

EI9IT387 : Etat de l'art projet robotique

---

## **Rapport Bibliographique**

### Conception d'un Rover Autonome avec Bras Robotisé Suiveur

---

*Étudiants :*

Adrien Clement  
Mathis Reinert  
Esteban Rodriguez

*Enseignant :*

Vincent Padois

*Client :*

Julien Geneste



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Système physique de suivi de drone</b>	<b>4</b>
2.1	Solutions alternatives . . . . .	4
2.2	Optimisation du système base mobile/bras . . . . .	5
2.3	Logiciels de simulation . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Système de pointage sur cible</b>	<b>7</b>
3.1	Pointage à l'aide d'un radar . . . . .	7
3.2	Utilisation de la <i>Computer Vision</i> . . . . .	7
3.3	Pointage laser . . . . .	7
3.4	Alignement de l'effecteur sur la cible . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Équilibrage du bras et de la base mobile</b>	<b>10</b>
4.1	Une solution statique . . . . .	10
4.2	Utilisation du contre-balancement en boucle fermée . . . . .	10
4.3	Stabilisation du système à travers sa modélisation mathématique . . . . .	11
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>13</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>15</b>



# 1 | Introduction

---

Le client, en la personne de Julien Geneste, a proposé comme objectif la conception d'un système de suivi d'objet volant à l'aide d'une base mobile pour le suivre au sol et d'un bras articulé devant pointer la direction de l'objet. Le souci de l'intégration physique du bras à la base mobile ainsi que de la communication/synchronisation entre ces deux modules constitue le premier sujet d'étude. Dans un second temps se pose la question du ciblage du drone d'après ses coordonnées et de l'exploitation de celles-ci par le système base mobile/bras dans le but d'identifier sa position dans l'espace en continu et d'en assurer le suivi.

Ce système, dans un premier temps, fera l'objet d'une simulation sur logiciel avant d'être validé lors d'une simulation en situation réelle avec des conditions particulières dans le but d'obtenir un *POC* (pour *Proof Of Concept* ou "preuve de concept" en français).

Le présent rapport vise à compiler et résumer les différentes recherches et études effectuées dans le cadre de l'élaboration de l'état de l'art sur les différents aspects évoqués plus hauts, donc les différentes méthodes de suivi d'un objet volant déjà existantes, l'intégration d'un bras robotisé à une base mobile et les possibilités de simulation d'un tel système, ainsi que la question de la dynamique et de l'équilibre de l'ensemble base mobile/bras.

## 2 | Système physique de suivi de drone

---

Dans cette section sont abordées les différentes solutions techniques existantes répondant au problème posé avec une emphase particulière sur l'ensemble base mobile/bras et la simulation de cette situation sur logiciel ou en situation réelle.

### 2.1 Solutions alternatives

Les différentes solutions identifiées afin d'effectuer le suivi d'un objet volant de type drone sont regroupables dans trois catégories : les bases fixes avec bras articulé, les bases mobiles terrestres avec bras articulé et les bases mobiles flottantes.

#### 2.1.1 Système base fixe/bras

Dans le cadre de l'observation et du suivi d'un objet volant mobile dans un terrain plat, dégagé et à la superficie limitée, une base mobile est superflue dans la mesure où l'orientation de l'effecteur du bras n'est pas prise en compte. Un bras avec une articulation pivot de type *pan-tilt* (avec *pan* pour "panoramique" et *tilt* pour "inclinaison") permet d'orienter l'effecteur n'importe où dans l'espace d'observation. Ce système est notamment utilisé dans de nombreux systèmes de surveillance avec des caméras de type *PTZ* (pour *Pan-Tilt-Zoom*).

Des applications dans la défense de tels systèmes existent déjà avec les *TIPS* (pour *Trakka Interceptor Protection System*) du fabricant Trakka ou le *KAPAN Counter Drone System* de METEKSAN [3] et sont souvent pairés avec des systèmes d'abattage de drone et des IA permettant de distinguer des drones d'autres objets volants (oiseaux, etc.).



FIGURE 2.1 – A gauche : le système *TIPS-I*. A droite : le système *KAPAN Counter UAS*.

