UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi

Mécanisme parallèle reconfigurable entraîné par des câbles pour éviter les collisions

Par BOUDAYA Bilel
Sous la direction de Martin J.-D. Otis

Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du grade de Maitre ès sciences appliquées (M. Sc. A.) en ingénierie

Jury :

Éric Villeneuve, ing. Ph.D, Professeur, UQAC, Membre externe

Marc Arsenault, P.Eng., Ph.D., Professeur, Université Laurentienne

Martin Otis, ing. Ph.D, Professeur, UQAC, Membre interne

Québec, Canada

© Bilel BOUDAYA, 2025

RÉSUMÉ

Ce mémoire traite de la conception, de la modélisation et de l'analyse d'un mécanisme parallèle reconfigurable entraîné par des câbles (MPREC), conçu pour assurer l'évitement des collisions avec des obstacles mobiles dans un environnement industriel dynamique. L'objectif principal est de développer une stratégie de reconfiguration adaptative des points d'attache des câbles et de la structure portante afin de garantir la sécurité du système tout en maintenant la trajectoire de l'effecteur. Dans un premier temps, une revue de la littérature a permis d'identifier les stratégies existantes en matière de reconfiguration des points d'attache et de gestion des contraintes mécaniques. Cette analyse a mis en évidence les limites des méthodes conventionnelles, notamment leur difficulté à s'adapter à des environnements changeants. La méthodologie adoptée repose sur une modélisation cinématique du MPREC ainsi que sur le développement d'un algorithme de détection et d'évitement de collision. Trois concepts de reconfiguration ont été explorés, chacun offrant des degrés de liberté différents pour l'adaptation aux obstacles. L'étude a conduit à la sélection du concept offrant une reconfiguration simultanée horizontale et verticale, assurant ainsi une flexibilité optimale. Les simulations sous MATLAB ont permis d'évaluer l'efficacité de la reconfiguration et son impact sur l'espace de travail du mécanisme. Deux scénarios ont été étudiés : une reconfiguration maximale et une reconfiguration partielle. Les résultats ont montré que l'ajustement dynamique des points d’attache et de la structure portante a permis d'éviter efficacement les obstacles tout en maintenant les tensions admissibles des câbles. Les résultats obtenus fournissent une base solide pour l'amélioration des stratégies de reconfiguration des MPREC. Les recherches futures pourraient inclure une modélisation dynamique complète ainsi qu'une optimisation des paramètres de reconfiguration pour une meilleure adaptabilité aux contraintes industrielles.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ ii
TABLE DES MATIÈRES iii
LISTE DES TABLEAUX v
LISTE DES FIGURES vi
LISTE DES ABRÉVIATIONS vii
REMERCIEMENTS viii
CHAPITRE 1 1
INTRODUCTION 1
1.1 CONTEXTE GÉNÉRAL 1
1.2 DÉFINITION DU CONCEPT DE COLLISION DANS LE CONTEXTE DES MPEC 3
1.3 PROBLEMATIQUE 4
1.4 OBJECTIFS 5
1.5 STRUCTURE DU MÉMOIRE 6
CHAPITRE 2 8
REVUE DE LA LITTÉRATURE 8
2.1 INTRODUCTION 8
2.2 DEMARCHE METHODOLOGIQUE DE LA REVUE 9
2.3 PLANIFICATION ET COMMANDE DYNAMIQUE 10
2.4 DÉTECTION, ÉVITEMENT ET GESTION DES OBSTACLES 12
2.5 ANALYSE DE STABILITÉ ET SCÉNARIOS DE RECONFIGURATION 14
2.6 CONCEPTION, MODÉLISATION ET ÉVALUATION DES PERFORMANCES 16
2.7 CONTRIBUTION 23
2.8 CONCLUSION 27
CHAPITRE 3 28
MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE 28
3.1 INTRODUCTION 28
3.2 HYPOTHESE 29
3.3 DESCRIPTION DU MPEC ÉTUDIÉ 30
3.4 CONCEPTS DE RECONFIGURATION 32
3.5 CINÉMATIQUE DIRECTE ET INVERSE 36
3.5.1 CINÉMATIQUE DIRECTE 37
3.5.2 CINÉMATIQUE INVERSE 37
3.6 TENSION DES CÂBLES 39
3.7 DÉTECTION DE COLLISION 43
3.8 ÉVITEMENT DE COLLISION 47
3.9 ESPACE DE TRAVAIL DES EFFORTS RÉALISABLES 48
3.10 VITESSE DE DÉPLACEMENT 50
3.11 CONCLUSION 56
CHAPITRE 4 58
RÉSULTATS ET DISCUSSION 58
4.1 INTRODUCTION 58

4.2 ÉTUDE D'UN CAS DE COLLISION AVEC UN OBSTACLE MOBILE 59
4.2.1 DÉTECTION DE COLLISION.....61
4.2.2 EMPLACEMENT DES POINTS D'ATTACHES.....62
4.2.3 LONGUEUR DES CÂBLES.....65
4.2.4 TENSION DES CÂBLES 66
4.2.5 ANALYSE DE L'ESPACE DE TRAVAIL DES EFFORTS RÉALISABLES.....68
4.3 ÉTUDE DES LIMITES DE DÉPLACEMENT DE LA RECONFIGURATION 71
4.3.1 ÉVALUATION DES LIMITES MAXIMALES DE RECONFIGURATION.....72
4.3.2 ANALYSE D'UNE RECONFIGURATION PARTIELLE 75
4.4 LIMITES DE L'ÉTUDE ET PERSPECTIVES D'AMÉLIORATION.....77
4.5 CONCLUSION.....79
CHAPITRE 5.....82
CONCLUSION GENERALE 82
5.1 CONCLUSION.....82
5.2 PERSPECTIVES ET TRAVAUX FUTURS.....84
LISTE DE RÉFÉRENCES 87
ANNEXE 1 89
ANNEXE 2 91

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : LES CONTRAINTES A ETUDIER.....2
TABLEAU 2 : COMPARAISON ENTRE LES TRAVAUX DE RECHERCHE ANTERIEURS ET LE PROJET DE RECHERCHE PROPOSE.....25
TABLEAU 3 : ÉQUATIONS PAR INTERVALLE DE TEMPS 54

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. SCHEMA STRUCTUREL DU MPEC RECONFIGURABLE A MASSE PONCTUELLE ET A TROIS DDL [6] 10
FIGURE 2. SCHEMA DU ROBOT PARALLELE A CABLES AVEC POINTS D'ANCRAGE MOBILES [8] 12
FIGURE 3. PROTOTYPE D'UN RPEC RECONFIGURABLE A TROIS BASES MOBILES [10] 15
FIGURE 4. SYSTEME DE TRANSMISSION DE LA BASE MOBILE [10] 15
FIGURE 5. RPEC SUSPENDU DOTE D'UN EFFECTEUR MOBILE ARTICULE A QUATRE PAIRES DE CABLES PARALLELES [17] 21
FIGURE 6. EFFECTEUR MOBILE ARTICULE [17] 21
FIGURE 7. PREMIER PROTOTYPE DU RPEC [18] 22
FIGURE 8. DEUXIEME PROTOTYPE DU RPEC [18] 23
FIGURE 9. ARCHITECTURE DU MPEC (DEPLACEMENT HORIZONTAL) 30
FIGURE 10. ARCHITECTURE DU MPEC (DEPLACEMENT VERTICAL) 31
FIGURE 11. PREMIER CONCEPT DE RECONFIGURATION 33
FIGURE 12. DEUXIEME CONCEPT DE RECONFIGURATION 34
FIGURE 13. TROISIEME CONCEPT DE RECONFIGURATION 35
FIGURE 14. DIAGRAMME CINEMATIQUE 36
FIGURE 15. DIAGRAMME DES FORCES AGISSANT SUR L'EFFECTEUR 39
FIGURE 16. DISTANCE ENTRE L'OBSTACLE ET LA STRUCTURE DU MPEC 44
FIGURE 17. ALGORITHME D'EVITEMENT DE COLLISION 46
FIGURE 18. TEMPS DE TRANSITION POUR LA TRAJECTOIRE LSPB 52
FIGURE 19. CAS SIMULE DE COLLISION AVEC UN OBSTACLE MOBILE 60
FIGURE 20. LA DISTANCE ENTRE L'OBSTACLE ET LA STRUCTURE 62
FIGURE 21. POSITION DE LA STRUCTURE SUR L'AXE Y 63
FIGURE 22. POSITION DU POINT D'ATTACHE DU CABLE 8 SUR L'AXE Z 64
FIGURE 23. LONGUEUR DES CABLES 65
FIGURE 24. TENSIONS DES CABLES 67
FIGURE 25. ESPACE DE TRAVAIL ORIGINAL 69
FIGURE 26. ESPACE DE TRAVAIL FINAL (A) 69
FIGURE 27. ESPACE DE TRAVAIL FINAL (B) 70
FIGURE 28. POSITION DE LA STRUCTURE SUR L'AXE Y 72
FIGURE 29. POSITION DU POINT D'ATTACHE DU CABLE 8 SUR L'AXE Z 73
FIGURE 30. ESPACE DE TRAVAIL FINAL 74
FIGURE 31. POSITION DE LA STRUCTURE SUR L'AXE Y 76
FIGURE 32. POSITION DU POINT D'ATTACHE DU CABLE 8 SUR L'AXE Z 76
FIGURE 33. ESPACE DE TRAVAIL FINAL 77

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ABRÉVIATIONS	DÉFINITIONS
• RPEC	Robot parallèle entraîné par des câbles
• MPEC	Mécanisme parallèle entraîné par des câbles
• MPREC	Mécanisme parallèle reconfigurable entraîné par des câbles
• RPEC-SV	Robot parallèle entraîné par des câbles à structure variable
• DDL	Degré de liberté

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en évaluant ce travail. Leur expertise et leurs précieuses observations contribueront sans aucun doute à l'amélioration de cette recherche.

Je souhaite également adresser mes sincères remerciements à mon directeur de recherche, pour m'avoir accordé sa confiance en dirigeant ce mémoire. Son encadrement, ses conseils avisés et son soutien tout au long de cette étude ont été déterminants pour l'aboutissement de ce projet. Je le remercie également de m'avoir accueilli au sein du Laboratoire d'Automatisation, de Robotique et d'Informatique (LARI), où j'ai eu l'opportunité d'enrichir mes connaissances et d'évoluer dans un environnement de recherche stimulant.

Un immense merci à ma famille, dont le soutien inconditionnel m'a accompagné tout au long de ce parcours. Leur encouragement et leur patience ont été une source de motivation précieuse.

Enfin, je remercie mes amis et collègues, qui ont partagé avec moi cette aventure, apportant leur aide, leur bonne humeur et leur soutien durant ces années d'études. Leur présence a rendu ce cheminement plus enrichissant et plus agréable.

À tous, je vous exprime ma profonde reconnaissance.

CHAPITRE 1
INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE GÉNÉRAL

L'évolution industrielle actuelle impose une flexibilité accrue des systèmes automatisés afin de s'adapter aux contraintes dynamiques des environnements de production. L'essor de l'industrie 4.0, caractérisée par l'intégration de technologies avancées telles que l'intelligence artificielle, l'Internet des objets et la robotique, a révolutionné les méthodes de fabrication. Par ailleurs, l'industrie 5.0 va plus loin en intégrant des critères de durabilité, de résilience aux changements et de production personnalisée pour répondre aux besoins spécifiques de chaque application [1].

Dans ce contexte, les mécanismes parallèles entraînés par des câbles se distinguent par leur capacité à couvrir de vastes espaces de travail et à manipuler des charges importantes tout en maintenant une précision élevée. Contrairement aux robots industriels classiques dotés de bras articulés rigides, les MPEC utilisent des câbles flexibles fixés à des enrouleurs motorisés sur une structure portante, permettant ainsi un contrôle efficace de l'effecteur. Cette architecture leur confère plusieurs avantages, notamment une grande rapidité de mouvement, une capacité de charge élevée et un accès étendu à l'espace de travail [2].

Dans un environnement industriel dynamique, la présence de multiples obstacles fixes et mobiles (tels que les machines, les véhicules autonomes et les travailleurs) introduit des défis majeurs en matière de sécurité et de gestion des trajectoires du mécanisme. Un MPEC reconfigurable permet de répondre à ces enjeux en modifiant dynamiquement la position de ses points d'attache et de sa structure portante, garantissant ainsi un évitement efficace des obstacles tout en maintenant les performances du système [3].

Ce projet de recherche vise à modéliser et analyser un MPEC reconfigurable dédié à une installation industrielle où l'environnement est contraint par la présence d'obstacles et de mouvements imprévisibles. L'objectif est de développer une méthode de reconfiguration adaptative permettant d'optimiser le positionnement du mécanisme tout en préservant l'intégrité de l'espace de travail et la stabilité de l'effecteur.

Plusieurs contraintes doivent être prises en compte pour garantir le bon fonctionnement et la sécurité du MPEC dans un environnement réel. Le tableau suivant présente les principales contraintes identifiées :

TABLEAU 1 : Les contraintes à étudier

Contraintes	Exemple
Environnement de travail dynamique	Présence de véhicules, de robots mobiles et de travailleurs partageant le même espace de travail que le MPEC. Le mécanisme doit éviter toute collision avec ces éléments en mouvement.
Espace de travail	L'effecteur du MPEC doit pouvoir atteindre toutes les cibles requises dans l'installation industrielle, quelles que soient les contraintes spatiales.
Sécurité des travailleurs	Les travailleurs opèrent à proximité du mécanisme, nécessitant des stratégies efficaces d'évitement de collision et de reconfiguration.
Sécurité du MPEC	Le mécanisme doit être conçu pour minimiser les risques de défaillance structurelle et garantir une fiabilité optimale lors de son fonctionnement.

Face à ces défis, il est essentiel de concevoir un mécanisme flexible et reconfigurable afin d'adapter dynamiquement la géométrie du MPEC en fonction des contraintes de l'environnement. Ainsi, la reconfiguration des points d'attache et de la structure portante est une approche prometteuse qui permet d'étendre l'accessibilité aux différentes zones

de travail tout en assurant la sécurité et la stabilité du système. Ce travail de recherche s'inscrit donc dans cette perspective en explorant les stratégies de reconfiguration optimales pour un MPEC évolutif et sécurisé.

1.2 DÉFINITION DU CONCEPT DE COLLISION DANS LE CONTEXTE DES MPEC

Dans le cadre des mécanismes parallèles entraînés par des câbles, la collision fait référence à toute situation où les mouvements des câbles ou de la structure portante des points d'attaches entrent en contact avec des éléments de l'environnement industriel, tels que des obstacles fixes ou mobiles, des équipements ou des travailleurs. Ces collisions peuvent être classées en plusieurs catégories :

- **Collision câble-câble :** Lorsque deux câbles se croisent ou entrent en contact pendant le mouvement, cela peut entraîner des frottements ou des enchevêtrements, affectant ainsi la précision et la stabilité du système [3].
- **Collision câble-obstacle** : Lorsqu'un câble touche ou s'approche dangereusement d'un obstacle mobile (comme un équipement en mouvement ou une pièce d'avion), cela peut entraîner des dommages au mécanisme ou à l'obstacle [4].
- **Collision humain-câble :** Dans un environnement partagé avec des travailleurs, les câbles en mouvement peuvent présenter un risque pour leur sécurité, nécessitant une gestion stricte des zones d'opération [5].
- **Collision structure-obstacle :** La structure portante des points d'attache peut également entrer en collision avec des obstacles dans l'environnement, notamment dans des espaces de travail de grande envergure (le cas d'étude de ce travail).

Dans un environnement industriel dynamique, ces types de collisions peuvent compromettre non seulement la sécurité et la fiabilité du mécanisme, mais aussi l'efficacité des opérations globales. Pour garantir un fonctionnement sûr et optimal, il est crucial de concevoir un système capable de détecter et d'éviter ces collisions tout en maintenant une performance robuste.

1.3 PROBLEMATIQUE

Dans le cadre des MPEC, les collisions se manifestent principalement sous forme d'interférence entre les câbles, la structure portante et les éléments de l'environnement (obstacles fixes, obstacles mobiles ou travailleurs). Ces collisions, décrites en détail dans la section précédente, représentent des risques significatifs de collisions, de frottements ou d'accidents, nécessitant des solutions innovantes pour les gérer efficacement.

Un des défis majeurs provient du fait que la géométrie des MPEC dans des installations industrielles vastes et dynamiques impose des contraintes supplémentaires. Les câbles deviennent souvent parallèles au sol, ce qui peut entraîner des tensions importantes et limiter la flexibilité du mécanisme. La reconfiguration géométrique des MPEC devient alors indispensable pour s’adapter à ces contraintes environnementales et opérationnelles. Cette adaptation, bien que nécessaire, doit également respecter des contraintes supplémentaires, telles que le maintien des tensions des câbles dans des plages acceptables et l'évitement des collisions.

La littérature récente, notamment Liu, Y. et al., 2023 [6], met en avant la nécessité d’optimiser la géométrie des MPEC pour surmonter ces défis, notamment en développant des mécanismes capables de reconfigurer dynamiquement leurs points d’attache. Cependant, ces solutions soulèvent également des problèmes complexes,

notamment la difficulté à gérer un espace de travail dynamique où les obstacles en mouvement et les collisions peuvent modifier la configuration optimale du mécanisme.

Ainsi, ce projet de recherche vise à développer un MPEC reconfigurable capable de fonctionner efficacement dans un espace de travail dynamique et proposer une solution qui permette d'éviter les collisions tout en garantissant une performance optimale. En particulier, ce travail s'intéresse à la reconfiguration des points d'attache pour gérer les collisions et maintenir une trajectoire précise de l'effecteur, tout en répondant aux exigences de sécurité et de robustesse dans un contexte industriel dynamique.

1.4 OBJECTIFS

Les contraintes de l'environnement industriel, notamment la présence de machines fixes, ainsi que les obstacles mobiles tels que les véhicules, les humains et les robots mobiles, nécessitent une géométrie reconfigurable du MPEC. Cette reconfigurabilité se traduit par un déplacement des points d'attache des câbles, qui peuvent monter et descendre sur le rail de la structure portante, permettant ainsi d'adapter dynamiquement l'espace de travail face aux changements de l'environnement, en assurant l'évitement des obstacles présents. De plus, la structure portante elle-même peut être déplacée horizontalement, offrant une flexibilité supplémentaire pour répondre aux contraintes d'installation.

Par conséquent, l'objectif principal de cette recherche est l'étude, l'analyse et la modélisation d'un MPREC, dont les points d'attache et la structure portante sont mobiles afin d'assurer une adaptation dynamique aux obstacles tout en préservant la stabilité et la trajectoire de l'effecteur. Notamment dans les environnements intérieurs, où l'une des dimensions de l'espace disponible prédomine sur les autres, les tensions dans les câbles peuvent être très élevées, rendant complexe la conception mécanique et la gestion des efforts.

Ainsi, les objectifs spécifiques de cette étude sont :

- Analyser l'impact de la reconfiguration sur l'espace de travail, en évaluant les modifications induites par les déplacements des points d'attache et de la structure portante.
- Déterminer les limites maximales de déplacement du système, en identifiant les contraintes mécaniques et opérationnelles empêchant une reconfiguration illimitée.
- Développer un algorithme de reconfiguration efficace, permettant d'ajuster la position des points d'attache en fonction de la détection des obstacles.
- Valider l'approche par des simulations sous MATLAB, en testant différents scénarios d'évitement et d'adaptation du mécanisme.

Ce travail contribue ainsi à l'amélioration des stratégies de reconfiguration des MPEC, en mettant en évidence les compromis entre flexibilité, espace de travail et contraintes mécaniques, tout en ouvrant des perspectives pour une application industrielle élargie.

1.5 STRUCTURE DU MÉMOIRE

Ce mémoire est organisé en cinq chapitres, chacun traitant d'un aspect clé de l'étude.

Le premier chapitre introduit le contexte du projet de recherche, en définissant la problématique et les objectifs de l'étude.

Le deuxième chapitre présente une revue de la littérature, mettant en évidence les approches existantes en matière de reconfiguration des MPREC et de gestion des collisions.

Le troisième chapitre est consacré à la méthodologie adoptée. Il décrit les différents concepts de reconfiguration explorés et justifie le choix du modèle retenu. Ce chapitre

présente également les équations cinématiques et les algorithmes d'évitement de collision. De plus, une section est dédiée à l’étude des trajectoires appliquées aux points d’attache et aux limitations rencontrées dans leur implémentation.

Le quatrième chapitre expose les résultats des simulations et leur analyse. Il examine l'impact de la reconfiguration sur l'espace de travail, la stabilité du mécanisme et la répartition des tensions dans les câbles. Deux scénarios de reconfiguration ont été étudiés : une reconfiguration maximale et une reconfiguration partielle, permettant d'évaluer les performances du système dans différentes configurations.

Enfin, le cinquième chapitre conclut l'étude en résumant les contributions du travail et en proposant des perspectives d'amélioration pour l'avenir.

CHAPITRE 2
REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 INTRODUCTION

Les mécanismes parallèles entraînés par câbles (MPEC), également connus sous le nom de robots parallèles à câbles, suscitent un intérêt croissant dans les domaines industriels et de la recherche. Grâce à leur architecture particulière combinant des câbles tendus et des structures parallèles, ces systèmes offrent des avantages significatifs en matière de légèreté, de flexibilité et de rapidité d'exécution, en comparaison aux robots sériels traditionnels. Ces caractéristiques leur permettent de répondre aux exigences de plus en plus complexes des environnements modernes de production et de manipulation.

Cependant, malgré leur potentiel élevé, les MPEC présentent des défis importants sur les plans de la stabilité, de la sécurité et de la précision, particulièrement lorsqu'ils évoluent dans des environnements dynamiques ou encombrés. Des aspects tels que la reconfiguration de la structure, la détection de collisions et l'évitement d'obstacles deviennent alors critiques pour assurer un fonctionnement fiable et sécurisé. Une meilleure compréhension de ces enjeux est donc nécessaire pour optimiser l'utilisation des MPEC dans des contextes industriels variés.

Cette revue de littérature vise à explorer les avancées récentes dans le domaine des mécanismes parallèles entraînés par câbles (MPEC), en mettant en lumière les approches liées à la planification dynamique, la reconfiguration géométrique, la gestion des obstacles et l'amélioration de la stabilité. La section 2.2 détaille la démarche méthodologique adoptée pour conduire cette revue de manière rigoureuse. La section 2.3 présente les progrès en matière de planification et de commande dynamique. La section 2.4 aborde les stratégies de détection, d'évitement et de gestion des obstacles. La section 2.5 se concentre sur l'analyse de la stabilité

et les scénarios de reconfiguration. Ensuite, la section 2.6 traite de la conception, de la modélisation et de l'évaluation des performances. La section 2.7 propose une synthèse critique des contributions identifiées, tandis que la section 2.8 conclut la revue en identifiant les défis restants et les pistes de recherche à explorer.

2.2 DEMARCHE METHODOLOGIQUE DE LA REVUE

Afin d'assurer une démarche rigoureuse et transparente dans la conduite de la revue de littérature, la méthode PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) a été adoptée. Cette approche fournit un cadre structuré permettant de systématiser la sélection, l'analyse et la synthèse des publications scientifiques, tout en garantissant la reproductibilité et la traçabilité des résultats.

La recherche documentaire a été effectuée à partir de plusieurs bases de données scientifiques reconnues telles que IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink et Scopus. Les mots-clés utilisés ont été soigneusement sélectionnés pour couvrir un large spectre de concepts liés aux mécanismes parallèles entraînés par câbles, notamment : Mécanisme, Mechanism, Robot, Parallèle, Parallel, Entraîné, Piloté, Driven, Câbles, Cables, Wires, Reconfigurable, et Reconfiguration.

Le processus de sélection des articles a suivi les étapes recommandées par le protocole PRISMA, incluant :

- La définition des critères d'inclusion et d'exclusion,
- L'identification des articles pertinents,
- La vérification de la pertinence des titres et résumés,
- Et enfin, l'analyse détaillée des textes intégraux retenus.

Cette méthode a permis de constituer une base solide de références scientifiques, pertinente pour aborder de manière exhaustive les problématiques liées à la reconfiguration, la commande, la détection d'obstacles et la performance des MPEC.

2.3 PLANIFICATION ET COMMANDE DYNAMIQUE

Les avancées en planification et commande dynamique ont transformé les MPEC, réduisant le temps de calcul et améliorant la réactivité pour des applications plus précises et dynamiques. Wang et al., 2024 [7], ont proposé une approche novatrice ayant pour but d'améliorer l'adaptabilité des MPEC, en se concentrant sur un nouveau concept de MPEC reconfigurable par point de masse à trois degrés de liberté (DDL) illustré dans la figure 1.

