurs et écarts présentés sont exprimés en m pour les distances et en $^\circ$ pour les rotations.

5.2.1 Suivi de structure sur sol plat

5.2.1.1 Variation de la trajectoire du mobile

La première série d'expérimentations⁵ étudiée a trait à l'influence de la trajectoire de référence du mobile sur les résultats de la coordination. De fait, au chapitre 3 une première simulation avait montré que selon le choix de la trajectoire de référence du mobile, les performances de la coordination étaient modifiées. Pour mettre en évidence ce constat expérimentalement, deux scénarios sont proposés dans cette partie, le n°1 et le n°2 (voir Fig.5.1) dans le contexte expérimental n°1 (voir Fig.5.2(a)). Dans le premier cas, la référence du mobile est une trajectoire droite. Dans le second cas, la référence du mobile est prise suivant la référence du manipulateur projetée au sol. Ainsi, dans le second scénario la trajectoire de référence suit le profil de la structure et permet de mieux anticiper les variations de cette dernière dans la commande du mobile.

Par ailleurs, afin d'offrir un comparatif pertinent tout en démontrant l'intérêt de la coordination, deux expérimentations sans coordination avec suivi de trajectoire et écarts fixes seront proposées selon deux configurations d'écarts différents (voir Tab.5.1).

4. Ceci est notamment vrai pour un virage serré, afin que le mobile puisse l'anticiper et tourner en douceur au lieu de freiner brutalement et de tourner sur place.

5. Dans ce premier cas d'étude, la vitesse désirée le long de l'abscisse curviligne est de $0.4m/s$.

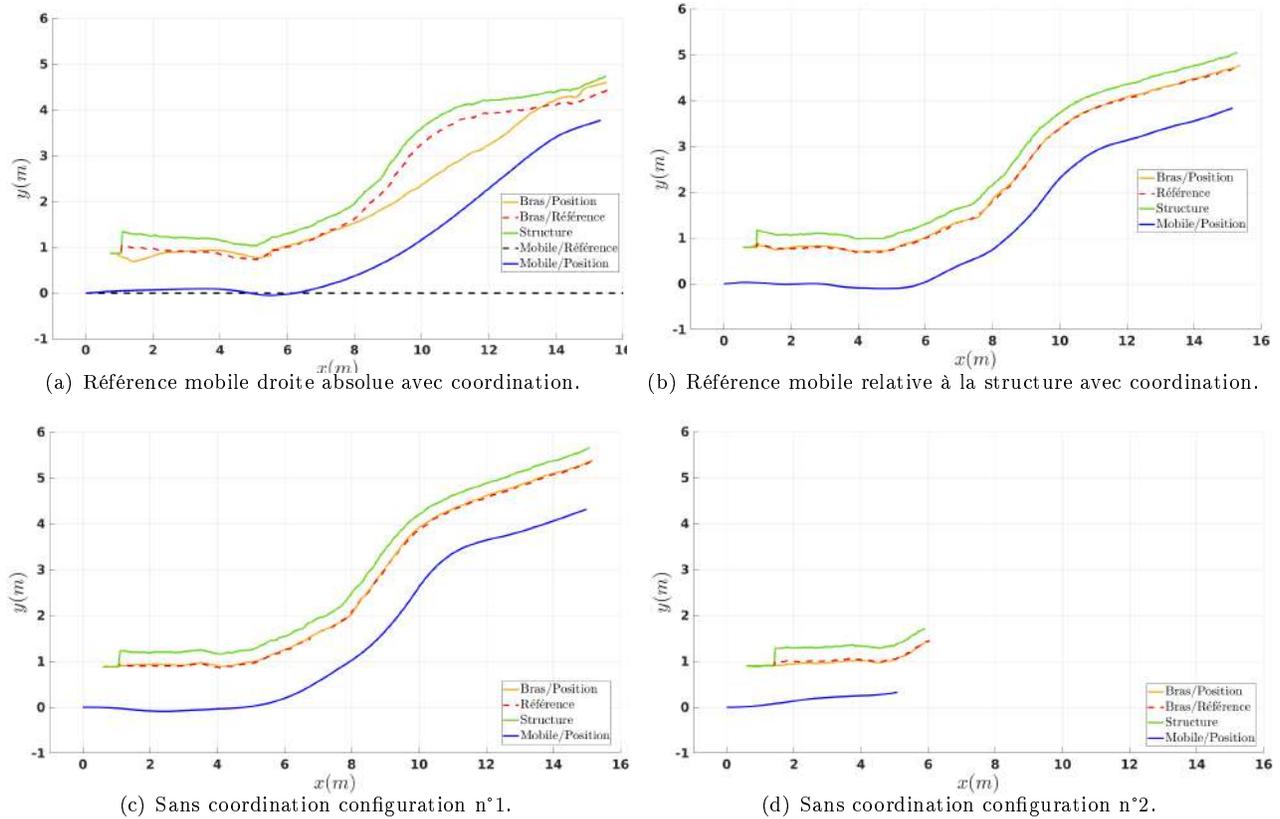


FIGURE 5.4 – Position du mobile et de l'effecteur par rapport à leur référence et la structure de référence lors de la tâche de suivi.

/	Manipulateur						Mobile		
	$\varepsilon_{a_s}^d (m)$	$\varepsilon_{a_y}^d (m)$	$\varepsilon_{a_z}^d (m)$	$\varepsilon_{a_{\theta_x}}^d (^\circ)$	$\varepsilon_{a_{\theta_y}}^d (^\circ)$	$\varepsilon_{a_{\theta_z}}^d (^\circ)$	$\varepsilon_{m_s}^d (m)$	$\varepsilon_{m_y}^d (m)$	$\varepsilon_{m\theta}^d (^\circ)$
Configuration n°1	0	0	0	90	0	-70	1.2	-0.8	0
Configuration n°2	0	0	0	90	0	-70	0.5	-1	0

TABLE 5.1 – Configuration des écarts désirés fixes des sous-systèmes lors des essais sans coordination

Les positions de l'effecteur et du mobile par rapport à la structure durant ces quatre expérimentations sont données en Fig.5.4. Sur cette dernière, l'expérimentation sans la coordination en configuration n°2 n'est pas complète car le système est tombé en singularité avant la fin de la tâche (voir la manipulabilité sur Fig.5.6). De fait, la seconde configuration d'écarts n'est pas adaptée pour remplir l'objectif tandis, que la première y arrive sans difficulté. Par ailleurs, sur la figure Fig.5.4, le constat concernant l'influence de la trajectoire de référence du mobile est démontré de façon expérimentale. Dans le cas où la référence est le profil de la structure, les performances sont bien meilleures que dans le cas où la référence est une trajectoire droite. Ceci est également montré sur la figure Fig.5.5 où il apparaît de très importantes erreurs par rapport au point objectif avec la trajectoire droite. Ainsi, cette expérimentation démontre de façon concrète l'importance du choix de la trajectoire de référence des sous-systèmes pour le fonctionnement global du robot.

La figure Fig.5.5 montre également que l'essai avec la coordination relative et l'essai sans coordination de configuration n°1 ont des performances similaires, voire de meilleures performances pour l'essai sans coordination, notamment pour l'écart longitudinal et l'écart angulaire ε_{a_y} de l'effecteur. Ce même constat est appuyé par la figure Fig.5.6 où la manipulabilité du bras pour l'essai sans coordination est meilleure que celle avec la coordination. Ainsi dans ce cas, un simple suivi bi-trajectoires avec écart fixe montre de meilleurs résultats qu'un essai coordonné avec écart variable.

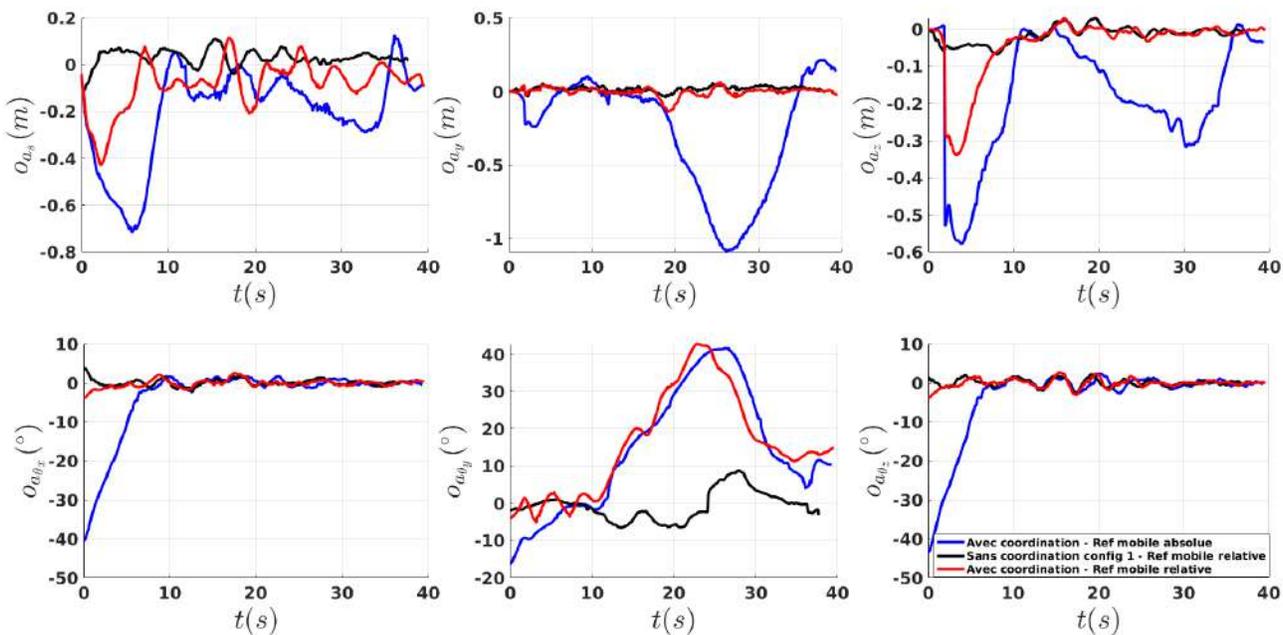


FIGURE 5.5 – Erreur à l'objectif de l'effecteur lors du suivi de structure selon la coordination et la trajectoire de référence du mobile.

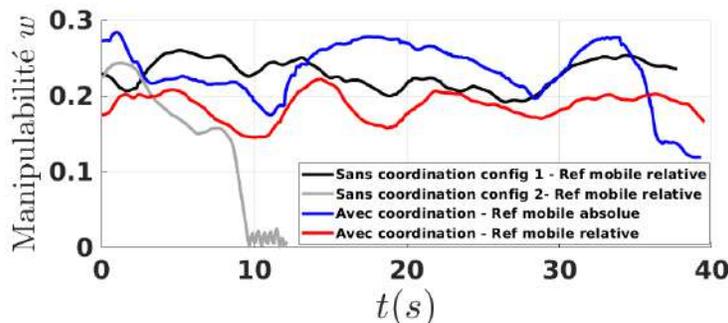


FIGURE 5.6 – Manipulabilité du manipulateur lors du suivi de structure selon la coordination et la trajectoire de référence du mobile.

Toutefois, les choix des configurations sans coordination ne sont pas arbitraires et ont été construits spécifiquement pour que l'un tombe en défaut et que l'autre soit optimal grâce à l'expérience empirique obtenue par la totalité des essais menés pendant ces travaux. Ce choix a été fait afin de montrer l'importance de pouvoir faire varier les écarts durant la réalisation de la tâche si la connaissance fournie par l'expérience n'existe pas. En environnement naturel, les profils de structure sont différents et peuvent varier le long de celle-ci, d'autant que les plateformes utilisées peuvent être différentes d'une fois sur l'autre. L'expérience empirique permettant de trouver les bons écarts dans tous les cas n'est donc pas aisée à obtenir et rien ne garantirait que ces écarts ne mènent pas à la situation de la configuration n°2. C'est donc ici toute la force de l'approche proposée, être capable de s'adapter en temps réel selon le profil à suivre et la plate-forme pour trouver des écarts permettant de réaliser la tâche même si ces derniers sont sous-optimaux. Concernant cette sous-optimalité, le cas de l'optimisation de la fonction de coordination a largement été abordée au chapitre 3, pour conclure qu'il est possible d'utiliser d'autres algorithmes plus performants permettant de se rapprocher des performances obtenues avec l'essai non coordonné.

5.2.1.2 Transition de trajectoire et changement de tâche

La seconde série d'expérimentations concerne la transition de trajectoire de référence et le changement de tâche, elles sont abordées par les scénarios n°4 et n°5 (voir Fig.5.1) dans le contexte expérimental n°1 (voir Fig.5.2(a)). Dans ce cas, l'effecteur commence un suivi de trajectoire en dehors de la structure avec pour seul objectif de rester

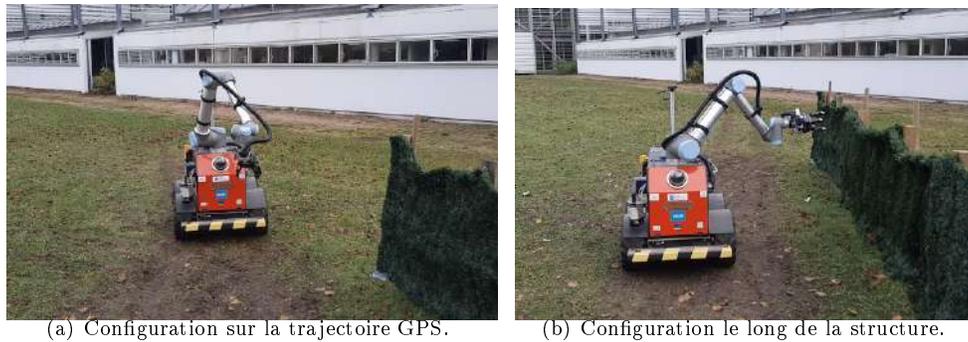


FIGURE 5.7 – Configuration du système lors de l'expérimentation avec le changement de référence et de tâche.

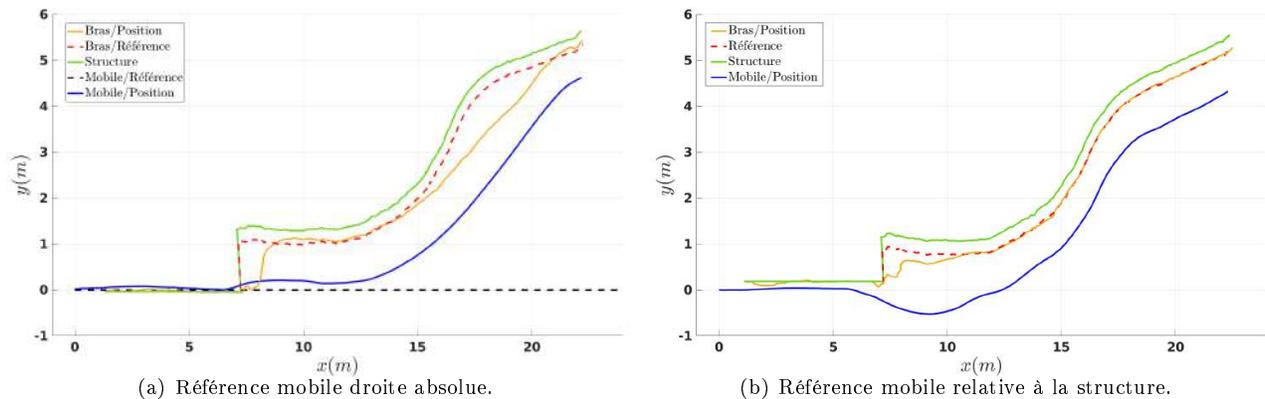


FIGURE 5.8 – Position du mobile et de l'effecteur par rapport à leurs références et la structure de référence lors de la tâche de suivi avec le changement de référence et de tâche.

proche de la trajectoire en maintenant sa manipulabilité. L'orientation est laissée libre au coordinateur. Lorsque les Lidars détectent la structure, le basculement est automatiquement réalisé sur le suivi de cette dernière, la trajectoire de référence de l'effecteur passe donc d'une trajectoire droite dans le repère absolu à une trajectoire relative à la structure. Par ailleurs, à cet instant, l'orientation de l'effecteur est régulée pour faire face au profil et se maintenir dans cette position. Au moment de la transition, le système doit donc se reconfigurer pour réaliser la nouvelle tâche qui lui est assignée (voir Fig.5.7). Comme précédemment, deux essais sont faits, l'un avec une trajectoire de référence fixe pour le mobile et l'autre avec une trajectoire de référence suivant le profil de la structure.

Les résultats de ces essais sont donnés en Fig.5.8 et Fig.5.9. Sur ces derniers, comme précédemment, l'essai avec les meilleures performances est celui usant de la référence variable pour le mobile. Par ailleurs, la figure Fig.5.9 montre une dégradation notable de la distance à l'objectif au moment de la transition de la trajectoire GPS à la structure. Cela s'explique par le décalage du point objectif depuis la référence absolue vers le profil de la structure et se remarque également sur la figure Fig.5.8. Toutefois, la manipulabilité ne souffre d'aucune discontinuité où brusque variation pouvant engendrer une singularité sur le système à ce moment. L'effecteur converge donc doucement vers le point objectif sans dégrader ce critère de sécurité.

Enfin la figure Fig.5.10 montre la régulation des écarts angulaires du système. Comme indiqué, avant la transition, ils sont laissés variables au gré du coordinateur et des besoins pour une bonne manipulabilité tandis qu'après la transition les trois écarts désirés sont fixés par rapport à la structure et le système s'efforce de faire converger leurs erreurs à zéro. On remarque alors que cette contrainte supplémentaire tend à faire baisser la manipulabilité globale du manipulateur, faute à ces degrés de liberté perdus, désormais associés à une nouvelle tâche (voir la manipulabilité Fig.5.9).

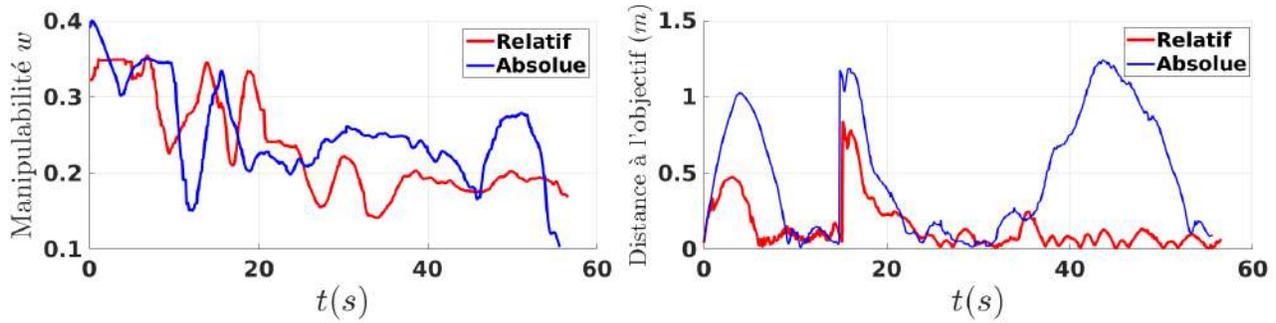


FIGURE 5.9 – Manipulabilité du manipulateur et distance à l'objectif lors de la tâche de suivi avec le changement de référence et de tâche selon la trajectoire de référence du mobile.

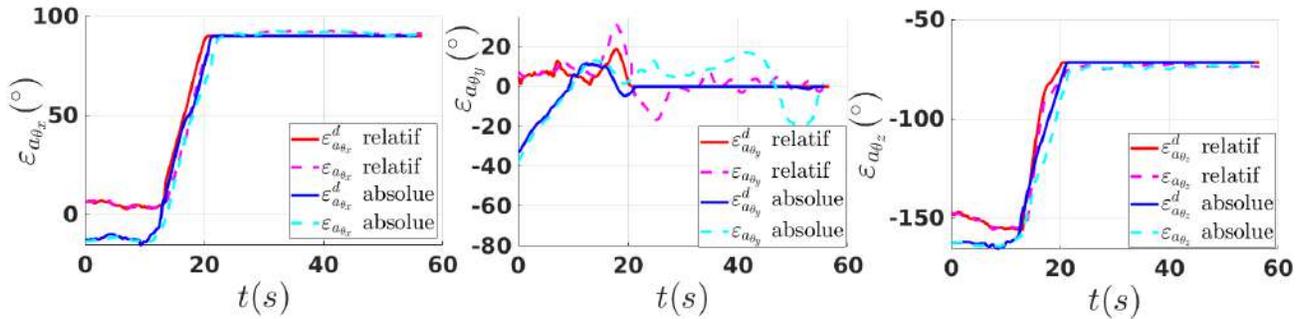


FIGURE 5.10 – Erreurs angulaires de l'effecteur lors de la tâche de suivi avec le changement de référence et de tâche selon la trajectoire de référence du mobile.

5.2.1.3 Régulation de l'orientation de l'effecteur en simulation

Ce troisième cas est le seul cas simulé présenté dans cette partie. Il s'agit de l'application du scénario n°3 (voir Fig.5.1) dans le contexte expérimental n°3 (voir Fig.5.2(c)). L'objectif ici est de proposer la régulation de l'effecteur selon l'orientation relative de la structure grâce à une caméra embarquée sur l'effecteur du système.

Les résultats de la simulation sont donnés en figure Fig.5.11 en effectuant une transition de référence comme dans les expérimentations précédentes. La figure 5.12(a) montre de très bons résultats sur le suivi de l'objectif sur tout le profil de la structure. La figure Fig.5.12(b) présente l'écart angulaire ε_{a_y} de l'effecteur et son erreur de régulation lors de la tâche de suivi. Sur cette même figure, l'écart angulaire désiré $\varepsilon_{a_y}^d$ représente exactement les mêmes variations angulaires que celles de la structure. Ainsi cette figure démontre le fonctionnement du système en asservissant son orientation à un capteur tout en réussissant la coordination du système.

5.2.1.4 Suivi de haie végétale

La dernière expérimentation sur sol plat présentée ici utilise le scénario n°2 (voir Fig.5.1) dans le contexte expérimental n°2 (voir Fig.5.2(b)) à $0.8m/s$. Dans ce cas de figure, le robot doit suivre une haie végétale rectiligne. Cet essai expérimental est très similaire à ce qui a été vu précédemment avec la facilité supplémentaire due à la rectitude de la structure végétale.

Les résultats de l'expérimentation sont donnés sur les figures Fig.5.13, Fig.5.14 et Fig.5.15. Ces dernières permettent de démontrer le fonctionnement de l'approche dans le cas réel d'un suivi de structure végétale. En effet, les performances observées, notamment sur les figures Fig.5.14 et Fig.5.15(b) sont similaires à celles déjà observées le long de la structure artificielle lors des autres essais, malgré le fait que la structure soit moins régulière. Ceci montre la robustesse des algorithmes de suivi utilisés ici et de leur application pour la coordination de manipulateur mobile.

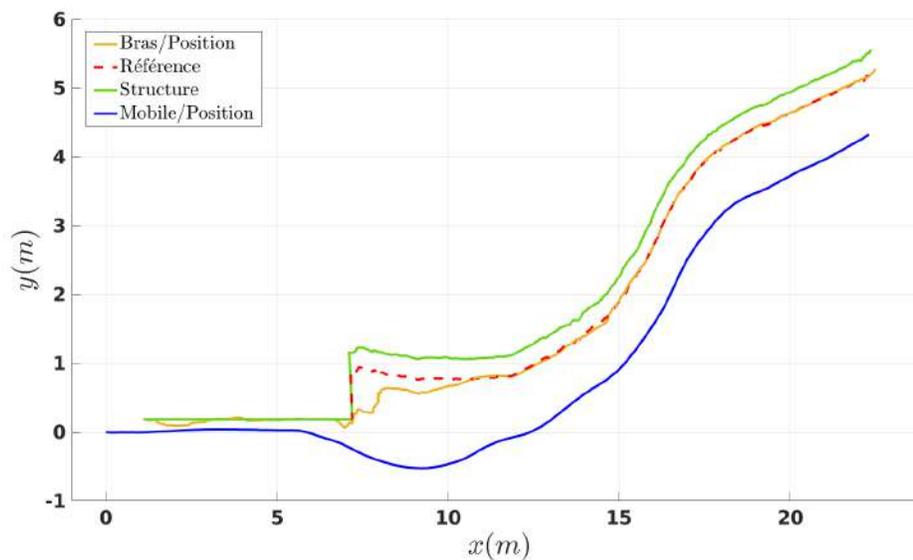


FIGURE 5.11 – Position de l'effecteur et du mobile lors de la simulation du suivi de structure avec l'orientation de l'angle de l'effecteur parallèle à la face de la structure suivie.

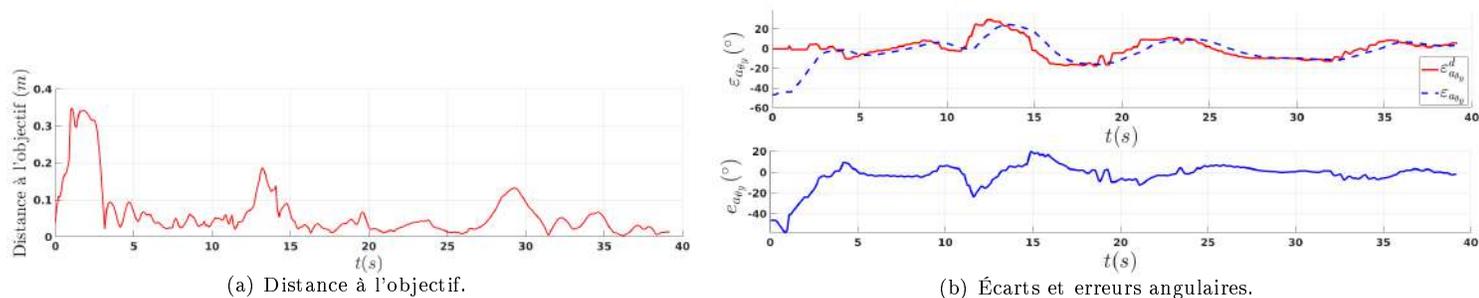


FIGURE 5.12 – Distance à l'objectif et écarts angulaires de l'effecteur par rapport à l'orientation de la face de la structure suivie.

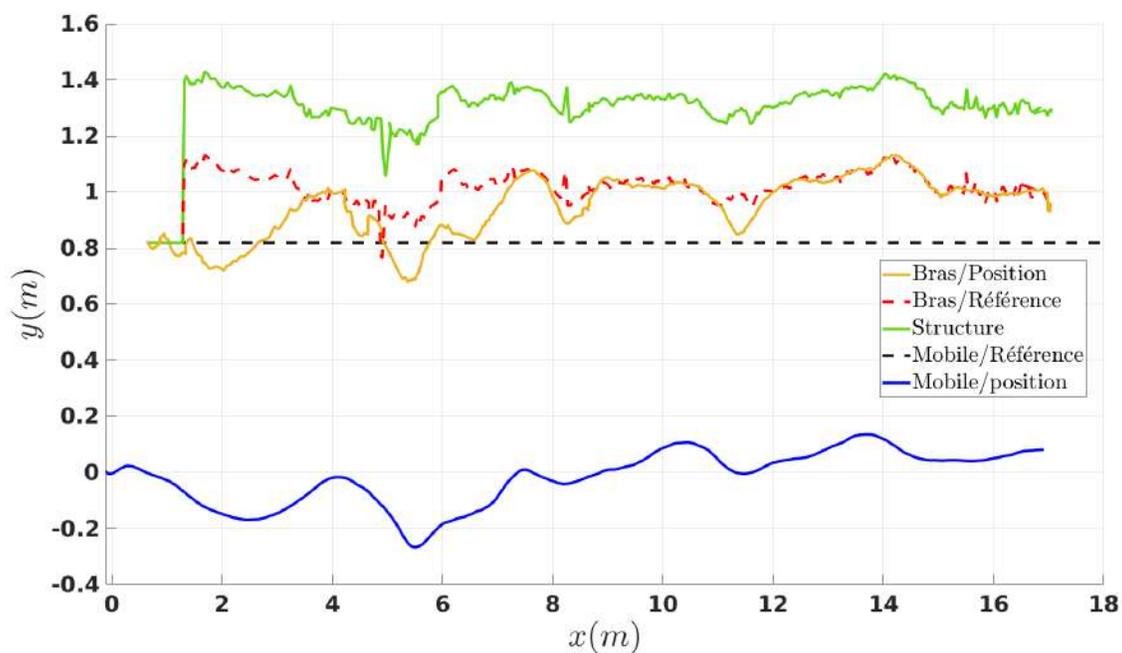


FIGURE 5.13 – Position du mobile et de l'effecteur lors du suivi de la haie végétale.

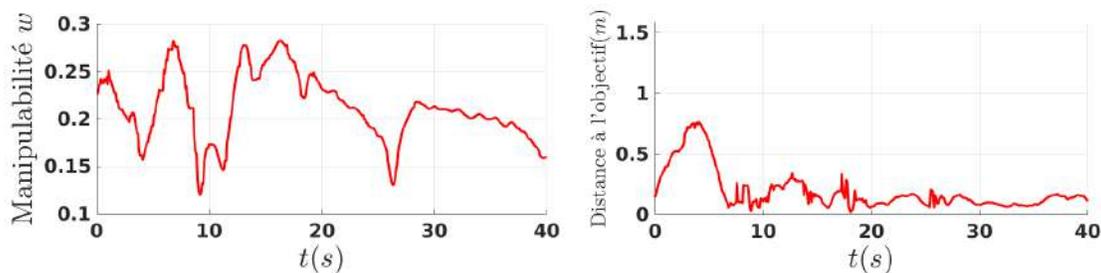


FIGURE 5.14 – Distance à l'objectif de l'effecteur lors du suivi de structure le long d'une haie végétale.

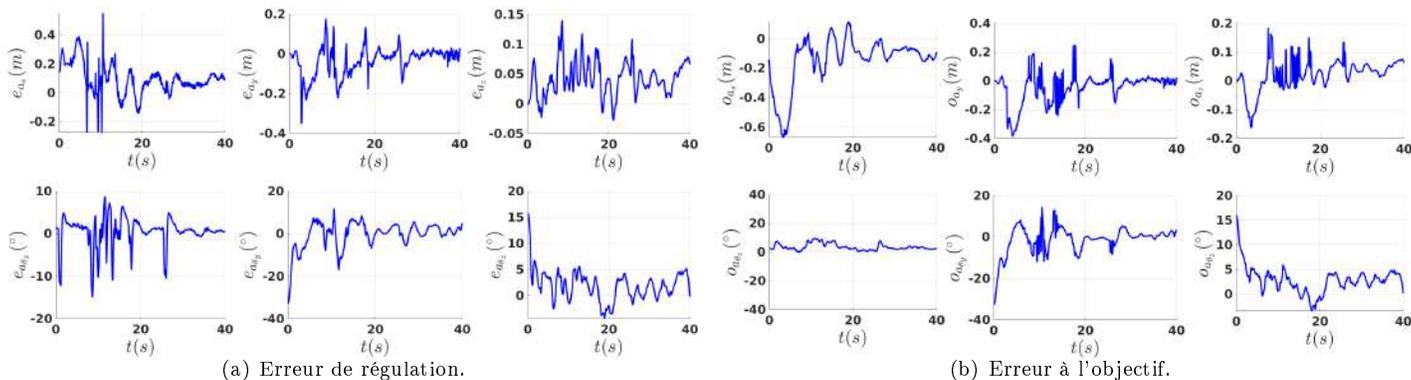


FIGURE 5.15 – Erreur de l'effecteur lors du suivi de structure le long d'une haie végétale.

5.2.2 Suivi de structure sur sol irrégulier

La seconde partie expérimentale de ce chapitre aborde le cas d'un suivi de structure sur sol irrégulier et en pente. Jusqu'à maintenant, la structure était installée sur un sol relativement plat avec peu de perturbations externes. Dans cette partie, elle sera installée sur différentes pentes pour voir l'influence de ces perturbations sur la coordination du manipulateur mobile. Dans le chapitre 4, il a été démontré que l'utilisation de la compensation et d'observateurs dans le cas d'un suivi de trajectoire sans coordination en milieu naturel permettait l'amélioration des performances de suivi du robot. Cette partie cherche maintenant à identifier l'impact que peut avoir ce genre de méthodes sur les performances de suivi avec la coordination et des écarts variables. Pour cela, trois expérimentations basées sur le scénario n°1 (voir Fig.5.1) sont proposées avec les contextes expérimentaux n°3, 4 et 5 (voir Fig.5.2).

Dans un premier temps, les expérimentations des contextes n°3 et n°4 sont comparées, la première évoluant à faible vitesse $0.4m/s$ tandis que la seconde évolue à vitesse plus importante $1m/s$. Les résultats sont donnés en Fig.5.16. La deuxième moitié du parcours est identique pour les deux systèmes tandis que la première est différente. Dans le cas du parcours à haute vitesse, l'angle serré au début du parcours a été enlevé afin que le mobile ne casse pas sa dynamique et que la plus grande partie du trajet puisse être réalisée à la vitesse nominale afin de voir apparaître les phénomènes qui nous intéressent. Le virage serré a été gardé dans le cas du système à basse vitesse pour montrer qu'il est capable de se sortir de situations compliquées telles que celle-ci.

Dans les deux cas, les résultats des erreurs de régulation et des erreurs à l'objectif sont données en figure Fig.5.17 et dans le tableau Tab.5.2. Les courbes de manipulabilité et de distance à l'objectif des essais sont donnés en figure Fig.5.19.

Concernant les essais à basse vitesse, il apparaît que l'observation sur le mobile seul n'a qu'un léger effet sur la distance à l'objectif, mais dégrade la manipulabilité. Cependant, la contribution faible du mobile s'explique par la faible vitesse de ce dernier, qui est alors soumis à des perturbations extérieures négligeables.

L'ajout de l'observateur du manipulateur quant à lui, améliore les performances de l'ensemble sensiblement, en terme de distance à l'objectif sans pour autant dégrader la manipulabilité. Cependant ce gain de performance est

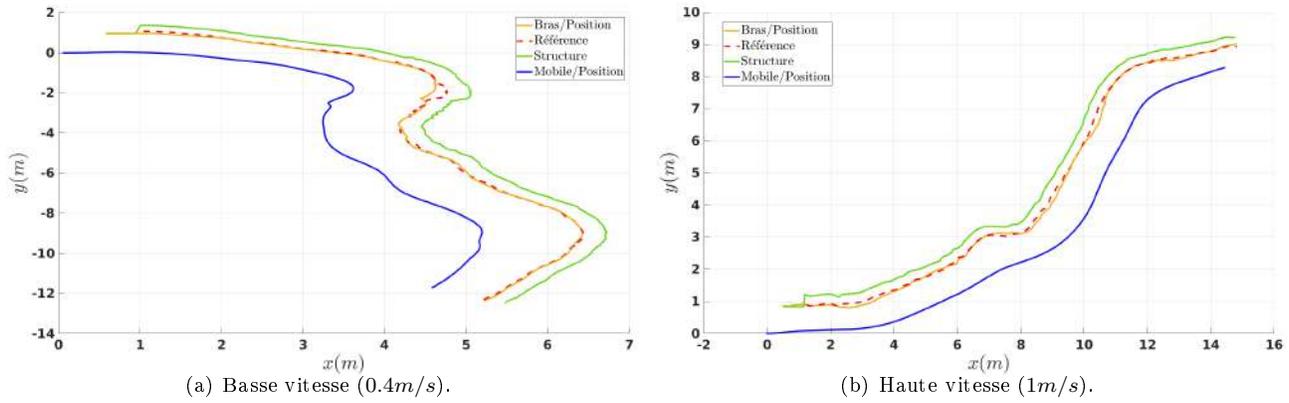


FIGURE 5.16 – Position de l'effecteur et du mobile lors du suivi de structure en pente avec les observateurs bras et mobile.

davantage dû à la limitation de l'erreur de départ (car l'observateur rend le mobile et le manipulateur plus réactifs pour suivre le point objectif) qu'à une diminution de l'erreur moyenne en régime permanent. De fait, ce premier essai montre une légère influence, positive, des observateurs sur la performance de suivi, mais la faible vitesse du système rend ce gain relativement faible.

Concernant les essais à haute vitesse, le constat est relativement similaire. L'ajout de l'observateur mobile n'a pas d'impact sur les performances du système tandis que l'ajout de l'observateur du manipulateur montre de meilleurs résultats en terme de distance à l'objectif. De fait, dans ce cas, les erreurs de départ sont identiques dans les quatre essais car le temps que le système se lance, le point objectif est ralenti et donc l'erreur n'augmente plus. Ainsi, l'amélioration moyenne de la distance est bien sur le régime permanent du système, ce qui démontre l'influence de l'observateur du manipulateur dans ce cas. De plus, pour ces mêmes essais, la manipulabilité du bras est également légèrement en hausse.

Suivi à vitesse basse 0.4m/s

	e_{a_s}	e_{a_y}	e_{a_z}	$e_{a_{\theta_x}}$	$e_{a_{\theta_y}}$	$e_{a_{\theta_z}}$	e_{m_s}	e_{m_y}	o_{a_s}	o_{a_y}	o_{a_z}	$o_{a_{\theta_x}}$	$o_{a_{\theta_y}}$	$o_{a_{\theta_z}}$	w	d	
Sans observateur	\bar{x}	0.092	-0.020	0.035	0.410	1.542	0.486	0.001	-0.023	-0.104	0.058	0.004	2.242	-2.486	0.445	0.204	0.188
	σ	0.110	0.035	0.035	0.731	4.559	3.561	0.149	0.054	0.185	0.099	0.060	16.38	5.868	17.64	0.030	0.162
Observateur mobile	\bar{x}	0.079	-0.029	0.033	0.466	1.999	0.416	0.037	0.037	-0.070	0.055	0.012	-1.212	-1.619	-2.857	0.168	0.145
	σ	0.094	0.039	0.035	0.842	4.859	3.755	0.128	0.076	0.106	0.094	0.048	17.84	6.028	18.96	0.046	0.097
Observateur manipulateur	\bar{x}	0.050	-0.009	0.024	-0.110	2.090	0.479	-0.001	-0.012	-0.053	0.023	0.004	1.413	-2.228	-0.188	0.207	0.139
	σ	0.110	0.047	0.041	1.811	4.552	4.052	0.149	0.064	0.130	0.093	0.052	15.50	6.280	15.8	0.031	0.111
Observateur manipulateur et mobile	\bar{x}	0.043	-0.007	0.022	-0.015	2.048	0.347	0.034	0.003	-0.044	0.016	0.003	-0.656	-1.374	-2.41	0.201	0.124
	σ	0.103	0.041	0.036	1.944	4.611	4.044	0.131	0.065	0.097	0.102	0.055	17.82	6.328	17.8	0.031	0.098

Suivi à vitesse haute 1m/s

	e_{a_s}	e_{a_y}	e_{a_z}	$e_{a_{\theta_x}}$	$e_{a_{\theta_y}}$	$e_{a_{\theta_z}}$	e_{m_s}	e_{m_y}	o_{a_s}	o_{a_y}	o_{a_z}	$o_{a_{\theta_x}}$	$o_{a_{\theta_y}}$	$o_{a_{\theta_z}}$	w	d	
Sans observateur	\bar{x}	0.103	-0.032	-0.001	-0.221	4.127	0.507	-0.020	0.049	-0.133	-0.075	-0.182	2.502	4.28	-4.867	0.163	0.297
	σ	0.116	0.056	0.077	1.82	5.882	3.563	0.088	0.088	0.154	0.090	0.116	9.108	6.474	8.82	0.036	0.116
Observateur mobile	\bar{x}	0.104	-0.045	-0.011	-0.414	5.355	-0.002	0.049	-0.136	-0.075	-0.186	3.276	3.960	-6.045	0.157	0.302	
	σ	0.114	0.077	0.079	2.159	5.733	3.928	0.090	0.115	0.158	0.097	0.102	6.533	7.028	5.897	0.049	0.110
Observateur manipulateur	\bar{x}	0.087	-0.034	0.038	0.695	3.194	0.238	-0.022	0.029	-0.121	-0.066	-0.133	6.164	2.699	-8.339	0.172	0.266
	σ	0.136	0.072	0.093	3.773	6.745	3.702	0.091	0.106	0.177	0.094	0.110	5.039	6.718	4.555	0.047	0.135
Observateur manipulateur et mobile	\bar{x}	0.083	-0.041	0.033	-0.031	5.005	0.549	-0.002	0.017	-0.115	-0.060	-0.124	3.535	4.190	-6.331	0.174	0.263
	σ	0.123	0.062	0.106	2.231	5.372	3.405	0.097	0.110	0.177	0.087	0.135	6.849	7.395	5.583	0.049	0.143

TABLE 5.2 – Moyenne et écart-type des erreurs à la trajectoire de l'effecteur, des erreurs de régulation, de la manipulabilité et de la distance à l'objectif lors du suivi de structure en pente.

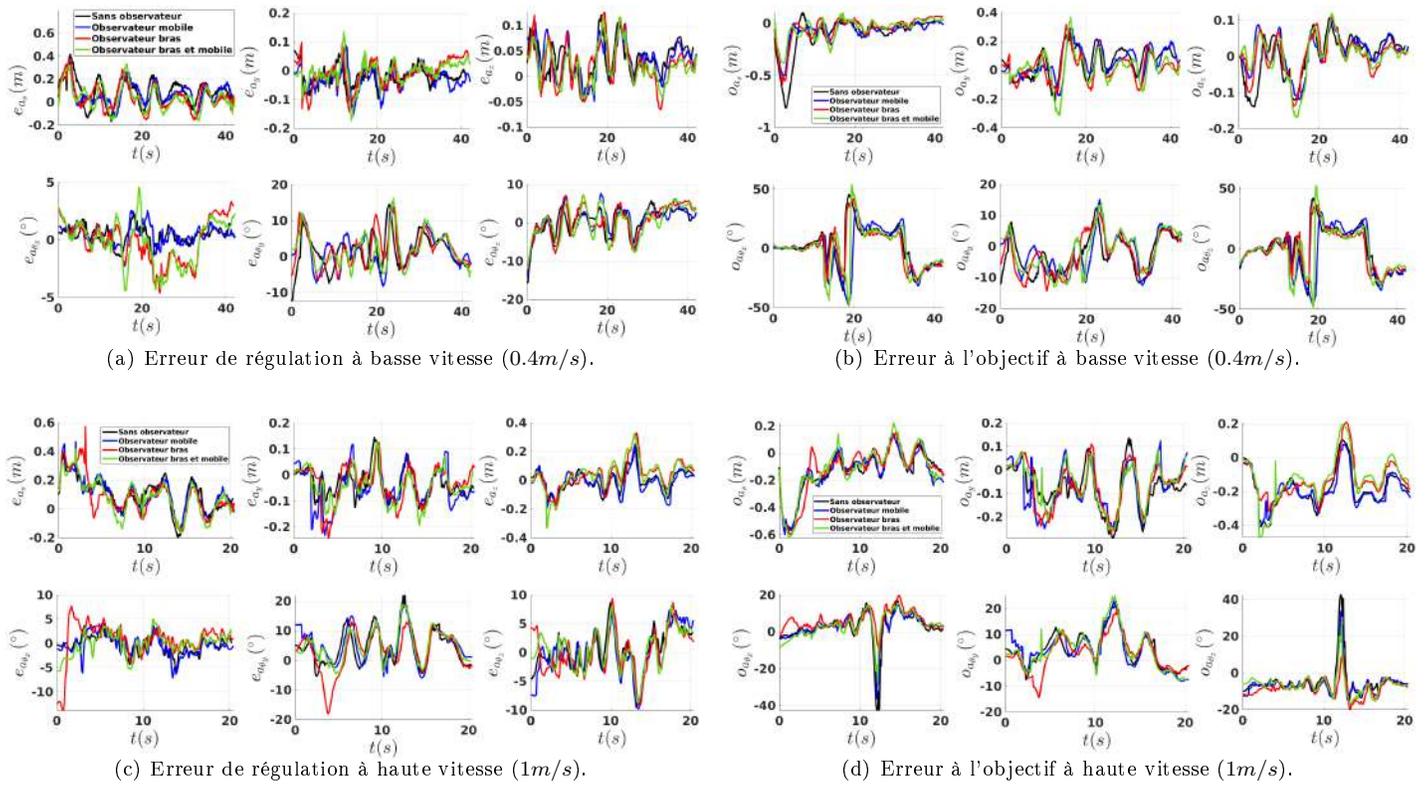


FIGURE 5.17 – Erreur de l'effecteur lors du suivi de structure en pente.

Il est également important de faire un point concernant l'influence des observateurs du mobile sur les erreurs de régulation du mobile. Comme il est montré sur la figure Fig.5.20 et dans le tableau Tab.5.2, la présence des observateurs du mobile n'a pas une influence claire sur ses erreurs de régulation contrairement aux essais du chapitre 4 et ceci, même à haute vitesse lors de la présence de glissement estimé non négligeable (voir Fig.5.18). Or ces améliorations ou dégradations observées ne sont pas corrélées directement à l'amélioration ou la dégradation des erreurs à l'objectif. Ceci peut s'expliquer de deux manières :

- Soit l'observateur dégrade le mouvement du mobile en imposant des erreurs qui sont ensuite compensées par le bras.
- Soit l'observateur corrige les erreurs du mobile mais cela ne se voit pas sur les courbes des erreurs de régulation car le coordinateur, prenant en compte ces nouvelles erreurs, déplace l'écart désiré à une autre valeur pouvant être plus optimale, causant ainsi une nouvelle erreur, due à la variation du coordinateur et non pas à l'observateur. Ainsi, l'observateur tente continuellement de corriger une erreur qui varie de sa propre action.