#### 2.1.2 Système base mobile terrestre/bras

Dans le cadre d'un ensemble base mobile/bras, différentes bases sont envisageables selon l'usage. De tels ensembles existent déjà, à l'image du rover *Curiosity* envoyé par la *NASA* pour l'exploration de Mars. Ce rover, avec ses multiples roues et son système de suspension, est conçu pour pouvoir évoluer sur des terrains très irréguliers.

A plus petite échelle, le fabricant *Fictionlab* propose son *Leo Rover*, capable notamment d'embarquer des bras articulés du fabricant *Trossen Robotics* comme le *PincherX 100* ou le *WidowX 250*.

Il est également possible d'évoquer les bases pouvant se déplacer autrement qu'avec des roues, comme par exemple le robot *Spot* développé par *Boston Dynamics* qui peut d'ailleurs être souvent vu équipé d'un bras articulé. Des bases à chenilles existent aussi, à l'instar du *Kobra* développé par *iRobot*. Ces différentes bases présentent des avantages et des inconvénients par rapport à un ensemble de roues selon la topographie du terrain.



FIGURE 2.2 – A gauche : le robot *Spot* équipé d'un bras articulé. A droite : le robot *Kobra*

### 2.1.3 Système base mobile aérienne

Dans le cas d'un terrain accidenté ou incluant des obstacles à la mobilité de la base (topographie, lacs) ou à la visibilité de l'effecteur (arbres, constructions), une base mobile aérienne se déplaçant plus ou moins à la même altitude que l'objet ciblé constitue un atout. Le principe est d'utiliser un drone (de n'importe quelle sorte : *multirotor*, planeur ou autres) équipé d'un capteur photographique afin de capturer la cible tout en la suivant. En revanche, trouver des exemples existants et mis en circulation d'un tel dispositif semble compliqué.

## 2.2 Optimisation du système base mobile/bras

Dans le cadre d'un système base mobile/bras autonome, il est souhaitable que la base puisse franchir certains obstacles dans le cadre d'un terrain capricieux, sinon les éviter. Pour cela, du matériel tel qu'un LIDAR 3D lui permettant de cartographier son environnement et éviter les obstacles infranchissables (arbres, lacs, etc.) est à envisager.

Pour le tracking et selon la distance à laquelle le drone sera détecté, des caméras avec une forte capacité de zoom peuvent constituer un plus en cas de mobilité réduite (terrain accidenté) ou perte de vitesse de la base par rapport à l'objet suivi, mais en tant qu'effecteur leur poids peut alors poser problème par rapport à la charge utile maximale du bras articulé choisi.

La présence d'un GPS et d'une centrale inertielle permettrait également de récupérer en continu des informations sur le système (localisation, vitesse de déplacement, orientation, etc.) et ainsi garder une trace de la base en cas de perte ou d'accident.

## 2.3 Logiciels de simulation

Plusieurs logiciels permettent de simuler la situation désirée. Parmi ceux-là, *Gazebo* est celui ressortant le plus, avec notamment l'appui de certains constructeurs comme *Trossen Robotics* qui le mettent en avant pour la simulation de leurs produits. D'autres logiciels peuvent également ressortir comme *Webots* de chez *Cyberbotics*, *CoppeliaSim* de *Coppelia Robotics* ou encore *MORSE* (pour *Modular OpenRobots Simulation Engine*) [4]. Vous trouverez en Table 2.1, le comparatif entre les différents simulateurs.

Métrique	<i>CoppeliaSim</i>	<i>Gazebo</i>	<i>MORSE</i>	<i>Webots</i>
Utilisation gratuite	- Oui	- Oui	- Oui	- Oui
Open Source	- Non	- Oui	- Oui	- Oui
Compatible avec ROS	- <i>Plug-in</i> fourni	- Oui	- Oui	- <i>Plug-in</i> fourni
Langages de programmations pris en charge	- C/C++, Python, Lua, MATLAB, Java, Octave	- C/C++, Python	- Python	- C/C++, Python, Java, MATLAB
Contrôle de l'utilisateur sur la simulation <sup>1</sup>	- Oui	- Oui	- Visualisation uniquement	- Oui
Formats de modèle supportés	- URDF, SDF, Stl, Obj, Dxf, Collada	- URDF, SDF, Stl, Obj, Collada	- Blend	- Proto Nodes
Simulateurs de physique supportés	- Bullet, ODE, Vortex, Newton	- Bullet, ODE, DART, Simbody	- Bullet	- ODE

TABLE 2.1 – Comparaison des différents simulateurs disponibles.