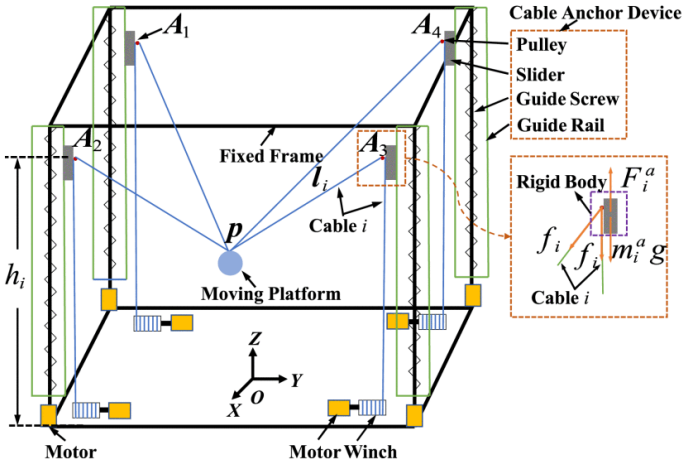


Figure 1. Schéma structurel du MPEC reconfigurable à masse ponctuelle et à trois DDL [6]

© 2024 IEEE. Reproduit avec permission de X. Wang, B. Zhang, W. Shang et S. Cong, "Optimal Reconfiguration Planning of a 3-DOF Point-Mass Cable-Driven Parallel Robot", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 71, no. 3, pp. 2672-2682, 2024.

L'objectif principal est de permettre une reconfiguration efficace de la configuration du robot afin d'optimiser son espace de travail réalisable pour les efforts (*wrench feasible workspace*). La méthodologie adoptée repose sur une méthode de planification optimale de la

reconfiguration, qui utilise un processus d'optimisation à deux niveaux. Tout d'abord, la méthode détermine la séquence et le nombre d'ancres de câble mobiles à ajuster pour atteindre la configuration souhaitée du MPEC reconfigurable. Ensuite, elle réalise une reconfiguration statique (SR) ou dynamique (DR) en fonction des besoins. L'optimisation de la norme L1 (c'est la distance entre la position réelle du robot et la position désirée en calculant la somme des valeurs absolues des différences entre les coordonnées de ces deux points dans chaque dimension de l'espace) est appliquée pour minimiser le nombre d'attaches des câbles mobiles dans la reconfiguration dynamique, ce qui contribue à économiser l'énergie de l'actionneur de manière efficace. Les résultats obtenus à partir des simulations et les expériences appliquées sur un MPEC reconfigurable à masse ponctuelle à trois DDL démontrent la faisabilité de la méthode proposée. Elle permet de déterminer automatiquement quand, quoi et comment les points d'attaches des câbles se déplacent sous des contraintes physiques, tout en minimisant le nombre de points d'attaches des câbles mobiles. Cette réduction contribue à une économie significative de l'énergie utilisée par l'enrouleur. De plus, la méthode s'est avérée efficace même pour des trajectoires qui ne pouvaient pas être suivies par une reconfiguration statique.

De plus Xiong et al., 2022 [8], ont développé une approche de planification de reconfiguration en temps réel pour MPEC reconfigurables qui vise à réduire le temps nécessaire au calcul pour la commande dynamique des mécanismes. L'approche consiste à définir une valeur de reconfiguration pour refléter la valeur d'une configuration du MPEC reconfigurable et fournir un indice de référence pour la planification. Pour évaluer son efficacité, une étude de cas a été menée sur un système avec un effecteur mobile à trois DDL entraîné par sept câbles.

Les résultats de cette étude ont révélé une réduction significative du temps de calcul nécessaire à la planification de la reconfiguration, avec une diminution de plus de 93 %. Cette réduction notable ouvre des perspectives prometteuses pour une utilisation plus efficace de la planification de reconfiguration dans la commande des robots. De plus, l'intégration de la planification de la reconfiguration avec la commande dynamique a permis au système d'exécuter des tâches qui étaient auparavant impossibles pour un robot câblé conventionnel,

ouvrant ainsi de nouvelles possibilités pour des applications plus complexes et améliorant les performances globales des systèmes robotiques parallèles entraînés par des câbles.

2.4 DÉTECTION, ÉVITEMENT ET GESTION DES OBSTACLES

Dans le domaine de la robotique, la détection, l'évitement et la gestion des obstacles constituent un enjeu important pour assurer la navigation sécurisée des robots à travers des environnements complexes. Cette discipline vise à fournir aux robots les capacités nécessaires pour percevoir les obstacles et y réagir, en garantissant ainsi leur sécurité et leur efficacité. C'est dans ce contexte que An et al., 2022 [4] ont proposé un MPEC à points d'attaches mobiles, comme le montre la figure 2. Le point d'attache mobile de chaque câble peut se déplacer tout le long de la voie sur les châssis fixes.

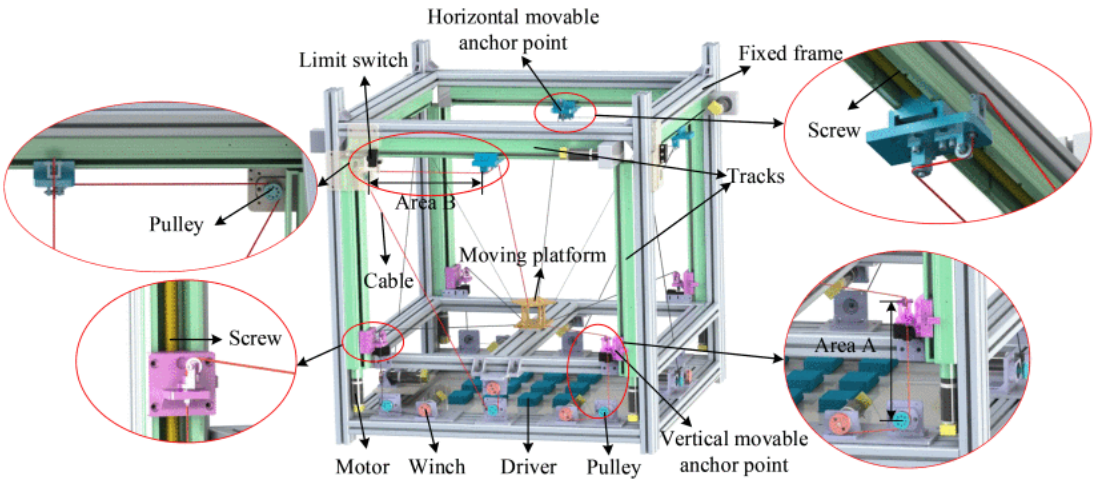


Figure 2. Schéma du robot parallèle à câbles avec points d'ancrage mobiles [8]

© 2022 IEEE. Reproduit avec permission de H. An et al., "A Novel Cable-Driven Parallel Robot With Movable Anchor Points Capable for Obstacle Environments", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 27, no. 6, pp. 5472-5483, 2022.

Ils ont établi la cinématique et la dynamique du MPEC, et ont proposé une méthode de détection de collisions et un algorithme d'évitement d'obstacles. Leurs analyses de simulation

indiquent que l'espace de travail réalisable par le MPEC augmente de 456,06 % par rapport aux MPEC traditionnels dans la même dimension. De plus, le MPEC peut réaliser un évitement d'obstacles sans modifier la trajectoire souhaitée dans différentes conditions lorsqu'il existe plusieurs obstacles statiques, ou à la fois des obstacles mobiles et statiques. De plus, ils ont fabriqué un prototype, composé de huit câbles d'entraînement et de huit points d'attaches mobiles. Les résultats expérimentaux montrent que le MPEC proposé fonctionne bien dans un environnement contenant un certain nombre d'obstacles statiques et/ou mobiles sans aucune collision. D'ailleurs, Khoshbin et al., 2022 [5] ont développé un modèle et une simulation d'un MPEC reconfigurable entièrement contraint permettant la détection et l'évitement des collisions câble-humain. Contrairement aux MPEC classiques où les points d'attaches sont fixes, les points d'attaches sur les rails sont déplaçables (montée et descente sur leurs rails), puis la configuration géométrique est adaptée. La méthode se concentre sur l'estimation de la distance la plus courte entre les obstacles mobiles (membres humains) et tous les câbles. Lorsque le câble et les membres sont sur le point de se heurter, la reconfiguration est présentée en déplaçant le point d'attache du câble sur le rail pour augmenter la distance entre les câbles et les membres humains pendant qu'ils sont tous les deux en mouvement, tout en gardant la trajectoire de l'effecteur final inchangée. D'après les résultats de la simulation, la méthode suggérée permet d'avoir une trajectoire prédéfinie sans collision. En outre, Youssef et Otis, 2020 [3], ont développé un modèle simulé d'un MPEC à six DDL actionné par huit câbles entièrement contraint reconfigurable qui peut éviter les collisions entre deux câbles en temps réel en déplaçant le point d'attache d'un câble sur le cadre pour augmenter la distance la plus courte entre eux, tout en maintenant la trajectoire de l'effecteur initialement prévue inchangée. L'approche a été testée en simulation seulement, en créant une trajectoire de collisions de deux câbles simulés et en détectant et évitant les collisions de câbles à l'aide de la reconfiguration. Grâce à ce modèle, le problème de la cinématique directe est résolu étant donné que les huit points d'attaches se déplacent verticalement sur les rails, tandis que les huit câbles commandent l'effecteur terminal. De plus, le problème de la cinématique inverse est résolu en déterminant les longueurs requises des huit câbles.

2.5 ANALYSE DE STABILITÉ ET SCÉNARIOS DE RECONFIGURATION

L'évaluation de la stabilité et l'exploration des scénarios des reconfigurations sont essentielles pour améliorer la performance et la sécurité des robots parallèles entraînés par des câbles, en garantissant une adaptation efficace à diverses situations opérationnelles. Dans Tan et al., 2024 [9], les auteurs se sont penchés sur l'analyse de la stabilité des RPEC, en se concentrant spécifiquement sur le concept du point de moment zéro (ZMP) lors de la reconfiguration d'un RPEC équipé de trois bases mobiles. L'objectif premier de cette recherche était de maintenir la stabilité du robot en garantissant que le ZMP reste toujours à l'intérieur des limites de support spécifiées. Deux schémas de reconfiguration ont été envisagés pour atteindre cet objectif, le premier impliquant le déplacement de la base mobile et le second consistant à modifier la longueur de la grue. Des modèles cinétostatiques ont été formulés pour chacun de ces schémas afin de calculer les tensions des câbles, permettant ainsi d'ajuster en permanence la position du point de sortie du câble pour maintenir la stabilité du robot. Pour résoudre le problème d'optimisation consistant à déterminer les positions optimales de la base mobile et de la longueur de la grue tout en maintenant l'équilibre du système, une méthodologie appropriée a été élaborée et validée à l'aide d'un dispositif expérimental comprenant un prototype de RPEC équipé de trois grues mobiles (voir figures 3 et 4).

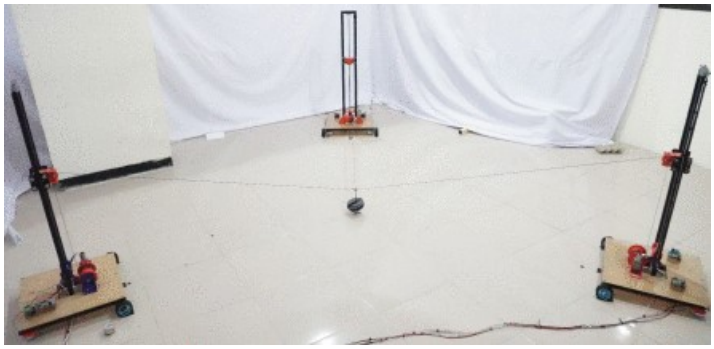


Figure 3. Prototype d’un RPEC reconfigurable à trois bases mobiles [10]

Source: H. Tan et al., "Stability Analysis of a Reconfigurable and Mobile Cable-Driven Parallel Robot", IEEE Access, vol. 12, pp. 14182-14193, 2024.

Licence: CC BY-NC-ND 4.0. © 2024 Les auteurs.

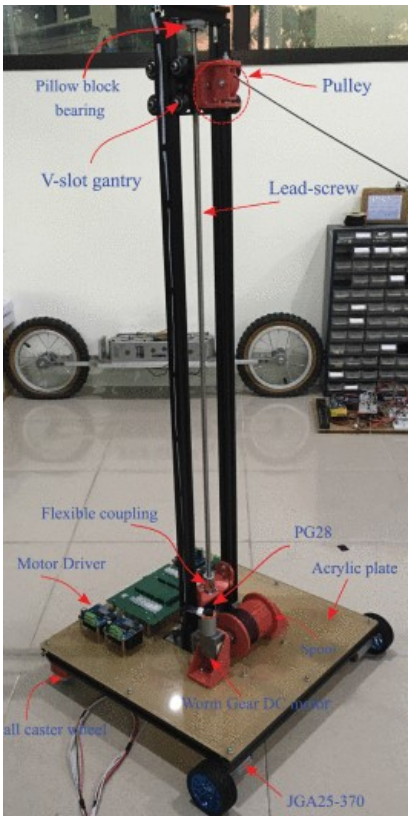


Figure 4. Système de transmission de la base mobile [10]

Source: H. Tan et al., "Stability Analysis of a Reconfigurable and Mobile Cable-Driven Parallel Robot", IEEE Access, vol. 12, pp. 14182-14193, 2024.

Licence: CC BY-NC-ND 4.0. © 2024 Les auteurs.

Les expériences menées ont confirmé l'efficacité des deux schémas de reconfiguration pour empêcher le basculement du robot pendant l'exécution de tâches prescrites. Les résultats expérimentaux ont également mis en évidence que le deuxième schéma de reconfiguration était plus efficace en termes de stabilité, avec des tensions de câble et des erreurs de longueur de câble inférieures par rapport au premier schéma. Cette constatation suggère que la modification de la longueur de la grue constitue une approche plus favorable pour garantir la stabilité mécanique du RPEC mobile. Alors que dans l'étude de Muntashir et Nurahmi, 2022 [10] se concentre sur les scénarios de reconfiguration visant à maintenir la stabilité d'un RPEC équipé de trois bases mobiles. L'étude présente une méthodologie pour ajuster la position de ces bases afin de prévenir le basculement de l'effecteur terminal causé par une tension excessive des câbles. Initialement, l'équilibre dynamique du robot est analysé, et une trajectoire est générée à l'aide d'un polynôme du cinquième degré pour l'effecteur. Ensuite, un concept de point de moment zéro pour stabiliser le robot en reconfigurant la base mobile, ce qui permet de réduire la tension des câbles et donc le risque de basculement. Des résultats de simulation numérique démontrent l'impact significatif de la reconfiguration sur la stabilité du robot. Trois scénarios de reconfiguration sont examinés, montrant que la tension des câbles peut être réduite et que le basculement peut être évité en ajustant les positions des bases mobiles. Les résultats montrent que les configurations géométriques ont permis de maintenir un moment (Newton.m) près de zéro dans des limites sûres, évitant ainsi le basculement. Des distributions de tensions pendant la reconfiguration sont également fournies pour chaque scénario.

2.6 CONCEPTION, MODÉLISATION ET ÉVALUATION DES PERFORMANCES

Cette section explore les avancées dans la conception et l'évaluation des performances des RPEC, mettant en lumière des méthodes innovantes pour optimiser la configuration des câbles et améliorer la résistance aux perturbations externes. Cheng et Lau, 2023 [11] ont introduit une

nouvelle méthode pour déterminer la configuration optimale des attaches de câble pour les RPEC reconfigurable tenant compte des diverses conditions de l'espace de travail. Cette méthode formule les conditions de réalisabilité des efforts (wrench-feasible), de fermeture des efforts (wrench-closure) et d'absence de collisions sous forme de contraintes d'inégalité, en considérant les points d'attache des câbles comme des fonctions polynomiales ou des variables. Elle identifie l'emplacement optimal de l'attache du câble pour minimiser la force du câble ou maximiser le facteur de tension cinématiquement à chaque pose. Différentes techniques d'optimisation, telles que la relaxation de programmation semi-définie et les solveurs d'optimisation basés sur le gradient multivariable, sont utilisées pour résoudre ce problème complexe. Cette recherche a proposé une manière de résoudre le problème de reconfiguration itérative et non linéaire des RPEC reconfigurable. Les résultats montrent que la méthode de Lasserre, utilisée pour résoudre la programmation polynomiale, assure l'optimalité globale de la configuration optimale des câbles. Cette formulation offre des avantages en élargissant considérablement les limites de l'espace de travail et en améliorant les performances du robot. Les RPEC offrent une solution prometteuse pour répondre aux exigences de flexibilité dans les lignes de production. Dans une perspective similaire Duan et al., 2023 [12] ont étudié la reconfiguration et l'évaluation des performances du TBot, un RPEC. L'objectif était de développer des principes de conception pour la reconfiguration du TBot afin de répondre aux demandes de disposition flexibles sur les lignes de production et d'ajustement de l'espace de travail. Les chercheurs ont proposé une méthode d'analyse des performances anti-perturbation basée sur la coque convexe pour évaluer la résistance aux forces externes des RPEC. Ils ont comparé deux configurations de TBots typiques avec des angles de base de 30° et 60°, évaluant la performance en termes de résistance contre les forces et les moments externes. Les résultats ont montré que le TBot avec un angle de base de 60° avait une meilleure performance anti-perturbation. De plus, les chercheurs ont examiné les tendances de performance pendant la reconfiguration du TBot, en analysant l'influence des changements d'angle de base sur le volume de l'espace de travail et la performance anti-

perturbation. Ils ont conclu que pour une meilleure performance, l'angle de base devrait être sélectionné entre 20° et 85°, avec une position de joint universel supérieur près du barycentre.

Trautwein et al., 2023 [13] ont présenté une méthode de planification géométrique pour les RPEC destinés à la reconfiguration en fonctionnement. L'objectif principal est de déterminer une géométrie adéquate pour le robot afin de répondre à des exigences spécifiques pendant son fonctionnement. Pour atteindre cet objectif, l'article propose une approche de prédiction-correction qui comprend deux étapes principales : la prédiction et la correction. Dans la première étape, la prédiction, une estimation initiale de la géométrie du robot est calculée en utilisant une abstraction simple de l'espace de travail. Cette estimation repose sur la différence entre l'état actuel du robot et les exigences spécifiées. La prédiction comprend la détermination de transformations (translation, rotation, mise à l'échelle) appliquées à la géométrie du robot pour obtenir une estimation initiale. Dans la deuxième étape, la correction, les différences restantes entre l'espace de travail du robot et les exigences spécifiées sont éliminées à l'aide d'une optimisation sous contraintes. Cette étape vise à ajuster la géométrie du robot pour garantir qu'il satisfait suffisamment aux exigences spécifiées. L'approche proposée prend en compte les propriétés du robot, telles que les forces de câbles, les vitesses de l'effecteur et les moments appliqués sur l'effecteur, ainsi que les contraintes imposées par les exigences spécifiées. L'article présente également une validation de la méthode proposée à la fois par simulation et par des expériences pratiques. Les résultats montrent que la méthode de prédiction-correction est capable de déterminer rapidement une géométrie adéquate pour le robot, et que cette géométrie est également réalisable dans des scénarios réels. En outre, Poitrimol et Igarashi, 2023 [14], ont exploré les avantages potentiels des RPEC à structure variable (RPEC-SV) dans l'interaction haptique. Cette étude vise à évaluer les avantages potentiels d'un RPEC-SV dans l'interaction haptique, en réponse aux limitations des robots traditionnels dus au nombre élevé de câbles. Pour cela, une nouvelle configuration de RPEC-SV de type SPIDAR a été développée, accompagnée d'une méthode de commande de la force sans capteur à l'effecteur basée sur la mesure du courant du moteur (mesure dans l'articulation). L'approche adoptée consiste à concevoir et à mettre en œuvre le RPEC-SV, en

mettant l'accent sur sa capacité à s'adapter aux mouvements de l'utilisateur tout en réduisant le nombre de câbles nécessaires. Une analyse cinématique a été menée pour évaluer l'espace de travail du dispositif, tandis qu'une méthode de commande basée sur la mesure du courant dans le moteur a été développée pour garantir la précision du retour de force. Le mécanisme doit présenter une faible friction dans l'ensemble de ses composantes afin d'équilibrer adéquatement les efforts sur l'effecteur. Des expériences ont été réalisées pour évaluer les performances du RPEC-SV, notamment en termes d'espace de travail et de retour de force. Les résultats obtenus ont démontré que le RPEC-SV offre un plus grand espace de travail tout en maintenant la précision du retour d'information, tout en réduisant la résistance à la manipulation pour l'utilisateur. De plus, l'utilisation de configurations hybrides n'a apparemment présenté aucun inconvénient. Behroozin et al., 2023 [15] proposent une approche novatrice pour réduire le nombre d'actionneurs tout en maintenant un espace de travail rectangulaire pour les RPEC planaires. Ils remettent en question l'idée selon laquelle chaque câble doit être entraîné par un actionneur distinct, et proposent plutôt un système de transmission permettant à plusieurs câbles d'être entraînés par un seul actionneur. L'objectif principal de leur recherche est de réduire le coût des robots tout en préservant leurs capacités opérationnelles. Les auteurs commencent par analyser la cinématique et la statique des RPEC et développent une matrice de transmission qui relie les couples d'actionneurs aux tensions des câbles. En utilisant cette matrice, ils proposent deux architectures de robots : L'une avec 2 DDL où la matrice de transmission est implémentée dans deux architectures. L'autre avec 3 DDL. Dans les deux cas, le nombre d'actionneurs est inférieur d'un à celui des câbles, ce qui permet de réduire le coût tout en conservant un espace de travail rectangulaire. Ils décrivent également les schémas mécaniques pour la mise en œuvre de ces systèmes de transmission, qui impliquent l'utilisation de poulies pour répartir la puissance des actionneurs parmi les câbles. Les résultats expérimentaux montrent que les robots conçus selon cette approche ont des capacités opérationnelles comparables, voire supérieures, à celles des RPEC traditionnels, avec un nombre d'actionneurs plus élevé. Ils montrent également que les robots peuvent maintenir la

fermeture des forces nécessaires sur toute la plage de mouvement de l’effecteur mobile, ce qui confirme l'efficacité des systèmes de transmission proposés.

D’autre part, Wang et al., 2022 [16] ont examiné les RPEC avec un effecteur mobile reconfigurable, explorant une solution pour combler les lacunes des RPEC traditionnels, qui offrent souvent un espace de travail translationnel généreux mais sont limités en termes de capacité de rotation. Ils ont présenté un RPEC suspendu doté d'un effecteur mobile articulé, utilisant quatre paires de câbles parallèles pour limiter les mouvements redondants. La conception intègre également un réducteur pour amplifier les mouvements de rotation autour de l'axe vertical. La modélisation cinématique et statique détaillée du robot est exposée, suivie d'une analyse d'optimisation multi-objectifs pour déterminer les paramètres dimensionnels optimaux. La reconfiguration de l’effecteur mobile est formulée comme un problème d'optimisation visant à améliorer les performances globales du robot, tandis qu'une approche numérique est adoptée pour calculer l'espace de travail statique sans collision. Enfin, des tests expérimentaux sont menés sur un prototype (figures 5 et 6), confirmant l'efficacité des approches de conception et d'optimisation et mettant en lumière les avantages de l’effecteur mobile reconfigurable articulé pour améliorer la capacité de rotation du robot.

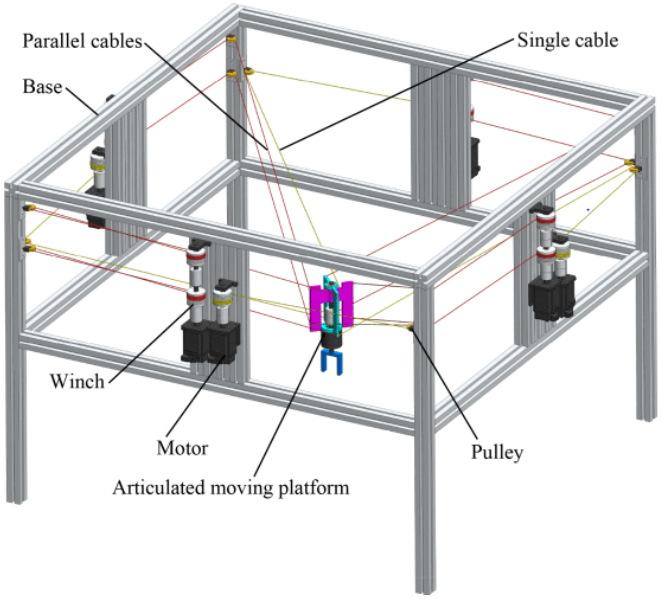


Figure 5. RPEC suspendu doté d'un effecteur mobile articulé à quatre paires de câbles parallèles [17]

© 2022 IEEE. Reproduit avec permission de R. Wang, S. Li, et Y. Li, "A Suspended Cable-Driven Parallel Robot With Articulated Reconfigurable Moving Platform for Schönflies Motions", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 27, no. 6, pp. 5173-5184, 2022.

