

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSENGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA**  
**FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR**  
**DEPARTEMENT D'AERONAUTIQUE**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

Pour L'obtention Du Diplôme D'ingénieur D'état En Aéronautique

Option : **Installation**

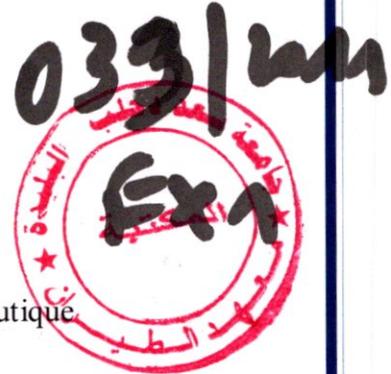
**THEME**

**LOCALISATION AUTOMATIQUE DES AVIONS SANS PILOTE**  
**AVEC DES FILTRES ROBUSTES INS/GPS**

Présent par :  
Terchi fatima zohra

Encadré par :  
Mr : rahmouni mohamed  
Mr : nemra karim

**Année universitaire**  
**2010/2011**



## DEDICACES

*Le projet m'a permis de m'épanouir, je l'ai fait avec beaucoup de passion et d'amour.*

JE NE SAURAI DIRE TOUTE MA GRATITUDE  
AU GRAND HOMME QUI EST DERRIÈRE MOI,  
QUI A SU ME REDONNER CONFIANCE EN MOI,  
QUI A ILLUMINE PAR SON SAVOIR MON CHEMIN,  
"MON PROMOTEUR"

A CELLE QUI M'A TANT DONNE SANS RECEVOIR, QUI N'A  
JAMAIS CESSÉ DE CROIRE EN MOI, QUI A TOUJOURS ÉTÉ UNE  
SOURCE INÉPUISABLE D'AMOUR ET D'AFFECTION, JE TE DOIS  
MA RÉUSSITE MAMAN ET JE DÉDIE CET HUMBLE DÉBUT  
JE T'AIME MAMA

A CELUI QUI A ÉTÉ TOUJOURS PRÉSENT POUR MON AVENIR,  
MERCİ D'ÊTRE INQUIET POUR L'AVANCEMENT DE MES ÉTUDES,  
MERCİ POUR TES CONSEILS SUR LA VIE ET TES MOTS D'ENCOURAGEMENTS  
JE T'AIME PAPA

MERCİE A MA SŒUR CHÉRIE, À L'UNIQUE SŒUR QUE J'AI AU MONDE, SARAH,  
D'ÊTRE TOUJOURS À MES COTÉ, PAR TA PRÉSENCE PAR TON AMOUR,  
POUR DONNER A CHAQUE JOUR UN RAYON DE SOLEIL SUR MA VIE.  
JE T'AIME SARSOURA

## REMERCIEMENTS

### *Je remercie dieu le tout puissant.*

*Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire Contrôle et commande à l'U.E.R Automatique de l'Ecole Militaire Polytechnique.*

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude au rapporteur Monsieur **NEMRA** d'avoir proposé le sujet, d'avoir assuré la direction et l'encadrement du travail présenté dans ce mémoire. Je le remercie aussi pour ses encouragements, ses suggestions et sa gentillesse.*

*Je tiens à dire ma reconnaissance envers Monsieur le professeur **RAHMOUNI Mohamed** qui, malgré les prérogatives qui sont siennes, a accepté sans réserve, d'encadrer ce projet de fin d'étude.*

*Je tiens à remercier chaleureusement le Capitaine **MOKDAD**, Cne **SNOUSSI**, Monsieur **AZZEZEN**, Monsieur **HENNI** et **Morad***

*Je ne manquerais pas non plus de dire un grand merci aux membres du jury*

*Mes remerciements s'étendent également*

*A mes amis :  
Sid Ahmed, Karim Adel  
Bahia, Fatima, Amina*

*Que dieu les protège*

*A toute ma famille  
Terchi et Aribi*

*A tous ceux qui, ne serait-ce qu'une fois, me furent d'une aide aussi petite soit-elle ; qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration du présent travail. A tous ceux pour qui je compte.*