Pour une simulation en situation réelle, l'accès à une cage de dimension 3x3x6 mètres est autorisé par le client pour des tests physiques du système choisi, de même que la possibilité d'y faire voler un drone pour évaluer le système de *tracking*.

1. Possibilité de démarrer/stopper/faire avancer pas par pas la simulation, ajouter des modèles n'importe quand



## 3 | Système de pointage sur cible

---

Un des premiers problèmes auquel se confronte le système est sa capacité à orienter le capteur photographique vers la cible désirée, qu'on connaisse ou non sa position à l'avance. Plusieurs solutions basées sur des concepts différents sont détaillées ci-dessous.

Cette tâche peut être divisée en plusieurs sous-tâches, chacune apportant son lot de défis techniques à résoudre :

- Détecter une cible dans l'espace.
- Garder la cible dans le champ de vision.
- Maintenir la cible avec précision sur un point donné.

Par ailleurs, une variable supplémentaire vient influencer les solutions envisagées : la possibilité d'accéder à la cible et d'y poser des capteurs actifs ou passifs. Dans le cadre spécifique du test en laboratoire à réaliser, nous aurons accès à sa position depuis la base mobile. Toutefois, il est nécessaire d'envisager toutes les configurations possibles.

### 3.1 Pointage à l'aide d'un radar

L'utilisation du radar pour détecter la position d'une cible est une application courante, cependant, comme évoqué précédemment, le problème d'identification des objets détectés persiste.

Néanmoins, il est possible d'utiliser des étiquettes (*tags*) constituées d'antennes pouvant être attachées à la cible. Ces étiquettes, combinées à des radars appelés radars harmoniques, permettraient de détecter avec précision la cible désirée [2]. Le principal inconvénient de cette technique réside dans la nécessité de pouvoir attacher ces étiquettes sur la cible, ce qui suppose un accès préalable à celle-ci. Dans ce cas précis, cette solution pourrait répondre aux trois tâches présentées, mais nécessiterait une infrastructure conséquente, avec plusieurs radars harmoniques au sol.

### 3.2 Utilisation de la *Computer Vision*

L'utilisation du capteur photographique comme outil d'aide à la visée peut s'avérer efficace, notamment lorsqu'il est couplé à de l'IA ou simplement à l'aide d'outils de traitement d'image. Il est également envisageable d'utiliser un double capteur photographique pour exploiter la *stéréo-vision*, ce qui permettrait une projection dans un repère réel et offrirait davantage d'informations sur la position précise de la cible.

Cette méthode pourrait répondre à la première et à la deuxième tâche. En effet, d'une part, un modèle de prédiction comme YOLO permettrait d'identifier précisément la cible, puis de la maintenir dans le champ de vision. Cependant, en raison de l'accumulation des imprécisions et de la latence engendrées par le système, il serait plus difficile de maintenir la cible avec précision sur un point fixe à l'écran.

### 3.3 Pointage laser

L'utilisation de laser en général se prête bien à l'aide à la visée puisqu'il permet de récupérer des informations spatiales sur l'objet [7]. Cependant, il subsiste un manque d'information sur le type d'objet. Si la cible