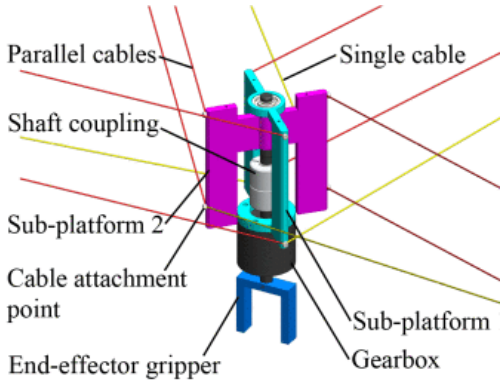


Figure 6. Effecteur mobile articulé [17]

© 2022 IEEE. Reproduit avec permission de R. Wang, S. Li, et Y. Li, "A Suspended Cable-Driven Parallel Robot With Articulated Reconfigurable Moving Platform for Schönflies Motions", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 27, no. 6, pp. 5173-5184, 2022.

Enfin, Zhou et al., 2018 [17] présentent une contribution significative en dévoilant la conception, l'analyse approfondie et les essais d'un nouveau RPEC modulaire et reconfigurable. La conception modulaire est élaborée, faisant appel à des composants optiques standard qui permettent une reconfiguration rapide et efficace du robot. En outre, les modules d'entraînement et de poulie proposés garantissent une capacité d'actionnement fiable et robuste après chaque reconfiguration, assurant ainsi la polyvalence du système. Une analyse cinématique détaillée du RPEC est réalisée, englobant à la fois la cinématique inverse et directe, afin de comprendre pleinement son comportement dynamique dans différents scénarios. Cette analyse est complétée par des validations par simulation, qui reposent sur deux types de trajectoires - une ligne et un cercle - pour couvrir une variété de mouvements possibles. En outre, les prototypes illustrés dans les figures 7 et 8 sont construits pour mettre à l'épreuve les concepts théoriques élaborés. Des expériences préliminaires sont menées, comprenant notamment des tests d'écriture alphabétique et de caractères chinois, démontrant ainsi la capacité pratique du robot à accomplir des tâches complexes et précises. Les résultats de ces expériences confirment les performances robustes du robot, validant ainsi la modélisation cinématique et la conception modulaire du RPEC reconfigurable proposé.

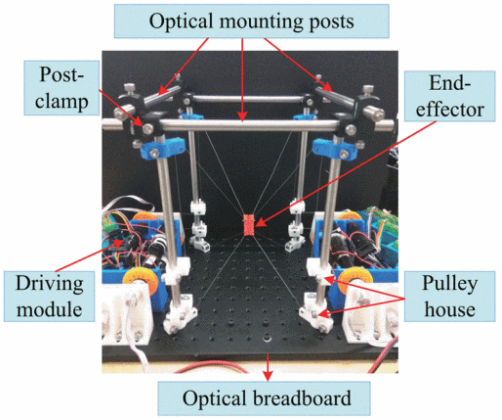


Figure 7. Premier prototype du RPEC [18]

© 2018 IEEE. Reproduit avec permission de L. Zhou et al., "Design and Kinematic Analysis of a Modular Re-Configurable Cable-Driven Parallel Robot", in Proc. 2018 IEEE Int. Conf. on Real-time Computing and Robotics (RCAR), 2018.

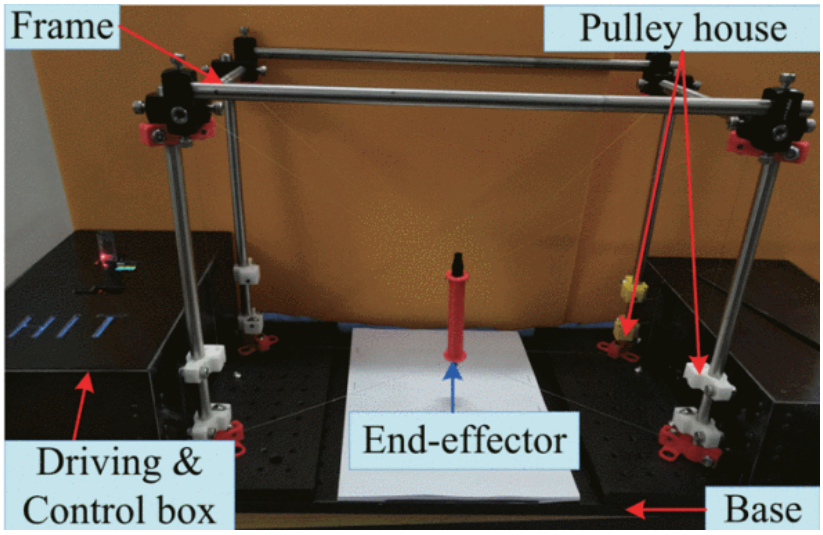


Figure 8. Deuxième prototype du RPEC [18]

© 2018 IEEE. Reproduit avec permission de L. Zhou et al., "Design and Kinematic Analysis of a Modular Re-Configurable Cable-Driven Parallel Robot", in Proc. 2018 IEEE Int. Conf. on Real-time Computing and Robotics (RCAR), 2018.

2.7 CONTRIBUTION

De nombreuses recherches ont exploré des aspects clés des mécanismes parallèles entraînés par câbles, notamment la détection de collisions et l'évitement d'obstacles, la planification de reconfiguration, ainsi que la gestion des interactions entre les câbles et leur environnement (collision câble-humain, câble-câble, câble-obstacle). Le tableau 2 résume les paramètres étudiés dans certaines recherches antérieures et met en évidence les aspects qui n'ont pas encore été pleinement abordés dans la littérature.

Bien que plusieurs études aient exploré la reconfiguration des points d'attache pour optimiser l'espace de travail ou éviter des collisions, aucune ne s'est spécifiquement intéressée à une approche combinant détection des obstacles mobiles et reconfiguration dynamique de la structure portante elle-même. Contrairement aux approches existantes, ce travail propose une stratégie où non seulement les points d'attache des câbles peuvent être ajustés, mais

également la structure portante elle-même peut être déplacée horizontalement. Cette reconfiguration permet d'améliorer la flexibilité du MPEC en lui permettant d'adapter dynamiquement sa géométrie aux changements de l'environnement, sans compromettre la stabilité de la trajectoire de l'effecteur terminal.

Une autre contribution majeure de cette étude réside dans l'analyse détaillée des limites de déplacement de la reconfiguration. Deux scénarios ont été étudiés afin de déterminer jusqu'à quel point la reconfiguration reste efficace et stable. Le premier scénario explore les limites maximales du déplacement de la structure portante et des points d'attache des câbles, tandis que le second analyse une reconfiguration partielle, où seule la structure portante est ajustée. Ces investigations permettent d'établir des contraintes mécaniques et opérationnelles cruciales pour la mise en œuvre d'un MPEC reconfigurable en milieu industriel.

Enfin, cette étude met en évidence l'impact de la reconfiguration sur l'espace de travail du mécanisme. Contrairement aux approches classiques où l'optimisation de l'espace de travail est souvent considérée comme un objectif prioritaire, cette recherche démontre que la reconfiguration peut entraîner une réduction de l'espace de travail dans certaines directions, tout en garantissant un évitement efficace des obstacles. Ces résultats apportent une compréhension approfondie des compromis entre adaptabilité, stabilité et accessibilité de l'effecteur.

En somme, ce mémoire apporte une contribution significative en démontrant qu'une reconfiguration intégrant le déplacement de la structure portante et des points d'attache offre une meilleure flexibilité pour éviter les obstacles dynamiques dans un environnement industriel. Il ouvre ainsi des perspectives pour l'optimisation des stratégies de reconfiguration et leur implémentation dans des contextes réels nécessitant des mécanismes adaptatifs et sécurisés.

TABLEAU 2 : Comparaison entre les travaux de recherche antérieurs et le projet de recherche proposé

Références	DDL	Nombre de câbles	Analyse de l'espace de travail	Contraintes étudiées				Trajectoire initiale préservée	Reconfiguration	Commentaires
				Collision câble-câble	Collision humain-câble	Collision câble-obstacle (fixe/mobile)	Pièces en mouvement			
Présente étude	6	8	Oui	Non	Non	Oui	Groupe enrouleur et servomoteur	Oui	Reconfiguration des points d'attache sur la structure et déplacement de la structure portante	• Applicable à toute architecture ; Mécanisme spatial • La reconfiguration entraîne une modification de l'espace de travail et nécessite une validation des tensions des câbles pour assurer la stabilité et la faisabilité du mécanisme

[3]	6	8	Oui	Oui	Oui	Non	Non défini	Oui	Déplacement vertical des points d'attache sur les rails	• MPEC entièrement contraint pour éviter les collisions entre les câbles
[7]	3	4	Oui	Non	Non	Non	Poulies & curseurs	Non défini	Points d'attaches mobiles et optimisation de leur position	• Planification optimale de la reconfiguration
[8]	3	7	Non	Non	Non	Non	Non défini	Oui	Reconfiguration dynamique avec déplacement des ancrages	• Planification de la reconfiguration en temps réel
[4]	6	8	Oui	Non	Non	Oui	Points d'ancrage	Oui	Points d'ancrage mobiles sur l'effecteur permettant d'éviter les obstacles	• RPEC à points d'ancrage mobiles
[5]	6	8	Non	Oui	Oui	Non	Non défini	Oui	Déplacement des points d'attache pour éviter les collisions humain-câble	• MPEC entièrement contraint, pour éviter les collisions entre les câbles et les humains

2.8 CONCLUSION

La revue de littérature présentée dans ce chapitre a permis de mettre en évidence les principaux axes de recherche liés aux mécanismes parallèles entraînés par câbles (MPEC), notamment en ce qui concerne la planification de la reconfiguration, la gestion des collisions, et l'optimisation des performances. Elle montre que de nombreuses études ont proposé des approches novatrices pour améliorer la flexibilité et la sécurité des MPEC en environnements contraints. Toutefois, une lacune persiste quant à la gestion simultanée de la structure portante et des points d'attache dans le cadre d'un évitement d'obstacles dynamiques.

Le chapitre suivant présentera la méthodologie adoptée pour modéliser et simuler une nouvelle approche de reconfiguration, en précisant les hypothèses, les paramètres étudiés et les outils utilisé

CHAPITRE 3
MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

3.1 INTRODUCTION

L'évolution des systèmes robotiques industriels impose des solutions innovantes capables de s'adapter aux environnements dynamiques et aux contraintes de sécurité. Dans ce contexte, les mécanismes parallèles reconfigurables entraînés par des câbles offrent une grande flexibilité en permettant l'ajustement de leur géométrie afin d'éviter les collisions avec des obstacles fixes ou mobiles. Cette capacité d'adaptation est essentielle pour garantir un fonctionnement sûr et efficace, tout en maintenant la précision de la trajectoire de l'effecteur.

Le projet de recherche présenté dans ce mémoire s'inscrit dans cette problématique en proposant une approche de reconfiguration adaptative du MPEC, où les points d'attache des câbles ainsi que la structure portante peuvent être ajustés dynamiquement. L'objectif principal est d'améliorer l'interaction entre le mécanisme et son environnement en optimisant sa capacité à éviter les obstacles tout en assurant la stabilité et la précision du mouvement. Plus spécifiquement, cette étude vise à analyser l'impact de la reconfiguration sur l'espace de travail et la capacité du mécanisme à éviter les obstacles, à développer un algorithme de reconfiguration permettant d'ajuster dynamiquement les points d'attache en fonction de la détection des obstacles et à valider cette approche par des simulations réalisées sous MATLAB.

À travers la revue de la littérature, deux travaux de recherche particulièrement pertinents ont été identifiés comme bases pour la présente méthodologie. Le premier, de Khoshbin et al., 2022 [5], propose une méthode innovante de reconfiguration des points d'attache le long de rails pour éviter les collisions câble-humain tout en préservant la trajectoire de l'effecteur. Le second, de Youssef et Otis, 2020 [3], présente un modèle de

mécanisme à six DDL reconfigurable, permettant d'éviter les collisions entre câbles en ajustant dynamiquement leurs points d'attache. Ces concepts seront adaptés dans le cadre de cette étude pour concevoir un mécanisme capable de prévenir efficacement les collisions dans des environnements industriels dynamiques, tout en garantissant sécurité et précision.

Par la suite, la méthodologie de recherche proposée pour tester cette hypothèse sera détaillée, en mettant en lumière les différentes étapes ainsi que les outils envisagés afin d'atteindre des résultats significatifs.

Ce chapitre débute par l'hypothèse principale de la recherche (section 3.2), suivie par une description détaillée du mécanisme étudié (section 3.3). La section 3.4 présente les différents concepts de reconfiguration étudiés et justifie le choix du modèle retenu. Le modèle cinématique est détaillée dans la section 3.5, incluant la cinématique directe (3.5.1) et inverse (3.5.2). Les sections suivantes traitent du calcul des tensions des câbles (3.6), des méthodes de détection de collision (3.7) et des stratégies d'évitement de collision (3.8). L'analyse de l'espace de travail des efforts réalisables est abordée dans la section 3.9, suivie par l'étude de la vitesse de déplacement en section 3.10. Enfin, le chapitre se termine par une conclusion en section 3.11, qui résume les éléments clés abordés.

3.2 HYPOTHESE

L'hypothèse fondamentale est : la reconfiguration permet d'éviter les obstacles mobiles, dans le cadre d'un processus de maintenance industrielle, tout en conservant la trajectoire inchangée de l'effecteur et en respectant l'espace de travail du mécanisme.

Cette hypothèse découle d'une réflexion approfondie sur les défis pratiques rencontrés quotidiennement par les opérateurs en maintenance industrielle. Les environnements industriels se distinguent par leur complexité géométrique, intégrant une diversité

d'éléments tels que des machines en fonctionnement, des structures porteuses, des robots mobiles et divers engins. Garantir un espace de travail partagé entre un MPEC et ces différents éléments constitue un défi majeur, auquel la présente recherche ambitionne d'apporter des solutions concrètes.

3.3 DESCRIPTION DU MPEC ÉTUDIÉ

Le mécanisme étudié est un MPREC, composé de huit câbles reliant les enrouleurs à un effecteur mobile ($n = 8\,\text{câbles}$). L'effecteur mobile se déplace dans l'espace à six degrés de liberté ($d = 6\,\text{ddl}$). Les câbles sont raccordés à l'effecteur selon un schéma de croisement de câbles. Cette connexion permet de réduire les collisions câble – câble et d'augmenter la rigidité du MPEC [18], ainsi que d'augmenter l'espace de travail [19], et de maximiser la force ou le couple que les câbles peuvent exercer sur l'effecteur dans certaines directions [20]. Les figures 9 et 10 présentent un aperçu de l'architecture proposée du MPEC.

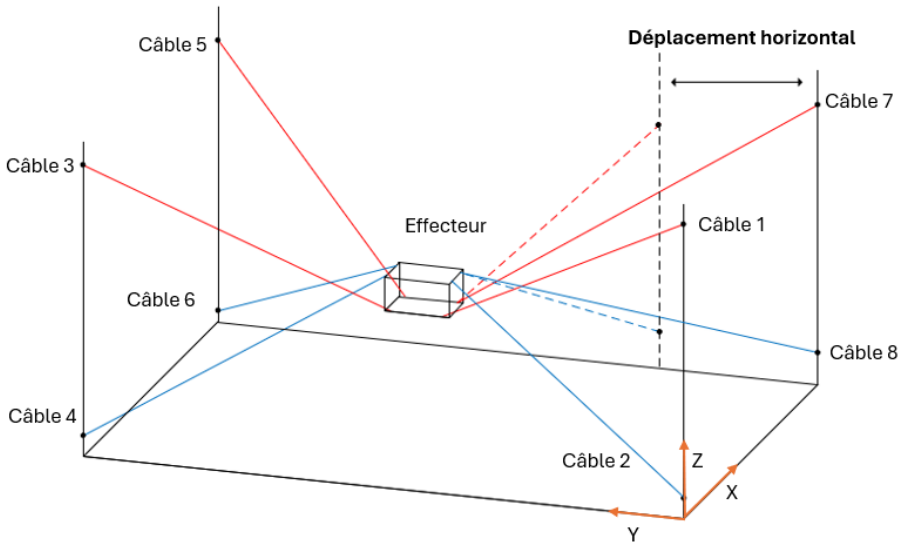


Figure 9. Architecture du MPEC (déplacement horizontal)

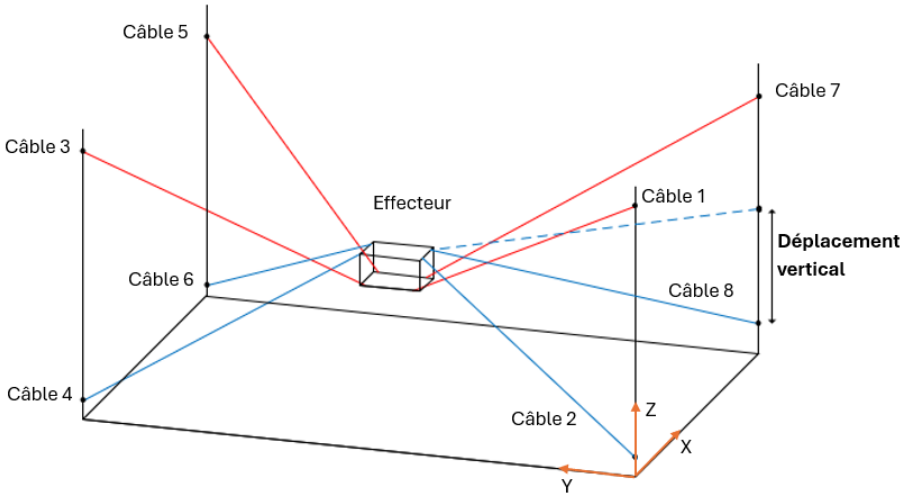


Figure 10. Architecture du MPEC (déplacement vertical)

Comme le montrent les figures 9 et 10, le mécanisme est conçu de manière à permettre un déplacement horizontal de la structure portante des points d'attache, tandis que les points d'attache eux-mêmes peuvent se déplacer verticalement. Cette configuration permet d'éviter les collisions car elle rend le système mécaniquement reconfigurable en fonction de la position des obstacles. Le déplacement horizontal de la structure portante permet d'écarter celle-ci des zones où des obstacles mobiles sont présents, tandis que le déplacement vertical des points d'attache offre une flexibilité supplémentaire pour adapter l'orientation et la tension des câbles. Ainsi, les câbles peuvent contourner les obstacles, et la structure portante peut se repositionner hors de leur trajectoire, réduisant considérablement le risque de collision. La configuration proposée est ainsi utilisée pour détecter et éviter ces collisions, tout en maintenant la trajectoire de l'effecteur final inchangée.

L'étude se concentre sur la manière dont se réalise la reconfiguration, sur les processus de détection et d'évitement des obstacles, ainsi que sur l'impact de la reconfiguration sur la fonctionnalité globale du mécanisme. D'autre part, cette étude repose sur une hypothèse quasi-statique, ce qui signifie que les effets dynamiques dus à l'inertie et aux accélérations rapides ne sont pas pris en compte. Cette simplification permet de se

concentrer sur l'analyse des tensions des câbles et de l'équilibre statique de l'effecteur, mais ne reflète pas le comportement du mécanisme dans des conditions de grande accélération. Cette hypothèse est acceptable dans le cadre de cette étude, car les scénarios simulés ne comportent ni accélérations brusques ni changements rapides de direction. Le mécanisme est supposé évoluer lentement, dans un environnement industriel contrôlé, où les mouvements sont progressifs et les obstacles relativement lents (vitesse moyenne de 0,42 m/s). De plus, l'objectif principal étant de valider la faisabilité de la reconfiguration géométrique et l'équilibre des tensions, une approche statique constitue une première étape pertinente avant d'envisager une modélisation dynamique plus complexe dans des travaux futurs.

Avant de valider la fonctionnalité du mécanisme, il est essentiel de présenter le modèle cinématique, qui servira de base pour décrire les différents paramètres du mécanisme. La section suivante présente le modèle cinématique, lequel établit la relation entre les positions des différents éléments du mécanisme et les longueurs des câbles qui le contrôlent.

3.4 CONCEPTS DE RECONFIGURATION

Dans le cadre de cette étude, la reconfiguration des points d'attache des câbles constitue une solution essentielle pour assurer l'évitement des obstacles mobiles et optimiser l'espace de travail du MPREC. Afin de répondre à cette problématique, trois concepts distincts de reconfiguration ont été développés, chacun présentant des caractéristiques spécifiques en termes de faisabilité mécanique, de flexibilité et d'adaptabilité aux différentes configurations du système.

Le premier concept, illustré à la figure 11, repose sur un mécanisme de translation verticale permettant d'ajuster la hauteur des points d'attache. L'enrouleur est monté sur un guide linéaire vertical, et son déplacement est assuré par un système vis-écrou

actionné par un moteur. Cette solution permet un contrôle précis de la position verticale, garantissant ainsi une meilleure adaptation aux obstacles. Sa robustesse et sa simplicité mécanique constituent des atouts majeurs. Toutefois, ce concept ne permet pas d'ajuster latéralement la position des points d'attache, ce qui réduit son efficacité dans un environnement où les obstacles peuvent se situer à différentes positions horizontales.

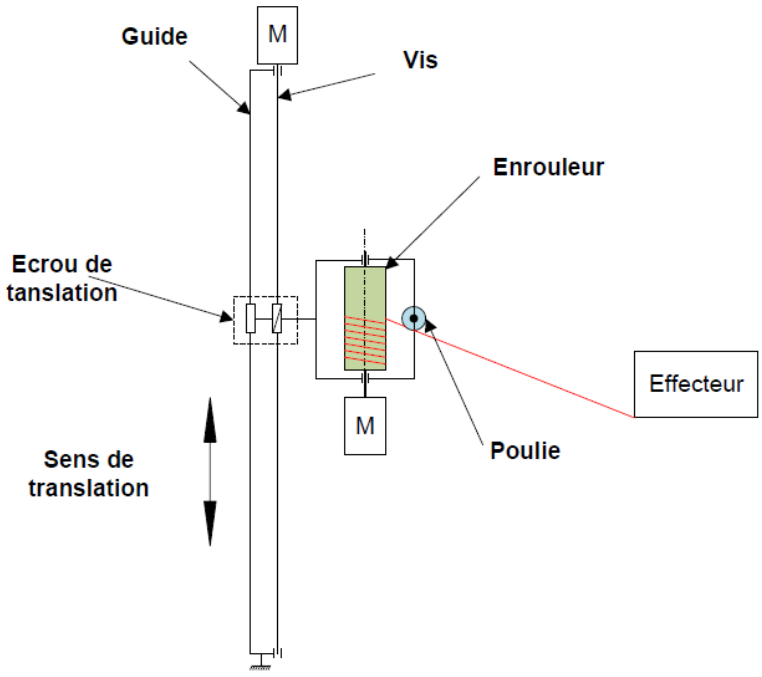


Figure 11. Premier concept de reconfiguration

Le deuxième concept, illustré dans la figure 12, combine une reconfiguration verticale et horizontale afin de maximiser la flexibilité du MPREC face aux obstacles. Le déplacement vertical est réalisé grâce à un écrou de translation se déplaçant le long d'un rail de guidage vertical, actionné par une vis motorisée. De manière similaire, le déplacement horizontal repose sur un second écrou de translation évoluant sur un rail de guidage horizontal, permettant ainsi un ajustement latéral des points d'attache. Ce mécanisme offre une adaptation dynamique en fonction de la position des obstacles, garantissant une plus grande flexibilité du MPREC. L'intégration de ces deux degrés de

liberté permet d'améliorer considérablement l'exploitation de l'espace de travail en assurant une meilleure gestion des positions des câbles. Toutefois, la synchronisation des déplacements vertical et horizontal doit être rigoureuse afin d'éviter des tensions excessives dans les câbles, ce qui nécessite une gestion efficace du contrôle du système.

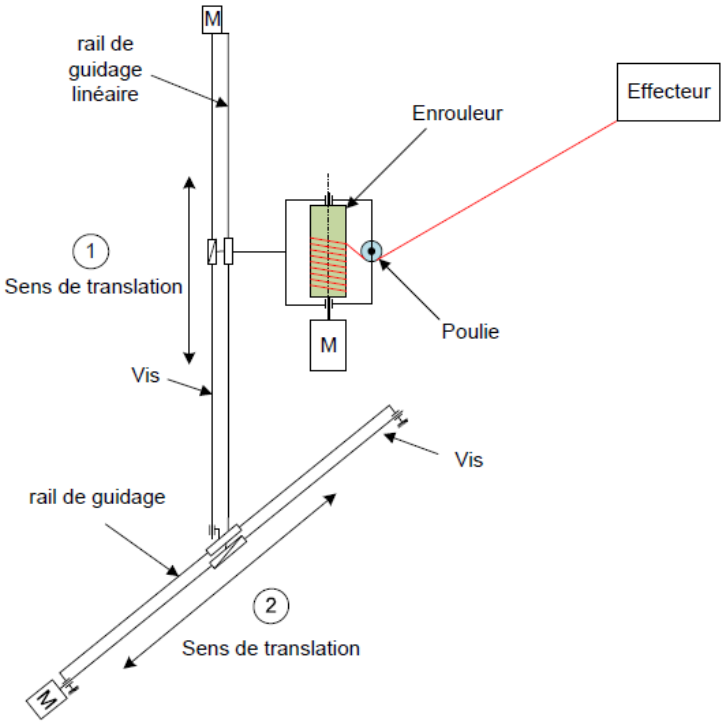


Figure 12. Deuxième concept de reconfiguration

Le troisième concept, illustré dans la figure 13, repose sur une combinaison entre une translation linéaire et un axe de rotation, permettant d'orienter dynamiquement les points d'attache en fonction de l'environnement. Contrairement aux deux premiers concepts, ce mécanisme permet non seulement un déplacement linéaire, mais aussi une adaptation en orientation grâce à un axe de rotation motorisé. Cette approche offre une plus grande liberté d'orientation des câbles, ce qui est particulièrement avantageux pour éviter des obstacles de formes complexes et optimiser la répartition des tensions. Toutefois, la mise en œuvre de ce concept nécessite une synchronisation précise entre

la rotation et la translation, augmentant la complexité du contrôle du mécanisme. La gestion des tensions des câbles devient également plus délicate, nécessitant une régulation avancée pour assurer la stabilité du système.