*A tous mes enseignants depuis mon enfance...  
A vous tous je dis merci*

*FATIMA JOAIRA*

*Ma chère mère qui n'a jamais cessé de prier pour moi*

*Mon cher père à qui je dois tous mes respects*

*Que Dieu les protège*

*Sans eux, je n'aurais jamais vu la lumière du jour,*

*Ni devenu ce que je suis.*

## Liste des figures

<b>Figure 1.1.</b> Toupie chinoise.....	.....
<b>Figure 1.2.</b> Vis aérienne.....	.....
<b>Figure 1.3.</b> La stabilisation automatique de Sperry.....	.....
<b>Figure 1.4.</b> Quadrotor Breguet-Richet.....	.....
<b>Figure 1.5.</b> Quadrotor Oemichen.....	.....
<b>Figure 1.6.</b> Quadrotor Bothezat.....	.....
<b>Figure 1.7.</b> Quadrotor Convertawings.....	.....
<b>Figure 1.8.</b> Le Draganflyer.....	.....
<b>Figure 1.9.</b> Le Quattrocopter.....	.....
<b>Figure 1.10.</b> Catégories des drones.....	.....
<b>Figures 1.11.</b> Classification selon le mode de propulsion.....	.....
<b>Figure 1.12.</b> Avion 3D.....	.....
<b>Figure 1.13.</b> Le T-Wing et l'HoverEye.....	.....
<b>Figure 1.14.</b> Hélicoptères à trois hélices. Le Vectron (a), l'hélicoptère auto-stable (b) et le Tri-rotor de Compiègne (c).....	.....
<b>Figure 1.15.</b> Hélicoptères à quatre hélices: quadrotor de pennsylvanie (a), X19 quadtilt-rotor aircraft (b), le drone du laboratoire IBISC (c) et le drone de la NASA (d).....	.....
<b>Figure 1.16.</b> Support au combat : coopération UAV-UGV (à gauche), éclaireur (à droite)	
<b>Figure 1.17.</b> Quelques missions des drones.....	.....
<b>Figure. 2.1:</b> Boucle de perception-décision-action d'un robot.....	.....
<b>Figure.2. 2.</b> Les robots mobiles.....	.....
<b>Figure.2. 3 :</b> Les principaux types de roues des robots mobiles.....	.....
<b>Figure. 2.4.</b> Robot mobile de type unicycle.....	.....
<b>Figure. 2.5 :</b> Évolution des robots mobiles de type unicycle.....	.....
<b>Figure. 2.6 :</b> Robot mobile de type tricycle.....	.....
<b>Figure. 2.7 :</b> Projets de voitures autonomes à l'université de Carnegie Mellon [11].....	.....
<b>Figure.2. 8 :</b> Représentation d'un robot mobile omnidirectionnel.....	.....

<b>Figure.2. 9</b> : Robot mobile omnidirectionnel Nomadic XR4000.....	.....
<b>Figure. 2.10</b> : Robucab.....	.....
<b>Figure2.11</b> : Le robot martien Sojourner. (rovers).....	.....
<b>Figure. 2.12</b> : Le robot sous Marin TAIPAN.....	.....
<b>Figure. 2.13</b> : Schéma synoptique de la navigation autonome.....	.....
<b>Figure 2.14</b> . Centrale inertielle (IMU) (a), camera (b), GPS (c) et capteur à ultrason (d).....	.....
<b>Figure. 2.14</b> : Télémètres infrarouges Sharp.....	.....
<b>Figure. 2.15</b> : Détecteurs infrarouges Pololu.....	.....
<b>Figure. 2.16</b> : Télémètres ultrasonores Polaroid USP 3 et Migatron RPS 409 IS.....	.....
<b>Figure. 2.17</b> : Télémètre ultrasonore MSU08 (commercialisé par Lextronic .....	.....
<b>Figure.2. 18</b> : La famille des télémètres lasers Sick (Sick, 2004).....	.....
<b>Figure.2. 20</b> . Catre géométrique.....	.....
<b>Figure. 2.19</b> : Carte topologique.....	.....
<b>Figure. 2.20</b> : grille d'occupation.....	.....
<b>Figure. 2.21</b> : Landmark map.....	.....
<b>Figure. 2.22</b> : Carte 3D avec toute la séquence.....	.....
<b>Figure. 2.23</b> : Carte 3D avec sélection des images clefs.....	.....
<b>Figure.2. 24</b> : Carte 3D avec une autre sélection des images clefs.....	.....
<b>Figure.2. 25</b> : Passage du repère lié à la caméra au repère lié au sol.....	.....
<b>Figure.2. 26</b> : Schéma illustratif des repères.....	.....
<b>Figure 3.1</b> . CI à plate forme [28].....	.....
<b>Figure 3.2</b> . CI à composants liés embarqué à bord d'un avion [29].....	.....
<b>Figure 3.3</b> . Différents systèmes de coordonnées.....	.....
<b>Figure 3.4</b> . Angles d'Euler.....	.....
<b>Figure 3.5</b> .Mobil aérien à l'arrêt.....	.....
<b>Figure3.6</b> .Mobil aérien décrivant une trajectoire rectiligne.....	.....