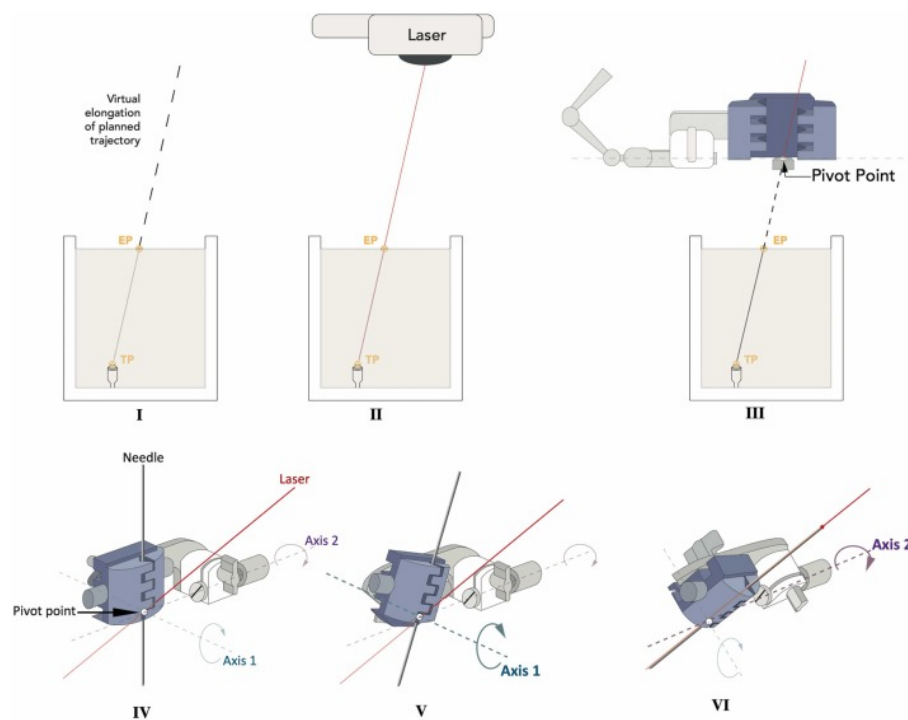


FIGURE 3.1 – Schéma illustrant le principe de pointage laser à l'aide d'une sonde dans le cadre d'une intervention chirurgicale.[7]

détectée est un mur, une personne ou un oiseau il est impossible de le savoir uniquement grâce à ce capteur. De plus, pour maximiser son efficacité, la pose d'un matériau réfléchissant sur la cible permettrait d'améliorer le suivant. Un autre problème réside dans la portée des capteurs lasers qu'il faudra prendre en compte selon le contexte d'utilisation et où se situe la cible ainsi que son milieu. Cependant, tout n'est pas à jeter car contrairement à d'autres solutions, la latence de ce capteur est très faible par rapport à des outils plus avancés comme avec la *computer vision* qui nécessite du traitement et du calcul supplémentaire.

Pour résumer, le pointage laser constitue un outil permettant de suivre avec précision et avec un minimum de puissance de calcul une cible de manière très précise, répondant donc à la deuxième et à la troisième tâche vues précédemment. Cependant, un accès permanent à la cible est requis, et la première tâche de détection de la cible devra être réalisée par un traitement auxiliaire.

### 3.4 Alignement de l'effecteur sur la cible

Dans le cadre du pointage avec un bras robotique classique à 6 degrés de liberté, il est essentiel d'aligner l'effecteur avec la cible souhaitée, tant en position qu'en orientation, afin que le capteur photographique puisse inclure la cible dans son champ de vision.

La littérature souligne l'importance d'un contrôle en vitesse et propose une gestion de l'erreur dans les cas où la trajectoire n'est pas connue à l'avance (ce qui est fréquent). Par ailleurs, le calcul de l'*axis-angle* est nécessaire pour assurer un alignement précis de l'effecteur sur la cible (Voir Figure 3.2).

Comme dit précédemment, l'un des principaux défis réside dans le contrôle dynamique du bras. Dans la majorité des applications, la trajectoire de l'effecteur n'est pas prédéfinie de manière exacte, ce qui rend le contrôle en vitesse particulièrement important. Lorsque la position et l'orientation de la cible sont variables ou inconnues à l'avance, un système de contrôle en vitesse permet de corriger rapidement toute déviation et d'atteindre la position désirée avec une grande précision.