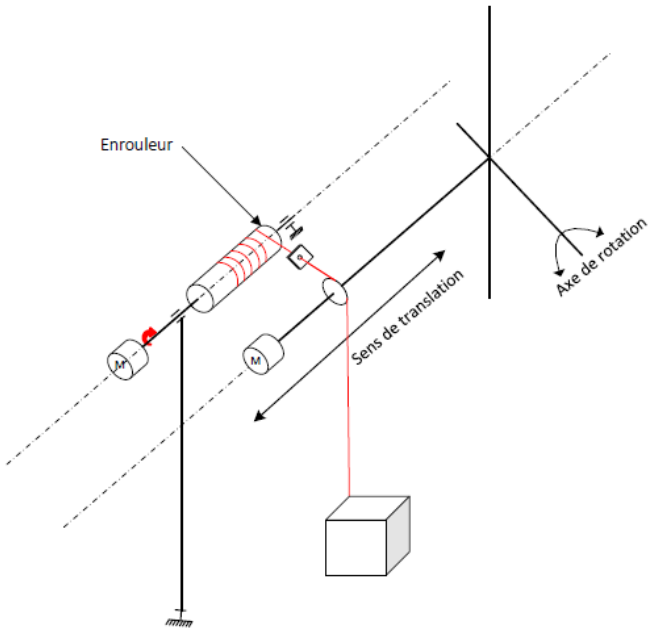


Figure 13. Troisième concept de reconfiguration

Après une analyse approfondie des trois concepts, le concept n°2 a été retenu comme la solution la plus adaptée pour assurer l'évitement des obstacles mobiles. Ce choix repose sur sa capacité à permettre un ajustement dans deux directions, verticale et horizontale, offrant ainsi une meilleure flexibilité au MPREC. Par rapport au concept n°1, il permet une adaptation plus efficace aux obstacles sans se limiter à une seule direction de reconfiguration. En comparaison avec le concept n°3, il présente l'avantage d'une mécanique plus simple et plus facile à intégrer dans le modèle numérique du MPREC, tout en assurant un bon compromis entre simplicité mécanique et capacité d'adaptation aux obstacles. Bien que le concept 3 offrait une flexibilité maximale, sa complexité mécanique rendait son intégration plus difficile. Le concept 2 a donc été privilégié pour sa meilleure faisabilité technique, tout en conservant une flexibilité suffisante pour les scénarios simulés.

3.5 CINÉMATIQUE DIRECTE ET INVERSE

Dans les mécanismes robotiques, la cinématique est l'étude des mouvements sans tenir compte des forces qui les provoquent. Elle permet de décrire la position, l'orientation et la trajectoire d'un effecteur en fonction des paramètres du mécanisme. La figure 14 illustre le schéma cinématique décrivant le système.

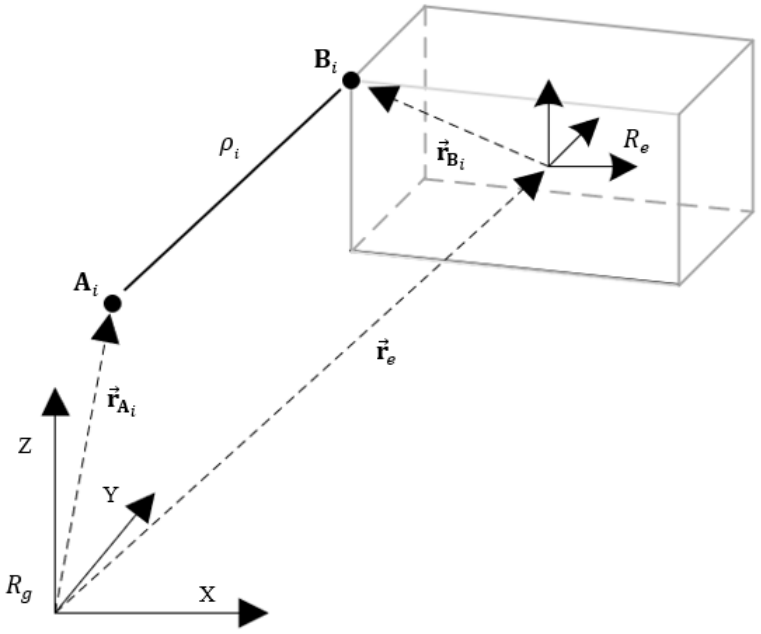


Figure 14. Diagramme cinématique

Un repère global fixe R_g est positionné dans le coin inferieur droite de la structure du MPEC et un repère mobile R_e positionné au centre de l'effecteur.

Le mécanisme est constitué de huit points d'attache A_i, capables de se déplacer verticalement le long de quatre rails (sur l'axe Z), tandis que la structure supportant ces points d'attache peut également se déplacer horizontalement (sur l'axe Y).

Les huit câbles de longueurs ρ_i sont attachés sur les côtés de l'effecteur mobile (en forme de prisme rectangulaire) sur les points d'attache B_i et du coté enrouleur sur les

points d'attache A_i afin de manipuler sa pose (position et orientation) en allongeant ou en raccourcissant les câbles.

Le vecteur $\vec{\mathbf{r}}_{\mathrm{A}_i}$ présente la position du point d'attache A_i dans le repère global fixe R_g.

Le vecteur $\vec{\mathbf{r}}_e$ présente la position du centre de l'effecteur dans le repère global fixe R_g, soit la position du repère R_e par rapport à R_g.

Le vecteur $\vec{\mathbf{r}}_{\mathrm{B}_i}$ présente la position du point d'attache B_i dans le repère global fixe R_e.

3.5.1 CINÉMATIQUE DIRECTE

La cinématique directe permet de déterminer la position et l'orientation de l'effecteur d'un MPEC à partir des longueurs des câbles. Cette étape est essentielle pour le contrôle des mécanismes parallèles entraînés par des câbles, car elle permet de vérifier en temps réel la pose de l'effecteur en fonction des entrées du système. Dans cette étude, la position et l'orientation de l'effecteur sont considérées comme des données d'entrée.

3.5.2 CINÉMATIQUE INVERSE

La cinématique inverse calcule les longueurs des câbles nécessaires pour atteindre une configuration donnée de l'effecteur, un problème généralement simple qui conduit souvent à une solution unique. En se référant à la figure 14, l'équation définissant les longueurs des câbles est formulée comme suit :

$$\rho_i = \left\| \vec{\mathbf{r}}_e + {}^{g}\mathbf{T}_e \, \vec{\mathbf{r}}_{\mathrm{B}_i} - \vec{\mathbf{r}}_{\mathrm{A}_i} \right\|, \text{pour } i = 1 \text{ à } n \tag{1}$$

${}^{g}\mathbf{T}_e$ est la transformation entre le repère R_g et le repère R_e

$$ {}^{g}\mathbf{T}_e = \begin{bmatrix} {}^{g}\mathbf{Q}_e & \vec{\mathbf{r}}_e \\ \mathbf{0}_3^T & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

où ${}^{g}\mathbf{Q}_{e}$ et $\vec{\mathbf{r}}_{e}$ sont respectivement la matrice de rotation entre R_g et R_e, et le vecteur de la position du R_e par rapport à R_g.

L'équation (1) est résolue à l'aide de l'outil d'optimisation de programmation linéaire de MATLAB, en prenant en compte le déplacement vertical des points d'attache ainsi que le déplacement horizontal de la structure supportant des points d'attache. La programmation linéaire consiste à optimiser une fonction linéaire (minimiser ou maximiser), tout en respectant des contraintes également linéaires. Dans MATLAB, cela se fait principalement avec la fonction linprog, qui permet de résoudre des problèmes de minimisation linéaire.

Dans le cadre de la reconfiguration du MPREC, certains points d'attache des câbles sont mobiles. Leur position dépend directement des paramètres de reconfiguration du système. Par exemple :

- Le point d'attache du câble 7 varie selon la position latérale de la structure portante sur l'axe y, ce qui donne :

$$\vec{\mathbf{r}}_{\mathrm{A}_7}(t) = [x_7, y_7(t), z_7]" \tag{3}$$

- Le point d'attache du câble 8 varie selon sa hauteur sur l'axe z , ce qui donne :

$$\vec{\mathbf{r}}_{\mathrm{A}_8}(t) = [x_8, y_8(t), z_8]" \tag{4}$$

Ces expressions permettent d'intégrer la reconfiguration directement dans le modèle cinématique. Cela est essentiel pour mettre à jour la géométrie du système à chaque itération de simulation ou d'optimisation.

3.6 TENSION DES CÂBLES

Dans un MPEC, le calcul des tensions est essentiel pour garantir la stabilité et la précision du système, tout en respectant les contraintes mécaniques et géométriques. Les tensions des câbles sont déterminées en prenant en compte les forces externes appliquées à l'effecteur terminal, ainsi que la configuration géométrique des points d'attache sur la base et l'effecteur. La figure 15 illustre les différentes forces agissant sur l'effecteur, mettant en évidence les tensions exercées par les câbles ainsi que les forces externes appliquées

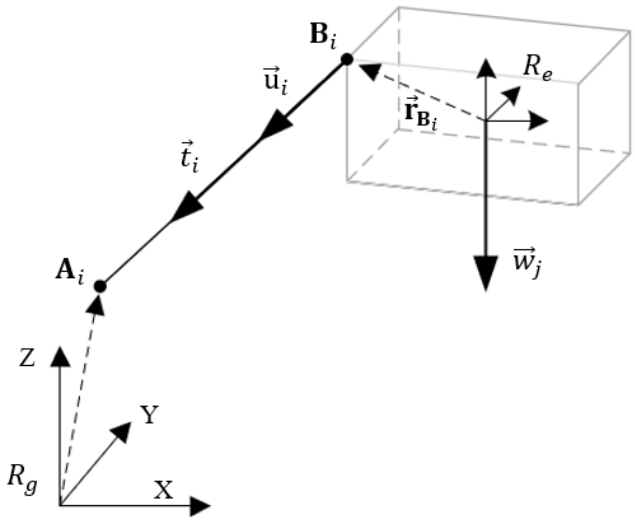


Figure 15. Diagramme des forces agissant sur l'effecteur

Dans le contexte d'un espace de travail des forces réalisables, le problème de distribution des tensions des câbles peut être formulé comme la recherche de toutes les tensions t_i telles que :

$$\widetilde{w}\vec{\mathbf{t}} \quad + \vec{\mathbf{w}} = \vec{0}_6, \text{avec } t_i > 0, \text{pour } i = 1 \text{ à } n \tag{5}$$

où $\widetilde{w}$ est la matrice structure définie par :

$$\widetilde{w} = \begin{bmatrix} \vec{\mathbf{u}}_1 & \vec{\mathbf{u}}_2 & \dots & \vec{\mathbf{u}}_n \\ {}^{g}\mathbf{Q}_e \times \vec{\mathbf{r}}_{\mathrm{B}_1} \times \vec{\mathbf{u}}_1 & {}^{g}\mathbf{Q}_e \times \vec{\mathbf{r}}_{\mathrm{B}_2} \times \vec{\mathbf{u}}_2 & \dots & {}^{g}\mathbf{Q}_e \times \vec{\mathbf{r}}_{\mathrm{B}_n} \times \vec{\mathbf{u}}_n \end{bmatrix} \tag{6}$$

$\vec{\mathrm{t}}$ est la tension des câbles définie par :

$$\vec{\mathbf{t}} = \begin{bmatrix} t_1 \\ \vdots \\ t_8 \end{bmatrix}_{n \times 1} \tag{7}$$

$\vec{\mathbf{w}}$ représente le vecteur contenant la force et le moment résultant appliqués sur l'effecteur, défini par :

$$\vec{\mathbf{w}} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \\ m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix}_{6 \times 1} \tag{8}$$

$\vec{\mathbf{0}}_6$ est un vecteur nul

où f_x, f_y, f_z, m_x, m_y et m_z représentent respectivement les composantes de la force et du moment externes agissant dans les directions X, Y et Z.

Les deux variables $\vec{\mathbf{u}}_i$ et $\vec{\mathbf{r}}_{B_i}$dans la matrice de structure $\widetilde{w}$ dépendent explicitement de la position et de l'orientation de la plateforme mobile, ainsi que de la position du point d'attache A_i. $\vec{\mathbf{u}}_i$ peut être calculé de la manière suivante :

$$\vec{\mathbf{u}}_i = \frac{\vec{\boldsymbol{\rho}}_i}{\rho_i}, \text{pour } i = 1 \text{ à } n \tag{9}$$

Dans cette étude, la condition des forces réalisables est appliquée, et une contrainte supplémentaire est introduite pour relier les valeurs de tension dans les huit câbles de la manière suivante :

$$t_{min} < t_i < t_{max} \tag{10}$$

où t_{min} est la valeur de tension minimale admissible pour garantir que tous les câbles sont tendus, et t_{max} est la valeur de tension maximale admissible en fonction du couple des actionneurs.

L’espace de travail des forces réalisables a été déterminé en supposant que la seule force externe appliquée sur l’effecteur terminal est son poids, soit 25 N. Les tensions dans les câbles doivent respecter des limites comprises entre 20 N (minimum) et 90 N (maximum) pour que l’équilibre soit considéré réalisable. Le fléchissement des câbles n’a pas été pris en compte dans cette étude. Le choix du Dyneema, un matériau léger et résistant, permet de minimiser cet effet de fléchissement, en raison de sa faible élasticité longitudinale malgré sa souplesse apparente. Bien qu’il soit qualifié de flexible pour sa maniabilité, il présente une excellente stabilité dimensionnelle sous tension. De plus, les limites de tension des câbles, fixées entre 20 et 90 N, sont basées sur les capacités du servo utilisé pour la réalisation du modèle réduit en laboratoire. Les contraintes sur les tensions des câbles sont définies par deux bornes : t_{min} et t_{max}. La tension minimale t_{min} est imposée pour éviter que les câbles ne deviennent totalement relâchés, ce qui entraînerait une perte de contrôle ou un comportement instable. Bien que certains modèles tolèrent $t_{min} = 0$, une petite valeur strictement positive est retenue ici (20 N) pour garantir un maintien constant de la tension et prévenir les effets de flottement. La tension maximale t_{max}, fixée à 90 N, reflète la capacité du système d’actionnement à générer et transmettre les efforts nécessaires. Cette limite ne dépend pas uniquement des caractéristiques des actionneurs (ex. couples moteurs), mais également de la configuration mécanique du système, de la longueur des câbles et des frottements. Une formulation plus complète pourrait inclure ces paramètres pour mieux représenter les limites physiques du système de câbles dans son ensemble.

La charge utile de 25 kg représente uniquement la masse de l’effecteur terminal, sans charge supplémentaire.

La distribution des tensions dans les câbles est obtenue à l’aide d’une méthode d’optimisation par programmation linéaire [21]. L’objectif est de déterminer, à chaque instant, une répartition des tensions qui respecte les contraintes mécaniques du système tout en assurant l’équilibre statique de l’effecteur.

Plus précisément, le problème consiste à minimiser la somme des tensions dans les câbles, sous deux contraintes principales :

- Les contraintes d'équilibre statique, qui garantissent que les forces exercées par les câbles compensent la charge appliquée sur l'effecteur.
- Les contraintes de bornes, qui imposent que chaque tension t_i reste comprise entre 20 N et 90 N.

Les tensions t_i sont les variables d'optimisation du problème. Cette formulation garantit une solution physiquement réalisable, optimisée en termes d'effort, et adaptée aux exigences du système.

Dans le cadre de cette étude, la notion de stabilité fait référence à la capacité du mécanisme à maintenir un équilibre statique valide pendant la reconfiguration. Cela signifie qu'à tout instant, les tensions calculées dans les câbles doivent rester comprises dans des bornes admissibles (entre t_{min} et t_{max}) tout en compensant la charge appliquée sur l'effecteur. Un état est considéré comme stable s'il permet de respecter ces conditions sans qu'aucun câble ne devienne détendu ou surchargé. Cette définition est directement liée à la faisabilité des solutions issues de l'optimisation.

La programmation linéaire est choisie car l'équation (5) représente des contraintes linéaires sans fonction objective.

En plus des contraintes de tension appliquées sur les câbles, la reconfiguration du mécanisme influence directement la répartition des efforts. Lorsqu'un déplacement des points d'attache est nécessaire, la mise à jour des tensions devient essentielle afin de garantir la stabilité du MPREC. Ce recalcul des tensions permet d'assurer une adaptation dynamique du système aux nouvelles conditions de fonctionnement.

Les équations (5-10) définissent le modèle mathématique utilisé pour calculer les tensions dans les câbles en fonction de l'équilibre statique du MPREC. Lorsque les points d'attache sont reconfigurés pour éviter un obstacle, la matrice de structure $\widetilde{w}$ est mise à jour afin de refléter la nouvelle géométrie du système.

La résolution du système d'équations permet alors de recalculer les tensions t_i de manière à garantir que l'effecteur reste stable dans la nouvelle configuration. Cette approche permet d'adapter dynamiquement les efforts appliqués aux câbles après chaque déplacement d'un point d'attache. Dans cette étude, la reconfiguration des points d'attache des câbles est réalisée de manière incrémentale, en appliquant un déplacement contrôlé jusqu'à ce que la contrainte d'évitement d'obstacles soit respectée. À chaque itération, la nouvelle configuration est évaluée et les tensions des câbles sont recalculées afin de garantir l'équilibre statique du MPREC. Cette approche permet d'assurer une adaptation fluide du système tout en conservant une tension minimale dans chaque câble.

3.7 DÉTECTION DE COLLISION

Dans cette étude, la méthode pour déterminer la distance minimale entre un obstacle et la structure portante du MPEC repose sur l'analyse de trois distances principales : d_1, d_2 et d_3, représentées par les lignes vertes dans la figure 16.

Ces distances sont calculées à partir des positions relatives entre les bords de l'obstacle et la structure portante des points d'attache des câbles (7 et 8). Chaque distance correspond à une mesure perpendiculaire entre un point de référence de la structure et l'un des bords de l'obstacle.

Dans les simulations, l'obstacle mobile est modélisé comme un cube rigide se déplaçant linéairement selon une trajectoire diagonale dans le plan XY. L'analyse des données de position, présentées en Annexe 2, montre une progression de 0,45 m sur les axes X et Y sur une période de 1,5 seconde, ce qui correspond à une vitesse moyenne d'environ 0,42 m/s. Cette valeur a été choisie pour représenter un déplacement typique d'un obstacle humain ou robotisé dans un environnement industriel. Elle permet de tester la

capacité du mécanisme à détecter et éviter l'obstacle tout en respectant les délais de réaction imposés par la reconfiguration du système.

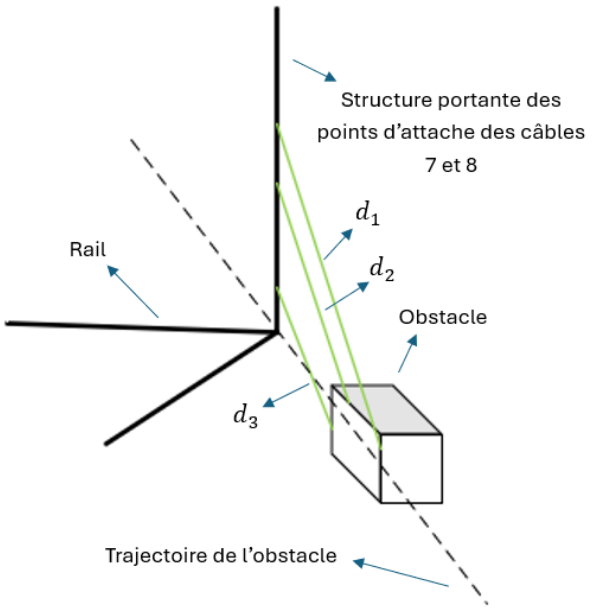


Figure 16. Distance entre l'obstacle et la structure du MPEC

Un seuil de 1 mètre est défini comme critère pour détecter une collision potentielle. Si la distance minimale calculée est inférieure à ce seuil, une reconfiguration est déclenchée pour déplacer la structure portante et éviter toute collision. Ce seuil repose sur une hypothèse liée à la vitesse de freinage du mécanisme et aux simplifications adoptées dans la simulation. Cependant, cette valeur n'a pas été optimisée ni validée en fonction des normes de sécurité, et une étude plus approfondie serait nécessaire pour en évaluer la pertinence.

Cette méthode s'appuie sur les travaux de Khoshbin et al. [5], qui ont décrit une approche similaire pour éviter les collisions dans les MPEC impliquant des interactions câble-humain en explorant les principes fondamentaux du calcul des distances perpendiculaires pour identifier les risques de collision. Ces principes ont été adaptés et appliqués au contexte de cette étude pour intégrer des obstacles mobiles dans l'espace de travail du MPEC.

La détection et la gestion des collisions ont été simulées dans MATLAB en suivant l'algorithme illustré dans la figure 17. Lorsqu'une collision potentielle est détectée, l'algorithme ajuste dynamiquement la position des points d'attache sur les rails à l'aide d'un pas scalaire de 0,1 m.

Cette procédure garantit une séparation sécurisée entre la structure portante et les obstacles, tout en maintenant la trajectoire de l'effecteur terminal inchangée, assurant ainsi la continuité et la sécurité des opérations.

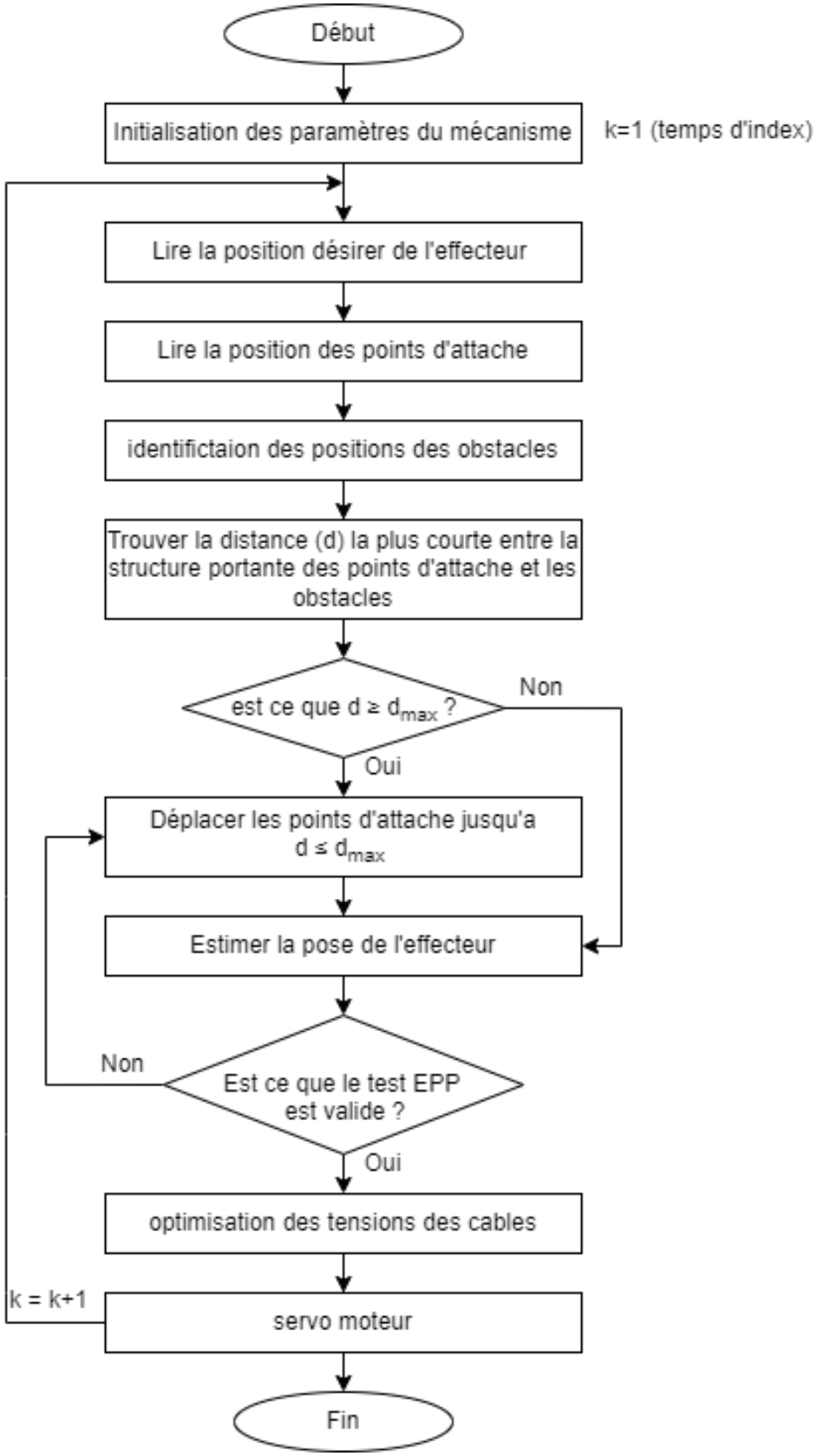


Figure 17. Algorithme d'évitement de collision

3.8 ÉVITEMENT DE COLLISION

Une fois la cinématique inverse résolue et la distance minimale entre l'obstacle et la structure supportant les points d'attache calculée, la structure est repositionnée pour éviter toute collision avec l'obstacle, tout en préservant la trajectoire de l'effecteur terminal.