Les essais menés lors des expérimentations du chapitre 4 tendent à disculper l'observateur pour choisir la seconde option. De même, si l'observateur induisait de réelles erreurs, il est peu probable qu'elles soient complètement compensées par le bras et des diminutions de performances seraient observées que ce soit dans l'essai avec l'observateur seul ou avec l'observateur du bras et du mobile ensemble. Or d'après le tableau Tabs.5.2 de telles diminutions de performances ne sont pas notables.

Par ailleurs, ce même effet se retrouve également sur les erreurs de régulation du manipulateur, mais de manière moins prononcée car le bras agit directement sur l'effecteur au contraire du mobile. Ainsi, il semble peu pertinent d'observer les erreurs de régulation pour évaluer l'influence des observateurs sur le système. Afin d'en avoir une idée, il semble plus intéressant de se pencher sur les erreurs à l'objectif du manipulateur mobile et sur les critères de tâche secondaire tels que la manipulabilité qui reflètent la performance réelle du système.

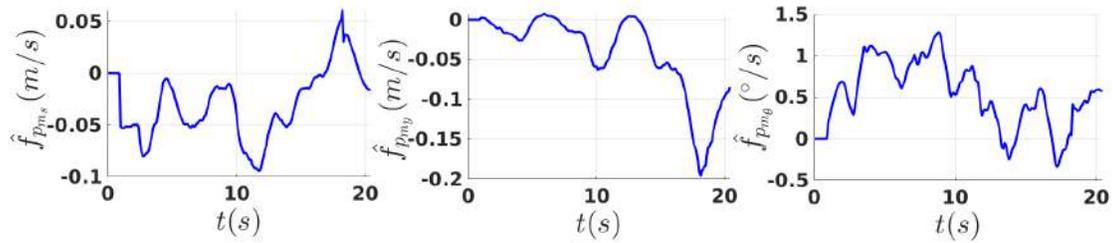


FIGURE 5.18 – Dérives de l'observateur générique du mobile lors du suivi de structure en pente avec les observateurs bras et mobile.

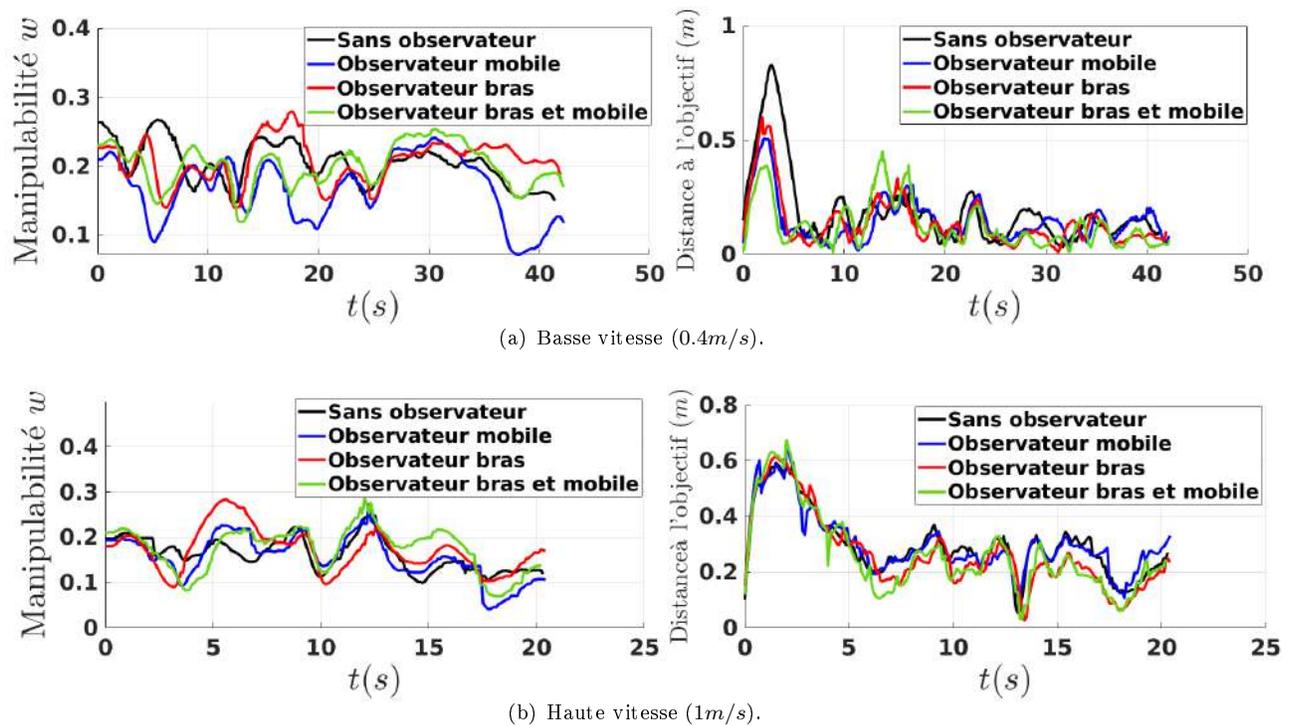


FIGURE 5.19 – Manipulabilité du manipulateur et distance à l'objectif lors du suivi de structure en pente avec les observateurs bras et mobile.

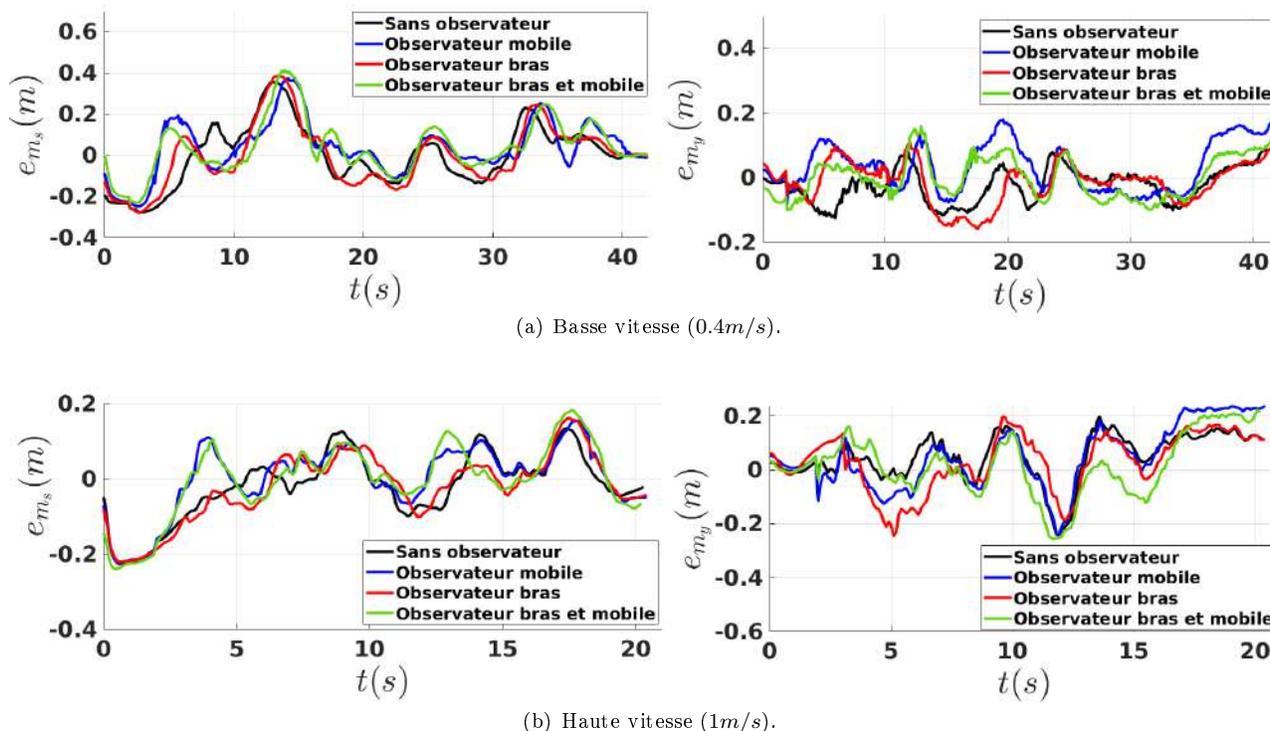


FIGURE 5.20 – Erreur de régulation du mobile lors du suivi de structure en pente avec les observateurs bras et mobile.

5.2.3 Suivi de structure rectiligne à 1m/s

Les essais précédents ont mis en avant une influence de l'observateur du manipulateur sur les performances de suivi. Cependant, la forme de la structure impose de constants changements au sein de la coordination, elle ne permet pas de fournir un régime permanent sur de longues distances et limite la vitesse du mobile en diminuant alors les perturbations appliquées au système. Afin d'observer une influence plus tranchée, une dernière expérimentation a été mise en place dans le contexte n°6 (voir Fig.5.2(f)). Elle est réalisée à la vitesse de 1m/s le long d'une structure rectiligne sur une pente régulière.

Les résultats de l'expérimentation sont donnés sur la figure Fig.5.21 et dans la table Tab.5.3. Les erreurs du mobile sont données sur la figure Fig.5.22 et la manipulabilité ainsi que la distance à l'objectif sont données en figure Fig.5.23.

De manière générale, les remarques énoncées pour les essais précédents restent identiques pour celui-ci. Cependant, l'influence des observateurs est davantage marquée pour ce cas et l'on note clairement une amélioration des performances par l'ajout de l'observateur du manipulateur. Concernant l'observateur du mobile, la différence est moins marquée et sa contribution est mineure par rapport à celle de l'observateur du manipulateur. De plus, l'influence de l'observateur sur les erreurs de régulation du manipulateur et du mobile est également plus marquée.

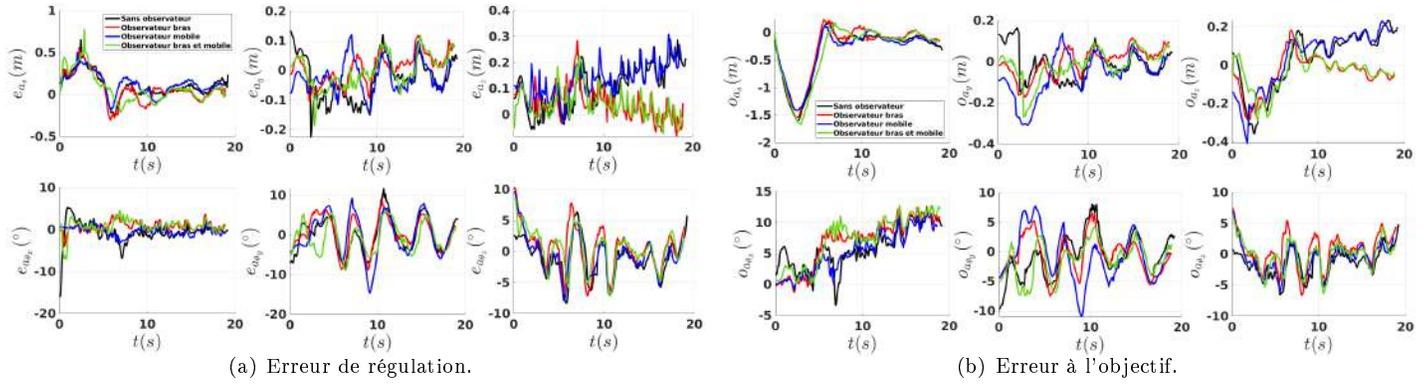


FIGURE 5.21 – Erreur de l'effecteur lors du suivi de structure rectiligne en pente à 1m/s.

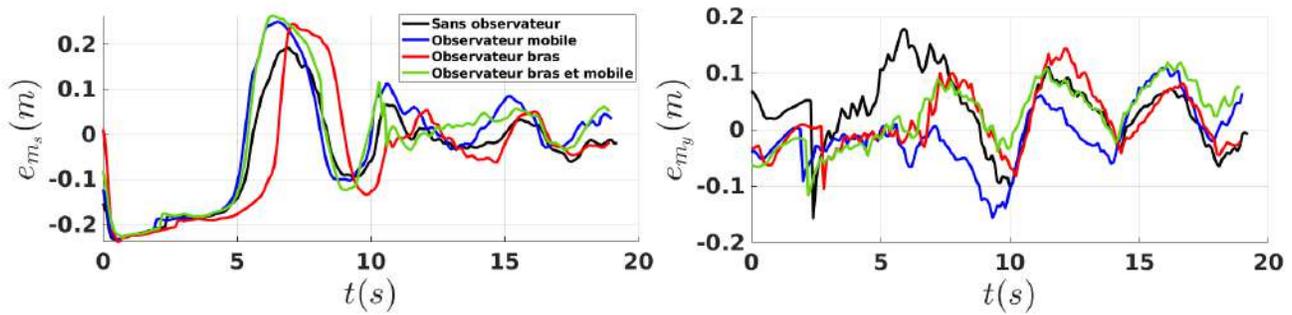


FIGURE 5.22 – Erreur du mobile lors du suivi de structure rectiligne en pente à 1m/s.

Suivi à vitesse basse 0.4m/s

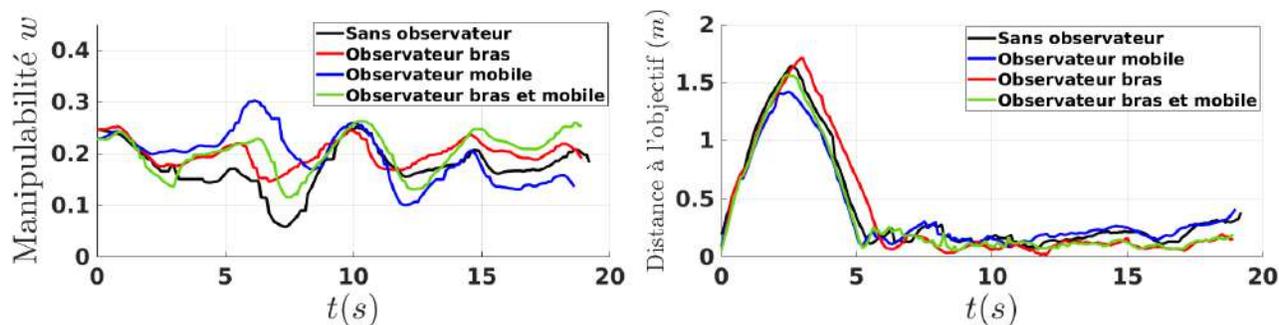
		e_{a_s}	e_{a_y}	e_{a_z}	$e_{a_{\theta_x}}$	$e_{a_{\theta_y}}$	$e_{a_{\theta_z}}$	e_{m_s}	e_{m_y}	o_{a_s}	o_{a_y}	o_{a_z}	$o_{a_{\theta_x}}$	$o_{a_{\theta_y}}$	$o_{a_{\theta_z}}$	w	d
Sans observateur	\bar{x}	0.107	-0.029	0.108	-0.656	0.012	-0.966	-0.046	0.034	-0.339	0.013	0.029	5.853	-0.705	-1.354	0.174	0.412
	σ	0.143	0.073	0.080	2.668	4.390	2.990	0.109	0.061	0.467	0.077	0.153	3.373	3.589	2.172	0.042	0.440
Observateur mobile	\bar{x}	0.124	-0.020	0.132	-0.395	-0.141	-0.609	-0.021	-0.011	-0.339	-0.064	0.033	5.638	-0.867	-0.641	0.196	0.392
	σ	0.127	0.054	0.064	1.050	5.197	3.241	0.129	0.055	0.419	0.105	0.154	3.546	4.117	2.390	0.049	0.378
Observateur manipulateur	\bar{x}	0.068	0.009	0.043	0.736	0.442	0.492	-0.052	0.016	-0.279	-0.002	-0.043	6.848	-0.604	0.588	0.200	0.387
	σ	0.171	0.049	0.061	1.138	4.136	3.477	0.126	-0.105	0.468	0.068	0.097	3.932	3.216	2.768	0.025	0.496
Observateur manipulateur et mobile	\bar{x}	0.076	-0.002	0.036	0.785	-0.687	0.423	-0.020	0.024	-0.337	-0.017	-0.040	7.353	-1.349	-0.111	0.202	0.349
	σ	0.173	0.055	0.055	1.630	3.714	3.062	0.131	0.053	0.517	0.075	0.089	3.862	2.934	2.432	0.039	0.437

TABLE 5.3 – Moyenne et écart-type des erreurs à la trajectoire de l'effecteur, des erreurs de régulation, de la manipulabilité et de la distance à l'objectif lors du suivi de structure rectiligne le long d'une pente régulière.

Ce dernier essai permet donc de conclure sur la pertinence de l'utilisation des méthodes d'observation développées dans le chapitre 4 pour améliorer les résultats de coordination obtenus par l'approche présentée au chapitre 3. Cependant, l'intérêt de l'utilisation de l'observateur sur le mobile reste mitigé, là où celle de l'observateur sur le manipulateur est affirmée.

5.3 Conclusion

Ce dernier chapitre offre une conclusion à l'ensemble des travaux de cette thèse en capitalisant les différentes contributions proposées au sein d'un ensemble d'expérimentations en milieu naturel simulant une tâche applicative d'intérêt pour le monde agricole.

FIGURE 5.23 – Manipulabilité et distance à l'objectif lors du suivi de structure rectiligne en pente à $1m/s$.

Plusieurs expérimentations montrent la capacité de l'approche de coordination présentée au chapitre 3 à s'adapter à des tâches et des trajectoires plus complexes que celles proposées lors de son étude. Dans ces essais, les trajectoires n'étaient plus des droites de référence absolues, mais le profil d'une structure inconnue suivie par le mobile. Par ailleurs, de nouvelles tâches plus complexes ont été ajoutées à la coordination comme l'évitement d'obstacle et la régulation angulaire par caméra. De plus, il a été démontré que le système était capable de changer de tâche à la volée en ajoutant de nouveaux critères et en changeant les trajectoires de référence lors de son fonctionnement. Enfin, le système a été complètement validé le long d'une structure végétale dans un cas proche de ce que l'on retrouve dans le domaine agricole. Ceci permet définitivement de conclure sur la pertinence de cette approche de coordination dans une application agricole par son efficacité et sa grande versatilité.

Dans une seconde partie, l'approche de coordination a été mise en place sur un terrain en pente et irrégulier dans le but d'évaluer sa robustesse face à des perturbations extérieures induites par le milieu agricole. Par ailleurs, la coordination a été couplée avec les approches de navigation robuste présentées au chapitre 4. Ces essais ont ainsi permis de conclure que l'approche était tout à fait apte à coordonner un système dans ce genre de milieu et que les approches par observation proposées, notamment celles appliquées au manipulateur, permettaient une amélioration des performances dans les cas où le système se déplace rapidement.

Toutefois, ces essais ne sont que préliminaires et de nombreuses améliorations peuvent être amenées afin d'aller plus loin dans ces travaux. Ils permettent toutefois d'apporter une démonstration expérimentale de fonctionnement et de quantifier les performances pour une tâche donnée au sein d'un milieu agricole, cette démonstration faisait souvent défaut aux approches présentées au sein de la littérature scientifique étudiée au chapitre 2.

Chapitre 6

Conclusion générale

SOMMAIRE DU CHAPITRE

6.1	Conclusion	193
6.1.1	Rappel de la problématique	193
6.1.2	Contributions apportées par ces travaux	194
6.1.2.1	Classification des méthodes de coordination	194
6.1.2.2	Méthode de coordination générique	195
6.1.2.3	Observateur de perturbations génériques	195
6.1.2.4	Apport des contributions	196
6.2	Perspectives	196
6.2.1	Les pistes de développements	196
6.2.2	Un concept à étendre...	197

6.1 Conclusion

6.1.1 Rappel de la problématique

La question de la commande coordonnée des manipulateurs mobiles à roues est une question prenant de plus en plus d'importance dans le monde industriel et scientifique, à mesure que les tâches robotisées se complexifient, nécessitant dès lors des capacités communes de mobilité et de manipulation. En effet, les stratégies actuelles, utilisant des manipulateurs montés sur des plateformes mobiles et consistant à piloter les systèmes les uns après les autres de façon désynchronisée, montrent désormais leurs limites. De fait, cette approche diminue la rentabilité de l'entreprise par des temps d'exécution plus longs lors des tâches, mais diminue aussi la performance du robot en lui ôtant des degrés de redondance lui permettant d'atteindre plusieurs objectifs simultanément.

De ce point de vue, la commande coordonnée solutionne les deux problèmes en diminuant les temps d'exécution d'une part, mais également en offrant la mobilité de la plateforme lors de la réalisation d'une tâche de manipulation. Cette mobilité augmente le degré de redondance total du système lui permettant de réaliser plus de tâches, sans pour autant investir dans un manipulateur plus coûteux qui intégrerait directement cette redondance.

Par ailleurs, nous avons vu au chapitre 1 que cette même question se posait dorénavant au milieu agricole qui, poussé par des contraintes environnementales et sociétales de plus en plus fortes, tend vers une révolution robotique dans tous ses secteurs. Ceci passe par l'automatisation de nombreuses tâches jugées aujourd'hui dangereuses ou laborieuses, ou encore par la création de nouveaux paradigmes agricoles que la robotique permet de construire. Dans tous les cas, ces systèmes loin des environnements hyper-structurés des industries doivent à la fois être capables de naviguer en milieu naturel et interagir avec un environnement dynamique et incertain. Ainsi, des tâches comme la taille, la récolte, le désherbage, la pulvérisation ou la surveillance des cultures sont à l'origine de nombreux projets industriels et scientifiques dans ce domaine.

Outre ce besoin d'associer ces capacités de mobilité et de manipulation, nous avons longuement abordé la question de la versatilité des systèmes agricoles robotisés. De fait, à l'heure actuelle, les robots commercialisés ou prototypes sont souvent pensés comme des pièces uniques à destination d'une ou de deux tâches, ou dans le meilleur des cas d'un ensemble de tâches liées à une problématique propre. Par exemple, un système ayant été pensé pour la récolte dans les planches de maraîchage n'est pas apte à la récolte dans un verger. Ceci pour des raisons d'intelligence embarquée premièrement, mais également pour des raisons techniques telles que la forme et la structure du robot et des effecteurs servant à la récolte. Concernant ce sujet, le principal constat que l'on peut faire est le cruel manque de modularité des systèmes actuels. Ce point rend alors les systèmes trop onéreux pour être réellement rentables et déployés à grande échelle.

Une façon d'aborder ce problème est alors de chercher à hyper-structurer l'environnement agricole en passant par la création de grandes parcelles agricoles, l'arrachage des haies et des sous-bois, le détournement des cours d'eau, les monocultures et les élevages hors sols. Or, cette hyper-structuration va à l'encontre des défis écologiques auxquels fait également face l'agriculture. La seconde voie de réponse impose d'adapter le robot à son environnement mais surtout que ce dernier soit suffisamment versatile pour s'adapter à plusieurs environnements. Cette dernière voie permet à la fois de répondre, du moins en partie, aux problématiques écologiques sans avoir à modifier les écosystèmes, aux problématiques humaines en retirant l'exploitant des tâches dangereuses ou physiques et répond également aux problématiques économiques, en offrant un système suffisamment générique pour être rentable tout en apportant un gain de productivité sur la ferme.

Enfin, quel que soit le système envisagé pour réaliser des tâches agricoles, ce dernier doit être suffisamment robuste pour travailler en environnement naturel. En effet, dans ce type de milieu, le système est soumis en permanence à des perturbations externes, imprévisibles, qu'il convient de prendre en compte pour remplir l'objectif. Or, plus le milieu se structure, plus ses perturbations peuvent être nombreuses et fortes sur le système. Ce dernier se doit alors de posséder une robustesse mécanique certaine, couplée à une intelligence permettant de rendre le robot insensible à ces perturbations.

C'est donc dans ce contexte que se sont inscrits les travaux présentés dans ce mémoire, en s'efforçant de poser les bases de résolution de la problématique de la coordination d'un manipulateur mobile suivant un paradigme suffisamment générique pour rendre le système modulaire tout en étant assez robuste pour naviguer en milieu naturel.

6.1.2 Contributions apportées par ces travaux

Les travaux de cette thèse se sont organisés autour de deux axes principaux, la création d'un paradigme de coordination des manipulateurs mobiles et la mise en place d'approches robustes pour leur navigation en milieu naturel. Par ailleurs, sur ces deux axes, la ligne directrice de développement a été portée sur la généralisation des méthodes pour proposer des solutions adaptables à tous types de systèmes, ceci afin de répondre à la problématique rappelée précédemment.

6.1.2.1 Classification des méthodes de coordination

Dans un premier temps, un état de l'art a été proposé, recensant nombre des travaux concernant les manipulateurs mobiles qui ont pu être étudiés par le passé. Cette revue de la littérature s'est décomposée en quatre parties selon la formalisation des tâches en robotique, les méthodes de coordination, les méthodes de gestion de redondance et les méthodes de commande en milieu naturel. Ceci a ensuite permis de faire une synthèse et une critique des approches existantes, permettant les développements proposés dans les chapitres suivants.

Par ailleurs, cet état de l'art a permis la présentation d'une première contribution de cette thèse sous la forme d'une classification des méthodes de coordination selon le degré de couplage des sous-systèmes du manipulateur mobile. Cette classification contient six degrés de couplage et permet de classifier l'ensemble des méthodes existantes, des approches sans coordination aux approches avec une coordination très forte. Cette classification a notamment permis de dégager trois catégories de couplage spécifiques. Le premier, le couplage des systèmes holonomes, le plus important dans la classification, considère les systèmes entièrement holonomes pouvant se formaliser comme une seule entité unique sans spécificité propre. Le second, le couplage interne, se formalise sous un seul modèle mais nécessite la prise en compte de certaines spécificités comme la contrainte de non-holonomie d'un mobile au sein

de la modélisation. Enfin le troisième, le couplage externe, considère chaque sous-système indépendant avec ses caractéristiques propres mais dont les objectifs sont coordonnés pour permettre la résolution de la tâche.

6.1.2.2 Méthode de coordination générique

Le premier axe de développement des travaux de thèse, apportant la seconde contribution, s'est porté sur la formulation d'un paradigme de coordination générique adaptable à tous types de manipulateur mobile. Ce paradigme se base sur le principe du couplage externe et du suivi multi-trajectoires lui donnant son caractère modulaire. Le principe de base de l'architecture proposée repose sur la variation d'écartés désirés à une trajectoire de référence dans la commande de chaque sous-système. Cette variation est préalablement décidée par un coordinateur étant en charge de la résolution de la redondance du système global. Ainsi l'approche se présente avec deux niveaux. Un premier niveau de commande, régulant de la meilleure façon possible les consignes envoyées aux sous-systèmes, et un second niveau de coordination, formé par le coordinateur ayant connaissance de l'ensemble du système.

Une telle architecture est très modulaire car chaque niveau de commande gère les propres spécificités du sous-système associé telles que la non-holonomie des mobiles. Par ailleurs, cela permet d'utiliser les modèles et commandes déjà bien connus et éprouvés de la littérature scientifique. Enfin, modifier la structure du manipulateur mobile n'engage pas à changer toute la modélisation et la commande de ce dernier, mais simplement ajouter ou retirer les paramètres liés à une partie spécifique dans le coordinateur.

Par ailleurs, cette architecture a été testée à la fois en simulation et de façon expérimentale sur différentes structures de manipulateurs mobiles et sur plusieurs scénarios en offrant des résultats très encourageants. Premièrement, ces expérimentations ont validé le concept proposé et démontré son fonctionnement en situation réelle. De plus, l'utilisation de plusieurs structures de manipulateurs mobiles a également validé sa généricité face au système à coordonner. Enfin, plusieurs scénarios ont permis de montrer ses capacités à intégrer plus ou moins de critères selon la tâche à accomplir, à les prioriser ou encore à en changer en cours de fonctionnement.

6.1.2.3 Observateur de perturbations génériques

Le second axe de développement de ces travaux s'est porté sur la création de méthodes robustes permettant au manipulateur mobile de naviguer et de se coordonner en milieu naturel pour accomplir sa tâche de la meilleure façon possible. Ceci a permis d'apporter la troisième contribution principale de ces travaux sous la forme d'un observateur de perturbation générique applicable à tous types de mobiles comme aux manipulateurs.

Premièrement, une méthode de compensation des irrégularités du terrain a été présentée et validée en simulation et de façon expérimentale en se basant sur les retours capteurs ou les vitesses fournies par les modèles des sous-systèmes pour compenser leur influence mutuelle les uns sur les autres.

Dans un second temps, les observateurs permettant de déterminer des dérives de glissement pour les mobiles à deux trains directeurs ont été étendus à l'estimation de la dérive longitudinale afin de les rendre complets. Ces mêmes observateurs ont ensuite été adaptés au modèle skid-steering. La définition de ces deux observateurs dédiés modèle a permis la mise en lumière d'une équivalence des dérives entre les modèles conduisant finalement à la synthèse d'un nouvel observateur, indépendant du modèle et adaptable pour tout type de mobile mais également aux manipulateurs.

L'ensemble de ces développements à par la suite été validé de façon expérimentale sur plusieurs types de base mobile en environnement naturel et escarpé. En premier lieu, il est apparu que les extensions proposées dans les observateurs basés modèle permettaient une nette amélioration des performances de suivi de trajectoire des mobiles. De plus, la généricité de l'observateur indépendant du modèle a été montrée sur trois types de mobiles différents en donnant les mêmes performances de suivi que ceux basés sur les modèles. De même, ce dernier a montré également de façon expérimentale sa pertinence lorsqu'il est utilisée pour un manipulateur.

Enfin, dans le dernier chapitre de ce mémoire, l'ensemble des développements présentés ont été appliqués de façon expérimentale sur un manipulateur mobile pour réaliser une tâche de suivi de structure, nécessaire à beaucoup d'applications agricoles telles que la taille ou la pulvérisation. Ces expérimentations ont démontré le fonctionnement de l'architecture de coordination dans un cadre applicatif complexe ainsi que la pertinence de l'utilisation des

méthodes de compensation et d'observation pour améliorer les performances de coordination tout au long de la tâche.

6.1.2.4 Apport des contributions

Finalement, l'ensemble des travaux de thèse présentés ici s'est efforcé d'apporter des éléments de réponse à la problématique posée, tout en pointant les manques dans la littérature scientifique nécessitant de plus amples recherches sur le sujet. Ainsi, la question de la modularité des systèmes a été centrale durant tous ces travaux dans le but de pouvoir s'adapter à tous types de systèmes expérimentaux ou commerciaux. Par ailleurs, les nombreuses expérimentations menées ont démontré la pertinence des approches proposées ainsi que leur fonctionnement dans un cas réel, en extérieur, et sur plusieurs systèmes différents.

6.2 Perspectives

Néanmoins, l'ensemble des travaux proposés ici sont prospectifs et s'identifient davantage à la preuve de concept plutôt qu'à une solution optimale. De fait, ces derniers peuvent être améliorés à bien des égards, ouvrant la voie à de nombreuses perspectives de travaux futurs.

6.2.1 Les pistes de développements

A ce stade de développement, l'approche de coordination s'est davantage intéressée à la modularité de la structure qu'à la gestion de la redondance de ses éléments, laissant cela à une approche de minimisation de fonction pondérée non-linéaire. Or, ce type d'approche, bien connue depuis de nombreuses années, car simple à mettre en place, est également complexe à paramétrer et sous-optimale dans sa résolution. C'est d'ailleurs une limite qui a été pointée plusieurs fois dans ce manuscrit. De fait, les approximations successives générées par l'algorithme de résolution ainsi que les temps longs d'optimisation dus au caractère non-linéaire de la fonction impliquent de devoir faire le compromis de la solution sous-optimale pour que l'approche puisse fonctionner. Or, comme cela a été montré dans la partie de l'état de l'art, les méthodes de gestion de la redondance sont un domaine extrêmement vaste en robotique et de nombreuses méthodes plus efficaces ont été développées ces dernières années. Ainsi, reformuler le problème d'optimisation sous la forme d'un problème QP semble un premier point de départ pertinent pour améliorer les performances de l'approche de minimisation étant donné les résultats très intéressants obtenus par ces méthodes.

Une seconde voie d'amélioration pour cette approche de coordination est la mise en place de composantes prédictives à la fois au sein des coordinateurs, mais aussi dans les commandes des sous-systèmes. L'idée d'une telle composante dans ces commandes permettrait une meilleure prise en compte de leurs spécificités propres, notamment en ce qui concerne les systèmes lents. En effet, les expérimentations sur la plateforme Adap2e ont montré la limite de l'approche de coordination sur des systèmes à dynamique très lente. Une voie de résolution est alors l'utilisation d'une commande prédictive prenant en compte les retards et dynamiques du bas-niveau pour rendre le système plus réactif. Par ailleurs, les approches prédictives permettent également de meilleures performances lors du suivi de trajectoire avec notamment la capacité à anticiper les fortes variations de courbure pour minimiser les dépassements du mobile observés sur les essais expérimentaux. Coupler une approche prédictive à l'observateur générique proposé permettrait donc une meilleure navigation et donc une meilleure coordination du système.

L'autre idée derrière la coordination est la possibilité de créer un coordinateur prédictif. Le coordinateur présenté dans ces travaux est purement réactif, ce qui peut le mener dans des configurations problématiques dues à un manque d'anticipation. Il semble pertinent alors de pouvoir développer un coordinateur permettant de générer des écarts désirés en prenant en compte un certain horizon de temps. Sur cette même idée, à la place d'un écart désiré, le coordinateur pourrait fournir une trajectoire tracée par une succession d'écarts désirés sur un horizon de temps donné. Ceci aurait l'avantage de permettre à la composante prédictive des sous-systèmes d'anticiper les variations d'écarts désirés pour mieux les réguler. Dans ce cas de figure, la trajectoire de référence ne sert alors plus que de support à la génération des écarts désirés tandis que la trajectoire locale du coordinateur devient la référence de commande.

Ce qui est intéressant parmi tout cela, c'est que quelles que soient les améliorations envisagées sur le coordinateur ou les commandes des sous-systèmes, le principe de l'architecture reste inchangé, l'aspect modulaire n'est pas remis

en cause. Cela laisse alors énormément de liberté et de flexibilité pour mettre en place différents types de coordinateurs ou de commandes sans changer le principe du système et sans avoir à fournir de nouvelles modélisations ou de nouvelles lois de commande.

Une autre voie d'étude pour approfondir ces travaux serait l'usage de l'approche pour des tâches d'interaction, nécessitant la prise en compte de modèles dynamiques. Ceci permettrait alors d'ouvrir la voie à des tâches telles que la taille ou la récolte, moyennant la capacité du système à venir estimer les paramètres dynamiques d'objets complexes, variables et hétérogènes en temps réel.

Concernant l'observateur de perturbations, il serait dans un premier temps intéressant d'étudier ses capacités d'estimation de dérive sur d'autres systèmes que ceux envisagés dans ces travaux, notamment sur ces systèmes humanoïdes ou à pattes afin de confirmer ou d'infirmer sa généralité. Cependant, la réelle limite de cet observateur se situe aujourd'hui sur son hypothèse de perturbation lentement variable qui impose des vitesses de déplacement faibles au système. Or, il existe des méthodes utilisées sur les observateurs dédiés modèles pour améliorer leur performance et les utiliser à plus haute vitesse en passant par la dynamique des systèmes. Ainsi, une voie d'amélioration de l'observateur générique serait de pouvoir lui appliquer de tels principes pour ne pas être restreint par l'hypothèse de la vitesse du mobile.

En second lieu, dans le cas d'une tâche utilisant un suivi de structure telle que présentée dans le chapitre 5, l'observateur générique nécessite de connaître la position du mobile dans un repère absolu pour fonctionner, car l'utilisation d'un repère local ne permet pas de bonnes estimations si ce repère local est variable. Or, dans le cas du suivi de structure, le repère change à chaque nouvelle détection Lidar provoquant des variations dans les écarts du mobile, ceux-ci étant alors considérés par l'observateur comme un glissement. Ceci est problématique dans le sens où le suivi de structure est pertinent, notamment dans les endroits où la localisation GPS absolue ne fonctionne pas. Dans ce cas, le mobile ne peut donc pas profiter de l'observateur pour améliorer ses performances de suivi. Une voie d'amélioration pour ce dernier serait donc de pouvoir l'adapter au repère local variable.

Enfin, pour se diriger vers la finalité de ces travaux, l'étude et l'application de ces approches sur des engins agricoles plus lourds, avec des dynamiques lentes est une étape essentielle à développer.

6.2.2 Un concept à étendre...

Une fois ceci présenté, il est également intéressant d'envisager un type de manipulateur mobile différent, sous la forme de structures variables. De fait, il est possible de diviser les systèmes en deux catégories, les outils et les porte-outils. Ceci est notamment vrai dans le cadre du milieu agricole où, très souvent, le tracteur fait office de porte-outils et chaque tâche est liée à un outil spécifique qui vient s'associer au tracteur. En soi, ce dernier est donc très modulaire et c'est ce qui en fait sa force par rapport aux systèmes autonomes actuels. Même pour un investissement important, ce dernier sera utilisé en continu toute l'année pour des tâches très diverses ce qui lui permettra d'être rentable pour l'exploitant.

Envisager une structure similaire robotisée, notamment avec des outils actifs, n'est pas une chose aisée car le porte-outils devra être capable de s'adapter en permanence à l'outil choisi et ce dernier doit également agir en fonction du porte-outils. Or, c'est exactement en cela que l'approche de coordination présentée ici prend tout son sens. Son architecture lui permet de coordonner le porte-outils avec l'outil quelle que soit la structure de ce dernier, puis de changer d'outil sans avoir à redessiner les bases de commande du porte-outils. De façon similaire, ceci est transposable à l'action de l'homme qui vient adapter le comportement de son tracteur selon l'outil choisi, sans changer le principe de conduite. Ainsi, l'une des perspectives à court terme serait l'application de cette approche sur des systèmes à structures variables.

Au delà de ça, les systèmes qui ont été présentés dans cette thèse se sont tournés principalement vers des robots mobiles et manipulateurs sériels, car ce sont les principales structures robotisées que l'on retrouve aujourd'hui dans le domaine agricole. Or, rien ne contraint l'approche de coordination présentée à de tels systèmes et pour aller plus loin il serait intéressant de pouvoir l'adapter sur d'autres structures commençant à apparaître en agriculture, telles que les drones, les robots à pattes ou les manipulateurs parallèles. De plus, en l'état, la méthode peut également s'intéresser à tous les autres types de mobilité et de systèmes d'interaction présentés au chapitre 1, et plus encore.

Le développement de l'observateur générique au chapitre 4 s'est fait sur le constat qu'il existait des équivalences possibles entre les différentes dérives que proposaient les observateurs dédiés modèles. Or, il a été montré que les commandes des mobiles possèdent également de telles équivalences. La piste de recherche d'une commande, pour les robots mobiles, plus globale, partant d'un modèle unifié semble alors un développement possible pour de futurs travaux. En effet, les mobilités actuelles sont celles historiquement utilisées dans les différents domaines agricoles. Ainsi on retrouve des petits robots à chenille dans les vignes, similaires au chenillard, ou des robots à un train directeur sur les planches de maraîchage similaires au tracteur traditionnel. Malgré tout, certains robots commercialisés proposent des choses différentes avec notamment des systèmes à quatre roues directrices, principalement pour bénéficier du fait de pouvoir tourner sur place. Mais dans tous les cas, les mobilités des systèmes sont figées à leurs structures.

Or, il serait pertinent de penser la modularité voulue entre outils et porte-outils, également au sein du porte-outils. De fait, ce type de modularité est aujourd'hui déjà pensé sur certains tracteurs. L'ajout de roues d'extension sur les roues d'un tracteur augmente son adhérence en augmentant la largeur virtuelle du pneu, mais augmente aussi sa voie. Le passage de deux roues motrices à quatre roues motrices selon le travail du sol change la dynamique du système. Le passage de un à deux trains directeurs sur certains engins de levage pour obtenir une meilleur manœuvrabilité. Le crabotage des roues, permet de privilégier le couple pour s'extraire des fourrières boueuses mais rend caduque le modèle d'Ackermann. Les chaînes mises sur les roues des engins pour simuler la cinématique d'une chenille et naviguer dans les terrains impraticables. Tous ces exemples montrent le besoin dans le milieu agricole de pouvoir varier la mobilité des systèmes. Or, cela pose la question de la commande de ce genre de systèmes, et le besoin de créer un contrôle suffisamment générique au lieu d'interchanger des commandes particularisées.

Cette grande flexibilité peut également s'envisager un cran au-dessus par la coordination de manipulateurs mobiles sans lien physique. Dès lors dénommer, le système "*manipulateur mobile*" serait sans doute impropre et le terme "*système robotisé*" plus générique serait plus approprié. De fait, ce qui lie aujourd'hui le manipulateur au mobile dans l'architecture proposée est un placement rigide de l'un par rapport à l'autre dans un repère de référence commun. Or rien ne contraint ce placement à être rigide et il est possible de le rendre flexible sans pour autant mettre l'architecture en défaut. Ainsi, sa capacité à prendre en compte des systèmes très différents permet à ces travaux d'être une porte d'entrée à la coordination de flottes de systèmes à structure variable et hétérogène.

Cette dernière voie de développement est extrêmement intéressante pour nos systèmes agricoles qui cherchent aujourd'hui à se réinventer selon de nouveaux paradigmes et de nouveaux usages, se tournant davantage vers des flottes de petits systèmes polyvalents adaptés au milieu déstructuré plutôt que vers des machines sur-dimensionnées nécessitant des environnements totalement contraints. De telles approches robotiques marqueraient alors une avancée prometteuse pour l'application à grande échelle des principes agroécologiques, nécessaires à l'avènement de nouveaux itinéraires de culture et d'élevage.

Bibliographie

- ADAM, Ulrich et CEMA Secretary GENERAL (2017). « Agriculture 4.0—the Challenges Ahead & What to Do About Them ». In : *CEMA Secretary General, Club of Bologna, Hannover 12*.
- ADAP2E, Inrae (2014). *Projet Adap2E*. <https://adap2e.inrae.fr>.
- AGUILERA-MARINOVIC, Sergio, Miguel TORRES-TORRITI et Fernando AUAT-CHEEIN (2017). « General Dynamic Model for Skid-Steer Mobile Manipulators With Wheel–Ground Interactions ». In : *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 22, p. 433-444.
- AKLI, Isma (2021). « Trajectory planning for mobile manipulators including Manipulability Percentage Index ». In : *International Journal of Intelligent Robotics and Applications* 5(4), p. 543-557.
- AKLI, Isma et al. (2011). « Trajectory generation for operational task execution with manipulability analysis ». In : *2011 15th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, p. 94-99.
- ALENYA, Guillem et al. (sept. 2013). « Robotized Plant Probing : Leaf Segmentation Utilizing Time-of-Flight Data ». In : *IEEE Robotics & Automation Magazine* 20(3), p. 50-59.
- AMAR, Faïz Ben et Philippe BIDAUD (1997). « Dynamic analysis of off-road vehicles ». In : *Experimental Robotics IV*. Springer, p. 363-371.
- ANCONA, Roberto (juill. 2017). « Redundancy Modelling and Resolution for Robotic Mobile Manipulators : A General Approach ». In : *Advanced Robotics* 31(13), p. 706-715.
- ANDALUZ, Víctor et al. (2012). « Adaptive unified motion control of mobile manipulators ». In : *Control Engineering Practice* 20(12), p. 1337-1352.
- ANTONELLI, G. et S. CHIAVERINI (fév. 2003). « Fuzzy Redundancy Resolution and Motion Coordination for Underwater Vehicle-Manipulator Systems ». In : *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 11(1), p. 109-120.
- ANTONELLI, Gianluca, Giovanni INDIVERI et Stefano CHIAVERINI (2009). « Prioritized closed-loop inverse kinematic algorithms for redundant robotic systems with velocity saturations ». In : *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 5892-5897.
- ANTONOV, S, A FEHN et A KUGI (2011). « Unscented Kalman filter for vehicle state estimation ». In : *Vehicle System Dynamics* 49(9), p. 1497-1520.
- ARAD, Boaz et al. (2020). « Development of a sweet pepper harvesting robot ». In : *J. Field Robotics* 37, p. 1027-1039.
- ARTUS, Guillaume (2005). « Application de l’approche par fonctions transverses à la commande de véhicules non-holonomes manoeuvrants ». Thèse de doct. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- ÅSTRAND, Björn et Albert-Jan BAERVELDT (2005). « A vision based row-following system for agricultural field machinery ». In : *Mechatronics* 15(2), p. 251-269.
- AVANZINI, Giovanni Buizza, Andrea Maria ZANCHETTIN et Paolo ROCCO (2015). « Constraint-based Model Predictive Control for holonomic mobile manipulators ». In : *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, p. 1473-1479.
- BAC, C. Wouter et al. (2014). « Harvesting Robots for High-Value Crops : State-of-the-Art Review and Challenges Ahead ». In : *Journal of Field Robotics* 31(6), p. 888-911.
- BAERLOCHER, P. et R. BOULIC (1998). « Task-Priority Formulations for the Kinematic Control of Highly Redundant Articulated Structures ». In : *Proceedings. 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Innovations in Theory, Practice and Applications*. T. 1. IEEE : Victoria, BC, Canada, p. 323-329.
- BAERLOCHER, Paolo (2001). *Inverse kinematics techniques of the interactive posture control of articulated figures*. Rapp. tech. EPFL.
- BAETEN, Johan et al. (2008). « Autonomous Fruit Picking Machine : A Robotic Apple Harvester ». In : *Field and Service Robotics*. Sous la dir. de Christian LAUGIER et Roland SIEGWART. T. 42. Springer Berlin Heidelberg : Berlin, Heidelberg, p. 531-539.