Le contrôle PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) peut être employé pour ajuster les paramètres de mouve-

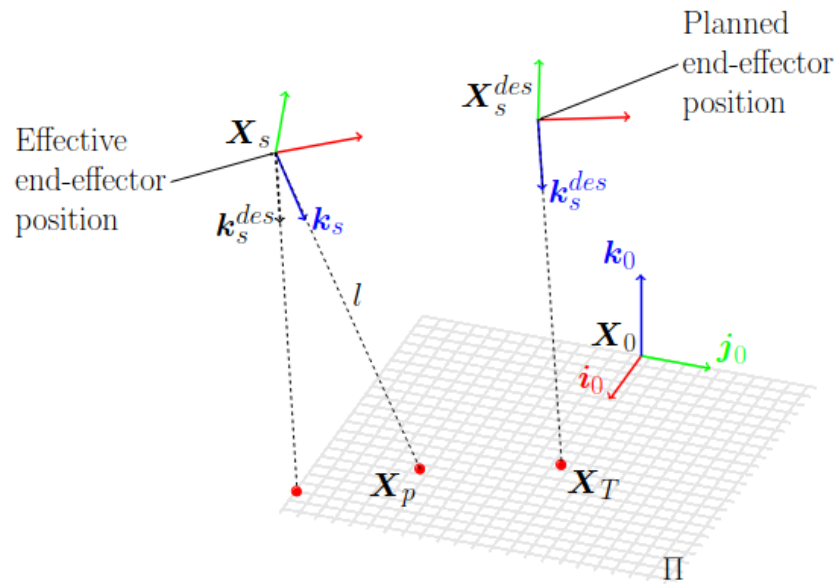


FIGURE 3.2 – Une illustration décrivant les paramètres nécessaires à la définition de la tâche de pointage. [5]

ment en fonction des erreurs observées pendant le processus de pointage. Cela permet de minimiser l'écart entre la position actuelle de l'effecteur et la cible visée, tout en compensant les effets de perturbations externes, telles que la gravité ou des variations dans le milieu de travail (comme les vibrations causées par le déplacement sur un terrain rugueux, par exemple).

Le calcul de l'*axis-angle*, qui détermine l'orientation nécessaire pour aligner l'effecteur avec la cible, est une approche géométrique courante dans ce contexte. Ce calcul repose sur la définition de deux vecteurs : celui représentant l'orientation actuelle de l'effecteur et celui correspondant à la direction vers la cible. L'*axis-angle* est ensuite utilisé pour ajuster l'orientation du bras en fonction de l'écart angulaire entre ces deux vecteurs.

Pour conclure, ces différentes méthodes de pointage présentent un fonctionnement radicalement différent. Chacune d'elles possède ses avantages et ses inconvénients, mais il n'est pas exclu de combiner ces différentes méthodes. Par exemple, il est envisageable d'imaginer une première reconnaissance par traitement d'image à l'aide d'une caméra, suivie d'un affinage du suivi à l'aide d'un laser.

## 4 | Équilibrage du bras et de la base mobile

---

Une autre contrainte apparaît : la notion d'équilibrage du système. En effet, selon la configuration du système, certains cas, comme celui de la configuration imposée (base mobile + bras à 6 degrés de liberté), font intervenir une notion d'équilibre.

Uniquement les scénarios où la contrainte d'équilibre sera explorée dans cette partie. Pour poser le contexte, l'utilisation d'un bras sur une base mobile pose souvent un problème d'équilibre et de répartition de la charge. Cette contrainte est très importante à prendre en compte, puisqu'elle peut engendrer un basculement complet du système.

En parlant de stabilité, la stabilité abordée dans ce qui va suivre est considérée dans le sens de l'équilibre des forces du système.

### 4.1 Une solution statique

Une solution simple et peu coûteuse en temps de développement consiste à mettre en place des barrières dans le système pour l'empêcher d'entrer dans une zone d'instabilité. Cette barrière, appelée *geo-fencing*, offre une solution de "moindre mal" permettant de résoudre ce problème de manière simple.

Cependant, elle s'accompagne de divers problèmes, notamment lors de l'établissement de cette barrière, qui nécessite une approche au cas par cas. En particulier, si cette barrière est définie de manière statique et qu'un cas non couvert survient, le système peut se déséquilibrer.

Dans un environnement contrôlé avec peu d'éléments perturbateurs, le *geo-fencing* peut s'avérer être une méthode rapide et peu coûteuse en temps de développement.