La détermination de cette distance minimale repose sur les positions respectives de la structure et de l'obstacle, qui sont calculées à partir des coordonnées des points d'attache. En cas de risque de collision, identifié par une distance d inférieure à un seuil prédéfini, la structure se déplace latéralement (vers la gauche ou la droite). La position du point d'attache $\mathbf{A}_i$ sur le rail est alors ajustée d'un pas scalaire Δq, fixé dans cette étude à 0,1 m.

La nouvelle position du point d'attache est mise à jour à l'aide de la formule suivante :

$$\left(\vec{\mathbf{r}}_{\mathrm{A}_{i,y}}\right)_{k+1} = \left(\vec{\mathbf{r}}_{\mathrm{A}_{i,y}}\right)_{k} + \Delta q, \text{avec } \left(\vec{\mathbf{r}}_{\mathrm{A}_{i,y}}\right)_{k} = (Y_i)_k \tag{11}$$

k : temps d'échantillonnage actuel

$k+1$: prochain temps d'échantillonnage

Y_i : position des points d'attache en direction Y sur le rail

De même, le point d'attache A_i situer en bas du mécanisme se déplace du bas vers le haut. Ce mouvement est défini par l'équation suivante :

$$\left(\vec{\mathbf{r}}_{\mathrm{A}_{i,z}}\right)_{k+1} = \left(\vec{\mathbf{r}}_{\mathrm{A}_{i,z}}\right)_{k} + \Delta q, \text{avec } \left(\vec{\mathbf{r}}_{\mathrm{A}_{i,z}}\right)_{k} = (Z_i)_k \tag{12}$$

k : temps d'échantillonnage actuel

$k+1$: prochain temps d'échantillonnage

Z_i : position des points d'attache en direction Z sur le rail

Ces déplacements sont intégrés dans le modèle à travers les expressions des positions des points d'attache, définies comme fonctions des variables de reconfiguration. Cela

permet de recalculer dynamiquement les longueurs de câbles et les tensions à chaque étape.

L'objectif du déplacement du point d'attache vers le haut est de prévenir la sortie de l'effecteur de l'espace de travail. Ce phénomène sera détaillé dans la section suivante.

L'idée de reconfiguration pour éviter les collisions entre la structure portante des points d'attache des câbles et l'obstacle mobile, simulée dans MATLAB, est présentée dans la section suivante.

3.9 ESPACE DE TRAVAIL DES EFFORTS RÉALISABLES

L'étude de l'espace de travail est une étape clé dans la conception d'un MPEC. Elle permet d'évaluer la capacité du système à réaliser des mouvements en translation et en rotation, tout en garantissant l'exécution efficace des tâches assignées. Cet espace est défini comme l'ensemble des positions et orientations accessibles par l'effecteur terminal, sous la contrainte que tous les torseurs appliqués soient équilibrés par des tensions strictement positives dans les câbles.

Duan et al., 2014 [22], ont proposé une catégorisation en cinq grandes classes :

- Espace de travail en équilibre statique : regroupe les configurations où l'effecteur se stabilise sous l'effet exclusif de la gravité, sans influence de forces externes supplémentaires, tout en maintenant une tension positive dans les câbles.
- Espace de fermeture des efforts (Wrench Closure Workspace - WCW) : représente les poses où l'effecteur peut générer et équilibrer toute force ou moment externe en maintenant des tensions positives dans les câbles.
- Espace des efforts réalisable (Wrench Feasible Workspace - WFW) : inclut l'ensemble des configurations où toutes les forces appliquées sont compensées par

des tensions dans les câbles respectant des limites minimales et maximales admissibles, garantissant ainsi un fonctionnement optimal du mécanisme.

- Espace de travail dynamique : prend en compte les effets d'inertie et les accélérations du système, offrant ainsi une analyse plus réaliste du comportement du MPEC en conditions dynamiques.
- Espace de travail sans collision : regroupe les configurations où l'effecteur et les câbles évoluent sans entrer en contact avec des obstacles fixes ou mobiles, un critère essentiel pour assurer la sécurité et la fiabilité du système.

Dans le cadre de cette étude, l'analyse se focalise sur l'espace des efforts réalisables, qui permet d'évaluer la capacité du mécanisme à fonctionner tout en respectant les contraintes de tension des câbles et en équilibrant les torseurs appliqués sur l'effecteur. Cet espace est défini comme l'ensemble des poses accessibles par l'effecteur, où les câbles restent en tension positive dans une plage admissible, tout en assurant l'équilibre des forces et moments externes [21]. L'étude de cet espace est essentielle pour la configuration du MPEC, garantir sa stabilité et améliorer son interaction avec son environnement, notamment en tenant compte des contraintes opérationnelles et de sécurité.

Dans cette étude, l'espace de travail des efforts réalisables est cartographié en respectant les équations (5) et (10). L'effort externe est fixé à 25 N dans la direction négative de l'axe Z, représentant le poids de l'effecteur. Les tensions minimales et maximales autorisées dans les huit câbles ont été fixées respectivement à 20 N et 90 N.

L'espace de travail du MPREC est discrétisé à l'aide d'une grille tridimensionnelle avec un pas de 0.5 m dans les directions X, Y et Z. Chaque point de cette grille est évalué individuellement afin de vérifier s'il appartient ou non à l'espace de travail réalisable, en fonction des contraintes de tension des câbles et de l'équilibre des forces appliquées sur l'effecteur.

Une fois les points réalisables identifiés, la frontière de l'espace de travail est déterminée à l'aide de l'algorithme d'enveloppe convexe (boundary () sous MATLAB). Cet algorithme construit une surface englobant l'ensemble des points valides, assurant ainsi une représentation précise de l'espace de travail tout en limitant les erreurs liées à l'approximation géométrique. L'espace de travail réalisable sera donc cartographié pour chaque configuration, incluant les positions des points d'attache et de la structure portante. Toutefois, cette étude se limite à la présentation des espaces de travail initial et final afin de permettre une comparaison entre ces deux configurations.

3.10 VITESSE DE DÉPLACEMENT

Dans les systèmes robotiques, la planification de trajectoire est un élément clé pour assurer des déplacements fluides et précis, tout en minimisant les effets indésirables tels que les vibrations et les chocs mécaniques. Dans le cadre de cette étude, la trajectoire LSPB (Linear Segments with Parabolic Blends) a été initialement étudiée comme une méthode permettant d'améliorer la transition entre différentes configurations des points d'attache du MPREC.

Cette approche repose sur une trajectoire à profil de vitesse trapézoïdal, caractérisée par trois phases distinctes : une montée progressive en accélération, un déplacement à vitesse constante et une décélération contrôlée avant l'arrêt. Cette stratégie permet de limiter les variations brusques de vitesse, ce qui présente plusieurs avantages :

- Un contrôle précis de la vitesse, évitant les à-coups brusques pouvant affecter la stabilité du mécanisme.
- Une réduction des vibrations, particulièrement bénéfique pour les mécanismes câblés afin d'assurer une transition fluide entre les différentes phases du mouvement.
- Une meilleure gestion des contraintes dynamiques, ce qui améliore la durabilité du système en limitant les surcharges mécaniques.

Dans cette section, les équations fondamentales qui régissent la planification de la trajectoire LSPB sont décrites, avec les différentes phases du mouvement illustrées dans la figure 18.

La trajectoire se décompose en trois parties :

- $t_0 \rightarrow t_a$: Accélération initiale. Cette phase est caractérisée par une augmentation progressive de la vitesse, modélisée par un polynôme quadratique. Cela permet de générer une rampe de vitesse linéaire, ce qui est essentiel pour éviter les accélérations brusques susceptibles de causer des vibrations ou des instabilités.
- $t_{\mathrm{a}} \rightarrow t_b$: Mouvement à vitesse constante. Pendant cette phase, la vitesse reste constante. Le mouvement est représenté par une fonction linéaire, garantissant une transition stable et uniforme sans variation de vitesse. Cette phase est cruciale pour accomplir les tâches nécessitant un déplacement régulier et précis.
- $t_b \rightarrow t_f$: Décélération progressive. Cette dernière phase est symétrique à la première et consiste en une réduction progressive de la vitesse jusqu'à un arrêt complet. Elle est également modélisée par un polynôme quadratique, permettant une rampe de vitesse linéaire décroissante.

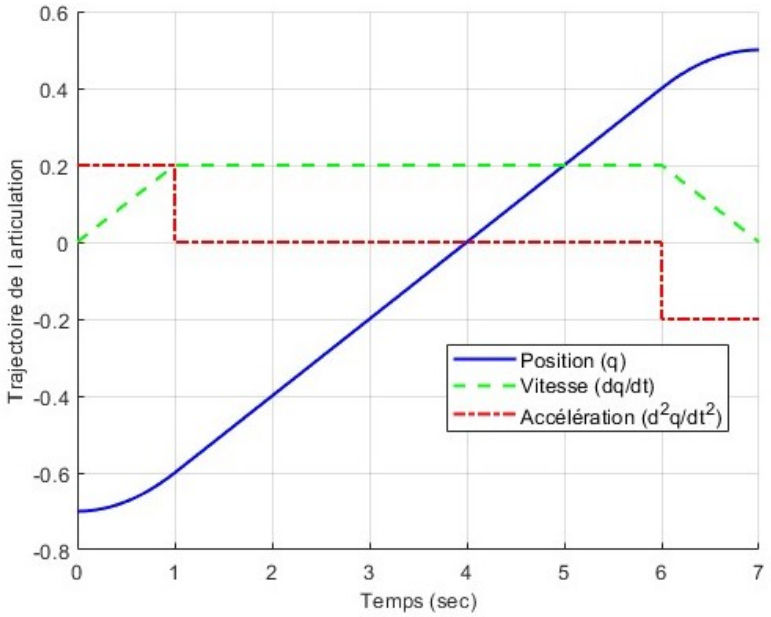


Figure 18. Temps de transition pour la trajectoire LSPB

Première phase : Accélération initiale ($t_0 < t < t_a$)

La trajectoire, la vitesse et l'accélération sont définies comme suit :

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$$

$$\dot{q}(t) = a_1 + 2a_2 t$$

$$\ddot{q}(t) = 2a_2$$

En imposant les conditions initiales $q(t_0) = q_0$, $\dot{q}(t_0) = 0$, et $\ddot{q}(t_0) = \ddot{q}_0$ les coefficients sont déterminés :

- $a_0 = q_0$
- $a_1 = 0$
- $a_2 = \frac{\ddot{q}_0}{2}$

La trajectoire, la vitesse et l'accélération deviennent donc :

$$q(t) = q_0 + \frac{\ddot{q}_0}{2} t^2 \qquad (13)$$

$$\dot{q}(t) = \ddot{q}_0 t \tag{14}$$

$$\ddot{q}(t) = \ddot{q}_0 \tag{15}$$

Deuxième phase : Vitesse constante ($t_a \leq t \leq t_b$)

Pendant cette phase, la vitesse est constante et égale à V.. Les équations sont :

$$q(t) = a_0 + a_1 t$$

$$\dot{q}(t) = a_1 = V$$

$$\ddot{q}(t) = 0$$

Avec les conditions $q(t_a) = q_a$, $\dot{q}(t_a) = V$, et $\ddot{q}(t_a) = 0$, les coefficients deviennent :

- $a_0 = q_a - V t_a$

Ainsi, pour cette phase :

$$q(t) = q_a - V t_a + V t \tag{16}$$

$$\dot{q}(t) = V \tag{17}$$

$$\ddot{q}(t) = 0 \tag{18}$$

Troisième phase : Décélération progressive ($t_b < t < t_f$)

La trajectoire et les dérivées sont modélisées par :

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$$

$$\dot{q}(t) = a_1 + 2a_2 t$$

$$\ddot{q}(t) = 2a_2$$

Avec les conditions $q(t_f) = q_f$, $\dot{q}(t_f) = 0$, et $\ddot{q}(t_f) = \ddot{q}_f$, les coefficients sont calculés :

- $a_0 = q_f + \frac{\ddot{q}_f}{2} {t_f}^2$
- $a_1 = -\ddot{q}_f t_f$
- $a_2 = \frac{\ddot{q}_f}{2}$

Ainsi :

$$q(t) = q_f + \frac{\ddot{q}_f}{2} {t_f}^2 - \ddot{q}_f t_f t + \frac{\ddot{q}_f}{2} t^2 \tag{19}$$

$$\dot{q}(t) = -\ddot{q}_f t_f + \ddot{q}_f t \tag{20}$$

$$\ddot{q}(t) = \ddot{q}_f \tag{21}$$

Le tableau ci-dessous regroupe les équations de chaque courbe relative à chaque intervalle de temps :

TABLEAU 3 : Équations par intervalle de temps

Intervalle de temps	**Trajectoire** $\boldsymbol{q(t)}$	**Vitesse** $\boldsymbol{\dot{q}(t)}$	**Accélération** $\boldsymbol{\ddot{q}(t)}$
$t_0 < t < t_a$	$q(t) = q_0 + \frac{\ddot{q}_0}{2} t^2$	$\dot{q}(t) = \ddot{q}_0 t$	$\ddot{q}(t) = \ddot{q}_0$
$t_a \leq t \leq t_b$	$q(t) = q_a - V t_a + V t$	$\dot{q}(t) = V$	$\ddot{q}(t) = 0$
$t_b < t < t_f$	$q(t) = q_f + \frac{\ddot{q}_f}{2} {t_f}^2 - \ddot{q}_f t_f t + \frac{\ddot{q}_f}{2} t^2$	$\dot{q}(t) = -\ddot{q}_f t_f + \ddot{q}_f t$	$\ddot{q}(t) = \ddot{q}_f$

Bien que l'approche LSPB présente plusieurs avantages théoriques, son implémentation dans le modèle numérique s'est révélée complexe et problématique. Plusieurs tentatives ont été effectuées pour intégrer cette méthode dans le cadre de la reconfiguration des points d'attache du MPREC, mais plusieurs contraintes ont empêché son application effective.

L'une des principales difficultés concernait la synchronisation du modèle LSPB avec la logique de reconfiguration du MPREC. Contrairement à un système où la trajectoire peut être planifiée indépendamment, ici la reconfiguration est directement influencée par la position des obstacles mobiles, dont les déplacements sont imprévisibles. Cette variabilité a rendu difficile l'application d'une planification continue basée sur LSPB.

Par ailleurs, l'intégration de cette trajectoire dans l'algorithme de simulation nécessitait une gestion des transitions et une mise à jour dynamique des tensions des câbles. Les

tests ont montré que l'application du LSPB introduisait des erreurs cumulatives dans le calcul des nouvelles positions des points d'attache, affectant la précision des ajustements et pouvant mener à des incohérences dans la simulation.

Face à ces limitations, une solution alternative plus adaptée au modèle a été adoptée. Plutôt que d'utiliser un profil de trajectoire continue, il a été décidé d'opter pour un déplacement instantané des points d'attache, réalisé par incréments de 0.1 m à chaque fois que l'obstacle mobile atteint une distance critique de 1 m par rapport à la structure portante du mécanisme.

Ce choix a été privilégié en raison de sa simplicité d'implémentation, évitant les recalculs complexes de trajectoire. Il permet une réponse immédiate face aux obstacles, garantissant une reconfiguration réactive et efficace. Il assure également une meilleure fiabilité du modèle, en réduisant les erreurs d'approximation dans le calcul des nouvelles positions des points d'attache. Bien que cette approche repose sur des déplacements discrets plutôt que progressifs, elle s'est révélée plus efficace dans le cadre du modèle numérique utilisé pour cette étude.

Toutefois, la trajectoire LSPB reste une solution pertinente et pourrait être intégrée dans d'autres modèles numériques où la planification anticipée des déplacements est possible. Son application pourrait être particulièrement intéressante dans des systèmes où les points d'attache peuvent suivre une trajectoire préprogrammée, plutôt qu'une adaptation instantanée aux obstacles mobiles.

Ainsi, malgré son potentiel, l'approche LSPB n'a pas été retenue dans cette étude en raison des contraintes d'implémentation. Le déplacement par pas de 0.1 m a été adopté comme solution finale, garantissant une exécution stable et une réponse immédiate aux obstacles.

3.11 CONCLUSION

Ce chapitre a présenté la méthodologie adoptée pour concevoir, modéliser et analyser le MPREC. L'hypothèse centrale de l'étude a été posée, selon laquelle la reconfiguration permet d'éviter les obstacles tout en conservant la trajectoire de l'effecteur et en respectant les contraintes de l'espace de travail.

Ensuite, une description détaillée du mécanisme étudié a été fournie, mettant en lumière les spécificités de sa configuration reconfigurable et ses avantages en termes de flexibilité et d'efficacité. Trois concepts de reconfiguration des points d'attache ont été analysés, et l'approche combinant un déplacement vertical et horizontal a été retenue comme la plus adaptée aux exigences du système.

Le modèle cinématique a été détaillé en distinguant la cinématique directe et inverse, permettant de calculer les poses de l'effecteur et les longueurs de câbles requises pour assurer un contrôle précis du mécanisme. Par ailleurs, l'analyse des tensions dans les câbles a été réalisée afin de garantir la stabilité du MPREC et d'assurer que toutes les forces appliquées respectent les contraintes mécaniques du système.

L'étude des méthodes de détection et d'évitement des collisions a permis d'illustrer comment le MPREC s'adapte dynamiquement aux obstacles mobiles présents dans son environnement. Initialement, une planification de trajectoire basée sur le profil de vitesse trapézoïdal (LSPB) a été étudiée pour assurer une transition fluide des points d'attache. Cependant, en raison des difficultés d'implémentation dans le modèle numérique, cette approche n'a pas été retenue et a été remplacée par un déplacement incrémental par pas de 0.1 m dès que la distance entre l'obstacle et la structure portante atteint un seuil critique de 1 m.

Enfin, l'analyse de l'espace de travail des efforts réalisables a permis de cartographier les limites opérationnelles du système et d'évaluer l'impact de la reconfiguration sur la faisabilité des mouvements du MPREC. L'étude de la vitesse de déplacement a

également été abordée afin de s’assurer que la reconfiguration respecte les contraintes dynamiques du système.

Dans le chapitre suivant, les résultats obtenus à partir des simulations seront présentés et discutés. Ces résultats permettront d’évaluer la performance du MPREC en termes de gestion des tensions des câbles, de maintien de l’espace de travail et d’efficacité des stratégies d’évitement des obstacles mises en place. Une attention particulière sera portée à l’analyse de la solution retenue pour la reconfiguration, en comparant ses performances aux exigences initiales du système.

CHAPITRE 4
RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 INTRODUCTION

Afin de valider la méthodologie de recherche et d'évaluer la capacité du MPREC à détecter et éviter les collisions, une série de simulations représentatives des conditions d'exploitation du système a été menée. Ces simulations, réalisées sur MATLAB, permettent de tester l'efficacité de L'approche de reconfiguration face à un obstacle mobile se déplaçant à proximité de la structure portante des points d'attache des câbles 7 et 8.

Dans un premier temps, un scénario de collision potentielle a été simulé, dans lequel un obstacle mobile se rapproche progressivement de la structure portante, risquant d'interférer avec les câbles. Cette simulation a permis d'analyser deux aspects fondamentaux :

- La détection de l'obstacle à l'aide des algorithmes mis en place, afin d'identifier sa position et d'anticiper la collision.
- L'évitement de l'obstacle en appliquant une stratégie de reconfiguration du MPREC. Cette stratégie consiste à déplacer la structure portante des points d'attache des câbles 7 et 8 sur l'axe Y, tout en ajustant la position du câble 8 sur l'axe Z, afin d'augmenter la distance entre les câbles/la structure et l'obstacle sans compromettre la trajectoire de l'effecteur.

Dans un second temps, deux simulations complémentaires ont été réalisées afin d'étudier les limites de déplacement de la reconfiguration et d'évaluer la flexibilité du système.

- Première simulation : Analyse des limites maximales de reconfiguration, en déplaçant à la fois la structure portante des câbles 7 et 8 et le point d'attache du câble 8 sur l'axe Z. L'objectif est de déterminer jusqu'à quel point la reconfiguration permet d'éviter l'obstacle sans compromettre la stabilité du système.
- Deuxième simulation : Étude d'un cas où seule la structure portante des câbles 7 et 8 est déplacée, sans modifier la position du point d'attache du câble 8 sur l'axe Z. Cette simulation permet d'évaluer dans quelle mesure une reconfiguration partielle suffit à garantir un évitement efficace.

Les résultats obtenus seront analysés en détail afin de mettre en évidence l'impact des différentes stratégies de reconfiguration sur la performance du mécanisme, notamment en termes de stabilité, d'accessibilité de l'espace de travail et de précision de la trajectoire de l'effecteur. Ces analyses permettront également de dégager des recommandations pour optimiser les capacités d'adaptation du MPREC dans un environnement dynamique.

4.2 ÉTUDE D'UN CAS DE COLLISION AVEC UN OBSTACLE MOBILE

La figure 19 illustre le scénario simulé pour étudier un cas de collision potentielle avec un obstacle mobile. Dans cette simulation, un cube représentant un obstacle mobile se déplace progressivement depuis un point de départ jusqu'à un point d'arrivée, à proximité de la structure portante des points d'attache des câbles 7 et 8. Ce déplacement présente un risque de collision avec les câbles, en particulier le câble 8, qui doit rester tendu pour garantir le fonctionnement stable du mécanisme.

Le système est configuré avec un ensemble de câbles répartis entre deux hauteurs différentes :

- Câbles 1, 3, 5, 7 : fixés à une hauteur de 7,5 mètres.

- Câbles 2, 4, 6, 8 : fixés à une hauteur de 0,5 mètre.

L'obstacle, en suivant une trajectoire prédéfinie, entre dans la zone d'opération des câbles, nécessitant une détection rapide et une reconfiguration efficace pour éviter la collision. La stratégie adoptée consiste à :

- Détecter la position de l'obstacle mobile grâce aux algorithmes intégrés.
- Reconfigurer le mécanisme en déplaçant la structure portante des points d'attache des câbles 7 et 8 sur l'axe Y et en ajustant la position du câble 8 sur l'axe Z, afin d'augmenter la distance entre les câbles et l'obstacle tout en préservant la trajectoire de l'effecteur.

Cette simulation constitue une base pour valider l'approche de détection et d'évitement des collisions proposée, tout en démontrant la flexibilité et l'efficacité du MPREC- dans des scénarios dynamiques.