- BAFFET, Guillaume, Ali CHARARA et Daniel LECHNER (2009). « Estimation of vehicle sideslip, tire force and wheel cornering stiffness ». In : *Control Engineering Practice* 17(11), p. 1255-1264.
- BAILLIEUL, J. (mars 1985). « Kinematic Programming Alternatives for Redundant Manipulators ». In : *1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings*. T. 2, p. 722-728.
- BALESTRINO, A., G. DE MARIA et L. SCIavicco (juill. 1984). « Robust Control of Robotic Manipulators ». In : *IFAC Proceedings Volumes* 17(2), p. 2435-2440.
- BANFIELD, Ilka et Humberto RODRIGUEZ (2020). « A Multi-Objective Genetic Algorithm Approach for Path Planning of an Underwater Vehicle Manipulator ». In : *Advances in Automation and Robotics Research*. Sous la dir. d'Alexánder MARTÍNEZ et al. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer International Publishing, p. 119-130.
- BARRAQUAND, J. et J.-LATOMBE (sept. 1989). « On Nonholonomic Mobile Robots and Optimal Maneuvering ». In : *Proceedings. IEEE International Symposium on Intelligent Control 1989*, p. 340-347.
- BAUDRY, Jacques (2019). « Les bocages entre sciences et actions publiques ». In : *Revue Science Eaux & Territoires* (30), p. 6-11.
- BAYAR, Gokhan, Marcel BERGERMAN, A Bugra KOKU et al. (2015). « Localization and control of an autonomous orchard vehicle ». In : *Computers and Electronics in Agriculture* 115, p. 118-128.
- BAYAR, Gokhan, Marcel BERGERMAN, Ahmet B KOKU et al. (2016). « Improving the trajectory tracking performance of autonomous orchard vehicles using wheel slip compensation ». In : *Biosystems Engineering* 146, p. 149-164.
- BAYLE, B., J.-Y. FOURQUET et M. RENAUD (juill. 2003a). « Manipulability of Wheeled Mobile Manipulators : Application to Motion Generation ». In : *The International Journal of Robotics Research* 22(7-8), p. 565-581.
- BAYLE, B., J.-Y. FOURQUET, F. LAMIRAUX et al. (sept. 2002). « Kinematic Control of Wheeled Mobile Manipulators ». In : *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1572-1577 vol.2.
- BAYLE, B., J.-Y. FOURQUET et M. RENAUD (sept. 2003). « Kinematic Modelling of Wheeled Mobile Manipulators ». In : *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 69-74 vol.1.
- BAYLE, B., J.-Y. FOURQUET et M. RENAUD (2001). « Using Manipulability with Nonholonomic Mobile Manipulators ». In : *In International Conference on Field and Service Robotics*. Merriam-Webster, p. 343-348.
- BAYLE, B., J.-Y. FOURQUET et M. RENAUD (sept. 2003b). « From Manipulation to Wheeled Mobile Manipulation : Analogies and Differences ». In : *IFAC Proceedings Volumes* 36(17), p. 97-104.
- BAYLE, Bernard (2001). « Modélisation et commande cinématique des manipulateurs mobiles à roues ». Thèse de doct. ANRT.
- BAYLE, Bernard, Jean-Yves FOURQUET et Marc RENAUD (2001). « Génération de mouvements des manipulateurs mobiles ». In : *APII-JESA* 35(6).
- BEALE, S et B SHAFAI (1989). « Robust control system design with a proportional integral observer ». In : *International Journal of control* 50(1), p. 97-111.
- BÉLANGER, Julie, Dafydd PILLING et al. (2019). *The state of the world's biodiversity for food and agriculture*. Food et Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- BELLON MAUREL, Véronique et al. (jan. 2022). *Agriculture et numérique*. INRIA, p. 198.
- BELLON-MAUREL, Véronique et Christian HUYGHE (2016). « L'innovation technologique dans l'agriculture ». In : *Géoéconomie* 80(3), p. 159.
- BERENSON, Dmitry, James KUFFNER et Howie CHOSSET (2008). « An optimization approach to planning for mobile manipulation ». In : *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 1187-1192.
- BERGERMAN, Marcel et al. (2016). « Robotics in Agriculture and Forestry ». en. In : *Springer Handbook of Robotics*. Second. Springer International Publishing, p. 1463-1492.
- BETTINI, Alessandro, Alessandro DE LUCA et Giuseppe ORIOLO (sept. 2000). « An Experimental Comparison of Redundancy Resolution Schemes ». In : *IFAC Proceedings Volumes* 33(27), p. 399-404.
- BEVLY, David M, Jihan RYU et J Christian GERDES (2006). « Integrating INS sensors with GPS measurements for continuous estimation of vehicle sideslip, roll, and tire cornering stiffness ». In : *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 7(4), p. 483-493.
- BOADA, Beatriz L, María Jesús López BOADA et V DIAZ (2016). « Vehicle sideslip angle measurement based on sensor data fusion using an integrated ANFIS and an Unscented Kalman Filter algorithm ». In : *Mechanical Systems and Signal Processing* 72, p. 832-845.
- BOMMARCO, Riccardo, David KLEIJN et Simon G. POTTS (avr. 2013). « Ecological Intensification : Harnessing Ecosystem Services for Food Security ». In : *Trends in Ecology & Evolution* 28(4), p. 230-238.
- BOSTELMAN, Roger, Tsai HONG et Jeremy MARVEL (juin 2016). « Survey of Research for Performance Measurement of Mobile Manipulators ». In : *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* 121.

- BOTTERILL, Tom et al. (sept. 2017). « A Robot System for Pruning Grape Vines : A Robot System for Pruning Grape Vines ». In : *Journal of Field Robotics* 34(6), p. 1100-1122.
- BOUKATTAYA, Mohamed et Tarak DAMAK (2019). « Coordinated Motion Control of a Nonholonomic Mobile Manipulators Using Self-Tuning Fuzzy Logic Control ». In : *19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, p. 176-185.
- BOUKATTAYA, Mohamed, Tarak DAMAK et Mohamed JALLOULI (2011). « Robust adaptive control for mobile manipulators ». In : *International Journal of Automation and Computing* 8(1), p. 8-13.
- BOUKATTAYA, Mohamed, Mohamed JALLOULI et Tarak DAMAK (2012). « On trajectory tracking control for non-holonomic mobile manipulators with dynamic uncertainties and external torque disturbances ». In : *Robotics and autonomous systems* 60(12), p. 1640-1647.
- BOUYARMANE, Karim et Abderrahmane KHEDDAR (2011). « Using a multi-objective controller to synthesize simulated humanoid robot motion with changing contact configurations ». In : *2011 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*, p. 4414-4419.
- BOYD, W. Douglas et al. (sept. 2000). « A Comparison of Robot-Assisted versus Manually Constructed Endoscopic Coronary Anastomosis ». In : *The Annals of Thoracic Surgery* 70(3), p. 839-842.
- BRAHMI, A et al. (2016). « Adaptive backstepping control of mobile manipulator robot based on virtual decomposition approach ». In : *8th international conference on modelling, identification and control (ICMIC)*. IEEE, p. 707-712.
- BRAHMI, Abdelkrim et al. (2013). « Real time control of ANAT robot manipulator using virtual decomposition approach ». In : *3rd International Conference on Systems and Control*, p. 962-967.
- BRAHMI, Abdelkrim et al. (2016). « Adaptive Control of Mobile Manipulator Robot based on Virtual Decomposition Approach. » In : *ICINCO (2)*, p. 254-261.
- BRAHMI, Abdelkrim et al. (2019). « Adaptive backstepping control of multi-mobile manipulators handling a rigid object in coordination ». In : *International Journal of Modelling, Identification and Control* 31(2), p. 169-181.
- BROCKETT, R. W. (1983). « Asymptotic Stability and Feedback Stabilization ». In : *Differential Geometric Control Theory*. Birkhauser, p. 181-191.
- BURGET, Felix, Maren BENNEWITZ et Wolfram BURGARD (2016). « BI²RRT* : An efficient sampling-based path planning framework for task-constrained mobile manipulation ». In : *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, p. 3714-3721.
- BUSS, Samuel R. et Jin-Su KIM (jan. 2005). « Selectively Damped Least Squares for Inverse Kinematics ». In : *Journal of Graphics Tools* 10(3), p. 37-49.
- CACCAVALE, F., S. CHIAVERINI et B. SICILIANO (1997). « Second-Order Kinematic Control of Robot Manipulators with Jacobian Damped Least-Squares Inverse : Theory and Experiments ». In : *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 2(3), p. 188-194.
- CAMPION, G., G. BASTIN et B. D'ANDREA-NOVEL (mai 1993). « Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamic Models of Wheeled Mobile Robots ». In : *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*. T. 1, p. 462-469.
- CARIOU, Christophe, Roland LENAIN et al. (2010). « Autonomous maneuver of a farm vehicle with a trailed implement : motion planner and lateral-longitudinal controllers ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 3819-3824.
- CARIOU, Christophe, Jean-Christophe ROUX et Roland LENAIN (2021). « Laser beam deflection of a 2D LiDAR for canopy detection on an autonomous spraying robot ». In : *7th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*, p. 80-84.
- CARRIKER, KHOSLA et KROGH (1989). « An approach for coordinating mobility and manipulation ». In : *IEEE International Conference on Systems Engineering*, p. 59-63.
- CARRIKER, W.F., P.K. KHOSLA et B.H. KROGH (1990). « The use of simulated annealing to solve the mobile manipulator path planning problem ». In : *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation*. T. 1, p. 204-209.
- CARRIKER, Wayne F, Pradeep K KHOSLA et Bruce H KROGH (1991). « Path planning for mobile manipulators for multiple task execution ». In : *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 7(3), p. 403-408.
- CASILLAS, Jorge et al. (2013). *Interpretability issues in fuzzy modeling*. T. 128. Springer.
- CHALLENGE ROSE (2019). *Challenge Rose*. <http://challenge-rose.fr/>.
- CHAMBRES D'AGRICULTURE, France (fév. 2020). *Agroécologie*. <https://chambres-agriculture.fr/recherche-innovation/agroecologie/>.

- CHAN, Tan Fung et R.V. DUBEY (avr. 1995). « A Weighted Least-Norm Solution Based Scheme for Avoiding Joint Limits for Redundant Joint Manipulators ». In : *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 11(2), p. 286-292.
- CHEN, B-C et F-C HSIEH (2008). « Sideslip angle estimation using extended Kalman filter ». In : *Vehicle System Dynamics* 46(S1), p. 353-364.
- CHEN, Jie et al. (2016). « UKF-based adaptive variable structure observer for vehicle sideslip with dynamic correction ». In : *IET Control Theory & Applications* 10(14), p. 1641-1652.
- CHEN, Mingwu et Ali M. S. ZALZALA (1997). « A genetic approach to motion planning of redundant mobile manipulator systems considering safety and configuration ». In : *Journal of Robotic Systems* 14(7), p. 529-544.
- CHEN, Wen-Hua (2004). « Disturbance observer based control for nonlinear systems ». In : *IEEE/ASME transactions on mechatronics* 9(4), p. 706-710.
- CHEN, Wen-Hua, Donald J BALLANCE et al. (2000). « A nonlinear disturbance observer for robotic manipulators ». In : *IEEE Transactions on industrial Electronics* 47(4), p. 932-938.
- CHEN, Wen-Hua, Jun YANG et al. (2015). « Disturbance-observer-based control and related methods—An overview ». In : *IEEE Transactions on industrial electronics* 63(2), p. 1083-1095.
- CHENG, Meng-Bi et Ching-Chih TSAI (2005). « Hybrid sliding-mode fuzzy neural network tracking control for a wheeled mobile manipulator ». In : *IEEE International Conference on Industrial Technology*, p. 944-949.
- CHEROUAT, H, M BRACI et S DIOP (2005). « Vehicle velocity, side slip angles and yaw rate estimation ». In : *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics. ISIE. T. 1*, p. 349-354.
- CHERUBINI, Andrea et François CHAUMETTE (2013). « Visual navigation of a mobile robot with laser-based collision avoidance ». In : *The International Journal of Robotics Research* 32(2), p. 189-205.
- CHIAVERINI, S. (juin 1997). « Singularity-Robust Task-Priority Redundancy Resolution for Real-Time Kinematic Control of Robot Manipulators ». In : *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 13(3), p. 398-410.
- CHIAVERINI, Stefano (sept. 1994). « Task-Priority Redundancy Resolution with Robustness to Algorithmic Singularities ». In : *IFAC Proceedings Volumes. Fourth IFAC Symposium on Robot Control* 27(14), p. 453-459.
- CHIAVERINI, Stefano, Giuseppe ORIOLO et Anthony A. MACIEJEWSKI (2016). « Redundant Robots ». In : *Springer Handbook of Robotics*. Second. Springer Handbooks. Springer International Publishing, p. 221-243.
- CHINDAMO, Daniel, Basilio LENZO et Marco GADOLA (2018). « On the vehicle sideslip angle estimation : a literature review of methods, models, and innovations ». In : *applied sciences* 8(3), p. 355.
- CHONG, Zhuang Jie et al. (2013). « Synthetic 2D LIDAR for precise vehicle localization in 3D urban environment ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 1554-1559.
- CHUNG, J. H. et S. A. VELINSKY (nov. 1998). « Modeling and Control of a Mobile Manipulator ». In : *Robotica* 16(6), p. 607-613.
- CHUNG, Jae H., Steven A. VELINSKY et Ronald A. HESS (déc. 1998). « Interaction Control of a Redundant Mobile Manipulator ». In : *The International Journal of Robotics Research* 17(12), p. 1302-1309.
- CIESLAK, Patryk, Pere RIDAO et Mariusz GIERGIEL (2015). « Autonomous underwater panel operation by GIRONA500 UVMS : A practical approach to autonomous underwater manipulation ». In : *IEEE International conference on robotics and automation (ICRA)*, p. 529-536.
- CLEARY, K. et D. TESAR (mai 1990). « Incorporating Multiple Criteria in the Operation of Redundant Manipulators ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings*, 618-624 vol.1.
- COLOMBO, Raffaele et al. (2019). « Parameterized Model Predictive Control of a Nonholonomic Mobile Manipulator : A Terminal Constraint-Free Approach ». In : *2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, p. 1437-1442.
- COROT, Léna (2022). *John Deere dévoile son tracteur autonome commercialisé courant 2022*. <https://www.usine-digitale.fr/article/ces-2022-john-deere-devoile-son-tracteur-autonome-commercialise-courant-2022.N1173842>.
- CRONIN, G. M., S. S. BORG et M. T. DUNN (2008). « Using Video Image Analysis to Count Hens in Cages and Reduce Egg Breakage on Collection Belts ». In : *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48(7), p. 768.
- DAKHLALLAH, Jamil et al. (2007). « Heavy vehicle state estimation and rollover risk evaluation using kalman filter and sliding mode observer ». In : *2007 European Control Conference (ECC)*. IEEE, p. 3444-3449.
- DANTON, Adrien et al. (2020). « Development of a spraying robot for precision agriculture : An edge following approach ». In : *IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, p. 267-272.
- DAR, Tehmoor M et Raul G LONGORIA (2010). « Slip estimation for small-scale robotic tracked vehicles ». In : *Proceedings of the 2010 American control conference*. IEEE, p. 6816-6821.

- DAWSON, Leigh (2021). *Advanced core processing : New robot technology appealing for apple growers*. <https://www.monash.edu/news/articles/advanced-core-processing-new-robot-technology-appealing-for-apple-growers>.
- DE LASA, Martin, Igor MORDATCH et Aaron HERTZMANN (2010). « Feature-based locomotion controllers ». In : *ACM transactions on graphics (TOG)* 29(4), p. 1-10.
- DE LUCA, A. et G. ORIOLO (août 1990). « The Reduced Gradient Method for Solving Redundancy in Robot Arms ». In : *IFAC Proceedings Volumes*. 11th IFAC World Congress on Automatic Control, 23(8, Part 5), p. 133-138.
- DE LUCA, A., G. ORIOLO et P.R. GIORDANO (mai 2006). « Kinematic Modeling and Redundancy Resolution for Nonholonomic Mobile Manipulators ». In : *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA*. P. 1867-1873.
- DE LUCA, Alessandro, Giuseppe ORIOLO et Paolo Robuffo GIORDANO (mars 2007). « Image-Based Visual Servoing Schemes for Nonholonomic Mobile Manipulators ». In : *Robotica* 25(2), p. 131-145.
- DE LUCA, Alessandro, Giuseppe ORIOLO et Paolo ROBUFFO GIORDANO (mai 2010). « Kinematic Control of Nonholonomic Mobile Manipulators in the Presence of Steering Wheels ». In : *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 1792-1798.
- DECRÉ, Wilm et al. (2009). « Extending iTaSC to support inequality constraints and non-instantaneous task specification ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 964-971.
- DEEPAK, B. B. V. L. et Dayal R. PARHI (mars 2016). « Control of an Automated Mobile Manipulator Using Artificial Immune System ». In : *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence* 28(1-2), p. 417-439.
- DEL PRETE, Andrea, Nicolas MANSARD et al. (2014). « Partial force control of constrained floating-base robots ». In : *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 3227-3232.
- DEL PRETE, Andrea, Francesco ROMANO et al. (2014). « Prioritized optimal control ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, p. 2540-2545.
- DEREMETZ, Mathieu et al. (2019). « A Generic Control Framework for Mobile Robots Edge Following. » In : *ICINCO (2)*, p. 104-113.
- DI VITO, Daniele, Ciro NATALE et Gianluca ANTONELLI (juill. 2017). « A Comparison of Damped Least Squares Algorithms for Inverse Kinematics of Robot Manipulators ». In : *IFAC-PapersOnLine*. 20th IFAC World Congress 50(1), p. 6869-6874.
- DIAN-SHENG, SUN et YJ ZHANG (2017). « Improved third-order time-varying parameters nonlinear ESO restraining the derivative peaking phenomenon ». In : *Electric Machines and Control* 21(9), p. 55-62.
- DICTE, Normand (2008). *L'agriculture bio, championne de la qualité et de la fertilité des sols*. <https://www.terre-net.fr/observatoire-technique-culturelle/strategie-technique-culturelle/article/qualite-sol-agriculture-biologique-217-46744.html>.
- DIETRICH, Alexander, Thomas WIMBOCK, Alin ALBU-SCHAFFER et al. (2012). « Reactive whole-body control : Dynamic mobile manipulation using a large number of actuated degrees of freedom ». In : *IEEE Robotics & Automation Magazine* 19(2), p. 20-33.
- DIETRICH, Alexander, Thomas WIMBOCK, Holger TAUBIG et al. (mai 2011). « Extensions to Reactive Self-Collision Avoidance for Torque and Position Controlled Humanoids ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Shanghai, China, p. 3455-3462.
- DIETRICH, Alexander, Thomas WIMBÖCK et Alin ALBU-SCHÄFFER (2011). « Dynamic whole-body mobile manipulation with a torque controlled humanoid robot via impedance control laws ». In : *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 3199-3206.
- DING, Nenggen et al. (2014). « An extended Luenberger observer for estimation of vehicle sideslip angle and road friction ». In : *International Journal of Vehicle Design* 66(4), p. 385-414.
- DUBOS, Camille et al. (2019). « Motion Coordination of a Mobile Manipulator Within Control Framework : Application to Phenotyping ». In : *ROMANSY 22 – Robot Design, Dynamics and Control*. Sous la dir. de Vigen ARAKELIAN et Philippe WENGER. Springer International Publishing, p. 230-237.
- DUGOFF, Howard, P. S. FANCHER et Leonard SEGEL (1970). « An Analysis of Tire Traction Properties and Their Influence on Vehicle Dynamic Performance ». In : *SAE Transactions* 79, p. 1219-1243.
- DUQUEF, Debastien (2018). *Tracteur Autonome Case IH Enfin Des Essais Grandeur Nature !* <https://www.terre-net.fr/materiel-agricole/tracteur-quad/article/en-route-pour-des-essais-grandeur-nature-207-136392.html>.
- DURAND-PETITEVILLE, Adrien et al. (oct. 2018). « Tree Detection With Low-Cost Three-Dimensional Sensors for Autonomous Navigation in Orchards ». In : *IEEE Robotics and Automation Letters* 3(4), p. 3876-3883.
- EGELAND, O. (oct. 1987). « Task-Space Tracking with Redundant Manipulators ». In : *IEEE Journal on Robotics and Automation* 3(5), p. 471-475.

- EGERSTEDT, M., X. HU et A. STOTSKY (juin 1998). « Control of a Car-like Robot Using a Virtual Vehicle Approach ». In : *AMC'98 - Coimbra. 1998 5th International Workshop on Advanced Motion Control. Proceedings*, p. 254-260.
- EGERSTEDT, M. et Xiaoming HU (avr. 2000). « Coordinated Trajectory Following for Mobile Manipulation ». In : *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings*. T. 4, p. 3479-3484.
- ESCANDE, Adrien, Nicolas MANSARD et Pierre-Brice WIEBER (2010). « Fast resolution of hierarchized inverse kinematics with inequality constraints ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 3733-3738.
- ESCANDE, Adrien, Nicolas MANSARD et Pierre-Brice WIEBER (2014). « Hierarchical quadratic programming : Fast online humanoid-robot motion generation ». In : *The International Journal of Robotics Research* 33(7), p. 1006-1028.
- FAREH, Raouf, Sofiane KHADRAOUI et al. (2016). « Tracking Control of mobile manipulators based on decentralized control ». In : *Proceedings of the 3rd International Conference on Control, Dynamic Systems, and Robotics (CDSR'16) Ottawa, Canada*.
- FAREH, Raouf, Mohamad R SAAD et al. (2019). « Trajectory tracking and stability analysis for mobile manipulators based on decentralized control ». In : *Robotica* 37(10), p. 1732-1749.
- FARELO, F., R. ALQASEMI et R. DUBEY (mai 2010). « Optimized Dual-Trajectory Tracking Control of a 9-DoF WMRA System for ADL Tasks ». In : *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 1786-1791.
- FARRELLY, Jim et Peter WELLSTEAD (1996). « Estimation of vehicle lateral velocity ». In : *IEEE International Conference on Control Applications*. P. 552-557.
- FARRONI, Flavio et al. (2015). « A comparison among different methods to estimate vehicle sideslip angle ». In : *Proceedings of the World Congress on Engineering*. T. 2.
- FLÉCHER, E. et al. (2019). « Visual Predictive Control of Robotic Arms with Overlapping Workspace : » in : *Proceedings of the 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*. SCITEPRESS - Science and Technology Publications, p. 130-137.
- FOULON, Gilles, J. -Yves FOURQUET et Marc RENAUD (mars 1999). « Coordinating Mobility and Manipulation Using Nonholonomic Mobile Manipulators ». In : *Control Engineering Practice* 7(3), p. 391-399.
- FOURQUET, Jean-Yves et Marc RENAUD (2000). « Coordinated Control of a Nonholonomic Mobile Manipulator ». In : *Experimental Robotics VI*. T. 250. Springer London : London, p. 139-149.
- FRASCH, Janick V et al. (2013). « Moving horizon observation for autonomous operation of agricultural vehicles ». In : *European Control Conference (ECC)*, p. 4148-4153.
- FRUCHARD, Matthieu, Pascal MORIN et Claude SAMSON (août 2006). « A Framework for the Control of Nonholonomic Mobile Manipulators ». In : *The International Journal of Robotics Research* 25(8), p. 745-780.
- GALICKI, Mirosław (2011). « Task space control of mobile manipulators ». In : *Robotica* 29(2), p. 221-232.
- GALICKI, Mirosław (2012). « Two-stage constrained control of mobile manipulators ». In : *Mechanism and Machine Theory* 54, p. 18-40.
- GALICKI, Mirosław (2019). « Optimal cascaded control of mobile manipulators ». In : *Nonlinear Dynamics* 96(2), p. 1367-1389.
- GAMMELL, Jonathan D., Siddhartha S. SRINIVASA et Timothy D. BARFOOT (2014). « Informed RRT* : Optimal sampling-based path planning focused via direct sampling of an admissible ellipsoidal heuristic ». In : *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 2997-3004.
- GAO, Chunyan, Minglu ZHANG et Lingyu SUN (2006). « Motion planning and coordinated control for mobile manipulators ». In : *9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, p. 1-6.
- GAO, Xiaojie et al. (2010). « Sideslip angle estimation based on input-output linearisation with tire-road friction adaptation ». In : *Vehicle System Dynamics* 48(2), p. 217-234.
- GAO, Zhiqiang (2006). « Active disturbance rejection control : a paradigm shift in feedback control system design ». In : *2006 American control conference*. IEEE, 7-pp.
- GARDNER, John F. et Steven A. VELINSKY (2000). « Kinematics of Mobile Manipulators and Implications for Design ». In : *Journal of Robotic Systems* 17(6), p. 309-320.
- GARRIDO, Miguel et al. (déc. 2015). « 3D Maize Plant Reconstruction Based on Georeferenced Overlapping LiDAR Point Clouds ». In : *Remote Sensing* 7(12), p. 17077-17096.
- GAULAY, Samuel (2019). *Robocrop : le premier robot cueilleur de framboise*. <https://www.magictech.io/blog/actus-tech/robotique/robocrop-le-premier-robot-cueilleur-de-framboise/>.
- GÉOCONFLUENCE (2022). *Remembrement*. <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/remembrement>.

- GONÇALVES, Vinicius Mariano et al. (2016). « Parsimonious Kinematic Control of Highly Redundant Robots ». In : *IEEE Robotics and Automation Letters* 1(1), p. 65-72.
- GONZALEZ, R et al. (2009). « Localization and control of tracked mobile robots under slip conditions ». In : *IEEE International Conference on Mechatronics*, p. 1-6.
- GREVILLE, T. N. E. (jan. 1959). « The Pseudoinverse of a Rectangular or Singular Matrix and Its Application to the Solution of Systems of Linear Equations ». In : *SIAM Review* 1(1), p. 38-43.
- GRIFFOUL, Bernard (2018). *Une offre multiple de robots repousse-fourrage*. <https://www.reussir.fr/machinisme/une-offre-multiple-de-robots-repousse-fourrage>.
- GUO, Shuai et al. (mars 2017). « Tip-Over Stability Analysis for a Wheeled Mobile Manipulator ». In : *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 139(5), p. 054501.
- HAN, Jingqing (2009). « From PID to active disturbance rejection control ». In : *IEEE transactions on Industrial Electronics* 56(3), p. 900-906.
- HANAFUSA, H., T. YOSHIKAWA et Y. NAKAMURA (août 1981). « Analysis and Control of Articulated Robot Arms with Redundancy ». In : *IFAC Proceedings Volumes. 8th IFAC World Congress on Control Science and Technology for the Progress of Society* 14(2), p. 1927-1932.
- HANAPPE, Peter (2018). « Le permaculteur et son robot : les microfermes et la gouvernance des nouvelles technologies ». In : *tic & société* 12(1), p. 229-253.
- HARARI, Yuval Noah (2015). *Sapiens. Une brève histoire de l'humanité*. Albin Michel.
- HAYASHI, Shigehiko et al. (2011). « Development of Circulating-Type Movable Bench System for Strawberry Cultivation ». In : *Japan Agricultural Research Quarterly : JARQ* 45(3), p. 285-293.
- HIEMER, Marcus et al. (2005). *Determination of the vehicle body side slip angle with non-linear observer strategies*. Rapp. tech. SAE Technical Paper.
- HILL, Ashley et al. (2020). « Online gain setting method for path tracking using CMA-ES : Application to off-road mobile robot control ». In : *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, p. 7697-7702.
- HIRAMATSU, Toshifumi et al. (2019). « Path-Tracking controller for tracked mobile robot on rough terrain ». In : *International Journal of Electrical and Computer Engineering* 13(2), p. 59-64.
- HOOTSMANS, N.A.M. et S. DUBOWSKY (1991). « Large motion control of mobile manipulators including vehicle suspension characteristics ». In : *Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation. T. 3*, p. 2336-2341.
- HOOTSMANS, N.A.M., S. DUBOWSKY et P.Z. MO (1992). « The experimental performance of a mobile manipulator control algorithm ». In : *Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation. T. 3*, p. 1948-1954.
- HOOTSMANS, Norbert Antony Murray et al. (1992). « The motion control manipulators on mobile vehicles ». Thèse de doct. Massachusetts Institute of Technology.
- HOSTETTER, GH et JS MEDITCH (1973). « On the generalization of observers to systems with unmeasurable, unknown inputs ». In : *Automatica* 9(6), p. 721-724.
- HSU, David et al. (2003). « The bridge test for sampling narrow passages with probabilistic roadmap planners ». In : *2003 IEEE international conference on robotics and automation. T. 3*, p. 4420-4426.
- HU, Chen et al. (2016). « Optimal path planning for mobile manipulator based on manipulability and localizability ». In : *IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)*, p. 638-643.
- HUANG, Qiang, Kazuo TANIE et Shigeki SUGANO (août 2000). « Coordinated Motion Planning for a Mobile Manipulator Considering Stability and Manipulation ». In : *The International Journal of Robotics Research* 19(8), p. 732-742.
- IBERRAKEN, Dimia et al. (2022). « Autonomous Vineyard Tracking Using a Four-Wheel-Steering Mobile Robot and a 2D LiDAR ». In : *AgriEngineering* 4(4), p. 826-846.
- IDE, Satoshi et al. (2011). « Real-time trajectory planning for mobile manipulator using model predictive control with constraints ». In : *2011 8th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, p. 244-249.
- INSEE (2017). *Les Revenus d'activité Des Non-Salariés En 2017 - Insee Première - 1781*. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4246305#graphique-figure2>.
- INSTITUT NATIONAL DU CANCER (2014). *Pesticides et risques de cancers*. <https://www.e-cancer.fr/Professionnels-de-sante/Facteurs-de-risque-et-de-protection/Environnement/Pesticides>.
- INTERNATIONAL, SRI (2020). *The man, the myth, the legend : Meet Shakey the robot, the world's first AI-based robot*. <https://www.sri.com/case-studies/the-man-the-myth-the-legend-meet-shakey-the-robot-the-worlds-first-ai-based-robot/>.

- JACOMY, Bruno (2015). *Une histoire des techniques*. Points.
- JAQUIER, Noémie et al. (juin 2018). « Geometry-Aware Tracking of Manipulability Ellipsoids ». In : *Robotics : Science and Systems XIV*. Robotics : Science and Systems Foundation.
- JIA, Y. et al. (sept. 2014). « Coordinated Motion Control of a Nonholonomic Mobile Manipulator for Accurate Motion Tracking ». In : *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 1635-1640.
- JIA, Yunyi, Ning XI et Erick NIEVES (mai 2014). « Coordination of a Nonholonomic Mobile Platform and an On-Board Manipulator ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Hong Kong, China, p. 4356-4361.
- JIANG, Kun, Alessandro CORRÊA VICTORINO et Ali CHARARA (2015). « Adaptive estimation of vehicle dynamics through RLS and Kalman filter approaches ». In : *IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, p. 1741-1746.
- JIMENEZ-LOZANO, Joel et Bill GOODWINE (2011). « Nonlinear Disturbance Decoupling for a Mobile Robotic Manipulator over Uneven Terrain ». In : *IFAC Proceedings Volumes 44(1)*. 18th IFAC World Congress, p. 6930-6936.
- JIN, Jie et Jianqiang GONG (2021). « An interference-tolerant fast convergence zeroing neural network for dynamic matrix inversion and its application to mobile manipulator path tracking ». In : *Alexandria Engineering Journal* 60(1), p. 659-669.
- JIN, Ning et Derong LIU (2008). « Wavelet basis function neural networks for sequential learning ». In : *IEEE transactions on neural networks* 19(3), p. 523-528.
- JOUDELAT, François (2019). *Le robot d'expérimentation BettyBot présent au SIMA 2019*. <https://www.itbfr.org/tous-les-articles/article/news/le-robot-dexperimentation-bettybot-present-au-sima-2019/>.
- JULIER, Simon J et Jeffrey K UHLMANN (2004). « Unscented filtering and nonlinear estimation ». In : *Proceedings of the IEEE* 92(3), p. 401-422.
- KALMAN, Rudolph Emil (1960). « A new approach to linear filtering and prediction problems ». In : *Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering* 82, p. 35-45.
- KANDEPU, Rambabu, Bjarne FOSS et Lars IMSLAND (2008). « Applying the unscented Kalman filter for nonlinear state estimation ». In : *Journal of process control* 18(7-8), p. 753-768.
- KANG, Sungchul et al. (2001). « Utilization of inertial effect in damping-based posture control of mobile manipulator ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164)*. T. 2, p. 1277-1282.
- KANOUN, Oussama, Florent LAMIRAUX et Pierre-Brice WIEBER (2011). « Kinematic Control of Redundant Manipulators : Generalizing the Task-Priority Framework to Inequality Task ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 27(4), p. 785-792.
- KANOUN, Oussama, Florent LAMIRAUX, Pierre-Brice WIEBER et al. (2009). « Prioritizing linear equality and inequality systems : Application to local motion planning for redundant robots ». In : *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 2939-2944.
- KARAMAN, Sertac et Emilio FRAZZOLI (2011). « Sampling-based algorithms for optimal motion planning ». In : *The international journal of robotics research* 30(7), p. 846-894.
- KAVRAKI, L.E. et al. (août 1996). « Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-Dimensional Configuration Spaces ». In : *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 12(4), p. 566-580.
- KAYACAN, Erkan et al. (2018). « High-precision control of tracked field robots in the presence of unknown traction coefficients ». In : *Journal of Field Robotics* 35(7), p. 1050-1062.
- KEITH, François et al. (2011). « Analysis of the discontinuities in prioritized tasks-space control under discrete task scheduling operations ». In : *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 3887-3892.
- KENNEDY, James et Russell EBERHART (1995). « Particle swarm optimization ». In : *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*. T. 4, p. 1942-1948.
- KHALIL, Hassan K (2008). « High-gain observers in nonlinear feedback control ». In : *International conference on control, automation and systems*, p. 993-1015.
- KHAN, Ameer Hamza et al. (2020). « Tracking control of redundant mobile manipulator : An RNN based metaheuristic approach ». In : *Neurocomputing* 400, p. 272-284.
- KHATIB, Oussama (1990). « Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots ». In : *Autonomous Robot Vehicles*. Sous la dir. d'Ingemar J. COX et Gordon T. WILFONG. Springer New York : New York, NY, p. 396-404.
- KIENCKE, Uwe et Armin DAISS (1997). « Observation of lateral vehicle dynamics ». In : *Control Engineering Practice* 5(8), p. 1145-1150.

- KIM, Euntai (2002). « A fuzzy disturbance observer and its application to control ». In : *IEEE Transactions on fuzzy systems* 10(1), p. 77-84.
- KIM, Kyung-Soo, Keun-Ho REW et Soohyun KIM (2010). « Disturbance observer for estimating higher order disturbances in time series expansion ». In : *IEEE Transactions on automatic control* 55(8), p. 1905-1911.
- KIM, Sanghyun et al. (2019). « Whole-body Control of Non-holonomic Mobile Manipulator Based on Hierarchical Quadratic Programming and Continuous Task Transition ». In : *2019 IEEE 4th International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)*, p. 414-419.
- KLEIN, Charles A. et Bruce E. BLAHO (juin 1987). « Dexterity Measures for the Design and Control of Kinematically Redundant Manipulators ». In : *The International Journal of Robotics Research* 6(2), p. 72-83.
- KLEMM, Sebastian et al. (2015). « RRT codestar -Connect : Faster, asymptotically optimal motion planning ». In : *2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, p. 1670-1677.
- KO, Jong-Sun et Byung-Moon HAN (2005). « Precision position control of PMSM using neural network disturbance observer and parameter compensator ». In : *IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference*, p. 1313-1319.
- KOENIG, Damien et Saïd MAMMAR (2002). « Design of proportional-integral observer for unknown input descriptor systems ». In : *IEEE transactions on automatic control* 47(12), p. 2057-2062.
- KOHONEN, Teuvo (jan. 1982). « Self-Organized Formation of Topologically Correct Feature Maps ». In : *Biological Cybernetics* 43(1), p. 59-69.
- KORAYEM, MH, AM SHAFEI et E SEIDI (2014). « Symbolic derivation of governing equations for dual-arm mobile manipulators used in fruit-picking and the pruning of tall trees ». In : *Computers and electronics in agriculture* 105, p. 95-102.
- KOS, Tomislav, Ivan MARKEZIC et Josip POKRAJIC (2010). « Effects of multipath reception on GPS positioning performance ». In : *Proceedings ELMAR-2010*. IEEE, p. 399-402.
- KRAFT, Dieter (sept. 1994). « Algorithm 733 : TOMP-Fortran Modules for Optimal Control Calculations ». In : *ACM Transactions on Mathematical Software* 20(3), p. 262-281.
- KRAUS, Tom et al. (2013). « Moving horizon estimation and nonlinear model predictive control for autonomous agricultural vehicles ». In : *Computers and electronics in agriculture* 98, p. 25-33.
- KUFFNER, J.J. et S.M. LAVALLE (2000). « RRT-connect : An efficient approach to single-query path planning ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings*. T. 2, p. 995-1001.
- KUWAHARA, Hiroaki et Toshiyuki MURAKAMI (2022). « Tracked Vehicle Velocity Estimation by Disturbance Observer and Machine Learning, and its Application to Driving Force Control for Slippage Suppression ». In : *IEEE Journal of Industry Applications* 11(1), p. 69-75.
- KWON, Dong-Soo et al. (2000). « Design of a teleoperation controller for an underwater manipulator ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. T. 4, p. 3114-3119.
- KWON, SangJoo et Wan Kyun CHUNG (2003). « A discrete-time design and analysis of perturbation observer for motion control applications ». In : *IEEE Transactions on control systems technology* 11(3), p. 399-407.
- LACEVIC, Bakir et Paolo ROCCO (2010). « Kinetostatic danger field - a novel safety assessment for human-robot interaction ». In : *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 2169-2174.
- LAMBERT, Antoire (2017). *Dossier Space : La robotique au service de l'éleveur*. Rapp. tech.
- LAUMOND, Jean-Paul (2001). *La robotique mobile*. Hermes Science Publications.
- LAVALLE, Steven M. (1998). « Rapidly-exploring random trees : a new tool for path planning ». In : *The annual research report*.
- LE CORE, Maude (2017). *ROBOTISATION / Un robot cueilleur de tomate*. <https://www.reussir.fr/fruits-legumes/un-robot-cueilleur-de-tomate>.
- LEE, Choon-Young et al. (2004). « Motion control of mobile manipulator based on neural networks and error compensation ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation. ICRA*. T. 5, p. 4627-4632.
- LEE, Ho Seong et Masayoshi TOMIZUKA (1996). « Robust motion controller design for high-accuracy positioning systems ». In : *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 43(1), p. 48-55.
- LEE, KangKyu et al. (mai 2017). « Inverse Kinematics with Strict Nonholonomic Constraints on Mobile Manipulator ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, p. 2469-2474.
- LEE, Minh et Hyeung-Sik CHOI (2000). « A robust neural controller for underwater robot manipulators ». In : *IEEE Transactions on Neural Networks* 11(6), p. 1465-1470.
- LEMAIRE, Thomas et al. (2007). « Vision-based slam : Stereo and monocular approaches ». In : *International Journal of Computer Vision* 74(3), p. 343-364.
- LENAIN, Roland (2011). « Commande de robots à dynamiques incertaines : le cas des robots mobiles tout-terrain ». Thèse de doct. Cemagref.

- LENAIN, Roland, Mathieu DEREMETZ et al. (2017). « Robust sideslip angles observer for accurate off-road path tracking control ». In : *Advanced Robotics* 31(9), p. 453-467.
- LENAIN, Roland, Benoit THUILOT, Christophe CARIOU et al. (2006). « High accuracy path tracking for vehicles in presence of sliding : Application to farm vehicle automatic guidance for agricultural tasks ». In : *Autonomous robots* 21(1), p. 79-97.
- LENAIN, Roland, Benoit THUILOT, Christophe CARIOU et al. (jan. 2007). « Adaptive and Predictive Path Tracking Control for Off-Road Mobile Robots ». In : *European Journal of Control* 13(4), p. 419-439.
- LENAIN, Roland, Benoit THUILOT, Christophe CARIOU et al. (2010). « Mixed kinematic and dynamic sideslip angle observer for accurate control of fast off-road mobile robots ». In : *Journal of Field Robotics* 27(2), p. 181-196.
- LENAIN, Roland, Benoit THUILOT, Oliver HACH et al. (2011). « High-speed mobile robot control in off-road conditions : a multi-model based adaptive approach ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 6143-6149.
- LEVY, A.V. et Susana GÓMEZ (jan. 1985). « Numerical Optimization ». In : chap. The tunneling method applied to global optimization, p. 213-244.
- LI, Chunli et al. (2021). « Non-singular terminal sliding mode control of an omnidirectional mobile manipulator based on extended state observer ». In : *International Journal of Intelligent Robotics and Applications* 5(2), p. 219-234.
- LI, Jun-tao (2016). « Design Optimization of Amazon Robotics ». In : *Automation, Control and Intelligent Systems* 4(2), p. 48.
- LI, Qinghua et al. (2020). « A hierarchical motion planning for mobile manipulator ». In : *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 15(9), p. 1390-1399.
- LI, Xin-Chun et al. (2005). « A coordinated and hierarchical path planning approach for mobile manipulators ». In : *2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. T. 5, p. 3013-3018.
- LI, Zhijun et Shuzhi Sam GE (2013a). *Fundamentals in Modeling and Control of Mobile Manipulators*. Zeroth. CRC Press.
- LI, Zhijun et Shuzhi Sam GE (mai 2013b). *Fundamentals in modeling and control of mobile manipulators*. CRC Press.
- LI, Zhijun, Chenguang YANG et Jiangong GU (2007). « Neuro-adaptive compliant force/motion control of uncertain constrained wheeled mobile manipulators ». In : *International Journal of Robotics and Automation* 22(3), p. 206-214.
- LIEGEOIS, Alain (déc. 1977). « Automatic Supervisory Control of the Configuration and Behavior of Multibody Mechanisms. » In : *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - TSMC* 7, p. 868-871.
- LIN, Sheng et A.A. GOLDENBERG (sept. 2001). « Neural-Network Control of Mobile Manipulators ». In : *IEEE Transactions on Neural Networks* 12(5), p. 1121-1133.
- LIPKIN, H. et J. DUFFY (1988). « Hybrid Twist And Wrench Control for a Robotic Manipulator ». In : *Trans. ASME J. Mech. Transm. Automation Design* 110, p. 138-144.
- LIU, Delong (déc. 2018). « Millimeter and submillimeter wave spectroscopy of low-lying vibrational states of normal-propyl cyanide and applications to radio astronomy ». Thèse de doct. Université Paul Sabatier - Toulouse III.
- LIU, Wei et al. (2012). « Side-slip angle estimation for vehicle electronic stability control based on sliding mode observer ». In : *Proceedings of 2012 International Conference on Measurement, Information and Control*. T. 2. IEEE, p. 992-995.
- LIU, Yugang et Yangmin LI (2005). « Sliding mode adaptive neural-network control for nonholonomic mobile modular manipulators ». In : *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 44(3), p. 203-224.
- LIU, Yugang et Yangmin LI (2006). « Dynamic modeling and adaptive neural-fuzzy control for nonholonomic mobile manipulators moving on a slope ». In : *International Journal of Control, Automation, and Systems* 4(2), p. 197-203.
- LOGOTHETIS, Michalis et al. (2018). « A model predictive control approach for vision-based object grasping via mobile manipulator ». In : *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, p. 1-6.
- LONGO, Domenico et Giovanni MUSCATO (déc. 2013). « Design and Simulation of Two Robotic Systems for Automatic Artichoke Harvesting ». In : *Robotics* 2(4), p. 217-230.
- LUNENBERGER, David (1971). « An introduction to observers ». In : *IEEE Transactions on automatic control* 16(6), p. 596-602.
- LUNENBERGER, David G (1964). « Observing the state of a linear system ». In : *IEEE transactions on military electronics* 8(2), p. 74-80.