<b>Figure 3.7.</b>	Mobil aérien décrivant une trajectoire circulaire.....
<b>Figure 3.8.</b>	Mobil aérien décrivant une trajectoire carrée.....
<b>Figure 3.9.</b>	Mesure de pseudo distance.....
<b>Figure 3.10</b>	Mesure par la phase.....
<b>Figure 3.11</b>	Positionnement absolu et différentiel.....
<b>Figure 3.12</b>	véhicule terrestre à l'arrêt.....
<b>Figure 3.13</b>	véhicule terrestre décrivant une trajectoire rectiligne.....
<b>Figure 3.14</b>	véhicule terrestre décrivant une trajectoire circulaire.....
<b>Figure 3.15</b>	véhicule terrestre décrivant une trajectoire carré .....
<b>Figure 3.16.</b>	Mode non couplé.....
<b>Figure 3.17.</b>	Mode indirect faiblement couplé en boucle ouverte.....
<b>Figure 3.18.</b>	Mode indirect faiblement couplé en boucle fermée.....
<b>Figure 3.19</b>	Mode indirect fortement couplé.....
<b>Figure 3.20</b>	mode direct.....
<b>Figure.4.1.</b>	Performance des techniques de couplage en mode direct pour un drone suivant un trajet ,(A) vitesse U,(B)vitesse V,(C)vitesse W ,.....
<b>Figure.4.2</b>	.Performance des techniques de couplage en mode direct pour un drone suivant un trajet ,(A) attitude teta ,(B)attitude phi,(C)attitude psi .....
<b>Figure.4.3.</b>	Evolution des erreurs x, y, z.....
<b>Figure .4.4.</b>	Evolution des erreurs U, V, W.....
<b>Figure .4.5.</b>	Evolution des erreurs phi,teta,psi.....
<b>Figure.4.6.</b>	Evolution d'erreur quadratique de X.....



## Table des matières

<b>RESUMES .....</b>	<b>.....</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>.....</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>.....</b>
<b>CHPITRE 1 : DEFINITION, ETAS DE L'ART ET GENERALITE SUR LES DRONES.....</b>	<b>.....</b>
1.1. Introduction.....	.....
1.2. Définition d'UAV.....	.....
1.3. Historique.....	.....
1.3.1. La genèse du vol verticale.....	.....
1.3.2. La naissance du vol autonome.....	.....
1.3.3. Du premier Quadrotor vers celui d'aujourd'hui.....	.....
1.4. Classification des drones.....	.....
1.4.1. Classification selon la taille.....	.....
1.4.2. Classification selon le mode de propulsion.....	.....
1.5. Applications et utilisation.....	.....
1.5.1. Applications militaires.....	.....
1.5.2. Applications civiles.....	.....
1.6. Conclusion.....	.....
<b>CHAPITRE 2 : NAVIGATION AUTONOME ET CARTOGRAPHIE .....</b>	<b>.....</b>
2.1. Introduction .....	.....
2.2. La navigation autonome .....	.....
2.2.1. Robot mobile autonome .....	.....
2.2.2. Les grandes classes de robots mobiles et leurs modèles.....	.....
2.2.2.1. Disposition des roues et centre instantané de rotation.....	.....
2.2.2.2. Robots mobiles de type unicycle.....	.....
2.2.2.3. Robots mobiles de type tricycle et de type voiture.....	.....
2.2.2.4. Robots mobiles omnidirectionnels.....	.....