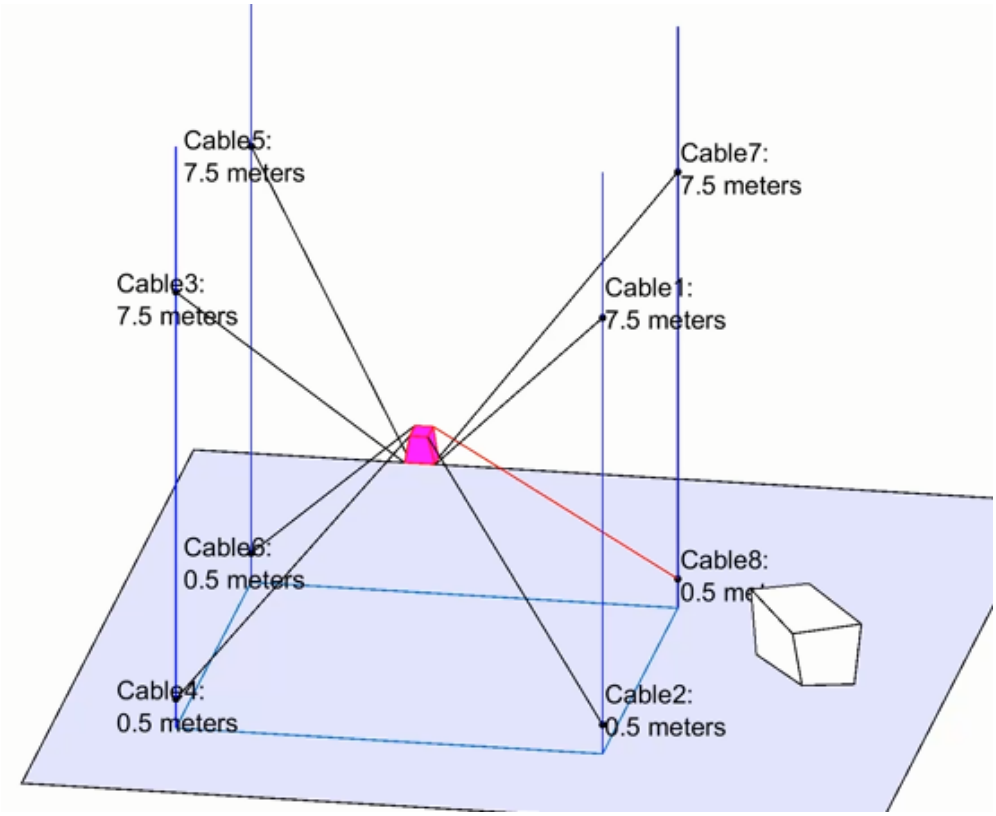


Figure 19. Cas simulé de collision avec un obstacle mobile

Dans les sections suivantes, les résultats relatifs à la détection de collision, à l'emplacement des points d'attache, à la longueur et à la tension des câbles, ainsi qu'à l'analyse de l'espace de travail des efforts réalisables, seront présentés.

4.2.1 DÉTECTION DE COLLISION

La méthode de détection de collision, basée sur la distance minimale entre la structure portante des points d'attache des câbles 7 et 8 et l'obstacle, a montré une efficacité notable dans l'identification des risques de collision. La figure 20 illustre la distance entre l'obstacle et la structure portante du MPREC au cours du temps, permettant d'évaluer l'efficacité du mécanisme de détection de collision. On observe une diminution progressive de cette distance jusqu'à atteindre le seuil critique de 1 m, moment auquel le système déclenche la reconfiguration des points d'attache pour éviter toute collision.

Un phénomène notable apparaît entre 5 et 15 secondes, où de petites oscillations ou pics sont visibles autour de la distance critique. Ces fluctuations sont directement liées à la nature discrète du modèle de reconfiguration, où chaque ajustement des points d'attache s'effectue par incréments de 0.1 m en réponse aux mouvements de l'obstacle. Contrairement à une trajectoire continue, ce mode de reconfiguration introduit des ajustements successifs, générant des variations observables dans la courbe.

On constate que la distance entre l'obstacle et la structure se maintient autour du seuil critique, confirmant que l'algorithme de détection de collision assure un suivi efficace de l'obstacle et une adaptation rapide de la configuration du mécanisme. Enfin, vers 16 secondes, la distance augmente de nouveau, indiquant un éloignement progressif de l'obstacle.

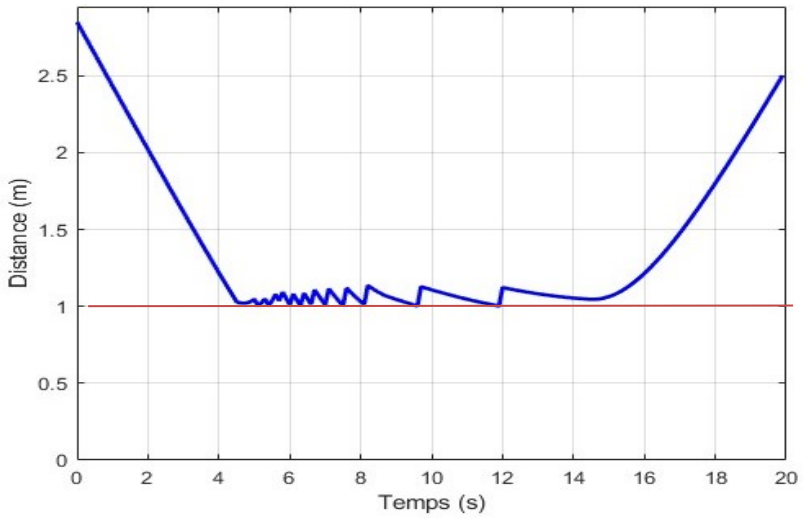


Figure 20. La distance entre l'obstacle et la structure

Ces résultats montrent que le modèle de détection de collision est réactif et capable d'activer la reconfiguration au bon moment, tout en maintenant une marge de sécurité suffisante pour éviter toute collision avec la structure du MPREC. La section suivante analysera plus en détail l'impact de ces ajustements sur la reconfiguration et la distribution des efforts dans le mécanisme.

4.2.2 EMPLACEMENT DES POINTS D'ATTACHES

L'ajustement dynamique des points d'attache, en réponse aux changements de configuration de l'environnement, a permis de réduire efficacement le risque de collision. Les résultats de simulation indiquent que les déplacements horizontaux et verticaux des points d'attache ont été réalisés avec précision, garantissant une reconfiguration adaptative et efficace du MPREC.

Les figures 21 et 22 présentent respectivement l'évolution de la position de la structure portante sur l'axe Y et du point d'attache du câble 8 sur l'axe Z, en réponse à l'approche de l'obstacle détecté.

L’analyse de ces courbes met en évidence un déplacement progressif par paliers, indiquant que la reconfiguration des points d’attache s’effectue par incréments successifs. Ce comportement discret, observé entre 5 et 15 secondes, est directement lié à la stratégie de reconfiguration adoptée, où chaque ajustement se produit uniquement lorsque l’obstacle atteint la distance critique de 1 m.

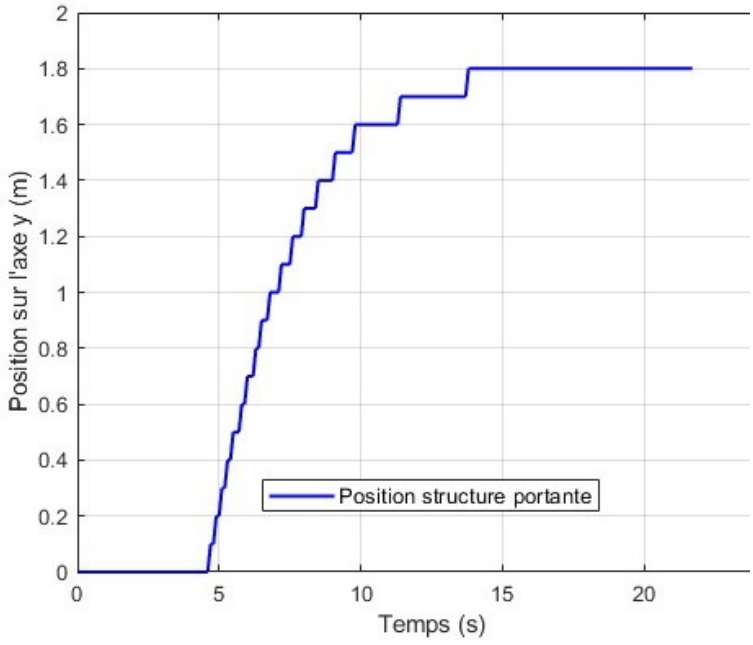


Figure 21. Position de la structure sur l’axe Y

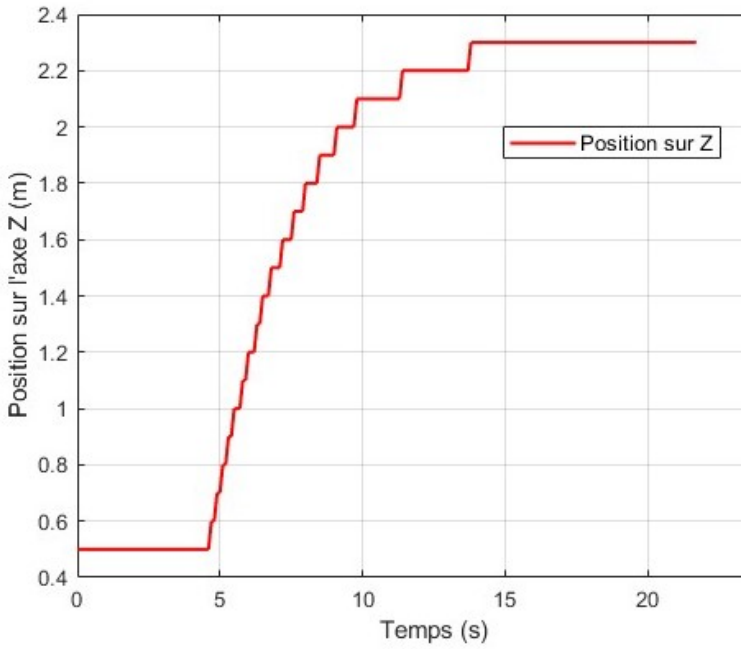


Figure 22. Position du point d'attache du câble 8 sur l'axe Z

Dans la figure 21, on observe que la structure portante se déplace horizontalement sur l'axe Y de manière progressive jusqu'à environ 1.8 m, où elle atteint une position stable après la disparition du risque de collision. La trajectoire en escalier reflète la prise de décision par l'algorithme de reconfiguration, qui ajuste la position en fonction des besoins en évitement d'obstacle.

De la même manière, la figure 22 illustre l'évolution de la position verticale du point d'attache du câble 8 sur l'axe Z. Ici encore, le déplacement suit un modèle par paliers, atteignant une hauteur finale d'environ 2.3 m. Ce mouvement vertical est coordonné avec la translation horizontale de la structure portante, assurant ainsi une reconfiguration efficace pour maintenir une distance de sécurité avec l'obstacle.

Ces résultats montrent que le modèle de reconfiguration adopté fonctionne de manière réactive et adaptative, garantissant une mise à jour rapide des positions des points d'attache tout en préservant la stabilité du mécanisme. Ce

comportement discret assure une exécution fiable et stable sans nécessiter de recalculs complexes des trajectoires.

La section suivante analysera l'impact de ces déplacements sur la longueur des câbles et la répartition des tensions dans le MPREC.

4.2.3 LONGUEUR DES CÂBLES

L'ajustement dynamique des points d'attache, en réponse aux changements de configuration de l'environnement, a permis d'optimiser la gestion des longueurs de câbles tout en maintenant la stabilité du MPREC. La figure 23 illustre l'évolution des longueurs des huit câbles au cours du temps, mettant en évidence les variations dues aux déplacements des points d'attache et de la structure portante.

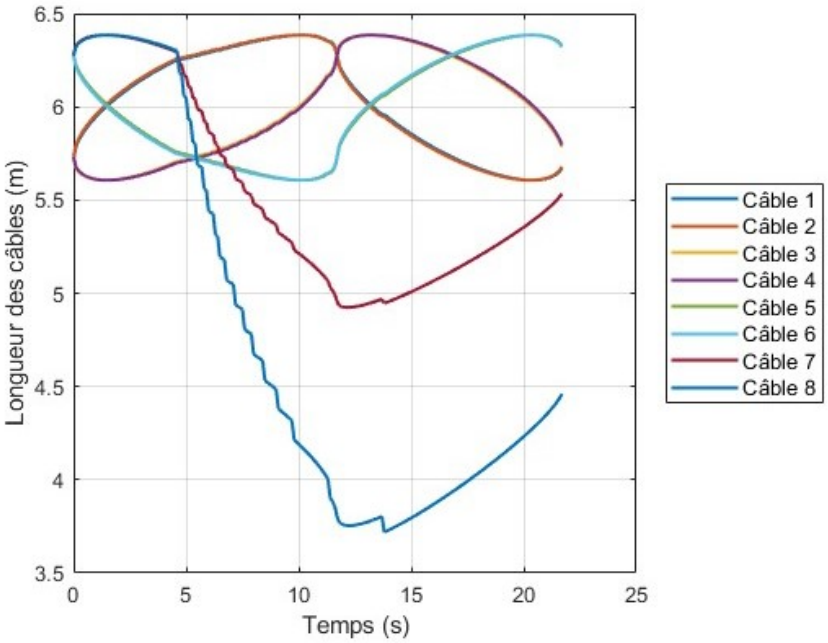


Figure 23. Longueur des câbles

On observe que les longueurs des câbles présentent des cycles de variation bien définis, reflétant les mouvements de l'effecteur dans l'espace de travail. En particulier, les câbles 7 et 8 subissent des variations par paliers, ce qui coïncide avec la phase de reconfiguration des points d'attache correspondants. Ce comportement discret est directement lié au mode de reconfiguration adopté, où la position des points d'attache est mise à jour de manière incrémentale à chaque ajustement en réponse à l'approche de l'obstacle.

En revanche, les autres câbles (1 à 6) présentent une variation plus fluide de leur longueur. Cette différence s'explique par l'absence de reconfiguration au niveau de leurs points d'attache, ce qui entraîne une adaptation progressive des longueurs en fonction des déplacements naturels de l'effecteur sans ajustements brusques.

Ces résultats mettent en évidence la corrélation entre la stratégie de reconfiguration et la gestion des longueurs de câbles, confirmant que le système ajuste dynamiquement la géométrie du MPREC pour s'adapter aux variations de l'environnement. La prochaine section analysera l'impact de ces variations sur la distribution des tensions dans les câbles, un paramètre clé pour assurer la stabilité du mécanisme.

4.2.4 TENSION DES CÂBLES

L'évolution des tensions dans les câbles est directement influencée par la reconfiguration des points d'attache et les déplacements de la structure portante. La figure 24 illustre la variation des tensions des huit câbles au cours du temps, mettant en évidence les effets de la reconfiguration sur la distribution des efforts.

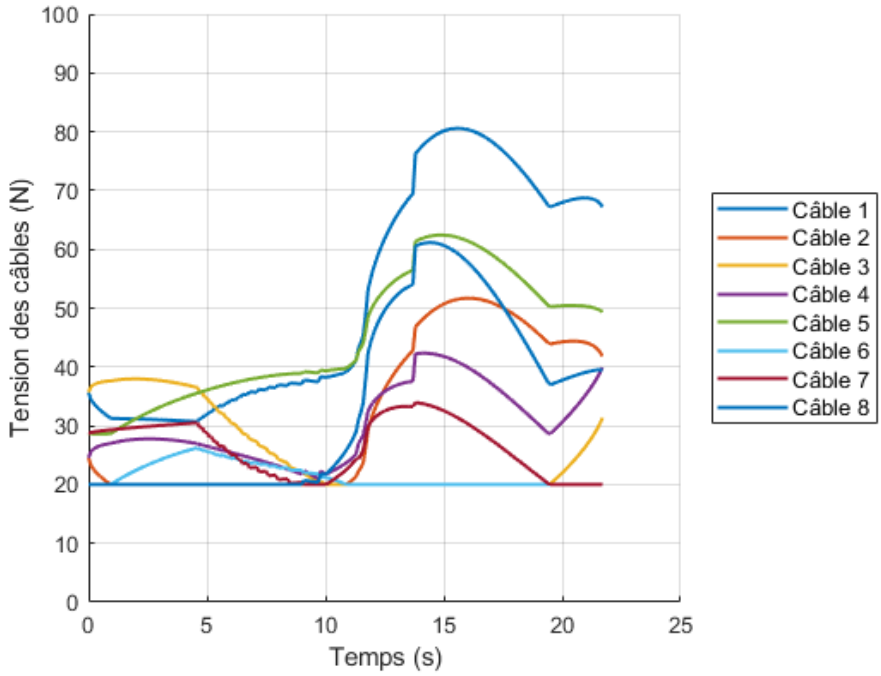


Figure 24. Tensions des câbles

On observe que les câbles 7 et 8 présentent une tension stable au début, suivie de variations par paliers à partir de 5 secondes. Ces variations coïncident avec la reconfiguration des points d'attache identifiée dans les sections précédentes. L'ajustement discret des positions des points d'attache entraîne une redistribution instantanée des tensions, ce qui se traduit par des transitions en escalier visibles sur les courbes de tension.

Les câbles 1 et 6 affichent des pics de tension significatifs, notamment entre 10 et 15 secondes, atteignant des valeurs maximales avoisinant 80 N. Ces pics sont dus à l'alignement des efforts appliqués sur l'effecteur, ce qui entraîne une répartition inégale des charges entre les câbles pendant la phase de reconfiguration. À l'inverse, certains câbles comme le câble 8 montrent une tension quasi constante après 10 secondes, indiquant une réduction de sa contribution à l'équilibre global du système après la stabilisation de la reconfiguration.

Un autre point à noter est que toutes les tensions restent dans l'intervalle défini entre 20 N et 90 N, respectant ainsi les contraintes de stabilité mécanique du système. Cependant, la redistribution des tensions montre que la reconfiguration affecte de manière non uniforme les câbles, certains supportant plus de charge que d'autres en fonction de la nouvelle configuration du MPREC.

Ces résultats confirment que la stratégie de reconfiguration a un impact direct sur la gestion des tensions dans les câbles, influençant la manière dont les efforts sont répartis à chaque instant. La méthode adoptée permet d'assurer une adaptation dynamique efficace, garantissant la stabilité du système tout en évitant des tensions excessives ou insuffisantes susceptibles d'altérer le comportement du MPREC.

4.2.5 ANALYSE DE L'ESPACE DE TRAVAIL DES EFFORTS RÉALISABLES

L'espace de travail des efforts réalisables est un indicateur clé pour évaluer l'impact de la reconfiguration des points d'attache sur la capacité du MPREC à générer des efforts exploitables dans son environnement de travail. Les figures 25, 26 et 27 comparent l'espace de travail initial (en bleu) et l'espace de travail final après reconfiguration (en rouge), mettant en évidence les modifications induites par la nouvelle configuration des points d'attache.

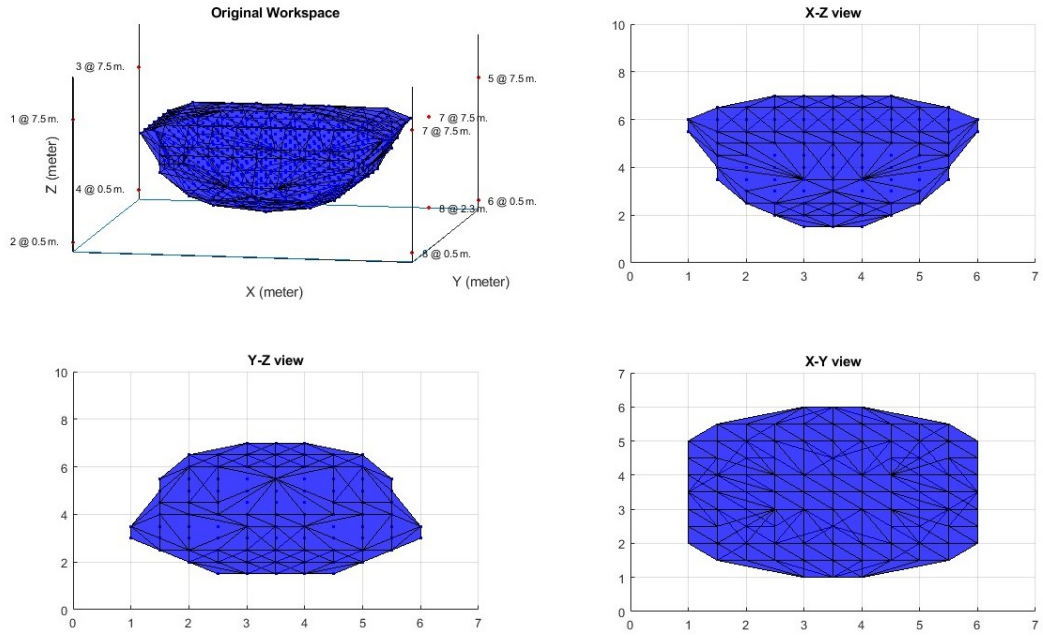


Figure 25. Espace de travail original

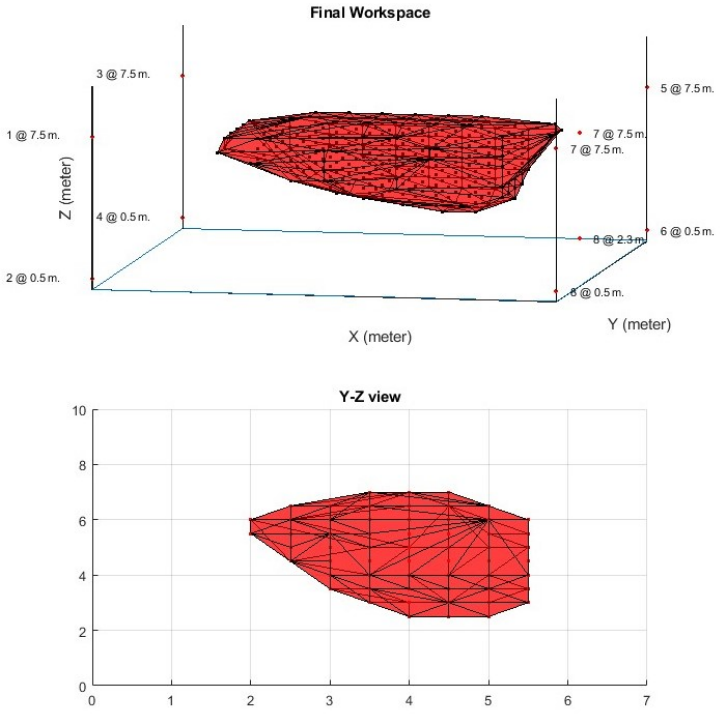


Figure 26. Espace de travail final (A)

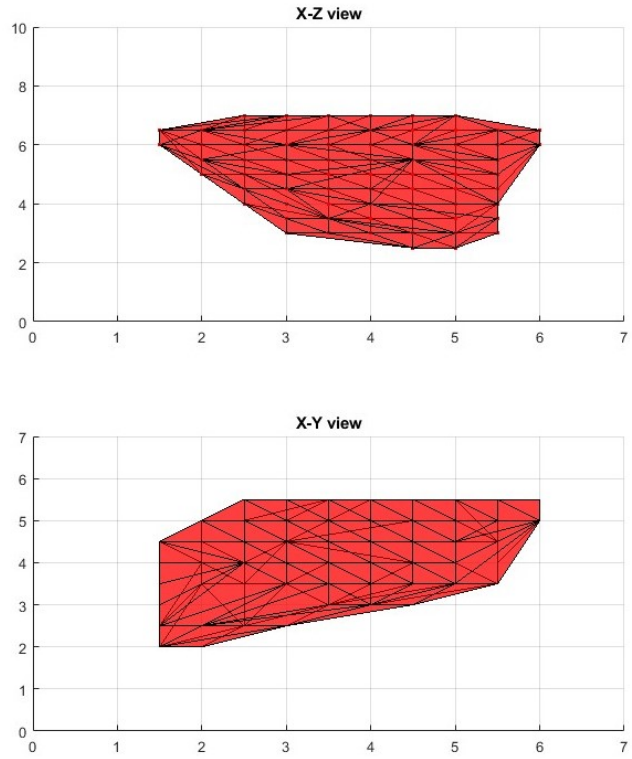


Figure 27. Espace de travail final (B)

L’analyse des deux espaces de travail montre une différence significative en termes de volume et de géométrie. L’espace de travail initial présente une forme relativement homogène et bien équilibrée, permettant à l’effecteur d’évoluer librement dans plusieurs directions. Après la reconfiguration, l’espace de travail final est réduit et asymétrique, limitant certaines directions de mouvement et modifiant la distribution des efforts réalisables. Cette transformation est particulièrement visible dans les vues X-Z et Y-Z, où l’espace de travail final apparaît plus incliné et restreint, réduisant ainsi l’accessibilité aux positions élevées.

Une autre observation concerne la hauteur maximale atteignable par l’effecteur. Dans l’espace de travail initial, les mouvements verticaux sont plus amples, tandis que dans l’espace final, ils sont contraints par la nouvelle disposition des points d’attache et des câbles. Cette limitation est due à la nécessité d’éviter les

obstacles en ajustant dynamiquement les points d'attache, ce qui restreint la mobilité du système dans certaines zones.

L'impact de cette reconfiguration ne se limite pas seulement à la réduction du volume de l'espace de travail, mais affecte également la faisabilité des efforts exercés par les câbles. La nouvelle configuration modifie la distribution des forces, imposant des contraintes supplémentaires sur certains câbles tout en relâchant d'autres. Cette réorganisation permet de prévenir les collisions avec l'obstacle détecté, garantissant ainsi une utilisation plus sécurisée du MPREC.

La comparaison des espaces de travail initial et final met en évidence un compromis entre la flexibilité de mouvement et la nécessité d'éviter les obstacles. Bien que la reconfiguration réduise l'amplitude des déplacements possibles, elle assure une adaptation dynamique du MPREC à son environnement tout en maintenant un espace de travail exploitable pour l'accomplissement des tâches assignées.

4.3 ÉTUDE DES LIMITES DE DÉPLACEMENT DE LA RECONFIGURATION

En complément de la première simulation, deux scénarios supplémentaires ont été réalisés afin d'explorer les limites de déplacement de la reconfiguration et de déterminer jusqu'à quel point le MPREC peut s'adapter aux contraintes imposées.