### 4.2 Utilisation du contre-balancement en boucle fermée

Une autre approche consiste à corriger constamment le déséquilibre grâce à une boucle de rétroaction pilotée par des capteurs comme un accéléromètre ou un gyroscope (souvent regroupés dans une centrale inertielle). Ces capteurs envoient constamment leurs données à un microcontrôleur, qui ajuste le système en temps réel pour le maintenir en équilibre (voir Figure 4.1).

Cet équilibre repose sur le calcul préalable d'un centre de gravité fixe. Le microcontrôleur compare les données reçues pour rapprocher le système de ce point d'équilibre.

Le principal problème avec cette méthode est qu'elle suppose un centre de gravité fixe. Or, dans le cas d'un bras articulé sur une base mobile, par exemple, le centre de gravité change dès que le bras est en mouvement.

Une première solution consiste à recalculer ce centre de gravité à chaque modification de la position du bras.

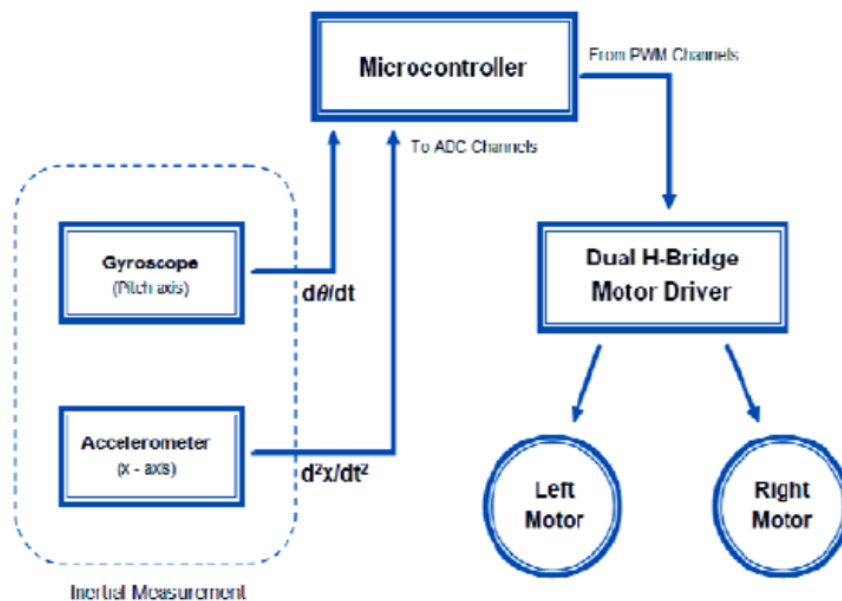


FIGURE 4.1 – Schéma de principe illustrant la compensation en boucle fermée [6]

### 4.3 Stabilisation du système à travers sa modélisation mathématique

Lors du passage d'un système en commande en force ou en vitesse, nous pouvons attribuer à celui-ci des tâches prenant la forme de grandeurs à minimiser, que nous allons résoudre à l'aide de méthodes numériques (comme la méthode des moindres carrés, par exemple). Après avoir calculé le polygone de sustentation<sup>1</sup> du système, un système cesse d'être à l'équilibre lorsque la verticale passant par le centre de gravité du système se trouve en dehors de ce polygone. La grandeur à minimiser est donc la distance entre le centre de gravité du système et le polygone de sustentation. Cela permettrait d'éviter en toute circonstance un basculement du système [1].

Notons que si nous ajoutons des contraintes fortes, comme l'interdiction pour le centre de gravité de sortir de ce polygone de sustentation, cette méthode se rapproche de la première méthode dite de *geo-fencing*, mais calculée dynamiquement.