- LUGHOFER, Edwin (2013). « On-line assurance of interpretability criteria in evolving fuzzy systems—achievements, new concepts and open issues ». In : *Information sciences* 251, p. 22-46.
- LUKOWICZ, Céline et al. (2018). « Metabolic Effects of a Chronic Dietary Exposure to a Low-Dose Pesticide Cocktail in Mice : Sexual Dimorphism and Role of the Constitutive Androstane Receptor ». In : *Environmental Health Perspectives* 126(6), p. 067007.
- MACIEJEWSKI, Anthony A. et Charles A. KLEIN (sept. 1985). « Obstacle Avoidance for Kinematically Redundant Manipulators in Dynamically Varying Environments ». In : *The International Journal of Robotics Research* 4(3), p. 109-117.
- MACIEJEWSKI, Anthony A. et Charles A. KLEIN (1988). « Numerical Filtering for the Operation of Robotic Manipulators through Kinematically Singular Configurations ». In : *Journal of Robotic Systems* 5(6), p. 527-552.
- MANSARD, N. et F. CHAUMETTE (2004). « Tasks sequencing for visual servoing ». In : *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. T. 1, p. 992-997.
- MANSARD, Nicolas (2012). « A dedicated solver for fast operational-space inverse dynamics ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 4943-4949.
- MANSARD, Nicolas, Oussama KHATIB et Abderrahmane KHEDDAR (2009). « A unified approach to integrate unilateral constraints in the stack of tasks ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 25(3), p. 670-685.
- MANSARD, Nicolas, Anthony REMAZEILLES et François CHAUMETTE (2009). « Continuity of varying-feature-set control laws ». In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 54(11), p. 2493-2505.
- MARAIS, Wilhelm Johan, Stefan B WILLIAMS et Oscar PIZARRO (2022). « Maximising Wrenches for Kinematically Redundant Systems with Experiments on UVMS ». In : *arXiv preprint arXiv :2202.13535*.
- MASHALI, M., R. ALQASEMI et R. DUBEY (déc. 2014). « Task Priority Based Dual-Trajectory Control for Redundant Mobile Manipulators ». In : *2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2014)*, p. 1457-1462.
- MASHALI, Mustafa (2015). « Kinematic Control of Redundant Mobile Manipulators ». Thèse de doct. University of South Florida.
- MASHALI, Mustafa, Rdwan ALQASEMI et Rajiv DUBEY (juill. 2016). « Mobile Manipulator Dual-Trajectory Tracking Using Control Variables Introduced to End-Effector Task Vector ». In : *2016 World Automation Congress (WAC)*, p. 1-6.
- MASHALI, Mustafa, Lei WU et al. (2018). « Controlling a Non-Holonomic Mobile Manipulator in a Constrained Floor Space ». In : *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, p. 725-731.
- MATTHEWS, Stephen G et al. (2017). « Automated tracking to measure behavioural changes in pigs for health and welfare monitoring ». In : *Scientific reports* 7(1), p. 1-12.
- MAZUR, Alicja et J PLASKONKA (2012). « The Serret–Frenet parametrization in a control of a mobile manipulator of (nh, h) type ». In : *IFAC Proceedings Volumes* 45(22), p. 405-410.
- MELZI, S yishax et E SABBIONI (2011). « On the vehicle sideslip angle estimation through neural networks : Numerical and experimental results ». In : *Mechanical Systems and Signal Processing* 25(6), p. 2005-2019.
- MERLET, Jean-Pierre, Clément GOSSELIN et Tian HUANG (2016). « Parallel Mechanisms ». In : *Springer Handbook of Robotics*. Second. Springer Handbooks. Springer International Publishing, p. 443-463.
- METROPOLIS, Nicholas et al. (1953). « Equation of State Calculations by Fast Computing Machines ». In : *The Journal of Chemical Physics* 21(6), p. 1087-1092.
- MIKLOSOVIC, Robert, Aaron RADKE et Zhiqiang GAO (2006). « Discrete implementation and generalization of the extended state observer ». In : *2006 American control conference*. IEEE, 6-pp.
- MIKSCH, W. et D. SCHROEDER (mai 1992). « Performance-Functional Based Controller Design for a Mobile Manipulator ». In : *Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 227-232 vol.1.
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE (2012). *La Diversification Des Assolements En France : Intérêts, Freins et Enjeux*. Rapp. tech.
- MINISTÈRE DES SOLIDARITÉS ET DE LA SANTÉ (2019). *Effets sur la santé d'une exposition à des pesticides*. <https://solidarites-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/risques-microbiologiques-physiques-et-chimiques/pesticides/article/effets-sur-la-sante-d-une-exposition-a-des-pesticides>.
- MINNITI, Maria Vittoria et al. (oct. 2019). « Whole-Body MPC for a Dynamically Stable Mobile Manipulator ». In : *IEEE Robotics and Automation Letters* 4(4), p. 3687-3694.
- MOGHADAM, Peyman, Wijerupage Sardha WIJESOMA et Dong Jun FENG (2008). « Improving path planning and mapping based on stereo vision and lidar ». In : *10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, p. 384-389.

- MOOSAVIAN, S Ali A et Arash KALANTARI (2008). « Experimental slip estimation for exact kinematics modeling and control of a tracked mobile robot ». In : *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 95-100.
- MORAS, Julien, Véronique CHERFAOUI et Philippe BONNIFAIT (2011). « Credibilist occupancy grids for vehicle perception in dynamic environments ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 84-89.
- MORIN, P. et C. SAMSON (sept. 2003). « Practical Stabilization of Driftless Systems on Lie Groups : The Transverse Function Approach ». In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 48(9), p. 1496-1508.
- MUELLER-SIM, Tim et al. (mai 2017). « The Robotanist : A Ground-Based Agricultural Robot for High-Throughput Crop Phenotyping ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, p. 3634-3639.
- NAGATANI, Keiji, Seiga KIRIBAYASHI et al. (2013). « Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots ». In : *Journal of Field Robotics* 30(1), p. 44-63.
- NAGATANI, Keiji et Shin'ichi YUTA (1996). « Door-Opening Behavior of an Autonomous Mobile Manipulator by Sequence of Action Primitives ». In : *J. Field Robotics* 13, p. 709-721.
- NAIT-CHABANE, Khair (jan. 2006). « Exploitation de La Redondance Pour La Commande Coordinée d'un Manipulateur Mobile d'assistance Aux Personnes Handicapées. » Thèse de doct. Université d'Evry-Val d'Essonne.
- NAKAMURA, Yoshihiko et Hideo HANAFUSA (1986). « Inverse Kinematic Solutions With Singularity Robustness for Robot Manipulator Control ». In : *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 108(3), p. 163.
- NASSAL, UM, M DAMM et TC LUETH (1994). *Mobile Manipulation : A Mobile Platform Supporting a Manipulator System for an Autonomous Robot*. Society of Manufacturing Engineers.
- NASSAL, Uwe M (1996). « Motion coordination and reactive control of autonomous multi-manipulator systems ». In : *Journal of robotic systems* 13(11), p. 737-754.
- NI, Jun et Jibin HU (2017). « Dynamic modelling and experimental validation of a skid-steered vehicle in the pivotal steering condition ». In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D : Journal of Automobile Engineering* 231(2), p. 225-240.
- NIEUWENHUIZEN, A.T., J.W. HOFSTEE et E.J. VAN HENTEN (sept. 2010). « Performance Evaluation of an Automated Detection and Control System for Volunteer Potatoes in Sugar Beet Fields ». In : *Biosystems Engineering* 107(1), p. 46-53.
- NINGYUE, LIYAN et LIUKEPING (2015). « The research of mobile manipulator trajectory tracking cooperative control based on the ADRC ». In : *2015 Chinese Automation Congress (CAC)*, p. 385-389.
- NLOPT (2020). *Overview - NLopt Documentation*. <https://nlopt.readthedocs.io/en/latest/>.
- OBERTI, Roberto et al. (juin 2016). « Selective Spraying of Grapevines for Disease Control Using a Modular Agricultural Robot ». In : *Biosystems Engineering* 146, p. 203-215.
- OGREN, P., N. EGERSTEDT et X. HU (avr. 2000). « Reactive Mobile Manipulation Using Dynamic Trajectory Tracking ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings*. T. 4, p. 3473-3478.
- OGREN, P., L. PETERSSON et al. (déc. 2000). « Reactive Mobile Manipulation Using Dynamic Trajectory Tracking : Design and Implementation ». In : *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*. T. 3, p. 3001-3006.
- OHI, Nicholas et al. (oct. 2018). « Design of an Autonomous Precision Pollination Robot ». In : *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, p. 7711-7718.
- ORIOLO, Giuseppe, Alessandro DE LUCA et Marilena VENDITTELLI (2002). « WMR control via dynamic feedback linearization : design, implementation, and experimental validation ». In : *IEEE Transactions on control systems technology* 10(6), p. 835-852.
- ORIOLO, Giuseppe et Christian MONGILLO (2005). « Motion planning for mobile manipulators along given end-effector paths ». In : *Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and automation*, p. 2154-2160.
- OSBORNE, Aoife et al. (2012). « Prevalence of Musculoskeletal Disorders among Farmers : A Systematic Review ». In : *American Journal of Industrial Medicine* 55(2), p. 143-158.
- OSMAN, Mostafa et al. (2020). « End-effector stabilization of a 10-dof mobile manipulator using nonlinear model predictive control ». In : *IFAC-PapersOnLine* 53(2), p. 9772-9777.
- PACEJKA, Hans (2005). *Tire and vehicle dynamics*. Elsevier.
- PADOIS, Vincent (nov. 2005). « Enchaînements dynamiques de tâches pour des manipulateurs mobiles à roues ». Thèse de doct. Institut National Polytechnique de Toulouse.
- PAPADOPOULOS, Evangelos et Daniel A. REY (jan. 2000). « The Force-Angle Measure of Tipover Stability Margin for Mobile Manipulators ». In : *Vehicle System Dynamics* 33(1), p. 29-48.

- PATEL, Bhavik, Ya-Jun PAN et Usman AHMAD (2017). « Adaptive backstepping control approach for the trajectory tracking of mobile manipulators ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, p. 1769-1774.
- PAYSAN, l'Atelier (2021). *Reprenre la terre au machine*. Anthropocène.
- PENG, Jinzhu, Jie YU et Jie WANG (2014). « Robust adaptive tracking control for nonholonomic mobile manipulator with uncertainties ». In : *ISA transactions* 53(4), p. 1035-1043.
- PETERSON, L., D. AUSTIN et D. KRAGIC (2000). « High-level control of a mobile manipulator for door opening ». In : *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. T. 3, p. 2333-2338.
- PICARD, Guillaume et al. (2020). « A predictive control framework for edge following : Application to two types of mobile robots ». In : *IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, p. 254-260.
- PIERALICE, Cristiano et al. (2018). « Vehicle sideslip angle estimation using Kalman filters : modelling and validation ». In : *The International Conference of IFToMM Italy*. Springer, p. 114-122.
- PIERRE, Cyrille et al. (2022). « A Multi-Control Strategy to Achieve Autonomous Field Operation ». In : *AgriEngineering* 4(3), p. 770-788.
- PILANIA, V. et K. GUPTA (nov. 2014). « A Hierarchical and Adaptive Mobile Manipulator Planner ». In : *2014 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, p. 45-51.
- PILANIA, Vinay et Kamal GUPTA (juin 2015a). « A Hierarchical and Adaptive Mobile Manipulator Planner with Base Pose Uncertainty ». In : *Autonomous Robots* 39(1), p. 65-85.
- PILANIA, Vinay et Kamal GUPTA (2015b). « A localization aware sampling strategy for motion planning under uncertainty ». In : *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, p. 6093-6099.
- PILANIA, Vinay et Kamal GUPTA (jan. 2017). « Localization Aware Sampling and Connection Strategies for Incremental Motion Planning under Uncertainty ». In : *Autonomous Robots* 41(1), p. 111-132.
- PILANIA, Vinay et Kamal GUPTA (fév. 2018). « Mobile Manipulator Planning under Uncertainty in Unknown Environments ». In : *The International Journal of Robotics Research* 37(2-3), p. 316-339.
- PIN, F.G. et J.-C. CULIOLI (juill. 1990). « Multi-Criteria Position and Configuration Optimization for Redundant Platform/Manipulator Systems ». In : *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, Towards a New Frontier of Applications*. T. 1, p. 103-107.
- PIN, Francois G et Jean-Christophe CULIOLI (1992). « Optimal positioning of combined mobile platform-manipulator systems for material handling tasks ». In : *Journal of intelligent and Robotic Systems* 6(2), p. 165-182.
- PINKSTONE, Joe (2018). *Cauliflower-Picking Robots Are Set to Replace Migrant Workers*. <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-5472195/Cauliflower-picking-robots-set-replace-migrant-workers.html>.
- PLEBE, Alessio et Giorgio GRASSO (nov. 2001). « Localization of Spherical Fruits for Robotic Harvesting ». In : *Machine Vision and Applications* 13(2), p. 70-79.
- PRETTY, Jules (fév. 2008). « Agricultural Sustainability : Concepts, Principles and Evidence ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences* 363(1491), p. 447-465.
- RADKE, Aaron et Zhiqiang GAO (2006). « A survey of state and disturbance observers for practitioners ». In : *2006 American Control Conference*. IEEE, 6-pp.
- RAJA, R., A. DUTTA et B. DASGUPTA (oct. 2019). « Learning Framework for Inverse Kinematics of a Highly Redundant Mobile Manipulator ». In : *Robotics and Autonomous Systems* 120, p. 103245.
- RAKITA, Daniel, Bilge MUTLU et Michael GLEICHER (2018). « RelaxedIK : Real-time Synthesis of Accurate and Feasible Robot Arm Motion. » In : *Robotics : Science and Systems*. Pittsburgh, PA, p. 26-30.
- RAM, RV, Pushparaj Mani PATHAK et Sergio J JUNCO (2019). « Trajectory control of a mobile manipulator in the presence of base disturbance ». In : *Simulation* 95(6), p. 529-543.
- REN, Hongbin et al. (2014). « Vehicle state information estimation with the unscented Kalman filter ». In : *Advances in Mechanical Engineering* 6, p. 589397.
- RIEKERT, Martin et al. (2020). « Automatically detecting pig position and posture by 2D camera imaging and deep learning ». In : *Computers and Electronics in Agriculture* 174, p. 105391.
- RIGOTTI-THOMPSON, Mattia, Miguel TORRES-TORRITI, Fernando A. AUAT CHEEIN et al. (2020). « \mathcal{H}_∞ -Based Terrain Disturbance Rejection for Hydraulically Actuated Mobile Manipulators With a Nonrigid Link ». In : *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 25(5), p. 2523-2533.
- RIGOTTI-THOMPSON, Mattia, Miguel TORRES-TORRITI, Fernando Auat CHEEIN et al. (oct. 2018). « Ground Disturbance Rejection Approach for Mobile Robotic Manipulators with Hydraulic Actuators ». In : *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Madrid, p. 5980-5986.

- RIOT, Antoine et Benoit EGON (2018). *Nouvelles Technologies C'est Quoi l'agriculture 4.0 ? (Partie 1/2)*. <https://www.terre-net.fr/actualite-agricole/economie-social/article/definition-de-l-agriculture-4-0-202-138781.html>.
- RODRIGUEZ, Humberto et Ilka BANFIELD (2018). « Inverse kinematic multiobjective optimization for a vehicle-arm robot system using evolutionary algorithms ». In : *Memorias de Congresos UTP*, p. 193-200.
- ROMANO, Francesco et al. (2015). « Prioritized optimal control : A hierarchical differential dynamic programming approach ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, p. 3590-3595.
- ROQUELAURE, Yves et al. (déc. 2019). « Carpal Tunnel Syndrome Among Male French Farmers and Agricultural Workers : Is It Only Associated With Physical Exposure ? » In : *Safety and Health at Work*, S2093791118302865.
- RYU, Jihan, Eric J ROSSETTER et J Christian GERDES (2002). « Vehicle sideslip and roll parameter estimation using GPS ». In : *Proceedings of the AVEC International Symposium on Advanced Vehicle Control*, p. 373-380.
- SAAB, Layale et al. (2013). « Dynamic whole-body motion generation under rigid contacts and other unilateral constraints ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 29(2), p. 346-362.
- SALINI, Joseph, Vincent PADOIS et Philippe BIDAUD (2011). « Synthesis of complex humanoid whole-body behavior : A focus on sequencing and tasks transitions ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 1283-1290.
- SAMMONS, Philip J, Tomonari FURUKAWA et Andrew BULGIN (2005). « Autonomous pesticide spraying robot for use in a greenhouse ». In : *Australian Conference on Robotics and Automation*. T. 1. 9. Commonwealth Scientific et Industrial Research Organisation Canberra, Australia.
- SAMSON, Claude (1995). « Control of chained systems application to path following and time-varying point-stabilization of mobile robots ». In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 40(1), p. 64-77.
- SÁNCHEZ, Gildardo et Jean-Claude LATOMBE (2003). « A single-query bi-directional probabilistic roadmap planner with lazy collision checking ». In : *Robotics research*. Springer, p. 403-417.
- SATRIA, Medy et Matt BEST (mars 2002). « Comparison between Kalman Filter and Robust Filter for Vehicle Handling Dynamics State Estimation ». In : *SAE Technical Papers*.
- SCARFE, A. J. et al. (fév. 2009). « Development of an Autonomous Kiwifruit Picking Robot ». In : *2009 4th International Conference on Autonomous Robots and Agents*. IEEE : Wellington, p. 380-384.
- SCHJØLBERG, Ingrid et Thor I. FOSSEN (1994). « Modelling and Control of Underwater Vehicle-Manipulator Systems ». In : *in Proc. rd Conf. on Marine Craft maneuvering and control*, p. 45-57.
- SCHRIJVER, Erwin et Johannes VAN DIJK (2002). « Disturbance observers for rigid mechanical systems : equivalence, stability, and design ». In : *J. Dyn. Sys., Meas., Control* 124(4), p. 539-548.
- SCHUTZ, Bob, Byron TAPLEY et George H BORN (2004). *Statistical orbit determination*. Elsevier.
- SCIAVICCO, L. et B. SICILIANO (août 1988). « A Solution Algorithm to the Inverse Kinematic Problem for Redundant Manipulators ». In : *IEEE Journal on Robotics and Automation* 4(4), p. 403-410.
- SEBASTIAN, Bijo et Pinhas BEN-TZVI (2019). « Active disturbance rejection control for handling slip in tracked vehicle locomotion ». In : *Journal of Mechanisms and Robotics* 11(2), p. 021003.
- SEENI, Aravind, Bernd SCHÄFER et Gerd HIRZINGER (2010). « Robot Mobility Systems for Planetary Surface Exploration – State-of-the-Art and Future Outlook : A Literature Survey ». In : *Aerospace Technologies Advancements*. Sous la dir. de Thawar T. ARIF. IntechOpen : Rijeka. Chap. 10.
- SEN, Sachidananda, Shouvik CHAKRABORTY et Ashoke SUTRADHAR (2015). « Estimation of tire slip-angles for vehicle stability control using Kalman filtering approach ». In : *2015 International Conference on Energy, Power and Environment : Towards Sustainable Growth (ICEPE)*. IEEE, p. 1-6.
- SERAJI, Homayoun (fév. 1998). « A Unified Approach to Motion Control of Mobile Manipulators ». In : *The International Journal of Robotics Research* 17(2), p. 107-118.
- SHE, Jin-Hua et al. (2008). « Improving disturbance-rejection performance based on an equivalent-input-disturbance approach ». In : *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 55(1), p. 380-389.
- SHIN, Dong Hun et al. (oct. 2003). « Motion Planning for a Mobile Manipulator with Imprecise Locomotion ». In : *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No. 03CH37453)*. T. 1, 847-853 vol.1.
- SHOJAEI, Khoshnam et al. (2011). « Adaptive trajectory tracking control of a differential drive wheeled mobile robot ». In : *Robotica* 29(3), p. 391-402.
- SICILIANO, B. et J.-J.E. SLOTINE (1991). « A General Framework for Managing Multiple Tasks in Highly Redundant Robotic Systems ». In : *Fifth International Conference on Advanced Robotics 'Robots in Unstructured Environments*. IEEE : Pisa, Italy, 1211-1216 vol.2.
- SIMETTI, Enrico et Giuseppe CASALINO (2016). « Manipulation and transportation with cooperative underwater vehicle manipulator systems ». In : *IEEE Journal of oceanic engineering* 42(4), p. 782-799.

- SIMETTI, Enrico, Giuseppe CASALINO, Sandro TORELLI et al. (2013). « Experimental results on task priority and dynamic programming based approach to underwater floating manipulation ». In : *2013 MTS/IEEE OCEANS-Bergen*. IEEE, p. 1-7.
- SIMETTI, Enrico, Giuseppe CASALINO, Sandro TORELLI et al. (2014). « Floating underwater manipulation : Developed control methodology and experimental validation within the trident project ». In : *Journal of Field Robotics* 31(3), p. 364-385.
- SIRA-RAMIREZ, Hebertt et Marco Antonio OLIVER-SALAZAR (2012). « On the robust control of buck-converter DC-motor combinations ». In : *IEEE Transactions on Power Electronics* 28(8), p. 3912-3922.
- SIVČEV, Satja et al. (2018). « Underwater manipulators : A review ». In : *Ocean engineering* 163, p. 431-450.
- SONG, Tao et al. (sept. 2016). « Optimization of a Mobile Platform for a Wheeled Manipulator ». In : *Journal of Mechanisms and Robotics* 8(6).
- SONG, ZB et al. (2008). « Non-linear observer for slip estimation of tracked vehicles ». In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D : Journal of Automobile Engineering* 222(4), p. 515-533.
- SOROUR, Mohamed, Andrea CHERUBINI et Philippe FRAISSE (sept. 2019). « Motion Control for Steerable Wheeled Mobile Manipulation ». In : *2019 European Conference on Mobile Robots (ECMR)*, p. 1-7.
- SPONG, Mark W, Seth HUTCHINSON, Mathukumalli VIDYASAGAR et al. (2006). *Robot modeling and control*. T. 3. Wiley New York.
- STAUB, Nicolas et al. (mai 2018). « Towards a Flying Assistant Paradigm : The OTHex ». In : *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, p. 6997-7002.
- STAVRIDIS, Sotiris, Pietro FALCO et Zoe DOULGERI (2021). « Pick-and-place in dynamic environments with a mobile dual-arm robot equipped with distributed distance sensors ». In : *IEEE-RAS 20th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, p. 76-82.
- STEENSLAND, Ann et Dr Margaret ZEIGLER (2017). « Global Harvest Initiative, Washington, D.C., October 2017 ». en. In : *GAP Report*, p. 72.
- STOTSKY, A et X HU (1997). « Control of car-like robots using sliding observers for steering angle estimation ». In : *Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control*. T. 4, p. 3648-3653.
- SUN, Zheng et al. (2005). « Narrow passage sampling for probabilistic roadmap planning ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 21(6), p. 1105-1115.
- SYMOA (2016). *Restaurer la morphologie des cours d'eau*. <https://www.symoa.net/accueil/nos-actions/restaurer-la-morphologie-des-cours-d-eau/>.
- SYNODINOS, Aris I, Vassilis C MOULIANITIS et Nikos A ASPRAGATHOS (2015). « A fuzzy approximation to dexterity measures of mobile manipulators ». In : *Advanced Robotics* 29(12), p. 753-769.
- TAKEMORI, Tatsuya, Motoyasu TANAKA et Fumitoshi MATSUNO (oct. 2018). « Ladder Climbing with a Snake Robot ». In : *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Madrid, p. 1-9.
- TAN, Jindong et Ning XI (2001). « Unified model approach for planning and control of mobile manipulators ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. T. 3, p. 3145-3152.
- TAN, Jindong et Ning XI (2002). « Integrated task planning and control for mobile manipulators ». In : *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292)*. T. 1, p. 382-387.
- TAN, Xiang-min, Dongbin ZHAO, Jianqiang YI, Zeng-Guang HOU et al. (2007). « Unified model and robust neural-network control of omnidirectional mobile manipulators ». In : *6th IEEE International Conference on Cognitive Informatics*, p. 411-418.
- TAN, Xiang-min, Dongbin ZHAO, Jianqiang YI et Dong XU (2008). « Adaptive hybrid control for omnidirectional mobile manipulators using neural-network ». In : *American Control Conference*, p. 5174-5179.
- TANG, Qirong et al. (2017). « An energy minimized solution for solving redundancy of underwater vehicle-manipulator system based on genetic algorithm ». In : *International Conference on Swarm Intelligence*. Springer, p. 394-401.
- TANNER, Herbert G et Kostas J KYRIAKOPOULOS (2000). « Nonholonomic motion planning for mobile manipulators ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings*. T. 2. IEEE, p. 1233-1238.
- TARBOURIECH, Sonny (2019). « Dual-Arm control strategy in industrial environments ». Thèse de doct. Université Montpellier.
- TCHON, K., J. JAKUBIAK et K. ZADARNOWSKA (2004). « Doubly Nonholonomic Mobile Manipulators ». In : *International Conference on Robotics and Automation*. T. 5, p. 4590-4595.
- TCHOŃ, Krzysztof et Janusz JAKUBIAK (2003). « Endogenous configuration space approach to mobile manipulators : a derivation and performance assessment of Jacobian inverse kinematics algorithms ». In : *International Journal of Control* 76(14), p. 1387-1419.

- TEKA, Beteley et al. (2017). « Advanced KSOM based redundancy resolution of a mobile manipulator system for motion on an uneven terrain ». In : *Proceedings of the Advances in Robotics*, p. 1-6.
- THAKAR, Shantanu, Liwei FANG et al. (2018). « Towards time-optimal trajectory planning for pick-and-transport operation with a mobile manipulator ». In : *IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, p. 981-987.
- THAKAR, Shantanu, Pradeep RAJENDRAN et al. (2019). « Accounting for Part Pose Estimation Uncertainties during Trajectory Generation for Part Pick-Up Using Mobile Manipulators ». In : *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, p. 1329-1336.
- TIN LEUNG, King et al. (2011). « A review of ground vehicle dynamic state estimations utilising GPS/INS ». In : *Vehicle System Dynamics* 49(1-2), p. 29-58.
- TOMIS, Vincent et al. (2014). « Impact of deep compaction on root growth and yield of potato ». In : *ISTRO Working Groups F and B, Visual Soil Examination and Evaluation (VSEE) and Subsoil Compaction (SC) joint meeting*".
- TOURRETTE, T. et al. (sept. 2017). « Tracking footprints for agricultural applications : a low cost lidar approach ». In : *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Workshop "Agricultural Robotics : learning from Industry 4.0 and moving into the future"*. Vancouver, Canada.
- TREHARD, Guillaume et al. (2014). « Credibilist simultaneous localization and mapping with a lidar ». In : *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 2699-2706.
- TREVELYAN, J.P. (1989). « Sensing and control for sheep shearing robots ». In : *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 5(6), p. 716-727.
- TSAI, Chi-Yi et al. (2019). « Visually guided picking control of an omnidirectional mobile manipulator based on end-to-end multi-task imitation learning ». In : *IEEE Access* 8, p. 1882-1891.
- TSUI, Katherine M. et al. (2009). « Performance Evaluation Methods for Assistive Robotic Technology ». In : *Performance Evaluation and Benchmarking of Intelligent Systems*. Sous la dir. de Raj MADHAVAN, Edward TUNSTEL et Elena MESSINA. Springer US : Boston, MA, p. 41-66.
- TUDICO, Andrea et al. (2017). « Improving and benchmarking motion planning for a mobile manipulator operating in unstructured environments ». In : *EPIA Conference on Artificial Intelligence*. Springer, p. 498-509.
- VAN HENTEN, E. J. et al. (nov. 2003). « Field Test of an Autonomous Cucumber Picking Robot ». In : *Biosystems Engineering* 86(3), p. 305-313.
- VANNOY, John et Jing XIAO (2006). « Real-time planning of mobile manipulation in dynamic environments of unknown changes ». In : *Proceedings of RSS 2006 Workshop : Manipulation for Human Environments*.
- VARGA, Balint, Selina MEIER et al. (mars 2019). « Model Predictive Control and Trajectory Optimization of Large Vehicle-Manipulators ». In : *IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, p. 60-66.
- VARGA, Balint, Arash SHAHIRPOUR et al. (2019). « Control of Large Vehicle-Manipulators with Human Operator ». In : *IFAC-PapersOnLine* 52(30), p. 373-378.
- VAYSSADE, Jehan-Antoine, Rémy ARQUET et Mathieu BONNEAU (2019). « Automatic activity tracking of goats using drone camera ». In : *Computers and Electronics in Agriculture* 162, p. 767-772.
- VERBIEST, Rafaël et al. (2020). « Automation and robotics in the cultivation of pome fruit : Where do we stand today? » In : *Journal of Field Robotics* 38(4), p. 513-531.
- VIETINGHOFF, Anne von, Marcus HIEMER et Uwe KIENCKE (2005). « Nonlinear observer design for lateral vehicle dynamics ». In : *IFAC Proceedings Volumes* 38(1), p. 988-993.
- VOUGIOUKAS, Stavros G (2020). « Agricultural Robotics ». In : *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, p. 30.
- VOUGIOUKAS, Stavros G. (mai 2019). « Agricultural Robotics ». In : *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems* 2(1), p. 365-392.
- WAMPLER, Charles (jan. 1986). « Manipulator Inverse Kinematic Solutions Based on Vector Formulations and Damped Least-Squares Methods ». In : *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 16(1), p. 93-101.
- WANG, YaoNan, ThangLong MAI et JianXu MAO (2014). « Adaptive motion/force control strategy for non-holonomic mobile manipulator robot using recurrent fuzzy wavelet neural networks ». In : *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 34, p. 137-153.
- WANG, Ying, Haoxiang LANG et W de SILVA CLARENCE (2010). « An autonomous mobile grasping system using visual servoing and nonlinear model predictive control ». In : *IEEE ICCA 2010*. IEEE, p. 86-91.
- WASEDA, University (2020). *History and Achievements*. <https://www.waseda.jp/inst/fro/en/about/history/>.
- WEI, Wang et al. (2016). « Vehicle sideslip angle estimation based on general regression neural network ». In : *Mathematical Problems in Engineering* 2016.

- WEI, Xinjiang et Lei GUO (2010). « Composite disturbance-observer-based control and H codeinfini control for complex continuous models ». In : *International Journal of Robust and Nonlinear Control : IFAC-Affiliated Journal* 20(1), p. 106-118.
- WHITE, Glenn D, Rajankumar M BHATT et Venkat N KROVI (2007). « Dynamic redundancy resolution in a nonholonomic wheeled mobile manipulator ». In : *Robotica* 25(2), p. 147-156.
- WHITE, Glenn D. et al. (juin 2009). « Experimental Evaluation of Dynamic Redundancy Resolution in a Nonholonomic Wheeled Mobile Manipulator ». In : *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 14(3), p. 349-357.
- WHITNEY, D. E. (déc. 1972). « The Mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators ». In : *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 94(4), p. 303-309.
- WOLOVICH, W. A. et H. ELLIOTT (déc. 1984). « A Computational Technique for Inverse Kinematics ». In : *The 23rd IEEE Conference on Decision and Control*, p. 1359-1363.
- WONG, Jo (jan. 2008). « Theory of Ground Vehicles ». In.
- WU, Xiru, Yaonan WANG et Xuanju DANG (2014). « Robust adaptive sliding-mode control of condenser-cleaning mobile manipulator using fuzzy wavelet neural network ». In : *Fuzzy Sets and Systems* 235, p. 62-82.
- XAVER, Fendt (2020). *Nouvelle génération de semoirs robotisés : Le Fendt Xaver atteint sa maturité*. <https://www.fendt.com/fr/2-fendt-xaver>.
- XU, Bin, Shunmugham R PANDIAN et Fred PETRY (2005). « A sliding mode fuzzy controller for underwater vehicle-manipulator systems ». In : *Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society*, p. 181-186.
- XU, Bin, Norimitsu SAKAGAMI et al. (2005). « A fuzzy controller for underwater vehicle-manipulator systems ». In : *Proceedings of OCEANS. IEEE*, p. 1110-1115.
- XU, Dong et al. (2009). « Trajectory tracking control of omnidirectional wheeled mobile manipulators : robust neural network-based sliding mode approach ». In : *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)* 39(3), p. 788-799.
- XU, Guohua et al. (2007). « Trajectory tracking for underwater manipulator using sliding mode control ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, p. 2127-2132.
- YAMAMOTO, Y. et X. YUN (déc. 1992). « Coordinating Locomotion and Manipulation of a Mobile Manipulator ». In : *Proceedings of the 31st IEEE Conference on Decision and Control*. T. 3, p. 2643-2648.
- YAMAMOTO, Y. et Xiaoping YUN (oct. 1996). « Effect of the Dynamic Interaction on Coordinated Control of Mobile Manipulators ». In : *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 12(5), p. 816-824.
- YAMAMOTO, Y. et Xiaoping YUN (mai 1999). « Unified Analysis on Mobility and Manipulability of Mobile Manipulators ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. T. 2, p. 1200-1206.
- YAMAUCHI, Genki, Keiji NAGATANI et al. (2017). « Slip-compensated odometry for tracked vehicle on loose and weak slope ». In : *Robomech Journal* 4(1), p. 1-11.
- YAMAUCHI, Genki, Daiki SUZUKI et Keiji NAGATANI (2016). « Online slip parameter estimation for tracked vehicle odometry on loose slope ». In : *International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, p. 227-232.
- YANG, Yuandong et Oliver BROCK (2007). « Elastic Roadmaps : Globally Task-Consistent Motion for Autonomous Mobile Manipulation in Dynamic Environments ». In : *relation* 21, p. 34.
- YANG, Yuandong et Oliver BROCK (2010). « Elastic roadmaps—motion generation for autonomous mobile manipulation ». In : *Autonomous Robots* 28(1), p. 113-130.
- YOSHIKAWA, T. (mars 1985). « Dynamic Manipulability of Robot Manipulators ». In : *1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings*. T. 2, p. 1033-1038.
- YOSHIKAWA, Tsuneo (juin 1985). « Manipulability of Robotic Mechanisms ». In : *The International Journal of Robotics Research* 4(2), p. 3-9.
- YOU, Alexander et al. (2020). « An Efficient Planning and Control Framework for Pruning Fruit Trees ». In : *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, p. 3930-3936.
- YU, Rui et Xiaohui XIA (2015). « Vehicle handling evaluation models using artificial neural networks ». In : *International Journal of Control and Automation* 8(5), p. 249-258.
- YUH, Junku, Side ZHAO et Pan-Mook LEE (2001). « Application of adaptive disturbance observer control to an underwater manipulator ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. T. 4, p. 3244-3249.
- ZGHAL, H., R.V. DUBEY et J.A. EULER (mai 1990). « Efficient Gradient Projection Optimization for Manipulators with Multiple Degrees of Redundancy ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings*. T. 2, p. 1006-1011.
- ZHANG, Heng, Qi SHENG et al. (2020). « A novel coordinated motion planner based on capability map for autonomous mobile manipulator ». In : *Robotics and autonomous systems* 129, p. 103554.

- ZHANG, Heng, Yichi ZHANG et al. (2019). « A task-priority coordinated motion planner combined with visual servo for mobile manipulator ». In : *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, p. 7-12.
- ZHANG, Huatao, Yunyi JIA et Ning XI (2012). « Sensor-Based Redundancy Resolution for a Nonholonomic Mobile Manipulator ». In : *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 5327-5332.
- ZHANG, Yunong et Shugen MA (2007). « Minimum-Energy Redundancy Resolution of Robot Manipulators Unified by Quadratic Programming and its Online Solution ». In : *2007 International Conference on Mechatronics and Automation*, p. 3232-3237.
- ZHANG, Yunong, Xiaogang YAN et al. (2016). « QP-based refined manipulability-maximizing scheme for coordinated motion planning and control of physically constrained wheeled mobile redundant manipulators ». In : *Nonlinear Dynamics* 85(1), p. 245-261.
- ZHAO, Min, Nirwan ANSARI et Edwin S. H. HOU (1994). « Mobile manipulator path planning by a genetic algorithm ». In : *Journal of Robotic Systems* 11(3), p. 143-153.
- ZHONG, Qing-Chang, Alon KUPERMAN et RK STOBART (2011). « Design of UDE-based controllers from their two-degree-of-freedom nature ». In : *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 21(17), p. 1994-2008.
- ZHOU, Shengfeng, Yazhini C PRADEEP et Peter CY CHEN (2015). « Simultaneous base and end-effector motion control of a nonholonomic mobile manipulator ». In : *6th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*, p. 143-148.
- ZHOU, Shengfeng, Yazhini C PRADEEP, Ming ZHU et al. (2018). « Motion control of a nonholonomic mobile manipulator in task space ». In : *Asian Journal of Control* 20(5), p. 1745-1754.

Annexes

Annexe A

Commande des sous-systèmes du manipulateur mobile

SOMMAIRE DU CHAPITRE

A.1	Commande des sous-systèmes	201
A.1.1	Commande du manipulateur	201
A.1.2	Commande du mobile	202
A.1.2.1	Régulation de l'écart longitudinal	202
A.1.2.2	Régulation de l'écart latéral	203
A.1.2.3	Régulation de l'écart de cap	204
A.2	Commande avec les modèles étendus	205
A.2.1	Commande du mobile	205
A.2.1.1	Régulation de l'écart longitudinal	206
A.2.1.2	Régulation de l'écart latéral	206
A.2.1.3	Régulation de l'écart de cap	208
A.2.2	Commande du manipulateur	208
A.3	Commande du mobile associée au modèle générique et à l'observateur générique . . .	209

Cette annexe présente les lois de commande utilisées dans les différentes expériences et simulations présentées dans cette thèse.

A.1 Commande des sous-systèmes

Cette première partie aborde la commande des sous-systèmes du manipulateur mobile en se basant sur les modèles cinématiques non perturbés. Ces commandes sont utilisées dans les expérimentations et simulations du chapitre 3.

A.1.1 Commande du manipulateur

La commande du manipulateur est une commande par retour d'état classique basée sur le modèle (3.60) du manipulateur développé dans la partie Sec.3.2.3.

Pour réaliser le retour d'état, une erreur e_{ε_a} est définie entre l'état courant ε_a et l'état désiré ε_a^d . Soit $e_{\varepsilon_a} = \varepsilon_a - \varepsilon_a^d$. Afin que l'état courant du système converge vers l'état désiré, et par conséquent que l'erreur converge vers zéro, une dynamique exponentielle lui est imposée, telle que $\dot{e}_{\varepsilon_a} = k_{\varepsilon_a} e_{\varepsilon_a}$. Ainsi, si k_{ε_a} est négatif, on assure une convergence asymptotique de l'erreur vers zéro et donc une bonne régulation du système.

Pour expliciter la loi de commande, on reporte la dynamique de l'erreur $\dot{e}_{\varepsilon_a} = \dot{\varepsilon}_a - \dot{\varepsilon}_a^d$ au sein de :

$$k_{\varepsilon_a} e_{\varepsilon_a} = \dot{\varepsilon}_a - \dot{\varepsilon}_a^d. \quad (\text{A.1})$$

Or, d'après le modèle (3.60) :

$$\dot{\varepsilon}_a = \mathcal{C}^{-1}(J_t \dot{q} + \mathcal{B}v_{ext}). \quad (\text{A.2})$$

En rassemblant les équations (A.1) et (A.2) nous obtenons l'équation :

$$\dot{q} = J_t^{-1} [\mathcal{C}(\dot{\varepsilon}_a^d + k_{\varepsilon_a} e_{\varepsilon_a}) - \mathcal{B}v_{ext}]. \quad (\text{A.3})$$

Cependant, étant donné que la modélisation (3.60) utilise la représentation des angles d'Euler, la dynamique exponentielle imposée par leurs erreurs le sera sur les vitesses de rotation des angles d'Euler $\dot{\theta}$ et non sur un vecteur vitesse de rotation Ω . Il est alors nécessaire d'ajouter un terme de conversion pour imposer la dynamique de convergence sur le vecteur vitesse de rotation Ω . Finalement, l'équation de commande peut s'exprimer telle que :

$$\dot{q} = J_t^{-1} [\mathcal{C}E_{RS}^{RE}(\dot{\varepsilon}_a^d + k_{\varepsilon_a} e_{\varepsilon_a}) - \mathcal{B}v_{ext}]. \quad (\text{A.4})$$

$$\text{Avec } E_{RS}^{RE} = \begin{pmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & U_{RS}^{RE} \end{pmatrix}.$$

A.1.2 Commande du mobile

Les différentes lois de contrôle pour les mobiles utilisés durant les travaux de cette thèse, sont issues des approches par backstepping proposées dans TOURETTE et al. (2017) ; DEREMETZ et al. (2019) basées sur la modélisation (3.24) pour le suivi de trajectoire. Le problème de contrôle est résolu en deux étapes grâce à la commande en cascade des variables d'état du mobile. Dans un premier temps, une valeur de cap est construite pour imposer la convergence latérale vers la valeur souhaitée. Puis, une seconde équation de contrôle assure la convergence du cap réel vers le cap désiré préalablement construit. Naturellement, cela impose que la commande du cap converge plus rapidement que celle de la déviation latérale². La preuve de stabilité de ce genre d'approche est connue et garantie par une fonction de Lyapunov. Une troisième équation de commande indépendante s'occupe de la régulation longitudinale du mobile.

A.1.2.1 Régulation de l'écart longitudinal

La première équation de commande porte sur la régulation de l'écart longitudinal ε_{m_s} . Une erreur est définie entre l'écart réel et l'écart désiré $e_{\varepsilon_{m_s}} = \varepsilon_{m_s} - \varepsilon_{m_s}^d$. Une dynamique exponentielle décroissante lui est alors imposée pour faire converger cette erreur à zéro, via l'équation suivante : $\dot{e}_{\varepsilon_{m_s}} = k_{\varepsilon_{m_s}} e_{\varepsilon_{m_s}} = \dot{\varepsilon}_{m_s} - \dot{\varepsilon}_{m_s}^d$, avec $k_{\varepsilon_{m_s}}$ un gain négatif. En utilisant le modèle (3.24), l'équation peut se réécrire :

$$k_{\varepsilon_{m_s}} e_{\varepsilon_{m_s}} + \dot{\varepsilon}_{m_s}^d = \frac{(v_R \cos(\delta_r) + \omega y_{MR}) \cos(\delta_m + \varepsilon_{m_\theta})}{\cos(\delta_m)(1 - c\varepsilon_{m_y})}. \quad (\text{A.5})$$

En isolant v_R l'équation de commande suivante est obtenue :

$$v_R = \left[\frac{(k_{\varepsilon_{m_s}} e_{\varepsilon_{m_s}} + \dot{\varepsilon}_{m_s}^d) \cos(\delta_m)(1 - c\varepsilon_{m_y})}{\cos(\varepsilon_{m_\theta} + \delta_m)} - \omega y_{MR} \right] \frac{1}{\cos(\delta_r)}. \quad (\text{A.6})$$

1. Pour l'expression de la matrice U , voir annexe C.2.

2. On retiendra un ratio minimal de deux entre les temps de réponse des équations de commandes.

A.1.2.2 Régulation de l'écart latéral

La seconde équation de commande porte sur la régulation de l'écart latéral du mobile. De façon similaire à l'équation de commande d'écart longitudinal, une erreur est définie entre l'écart réel et l'écart désiré $e_{\varepsilon_{m_y}} = \varepsilon_{m_y} - \varepsilon_{m_y}^d$. Une dynamique exponentielle décroissante lui est alors imposée pour faire converger cette erreur à zéro, via l'équation suivante : $\dot{\varepsilon}_{m_y} = k_{\varepsilon_{m_y}} e_{\varepsilon_{m_y}} = \dot{\varepsilon}_{m_y} - \dot{\varepsilon}_{m_y}^d$, avec $k_{\varepsilon_{m_y}}$ un gain négatif.

Cependant, traiter la dynamique de façon temporelle induit une singularité dans la commande à vitesse nulle³. Pour résoudre cela, il est pertinent d'utiliser une dynamique spatiale (en dérivant par rapport à l'abscisse curviligne) via la transformation suivante :

$$\varepsilon'_{m_y} = \frac{\partial \varepsilon_{m_y}}{\partial \varepsilon_{m_s}} = \frac{d\varepsilon_{m_y}}{dt} \frac{dt}{d\varepsilon_{m_s}} = \frac{\dot{\varepsilon}_{m_y}}{\dot{\varepsilon}_{m_s}}. \quad (\text{A.7})$$

En suivant cette transformation l'équation d'erreur se réécrit :

$$k_{\varepsilon_{m_y}} e_{\varepsilon_{m_y}} + \varepsilon_{m_y}^{\prime d} = \varepsilon'_{m_y} = \frac{\dot{\varepsilon}_{m_y}}{\dot{\varepsilon}_{m_s}}. \quad (\text{A.8})$$

En utilisant (3.24), on à :

$$\varepsilon'_{m_y} = (1 - c\varepsilon_{m_y}) \tan(\delta_m + \varepsilon_{m_\theta}). \quad (\text{A.9})$$

d'où l'on peut obtenir :

$$\varepsilon_{m_\theta} = \arctan\left(\frac{k_{\varepsilon_{m_y}} e_{\varepsilon_{m_y}} + \varepsilon_{m_y}^{\prime d}}{1 - c\varepsilon_{m_y}}\right) - \delta_m. \quad (\text{A.10})$$

Lorsque cette dernière équation est vérifiée, alors l'écart latéral converge vers une valeur nulle. Pour assurer cette égalité, une commande virtuelle ψ est défini tel que $\psi = \varepsilon_{m_\theta}$ et la commande virtuelle désirée est donnée telle que :

$$\psi^d = \arctan\left(\frac{k_{\varepsilon_{m_y}} e_{\varepsilon_{m_y}} + \varepsilon_{m_y}^{\prime d}}{1 - c\varepsilon_{m_y}}\right) - \delta_m. \quad (\text{A.11})$$

L'objectif de la seconde étape du backstepping est de faire converger cette nouvelle commande ψ sur ψ^d en imposant une nouvelle dynamique d'erreur exponentielle sous la forme :

$$\dot{\psi} = k_\psi e_\psi + \dot{\psi}^d. \quad (\text{A.12})$$

Dans cette dernière, k_ψ est négatif afin d'imposer une décroissance exponentielle de l'erreur vers zéro.