La première simulation vise à évaluer les limites maximales de reconfiguration en déplaçant simultanément la structure portante des câbles 7 et 8 ainsi que le point d'attache du câble 8 sur l'axe Z. La deuxième simulation porte sur une reconfiguration partielle où seule la structure portante des câbles 7 et 8 est déplacée, sans modifier la position du point d'attache du câble 8 sur l'axe Z.

Cette analyse a pour objectif d'identifier les contraintes mécaniques et les seuils au-delà desquels la reconfiguration devient inefficace ou instable. Les résultats obtenus

permettront d'évaluer les performances et les restrictions du mécanisme en fonction des stratégies de reconfiguration adoptées. Cette étude contribuera à mieux comprendre les capacités d'adaptation du MPREC dans un environnement dynamique.

4.3.1 ÉVALUATION DES LIMITES MAXIMALES DE RECONFIGURATION

L'évaluation des limites maximales de reconfiguration permet d'analyser jusqu'à quel point le système peut adapter la position de ses points d'attache pour éviter les obstacles tout en conservant un espace de travail exploitable. Les figures 28 et 29 illustrent respectivement l'évolution de la position de la structure portante dans les axes Y et Z, tandis que la figure 30 montre l'espace de travail final après la reconfiguration complète.

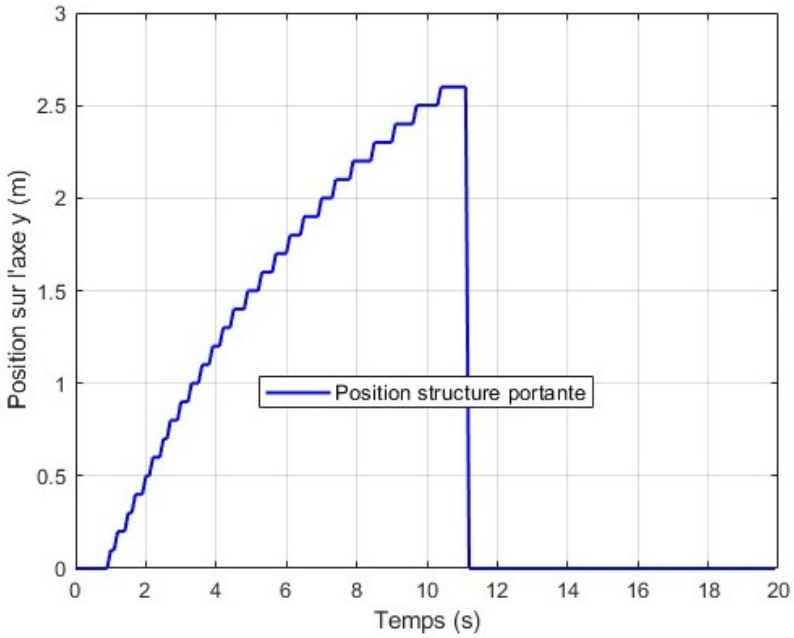


Figure 28. Position de la structure sur l'axe Y

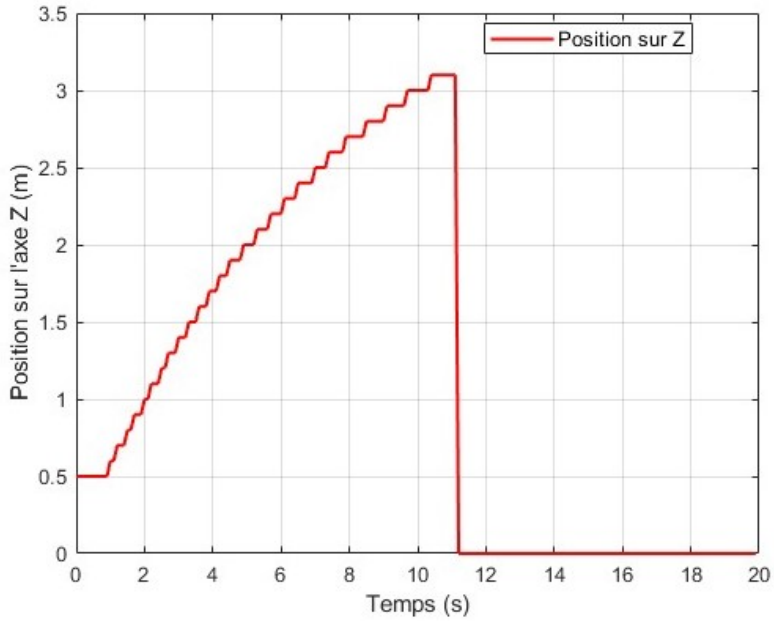


Figure 29. Position du point d'attache du câble 8 sur l'axe Z

Les figures 28 et 29 montrent que la structure portante subit une progression progressive jusqu'à une position maximale de 2.5 m sur Y et 3.2 m sur Z avant de chuter brusquement à 0 m après 11 secondes. Ce comportement traduit une reconfiguration continue jusqu'à l'atteinte des limites mécaniques du système, où une contrainte empêche tout déplacement supplémentaire. Cette chute soudaine pourrait indiquer soit une saturation du mécanisme de reconfiguration, soit une invalidation des positions calculées par l'algorithme en raison des contraintes structurelles.

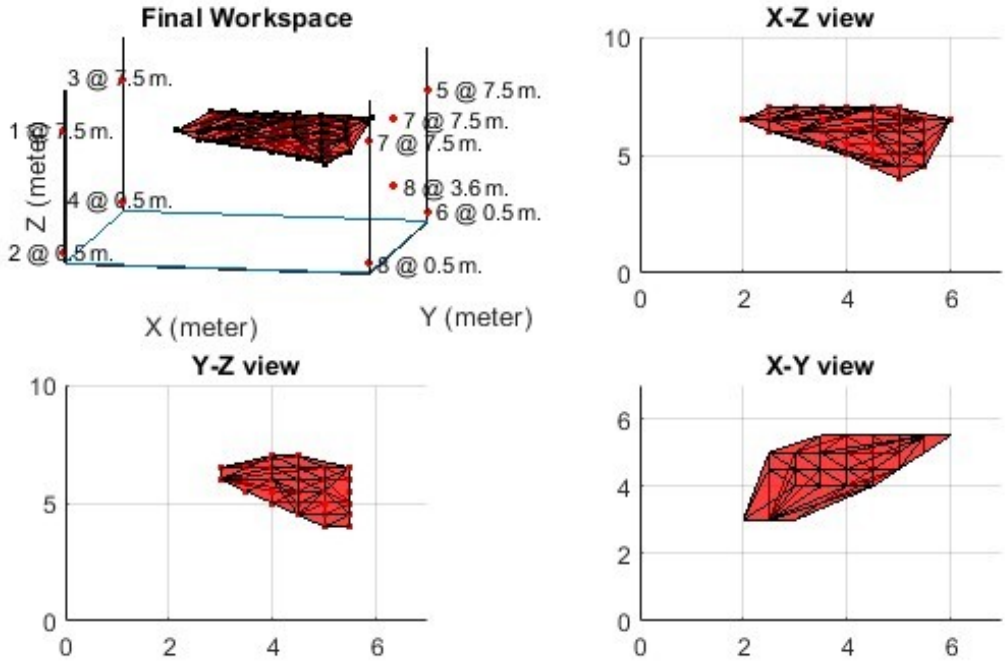


Figure 30. Espace de travail final

La figure 30 représente l'espace de travail final après la reconfiguration maximale. On observe une réduction drastique du volume accessible par rapport à l'espace initial. L'espace devient plus compact et incliné, avec une zone d'exploitation nettement restreinte. Cette transformation est principalement due aux ajustements successifs des points d'attache qui, tout en évitant les obstacles, contraignent progressivement la mobilité de l'effecteur.

L'inclinaison de l'espace de travail final, visible dans les vues X-Z et Y-Z, est une conséquence directe de la reconfiguration asymétrique des points d'attache. Le mouvement des points d'attache sur l'axe Z entraîne une réduction de la hauteur maximale exploitable, tandis que leur déplacement sur Y limite davantage l'étendue latérale du système. En conséquence, l'effecteur doit évoluer dans un espace plus restreint, ce qui impacte potentiellement ses performances et sa flexibilité.

Cette analyse met en évidence un compromis fondamental dans l'optimisation de la reconfiguration du MPREC. Bien que la reconfiguration permette d'éviter efficacement les obstacles, elle entraîne également une réduction de l'espace de travail disponible. Cette observation souligne l'importance d'un équilibre entre la flexibilité du mécanisme et la préservation des capacités opérationnelles du système.

4.3.2 ANALYSE D'UNE RECONFIGURATION PARTIELLE

L'analyse d'une reconfiguration partielle vise à comprendre comment le système s'adapte à l'environnement tout en conservant une capacité opérationnelle suffisante. Contrairement à la reconfiguration maximale étudiée précédemment, cette approche permet d'évaluer l'impact d'un ajustement limité des points d'attache sur l'espace de travail et la stabilité du mécanisme.

Les figures 31 et 32 illustrent l'évolution de la structure portante et du point d'attache du câble 8 sur les axes Y et Z. On observe une progression par paliers successifs jusqu'à une position maximale sur Y (≈ 3 m) et Z (≈ 0.5 m). Ce comportement indique un ajustement graduel en réponse aux obstacles mobiles. Cependant, après environ 10 secondes, la position chute brutalement à 0 m, ce qui suggère que le mécanisme a atteint une limite de reconfiguration ou qu'une contrainte externe a invalidé la poursuite de l'adaptation.

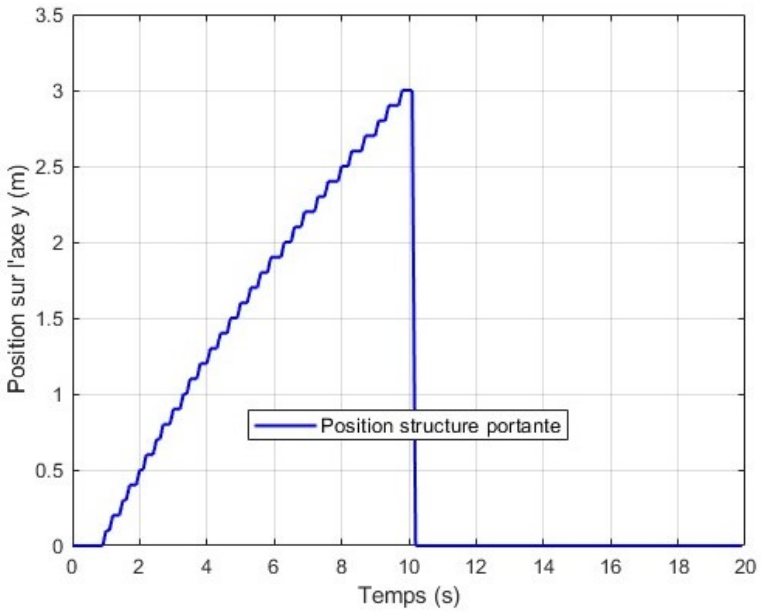


Figure 31. Position de la structure sur l'axe Y

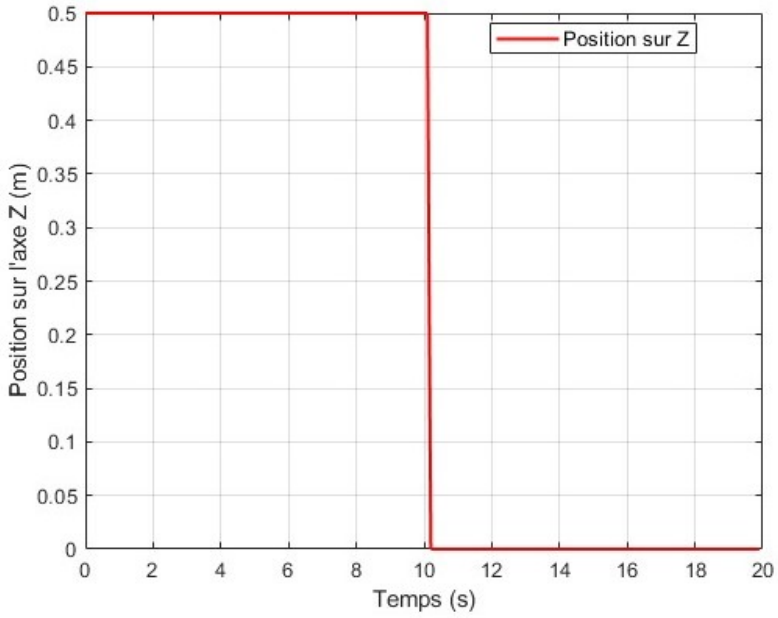


Figure 32. Position du point d'attache du câble 8 sur l'axe Z

La figure 33 représente l'espace de travail résultant de cette reconfiguration partielle. Contrairement à l'espace de travail final observé lors de la reconfiguration maximale, ici, la zone accessible reste plus étendue et

fonctionnelle, bien qu'elle soit réduite et asymétrique. On remarque que la forme de l'espace exploitable devient plus étroite, indiquant une diminution progressive des options de mouvement pour l'effecteur. L'espace reste cependant plus stable, ce qui confirme que la reconfiguration partielle permet un compromis entre la flexibilité et la préservation de la capacité d'action du MPREC.

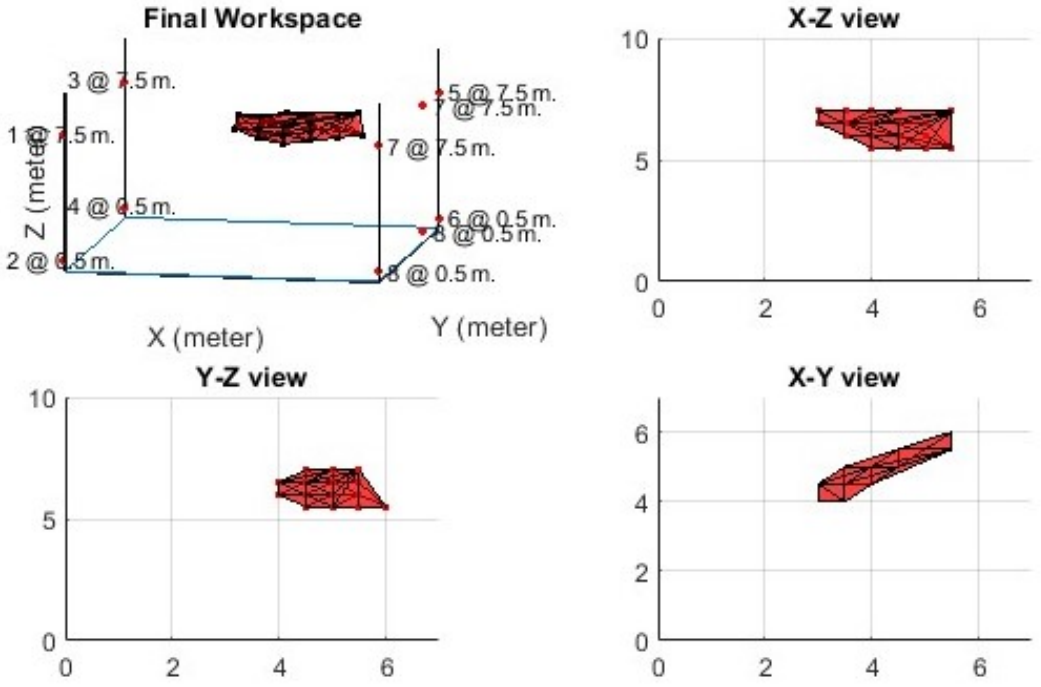


Figure 33. Espace de travail final

Cette analyse met en évidence l'intérêt d'une stratégie de reconfiguration modérée, permettant d'éviter les obstacles tout en conservant un espace de travail plus large par rapport à une reconfiguration totale. Bien que la mobilité du système soit limitée, cette approche assure une meilleure stabilité structurelle, évitant des pertes excessives en volume de travail tout en maintenant l'effecteur opérationnel.

4.4 LIMITES DE L'ÉTUDE ET PERSPECTIVES D'AMÉLIORATION

Bien que cette étude ait permis d'analyser la reconfiguration d'un MPREC pour éviter les collisions avec un obstacle mobile, plusieurs hypothèses et simplifications ont été adoptées, ce qui entraîne certaines limites à considérer.

Tout d'abord, la modélisation repose sur une hypothèse quasi-statique, ce qui signifie que les effets dynamiques, tels que l'inertie et les grandes accélérations, ne sont pas pris en compte. Cette simplification a permis de se concentrer sur l'équilibre statique des tensions dans les câbles et la faisabilité de la reconfiguration. Toutefois, pour une analyse plus complète du comportement du mécanisme en situation réelle, il serait nécessaire d'intégrer une modélisation dynamique afin d'évaluer les forces d'inertie et les effets de l'accélération sur la stabilité du système.

Ensuite, les limites de tension des câbles, fixées entre 20 et 90 N, ont été définies en fonction des capacités du servo utilisé pour la réalisation du modèle réduit en laboratoire. De plus, le fléchissement des câbles n'a pas été pris en compte, bien que le choix du Dyneema, un matériau léger et flexible, minimise cet effet. Dans une étude future, une analyse plus détaillée intégrant les effets de flexion et de déformation des câbles sous différentes charges pourrait être envisagée.

Concernant la charge appliquée, la simulation a été réalisée en considérant une charge utile de 25 kg, correspondant exclusivement au poids de l'effecteur terminal, sans charge supplémentaire. Cette hypothèse permet une analyse simplifiée des tensions et de la reconfiguration, mais elle ne reflète pas le comportement du système lorsqu'il est soumis à des charges variables ou en présence d'outils montés sur l'effecteur. Une extension de cette étude pourrait inclure des charges supplémentaires afin d'évaluer leur impact sur la stabilité et les performances du mécanisme.

Par ailleurs, un seuil de 1 mètre a été défini pour éviter les collisions, basé principalement sur la vitesse de freinage du mécanisme et les simplifications adoptées dans la simulation. Cette valeur n'a pas été optimisée ni validée selon des normes de sécurité industrielles. Une étude plus approfondie, intégrant des critères normatifs et

des analyses expérimentales, permettrait d'affiner ce seuil pour garantir une sécurité accrue du système.

Enfin, les scénarios impliquant la présence de plusieurs obstacles simultanés n'ont pas été abordés dans cette étude. L'algorithme de reconfiguration actuellement implémenté ne gère qu'un seul obstacle à la fois. En présence de plusieurs interférences, les déplacements simultanés requis de la structure portante et des points d'attache pourraient conduire à des configurations où les tensions des câbles sortent des plages admissibles, menaçant ainsi la stabilité du mécanisme. De plus, le modèle ne prend pas en compte les délais de réponse mécaniques ni la vitesse de reconfiguration. En cas d'apparition soudaine d'un obstacle à grande vitesse, il est possible que la reconfiguration ne soit pas déclenchée à temps pour éviter la collision. L'intégration d'une logique prédictive, fondée sur des trajectoires anticipées d'obstacles, ainsi que la prise en compte des contraintes temporelles et des limites d'accélération du système, représenterait une amélioration essentielle pour faire face à des environnements industriels plus réalistes et dynamiques.

Bien que cette étude apporte une première validation de la stratégie de reconfiguration du MPREC, l'intégration des aspects dynamiques, de flexibilité des câbles, de charge variable et de normes de sécurité permettrait d'améliorer la robustesse et la fiabilité du modèle proposé. Ces perspectives ouvrent la voie à des recherches futures pour affiner l'approche et renforcer son applicabilité dans des contextes industriels réels.

4.5 CONCLUSION

Ce chapitre a permis d'évaluer les performances du MPREC à travers une série de simulations détaillées. L'objectif principal était de valider l'approche de reconfiguration en réponse aux obstacles mobiles et d'analyser l'impact de cette stratégie sur la stabilité, la trajectoire de l'effecteur et les contraintes mécaniques du système.

Les résultats obtenus démontrent que la stratégie adoptée permet une reconfiguration efficace, garantissant l'évitement des obstacles sans compromettre la stabilité du mécanisme. L'analyse des distances entre la structure et l'obstacle a mis en évidence une gestion adaptative réussie, où les ajustements des points d'attache permettent de maintenir une séparation sécuritaire tout en assurant un fonctionnement fluide du système. Les déplacements incrémentaux de la structure portante et du point d'attache du câble 8 ont révélé une adaptation progressive aux variations de l'environnement, minimisant ainsi les impacts sur la trajectoire de l'effecteur.

Concernant la longueur et la tension des câbles, l'étude a montré que les modifications apportées par la reconfiguration influencent directement la distribution des efforts dans le système. Une variation plus marquée des câbles 7 et 8 a été observée, ce qui souligne l'importance de ces points d'attache dans la dynamique de reconfiguration. En revanche, les autres câbles présentent des ajustements plus fluides, indiquant que la structure reste globalement stable et bien équilibrée.

L'analyse de l'espace de travail a permis d'illustrer l'impact de la reconfiguration sur les limites d'exploitation du mécanisme. L'espace de travail final a été réduit par rapport à l'espace initial, en particulier dans les directions Y et Z, ce qui reflète les compromis nécessaires entre flexibilité de reconfiguration et maintien des performances du système. La gestion des efforts réalisables a montré que la stratégie mise en place permet de conserver des tensions dans des plages acceptables, bien que l'adaptation dynamique puisse engendrer des variations ponctuelles nécessitant une régulation plus fine.

Enfin, l'étude de la trajectoire LSPB a mis en évidence les limitations de cette approche dans un contexte de reconfiguration réactive. L'application d'un profil de vitesse préétabli s'est avérée incompatible avec l'adaptabilité requise par le MPREC, ce qui a conduit à l'abandon de cette méthode au profit d'une stratégie incrémentale plus flexible et réactive.

Les analyses réalisées dans ce chapitre ont ainsi confirmé la pertinence du modèle proposé et mis en évidence les ajustements nécessaires pour améliorer encore la gestion de la reconfiguration. Les résultats obtenus constituent une base solide pour optimiser le comportement du mécanisme dans des environnements industriels plus complexes et mieux maîtriser les contraintes liées aux interactions dynamiques avec les obstacles mobiles.

CHAPITRE 5
CONCLUSION GENERALE

5.1 CONCLUSION

Ce mémoire a porté sur la conception, la modélisation et l'analyse d'un MPREC destiné à éviter les collisions avec des obstacles mobiles dans un environnement industriel. L'objectif principal de cette étude était de développer et d'évaluer une stratégie de reconfiguration dynamique permettant d'adapter la position des points d'attache des câbles en fonction des obstacles tout en maintenant la stabilité et l'intégrité de l'espace de travail du mécanisme. L'approche adoptée repose sur la capacité du MPREC à modifier sa configuration en temps réel afin d'optimiser sa flexibilité et sa robustesse.

Le premier chapitre a introduit la problématique de recherche, mettant en avant les limites des mécanismes parallèles conventionnels face aux environnements industriels dynamiques. Il a également exposé les objectifs de cette étude, notamment l'implémentation d'un algorithme de reconfiguration permettant d'ajuster les points d'attache des câbles en fonction de la présence d'obstacles.

Le deuxième chapitre a présenté une revue de la littérature portant sur les stratégies de planification de trajectoire, les méthodes de gestion des tensions des câbles et les approches existantes de reconfiguration. Cette analyse a permis d'identifier les défis liés à l'évitement des collisions dans un contexte industriel et de positionner cette étude dans le cadre des solutions innovantes basées sur la reconfiguration adaptative des points d'attache. Trois concepts de reconfiguration ont été explorés, mettant en évidence les avantages d'une approche combinant un déplacement horizontal et vertical pour maximiser l'adaptabilité du système.

Le troisième chapitre a détaillé la méthodologie adoptée pour concevoir et simuler la stratégie de reconfiguration. La modélisation cinématique et statique du MPREC a été établie, permettant d'analyser la distribution des forces et des tensions dans les câbles avant et après la reconfiguration. Une étude approfondie a été menée sur la trajectoire LSPB (Linear Segment with Parabolic Blend) comme solution d'optimisation des déplacements des points d'attache. Cependant, après plusieurs tentatives d'intégration, cette approche a été abandonnée en raison de sa complexité d'implémentation et de son incompatibilité avec la logique de reconfiguration instantanée du modèle. Une solution alternative a été retenue, consistant à effectuer un ajustement incrémental des points d'attache par pas de 0.1 m lorsque l'obstacle atteint la distance critique de 1 m de la structure portante.

Le quatrième chapitre a présenté et analysé les résultats obtenus à partir des simulations sous MATLAB. Deux scénarios de reconfiguration ont été étudiés afin de comparer l'impact de la stratégie d'évitement des collisions sur l'espace de travail et la stabilité du système.

Dans le premier scénario, correspondant à une reconfiguration maximale, la structure portante des câbles 7 et 8 a été déplacée jusqu'à 2.6 mètres sur l'axe Y, tandis que le point d'attache du câble 8 a été ajusté jusqu'à 3.1 mètres sur l'axe Z. Cette approche a permis d'assurer un évitement efficace des obstacles, mais au prix d'une réduction significative de l'espace de travail, notamment sur l'axe Y. Cette limitation met en évidence le compromis entre flexibilité et préservation de l'espace de travail, qui doit être optimisé pour garantir un fonctionnement efficace dans un environnement industriel complexe.