Un tableau rassemblant les différents points notables pour chaque méthode a été dressé afin de faciliter la comparaison de celles-ci. (Voir Table 4.1)

1. La surface sur laquelle la projection orthogonale du centre de gravité d'un solide sur le sol, ou sur un support, doit se trouver pour permettre l'équilibre statique. (Source : Wikipédia)

Méthode	Avantages	Inconvénients
<b>Geo-fencing (Barrières statiques)</b>	- Facile et rapide à implémenter.	- Nécessite une configuration précise pour chaque cas d'utilisation. - Risque de déséquilibre en cas de situation non prévue.
<b>Contre-balancement en boucle fermée</b>	- Temps de réponse du système faible	- Dépend d'un modèle statique du centre de gravité. - Complexité accrue pour des systèmes où le centre de gravité change fréquemment.
<b>Modélisation cinématique ou dynamique</b>	- Permet une optimisation fine grâce à des méthodes numériques. - S'adapte en théorie à toutes situations	- Difficile à implémenter  - Nécessite une modélisation précise du système (Prenant en compte les forces appliquées non pas en un point mais sur un solide).

TABLE 4.1 – Comparaison des méthodes d'équilibrage d'une base mobile.

## 5 | Conclusion

---

En conclusion, cet état de l'art, couvrant les différentes problématiques du système, montre que celles-ci dépendent largement de l'intégration initiale et des conditions de départ : accès possible ou non à la cible, environnement (topographie, présence d'obstacles, etc.) configuration choisie (base fixe ou mobile, etc.). De plus, il existe souvent une granularité dans le temps de développement selon les solutions choisies : des solutions plus générales offrant davantage de robustesse, mais au prix d'un développement plus coûteux. Globalement, l'enjeu dans le temps à venir est de positionner un curseur pour chaque problématique en termes d'investissement en temps afin d'obtenir le résultat attendu.

Le but de ce rapport a été de fournir un panorama assez large de ce qui peut être fait pour répondre à la problématique donnée. Il a vocation à être repris et exploré dans toutes ses branches afin d'être affiné.





# Bibliographie

- [1] « (PDF) How to ensure stable motion of suspended wheeled mobile robot ». en. In : *ResearchGate* (oct. 2024). DOI : 10.1108/01439911111106354. URL : [https://www.researchgate.net/publication/233488602\\_How\\_to\\_ensure\\_stable\\_motion\\_of\\_suspended\\_wheeled\\_mobile\\_robot](https://www.researchgate.net/publication/233488602_How_to_ensure_stable_motion_of_suspended_wheeled_mobile_robot) (visité le 29/11/2024).
- [2] « (PDF) Tracking Insects with Harmonic Radar : a Case Study ». en. In : *ResearchGate* (oct. 2024). DOI : 10.1093/ae/50.4.212. URL : [https://www.researchgate.net/publication/233575706\\_Tracking\\_Insects\\_with\\_Harmonic\\_Radar\\_a\\_Case\\_Study](https://www.researchgate.net/publication/233575706_Tracking_Insects_with_Harmonic_Radar_a_Case_Study) (visité le 04/12/2024).
- [3] *Drone Camera Tracking Systems / Visual Drone Detection* — [unmannedsystemstechnology.com](https://unmannedsystemstechnology.com). <https://www.unmannedsystemstechnology.com/expo/drone-camera-tracking-systems/>. [Accessed 11-12-2024].
- [4] Andrew FARLEY, Jie WANG et Joshua A. MARSHALL. « How to pick a mobile robot simulator : A quantitative comparison of CoppeliaSim, Gazebo, MORSE and Webots with a focus on accuracy of motion ». In : *Simulation Modelling Practice and Theory* 120 (2022), p. 102629. ISSN : 1569-190X. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2022.102629>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X22001046>.
- [5] Lucas JOSEPH. « An energetic approach to safety in robotic manipulation ». en. Thèse de doct. Sorbonne Université, déc. 2018. URL : <https://hal.science/tel-02094844> (visité le 25/10/2024).
- [6] Omer SALEEM, Khalid MEHMOOD-UL-HASAN et Muhammad Anas IMTIAZ. « Attitude Control and Stabilization of a Two-Wheeled Self-Balancing Robot ». In : *Control Engineering and Applied Informatics* 17 (sept. 2015), p. 98-104.
- [7] Yannick SCHARLL et al. « Laser Target System in Combination with an Aiming Device for Percutaneous CT-Guided Interventions – An Accuracy Study ». In : *Academic Radiology* 30.12 (déc. 2023), p. 3047-3055. ISSN : 1076-6332. DOI : 10.1016/j.acra.2023.03.028. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1076633223001642> (visité le 04/12/2024).