1.1.2.2.a Cas d'une base mobile type Skid-steering

Dans le cas d'un mobile de type unicycle ou skid-steering, ce dernier est apte à tourner sur lui-même. Lui imposer une dynamique spatiale de convergence sur l'équation (A.12) sera contre-productif vis-à-vis de ses capacités, car il serait contraint de posséder une vitesse longitudinale non nulle pour orienter son cap. Dans ce cas, l'utilisation d'une dynamique exponentielle temporelle est plus pertinente. De plus, cela n'engendre aucune singularité supplémentaire. Dans ce cas de figure, la notation suivante est adoptée :

$$\dot{\psi} = \dot{\varepsilon}_{m_\theta} = k_\psi e_\psi + \dot{\psi}^d. \quad (\text{A.13})$$

Ce qui permet d'obtenir l'équation de commande finale à partir du modèle (3.24) :

$$\omega = \frac{(k_\psi e_\psi + \dot{\psi}^d) \cos(\delta_m)(1 - c\varepsilon_{m_y}) + cv_R \cos(\delta_r) \cos(\varepsilon_{m_\theta} + \delta_m)}{\cos(\delta_m)(1 - c\varepsilon_{m_y}) - c \cos(\varepsilon_{m_\theta} + \delta_m) y_{MR}}. \quad (\text{A.14})$$

3. La contrainte de non-holonomie empêche le mobile de converger de façon latérale avec une vitesse longitudinale nulle.

1.1.2.2.b Cas d'une base mobile type voiture ou à deux trains directeurs

Concernant les mobiles à roues directrices, la dynamique choisie reste spatiale car ces types de mobiles ne sont pas aptes à tourner sur eux-mêmes à vitesse longitudinale nulle. Dans ce cas, la notation suivante est adoptée :

$$\psi' = k_\psi e_\psi + \psi'^d. \quad (\text{A.15})$$

En sachant que $\psi' = \varepsilon'_{m_\theta}$ et $\varepsilon'_{m_\theta} = \frac{\dot{\varepsilon}_{m_\theta}}{\dot{s}} = \frac{\omega}{\dot{s}} - c$, au vue de (3.24), on a alors :

$$\psi' = \frac{\omega \cos(\delta_m)(1 - c\varepsilon_{m_y})}{(v_R \cos(\delta_r) + \omega y_{MR}) \cos(\delta_m + \varepsilon_{m_\theta})} - c. \quad (\text{A.16})$$

Ceci menant à l'équation de commande finale :

$$\omega = \frac{v_R \cos(\delta_r)(k_\psi e_\psi + \psi'^d + c) \cos(\delta_m + \varepsilon_{m_\theta})}{\cos(\delta_m)(1 - c\varepsilon_{m_y}) - y_{MR}(k_\psi e_\psi + \psi'^d + c) \cos(\delta_m + \varepsilon_{m_\theta})}. \quad (\text{A.17})$$

Généralement, le terme ψ'^d est négligé et considéré comme nul sous l'hypothèse que sa variation est négligeable devant celle de ε_{m_θ} .

Pour un mobile utilisant des trains directeurs, le contrôle de ω n'est pas direct et se réalise par l'intermédiaire des angles de braquage des roues avant et arrières⁴. Pour assurer la commande de l'angle de braquage avant δ_f , il est alors possible d'utiliser la relation :

$$\omega = v_R \cos(\delta_r) \frac{\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r)}{L}. \quad (\text{A.18})$$

Cette dernière intégrée dans (A.17) permet d'obtenir l'équation de commande suivante :

$$\delta_f = \arctan \left[\frac{L(k_\psi e_\psi + \psi'^d + c) \cos(\delta_m + \varepsilon_{m_\theta})}{\cos(\delta_m)(1 - c\varepsilon_{m_y}) - y_{MR}(k_\psi e_\psi + \psi'^d + c) \cos(\delta_m + \varepsilon_{m_\theta})} + \tan(\delta_r) \right]. \quad (\text{A.19})$$

A.1.2.3 Régulation de l'écart de cap

Dans le cas du manipulateur mobile à deux trains directeurs, la commande (A.19) pour la régulation de l'écart latéral n'utilise qu'un degré de manoeuvrabilité sur les deux proposés par les angles de braquage du mobile. Ainsi, ce type de mobile permet également la régulation du cap du véhicule en utilisant ce degré de manoeuvrabilité supplémentaire par l'intermédiaire de l'angle de braquage δ_r ⁵.

Une erreur de cap est définie comme précédemment avec une dynamique exponentielle décroissante imposée par un gain négatif $k_{\varepsilon_{m_\theta}}$. Il apparaît alors :

$$\varepsilon'_{m_\theta} = k_{\varepsilon_{m_\theta}} e_{\varepsilon_{m_\theta}} + \varepsilon'^d_{m_\theta}. \quad (\text{A.20})$$

Or, en sachant que la commande virtuelle ψ à été défini $\psi = \varepsilon_{m_\theta}$, alors ε_{m_θ} est également soumis à la dynamique imposée à la commande virtuelle lors de la régulation de l'écart latéral :

$$\varepsilon'_{m_\theta} = \psi' = k_\psi e_\psi = k_\psi (\psi - \psi^d) = k_\psi (\varepsilon_{m_\theta} - \psi^d) + \psi'^d. \quad (\text{A.21})$$

Comme pour l'écart latéral, ψ'^d est négligé et considéré comme nul sous l'hypothèse que sa variation est négligeable devant celle de ε_{m_θ} . Ici, le terme ε_{m_θ} est donc soumis à deux dynamiques différentes, la première, utilisant le braquage δ_f pour contrôler l'orientation du vecteur vitesse, le force à aller vers la trajectoire pour satisfaire l'équation (A.11) et ce quel que soit δ_m et donc l'angle de braquage arrière δ_r . Aussi la seconde cherche à maintenir l'orientation réelle du robot vers une valeur désirée en se servant du braquage δ_r . Pour que la commande reste

4. On ne traite ici que le cas d'un mobile à deux trains directeurs, le mobile à un train directeur étant un cas particulier de ce dernier où l'un de ses angles de braquage est fixe et nul.

5. Il est nécessaire de préciser qu'il est également possible d'envisager de réguler l'écart latéral via δ_r dans l'équation (A.19) précédente et d'utiliser δ_f pour la régulation du cap.

stable, la première dynamique est résolue avec un temps de réponse plus lent que la seconde⁶. Dans le cas contraire, des oscillations peuvent apparaître sur le mouvement du mobile.

En intégrant (A.20) avec (A.21) et (A.11) il est possible d'obtenir la commande suivante :

$$\delta_m = \frac{k_{\varepsilon_{m_\theta}} e_{\varepsilon_{m_\theta}} + \varepsilon_{m_\theta}^{id}}{k_w} - \varepsilon_{m_\theta} + \arctan \left(\frac{k_{\varepsilon_{m_y}} e_{\varepsilon_{m_y}} + \varepsilon_{m_y}^{id}}{1 - c\varepsilon_{m_y}} \right). \quad (\text{A.22})$$

Cette dernière équation permet de contrôler le cap par l'intermédiaire de δ_m . Il est ensuite possible d'extraire δ_r de la relation (3.27) pour faire le lien entre avec δ_m tel que :

$$\delta_r = \arctan \left(\frac{\tan(\delta_f)(y_{MR} \tan(\delta_m) + x_{MR}) + L \tan(\delta_m)}{(x_{MR} + L + y_{MR} \tan(\delta_m))} \right). \quad (\text{A.23})$$

A.2 Commande avec les modèles étendus

Une partie du chapitre.4 (Voir Sec.4.2) s'emploie à proposer plusieurs extensions des modèles présentés au chapitre.3.1 (voir Sec.3.2) pour prendre en compte des paramètres additionnels adaptatifs permettant de décrire l'effet des perturbations engendrées par la navigation en milieu naturel et ainsi pourvoir les compenser via la commande. Cette partie présente donc les différentes commandes étendues, utilisant les différentes versions de ces paramètres adaptatifs. Ces commandes sont celles utilisées pour les différentes simulations et expérimentations du chapitre 4.

Dans cette partie, les notations suivantes sont utilisées pour les lois de commande utilisant l'observateur générique :

- f_m : désigne le vecteur de vitesse du modèle du mobile.
- f_a : désigne le vecteur de vitesse du modèle du manipulateur.
- f_{m_p} : désigne le vecteur de vitesse de perturbation du mobile.
- f_{a_p} : désigne le vecteur de vitesse de perturbation du manipulateur.

A.2.1 Commande du mobile

Cette première partie concerne la commande étendue du mobile dans le cas de l'utilisation des observateurs dédiés et de l'observateur générique. Les principes de commande étant les mêmes, les développements pour chaque observateur et chaque modèle de robot seront menés de front et récapitulés dans un tableau à la fin de chaque partie. Par ailleurs, les modèles utilisés pour synthétiser la commande adaptative sont ceux classiquement utilisés pour les mobiles (voir Sec.D.4.4) afin de rester homogène avec les paramètres et modèles d'observation utilisés dans le chapitre 4⁷.

La synthèse de ces commandes repose sur l'utilisation des modèles classiques étendus dans le repère de Frenet Tab.4.3 et Tab.4.2 pour l'utilisation des observateurs dédiés. Pour l'utilisation de l'observateur générique, la commande construite repose sur les modèles classiques étendus avec les nouveaux paramètres de perturbation donnés dans la table Tab.A.1.

/	Skid-steering	Deux trains directeurs
$\begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_{m_s} \\ \dot{\varepsilon}_{m_y} \\ \dot{\varepsilon}_{m_\theta} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \frac{v \cos(\varepsilon_{m_\theta})}{1 - c\varepsilon_{m_y}} + \hat{f}_{m_{ps}} \\ v \sin(\varepsilon_{m_\theta}) + \hat{f}_{m_{py}} \\ \omega - \frac{c v \cos(\varepsilon_{m_\theta})}{1 - c\varepsilon_{m_y}} + \hat{f}_{m_{p\theta}} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \frac{v \cos(\varepsilon_{m_\theta} + \delta_r)}{1 - c\varepsilon_{m_y}} + \hat{f}_{m_{ps}} \\ v \sin(\varepsilon_{m_\theta} + \delta_r) + \hat{f}_{m_{py}} \\ v \cos(\delta_r) \left(\frac{\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r)}{L} \right) - \frac{c v \cos(\varepsilon_{m_\theta} + \delta_r)}{1 - c\varepsilon_{m_y}} + \hat{f}_{m_{p\theta}} \end{pmatrix}$

TABLE A.1 – Modèle de Frenet étendu avec les paramètres de perturbation génériques pour le mobile Skid-steering et le mobile à deux trains directeurs.

6. $k_{\varepsilon_{m_y}} < k_\psi$, avec un ratio minimal de deux.

7. La section Sec.A.3 cette annexe traitera du cas de l'utilisation du modèle générique (3.24) avec l'observateur générique.

A.2.1.1 Régulation de l'écart longitudinal

On considère un point P_o se déplaçant le long de la trajectoire Γ et $e_{\varepsilon_{m_s}} = \varepsilon_{m_s} - \varepsilon_{m_s}^d$ l'erreur entre l'abscisse curviligne $\varepsilon_{m_s}^d$ associée à la position de P_o et l'abscisse curviligne ε_{m_s} du point de contrôle du robot. La décroissance exponentielle vers zéro de l'erreur $e_{\varepsilon_{m_s}}$ est obtenue en imposant la dynamique $\dot{e}_{\varepsilon_{m_s}} = k_{\varepsilon_{m_s}} e_{\varepsilon_{m_s}}$ avec $k_{\varepsilon_{m_s}}$ un gain négatif. Ceci mène à :

$$\dot{e}_{\varepsilon_{m_s}} = k_{\varepsilon_{m_s}} e_{\varepsilon_{m_s}} + \dot{\varepsilon}_{m_s}^d. \quad (\text{A.24})$$

L'équation de commande correspondante (voir Tab.A.2) est obtenue en combinant (A.24) avec la première ligne des modèles de Frenet étendus des tables Tab.4.3, Tab.4.2 et Tab.A.1.

v	Skid-steering	Deux trains directeurs
Étendu	$\frac{(k_{\varepsilon_{m_s}} e_{\varepsilon_{m_s}} + \dot{\varepsilon}_{m_s}^d)(1 - c\varepsilon_{m_y})}{\cos(\varepsilon_{m_\theta} + \hat{\beta})} - \hat{v}_p$	$\frac{(k_{\varepsilon_{m_s}} e_{\varepsilon_{m_s}} + \dot{\varepsilon}_{m_s}^d)(1 - c\varepsilon_{m_y})}{\cos(\varepsilon_{m_\theta} + \delta_r + \hat{\beta}_r)} - \hat{v}_p$
Générique	$\frac{(k_{\varepsilon_{m_s}} e_{\varepsilon_{m_s}} + \dot{\varepsilon}_{m_s}^d - \hat{f}_{m_{p_s}})(1 - c\varepsilon_{m_y})}{\cos(\varepsilon_{m_\theta})}$	$\frac{(k_{\varepsilon_{m_s}} e_{\varepsilon_{m_s}} + \dot{\varepsilon}_{m_s}^d - \hat{f}_{m_{p_s}})(1 - c\varepsilon_{m_y})}{\cos(\varepsilon_{m_\theta} + \delta_r)}$

TABLE A.2 – Vitesse de contrôle longitudinale v pour les modèles étendus (première ligne) et pour le modèle générique (seconde ligne).

A.2.1.2 Régulation de l'écart latéral

Une erreur de l'écart latéral est tout d'abord définie telle que : $e_{\varepsilon_{m_y}} = \varepsilon_{m_y} - \varepsilon_{m_y}^d$ entre la position latérale courante du robot à la trajectoire et la position latérale désirée. L'objectif est de piloter l'orientation relative du robot afin de faire converger l'écart latéral à zéro.

1.2.1.2.a Premier étage

Pour cela la dynamique spatiale de l'erreur est imposée suivant l'équation :

$$e'_{\varepsilon_{m_y}} = \varepsilon'_{m_y} - \varepsilon_{m_y}^{td} = k_{\varepsilon_{m_y}} e_{\varepsilon_{m_y}}. \quad (\text{A.25})$$

Avec $k_{\varepsilon_{m_y}}$ un gain négatif et $e'_{\varepsilon_{m_y}} = \partial e_{\varepsilon_{m_y}} / \partial \varepsilon_{m_s}$ la dérivée de $e_{\varepsilon_{m_y}}$ par rapport à l'abscisse curviligne. Ceci impose une distance de convergence (et non un temps) et permet d'éviter les singularités à vitesse nulle. La dérivée $\varepsilon'_{m_y} = \partial \varepsilon_{m_y} / \partial \varepsilon_{m_s}$ est donnée par la table Tab.A.3.

ε'_{m_y}	Skid-steering	Deux trains directeurs
Étendu	$\tan(\varepsilon_\theta + \hat{\beta})[1 - c\varepsilon_{m_y}]$	$\tan(\varepsilon_{m_\theta} + \delta_r + \hat{\beta}_r)[1 - c\varepsilon_{m_y}]$
Générique	$\tan(\varepsilon_{m_\theta})[1 - c\varepsilon_{m_y}] + \hat{f}_{m_{p_y}}^s$	$\tan(\varepsilon_{m_\theta} + \delta_r)[1 - c\varepsilon_{m_y}] + \hat{f}_{m_{p_y}}^s$

TABLE A.3 – Dérivée spatiale ε'_{m_y} pour l'observateur étendu (première ligne) et pour l'observateur générique (deuxième ligne).

La notation \hat{f}^s est introduite à partir d'ici. Cette dernière signifie que la vitesse de perturbation est évaluée sur l'abscisse curviligne de la trajectoire et non par rapport au temps noté \hat{f} .

En utilisant les équations génériques de la table Tab.A.3 en sachant que :

$$\varepsilon'_{m_y} = \frac{\partial \varepsilon_{m_y}}{\partial \varepsilon_{m_s}} = \frac{\partial \varepsilon_{m_y}}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial \varepsilon_{m_s}} = \frac{\dot{\varepsilon}_{m_y}}{\dot{\varepsilon}_{m_s}} = \frac{f_{m_y} + \hat{f}_{m_{p_y}}^s}{f_{m_s} + \hat{f}_{m_{p_s}}^s}. \quad (\text{A.26})$$

Il est possible d'obtenir les équations suivantes de $\hat{f}_{m_{p_y}}^s$:

	Skid-steering	Deux trains directeurs
$\hat{f}_{m_{py}}^s =$	$\frac{f_{m_y} + \hat{f}_{m_{py}}}{f_{m_s} + \hat{f}_{m_{ps}}} - \tan(\varepsilon_{m_\theta})(1 - c\varepsilon_{m_y})$	$\frac{f_{m_y} + \hat{f}_{m_{py}}}{f_{m_s} + \hat{f}_{m_{ps}}} - \tan(\varepsilon_{m_\theta} + \delta_r)(1 - c\varepsilon_{m_y})$

TABLE A.4 – Valeur de $\hat{f}_{m_{py}}^s$ évaluer pour les modèles skid-steering et à deux trains directeurs.

$\hat{f}_{m_{py}}^s$ peut être compris comme la vitesse de perturbation latérale exprimée par rapport à la distance parcourue le long de la trajectoire, alors que l'observateur construit précédemment estime $\hat{f}_{m_{ps}}$ et $\hat{f}_{m_{py}}$ à partir d'une dérivée temporelle. Ainsi $\hat{f}_{m_{py}}^s$ s'entend comme la différence entre la valeur non perturbée de ε'_{m_y} (dans le cas du skid-steering $\varepsilon'_{m_y} = \tan(\varepsilon_{m_\theta})[1 - c\varepsilon_{m_y}]$) et sa valeur perturbée selon son abscisse curviligne.

En combinant (A.25) avec les équations de la table Tab.A.3, la valeur de ε_{m_θ} est calculée telle que :

ε_{m_θ}	Skid-steering	Deux trains directeurs
Étendu	$\arctan\left(\frac{k_{\varepsilon_{m_y}} e_{\varepsilon_{m_y}} + \varepsilon'_{m_y}{}^d}{1 - c\varepsilon_{m_y}}\right) - \hat{\beta}$	$\arctan\left(\frac{k_{\varepsilon_{m_y}} e_{\varepsilon_{m_y}} + \varepsilon'_{m_y}{}^d}{1 - c\varepsilon_{m_y}}\right) - \hat{\beta}_r - \delta_r$
Générique	$\arctan\left(\frac{k_{\varepsilon_{m_y}} e_{\varepsilon_{m_y}} + \varepsilon'_{m_y}{}^d - \hat{f}_{m_{py}}^s}{1 - c\varepsilon_{m_y}}\right)$	$\arctan\left(\frac{k_{\varepsilon_{m_y}} e_{\varepsilon_{m_y}} + \varepsilon'_{m_y}{}^d - \hat{f}_{m_{py}}^s}{1 - c\varepsilon_{m_y}}\right) - \delta_r$

TABLE A.5 – Écart de cap ε_{m_θ} pour un mobile à deux trains directeurs et un mobile skid-steering avec les observateurs dédiés et l'observateur générique. Ces valeurs sont ensuite considérées comme la valeur désirée de la commande virtuelle ψ^d .

En pratique, la singularité $1 - c\varepsilon_y$ n'est jamais rencontrée tant que le robot ne se situe pas au centre de la courbure de la trajectoire de référence.

La valeur ε_{m_θ} obtenue dans la table Tab.A.5 est ensuite considérée comme la valeur désirée ψ^d de l'orientation relative du robot. Le second niveau du schéma de contrôle a pour but de réguler cette orientation $\psi = \varepsilon_{m_\theta}$ sur l'orientation relative désirée ψ^d pour amener l'erreur $e_\psi = \psi - \psi^d$ à zéro. Quand ce but est atteint, cela implique que ε_{m_y} converge à son tour sur $\varepsilon_{m_y}^d$ ce qui fait tendre l'erreur $e_{\varepsilon_{m_y}}$ vers zéro.

1.2.1.2.b Second étage pour un mobile type Skid-steering

Étant donné que le mobile skid-steering a la capacité de tourner sur lui-même, il est pertinent de lui imposer une dynamique temporelle dans la régulation de la vitesse de lacet plutôt qu'une dynamique spatiale. Pour réguler cette vitesse, une décroissance exponentielle est imposée à l'erreur e_ψ avec $\dot{e}_\psi = k_\psi e_\psi$ (avec k_ψ un gain négatif). Du fait que la convergence à zéro de l'erreur latérale ($e_{\varepsilon_{m_y}} = 0$) est satisfaite si et seulement si $\psi = \psi^d$ ($e_\psi = 0$), la dynamique imposée par le gain k_ψ doit être nécessairement plus grande que celle du gain $k_{\varepsilon_{m_y}}$ ⁸.

En sachant que $\dot{e}_\psi = k_\psi e_\psi = \dot{\psi} - \dot{\psi}^d$ et $\dot{\psi} = \dot{\varepsilon}_{m_\theta}$ et en utilisant les équations des tables Tab.4.3 et Tab.A.1, la loi de commande de la vitesse de lacet est donnée dans la table Tab.A.6.

Étendu	$\omega = k_\psi e_\psi + \dot{\psi}^d - \hat{\theta}_p + \frac{c(v + \hat{v}_p) \cos(\varepsilon_{m_\theta} + \hat{\beta})}{1 - c\varepsilon_{m_y}}$
Générique	$\omega = k_\psi e_\psi + \dot{\psi}^d - \hat{f}_{p_\theta} + \frac{cv \cos(\varepsilon_{m_\theta})}{1 - c\varepsilon_{m_y}}$

TABLE A.6 – Commande de la vitesse de lacet avec les observateurs dédiés et l'observateur générique pour un mobile Skid-steering.

8. Pour un fonctionnement minimal, le ratio entre ces deux gains ne doit pas être inférieur à deux, sous peine de provoquer des oscillations dans la commande.

1.2.1.2.c Second étage pour un mobile type voiture ou à deux trains directeurs

Le mobile à deux trains directeurs ne pouvant tourner sur lui-même, il est préférable de lui imposer une dynamique spatiale dans la régulation de sa vitesse de lacet : $e'_\psi = k_\psi e_\psi$ avec k_ψ un gain négatif. Comme pour le mobile Skid-steering, le gain k_ψ doit être plus important que le gain $k_{\varepsilon_{m_y}}$ pour garantir la convergence de l'erreur latérale.

En sachant que $k_\psi e_\psi = \psi' - \psi'^d$, $\psi' = \dot{\varepsilon}_{m_\theta} / \dot{\varepsilon}_{m_s}$ et en utilisant les équations des tables Tab.4.2 et Tab.A.1, l'expression de l'angle braquage avant est donnée dans la table Tab.A.7.

Étendu	$\delta_f = \arctan \left(\frac{(k_\psi e_\psi + c + \psi'^d)L}{(v + \hat{v}_p) \cos(\delta_r + \hat{\beta}_r)} + \tan(\delta_r + \hat{\beta}_r) \right) - \hat{\beta}_f$
Générique	$\delta_f = \arctan \left(\frac{(k_\psi e_\psi + c + \psi'^d - \hat{f}_{p_\theta}^s)L}{v \cos(\delta_r)} + \tan(\delta_r) \right)$

TABLE A.7 – Commande de l'angle de braquage avant avec les observateurs dédiés et l'observateur générique pour un mobile à deux trains directeurs.

Du fait que $\hat{\varepsilon}_{m_{p_\theta}}$ est observé dans le repère absolu⁹, la dérivée spatiale $\hat{f}_{m_{p_\theta}}^s$ peut être écrite :

$$\hat{f}_{m_{p_\theta}}^s = \frac{f_{m_\theta} + f_{m_{p_\theta}}}{f_{m_s} + f_{m_{p_s}}} - \frac{f_{m_\theta}}{f_{m_s}}. \quad (\text{A.27})$$

La quantité ψ^d ayant déjà été calculée, ses dérivées temporelles $\dot{\psi}^d$ ou spatiale ψ'^d peuvent être obtenues par une simple dérivation numérique. Par ailleurs, pour éviter le bruit induit par la dérivation numérique, ces quantités peuvent être négligées en pratique, en supposant que la trajectoire est suffisamment "douce" et régulière.

A.2.1.3 Régulation de l'écart de cap

Dans le cas du mobile à deux trains directeurs, son degré de manœuvrabilité supplémentaire lui permet de réguler son angle de cap. Pour cela, une dynamique exponentielle décroissante est imposée à l'erreur $e_{\varepsilon_{m_\theta}} = \varepsilon_{m_\theta} - \varepsilon_{m_\theta}^d$ telle que : $e'_{\varepsilon_{m_\theta}} = k_{\varepsilon_{m_\theta}} e_{\varepsilon_{m_\theta}}$ avec $k_{\varepsilon_{m_\theta}}$ un gain négatif. Ceci mène à l'équation $\varepsilon'_{m_\theta} = k_{\varepsilon_{m_\theta}} e_{\varepsilon_{m_\theta}} + \varepsilon_{m_\theta}^{d'}$. Or $\varepsilon'_{m_\theta} = \psi' = k_\psi e_\psi + \psi'^d = k_\psi(\psi - \psi^d) + \psi'^d$ et en considérant que ψ'^d est négligé, les équations de la table Tab.A.5 permettent d'écrire la loi de commande pour le braquage du train arrière du véhicule tel que :

$$\begin{aligned} k_{\varepsilon_{m_\theta}} e_{\varepsilon_{m_\theta}} + \varepsilon_{m_\theta}^{d'} &= k_\psi \left(\varepsilon_{m_\theta} - \arctan \left(\frac{k_{\varepsilon_{m_y}} e_{\varepsilon_{m_y}} + \varepsilon_{m_y}^{d'} - \hat{f}_{m_{p_y}}^s}{1 - c\varepsilon_{m_y}} \right) + \delta_r \right) \\ \implies \delta_r &= \frac{k_{\varepsilon_{m_\theta}} e_{\varepsilon_{m_\theta}} + \varepsilon_{m_\theta}^{d'}}{k_\psi} + \arctan \left(\frac{k_{\varepsilon_{m_y}} e_{\varepsilon_{m_y}} + \varepsilon_{m_y}^{d'} - \hat{f}_{m_{p_y}}^s}{1 - c\varepsilon_{m_y}} \right) - \varepsilon_{m_\theta}. \end{aligned} \quad (\text{A.28})$$

A.2.2 Commande du manipulateur

Cette partie présente la commande du manipulateur associée aux observateurs présentés dans le chapitre 4. Par ailleurs, seule la commande avec les dérivées de l'observateur générique est présentée ici, le manipulateur n'ayant pas d'observateur dédié. Cette dernière commande est similaire à la commande par retour d'état (A.4) associée au modèle étendu (4.22). Elle s'exprime telle que :

$$\dot{q} = J_t^{-1} \left[\mathcal{C}E_{RS}^{RE} \left(\dot{\varepsilon}_a^d + k_{\varepsilon_a} e_{\varepsilon_a} - \hat{f}_{a_p} \right) - \mathcal{B}v_{ext} \right]. \quad (\text{A.29})$$

9. Nous rappelons que dans le cas présenté ici, l'observateur utilise le modèle hybride Tab.4.7.

A.3 Commande du mobile associée au modèle générique et à l'observateur générique

Cette dernière partie de la commande du mobile présente la synthèse de la commande finale utilisée lors des expérimentations de coordination présentées dans le chapitre 5. Elle se base sur le modèle générique du mobile dans le repère de Frenet présenté au chapitre 3 (voir Sec.3.2.4) associé à l'observateur générique présenté au chapitre 4. Les principes étant exactement les mêmes que les commandes par backstepping utilisant les modèles classiques et étendus, seules les équations finales de commande sont fournies.

Cette commande se base sur le modèle combinant (3.24) et (4.12) :

$$\dot{\varepsilon}_m = \begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_{m_s} \\ \dot{\varepsilon}_{m_y} \\ \dot{\varepsilon}_{m_\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{(v_R \cos(\delta_r) + \omega y_{MR}) \cos(\delta_m + \varepsilon_{m_\theta})}{\cos(\delta_m)(1 - c\varepsilon_{m_y})} + \hat{f}_{m_{ps}} \\ \frac{(v_R \cos(\delta_r) + \omega y_{MR}) \sin(\delta_m + \varepsilon_{m_\theta})}{\cos(\delta_m)} + \hat{f}_{m_{py}} \\ \omega - \frac{c(v_R \cos(\delta_r) + \omega y_{MR}) \cos(\delta_m + \varepsilon_{m_\theta})}{\cos(\delta_m)(1 - c\varepsilon_{m_y})} + \hat{f}_{m_{p\theta}} \end{pmatrix}. \quad (\text{A.30})$$

- **Régulation de l'écart longitudinal :**

$$v_R = \left[\frac{(k_{\varepsilon_{m_s}} e_{\varepsilon_{m_s}} + \varepsilon_{m_s}^d - \hat{f}_{m_{ps}}) \cos(\delta_m)(1 - c\varepsilon_{m_y})}{\cos(\varepsilon_{m_\theta} + \delta_m)} - \omega y_{MR} \right] \frac{1}{\cos(\delta_r)}. \quad (\text{A.31})$$

- **Régulation de l'écart latéral :**

$$\varepsilon_{m_\theta} = \arctan \left(\frac{k_{\varepsilon_{m_y}} e_{\varepsilon_{m_y}} + \varepsilon_{m_y}^{td} - \hat{f}_{m_{py}}^s}{1 - c\varepsilon_{m_y}} \right) - \delta_m. \quad (\text{A.32})$$

- ◊ **Cas d'une base mobile type skid steering :**

$$\omega = \frac{(k_\psi e_\psi + \psi^d - \hat{f}_{m_{p\theta}}) \cos(\delta_m)(1 - c\varepsilon_{m_y}) + c v_R \cos(\delta_r) \cos(\varepsilon_{m_\theta} + \delta_m)}{\cos(\delta_m)(1 - c\varepsilon_{m_y}) - c \cos(\varepsilon_{m_\theta} + \delta_m) y_{MR}}. \quad (\text{A.33})$$

- ◊ **Cas d'une base mobile type voiture ou à deux trains directeurs :**

$$\delta_f = \arctan \left[\frac{L(k_\psi e_\psi + \psi^d - \hat{f}_{m_{p\theta}}^s + c) \cos(\delta_m + \varepsilon_{m_\theta})}{\cos(\delta_m)(1 - c\varepsilon_{m_y}) - y_{MR}(k_\psi e_\psi + \psi^d - \hat{f}_{m_{p\theta}}^s + c) \cos(\delta_m + \varepsilon_{m_\theta})} + \tan(\delta_r) \right]. \quad (\text{A.34})$$

- **Régulation de l'écart de cap**

$$\delta_m = \frac{k_{\varepsilon_{m_\theta}} e_{\varepsilon_{m_\theta}} + \varepsilon_{m_\theta}^{td} - \hat{f}_{m_{p\theta}}^s}{k_\psi} - \varepsilon_{m_\theta} + \arctan \left(\frac{k_{\varepsilon_{m_y}} e_{\varepsilon_{m_y}} + \varepsilon_{m_y}^{td} - \hat{f}_{m_{py}}^s}{1 - c\varepsilon_{m_y}} \right). \quad (\text{A.35})$$

Annexe B

Annexe : Preuve de convergence des observateurs par Lyapunov

Cette annexe détaille la preuve mathématique que les fonctions d'observation α_Δ ¹ et α_o présentées en Sec.4.2 imposent la convergence asymptotique de l'erreur d'observation à zéro. Pour cela, la fonction candidate de Lyapunov suivante est proposée :

$$V = \frac{1}{2}(e_\Delta^o)^t K_o e_\Delta^o + \frac{1}{2}(e_o^o)^t e_o^o. \quad (\text{B.1})$$

Cette fonction est positive défini et sa dérivée s'exprime telle que :

$$\dot{V} = (\dot{e}_\Delta^o)^t K_o e_\Delta^o + (e_o^o)^t \dot{e}_o^o. \quad (\text{B.2})$$

En utilisant les équations de modèle (4.6) et d'observation (4.7), il est possible d'obtenir :

$$\begin{cases} \dot{e}_\Delta^o = \dot{\varepsilon}_\Delta - \dot{\hat{\varepsilon}}_\Delta = f(\varepsilon_\Delta, \varepsilon_o, u) - f(\varepsilon_\Delta, \hat{\varepsilon}_o, u) - \alpha_\Delta \\ \dot{e}_o^o = \dot{\varepsilon}_o - \alpha_o \end{cases} \quad (\text{B.3})$$

Les hypothèses suivantes sont alors posées :

- L'erreur d'observation e_o^o est suffisamment petite pour que le développement de Taylor de la fonction $f(\varepsilon_\Delta, \varepsilon_o, u)$ autour de $\hat{\varepsilon}_o$ puisse être tronqué tel que :

$$f(\varepsilon_\Delta, \varepsilon_o, u) = f(\varepsilon_\Delta, \hat{\varepsilon}_o, u) + \frac{\partial f(\varepsilon_\Delta, \hat{\varepsilon}_o, u)}{\partial \varepsilon_o} e_o^o. \quad (\text{B.4})$$

- La dérivée $\dot{\varepsilon}_o$ est négligeable par rapport à la dynamique imposée des observateurs.
- En considérant ces deux hypothèses et en reportant l'équation (4.8) dans (B.3), on parvient à :

$$\begin{cases} \dot{e}_\Delta^o = \frac{\partial f(\varepsilon_\Delta, \hat{\varepsilon}_o, u)}{\partial \varepsilon_o} e_o^o - K_\Delta e_\Delta^o \\ \dot{e}_o^o = -K_o \left(\frac{\partial f(\varepsilon_\Delta, \hat{\varepsilon}_o, u)}{\partial \varepsilon_o} \right)^t e_\Delta^o \end{cases} \quad (\text{B.5})$$

Il suffit ensuite d'injecter l'expression de \dot{e}_Δ^o et de \dot{e}_o^o dans l'équation (B.2) pour obtenir :

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \left(\frac{\partial f(\varepsilon_\Delta, \hat{\varepsilon}_o, u)}{\partial \varepsilon_o} e_o^o - K_\Delta e_\Delta^o \right)^t K_o e_\Delta^o - (e_o^o)^t \left(\frac{\partial f(\varepsilon_\Delta, \hat{\varepsilon}_o, u)}{\partial \varepsilon_o} \right)^t K_o e_\Delta^o \\ \dot{V} &= -(e_\Delta^o)^t K_\Delta K_o e_\Delta^o \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

1. Par rapport aux notations utilisées dans le chapitre 4, la notation ε_a utilisée pour la synthèse de l'observateur de Lyapunov dédié modèle est remplacée par la notation ε_Δ pour garder la validité de la preuve dans un repère quelconque, notamment lors de la synthèse de l'observateur générique qui utilise le même raisonnement que celui présenté ici.

Sachant que K_Δ et K_o sont des matrices diagonales strictement positives, alors $\dot{V} \leq 0$. Ceci assure donc la stabilité du système.

Par ailleurs, le Théorème de LaSalle indique que e^o converge vers le plus grand sous-espace invariant inclus dans $\{e^o/\dot{V} = 0\}$. Ici \dot{V} est nulle si et seulement si e_Δ^o est nulle. De fait, la position et l'orientation observées convergent vers leurs valeurs mesurées. Enfin, en injectant $e_\Delta^o = 0$ et $\dot{e}_\Delta^o = 0$ dans la première équation de (B.5), alors $e_o^o = 0$. En conclusion, le plus grand sous-espace invariant est réduit à la seule solution constante $e^o = 0$. Ainsi le théorème de LaSalle établit la stabilité asymptotique du système et donc la convergence des glissements observés vers leurs valeurs réelles.

Annexe C

Rappels Mathématiques

SOMMAIRE DU CHAPITRE

C.1	Représentation de la rotation d'un repère	214
C.1.1	Matrice de rotation	214
C.1.1.1	Rotations successives	214
C.1.1.2	Rotation inverse	214
C.1.1.3	Dérivée de la matrice de rotation	214
C.1.1.4	Discussion sur la représentation	215
C.1.2	Représentation des angles d'Euler Θ	215
C.1.2.1	Relation avec la matrice de rotation	215
C.1.2.2	Extraction des paramètres à partir d'une matrice de rotation	215
C.1.2.3	Discussion sur la représentation	216
C.1.3	Représentation axe-angle u_Θ	216
C.1.3.1	Définition	216
C.1.3.2	Relation avec la matrice de rotation	216
C.1.3.3	Extraction des paramètres à partir d'une matrice de rotation	216
C.1.3.4	Discussion sur la représentation	217
C.1.4	Représentation quaternion	217
C.1.4.1	Rotations successives	217
C.1.4.2	Rotation inverse	217
C.1.4.3	Relation avec la matrice de rotation	217
C.1.4.4	Extraction des paramètres à partir d'une matrice de rotation	218
C.1.4.5	Discussion sur la représentation	218
C.2	Vitesse d'une rotation	218
C.3	Matrice	218
C.3.1	Matrice antisymétrique	218
C.3.2	Matrice de passage	219
C.3.3	Décomposition SVD	220
C.4	Courbe paramétrée	220
C.4.1	Longueur d'une courbe	220
C.4.2	Reparamétrisation	221
C.4.2.1	Paramétrisation par abscisse curviligne	221
C.4.3	Régularité de la courbe	221
C.4.4	Courbe en dimension deux	221
C.4.4.1	Repère de Frenet	222
C.4.4.2	Courbure	222
C.4.4.3	Formule de Frenet	223
C.4.5	Courbe en dimension trois (courbe gauche)	223
C.4.5.1	Repère de Frenet	223
C.4.5.2	Description locale de la courbe gauche	223

C.4.5.3 Formule de Frenet 224
 C.4.5.4 Calcul du trièdre de Frenet dans la cas d'un paramétrage quelconque 224
 C.4.6 Accélération dans le repère de Frenet 225
 C.4.7 Définition du repère de Frenet dans \mathbb{R}^3 pour une droite 225

C.1 Représentation de la rotation d'un repère

Cette section décrit les quatre façons différentes de représenter une rotation dans l'espace 3D : les matrices de rotation, les angles d'Euler, les quaternions et la représentation axes-angles. Pour chacune des représentations existantes, il existe des relations pour passer de l'une à l'autre qui seront données dans les différents paragraphes consacrés.

C.1.1 Matrice de rotation

Définition C.1. La matrice de rotation (aussi appelée matrice des cosinus directeurs) permet de représenter une rotation dans un espace à n dimensions. Une rotation 3D (C.1) quelconque est donc représentée par une matrice de dimension 3 :

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}. \tag{C.1}$$

Ses neuf paramètres sont reliés par plusieurs relations dues au fait que chaque colonne et chaque ligne de la matrice doit représenter un vecteur unitaire. Les trois matrices de rotations élémentaires dans l'espace 3D sont définies autour de chacun des axes principaux du repère de la façon suivante :

$$R^x(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad R^y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad R^z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{C.2}$$

Ces trois matrices représentent respectivement la rotation autour des axes x , y et z d'un angle θ . Chacune d'entre elles peut s'exprimer en prenant successivement chaque axe du repère, pivoter autour de l'axe de rotation et finalement projeter sur les axes du repère initial. Ainsi, chaque axe donne un vecteur colonne et chaque élément de la ligne correspond à la projection du vecteur sur un des axes du repère initial.

C.1.1.1 Rotations successives

La matrice de deux rotations successives autour d'axes différents peut être représentée par la multiplication des deux matrices de rotation dont elle est issue. Ainsi, la rotation d'angle θ_1 autour de x puis de θ_2 autour de z donne :

$$R = R^x(\theta_1)R^z(\theta_2). \tag{C.3}$$

C.1.1.2 Rotation inverse

La matrice $R(-\theta)$ représentant la rotation inverse d'une rotation $R(\theta)$ est donnée par l'inverse de $R(\theta)$. De plus, en sachant qu'une matrice de rotation est orthogonale de déterminant égal à un, il est possible d'écrire :

$$R(-\theta) = R(\theta)^{-1} = R(\theta)^t. \tag{C.4}$$

C.1.1.3 Dérivée de la matrice de rotation

La dérivée de la matrice de rotation est donnée par l'expression (SPONG, HUTCHINSON, VIDYASAGAR et al. (2006)) :

$$\dot{R}_{R_B}^{R_A} = [\omega_{R_A} |_{R_B}]_{\times} R_{R_B}^{R_A}. \tag{C.5}$$

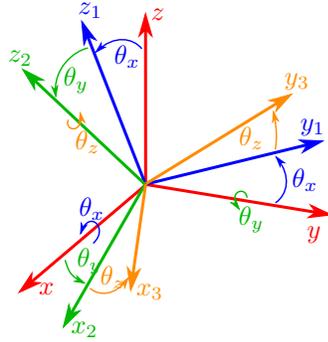


FIGURE C.1 – Rotation par les angles d'Euler selon l'ordre de rotation XYZ.

C.1.1.4 Discussion sur la représentation

Cette représentation de la rotation est maximale parmi celles présentées dans cette section. Elle possède neuf paramètres reliés par six relations. De plus, elle ne permet pas intuitivement de se faire à l'esprit une image de la rotation réelle du repère. Cependant, elle possède deux avantages importants : elle est dénuée de toute singularité et permet la réalisation de calculs directement par sa représentation.

C.1.2 Représentation des angles d'Euler Θ

Définition C.2. L'une des manières les plus communes pour représenter une rotation dans l'espace 3D est l'utilisation des angles d'Euler introduits par *Leonhard Euler* au 18^e siècle. Le principe de cette représentation est de faire effectuer à un repère (ou solide) trois rotations successives autour de trois axes successivement différents. Cette représentation est donc paramétrée par trois angles ($\psi \theta \varphi$)^t. De plus l'ordre des axes de rotation successifs n'étant pas défini, il existe plusieurs choix possibles et donc autant de représentations possibles de ce type d'opération. La rotation dans l'ordre ZYZ est communément nommée les angles d'Euler, la rotation XYZ le roulis-tangage-lacet (roll-pitch-yaw) et la rotation ZYX les angles de Tait-Bryan.

La figure suivante Fig.(C.1) présente la représentation en XYZ qui consiste en une rotation θ_x autour de l'axe X puis une rotation θ_y autour de l'axe Y du nouveau repère, et se termine par une dernière rotation θ_z autour de l'axe Z. Ce type de représentation porte aussi le nom de RPY pour roll-pitch-yaw et se paramètre telle que :

$$\Theta = \begin{pmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{pmatrix}. \quad (\text{C.6})$$

C.1.2.1 Relation avec la matrice de rotation

A partir de ces paramètres et de la convention choisie, il est possible de déduire la matrice de rotation associée simplement par la multiplication successive de trois matrices de rotation¹ :

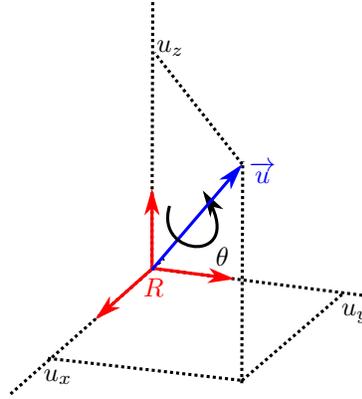
$$R = R^x(\theta_x)R^y(\theta_y)R^z(\theta_z) = \begin{pmatrix} C_{\theta_y}C_{\theta_z} & -S_{\theta_z}C_{\theta_y} & S_{\theta_y} \\ S_{\theta_x}S_{\theta_y}C_{\theta_z} + C_{\theta_x}S_{\theta_z} & -S_{\theta_x}S_{\theta_y}S_{\theta_z} + C_{\theta_x}S_{\theta_z} & -C_{\theta_y}S_{\theta_x} \\ -C_{\theta_x}S_{\theta_y}C_{\theta_z} + S_{\theta_x}S_{\theta_z} & C_{\theta_x}S_{\theta_y}S_{\theta_z} + C_{\theta_z}S_{\theta_x} & C_{\theta_x}C_{\theta_y} \end{pmatrix}. \quad (\text{C.7})$$

C.1.2.2 Extraction des paramètres à partir d'une matrice de rotation

Soit une matrice de rotation quelconque de la forme (C.1) et la convention de rotation choisie XYZ. Il est possible, à partir de cette matrice de rotation, de remonter aux angles d'Euler initiaux par les relations suivantes :

$$\theta_x = \arctan\left(\frac{-r_{23}}{r_{33}}\right) \quad \theta_y = \arctan\left(\frac{r_{13}}{\sqrt{1-r_{13}^2}}\right) \quad \theta_z = \arctan\left(\frac{-r_{12}}{r_{11}}\right). \quad (\text{C.8})$$

1. La notation suivante est adoptée pour plus de concision : $C_a = \cos(a)$ et $S_a = \sin(a)$.

FIGURE C.2 – Représentation axe-angle u_θ .

C.1.2.3 Discussion sur la représentation

Cette représentation a l'avantage d'être la plus minimale avec seulement trois paramètres. Cependant, elle souffre d'un problème nommé Gimbal Lock (ou blocage de cardan) qui arrive lorsque deux axes de rotation successifs se retrouvent parallèles. Ce problème conduit à une singularité mathématique dans les relations d'extractions des angles depuis une matrice de rotation. En effet, dans la relation (C.7), en identifiant terme à terme avec (C.1) il apparaît que $r_{13} = \sin(\theta_y)$. Donc lorsque $\theta_y = \frac{\pi}{2}$, il suit $\sin(\theta_y) = 1$. A ce moment la relation d'extraction de θ_y devient singulière.

C.1.3 Représentation axe-angle u_Θ

C.1.3.1 Définition

Définition C.3. Une autre façon de représenter la rotation dans l'espace 3D est la représentation u_θ . Ainsi, un repère ayant subi une rotation par rapport à un autre, peut être vu comme un repère ayant tourné d'un angle θ autour d'un axe dirigé par un vecteur unitaire \vec{u} (voir Fig.C.2). Le vecteur ayant trois composantes dans l'espace, $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z)^t$, la rotation dans l'espace 3D est alors représentée par un ensemble de quatre paramètres :

$$u_\Theta = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \\ \theta \end{pmatrix}. \quad (\text{C.9})$$

C.1.3.2 Relation avec la matrice de rotation

Il est également possible d'extraire les différentes composantes de la représentation à partir d'une matrice de rotation classique selon la relation ci-dessous :

$$R = \begin{pmatrix} u_x^2(1 - \cos(\theta)) + \cos(\theta) & u_x u_y(1 - \cos(\theta)) - u_z \sin(\theta) & u_x u_z(1 - \cos(\theta)) + u_y \sin(\theta) \\ u_x u_y(1 - \cos(\theta)) + u_z \sin(\theta) & u_y^2(1 - \cos(\theta)) + \cos(\theta) & u_y u_z(1 - \cos(\theta)) - u_x \sin(\theta) \\ u_x u_z(1 - \cos(\theta)) - u_y \sin(\theta) & u_y u_z(1 - \cos(\theta)) + u_x \sin(\theta) & u_z^2(1 - \cos(\theta)) + \cos(\theta) \end{pmatrix}. \quad (\text{C.10})$$

C.1.3.3 Extraction des paramètres à partir d'une matrice de rotation

A partir d'une matrice de rotation quelconque de la forme (C.1), il est possible d'extraire les paramètres de la représentation par les relations suivantes :

$$\theta = \arccos \left(\frac{r_{11} + r_{22} + r_{33} - 1}{2} \right). \quad (\text{C.11})$$

$$u = \frac{1}{2 \sin(\theta)} \begin{pmatrix} r_{32} - r_{23} \\ r_{13} - r_{31} \\ r_{21} - r_{12} \end{pmatrix}. \quad (\text{C.12})$$

C.1.3.4 Discussion sur la représentation

Contrairement à la représentation des angles d'Euler, cette représentation est moins minimal mais ne souffre plus de singularité comme le blocage de cardan. Elle possède cependant le désavantage de nécessairement devoir repasser par les matrices de rotation pour pouvoir effectuer un calcul de positionnement dans l'espace. Elle n'est donc, au même titre que les angles d'Euler, qu'une représentation intuitivement représentable dans l'esprit d'une rotation en trois dimensions. De plus, elle possède une ambiguïté. En effet, une rotation d'angle θ autour d'un axe u peut également être représentée comme une rotation d'angle $-\theta$ autour de l'axe $-u$.