Dans le second scénario, une reconfiguration partielle a été mise en œuvre, où la structure portante a atteint un déplacement maximal de 3 mètres sur l'axe Y, tandis que le point d'attache du câble 8 est resté fixé à 0.5 mètre sur l'axe Z. Cette approche a permis de maintenir une meilleure stabilité structurelle mais a entraîné une réduction plus importante de l'espace de travail par rapport au premier scénario. De plus, le

déplacement maximal de la structure portante a été légèrement réduit, ce qui reflète les limites de la stratégie adoptée dans un cadre de reconfiguration partielle.

Les résultats obtenus ont mis en évidence l'efficacité de l'algorithme de reconfiguration pour garantir une réponse rapide et stable aux obstacles mobiles. Toutefois, plusieurs limitations de l'étude doivent être soulignées.

Tout d'abord, la modélisation adoptée repose sur une hypothèse quasi-statique, excluant les effets dynamiques et inertiels pouvant influencer la stabilité du mécanisme lors de transitions rapides. Ensuite, la charge utile prise en compte est limitée au poids de l'effecteur, sans intégrer d'autres charges susceptibles d'affecter la distribution des tensions dans les câbles. Par ailleurs, la flexion des câbles n'a pas été modélisée, bien que l'utilisation de matériaux haute performance comme le Dyneema permette de minimiser cet effet. Enfin, le choix d'un seuil de sécurité fixe de 1 mètre pour l'évitement des obstacles pourrait être optimisé en fonction de critères plus avancés, tels que l'adaptabilité aux variations de la trajectoire de l'obstacle et aux contraintes spécifiques du milieu industriel.

En conclusion, cette étude a permis de démontrer l'intérêt de la reconfiguration dynamique des points d'attache comme solution efficace pour éviter les obstacles mobiles tout en maintenant un espace de travail exploitable. Bien que certaines limitations aient été identifiées, les résultats obtenus constituent une base solide pour le développement futur de stratégies de reconfiguration plus avancées, intégrant des modèles dynamiques complets et des techniques d'optimisation en temps réel.

5.2 PERSPECTIVES ET TRAVAUX FUTURS

Les résultats obtenus dans cette étude constituent une base solide pour le développement de mécanismes parallèles reconfigurables autonomes et intelligents, capables de s'adapter dynamiquement aux variations de leur environnement. Bien que

la stratégie de reconfiguration développée ait démontré son efficacité dans l'évitement des obstacles mobiles, plusieurs axes d'amélioration peuvent être envisagés pour optimiser les performances du MPREC et étendre son applicabilité à des contextes industriels plus complexes.

L'une des premières pistes d'amélioration concerne l'intégration des effets dynamiques dans la modélisation du MPREC. L'approche adoptée dans cette étude repose sur une hypothèse quasi-statique, excluant les effets inertiels et les accélérations brusques. Une prise en compte de ces facteurs permettrait de mieux appréhender les contraintes mécaniques réelles et d'optimiser la stratégie de reconfiguration pour assurer une transition plus fluide entre les états successifs du système.

Une optimisation des stratégies de reconfiguration représente également une perspective importante. Actuellement, l'ajustement des points d'attache repose sur un déplacement par paliers de 0,1 m dès qu'un obstacle atteint la distance critique de 1 m. Une approche plus avancée, basée sur des algorithmes d'optimisation en temps réel, permettrait d'ajuster dynamiquement ces déplacements en fonction de critères tels que la minimisation des efforts exercés sur les câbles ou l'optimisation de l'espace de travail restant.

Un autre axe d'amélioration porte sur la gestion des charges variables supportées par l'effecteur. L'étude menée s'est limitée au poids de l'effecteur sans considérer de charges supplémentaires, ce qui représente une hypothèse simplificatrice. L'extension du modèle à des configurations avec des charges variables permettrait d'évaluer l'impact de la reconfiguration sur la distribution des tensions et de garantir que l'ajustement des points d'attache reste efficace quelles que soient les conditions d'utilisation.

Une validation expérimentale constitue une étape essentielle pour confronter les résultats obtenus en simulation à un environnement réel. La mise en place d'un prototype physique du MPREC, équipé de capteurs de position et de détection

d’obstacles, permettrait d’évaluer les performances de la stratégie de reconfiguration dans des conditions industrielles et de mesurer les écarts potentiels avec les simulations numériques. Cette expérimentation serait également l’occasion de tester la précision des ajustements des points d’attache et la réactivité du mécanisme face aux obstacles dynamiques.

Enfin, une amélioration de l’algorithme de détection et d’évitement des obstacles pourrait renforcer l’efficacité du MPREC dans des environnements plus complexes. L’intégration de techniques basées sur l’intelligence artificielle et l’apprentissage automatique permettrait d’optimiser la reconnaissance des obstacles et d’adapter en temps réel la stratégie de reconfiguration en fonction des conditions évolutives du milieu industriel.

Cette étude a mis en évidence le potentiel des MPREC pour assurer une reconfiguration dynamique des points d’attache, permettant ainsi l’évitement d’obstacles mobiles tout en préservant la stabilité et la faisabilité du mécanisme. Les travaux futurs porteront sur l’optimisation des stratégies de reconfiguration, l’intégration d’une modélisation dynamique avancée et la validation expérimentale, afin d’affiner cette approche et de l’adapter à des applications industrielles nécessitant un haut degré de flexibilité et de précision.

LISTE DE RÉFÉRENCES

1. Moencks, M., et al. *Augmented Workforce: A Case Study on integrating Operator Assistance Systems for Repair Jobs into Human-centric Production*. in *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. 2022.

2. Demir, K.A., G. Döven, and B. Sezen. *Industry 5.0 and Human-Robot Co-working*. in *Procedia Computer Science*. 2019.

3. Youssef, K. and M.J.D. Otis, *Reconfigurable fully constrained cable driven parallel mechanism for avoiding interference between cables.* Mechanism and Machine Theory, 2020. **148**: p. 103781.

4. An, H., et al., *A Novel Cable-Driven Parallel Robot With Movable Anchor Points Capable for Obstacle Environments.* IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022. **27**(6): p. 5472-5483.

5. Khoshbin, E., et al., *Reconfigurable fully constrained cable-driven parallel mechanism for avoiding collision between cables with human.* Robotica, 2022. **40**(12): p. 4405-4430.

6. Liu, Y., et al., *Dynamic Obstacle Avoidance for Cable-Driven Parallel Robots With Mobile Bases via Sim-to-Real Reinforcement Learning.* IEEE Robotics and Automation Letters, 2023. **8**(3): p. 1683-1690.

7. Wang, X., et al., *Optimal Reconfiguration Planning of a 3-DOF Point-Mass Cable-Driven Parallel Robot.* IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024. **71**(3): p. 2672-2682.

8. Xiong, H., et al., *Real-Time Reconfiguration Planning for the Dynamic Control of Reconfigurable Cable-Driven Parallel Robots.* Journal of Mechanisms and Robotics, 2022. **14**(6).

9. Tan, H., et al., *Stability Analysis of a Reconfigurable and Mobile Cable-Driven Parallel Robot.* IEEE Access, 2024. **12**: p. 14182-14193.

10. Muntashir, R. and L. Nurahmi. *Reconfiguration of Cable Driven Parallel Robot Based on Mobile Base Position*. in *2022 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*. 2022.

11. Cheng, H.H. and D. Lau, *Cable Attachment Optimization for Reconfigurable Cable-Driven Parallel Robots Based on Various Workspace Conditions.* IEEE Transactions on Robotics, 2023. **39**(5): p. 3759-3775.

12. Duan, J., et al. *Reconfiguration and Performance Evaluation of TBot Cable-Driven Parallel Robot*. in *Cable-Driven Parallel Robots*. 2023. Cham: Springer Nature Switzerland.

13. Trautwein, F., et al. *A Predictor-Corrector-Scheme for the Geometry Planning for In-Operation-Reconfiguration of Cable-Driven Parallel Robots*. in *Cable-Driven Parallel Robots*. 2023. Cham: Springer Nature Switzerland.

14. Poitrimol, B. and H. Igarashi, *A Cable-Based Haptic Interface with a Reconfigurable Structure.* Journal of Mechanisms and Robotics, 2024: p. 1-22.

15. Behroozi, F., P. Cardou, and S. Caro. *Transmission Systems to Extend the Workspace of Planar Cable-Driven Parallel Robots*. in *Cable-Driven Parallel Robots*. 2023. Cham: Springer Nature Switzerland.

16. Wang, R., S. Li, and Y. Li, *A Suspended Cable-Driven Parallel Robot With Articulated Reconfigurable Moving Platform for Schönflies Motions.* IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022. **27**(6): p. 5173-5184.

17. Zhou, L., et al. *Design and Kinematic Analysis of a Modular Re-Configurable Cable-Driven Parallel Robot*. in *2018 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)*. 2018.

18. Gagliardini, L., S. Caro, and M. Gouttefarde. *Dimensioning of cable-driven parallel robot actuators, gearboxes and winches according to the twist feasible workspace*. in *2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. 2015.

19. Vu, D.-S., et al. *On the Design of a Three-DOF Cable-Suspended Parallel Robot Based on a Parallelogram Arrangement of the Cables*. in *Cable-Driven Parallel Robots*. 2018. Cham: Springer International Publishing.

20. Boschetti, G. and A. Trevisani, *Cable Robot Performance Evaluation by Wrench Exertion Capability.* Robotics, 2018. **7**(2): p. 15.

21. Yang, G., C.B. Pham, and S.H. Yeo. *Workspace Performance Optimization of Fully Restrained Cable-Driven Parallel Manipulators*. in *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2006.

22. Duan, Q.J. and X. Duan, *Workspace Classification and Quantification Calculations of Cable-Driven Parallel Robots.* Advances in Mechanical Engineering, 2014. **6**: p. 358727.

ANNEXE 1

Trajectoire circulaire suivie par l'effecteur, avec des angles de rotation fixés à zéro, définie par rapport à son repère dans toutes les simulations.

Temps	X	Y	Z
0,1	3	3,50	4
0,2	3,01	3,60	4
0,3	3,02	3,64	4
0,4	3,03	3,67	4
0,5	3,04	3,70	4
0,6	3,05	3,72	4
0,7	3,06	3,74	4
0,8	3,07	3,76	4
0,9	3,08	3,77	4
1	3,09	3,79	4
1,1	3,1	3,80	4
1,2	3,11	3,81	4
1,3	3,12	3,82	4
1,4	3,13	3,84	4
1,5	3,14	3,85	4
1,6	3,15	3,86	4
1,7	3,16	3,87	4
1,8	3,17	3,88	4
1,9	3,18	3,88	4
2	3,19	3,89	4
2,1	3,2	3,90	4
2,2	3,21	3,91	4
2,3	3,22	3,91	4
2,4	3,23	3,92	4
2,5	3,24	3,93	4
2,6	3,25	3,93	4
2,7	3,26	3,94	4
2,8	3,27	3,94	4
2,9	3,28	3,95	4
3	3,29	3,95	4
3,1	3,3	3,96	4
3,2	3,31	3,96	4
3,3	3,32	3,97	4
3,4	3,33	3,97	4
3,5	3,34	3,97	4
3,6	3,35	3,98	4
3,7	3,36	3,98	4
3,8	3,37	3,98	4
3,9	3,38	3,99	4
4	3,39	3,99	4
4,1	3,4	3,99	4
4,2	3,41	3,99	4
4,3	3,42	3,99	4
4,4	3,43	4,00	4
4,5	3,44	4,00	4
4,6	3,45	4,00	4
4,7	3,46	4,00	4
4,8	3,47	4,00	4
4,9	3,48	4,00	4
5	3,49	4,00	4
5,1	3,5	4,00	4
5,2	3,51	4,00	4
5,3	3,52	4,00	4
5,4	3,53	4,00	4
5,5	3,54	4,00	4
5,6	3,55	4,00	4
5,7	3,56	4,00	4
5,8	3,57	4,00	4
5,9	3,58	3,99	4
6	3,59	3,99	4
6,1	3,6	3,99	4
6,2	3,61	3,99	4
6,3	3,62	3,99	4
6,4	3,63	3,98	4
6,5	3,64	3,98	4
6,6	3,65	3,98	4
6,7	3,66	3,97	4
6,8	3,67	3,97	4
6,9	3,68	3,97	4
7	3,69	3,96	4
7,1	3,7	3,96	4
7,2	3,71	3,95	4
7,3	3,72	3,95	4
7,4	3,73	3,94	4
7,5	3,74	3,94	4
7,6	3,75	3,93	4
7,7	3,76	3,93	4
7,8	3,77	3,92	4
7,9	3,78	3,91	4
8	3,79	3,91	4
8,1	3,8	3,90	4
8,2	3,81	3,89	4
8,3	3,82	3,88	4
8,4	3,83	3,88	4
8,5	3,84	3,87	4
8,6	3,85	3,86	4
8,7	3,86	3,85	4
8,8	3,87	3,84	4
8,9	3,88	3,82	4
9	3,89	3,81	4
9,1	3,9	3,80	4
9,2	3,91	3,79	4
9,3	3,92	3,77	4
9,4	3,93	3,76	4
9,5	3,94	3,74	4
9,6	3,95	3,72	4
9,7	3,96	3,70	4
9,8	3,97	3,67	4
9,9	3,98	3,64	4
10	3,99	3,60	4
10,1	4	3,50	4
10,2	3,99	3,40	4
10,3	3,98	3,36	4
10,4	3,97	3,33	4
10,5	3,96	3,30	4
10,6	3,95	3,28	4
10,7	3,94	3,26	4
10,8	3,93	3,24	4
10,9	3,92	3,23	4
11	3,91	3,21	4
11,1	3,9	3,20	4

Temps	X	Y	Z
11,2	3,89	3,19	4
11,3	3,88	3,18	4
11,4	3,87	3,16	4
11,5	3,86	3,15	4
11,6	3,85	3,14	4
11,7	3,84	3,13	4
11,8	3,83	3,12	4
11,9	3,82	3,12	4
12	3,81	3,11	4
12,1	3,8	3,10	4
12,2	3,79	3,09	4
12,3	3,78	3,09	4
12,4	3,77	3,08	4
12,5	3,76	3,07	4
12,6	3,75	3,07	4
12,7	3,74	3,06	4
12,8	3,73	3,06	4
12,9	3,72	3,05	4
13	3,71	3,05	4
13,1	3,7	3,04	4
13,2	3,69	3,04	4
13,3	3,68	3,03	4
13,4	3,67	3,03	4
13,5	3,66	3,03	4
13,6	3,65	3,02	4
13,7	3,64	3,02	4
13,8	3,63	3,02	4
13,9	3,62	3,01	4
14	3,61	3,01	4
14,1	3,6	3,01	4
14,2	3,59	3,01	4
14,3	3,58	3,01	4
14,4	3,57	3,00	4
14,5	3,56	3,00	4
14,6	3,55	3,00	4
14,7	3,54	3,00	4
14,8	3,53	3,00	4

Temps	X	Y	Z
14,9	3,52	3,00	4
15	3,51	3,00	4
15,1	3,5	3,00	4
15,2	3,49	3,00	4
15,3	3,48	3,00	4
15,4	3,47	3,00	4
15,5	3,46	3,00	4
15,6	3,45	3,00	4
15,7	3,44	3,00	4
15,8	3,43	3,00	4
15,9	3,42	3,01	4
16	3,41	3,01	4
16,1	3,4	3,01	4
16,2	3,39	3,01	4
16,3	3,38	3,01	4
16,4	3,37	3,02	4
16,5	3,36	3,02	4
16,6	3,35	3,02	4
16,7	3,34	3,03	4
16,8	3,33	3,03	4
16,9	3,32	3,03	4
17	3,31	3,04	4
17,1	3,3	3,04	4
17,2	3,29	3,05	4
17,3	3,28	3,05	4
17,4	3,27	3,06	4
17,5	3,26	3,06	4
17,6	3,25	3,07	4
17,7	3,24	3,07	4
17,8	3,23	3,08	4
17,9	3,22	3,09	4
18	3,21	3,09	4
18,1	3,2	3,10	4
18,2	3,19	3,11	4
18,3	3,18	3,12	4
18,4	3,17	3,12	4
18,5	3,16	3,13	4

Temps	X	Y
18,6	3,15	3,14
18,7	3,14	3,15
18,8	3,13	3,16
18,9	3,12	3,18
19	3,11	3,19
19,1	3,1	3,20
19,2	3,09	3,21
19,3	3,08	3,23
19,4	3,07	3,24
19,5	3,06	3,26
19,6	3,05	3,28
19,7	3,04	3,30
19,8	3,03	3,33
19,9	3,02	3,36
20	3,01	3,40

ANNEXE 2

Trajectoire de l'obstacle mobile dans toutes les simulations, exprimée par rapport à son centre avec une orientation de 45° autour de l'axe Z.

Temps	X	Y	Z
0,1	3,87	-2,63	0,75
0,2	3,9	-2,60	0,75
0,3	3,93	-2,57	0,75
0,4	3,96	-2,54	0,75
0,5	3,99	-2,51	0,75
0,6	4,02	-2,48	0,75
0,7	4,05	-2,45	0,75
0,8	4,08	-2,42	0,75
0,9	4,11	-2,39	0,75
1	4,14	-2,36	0,75
1,1	4,17	-2,33	0,75
1,2	4,2	-2,30	0,75
1,3	4,23	-2,27	0,75
1,4	4,26	-2,24	0,75
1,5	4,29	-2,21	0,75
1,6	4,32	-2,18	0,75
1,7	4,35	-2,15	0,75
1,8	4,38	-2,12	0,75
1,9	4,41	-2,09	0,75
2	4,44	-2,06	0,75
2,1	4,47	-2,03	0,75
2,2	4,5	-2,00	0,75
2,3	4,53	-1,97	0,75
2,4	4,56	-1,94	0,75
2,5	4,59	-1,91	0,75
2,6	4,62	-1,88	0,75
2,7	4,65	-1,85	0,75
2,8	4,68	-1,82	0,75
2,9	4,71	-1,79	0,75
3	4,74	-1,76	0,75
3,1	4,77	-1,73	0,75
3,2	4,8	-1,70	0,75
3,3	4,83	-1,67	0,75
3,4	4,86	-1,64	0,75
3,5	4,89	-1,61	0,75
3,6	4,92	-1,58	0,75
3,7	4,95	-1,55	0,75

Temps	X	Y	Z
3,8	4,98	-1,52	0,75
3,9	5,01	-1,49	0,75
4	5,04	-1,46	0,75
4,1	5,07	-1,43	0,75
4,2	5,1	-1,40	0,75
4,3	5,13	-1,37	0,75
4,4	5,16	-1,34	0,75
4,5	5,19	-1,31	0,75
4,6	5,22	-1,28	0,75
4,7	5,25	-1,25	0,75
4,8	5,28	-1,22	0,75
4,9	5,31	-1,19	0,75
5	5,34	-1,16	0,75
5,1	5,37	-1,13	0,75
5,2	5,4	-1,10	0,75
5,3	5,43	-1,07	0,75
5,4	5,46	-1,04	0,75
5,5	5,49	-1,01	0,75
5,6	5,52	-0,98	0,75
5,7	5,55	-0,95	0,75
5,8	5,58	-0,92	0,75
5,9	5,61	-0,89	0,75
6	5,64	-0,86	0,75
6,1	5,67	-0,83	0,75
6,2	5,7	-0,80	0,75
6,3	5,73	-0,77	0,75
6,4	5,76	-0,74	0,75
6,5	5,79	-0,71	0,75
6,6	5,82	-0,68	0,75
6,7	5,85	-0,65	0,75
6,8	5,88	-0,62	0,75
6,9	5,91	-0,59	0,75
7	5,94	-0,56	0,75
7,1	5,97	-0,53	0,75
7,2	6	-0,50	0,75
7,3	6,03	-0,47	0,75
7,4	6,06	-0,44	0,75

Temps	X	Y	Z
7,5	6,09	-0,41	0,75
7,6	6,12	-0,38	0,75
7,7	6,15	-0,35	0,75
7,8	6,18	-0,32	0,75
7,9	6,21	-0,29	0,75
8	6,24	-0,26	0,75
8,1	6,27	-0,23	0,75
8,2	6,3	-0,20	0,75
8,3	6,33	-0,17	0,75
8,4	6,36	-0,14	0,75
8,5	6,39	-0,11	0,75
8,6	6,42	-0,08	0,75
8,7	6,45	-0,05	0,75
8,8	6,48	-0,02	0,75
8,9	6,51	0,01	0,75
9	6,54	0,04	0,75
9,1	6,57	0,07	0,75
9,2	6,6	0,10	0,75
9,3	6,63	0,13	0,75
9,4	6,66	0,16	0,75
9,5	6,69	0,19	0,75
9,6	6,72	0,22	0,75
9,7	6,75	0,25	0,75
9,8	6,78	0,28	0,75
9,9	6,81	0,31	0,75
10	6,84	0,34	0,75
10,1	6,87	0,37	0,75
10,2	6,9	0,40	0,75
10,3	6,93	0,43	0,75
10,4	6,96	0,46	0,75
10,5	6,99	0,49	0,75
10,6	7,02	0,52	0,75
10,7	7,05	0,55	0,75
10,8	7,08	0,58	0,75
10,9	7,11	0,61	0,75
11	7,14	0,64	0,75
11,1	7,17	0,67	0,75

Temps	X	Y	Z
11,2	7,2	0,70	0,75
11,3	7,23	0,73	0,75
11,4	7,26	0,76	0,75
11,5	7,29	0,79	0,75
11,6	7,32	0,82	0,75
11,7	7,35	0,85	0,75
11,8	7,38	0,88	0,75
11,9	7,41	0,91	0,75
12	7,44	0,94	0,75
12,1	7,47	0,97	0,75
12,2	7,5	1,00	0,75
12,3	7,53	1,03	0,75
12,4	7,56	1,06	0,75
12,5	7,59	1,09	0,75
12,6	7,62	1,12	0,75
12,7	7,65	1,15	0,75
12,8	7,68	1,18	0,75
12,9	7,71	1,21	0,75
13	7,74	1,24	0,75
13,1	7,77	1,27	0,75
13,2	7,8	1,30	0,75
13,3	7,83	1,33	0,75
13,4	7,86	1,36	0,75
13,5	7,89	1,39	0,75
13,6	7,92	1,42	0,75
13,7	7,95	1,45	0,75
13,8	7,98	1,48	0,75
13,9	8,01	1,51	0,75
14	8,04	1,54	0,75
14,1	8,07	1,57	0,75
14,2	8,1	1,60	0,75
14,3	8,13	1,63	0,75
14,4	8,16	1,66	0,75
14,5	8,19	1,69	0,75
14,6	8,22	1,72	0,75
14,7	8,25	1,75	0,75
14,8	8,28	1,78	0,75

Temps	X	Y	Z
14,9	8,31	1,81	0,75
15	8,34	1,84	0,75
15,1	8,37	1,87	0,75
15,2	8,4	1,90	0,75
15,3	8,43	1,93	0,75
15,4	8,46	1,96	0,75
15,5	8,49	1,99	0,75
15,6	8,52	2,02	0,75
15,7	8,55	2,05	0,75
15,8	8,58	2,08	0,75
15,9	8,61	2,11	0,75
16	8,64	2,14	0,75
16,1	8,67	2,17	0,75
16,2	8,7	2,20	0,75
16,3	8,73	2,23	0,75
16,4	8,76	2,26	0,75
16,5	8,79	2,29	0,75
16,6	8,82	2,32	0,75
16,7	8,85	2,35	0,75
16,8	8,88	2,38	0,75
16,9	8,91	2,41	0,75
17	8,94	2,44	0,75
17,1	8,97	2,47	0,75
17,2	9	2,50	0,75
17,3	9,03	2,53	0,75
17,4	9,06	2,56	0,75
17,5	9,09	2,59	0,75
17,6	9,12	2,62	0,75
17,7	9,15	2,65	0,75
17,8	9,18	2,68	0,75
17,9	9,21	2,71	0,75
18	9,24	2,74	0,75
18,1	9,27	2,77	0,75
18,2	9,3	2,80	0,75
18,3	9,33	2,83	0,75
18,4	9,36	2,86	0,75
18,5	9,39	2,89	0,75

Temps	X	Y	Z
18,6	9,42	2,92	0,75
18,7	9,45	2,95	0,75
18,8	9,48	2,98	0,75
18,9	9,51	3,01	0,75
19	9,54	3,04	0,75
19,1	9,57	3,07	0,75
19,2	9,6	3,10	0,75
19,3	9,63	3,13	0,75
19,4	9,66	3,16	0,75
19,5	9,69	3,19	0,75
19,6	9,72	3,22	0,75
19,7	9,75	3,25	0,75
19,8	9,78	3,28	0,75
19,9	9,81	3,31	0,75
20	9,84	3,34	0,75