C.1.4 Représentation quaternion

Définition C.4. Les quaternions sont un nouvel objet mathématique introduit par William Rowan Hamilton en 1843 et sont le premier exemple de nombres hypercomplexes. Un quaternion est représenté par un unique ensemble de quatre scalaires $(w \ x \ y \ z)^t$ sous la forme :

$$q = w + xi + yj + zk. \quad (\text{C.13})$$

Avec les trois éléments $(i \ j \ k)^t$ satisfaisant les relations :

$$i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1. \quad (\text{C.14})$$

Les quaternions sont formés de deux parties, la partie réelle w et la partie imaginaire $xi + yj + zk$. Ces objets possèdent leur propre algèbre où la multiplication entre deux quaternions n'est pas commutative.

C.1.4.1 Rotations successives

Un quaternion peut-être vu comme un vecteur u (partie complexe) ainsi qu'un angle de rotation 2θ (partie réelle). Soit v un vecteur ordinaire représenté comme un quaternion avec une partie réelle nulle. Le produit qvq^{-1} renvoie le vecteur v tourné d'un angle θ autour de l'axe dirigé par u avec q un quaternion unitaire. Cette opération se nomme également la **conjugaison** par q . De la même façon, il est possible de réaliser plusieurs rotations successives en appliquant plusieurs fois cette conjugaison avec des quaternions différents.

C.1.4.2 Rotation inverse

Pour réaliser la rotation inverse avec un quaternion, il suffit de réaliser la conjugaison avec le quaternion inverse tel que : $q^{-1}(qvq^{-1})q = v$.

C.1.4.3 Relation avec la matrice de rotation

La relation suivante permet de calculer une matrice de rotation à partir d'un quaternion :

$$R = \begin{pmatrix} 1 - 2(y^2 + z^2) & 2(xy - wz) & 2(xz - wy) \\ 2(xy + xw) & 1 - 2(x^2 + z^2) & 2(yz - wx) \\ 2(xz - wy) & 2(yz + wx) & 1 - 2(x^2 + y^2) \end{pmatrix}. \quad (\text{C.15})$$

C.1.4.4 Extraction des paramètres à partir d'une matrice de rotation

Il est possible d'extraire les paramètres d'un quaternion à partir d'une matrice de rotation en utilisant les relations ci-dessous :

$$w = \frac{1}{2}\sqrt{1 + r_{11} + r_{22} + r_{33}} \quad x = \frac{r_{32} - r_{23}}{4w} \quad y = \frac{r_{13} - r_{31}}{4w} \quad z = \frac{r_{21} - r_{12}}{4w} . \quad (\text{C.16})$$

C.1.4.5 Discussion sur la représentation

Cette représentation des rotations dans l'espace a la réputation d'être la plus simple et élégante. En effet, elle ne possède aucune singularité contrairement aux angles d'Euler, elle est aussi minimale que la représentation axe-angle et possède sa propre algèbre permettant d'effectuer directement les calculs avec cette représentation sans passer par les matrices de rotation. Les relations entre matrice de rotation et quaternion données précédemment montrent que l'équivalence existe, mais sans pour autant être nécessaire. De plus, l'utilisation de l'interpolation linéaire sphérique permet de trouver les rotations minimales dans l'espace entre deux positions, ce que ne permettent pas les autres représentations. Elle a cependant le désavantage de n'être que très peu interprétable intuitivement par l'esprit pour se représenter la rotation donnée par le quaternion.

C.2 Vitesse d'une rotation

La vitesse d'une rotation dépend des paramètres utilisés pour sa représentation. Par exemple, pour les angles d'Euler, elle dépend de la vitesse de chacun des angles indépendamment autour de son axe de rotation.

Ainsi cette vitesse se notera :

$$\dot{\Theta}_{R_1/R_2} \Big|_{R_3} = \begin{pmatrix} \dot{\theta}_x \\ \dot{\theta}_y \\ \dot{\theta}_z \end{pmatrix} . \quad (\text{C.17})$$

avec $(\theta_x \theta_y \theta_z)$ les angles d'Euler représentant cette rotation et R_1, R_2 et R_3 des repères quelconques. Cependant, l'utilisation de cette représentation pose certains problèmes car elle n'a pas de structure d'espace vectoriel. Pour pallier à cela, la représentation des vecteurs vitesse de rotation peut être utilisée. Cette dernière, notée ω est usuelle en mécanique et permet d'exprimer la vitesse de rotation d'un repère autour d'un autre, en gardant une structure d'espace vectoriel. Grâce à la composition des vecteurs vitesse de rotation, il est possible d'exprimer :

$$\omega_{R_1/R_2} \Big|_{R_3} = u_x \dot{\theta}_x + u_y \dot{\theta}_y + u_z \dot{\theta}_z . \quad (\text{C.18})$$

avec $(u_x u_y u_z)$ les axes portant les différentes rotations des angles d'Euler entre les repères R_1 et R_3 . L'équation peut donc se réécrire :

$$\omega_{R_1/R_2} \Big|_{R_3} = (u_x \ u_y \ u_z) \dot{\Theta}_{R_1/R_2} \Big|_{R_3} = U_{R_3}^{R_1} \dot{\Theta}_{R_1/R_2} \Big|_{R_3} . \quad (\text{C.19})$$

avec :

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \sin(\theta_y) \\ 0 & \cos(\theta_x) & -\cos(\theta_y) \sin(\theta_x) \\ 0 & \sin(\theta_x) & \cos(\theta_y) \cos(\theta_x) \end{pmatrix} . \quad (\text{C.20})$$

et les angles $(\theta_x \theta_y \theta_z)^t$ sont les angles extraits de la matrice de rotation $R_{R_3}^{R_1}$

C.3 Matrice

C.3.1 Matrice antisymétrique

Les différents éléments donnés dans cette partie peuvent être retrouvés dans SPONG, HUTCHINSON, VIDYASAGAR et al. (2006) où ils sont plus amplement détaillés.

Définition C.5. Soit S une matrice carrée de taille n , cette matrice est dite **antisymétrique** si et seulement si :

$$S^t + S = 0. \quad (\text{C.21})$$

Ce qui est équivalent à dire :

$$s_{ij} + s_{ji} = 0 \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (\text{C.22})$$

La matrice S est donc nécessairement de la forme :

$$S = \begin{pmatrix} 0 & -s_3 & s_2 \\ s_3 & 0 & -s_1 \\ -s_2 & s_1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (\text{C.23})$$

La matrice antisymétrique permet alors de définir un opérateur matriciel S sur un vecteur $a = (a_x, a_y, a_z)^t$ pour le produit vectoriel tel que :

$$a \wedge b = S(a)b. \quad (\text{C.24})$$

avec $S(a)$ la matrice définie telle que :

$$S = \begin{pmatrix} 0 & -a_z & a_y \\ a_z & 0 & -a_x \\ -a_y & a_x & 0 \end{pmatrix} = S(a). \quad (\text{C.25})$$

La matrice $S(a)$ peut aussi être notée $[a]_\times$

Propriété C.1. *L'opérateur S est linéaire :*

$$S(\alpha a + \beta b) = \alpha S(a) + \beta S(b). \quad (\text{C.26})$$

avec a et b appartenant à \mathbb{R}^3 et α, β des scalaires.

Propriété C.2. *Soit une matrice $R \in SO(3)$ et $a \in \mathbb{R}^3$*

$$RS(a)R^t = S(Ra). \quad (\text{C.27})$$

C.3.2 Matrice de passage

Une matrice de passage permet de passer un élément géométrique d'un repère à un autre. Ce passage se réalise au moyen de deux opérations élémentaires, une translation et une rotation, qui se traduisent par l'utilisation d'une matrice de rotation R et d'un vecteur de translation T au sein d'une matrice homogène P :

$$P = \begin{pmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (\text{C.28})$$

L'inverse d'une matrice de passage est donnée par :

$$P^{-1} = \begin{pmatrix} R^t & -R^t T \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (\text{C.29})$$

Les coordonnées d'un point \mathcal{P} , exprimées dans un premier repère, se calculent, pour un second repère, au moyen de ces matrices de passage. La figure C.3 illustre ceci :

$$\mathcal{P}_{/R_0} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{pmatrix} = P_{R_0}^{R_1} \mathcal{P}_{/R_1} = P_{R_0}^{R_1} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (\text{C.30})$$

Le changement de direction dans le passage d'un repère à l'autre se fait par l'intermédiaire de l'inverse de la matrice de passage qui s'exprime :

$$P_{R_0}^{R_1} = (P_{R_1}^{R_0})^{-1}. \quad (\text{C.31})$$

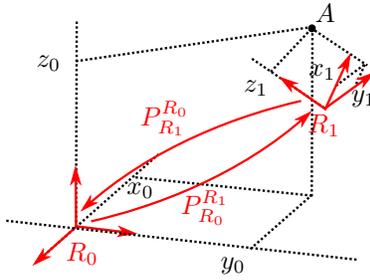


FIGURE C.3 – Changement de repère par l'utilisation des matrices de passage.

C.3.3 Décomposition SVD

Si une matrice A est carrée, de dimension $n \times n$ avec n **vecteurs propres** indépendants alors A est diagonalisable telle que : $A = PA'P^{-1}$ avec A' matrice diagonale dont chacun des éléments de la diagonale est une valeur propre de A . La décomposition SVD est la généralisation de la diagonalisation à une matrice quelconque $m \times n$ avec des **vecteurs singuliers**.

Soit A une matrice de taille $m \times n$ et de rang r . On peut décomposer A de la façon suivante :

$$A = U\Sigma V^t = \sigma_1 u_1 v_1^t + \sigma_2 u_2 v_2^t + \dots + \sigma_r u_r v_r^t = \sum_{i=1}^r (\sigma_i u_i v_i^t). \quad (\text{C.32})$$

Avec $U \in \mathbb{R}^{m \times m}$ et $V \in \mathbb{R}^{n \times n}$ deux matrices orthogonales et $\Sigma \in \mathbb{R}^{m \times n}$ une matrice diagonale formée par les r (rang de la matrice) valeurs singulières $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r$, de la forme :

$$V = (v_1 \quad v_2 \quad v_3 \quad \dots \quad v_n) \in \mathbb{R}^{n \times n}. \quad (\text{C.33})$$

$$U = (u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad \dots \quad u_m) \in \mathbb{R}^{m \times m}. \quad (\text{C.34})$$

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_r & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{m \times n}. \quad (\text{C.35})$$

Avec $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r \geq 0$.

C.4 Courbe paramétrée

Cette section fournit plusieurs rappels et précisions sur les courbes paramétrées servant à décrire les trajectoires des systèmes étudiés dans ce rapport. Elle résume les notions importantes et les principales formulations nécessaires pour la modélisation des systèmes dans le repère de Frenet.

Une courbe paramétrée est une application notée $\gamma : I \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$. Intuitivement, une courbe paramétrée est une succession de points construite à partir d'une fonction dépendante d'un certain paramètre t décrivant une courbe \mathcal{C} dans l'espace, définie comme le support de la courbe paramétrée. Il est alors possible d'étudier la continuité ainsi que la dérivabilité de cette courbe.

C.4.1 Longueur d'une courbe

Définition C.6. Si la longueur de la courbe est finie (définie sur un intervalle tel que $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$), elle est dite **rectifiable**.

Soit $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ une courbe paramétrée de classe \mathcal{C}^1 , alors la longueur $l(\gamma)$ de la courbe est donnée par l'expression :

$$l(\gamma) = \int_a^b \|\gamma'(t)\| dt. \quad (\text{C.36})$$

C.4.2 Reparamétrisation

De plus, une même courbe peut être décrite de plusieurs manières possibles en fonction de la paramétrisation choisie.

Exemple C.1. La courbe $\gamma_1 : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^2$ donnée par $\gamma_1(t) = \begin{pmatrix} rt \\ r\sqrt{1-t^2} \end{pmatrix}$ a pour support géométrique un quart de cercle de rayon r . Or, ce support géométrique peut également être décrit par la courbe $\gamma_2 : [0, \frac{\pi}{2}] \rightarrow \mathbb{R}^2$ donnée par $\gamma_2(\theta) = \begin{pmatrix} r \cos(\theta) \\ r \sin(\theta) \end{pmatrix}$.

En définissant un difféomorphisme $\varphi : J \subset \mathbb{R} \rightarrow I$, alors la courbe paramétrée $\gamma_2 = \gamma_1 \circ \varphi : J \rightarrow \mathbb{R}^n$ possède exactement le même support \mathcal{C} que γ_1 . φ est un alors changement de variable admissible et γ_2 est une reparamétrisation de γ_1 .

C.4.2.1 Paramétrisation par abscisse curviligne

L'une des reparamétrisations les plus courantes des courbes paramétrées est celle faite par abscisse curviligne le long de la courbe. Cette dernière permet de représenter la courbe en fonction de la distance à l'origine le long de son support. Elle est couramment notée s . Cette paramétrisation est dite **normale** ou **par abscisse curviligne**.

Formellement, une paramétrisation $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ est dite par abscisse curviligne si $\forall [t_1, t_2] \subset I : l(\gamma_{[t_1, t_2]}) = t_2 - t_1$. C'est-à-dire que la longueur entre les points $\gamma(t_1)$ et $\gamma(t_2)$ est égale à $t_2 - t_1$.

On peut alors définir l'abscisse curviligne à partir du point t_0 de la courbe comme :

$$s(t) = \int_{t_0}^t \|\gamma'(u)\| du. \quad (\text{C.37})$$

Propriété C.3. Si $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ est une courbe dont la paramétrisation est par abscisse curviligne, alors :

$$\forall s \in I, \quad \|\gamma'(s)\| = 1. \quad (\text{C.38})$$

Un paramétrage de courbe vérifiant la condition (C.38) est dit **naturel**.

Note C.1. Pour le reste de cette partie C.4, lorsque dans les équations sera explicitée la dépendance d'un paramètre en particulier, cela signifiera que les relations ne sont vraies que pour ce paramétrage. Si le paramétrage donné est t , les relations sont générales pour tout paramétrage.

C.4.3 Régularité de la courbe

Définition C.7. Une courbe paramétrée $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ est dite **régulière** si pour tout $t \in I$, $\gamma'(t) \neq 0$.

Une courbe paramétrée régulière admet donc une tangente en tout point.

Note C.2. Si une courbe γ est régulière et que φ est une reparamétrisation de γ , alors φ est aussi régulière.

C.4.4 Courbe en dimension deux

Cette partie s'intéresse aux courbes régulières à deux dimensions. Deux notions fondamentales permettant de décrire localement la courbe sont introduites : le repère de Frenet et la courbure.

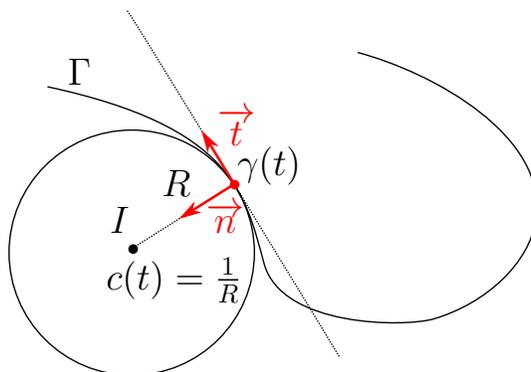


FIGURE C.4 – Courbe plane

C.4.4.1 Repère de Frenet

Le repère de Frenet sur une courbe paramétrée est un repère mobile qui évolue le long de celle-ci. Il correspond au repère orthonormé :

$$(\gamma(t), \vec{t}(t), \vec{n}(t)). \quad (\text{C.39})$$

avec $\vec{t}(t) = \frac{\gamma'(t)}{\|\gamma'(t)\|}$ et \vec{n} le vecteur formant une base directe avec \vec{t} .

La droite tangente à la courbe en un point ne dépend pas de la paramétrisation, étant donné que le support est invariant par rapport au choix du paramètre. Cependant, le vecteur tangent et donc par conséquent le repère de Frenet, dépend du sens de parcours le long de la courbe.

C.4.4.2 Courbure

En chaque point de la courbe, il est possible de représenter l'allure locale de cette dernière selon sa courbure $c(s)$. De façon intuitive, la courbure représente la manière dont la courbe effectue des virages plus ou moins serrés. Une trajectoire droite a une courbure nulle mais plus la trajectoire se courbe, plus sa courbure augmente.

On peut définir en chaque point de la courbe, un cercle tangent appelé **cercle osculateur** qui correspond au cercle "épousant au mieux la forme" de la courbe. La courbure est alors donnée par l'inverse du rayon de ce cercle.

Propriété C.4. Soit une courbe paramétrée $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^2$ régulière de classe C^2 de paramétrisation normale alors :

$$\forall s \in I, \quad \gamma''(s) = \vec{t}'(s) = \bar{c}(s) \vec{n}(s). \quad (\text{C.40})$$

Définition C.8. La courbure algébrique $\bar{c}(s)$ de la courbe γ est donnée par :

$$\bar{c}(s) = \vec{t}'(s) \vec{n}(s). \quad (\text{C.41})$$

Définition C.9. La courbure géométrique $c(s)$ de la courbe γ est donnée par :

$$c(s) = |\bar{c}(s)| = \|\gamma''(s)\|. \quad (\text{C.42})$$

Remarque C.1. Ci-dessous, quelques remarques concernant la courbure d'une courbe plane :

- Les points de la courbe dont la courbure est non nulle sont appelés des points **bi-réguliers**
- La valeur de la courbure ne dépend pas de la paramétrisation
- La courbure est définie au signe près, dépendant du sens de parcours de la courbe et de l'orientation du plan.
- Le centre du cercle osculateur $C(t)$ est $C(t) = \gamma(t) + \frac{1}{\bar{c}(t)} \vec{n}(t)$.

C.4.4.3 Formule de Frenet

On peut également définir les formules de Frenet qui expriment la façon dont le repère évolue le long de la courbe.

Définition C.10. Soit $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^2$ une courbe de paramétrisation normale de classe \mathcal{C}^2 , alors :

$$\forall s \in I, \quad \begin{cases} \vec{t}'(s) &= \bar{c}(s) \vec{n}(s) \\ \vec{n}'(s) &= -\bar{c}(s) \vec{t}(s) \end{cases} . \quad (\text{C.43})$$

C.4.5 Courbe en dimension trois (courbe gauche)

Cette partie s'intéresse maintenant aux courbes régulières de classe \mathcal{C}^3 à trois dimensions autrement appelées courbes gauches. Il y est introduit une notion fondamentale supplémentaire spécifique à ce type de courbe : la torsion.

C.4.5.1 Repère de Frenet

De la même façon que dans le cas des courbes planes, il est possible de définir un repère de Frenet pour les courbes gauches.

On retrouve alors :

$$\vec{t}(s) = \frac{\gamma'(s)}{\|\gamma'(s)\|}. \quad (\text{C.44})$$

et

$$\vec{n}(s) = \frac{1}{c(s)} \vec{t}'(s). \quad (\text{C.45})$$

avec $\vec{t}'(s) = \frac{\gamma''(s)}{\|\gamma''(s)\|}$.

Aux deux vecteurs $\vec{t}(t)$ et $\vec{n}(t)$ déjà définis, est alors ajouté un troisième vecteur $\vec{b}(t)$ permettant de compléter le trièdre direct de la base, défini tel que :

$$\vec{b}(t) = \vec{t}(t) \wedge \vec{n}(t). \quad (\text{C.46})$$

Le vecteur \vec{b} est alors appelé le vecteur **binormal** du repère de Frenet.

Le repère de Frenet correspond donc au repère orthonormé direct :

$$(\gamma(t), \vec{t}(t), \vec{n}(t), \vec{b}(t)). \quad (\text{C.47})$$

Note C.3. Ci-dessous quelques remarques concernant les courbes gauches et le repère de Frenet :

- Le plan défini par les vecteurs $\vec{t}(t)$ et $\vec{n}(t)$ est nommé **plan osculateur**.
- Le **centre de courbure** C est donné par $C(t) = \gamma(t) + \frac{1}{c(t)} \vec{n}(t)$.
- La sphère osculatrice est la sphère de centre $C(t)$ et de rayon $\frac{1}{c(t)}$.

C.4.5.2 Description locale de la courbe gauche

L'étude locale des courbes gauches est plus complexe que pour les courbes planes. En effet, dans le cas des courbes planes, il n'y a qu'une seule direction normale à la courbe, tandis que les courbes gauches font apparaître un plan orthogonal. Un nouveau paramètre est alors nécessaire pour la description de la courbe : la torsion τ .

3.4.5.2.a Courbure

Dans le cas d'une courbe gauche, la courbure algébrique ne peut plus être définie et se trouve remplacée par une courbure géométrique, toujours positive telle que :

$$c(s) = \|\gamma''(s)\|. \quad (\text{C.48})$$

dans le cas d'une paramétrisation normale, et

$$c(t) = \frac{\|\gamma'(t) \wedge \gamma''(t)\|}{\|\gamma'(t)\|^3}. \quad (\text{C.49})$$

dans le cas d'une paramétrisation quelconque.

3.4.5.2.b Torsion

La notion de torsion pour les courbes gauches pourrait être représentée par la manière dont le repère de Frenet tourne autour de son axe $\vec{t}(t)$. Il représente l'évolution du vecteur binormal et se calcule à partir de sa dérivée tel que :

$$\tau(s) = \langle -\vec{b}'(s), \vec{n}(s) \rangle. \quad (\text{C.50})$$

Note C.4. Dans le cas d'une courbe plane, la torsion est nulle.

C.4.5.3 Formule de Frenet

Dans le cas des courbes gauches, il est possible de définir les différentes dérivées des vecteurs de Frenet, appelées formules de Frenet, telles que :

$$\forall s \in I, \quad \begin{cases} \vec{t}'(s) &= c(s)\vec{n}(s) \\ \vec{n}'(s) &= -c(s)\vec{t}(s) + \tau(s)\vec{b}(s) \\ \vec{b}'(s) &= -\tau(s)\vec{n}(s) \end{cases}. \quad (\text{C.51})$$

Ou encore, mises sous forme matricielle :

$$\frac{d}{ds} \begin{pmatrix} \vec{t}(s) \\ \vec{n}(s) \\ \vec{b}(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & c(s) & 0 \\ -c(s) & 0 & \tau(s) \\ 0 & -\tau(s) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{t}(s) \\ \vec{n}(s) \\ \vec{b}(s) \end{pmatrix}. \quad (\text{C.52})$$

C.4.5.4 Calcul du trièdre de Frenet dans la cas d'un paramétrage quelconque

Généralement, le paramétrage d'une courbe est considéré en abscisse curviligne et les formules pour le calcul des vecteurs de la base de Frenet sont données dans ce paramétrage. Sont données ci-dessous les formules pour le cas d'un paramétrage quelconque.

Soit une courbe paramétrée régulière γ ainsi qu'une reparamétrisation η . A partir de $\gamma = \eta \circ u$ il est possible d'exprimer les vecteurs de la base de Frenet et les paramètres de la courbe tels que :

$$\vec{t}_\eta \circ u = \frac{\gamma'}{\|\gamma'\|} \quad \vec{n}_\eta \circ u = \frac{(\gamma' \wedge \gamma'') \wedge \gamma'}{\|\gamma' \wedge \gamma''\| \|\gamma'\|} \quad \vec{b}_\eta \circ u = \frac{\gamma' \wedge \gamma''}{\|\gamma' \wedge \gamma''\|^2}. \quad (\text{C.53})$$

Ainsi que :

$$c_\eta \circ u = \frac{\|\gamma' \wedge \gamma''\|}{\|\gamma'\|^3} \quad \tau_\eta \circ u = \frac{\det(\gamma', \gamma'', \gamma''')}{\|\gamma' \wedge \gamma''\|^2}. \quad (\text{C.54})$$

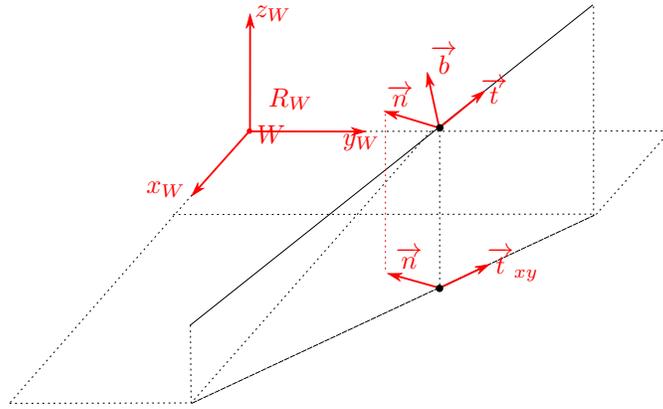


FIGURE C.5 – Définition du repère de Frenet pour une droite.

C.4.6 Accélération dans le repère de Frenet

En considérant une courbe paramétrée $\gamma(s)$ bi-régulière, il est possible d'expliciter l'accélération dans le repère de Frenet. Cette dernière a deux composantes, une selon la tangente et une autre selon la normale à la courbe. Elle s'exprime comme :

$$\vec{a} = \frac{dv}{dt} \vec{t} + v^2 c(s) \vec{n}. \quad (\text{C.55})$$

C.4.7 Définition du repère de Frenet dans \mathbb{R}^3 pour une droite

Dans le cas où la trajectoire à suivre est une droite, il n'est plus possible de définir un repère de Frenet car cette courbe n'est pas birégulière. Or, dans le cas des applications visées dans ces travaux, il est nécessaire de définir de telles trajectoires. On note le repère monde (R_W, x_W, y_W, z_W) .

Un nouveau repère $(F, \vec{t}, \vec{n}, \vec{b})$ (voir figure C.5) est posé arbitrairement tel que :

- \vec{t} : le vecteur tangent à la trajectoire. D'où $\vec{t} = \frac{\gamma'}{\|\gamma'\|}$.
- \vec{n} : vecteur orthogonal direct à \vec{t} et parallèle au plan $x_W y_W$ du repère monde, ce qui implique que $\vec{n} = \vec{t}_{xy} \wedge z_W$ avec \vec{t}_{xy} le projeté de \vec{t} sur le plan xy du repère monde.
- \vec{b} tel que l'on ait le trièdre direct $(\vec{t}, \vec{n}, \vec{b})$. Ainsi $\vec{b} = \vec{t} \wedge \vec{n}$.

Annexe D

Rappels Robotique

SOMMAIRE DU CHAPITRE

D.1	Définitions	227
D.2	Modèles	229
D.2.1	Modèle géométrique	229
D.2.2	Modèle cinématique	229
D.2.3	Modèle statique	229
D.2.4	Modèle dynamique	230
D.3	Système holonome/non-holonome	230
D.4	Robot mobile à roues	230
D.4.1	Contrainte de roulement sans glissement	230
D.4.2	Type de roue d'un mobile :	232
D.4.3	Classe des robots mobiles :	232
D.4.4	Modèles classiques des robots mobiles	233
D.5	Représentation d'état	234

Cette annexe propose un rappel sur plusieurs notions de robotique mobile et manipulatrice, permettant de clarifier certains points du mémoire.

D.1 Définitions

Définition D.1. Coordonnées généralisées/articulaires q :

Vecteur q permettant de décrire sans ambiguïté la configuration ou l'état d'un système. Le choix de cet ensemble n'est pas unique pour un système. Les coordonnées généralisées ne sont pas supposées indépendantes. Bien que cela ne soit pas nécessaire pour exprimer un vecteur de coordonnées généralisées, ce dernier sera supposé minimal. Ceci n'est pas une hypothèse forte dans le sens où tout vecteur de coordonnées généralisées peut être ramené à un vecteur minimal en considérant les contraintes géométriques du système (par exemple : la distance entre deux points d'un solide rigide est constante).

Définition D.2. Coordonnées opérationnelles p :

Le vecteur de coordonnées opérationnelles p d'un système représente les coordonnées généralisées du système une fois qu'elles ont subi une opération de changement de coordonnées ϕ , appelée aussi difféomorphisme, de l'espace articulaire vers l'espace opérationnel.

$$p = \phi(q). \tag{D.1}$$

Ce difféomorphisme permet de définir un espace vectoriel tangent, localement au voisinage de chaque point de la variété différentielle représentant l'espace articulaire, où vont évoluer les vitesses généralisées \dot{q} de façon linéaire avec les vitesses opérationnelles \dot{p} .

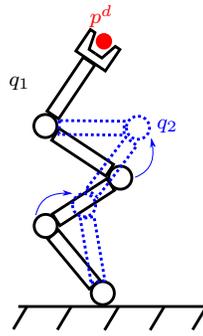


FIGURE D.1 – Exemple de mouvement interne sur un manipulateur. La configuration du manipulateur change mais l'effecteur maintient sa position.

$$\dot{p} = J\dot{q}. \quad (\text{D.2})$$

Avec J la matrice Jacobienne.

Définition D.3. Espace généralisé/articulaire \mathcal{E}_q :

L'espace généralisé, appelé également **espace articulaire**, est l'espace mathématique dans lequel évolue le vecteur de coordonnées généralisées q . La structure de cet espace est celle d'une variété différentielle. Cet espace n'a pas une structure d'espace vectoriel et donc les opérations usuelles ne sont pas définies. Ainsi, dans ces espaces, l'addition de deux points n'a pas de sens. Cependant, il est possible de définir un espace vectoriel tangent, localement au voisinage de chaque point de la variété, où vont évoluer les vitesses généralisées (dérivées des coordonnées généralisées).

Définition D.4. Espace opérationnel \mathcal{E}_p :

L'espace opérationnel est l'espace dans lequel évolue le vecteur de coordonnées opérationnelles p . Ce dernier, possédant une structure d'espace vectoriel, est relié à l'espace articulaire par un changement de coordonnées ϕ .

Définition D.5. Degré de liberté :

Paramètre permettant la description de l'état d'un système physique pouvant évoluer de façon libre, sans contraintes.

Définition D.6. Mouvement interne :

Un mouvement interne du mécanisme opère un changement de configuration q du système sans modifier son vecteur opérationnel p . Autrement considéré, les mouvements internes peuvent être vus comme étant les différents mouvements possibles du mécanisme qui n'affectent pas la réalisation de la tâche (Voir Fig.D.1).

Définition D.7. Degré de redondance :

La notion de redondance d'un système est à lier avec sa capacité à réaliser un ou plusieurs mouvements internes (voir Fig.D.1). Cependant, un système est redondant vis-à-vis d'une tâche. La redondance en elle-même n'a pas de sens si la tâche n'est pas définie.

Un système robotique est dit redondant si le nombre de ses degrés de liberté est supérieur au nombre nécessaire utilisé pour la réalisation de sa tâche. Dans ce cas-là, le nombre de solutions à la résolution du système est infini.

Le degré de redondance est alors défini comme le nombre de degrés de liberté restants au système après avoir retiré ceux occupés par sa tâche.

Définition D.8. Pose/Posture :

La pose est un vecteur représentant la position et l'orientation d'un repère dans un espace 3D. Il est généralement employé en robotique manipulatrice. En robotique mobile, dans un espace 2D, le terme posture CAMPION, BASTIN et D'ANDREA-NOVEL (1993) est plus conventionnellement adopté.

Définition D.9. Tâche ou vecteur de tâche :

Un vecteur de tâche $g(t)$ est un vecteur décrivant une tâche à réaliser par un système. Il peut s'agir d'un vecteur constant ou évoluant selon une fonction définie. Il peut être défini dans l'espace opérationnel du système (tâche opérationnelle) ou dans l'espace articulaire (tâche articulaire/généralisée).

D.2 Modèles

D.2.1 Modèle géométrique

Afin de pouvoir réaliser une tâche opérationnelle, le système doit exécuter une commande qui se trouve dans son espace articulaire. Il devient alors nécessaire de trouver une relation, nommée **modèle géométrique direct**, entre le vecteur de coordonnées articulaires q et son vecteur de coordonnées opérationnelles p telle que :

$$p = \phi(q). \quad (\text{D.3})$$

Ce type de modèle est propre à chaque système et se déduit de considérations géométriques à partir du vecteur de coordonnées articulaires q .

Inversement, il peut être intéressant de vouloir connaître la configuration articulaire q pour un vecteur p donné. Pour cela, le modèle direct obtenu est inversé pour obtenir le **modèle géométrique inverse** :

$$q = \phi^{-1}p. \quad (\text{D.4})$$

Il est important de noter que dans le cas d'un système linéaire, le modèle est forcément bijectif, ce qui implique que son inversion ne pose aucun problème. Cependant, si le système est non-linéaire, le modèle géométrique n'est pas nécessairement bijectif. De fait, pour un vecteur p donné, il peut exister plusieurs configurations articulaires q permettant de l'atteindre.

D.2.2 Modèle cinématique

De la même façon que le modèle géométrique permet de lier la position de l'espace opérationnel vers l'espace articulaire, le modèle cinématique permet de lier les vitesses de l'espace opérationnel à celle de l'espace articulaire. Il s'agit d'une relation linéaire entre l'espace tangent à l'espace des configurations \mathcal{E}_q et l'espace tangent de l'espace opérationnel \mathcal{E}_p . Pour l'obtenir, le modèle géométrique (D.3) est dérivé pour former le modèle cinématique (D.5) tel que :

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= \frac{d(\phi(q))}{dt} = \frac{\partial \phi(q)}{\partial q} \frac{\partial q}{\partial t} \\ \implies \dot{p} &= J(q)\dot{q}. \end{aligned} \quad (\text{D.5})$$

Avec $J(q)$ la matrice Jacobienne du système. Contrairement au modèle géométrique, le modèle cinématique a l'avantage d'être linéaire selon les vitesses \dot{q} . Il est donc aisé d'en déduire le **modèle cinématique inverse** qui se calcule simplement par :

$$\dot{q} = J(q)^{-1}\dot{p}. \quad (\text{D.6})$$

Cependant, cette méthode suppose que la jacobienne est inversible. Dans le cas contraire, il existe une direction dans l'espace des vitesses opérationnelles suivant laquelle le système ne peut plus se déplacer, il est en position de singularité. Dans ce cas, le champ des vitesses accessibles perd une dimension. Ainsi, à l'approche des positions de singularité, une petite variation de la vitesse de l'effecteur implique une forte vitesse articulaire.

D.2.3 Modèle statique

S'il devient nécessaire de prendre en compte les forces et couples appliqués au système, de façon statique, il est possible de définir un modèle statique du système reliant les forces et couples opérationnels p_τ aux forces et couples articulaires q_τ tels que :

$$q_\tau = J(q)^t p_\tau. \quad (\text{D.7})$$

D.2.4 Modèle dynamique

De façon similaire, il est possible d'obtenir un modèle dynamique du système pour prendre en compte les forces et accélérations dans l'espace opérationnel. Ce dernier est donné de façon générique tel que :

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) = p_\tau. \quad (\text{D.8})$$

Où $M(q)$ est la matrice d'inertie du système, $h(q, \dot{q})$ représente les forces centrifuges et de coriolis, $g(q)$ les effets de la gravité et p_τ les forces ou couples à appliquer au système.

D.3 Système holonome/non-holonome

Cette section aborde les notions concernant les systèmes holonomes ou non ainsi que les implications que cela comporte dans la commande des systèmes robotisés.

Les contraintes cinématiques d'un système robotique peuvent se différencier selon leur intégrabilité BARRAQUAND et J. LATOMBE (1989). Une contrainte cinématique du premier ordre sur le mouvement du système s'écrit :

$$G(q, \dot{q}, t) = 0. \quad (\text{D.9})$$

Si la contrainte est intégrable, alors \dot{q} peut être éliminé et l'équation devient une contrainte géométrique de la forme :

$$G_2(q, t) = 0. \quad (\text{D.10})$$

Cette contrainte est alors dite holonome, dans le cas contraire elle est dite non-holonome. Une contrainte holonome, donc intégrable, a pour effet de restreindre l'ensemble des états que peut prendre le système tandis qu'une contrainte non-holonome restreint ses possibilités d'évolution. Ainsi ces dernières réduisent le champ des vitesses accessibles au robot d'autant de dimensions qu'il possède de contraintes non-holonomes.

Autrement résumé :

- Une contrainte complètement intégrable pour un système a pour effet de limiter l'ensemble des états qu'il peut prendre à un instant donné (contrainte géométrique).
- Une contrainte non-intégrable du premier ordre a pour effet de limiter ses possibilités d'évolution depuis chacun de ses états (limitation de la vitesse ou contrainte cinématique).
- Une contrainte non-intégrable du second ordre a pour effet de contraindre les accélérations possibles du système depuis chacun de ses états.

Définition D.10. système holonome : Un système est dit holonome si toutes ses contraintes cinématiques sont complètement intégrables.

Définition D.11. système non-holonome : Un système est dit non-holonome si au moins une de ses contraintes cinématiques n'est pas complètement intégrable.

Définition D.12. Contrainte d'ordre 1 linéaire en la vitesse Une contrainte d'ordre 1, linéaire en la vitesse, aussi appelée contrainte Pfaffienne, peut être mise sous la forme :

$$G(q)\dot{q} = 0. \quad (\text{D.11})$$

Dans ce cas, les vitesses généralisées permettant de respecter la contrainte se trouvent nécessairement dans le noyau de la matrice $G(q)$.

D.4 Robot mobile à roues

D.4.1 Contrainte de roulement sans glissement

La contrainte de roulement sans glissement est une contrainte cinématique induite par le mouvement de rotation d'un cylindre sur un plan, en supposant un contact parfait selon une ligne. Elle implique que la vitesse des points

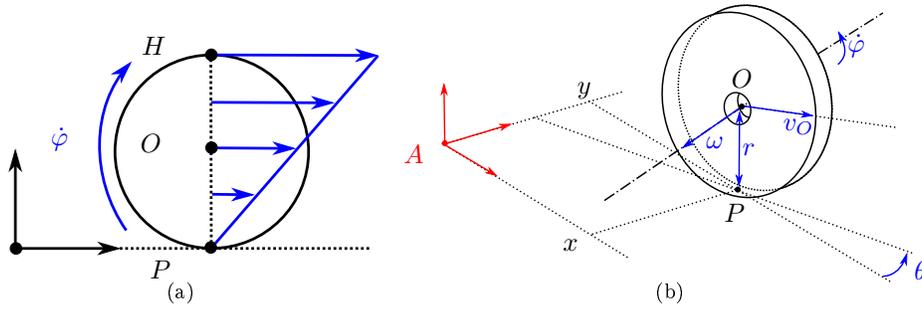


FIGURE D.2 – Contrainte de roulement sans glissement. (a) Profil de vitesse dans la tranche d'un cylindre en rotation sur le sol sous l'hypothèse du roulement sans glissement. (b) Schématisation et paramétrisation d'un cylindre en rotation sur le sol.

de la ligne du cylindre en contact avec le sol (réduite à un point en deux dimensions) est nulle. Généralement, la modélisation des robots mobiles à roues suppose que le contact des roues au sol est sous l'hypothèse d'un roulement sans glissement. Si l'hypothèse est violée, la vitesse au point de contact est non nulle et le mouvement est une composition entre un mouvement de rotation et de translation impliquant la présence de glissement.

Sous l'hypothèse du roulement sans glissement, le profil de vitesse du solide dans sa tranche peut être représenté par la figure Fig.D.2(a) à gauche. La figure Fig.D.2(b) présente les paramètres d'un cylindre en rotation sur le sol.

Sous l'hypothèse du roulement sans glissement, on a $\vec{v}_P = \vec{0}$. En considérant la vitesse au point O , les équations de la mécanique permettent d'écrire :

$$\vec{v}_P = \vec{v}_O + \overrightarrow{PO} \wedge \omega = \vec{0}. \quad (\text{D.12})$$

Or, $\vec{v}_O = (\dot{x} \ \dot{y} \ 0)^t$ et $\omega = (\dot{\varphi} \sin(\theta) \ -\dot{\varphi} \cos(\theta) \ 0)^t$, ce qui permet d'écrire :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{\varphi} \sin(\theta) \\ -\dot{\varphi} \cos(\theta) \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{x} + r\dot{\varphi} \cos(\theta) \\ \dot{y} + r\dot{\varphi} \sin(\theta) \\ 0 \end{pmatrix} = \vec{0}. \quad (\text{D.13})$$

Ceci permet alors d'extraire le système d'équations :

$$\begin{cases} \dot{x} + r\dot{\varphi} \cos(\theta) = 0 \\ \dot{y} + r\dot{\varphi} \sin(\theta) = 0 \end{cases} \implies \begin{cases} \dot{x} \cos(\theta) + \dot{y} \sin(\theta) = -r\dot{\varphi} \\ -\dot{x} \sin(\theta) + \dot{y} \cos(\theta) = 0 \end{cases}. \quad (\text{D.14})$$

Qui peut être transformé en :

$$\begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r\dot{\varphi} \\ 0 \end{pmatrix} \implies R(\theta)^{-1} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r\dot{\varphi} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (\text{D.15})$$

Cette dernière relation (D.15) montre alors le passage du vecteur vitesse \vec{v}_O exprimé dans le repère monde vers le repère attaché à la roue. Cela indique que la direction de ce vecteur est forcément dans le sens longitudinal de la roue et qu'il ne peut exister de vitesse latérale par l'action d'une simple rotation.

Ce type de contrainte est primordial dans le cas d'étude des robots mobiles à roues, car il sert de base à leur modélisation. Or, cette contrainte cinématique est non-intégrable et rend les robots mobiles à roues non-holonomes. Leurs espaces de configuration sont de dimension trois, mais leurs champs de vitesse accessible sont de dimension deux car la contrainte impose que la vitesse latérale soit nulle.

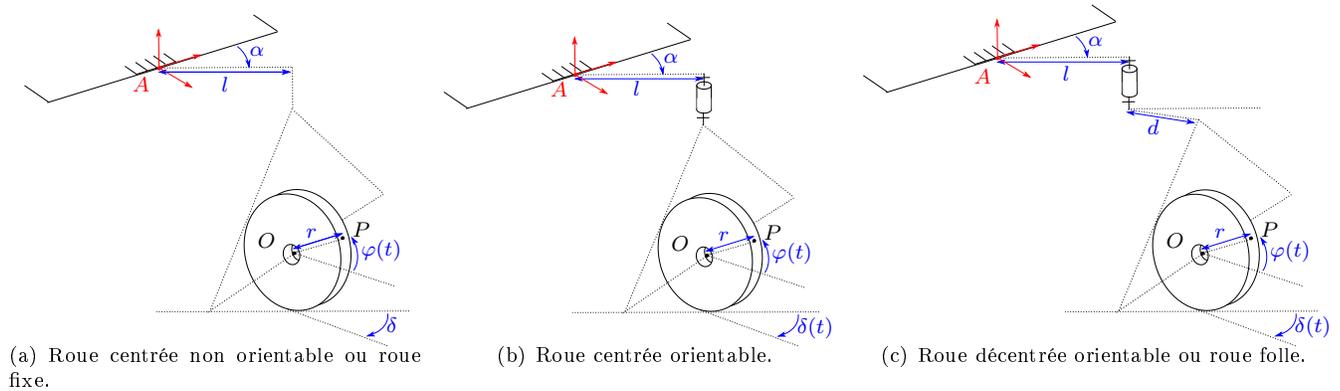


FIGURE D.3 – Cinématique des trois types de roue classiquement utilisés pour les robots mobiles.

D.4.2 Type de roue d'un mobile :

Un système mobile à roues est formé par l'association d'un châssis et d'un ensemble de trois roues minimum. Elles peuvent être de différents types, dont trois sont généralement retrouvés sur les mobiles (Voir Fig.D.3).

- La première, la roue centrée non orientable, consiste en une fixation rigide de la roue sur le châssis du mobile, avec comme seul mouvement possible, la rotation de celle-ci autour de son axe (Voir Fig.D.3(a)).
- La seconde est la roue centrée orientable qui autorise à la roue une rotation selon un axe vertical pour changer sa direction par rapport au châssis (Voir Fig.D.3(b)).
- La roue décentrée orientable peut effectuer les mêmes mouvements que la roue centrée orientable, mais en faisant intervenir un bras de levier d qui va modifier son comportement lors du mouvement (Voir Fig.D.3(c)).
- Enfin, il existe un quatrième type de roue, dite omnidirectionnelle (roue suédoise, roue sphérique,...), utilisée dans des contextes plus particuliers. Ces roues utilisent des cinématiques spécifiques permettant au robot mobile d'être holonome. Cependant, ce type de roue n'est adapté qu'à des terrains parfaitement plats et lisses et ne pourrait être utilisé en extérieur.

D.4.3 Classe des robots mobiles :

Le type de roue utilisé sur un système mobile permet de définir cinq classes de robot mobile possédant chacun une modélisation cinématique et un vecteur de contrôle différent CAMPION, BASTIN et D'ANDREA-NOVEL (1993). Ces classes sont catégorisées selon les degrés de mobilité, de dirigeabilité et de manoeuvrabilité du mobile définis ci-dessous.

Définition D.13. Degré de mobilité δ_m :

Le degré de mobilité est égal au nombre de mouvements indépendants que peut faire le mécanisme, autrement dit, le nombre de degrés de liberté que l'on peut directement manipuler sans avoir à réorienter les roues. Il peut être déduit comme la différence entre le nombre de coordonnées généralisées du système et le nombre de contraintes non-holonomes indépendantes auxquelles il est soumis. Ce degré donne la dimension du vecteur de contrôle u du système.

Définition D.14. Degré de dirigeabilité δ_s :

Le degré de dirigeabilité est égal au nombre de roues centrées orientables qui peuvent être orientées indépendamment pour diriger le robot, sans bloquer son mouvement.

Définition D.15. Degré de manoeuvrabilité δ_M :

A partir du degré de mobilité et de dirigeabilité, il est possible de définir le degré de manoeuvrabilité correspondant au nombre total de degrés de liberté du robot que l'on peut manipuler avec le vecteur de commande (D.16). Il représente sa capacité à réaliser des mouvements en un minimum d'étapes.

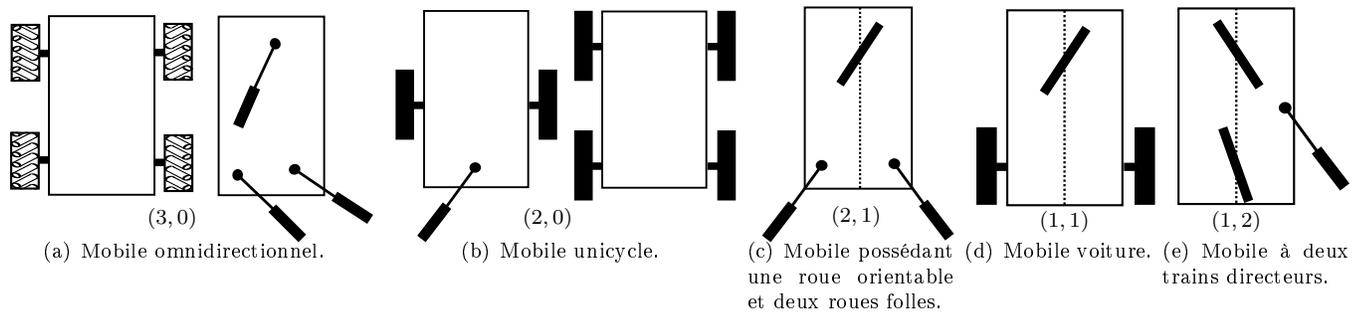


FIGURE D.4 – Les cinq classes de robot mobile.

$$\delta_M = \delta_m + \delta_s. \quad (\text{D.16})$$

Le couple (δ_m, δ_s) ne peut prendre que cinq valeurs possibles associées aux cinq classes de robot mobile (Voir Fig.D.4).

- La première d'entre elle (3,0) représente les robots omnidirectionnels où chaque degré de mobilité peut être instantanément commandé. Les exemples de ce type de robot sont plutôt présents en industrie où la haute structuration du milieu rend possible l'utilisation de roues omnidirectionnelles. Ce type de mobile peut également être formé par l'utilisation de trois roues décentrées orientables (Voir Fig.D.4(a)).
- La seconde classe (2,0) représente les robots unicycles. Ces derniers possèdent une roue fixe indépendante par côté. Le contrôle différentiel du robot permet de le faire avancer et tourner. C'est le type de mobile le plus utilisé dans le monde de la robotique qu'il soit d'intérieur ou d'extérieur. Le robot skid steering possédant deux roues fixes (avec une vitesse de rotation identique) par côté, utilise le même modèle cinématique en considérant une roue virtuelle placée au centre des roues existantes. Les systèmes à chenille utilisent également, en première approche, cette modélisation (Voir Fig.D.4(b)).
- La troisième classe (2,1) possède deux roues décentrées orientables et une roue centrée orientable (Voir Fig.D.4(c)).
- Le quatrième modèle (1,1) possède une roue orientable et deux roues fixes et s'apparente communément au modèle d'une voiture (Voir Fig.D.4(d)).
- Enfin le dernier modèle (1,2) possède deux roues centrées orientables et s'apparente au modèle utilisé par certains véhicules de chantier ou agricole, pouvant manœuvrer leurs deux trains directeurs pour réaliser une marche en crabe ou un virage très serré (Voir Fig.D.4(e)).

D.4.4 Modèles classiques des robots mobiles

Concernant la modélisation des robots mobiles à roues, la littérature scientifique nous renseigne sur les modèles usuels utilisés pour les différents types de mobiles. Ces modèles sont classiquement au nombre de deux : ceux exprimés dans le repère absolu et ceux exprimés dans le repère de Frenet (référéncés par rapport à une trajectoire). Le tableau Tab.D.1 présente rapidement les modèles et équations associés aux différents types de mobiles ayant un intérêt pour les travaux de cette thèse.

Classe	Repère Absolu	Repère de Frenet
(2,0)	$\begin{pmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \varepsilon_\Theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \cos(\varepsilon_\theta) \\ v \sin(\varepsilon_\theta) \\ \omega \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \varepsilon_s \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{v \cos(\varepsilon_\theta)}{1 - c\varepsilon_y} \\ v \sin(\varepsilon_\theta) \\ \omega - \frac{cv \cos(\varepsilon_\theta)}{1 - c\varepsilon_y} \end{pmatrix}$
(1,1)	$\begin{pmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \varepsilon_\Theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \cos(\varepsilon_\theta) \\ v \sin(\varepsilon_\theta) \\ v \frac{\tan(\delta_f)}{L} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \varepsilon_s \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{v \cos(\varepsilon_\theta)}{1 - c\varepsilon_y} \\ v \sin(\varepsilon_\theta) \\ v \frac{\tan(\delta_f)}{L} - \frac{cv \cos(\varepsilon_\theta)}{1 - c\varepsilon_y} \end{pmatrix}$
(1,2)	$\begin{pmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \varepsilon_\Theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \cos(\varepsilon_\theta + \delta_r) \\ v \sin(\varepsilon_\theta) \\ v \cos(\delta_r) \frac{\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r)}{L} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \varepsilon_s \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{v \cos(\varepsilon_\theta + \delta_r)}{1 - c\varepsilon_y} \\ v \sin(\varepsilon_\theta) \\ v \cos(\delta_r) \frac{\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r)}{L} - \frac{cv \cos(\varepsilon_\theta + \delta_r)}{1 - c\varepsilon_y} \end{pmatrix}$

TABLE D.1 – Tableau des modélisations classiques de plusieurs cinématiques de mobiles dans le repère absolu et de Frenet, utilisées au sein de cette thèse.

D.5 Représentation d'état

La représentation d'état permet la modélisation d'un système dynamique, linéaire ou non, continu ou discret, pour en connaître le comportement à partir de la connaissance de son point de départ (conditions initiales). Ce modèle a largement supplanté l'utilisation de la fonction de transfert en automatique, car il permet de connaître également le fonctionnement interne du système par l'intermédiaire de son vecteur d'état. La forme linéaire de la représentation d'état est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (\text{D.17})$$

Avec x le vecteur d'état, y le vecteur de sortie, u le vecteur d'entrée, A la matrice d'état, B la matrice de commande, C la matrice d'observation et D la matrice d'action directe. Communément, la première équation est appelée *équation d'évolution* et la seconde *équation d'observation*.

Cette représentation a l'intérêt de mettre à jour de très nombreuses propriétés concernant les systèmes, notamment les propriétés de commandabilité, d'observabilité, de convergence,... et se trouve donc encore aujourd'hui très largement utilisée dans les domaines industriels et scientifiques.

La forme non-linéaire de la représentation d'état est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u, t) \\ y = h(x, u, t) \end{cases} \quad (\text{D.18})$$

Annexe E

Optimisation

SOMMAIRE DU CHAPITRE

E.1	Algorithme d'optimisation combinatoire	235
E.1.1	Algorithme glouton	236
E.1.2	Algorithme génétique	236
E.2	Algorithme d'optimisation continue	236
E.2.1	Algorithme du simplexe	236
E.2.2	Algorithme du recuit simulé	236
E.2.3	Essaim particulaire	237
E.2.4	Algorithme stochastique	237
E.2.4.1	RRT	237
E.2.4.2	PRM	238

Cette partie présente différents algorithmes d'optimisation de la littérature scientifique. Il est à noter qu'elle n'est pas exhaustive et ne représente pas toutes les recherches qui ont été faites dans ce domaine très vaste et bien au-delà du cadre de ce manuscrit. Elle a pour simple vocation de donner une idée de principe au lecteur des différentes approches d'optimisation qui ont été mises en œuvre pour la commande coordonnée des manipulateurs mobiles recensées au sein de la littérature.

Définition E.1. Algorithme à heuristique

Les algorithmes à heuristique usent d'un a priori, ou d'une connaissance de départ quelconque, comme une règle permettant de guider la résolution du problème d'optimisation. Ces heuristiques permettent de résoudre plus rapidement nombre de problèmes en rejetant une partie de l'espace de recherche. Cependant, leur utilisation peut rendre la solution finale non-optimale. De plus, les heuristiques sont des principes purement empiriques basés sur l'expérience dont le réglage peut être délicat. Malgré tout, elles se sont montrées d'une redoutable aide dans la résolution de nombreux problèmes d'optimisation à travers différentes approches.

Définition E.2. Complétude d'un algorithme

- *Algorithme complet* : S'il existe une solution, l'algorithme finira par la trouver.
- *Algorithme statistiquement complet* : Pour un nombre d'échantillons infini, l'algorithme finira par trouver une solution s'il en existe une.

E.1 Algorithme d'optimisation combinatoire

Cette première partie aborde différents algorithmes de résolution de problèmes d'optimisation combinatoire¹. Ces algorithmes sont des approches très connues du domaine de la recherche opérationnelle, notamment en robotique mobile pour la recherche de chemins dans un espace.

1. Problème dont les variables sont discrètes.

E.1.1 Algorithme glouton

L'approche la plus simple permettant d'obtenir une solution non-optimale à un problème d'optimisation est la méthode de l'algorithme glouton (ce dernier peut également s'appliquer aux problèmes d'optimisation continue mais il est classiquement utilisé dans le cadre des problèmes combinatoires). Il s'agit d'un algorithme constructif qui cherche une solution répondant aux critères du problème sans chercher à savoir si elle est optimale. Il consiste à affecter les variables du problème les unes après les autres sans jamais revenir sur son choix précédent. Il est accompagné de deux heuristiques, l'une guidant le choix de l'ordre d'affectation des variables et l'autre guidant la valeur de l'affectation des variables. C'est une méthode très simple, facile à implémenter et donnant des résultats de façon rapide. Cependant, ses solutions sont souvent de mauvaise qualité. Elles servent alors à la construction d'une solution de départ admissible, qui sera ensuite améliorée par d'autres algorithmes d'optimisation.

E.1.2 Algorithme génétique

L'algorithme génétique fait partie de la famille des algorithmes évolutionnaires qui se basent sur un principe similaire à celui de l'évolution naturelle. Ils sont classiquement composés de trois éléments, une population, un mécanisme de sélection et un mécanisme d'évolution. Ces algorithmes sont composés de trois étapes séquentielles réalisées à chaque nouvelle itération : déterminer la qualité d'un individu, sélectionner des individus et créer de nouveaux individus à partir des anciens.

Déterminer la qualité des individus permet de sélectionner les meilleurs d'entre eux. Les individus sélectionnés seront ensuite utilisés lors d'une étape de croisement afin de créer de nouveaux individus. Ces derniers hériteront alors des caractéristiques de leurs parents (intensification). Une étape de mutation est ensuite ajoutée, afin de modifier aléatoirement un gène d'un individu, ce qui permet d'apporter de nouvelles informations dans la population (diversification).

L'algorithme part d'une population initiale et effectue ces opérations en boucle sur un certain nombre de générations, jusqu'à ce qu'il en dépasse un certain nombre ou arrive à un critère d'arrêt.

E.2 Algorithme d'optimisation continue

Les algorithmes d'optimisation continue sont utilisés lorsque les variables du problème d'optimisation sont continues. De par ce caractère, les algorithmes d'optimisation sont davantage tournés vers la recherche locale de solution. Cependant, certains algorithmes usent d'heuristiques afin de sortir des minima locaux auxquels ils sont soumis, pour obtenir une meilleure exploration de l'espace de recherche mais sans aucune garantie de trouver le minimum global.

E.2.1 Algorithme du simplexe

L'algorithme du simplexe est destiné à la résolution des problèmes d'optimisation linéaire dont l'espace admissible est formé d'un polyèdre convexe. Dans ce cas de figure, la minimalité se situe forcément sur l'un des sommets du polyèdre (sauf dans le cas où le minimum n'est pas borné et tend vers $-\infty$, qui est un cas particulier à prendre en compte dans l'algorithme). Une liste exhaustive de l'ensemble des sommets du polyèdre ne pourrait fonctionner que pour des problèmes de petites dimensions, car la résolution serait trop longue dans le cas général. L'algorithme du simplexe prend son point de départ sur l'un des sommets du polyèdre et chaque itération l'emmène sur un autre sommet, en glissant sur les arêtes, diminuant le coût de la fonction et rejetant celles le faisant augmenter. Cette approche permet de converger vers l'optimal de la fonction de coût sans avoir à étudier exhaustivement l'ensemble des sommets du polyèdre.

E.2.2 Algorithme du recuit simulé

Cet algorithme s'inspire du processus de recuit utilisé en métallurgie pour l'amélioration de la qualité d'un acier. Le but est de trouver l'état d'énergie minimale du solide en partant d'un état de haute énergie (élevée à haute température) et en le refroidissant progressivement. Au départ, les atomes agités peuvent se déplacer facilement dans la structure de l'acier, ils explorent donc l'espace des configurations dans lequel ils se trouvent. Plus la température diminue, moins ils sont aptes à se déplacer librement dans l'espace, ils vont alors rechercher plus localement la meilleure position pour un état de basse énergie. L'algorithme de recuit simulé, utilise ce phénomène. En partant

d'une configuration initiale, il explore le voisinage. Si le voisinage exploré améliore la solution finale, il se déplace vers lui. Si le voisinage détériore la solution, l'algorithme pourra déplacer la configuration vers lui selon une probabilité :

$$p = e^{\frac{\Delta E}{C_b T}}. \quad (\text{E.1})$$

ΔE correspond à la variation d'énergie du système, C_b une constante et T est la température, initialement élevée et suivant une fonction décroissante. Plus la température est élevée, plus la probabilité de se déplacer vers une solution dégradante est forte (diversification). Plus la température est faible, plus cette probabilité diminue et l'on se rapproche d'une recherche locale (intensification). Cette méthode permet de sortir des optimums locaux pour converger vers l'optimum global. Cependant son paramétrage est empirique et nécessite de l'expérience, notamment sur le choix du schéma de refroidissement qui peut fortement influencer les résultats.

E.2.3 Essaim particulaire

L'idée derrière les algorithmes d'essaims particuliers KENNEDY et EBERHART (1995) est qu'un groupe d'individus peu intelligents peut posséder une organisation globale complexe. Chaque individu, nommé particule, est tout d'abord positionné dans l'espace de recherche (aléatoirement ou selon une heuristique choisie). L'objectif de ces individus est de se déplacer selon un ensemble de règles, afin de progressivement converger vers un minimum global. Chacune de ces particules constitue une solution potentielle, possédant une mémoire de sa meilleure solution visitée. La particule va se déplacer selon deux règles de déplacement : sa volonté de retourner vers sa meilleure solution et celle de converger vers celle de son voisinage. Ceci fournit une équation de mouvement de la particule telle que :

$$V_{k+1} = \omega V_k + \rho_1(\hat{X} - X) + \rho_2(\hat{X}_v - X). \quad (\text{E.2})$$

Où V est la vitesse de la particule, ω un facteur d'inertie, X sa position courante, \hat{X} la position de sa solution optimale en mémoire, \hat{X}_v la position optimale dans son voisinage et $(\rho_1 \rho_2)^k$ des indices de confiance pondérant le comportement conservateur et exploratoire de la particule. Par ailleurs, plus le nombre de particules sera élevé, plus il sera facile de trouver une solution optimale en un minimum d'interactions, mais plus ces dernières seront coûteuses en temps de calcul.

E.2.4 Algorithme stochastique

Les algorithmes stochastiques se basent sur le tirage aléatoire de plusieurs solutions dans l'espace de recherche admissible. Ces approches permettent de procéder à une importante couverture de l'espace, mais sont moins performantes en terme d'optimalité et doivent dès lors se coupler avec d'autres méthodes pour améliorer leurs solutions. Une de ces manières (la plus simple mais pas optimale) est de coupler ces approches aux algorithmes gloutons, en tirant aléatoirement un point de départ différent pour le glouton, permettant de créer plusieurs solutions sous-optimales et de choisir la meilleure par la suite. Cependant, le domaine où les algorithmes stochastiques ont largement fait leurs preuves est celui de la recherche de chemin ou de trajectoire dans l'espace de configuration ou de la tâche.

Ce type de méthode peut également être combiné à une ou plusieurs heuristiques, notamment sur le choix des distributions de probabilité utilisées lors de l'échantillonnage.

Certains algorithmes stochastiques sont davantage orientés vers la recherche combinatoire que ceux présentés ici. Cependant, il est important de noter que ces algorithmes sont, par nature, des méthodes d'échantillonnage de l'espace de recherche qui transforment ainsi le problème d'optimisation continue en un problème d'optimisation discret, mais dont la recherche est globale.

E.2.4.1 RRT

Cette première partie présente les différentes méthodes de recherche de chemin par l'utilisation d'arbres de remplissage aléatoires permettant de parcourir un espace non convexe. La première approche dans ce domaine est l'utilisation d'un arbre créé par un tirage aléatoire successif d'échantillons dans l'espace. Chaque nouveau nœud est tiré aléatoirement et relié au nœud précédent, en respectant une limite de distance maximale appelée facteur de croissance. Le problème de cette première version est que l'exploration de l'arbre est très limitée et le nombre

de points à tirer pour remplir l'espace est très important. De plus, cela crée des chemins sous-optimaux avec de nombreux croisements des connexions de l'arbre.

Pour répondre à ce problème, l'algorithme RRT (Rapidly-exploring Random Tree) S. M. L'AVALLE (1998) se construit progressivement à partir d'un tirage aléatoire dans l'espace de recherche, en connectant chacun des nouveaux échantillons à son voisin le plus proche dans le graphe (et non plus au dernier sommet du graphe créé). La racine de l'arbre est fixée sur la configuration de départ et les échantillons sont soumis à un facteur de croissance qui limite la distance de ces derniers à l'arbre. Ceci permet de créer un arbre explorant tout l'espace beaucoup plus rapidement, avec beaucoup moins d'échantillons. L'algorithme peut être biaisé en changeant les distributions aléatoires des échantillons dans l'espace pour préférer des zones de recherche sur d'autres. Cependant, le meilleur chemin du RRT est souvent sous-optimal et quel que soit le nombre d'échantillons tirés, une fois le chemin obtenu, il ne peut plus être amélioré.

5.2.4.1.a BiRRT Une version bi-directionnelle du RRT (BiRRT ou RRT-connect) est également proposée par J.J. KUFFNER et S. L'AVALLE (2000) afin d'améliorer la vitesse de convergence de l'algorithme pour trouver une solution en créant deux arbres, dont les racines sont respectivement au point de départ et au point d'arrivée, en les faisant grandir simultanément jusqu'à ce qu'ils puissent se connecter ensemble.

5.2.4.1.b RRT* KARAMAN et FRAZZOLI (2011) propose l'algorithme RRT* qui permet de trouver un chemin optimal dans l'arbre. Plus le nombre d'échantillons du chemin est important, plus ce dernier peut s'améliorer et se rapprocher du chemin optimal dans l'espace. Pour un nombre d'échantillons infini, la méthode obtiendra un résultat optimal. Pour se faire, l'approche change le mécanisme de connexion d'un nouveau nœud au graphe. Ce dernier n'est pas connecté au nœud du graphe le plus proche mais au nœud du graphe le plus proche dans son voisinage, qui minimise sa distance à la racine de l'arbre. De plus, une fois cette connexion faite, l'arbre est capable, dans ce voisinage, de changer les connexions de ces nœuds, dans le but qu'à tout instant, l'ensemble des feuilles de l'arbre soit à la distance minimale de la racine dans le graphe. De fait, l'algorithme RRT* est asymptotiquement optimal dans la totalité de l'espace de recherche.

5.2.4.1.c BiRRT* Une version bi-directionnelle du RRT* est également apparue dans KLEMM et al. (2015) qui combine la rapidité de convergence du RRT bi-directionnel ainsi que l'optimalité du RRT*.

5.2.4.1.d Informed RRT* Cet algorithme GAMMELL, SRINIVASA et BARFOOT (2014) est une amélioration du RRT* qui permet d'augmenter la vitesse de convergence vers le chemin optimal en proposant l'utilisation d'une heuristique au sein de l'algorithme. Lorsque le premier chemin de la configuration de départ à l'arrivée est déterminé par l'algorithme, ce dernier considère une ellipsoïde l'englobant. A partir de là, l'échantillonnage de l'espace ne sera réalisé qu'au sein de cette ellipsoïde qui se réduit à mesure que le chemin courant converge vers le chemin optimal. Cette méthode permet ainsi de donner une direction de recherche à l'algorithme et lui permet de converger rapidement vers le chemin optimal.

5.2.4.1.e BI²RRT* Plus récemment, une version bi-directionnelle du RRT* couplée à l'heuristique du Informed RRT* a été proposée par BURGET, BENNEWITZ et BURGARD (2016) permettant ainsi d'obtenir un algorithme à la fois très rapide, ainsi qu'un chemin asymptotiquement optimal.

5.2.4.1.f RRT-LIKE Une version du RRT, qui change la méthode d'expansion de l'arbre. Ainsi, les travaux proposés dans Giuseppe ORIOLO et MONGILLO (2005) génèrent une configuration aléatoire pour identifier le nœud voisin puis, au lieu de les connecter ensemble par une ligne droite, génèrent un nouveau nœud, à partir du nœud voisin et suivant les vitesses admissibles par le système. Une variante de ce dernier, combinée à un algorithme de recherche glouton permettant de guider l'expansion de l'arbre, a également été proposée dans cet article.

E.2.4.2 PRM

L'algorithme PRM (Probabilistist roadmap) KAVRAKI et al. (1996) génère des échantillons (points) aléatoirement dans l'espace libre. L'ensemble des points considérés comme voisins (à une certaine distance choisie) sont ensuite interconnectés. Contrairement à l'approche RRT, la division de l'espace ne se réalise pas sous la forme d'un arbre mais par un graphe connecté. La méthode est simple et différentes distributions peuvent être utilisées pour la création de la carte dans l'environnement (distribution uniforme, gaussienne,...) ce qui permet de faire varier la

densité des points selon un a priori connu.

Bien que les chemins obtenus soient relativement contraints selon la distribution utilisée (et donc sous-optimale), cette méthode est bien plus rapide que celles décomposant l'ensemble de l'espace en une grille régulière et permet de trouver des chemins de bonne qualité en peu de temps.

La méthode permet la génération d'un graphe dans l'espace des configurations, la recherche du chemin final doit être réalisée par la suite grâce à un algorithme de recherche dans un graphe (Algorithme Dijkstra, A*,...).

5.2.4.2.a PRM* L'algorithme PRM* KARAMAN et FRAZZOLI (2011) est une variante optimale de l'algorithme PRM, qui propose une fonction logarithme de décroissement du rayon de connexion (distance de connexion entre deux nœuds du graphe) selon le nombre d'échantillons de la carte.

5.2.4.2.b SBL L'algorithme SBL (Single query, Bidirectional, Lazy in collision checking) est une autre amélioration de l'algorithme PRM proposée dans SÁNCHEZ et J.-C. LATOMBE (2003) afin d'améliorer le temps de calcul. Ces travaux partent du fait que le temps de calcul du PRM est principalement consacré à la vérification des collisions des échantillons tirés aléatoirement et des connexions du graphe. Pour ce faire, la résolution d'échantillonnage est adaptée en fonction de l'espace pour faire de grands pas en espace dégagé et des petits pas en espace étroit. De plus, l'algorithme est bi-directionnel et construit sa carte à partir de la configuration d'arrivée et de départ. Enfin, la collision est vérifiée uniquement lorsqu'une séquence de points permet de relier la configuration de départ et d'arrivée, ceci afin d'éviter de perdre du temps sur des chemins qui ne permettent pas cette connexion.

5.2.4.2.c RBB Une variante de l'algorithme PRM a été proposée dans HSU et al. (2003) en changeant la distribution de l'échantillonnage de l'espace afin de faciliter la recherche de chemin dans les espaces étroits. L'algorithme RBB (Randomized Bridge Builder) se base sur le test du "pont", afin de créer un chemin dans les espaces étroits. Pour cela, un premier point est tiré aléatoirement dans l'espace, puis si ce dernier est en collision, un second point est tiré avec une densité de probabilité gaussienne autour du premier. Si ce second point est également en collision, un trait est tiré entre les deux points et le point milieu est à son tour testé et ajouté à la carte s'il n'est pas en collision. Une telle distribution permet de créer plus facilement des chemins entre nœuds du graphe dans les environnements étroits, mais elle a plus de mal à bien couvrir la carte en espace ouvert.

5.2.4.2.d HRBB Pour répondre à ce problème une variante hybride du RBB, le HRBB a été présentée dans Z. SUN et al. (2005) où la méthode RBB est appliquée dans l'espace étroit et une distribution uniforme est appliquée dans les espaces ouverts, afin de couvrir au mieux l'ensemble de l'espace. Le choix de la distribution est alors pondéré par un facteur dépendant localement de l'espace de recherche.

Annexe F

Annexe : Présentation des manipulateurs Ur

SOMMAIRE DU CHAPITRE

F.1	Manipulateur Ur	241
F.2	Modélisation des manipulateurs Ur	242
F.2.1	Modèle géométrique des manipulateurs Ur	242
F.2.1.1	Modèle géométrique direct	242
F.2.1.2	Modèle géométrique inverse	246
F.2.2	Modèle cinématique	246

F.1 Manipulateur Ur

Dans le cadre des travaux présentés dans cette thèse, trois manipulateurs de la société *Universal Robot* ont été utilisés, un Ur10 (Voir Fig.F.1(b)) associé à la plateforme Campero, un Ur10e (Voir Fig.F.1(c)) associé à la plateforme Adap2e et un Ur5 (Voir Fig.F.1(a)) associé à la plateforme Adap2e pour les simulations bi-bras. Les caractéristiques techniques de ces différents manipulateurs sont données dans le tableau Tab.F.1.

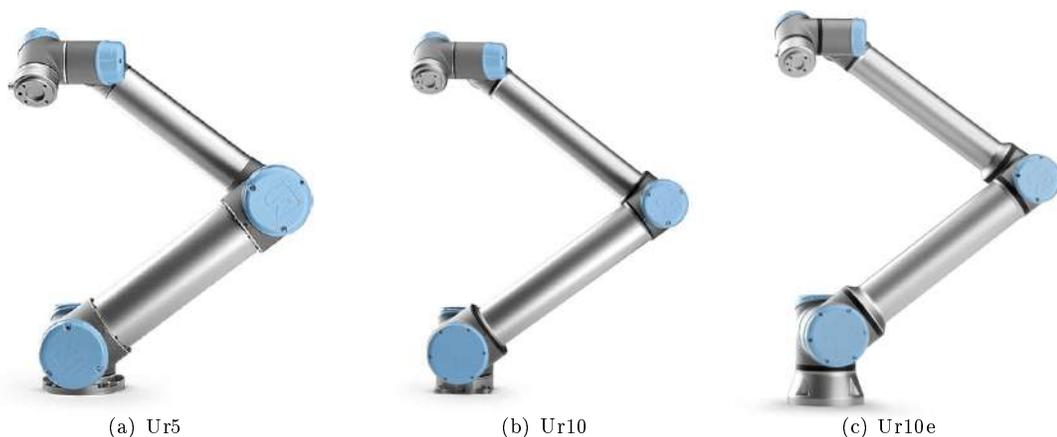


FIGURE F.1 – Manipulateur Ur de la société *Universal Robot*.

Serie	Portée	Charge utile	Poids	Répétabilité	Vitesse effecteur	Limite axes	Vitesse max des axes
Ur5	0.85m	5kg	18.4kg	±0.1mm	1m/s	±360°	±180°/s
Ur10	1.3m	10kg	28.9kg	±0.1mm	1m/s	±360°	±120°/s pour base/épaule ±180°/s pour les autres
UR10e	1.3m	12.5kg	33.5kg	±0.05mm	1m/s	±360°	±120°/s pour base/épaule ±180°/s pour les autres

TABLE F.1 – Caractéristiques techniques des manipulateurs Ur5, Ur10 et Ur10e.

Paramètres(m)	a_1	b_2	b_3	a_4	a_5	a_6
Ur5	0.089159	0.425	0.39225	0.10915	0.09465	0.0823
Ur10	0.1273	0.612	0.5723	0.163941	0.1157	0.0922
Ur10e	0.1807	0.6127	0.57155	0.17415	0.11985	0.11655

TABLE F.2 – Ensemble des paramètres géométriques du manipulateur.

F.2 Modélisation des manipulateurs Ur

Cette section présente la modélisation des différents manipulateurs utilisés pour ces travaux. Elle présente leurs différents paramètres, ainsi que les modèles géométriques et cinématiques. Ces manipulateurs sont constitués d'une succession de six liaisons pivot orthogonales. Leur modélisation est identique, seuls leurs paramètres géométriques changent. Ces derniers sont donnés dans le tableau Tab.F.2 pour les manipulateurs utilisés.

Ces paramètres géométriques sont représentés sur la figure FigF.2(a). Cette dernière présente également son schéma cinématique pour une configuration articulaire nulle.

F.2.1 Modèle géométrique des manipulateurs Ur

Cette section présente le calcul du modèle géométrique du manipulateur. Ce dernier permet l'obtention de la position et de l'orientation de l'effecteur R_E dans le repère de la base du manipulateur R_A en fonction de ses différentes coordonnées articulaires q .

F.2.1.1 Modèle géométrique direct

Par souci de simplicité de la représentation, l'orientation du repère de l'effecteur dans l'espace a été choisie en utilisant les angles d'Euler selon la convention XYZ. De plus, afin de considérer la géométrie de l'effecteur, six paramètres $(x_{eff} \ y_{eff} \ z_{eff} \ \theta_{x_{eff}} \ \theta_{y_{eff}} \ \theta_{z_{eff}})^t$ sont ajoutés, représentant le repère de l'effecteur dans le repère de la dernière liaison du manipulateur.

Le vecteur opérationnel est défini tel que :

$$X_{E \in R_E / R_A} |_{R_A} = \begin{pmatrix} x_{R_E} \\ y_{R_E} \\ z_{R_E} \\ \theta_{x_{R_E}} \\ \theta_{y_{R_E}} \\ \theta_{z_{R_E}} \end{pmatrix} = f(q). \quad (F.1)$$

Avec le vecteur $(x_{R_E}, y_{R_E}, z_{R_E})^t$ représentant la position de l'effecteur dans l'espace et $(\theta_{x_{R_E}}, \theta_{y_{R_E}}, \theta_{z_{R_E}})^t$ son orientation.

La formulation TCS (Travelling coordinated system) sera utilisée pour déterminer le modèle géométrique. Elle consiste à faire naviguer un repère voyageur de la base du manipulateur vers son extrémité, par l'utilisation d'un opérateur élémentaire de rotation et de translation, regroupées en matrice homogène, permettant le passage d'un repère à un autre. La figure Fig.F.2(b) présente le repère voyageur sur les différents axes du manipulateur pour

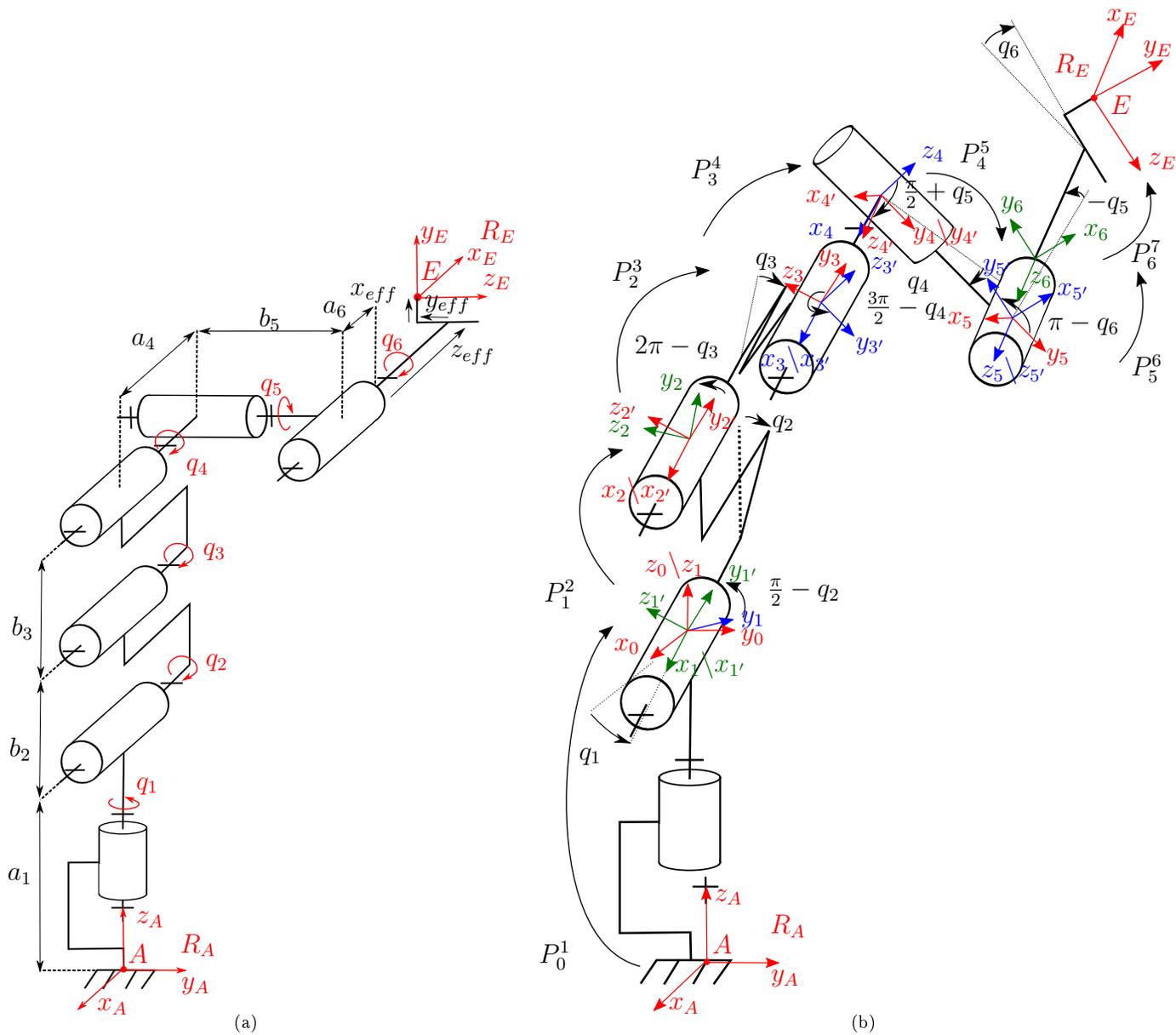


FIGURE F.2 – Schéma cinématique pour la modélisation des manipulateurs Ur. (a) Schéma cinématique et paramètres du bras Ur10. (b) Modélisation du repère voyageur sur le bras Ur10

chaque étape de sa progression vers le repère effecteur final. La succession des différents axes de rotation du repère voyageur est $R^z, R^x, R^x, R^x, R^y, R^z$. Les différentes étapes de progression sont données ci-dessous :

- 1 • $(x_{base}, y_{base}, z_{base}) \xrightarrow{T^z(a_1)} (x_0, y_0, z_0)$.
- 2 • $(x_0, y_0, z_0) \xrightarrow{R^z(q_1)} (x_1, y_1, z_1)$.
- 3 • $(x_1, y_1, z_1) \xrightarrow{R^x(\frac{\pi}{2}-q_2)} (x_{1'}, y_{1'}, z_{1'})$.
- 4 • $(x_{1'}, y_{1'}, z_{1'}) \xrightarrow{T^y(b_2)} (x_2, y_2, z_2)$.
- 5 • $(x_2, y_2, z_2) \xrightarrow{R^x(2\pi-q_3)} (x_{2'}, y_{2'}, z_{2'})$.
- 6 • $(x_{2'}, y_{2'}, z_{2'}) \xrightarrow{T^y(b_3)} (x_3, y_3, z_3)$.
- 7 • $(x_3, y_3, z_3) \xrightarrow{R^x(\frac{3\pi}{2}-q_4)} (x_{3'}, y_{3'}, z_{3'})$.
- 8 • $(x_{3'}, y_{3'}, z_{3'}) \xrightarrow{T^x(-a_4)} (x_4, y_4, z_4)$.
- 9 • $(x_4, y_4, z_4) \xrightarrow{R^y(\frac{\pi}{2}+q_5)} (x_{4'}, y_{4'}, z_{4'})$.
- 10 • $(x_{4'}, y_{4'}, z_{4'}) \xrightarrow{T^y(a_5)} (x_5, y_5, z_5)$.
- 11 • $(x_5, y_5, z_5) \xrightarrow{R^z(\pi-q_6)} (x_{5'}, y_{5'}, z_{5'})$.
- 12 • $(x_{5'}, y_{5'}, z_{5'}) \xrightarrow{T^z(-a_6)} (x_6, y_6, z_6)$.
- 13 • $(x_6, y_6, z_6) \xrightarrow{t_{eff} R_{eff}} (x_E, y_E, z_E)$.

Avec :

$$T_{eff} = T^x(x_{eff})T^y(y_{eff})T^z(z_{eff}) \quad R_{eff} = R^x(\theta_{x_{eff}})R^y(\theta_{y_{eff}})R^z(\theta_{z_{eff}}) . \quad (F.2)$$

En assemblant ces différentes opérations élémentaires, un ensemble de matrices de passage associées à chaque liaison du manipulateur est obtenu. L'ensemble de ces matrices est donné dans la liste ci-dessous :

- $P_{R_A}^1 = P_0^1 = T^z(a_1)R^z(q_1)$.
- $P_1^2 = R^x(\frac{\pi}{2} - q_2)$.
- $P_2^3 = T^y(b_2)R^x(2\pi - q_3)$.
- $P_3^4 = T^y(b_3)R^x(\frac{3\pi}{2} - q_4)$.
- $P_4^5 = T^x(-a_4)R^y(\frac{\pi}{2} + q_5)$.
- $P_5^6 = T^y(a_5)R^z(\pi - q_6)T^z(-a_6)$.
- $P_6^{R_E} = P_6^7 = T_{eff}R_{eff}$.

Ce qui permet l'obtention des matrices de passage :

$$\begin{aligned}
 P_0^1 &= \begin{pmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & P_1^2 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & -C_2 & 0 \\ 0 & C_2 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & P_2^3 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_3 & S_3 & b_2 \\ 0 & -S_3 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & P_3^4 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -S_4 & C_4 & b_3 \\ 0 & -C_4 & -S_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 P_4^5 &= \begin{pmatrix} -S_5 & 0 & C_5 & -a_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -C_5 & 0 & -S_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & P_5^6 &= \begin{pmatrix} -C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & -C_6 & 0 & a_5 \\ 0 & 0 & 1 & -a_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & P_6^7 &= \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \quad (F.3)$$

Avec la notation :

- $C_1 = \cos(q_1)$.
- $S_1 = \sin(q_1)$.
- $C_2 = \cos(q_2)$.
- $S_2 = \sin(q_2)$.
- $C_3 = \cos(q_3)$.
- $S_3 = \sin(q_3)$.
- $C_4 = \cos(q_4)$.
- $S_4 = \sin(q_4)$.
- $C_5 = \cos(q_5)$.
- $S_5 = \sin(q_5)$.
- $C_6 = \cos(q_6)$.
- $S_6 = \sin(q_6)$.

Les éléments $r_{ij}, i \in \llbracket 1; 3 \rrbracket, j \in \llbracket 1; 4 \rrbracket$ sont constants et représentent la transformation de l'extrémité du manipulateur au point de contrôle de l'effecteur. Pour rester cohérent avec la figure Fig.F.2(a), le point de contrôle de l'effecteur est exprimé par :

- $r_{14} = x_{eff}$.
- $r_{24} = y_{eff}$.
- $r_{34} = -z_{eff}$.

Les autres éléments r_{ij} représentent la matrice de rotation entre le repère (x_6, y_6, z_6) et (x_E, y_E, z_E) .

Le calcul du modèle géométrique direct est ensuite obtenu par la multiplication de toutes ces transformations successives. Le modèle donné va jusqu'à l'extrémité du bras sans la prise en compte l'effecteur :

$$P_0^6 = P_0^1 P_1^2 P_2^3 P_3^4 P_4^5 P_5^6. \quad (\text{F.4})$$

L'ajout de l'effecteur modifie simplement le modèle géométrique par la multiplication avec la dernière matrice de passage proposée :

$$P_0^7 = P_0^6 P_6^7. \quad (\text{F.5})$$

Tous calculs effectués, la matrice de passage P_0^6 s'exprime de la façon suivante :

$$P_0^6 = \begin{pmatrix} S_5 C_6 C_1 - S_1(S_6 C_\alpha + C_5 C_6 S_\alpha) & S_5 S_6 C_1 - S_1(-C_6 C_\alpha + C_5 S_6 S_\alpha) & C_5 C_1 + S_1 S_5 S_\alpha & C_1(-a_6 C_5 - a_4) - S_1(a_5 C_\alpha + a_6 S_5 S_\alpha + b_3 S_\beta + b_2 S_2) \\ S_5 C_6 S_1 + C_1(S_6 C_\alpha + C_5 C_6 S_\alpha) & S_5 S_6 S_1 + C_1(-C_6 C_\alpha + C_5 S_6 S_\alpha) & C_5 S_1 - S_5 C_1 S_\alpha & S_1(-a_6 C_5 - a_4) + C_1(a_5 C_\alpha + a_6 S_5 S_\alpha + b_3 S_\beta + b_2 S_2) \\ -S_6 S_\alpha + C_5 C_6 C_\alpha & C_6 S_\alpha + C_5 S_6 C_\alpha & -S_5 C_\alpha & a_1 - a_5 S_\alpha + a_6 S_5 C_\alpha + b_3 C_\beta + b_2 C_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (\text{F.6})$$

Avec la notation :

- $C_\alpha = \cos(q_2 + q_3 + q_4)$.
- $S_\alpha = \sin(q_2 + q_3 + q_4)$.
- $C_\beta = \cos(q_2 + q_3)$.
- $S_\beta = \sin(q_2 + q_3)$.

Pour la suite, la notation suivante est introduite pour la matrice de passage du modèle géométrique direct :

$$P_0^6 = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & T_x \\ y_1 & y_2 & y_3 & T_y \\ z_1 & z_2 & z_3 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (\text{F.7})$$

La matrice de passage finale exprimant la position et l'orientation de l'effecteur dans le repère de base R_A du manipulateur peut alors s'écrire :

$$\begin{aligned} P_0^7 &= \begin{pmatrix} r_{11}x_1 + r_{21}x_2 + r_{31}x_3 & r_{12}x_1 + r_{22}x_2 + r_{32}x_3 & r_{13}x_1 + r_{23}x_2 + r_{33}x_3 & r_{14}x_1 + r_{24}x_2 + r_{34}x_3 + T_x \\ r_{11}y_1 + r_{21}y_2 + r_{31}y_3 & r_{12}y_1 + r_{22}y_2 + r_{32}y_3 & r_{13}y_1 + r_{23}y_2 + r_{33}y_3 & r_{14}y_1 + r_{24}y_2 + r_{34}y_3 + T_y \\ r_{11}z_1 + r_{21}z_2 + r_{31}z_3 & r_{12}z_1 + r_{22}z_2 + r_{32}z_3 & r_{13}z_1 + r_{23}z_2 + r_{33}z_3 & r_{14}z_1 + r_{24}z_2 + r_{34}z_3 + T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} x_{f_1} & x_{f_2} & x_{f_3} & T_{x_f} \\ y_{f_1} & y_{f_2} & y_{f_3} & T_{y_f} \\ z_{f_1} & z_{f_2} & z_{f_3} & T_{z_f} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (\text{F.8})$$

Sous forme vectorielle, en utilisant la relation (F.8) et les formules d'extraction des angles d'Euler d'une matrice de rotation (Annexe.C.1.2.2), il est finalement possible d'écrire :

$$X_{E \in R_E / R_A} \Big|_{R_A} = \begin{pmatrix} x_{R_E} \\ y_{R_E} \\ z_{R_E} \\ \theta_{x_{R_E}} \\ \theta_{y_{R_E}} \\ \theta_{z_{R_E}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{x_f} \\ T_{y_f} \\ T_{z_f} \\ \arctan\left(\frac{-y_{f_3} \cos(\theta_y)}{\cos(\theta_y) z_{f_3}}\right) \\ \arctan\left(\frac{x_{f_3}}{\sqrt{1 - x_{f_3}^2}}\right) \\ \arctan\left(\frac{-x_{f_2} \cos(\theta_y)}{\cos(\theta_y) x_{f_1}}\right) \end{pmatrix} = f(q). \quad (\text{F.9})$$

F.2.1.2 Modèle géométrique inverse

Le modèle géométrique inverse permet de trouver les différentes configurations articulaires q en fonction d'une position et d'une orientation de l'effecteur dans l'espace. Cependant, la relation entre l'espace articulaire et opérationnel n'étant pas bijective, il peut exister plus d'une solution aux modèles géométriques inverses. Dans le cas des manipulateurs de la série Ur, il peut exister jusqu'à huit configurations articulaires pour une configuration opérationnelle.

Le modèle géométrique inverse n'étant pas utilisé dans ces travaux, les solutions sont données à titre informatif et le détail des calculs est volontairement éludé pour plus de concision. Chaque solution q_i $i \in \llbracket 1; 6 \rrbracket$ se compose de deux paramètres C et S représentant respectivement un cosinus et un sinus. Une fois ces paramètres connus, la solution est donnée par :

$$q_i = \arctan \left(\frac{S_i}{C_i} \right). \quad (\text{F.10})$$

Les couples de ces paramètres sont donnés dans le tableau Tab.F.3 ci-dessous (en considérant le paramètre $\varepsilon = \pm 1$) :

q	C	S
1	$\frac{-a_4(a_6x_3 + T_x) - \varepsilon(a_6y_3 + T_y)}{(a_6y_3 + T_y)^2 + (a_6x_3 + T_x)^2} \dots$ $\dots \frac{1}{\sqrt{(a_6y_3 + T_y)^2 + (a_6x_3 + T_x)^2 - a_4^2}}$	$\frac{-a_4(a_6y_3 + T_y) + \varepsilon(a_6x_3 + T_x)}{(a_6y_3 + T_y)^2 + (a_6x_3 + T_x)^2} \dots$ $\dots \frac{1}{\sqrt{(a_6y_3 + T_y)^2 + (a_6x_3 + T_x)^2 - a_4^2}}$
5	$\frac{x_3C_1 + S_1y_3}{x_1C_1 + S_1y_1}$	$\pm \sqrt{1 - C_5^2}$
6	$\frac{S_5}{S_5}$	$\frac{x_2C_1 + S_1y_2}{S_5}$
3	$\frac{(b_3S_\beta + b_2S_2)^2 + (b_3C_\beta + b_2C_2)^2 - b_2^2 - b_3^2}{2b_2b_3}$	$\pm \sqrt{1 - C_3^2}$
2	$\frac{(C_2(b_3C_3 + b_2) - S_2S_3b_3)(b_3C_3 + b_2)}{(b_3C_3 + b_2)^2 + (S_3b_3)^2} \dots$ $\dots + \frac{(S_2(b_3C_3 + b_2) + C_2S_3b_3)(S_3b_3)}{(b_3C_3 + b_2)^2 + (S_3b_3)^2}$	$\frac{(S_2(b_3C_3 + b_2) + C_2S_3b_3)(b_3C_3 + b_2)}{(b_3C_3 + b_2)^2 + (S_3b_3)^2} \dots$ $\dots - \frac{(C_2(b_3C_3 + b_2) - S_2S_3b_3)(S_3b_3)}{(b_3C_3 + b_2)^2 + (S_3b_3)^2}$
4	$-C_\alpha S_\beta - S_\alpha C_\beta$	$S_\alpha S_\beta - C_\alpha C_\beta$

TABLE F.3 – Solution au modèle géométrique inverse du manipulateur de la série Ur.

F.2.2 Modèle cinématique

Une fois le modèle géométrique établi, il est possible de calculer le modèle cinématique du manipulateur à partir de (F.9). Ce dernier modèle permet de mettre en lien les vitesses opérationnelles de l'effecteur $\dot{X}_{E \in R_E/R_A} \Big|_{R_A}$ avec les vitesses articulaires du manipulateur \dot{q} dans le repère de la base du manipulateur R_A . On a :

$$\dot{X}_{E \in R_E/R_A} \Big|_{R_A} = \frac{\partial f(q)}{\partial q} \dot{q} = J\dot{q}. \quad (\text{F.11})$$

Avec J la Jacobienne du modèle géométrique.

Annexe G

Annexe : Présentation des mobiles

SOMMAIRE DU CHAPITRE

G.1 Campero	247
G.2 Adap2E	247

G.1 Campero

La plateforme Campero (voir Fig.G.1) est un manipulateur mobile développé par la société Robotnik. Elle est équipée d'un manipulateur Ur10 (Voir Sec.F.1) pour lui offrir des capacités de manipulation. Le manipulateur est équipé d'une pince trois doigts (Robotiq) et d'un capteur d'efforts (FT300 Robotiq) sur la dernière liaison. La plateforme est aussi équipée d'un GPS (DGPS u-blox RTK C94-M8P), d'une IMU (Pixhawk) de deux LIDAR SICK (LMS151) aux coins opposés du robot, d'une caméra directionnelle frontale (PTZ Axis M5525-E) et d'une caméra (RGBD Realsense D435) au niveau de l'effecteur.

C'est une plateforme électrique à quatre roues motrices, chacune entraînée par un moteur de 1.2kW, sans train directeur. Elle est autant adaptée aux environnements naturels qu'industriels, avec la possibilité de changer sa mobilité par l'installation de roues omni-directionnelles. Les caractéristiques techniques des plateformes sont données dans le tableau Tab.G.1.

G.2 Adap2E

Adap2E (voir Fig.G.2) est une plateforme mobile issue du projet jeune chercheur Adap2E, soutenu par l'ANR, au sein du laboratoire IRSTEA. La plateforme a, par la suite, été équipée d'un manipulateur Ur10e pour en faire un robot de manipulation mobile. Elle est également équipée d'un GPS (Droteck RTK) et d'une centrale inertielle (Xsens MTi-100). De plus, un outil de pulvérisation a été ajouté sur le robot dans le cadre de travaux de recherche sur la pulvérisation de précision le long d'une structure végétale.

C'est une plateforme électrique possédant quatre roues motrices et directrices d'une puissance de 3kW, adaptée au déplacement en environnement naturel. La plateforme peut se présenter selon deux configurations de voie, la

Masse	308 kg
Empattement	0.52 m
Voie	0.7 m
Vitesse linéaire maximale	3 m/s
Vitesse angulaire maximale	6 rad/s

TABLE G.1 – Caractéristiques techniques de la plateforme Campero

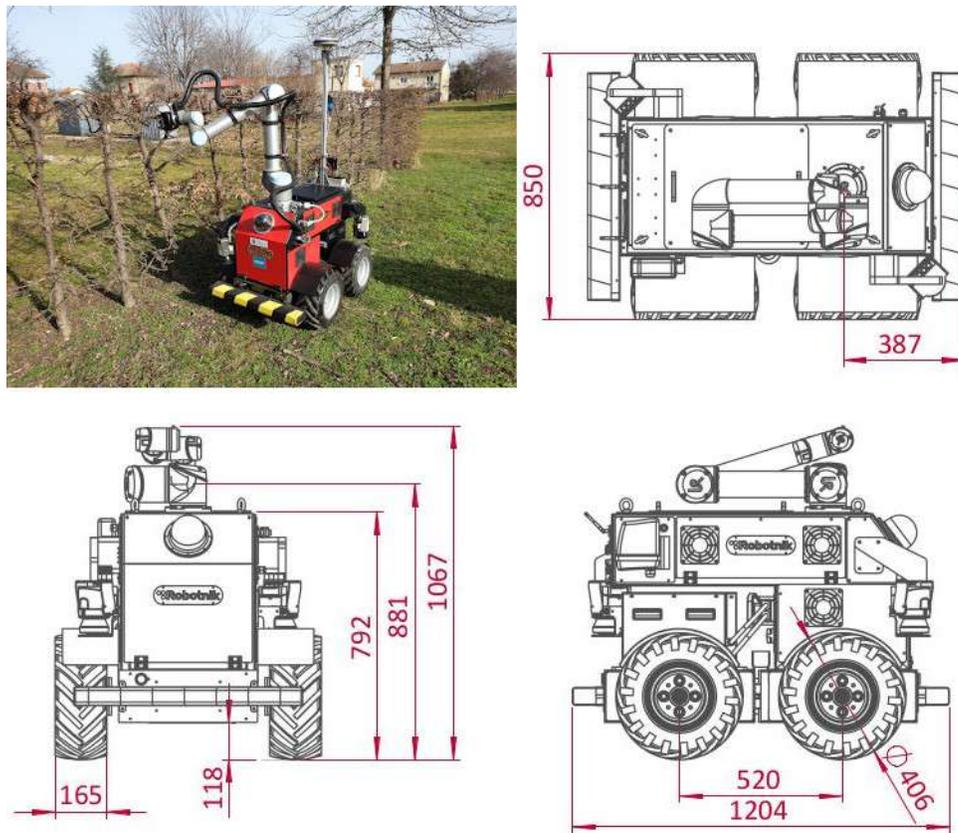


FIGURE G.1 – Plateforme Campero de la société Robotnik



FIGURE G.2 – Plateformes de manipulation mobile Adap2e

Masse	500 kg
Empattement	1.69 m
Voie	0.6m
Rayon de courbure minimal de la trajectoire	0.9 m
Vitesse maximale	9.8 m/s

TABLE G.2 – Caractéristiques techniques de la plateforme Adap2E

première de 0.6m, adaptée aux travaux en vignes étroites et la seconde, de 1.2m, plus générique, adaptée aux autres travaux agricoles. Les caractéristiques techniques de la plateforme sont données dans le tableau Tab.G.2.

Annexe H

Annexe : Couplage interne

SOMMAIRE DU CHAPITRE

H.1	Modélisation cinématique d'un cas d'étude 2D	251
H.1.1	Modélisation cinématique en contrainte non-holonome par tâche	252
H.1.2	Modélisation cinématique en contrainte non-holonome par modèle	252
H.2	Application au cas 3D et expérimentation	253
H.2.1	Comparaison des modélisations	253
H.2.1.1	Détails des erreurs sur les différentes contraintes	254
H.2.1.2	Conclusion sur le comparatif des approches en couplage interne	255
H.2.2	Discussion sur la manipulabilité	256

Cette annexe traite des travaux de stage de seconde année de master de Mr. Pierre Joyet, encadré durant la période du 01/03/2021 au 31/08/2021, concernant les approches en couplage interne des manipulateurs mobiles. Cette partie présente les résultats des différentes approches mises en œuvre, obtenus de manière expérimentale, ainsi que des observations et remarques sur ces derniers.

H.1 Modélisation cinématique d'un cas d'étude 2D

Cette première partie présente une étude de cas simple sur un manipulateur mobile 2D (Fig.H.1) en utilisant les deux approches principales de modélisation cinématique du système pour le couplage interne de ce type de robot.

Afin de réaliser les deux modèles dans les parties suivantes, un ensemble de notations est défini ci-dessous :

- p : Position du point de contrôle du système $(p_x \ p_y)^t$, ici l'effecteur du manipulateur, dans l'espace de la tâche.
- u : Vecteur de commande du mobile $(v \ \omega)^t$.
- q_b : Variables articulaires du mobile $(m_x \ m_y \ \theta)^t$.
- q_a : Variables articulaires du manipulateur $(q_1 \ q_2)^t$.
- q : Variables articulaires du manipulateur mobile $(q_b \ q_a)^t$.

Dans un premier temps, le modèle géométrique direct du système est exprimé tel que :

$$\begin{cases} p_x = m_x + l_0 \cos(\theta) + l_1 \cos(\theta + q_1) + l_2 \cos(\theta + q_1 + q_2) \\ p_y = m_y + l_0 \sin(\theta) + l_1 \sin(\theta + q_1) + l_2 \sin(\theta + q_1 + q_2) \end{cases} \quad (\text{H.1})$$

A partir du modèle précédent (H.1), il est possible d'en déduire un modèle cinématique tel que :

$$\dot{p} = J_b \dot{q}_b + J_a \dot{q}_a = (J_b \quad J_a) \dot{q}. \quad (\text{H.2})$$

Avec :

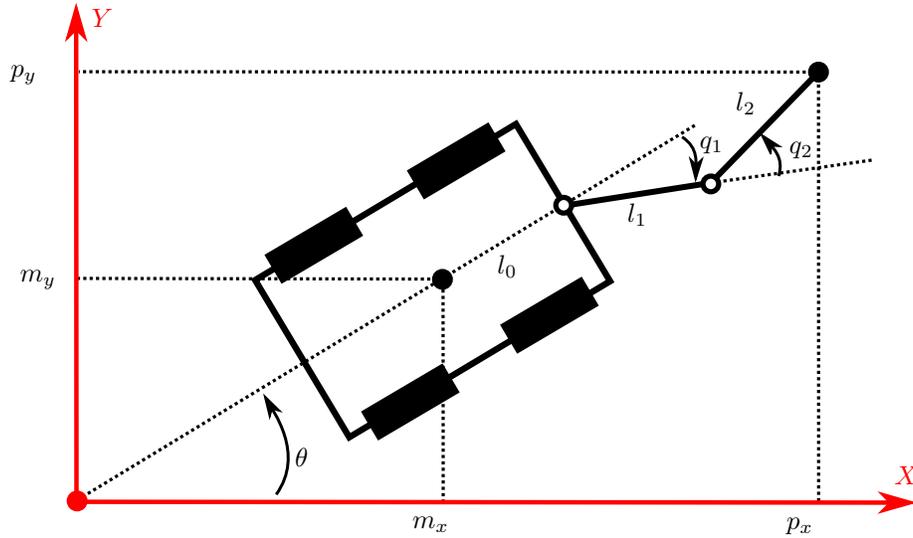


FIGURE H.1 – Modélisation 2D d'un manipulateur mobile.

$$J_b = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -l_0 \sin(\theta) - l_1 \sin(\theta + q_1) - l_2 \sin(\theta + q_1 + q_2) \\ 0 & 1 & l_0 \cos(\theta) + l_1 \cos(\theta + q_1) + l_2 \cos(\theta + q_1 + q_2) \end{pmatrix}. \quad (\text{H.3})$$

$$J_a = \begin{pmatrix} -l_1 \sin(\theta + q_1) - l_2 \sin(\theta + q_1 + q_2) & -l_2 \sin(\theta + q_1 + q_2) \\ l_1 \cos(\theta + q_1) + l_2 \cos(\theta + q_1 + q_2) & l_2 \cos(\theta + q_1 + q_2) \end{pmatrix}. \quad (\text{H.4})$$

Cependant, le modèle (H.2) construit de cette manière ne comporte pas la prise en compte de la non-holonomie du mobile. De fait, ce modèle représente le système dans le cas où la base mobile est holonome (tel que présenté dans SERAJI (1998)).

H.1.1 Modélisation cinématique en contrainte non-holonome par tâche

La première approche pour l'ajout de la non-holonomie, consiste à la considérer comme une tâche secondaire à effectuer par le système. Pour cela, la contrainte cinématique (D.15) est ajoutée sous la forme :

$$J_c = \begin{pmatrix} \sin(\theta) & -\cos(\theta) & 0 \end{pmatrix}. \quad (\text{H.5})$$

Cette formulation est valable dans le cas où le point $(m_x \ m_y)^t$ est le centre du mobile. Dans le cas contraire, un terme additionnel selon l'angle θ est à ajouter.

La contrainte (H.5) est alors ajoutée dans le modèle sur le principe de l'augmentation de l'espace de la tâche, tel que :

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \dot{p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_c & 0_{1 \times 2} \\ J_b & J_a \end{pmatrix} \dot{q} = J_t \dot{q}. \quad (\text{H.6})$$

Avec :

$$J_t = \begin{pmatrix} \sin(\theta) & -\cos(\theta) & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -l_0 \sin(\theta) - l_1 \sin(\theta + q_1) - l_2 \sin(\theta + q_1 + q_2) & -l_1 \sin(\theta + q_1) - l_2 \sin(\theta + q_1 + q_2) & -l_2 \sin(\theta + q_1 + q_2) \\ 0 & 1 & l_0 \cos(\theta) + l_1 \cos(\theta + q_1) + l_2 \cos(\theta + q_1 + q_2) & l_1 \cos(\theta + q_1) + l_2 \cos(\theta + q_1 + q_2) & l_2 \cos(\theta + q_1 + q_2) \end{pmatrix}. \quad (\text{H.7})$$

H.1.2 Modélisation cinématique en contrainte non-holonome par modèle

La seconde méthode propose la prise en compte de la non-holonomie au sein du modèle du robot en prenant non pas la contrainte de non-holonomie comme une tâche supplémentaire, mais le modèle du mobile afin de générer

des vitesses admissibles.

Dans la cas d'étude proposé, la matrice B du mobile est donnée telle que :

$$B = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (\text{H.8})$$

Cette dernière est alors incorporée au modèle du manipulateur mobile sous la forme :

$$\dot{p} = (J_b B \quad J_a) \dot{q} = J_m \begin{pmatrix} u \\ \dot{q}_a \end{pmatrix}. \quad (\text{H.9})$$

Avec :

$$J_m = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -l_0 \sin(\theta) - l_1 \sin(\theta + q_1) - l_2 \sin(\theta + q_1 + q_2) & -l_1 \sin(\theta + q_1) - l_2 \sin(\theta + q_1 + q_2) & -l_2 \sin(\theta + q_1 + q_2) \\ \sin(\theta) & l_0 \cos(\theta) + l_1 \cos(\theta + q_1) + l_2 \cos(\theta + q_1 + q_2) & l_1 \cos(\theta + q_1) + l_2 \cos(\theta + q_1 + q_2) & l_2 \cos(\theta + q_1 + q_2) \end{pmatrix}. \quad (\text{H.10})$$

H.2 Application au cas 3D et expérimentation

En suivant le même principe de modélisation du manipulateur mobile que celui présenté dans la section précédente, il est ensuite possible d'étendre cela dans le cas 3D sur un système possédant plus de degrés de liberté. Cette partie présente un comparatif des performances obtenues de façon expérimentale par les deux méthodes de modélisation cinématique des couplages internes.

Les vidéos associées aux essais présentés ici peuvent être trouvées à l'adresse : <https://nextcloud.inrae.fr/s/Rm5LQH7oGew9qdA>. L'ensemble des erreurs et écarts présentés sont exprimés en m pour les distances et en $^\circ$ pour les rotations.

Les expérimentations ont été menées sur la plateforme Campero (Voir Annexe.G) fonctionnant sous ROS.

Ce cas d'étude s'intéresse à la stabilisation en un point du manipulateur mobile. Pour ce faire, la même loi de commande par retour d'état est appliquée pour les deux approches avec un gain de commande identique pour chaque articulation du système égal à $k = 0.3$.

Dans ce cas d'étude, la position de départ dans le repère monde est $(0 \ 0 \ 0)^t$ pour le mobile et $(1.15 \ 0 \ 0.8 \ 0 \ 0 \ 0)^t$ pour le manipulateur. Une limite de vitesse à $1m/s$ est appliquée à toutes les articulations pour éviter des pics de commande trop importants pouvant endommager le système. Ici, deux scénarios sont envisagés :

- **Scénario 1** : Le point d'arrivée de l'effecteur est situé en $(6 \ -1)^t$.
- **Scénario 1** : Le point d'arrivée de l'effecteur est situé en $(6 \ -6)^t$.

Pour chaque approche de modélisation, quatre essais différents sont réalisés, en ajoutant à chaque fois une nouvelle contrainte cinématique afin de contraindre de plus en plus le système :

- **Essai 1** : Seule la position de l'effecteur est contrainte.
- **Essai 2** : La position et l'orientation de l'effecteur sont contraintes $(p_{\theta_x} \ p_{\theta_y} \ p_{\theta_z})^t = (0 \ 0 \ 0)^t$.
- **Essai 3** : La position et l'orientation de l'effecteur, ainsi que l'angle du coude du manipulateur sont contraints $q_3 = 0.5$ radians.
- **Essai 4** : La position et l'orientation de l'effecteur, ainsi que l'angle du coude du manipulateur et l'orientation du mobile sont contraints $(\theta = 0)$ radians.

H.2.1 Comparaison des modélisations

Les courbes présentées Fig.H.2 représentent la norme de l'erreur pour les différentes contraintes selon les essais dans le cas des deux scénarios. Ces dernières permettent de montrer que, globalement, le comportement du système quelle que soit l'approche de modélisation choisie et les contraintes associées sont très similaires.

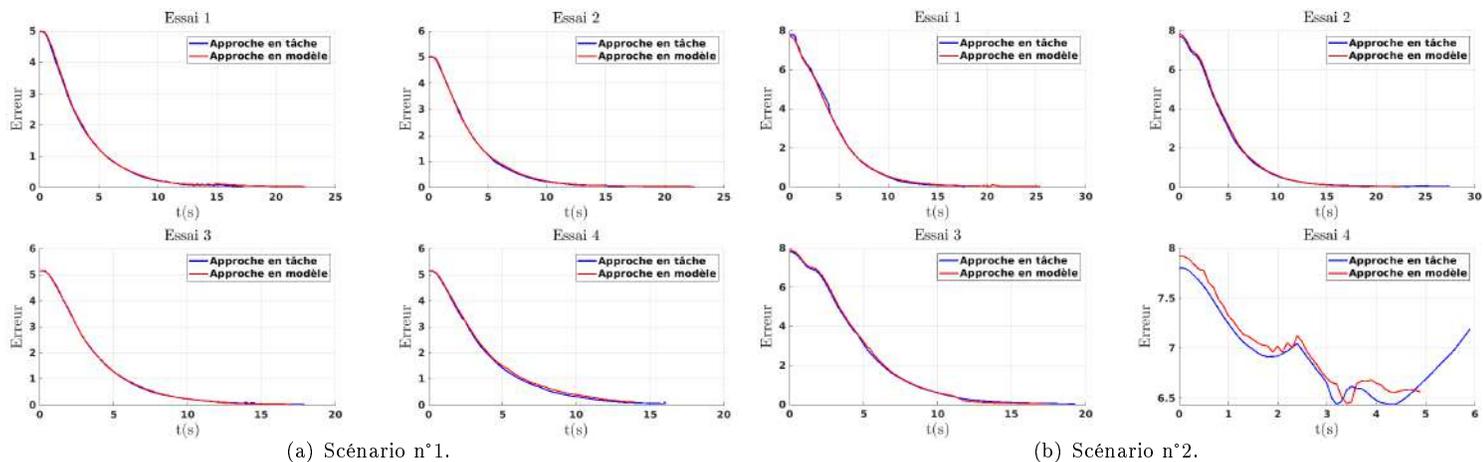


FIGURE H.2 – Norme de l'erreur sur l'ensemble des contraintes sur les quatre essais.

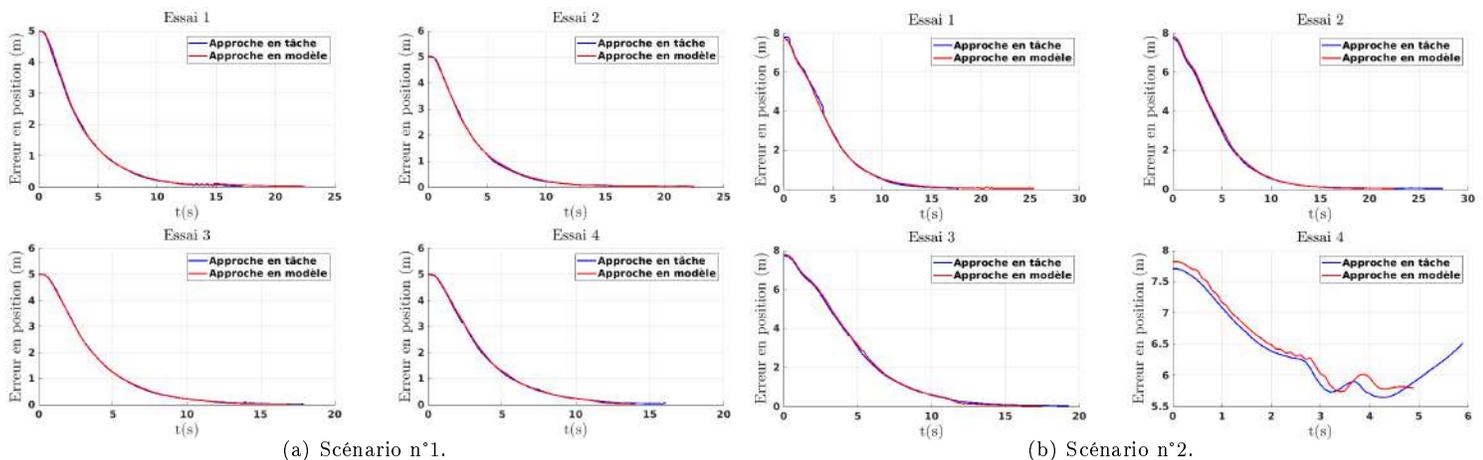


FIGURE H.3 – Erreur en position de l'effecteur sur les quatre essais.

Une attention particulière est demandée sur la figure Fig.H.2(b) portant sur l'essai 4 où cette dernière montre d'importants écarts entre les deux méthodes. Or, ces courbes représentent un cas particulier où le système ne peut pas réaliser l'ensemble de ces contraintes, car l'une d'entre elles se trouve impossible face à la réalisation des autres. De fait, il s'agit du cas de figure où l'orientation du mobile est contrainte à un angle nul, tandis que son objectif en position lui impose de se décaler sur sa droite. Ainsi, sur l'ensemble des courbes présentées dans la suite, portant sur cet essai, le comparatif n'est pas pertinent car la tâche est impossible pour le système. Cependant il est intéressant de pointer que les deux approches ont exactement la même limite concernant le nombre de tâches affectées et leurs capacités à les gérer et cela malgré la différence de dimension de leurs vecteurs de commande.

H.2.1.1 Détails des erreurs sur les différentes contraintes

Cette section propose l'étude des erreurs pour chacune des contraintes ajoutées en fonction des essais. Cela permet d'obtenir un meilleur comparatif que la simple norme de l'ensemble des erreurs des contraintes soumises aux biais des unités utilisées.

Ainsi, concernant l'erreur en position de l'effecteur (Voir Fig.H.3), les résultats sont identiques entre les deux méthodes, pour les deux scénarios, ce qui conforte l'idée d'un comportement similaire où l'effecteur suit la même trajectoire pour atteindre le point final.

Concernant l'erreur angulaire de l'effecteur (Voir Fig.H.4), on observe quelques différences sur les erreurs des axes de rotation. Cependant, ces dernières étant relativement faibles (de l'ordre de quelques degrés) et obtenues de

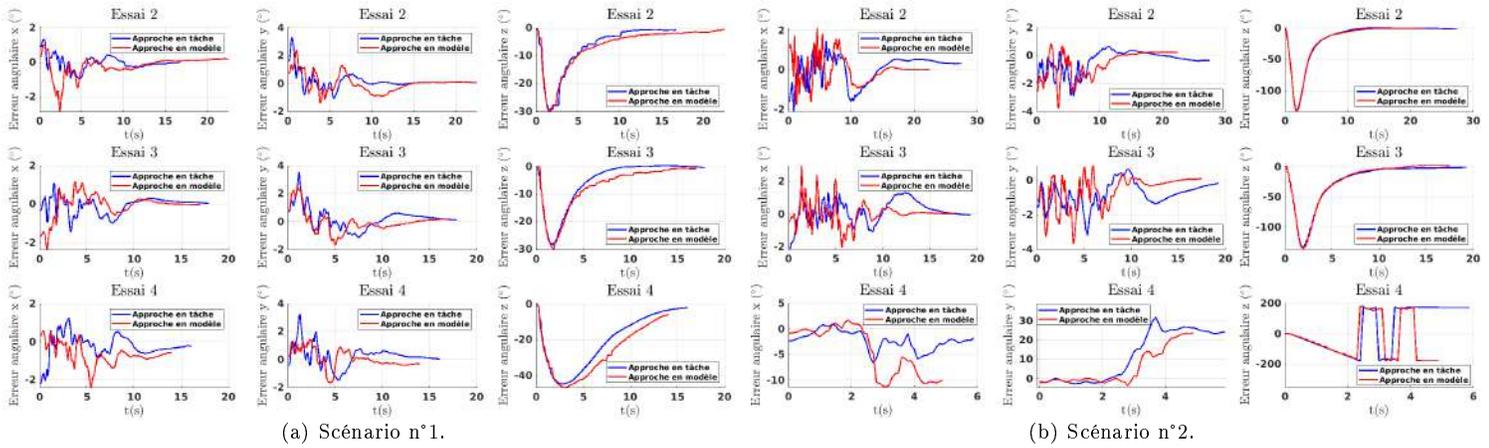


FIGURE H.4 – Erreur angulaire de l’effecteur sur les essais n°2, 3 et 4.

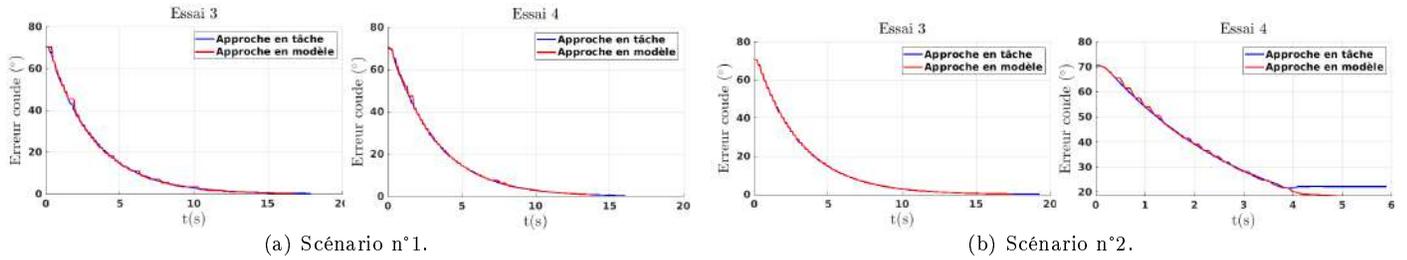


FIGURE H.5 – Erreur angulaire de l’articulation du coude du manipulateur sur les essais n°3 et 4.

façon expérimentale sur un système évoluant en terrain naturel, elles ne sont pas significatives. De plus, l’allure de ces dernières traduit également un comportement très similaire.

Finalement, on retrouve les mêmes conclusions sur les erreurs angulaires de l’articulation du coude du manipulateur (Voir Fig.H.5) et du cap du mobile (Voir Fig.H.6).

H.2.1.2 Conclusion sur le comparatif des approches en couplage interne

Au vu des résultats obtenus précédemment, il semble pertinent de conclure sur la similarité des approches en terme de performance pure. De fait, avec les deux méthodes, les comportements du système sont extrêmement similaires et les contraintes de tâches sont satisfaites de façon identique. Ainsi, le simple critère de performance ne permet pas de dégager l’intérêt d’une méthode par rapport à l’autre.

D’un point de vue conceptuel, les deux méthodes sont cependant très différentes. L’une considérant la contrainte de non-holonomie comme une tâche au même titre que les autres contraintes, et l’autre la considérant comme une

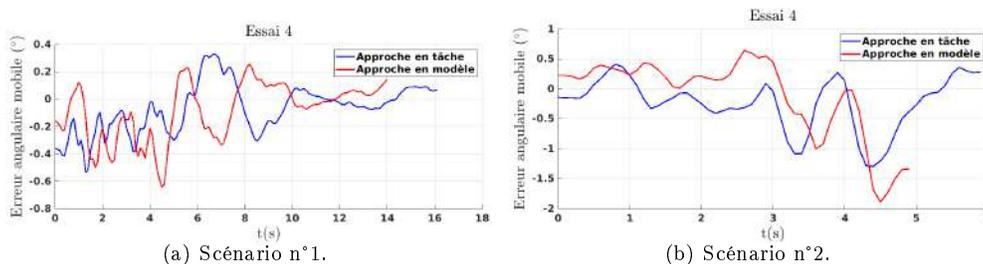


FIGURE H.6 – Erreur angulaire du mobile sur l’essai n°4.

limite intrinsèque au système. Cependant, il est tout à fait possible de mettre en défaut l'approche par tâche dans le cas où la contrainte de non-holonomie n'est pas strictement prioritaire sur les autres et que le système devient sur-contraint. Malgré tout, poser l'hypothèse que cette contrainte possède la priorité la plus haute dans une liste de tâches n'est pas restrictif¹. Enfin, l'utilisation de la modélisation retire une dimension de commande au système, par rapport à la méthode par ajout de tâche. Mais dans cette dernière, deux de ces dimensions sont liées par la contrainte de non-holonomie (ce qui se retrouve également dans la relation linéaire qui rassemble ses deux vecteurs de commande). Ainsi, aucune des deux méthodes ne permet de gains sur la dimension de la commande et l'ajout de contrainte supplémentaire par rapport à l'autre.

Par ailleurs, il serait intéressant de considérer le fait que l'approche en tâche ne considère jamais le modèle du mobile et posséderait un aspect générique. Or, dans ce cas, il serait nécessaire de pouvoir piloter le vecteur q_b sans restriction pour que cela soit vrai. De par la mobilité du mobile, cela est impossible et nécessite un contrôleur dédié pour piloter le vecteur q_b selon le vecteur de contrôle u du mobile. Cependant, ajouter un tel contrôleur pour le mobile, implique de ne plus être dans le paradigme du couplage interne et surtout de ne pas avoir à considérer la non-holonomie au sein de J_t car elle sera déjà prise en compte au sein du contrôleur dédié, ce qui ramènerait l'approche à un couplage externe générique.

D'un autre côté, l'approche par modèle peut être pertinente car elle prend en compte explicitement le modèle du mobile et donc ses capacités de mobilité. Ce point permettrait d'extrapoler la méthode en changeant de modèle B pour chaque type de mobile différent et ainsi, à défaut, d'avoir une approche générique. Elle n'en serait pas moins facilement adaptable. Or, bien que ces méthodes ne peuvent augmenter le degré de manœuvrabilité de la plateforme, il a été montré dans Alessandro DE LUCA, Giuseppe ORIOLO et ROBUFFO GIORDANO (2010) qu'elles sont tout à fait aptes à le diminuer par l'inexistence de la relation linéaire directe entre les vitesses généralisées du mobile \dot{q}_b et son vecteur de contrôle u en dehors du cas des mobiles holonomes et unicycles. De fait, le mouvement propre associé aux roues directrices des autres types de mobilité n'influence pas directement le point de contrôle du robot. Par ailleurs, les mobiles holonomes n'ayant pas besoin de cette prise en compte de la non-holonomie, cette méthode est finalement uniquement applicable au cas du mobile de type unicycle ou skid steering. La solution à ce problème (en restant au niveau de la cinématique) passe alors par l'exploitation du noyau du modèle complet, pour optimiser une tâche secondaire utilisant la dirigeabilité du mobile. Or, ceci est similaire à l'approche en tâche car cela revient à considérer les capacités de mobilité de la plateforme au sein d'une tâche et non du modèle.

Bien que l'ensemble des points mentionnés précédemment semble évident, il est important de les rappeler afin de pointer que les deux méthodes proposées pour le couplage interne des manipulateurs mobiles ne possèdent pas de différences notables en dehors de leur formalisation de départ. Aucun critère de performance ne permet de les différencier et leur différence de concept, ne permet pas de tirer un bénéfice de l'une par rapport à l'autre.

H.2.2 Discussion sur la manipulabilité

Ces expérimentations ont également permis la mise en lumière d'un second point concernant les couplages internes² et notamment la manipulabilité. Bien que ce dernier a déjà été évoqué dans la littérature, il semblait pertinent d'en donner ici une illustration et de discuter les implications.

Le critère de manipulabilité a subi de nombreuses évolutions dans la littérature, dont plusieurs sont directement issues de leurs adaptations à l'usage des manipulateurs mobiles. Ainsi, les premiers travaux concernant la coordination des manipulateurs mobiles visaient à maximiser la manipulabilité du bras. Par la suite, l'utilisation des couplages internes, avec un modèle complet, a permis de considérer la manipulabilité du système dans son ensemble. Cette avancée possède plusieurs intérêts, le premier étant qu'elle permet d'intégrer l'ensemble des capacités de déplacement du système au sein d'un seul critère. Par ailleurs, le modèle ainsi construit permet de faire disparaître une partie des singularités auxquelles est classiquement soumis le manipulateur seul (notamment son extension maximale).

Cependant, maximiser la manipulabilité du système dans son ensemble ne garantit nullement de maximiser la manipulabilité des différents sous-systèmes. En pratique, il apparaît que cela peut être le contraire. Ainsi, lors des

1. Cela assure que l'un des degrés de redondance de la plateforme sera continuellement occupé par cette contrainte, ce qui est similaire au cas de l'approche par la modélisation où ce degré de redondance n'est simplement pas disponible

2. On associe ici ce point au couplage interne car l'historique de la littérature veut qu'il n'ait été abordé que dans ce contexte. Cependant, il est tout à fait possible de la considérer également au sein d'un couplage externe.

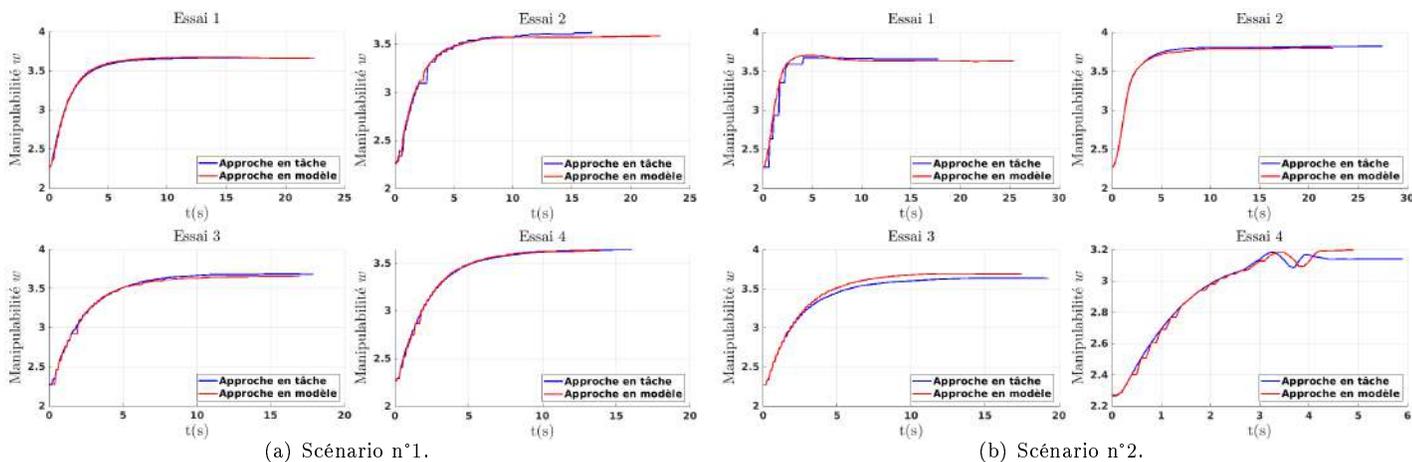


FIGURE H.7 – Manipulabilité du système complet sur les quatre essais.

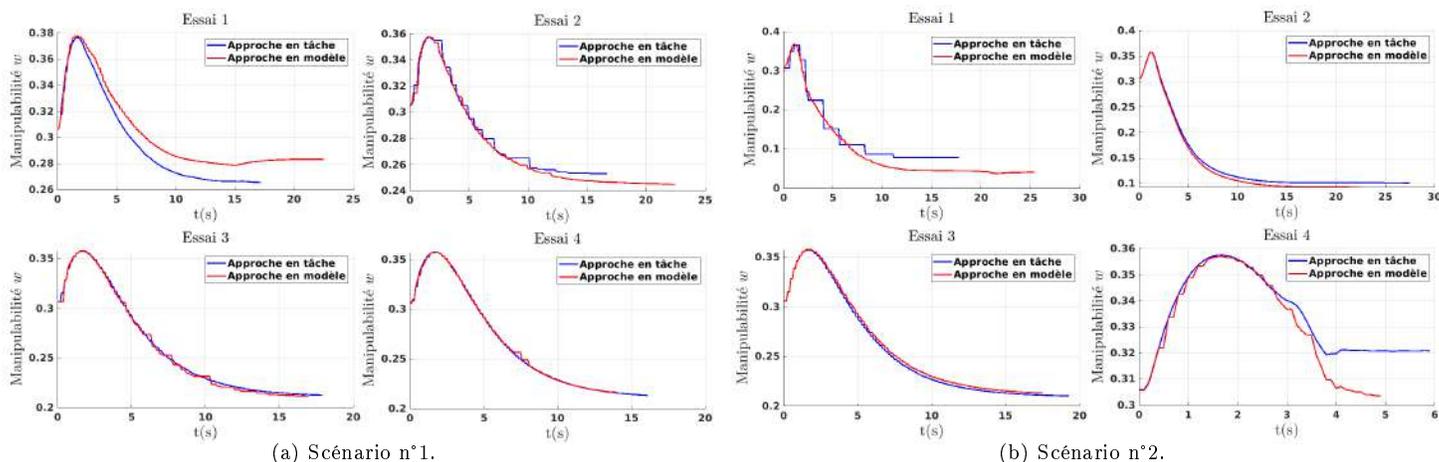


FIGURE H.8 – Manipulabilité du manipulateur seul sur les quatre essais.

expérimentations menées, la mesure de manipulabilité du système complet et du bras a été obtenue pour les quatre essais des deux scénarios différents. Les résultats sont donnés sur les deux figures Fig.H.7 et Fig.H.8.

Il apparaît alors que dans les deux scénarios, la manipulabilité du système complet reste à une valeur haute (ce qui est normal car les contraintes ont été choisies pour être en dehors des singularités du manipulateur mobile, on rappelle ici qu’il n’y a pas d’optimisation de ce critère, seulement des contraintes cinématiques strictes). Cependant, la manipulabilité du manipulateur s’effondre³ dans les deux autres cas, et notamment dans le scénario n°2 où le mouvement du manipulateur est plus sollicité. De fait, l’utilisation d’un modèle global supprimant certaines positions singulières du manipulateur, permet au système de se positionner dans ces dernières. Ceci est illustré sur la figure Fig.H.9 montrant la position du système une fois le point objectif atteint. Le manipulateur est entré en extension causant l’effondrement de sa manipulabilité à des niveaux très faibles. Dans ce cas de figure, le modèle global fait disparaître la manipulabilité du système, car la dimension des vitesses admissibles normalement perdue par le manipulateur, est maintenue par la capacité du mobile à se déplacer sur son axe longitudinal⁴.

En théorie, l’utilisation de la manipulabilité du système complet au profit de celle du manipulateur est donc à l’avantage d’un modèle global, car elle est moins restrictive dans les positions atteignables par le système. Néan-

3. Ceci est particulièrement notable pour les essais n°1 et n°2, car la contrainte sur le coude du manipulateur dans les essais n°3 et n°4 limite cet effet

4. Si l’extension du manipulateur se produisait sur l’axe latéral du mobile, la singularité serait maintenue, car la dimension des vitesses admissibles serait perdue pour les deux systèmes

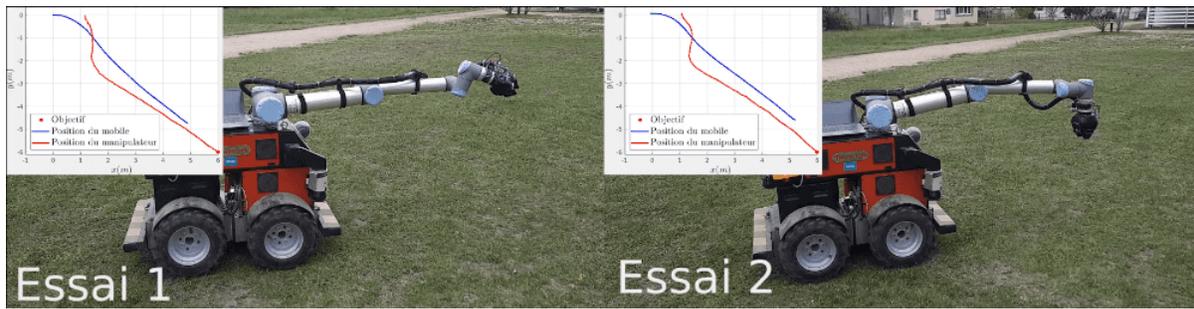


FIGURE H.9 – Situation du manipulateur mobile à la fin de l'expérimentation pour l'essai n°1 et n°2.

moins, en pratique, elle pose un problème lié à la différence de dynamique des sous-systèmes. De fait, en permettant au manipulateur de s'allonger entièrement selon un axe, ce dernier perd sa capacité de déplacement selon cet axe, qui est alors octroyée à la plateforme mobile. Ainsi, si le bras s'étend à l'avant du mobile, tous les mouvements devant être achevés dans cette direction devront être assurés par le mobile. Or, en pratique, le mobile et le manipulateur sont des systèmes très différents, notamment dans la précision de leur positionnement et dans leur dynamique de commande. Ainsi, dans la configuration précédente, (bras tendu sur l'axe longitudinal du mobile), la précision associée à la préhension d'un objet serait assurée en totalité sur un axe par la précision de déplacement du mobile, ce qui pourrait conduire à une mauvaise préhension du système ou des oscillations de ce dernier. Par ailleurs, tant qu'aucun critère concernant le bras seul ne sera pris en compte, il est impossible de garantir que ce dernier puisse conserver une capacité de déplacement dans l'ensemble des directions de son espace de travail.

En conclusion, malgré les intérêts associés aux critères de manipulabilité pour le système complet, il est important de s'assurer que chaque sous-système reste en dehors de ses singularités propres. Ce constat ajoute ainsi un nouvel argument contre l'utilisation des systèmes hautement couplés, par la nécessité d'en distinguer les parties ou de diminuer le niveau de couplage, à cause de la nature propre à chacune des sous-parties du manipulateur mobile.