2.2.3. Mode de fonctionnement de robot mobile .....	
2.2.4. Navigation autonome des robots mobiles .....	
2.2.5. Les problèmes-clés de la robotique mobile autonome .....	
2.2.6. Technologie des capteurs pour la localisation des drones.....	
2.2.6.1. Capteurs Proprioceptifs.....	
2.2.6.2. Capteurs Extéroceptifs.....	
2.3. Percevoir et interagir avec son environnement local.....	
2.3.1. Capteurs en robotique mobile .....	
2.3.1.1. Mesure de la position : le GPS.....	
2.3.1.2. Mesure de proximité et de distance.....	
2.3.1.3 Vision par ordinateur.....	
2.4. Localisation .....	
2.4.1. Odométrie .....	
2.4.1.1. Principe .....	
2.4.1.2. Erreurs et correction .....	
2.4.2. Explorer et représenter son environnement global.....	
2.4.3. Technique de localisation et cartographie .....	
2.5. Cartographie.....	
2.5.1. Définition.....	
2.5.2. Type de cartes .....	
2.5.2.1. Carte géométrique.....	
2.5.2. 2.Carte topologique.....	
<b>Erreur ! Source du renvoi introuvable.</b>	
2.5.2.3. Carte d'occupation.....	
2.5.2.4. Carte de points d'intérêt :(Landmark map).....	
2.5.3. Comparaison entre les différents types de carte voir.....	
2.6.1. Construction d'une carte 3D.....	
2.6.1.1. Caméras et nuage de points reconstruits.....	
2.6.1.2. D'une séquence d'images à un modèle tridimensionnel .....	

2.6.1.3. Algorithme de cartographie 3D.....	.....
2.6.1.4. Passage à un repère lié au sol.....	.....
2.7. Architecture de contrôle des drones.....	.....
2.7.1. Méthodes pour la localisation.....	.....
2.7.1.1. Navigation inertielle.....	.....
2.7.1.2. Navigation inertielle hybridée.....	.....
2.7.1.3. Navigation par mise en correspondance de carte.....	.....
2.7.2. Méthodes pour le pilotage et le guidage.....	.....
2.7.3. Méthodes pour la navigation autonome.....	.....
2.7.3.1. Le suivi de terrain.....	.....
2.7.3.2. La navigation par points de passage.....	.....
2.7.3.3. L'évitement d'obstacle et la gestion de zones d'exclusion.....	.....
2.8. Conclusion.....	.....
<b>CHAPITRE 3 : HYBRIDATION INS/GPS ET FILTRAGE DE KALMAN.....</b>	<b>.....</b>
3.1 Introduction.....	.....
3.2 Navigation inertielle.....	.....
3.2.1 Types de centrale inertielle.....	.....
3.2.2 Systèmes de coordonnées.....	.....
3.2.3 Equations de navigation.....	.....
3.2.4 Erreurs dans les INS.....	.....
3.2.5. Simulation d'une CI à composants liés .....	.....
3.3 Navigation par GPS.....	.....
3.3.1 Description du système.....	.....
3.3.2 Types de mesures GPS.....	.....
3.3.3 Précision du positionnement GPS .....	.....
3.3.4. Simulation des observations délivrées par le GPS .....	.....

3.4	Avantages et inconvénients.....	.....
3.5	Hybridation INS/GPS.....	.....
3.5.1	Mode non couplé.....	.....
3.5.2	Mode indirect faiblement couplé.....	.....
3.5.3	Mode indirect fortement couplé.....	.....
3.5.4	Mode direct .....	.....
3.6	Modèles d'état.....	.....
3.6.1	Mode indirect faiblement couplé.....	.....
3.6.2	Mode direct.....	.....
3.7	.Filtre de Kalman.....	.....
3.7.1	Modèle d'état.....	.....
3.8	Filtre de kalman étendu.....	.....
3.8.1	Modèle d'état et linéarisation.....	.....
3.8.2	Algorithme.....	.....
3.9	Conclusion.....	.....
	<b>CHAPITRE 4 : ETUDE DES PERFORMANCES DE L'HYBRIDATION</b>	
	<b>INS/GPS.....</b>	
4.1	Introduction.....	.....
4.2	Modèle direct étendu.....	.....
4.3	Résultats des simulations.....	.....
4.4	Conclusion.....	.....
	CONCLUSION GENERALE.....	.....
	ANNEXES .....	.....
	BIBLIOGRAPHIE.....	.....

## Résumé

Les centrales inertielles que ce soit les centrales « Strap Down » présentent l'avantage d'offrir une très grande précision à court terme mais dont les erreurs dérivent dans le temps et peuvent engendrer une dérive de la trajectoire au delà des limites admissibles. Notre mémoire a pour but de remédier au problème de la dérive en effectuant un recalage par filtrages de kalman grâce aux positions ou positions et vitesses données par un moyen de navigation de grande précision à long terme mais tout à fait différent qu'est le GPS. Plusieurs modes de couplage ont été testés et les performances étudiées. Le système hybride INS/GPS apparaît comme une solution de navigation meilleure aux solutions individuelles des deux systèmes.

## Mot clés

Filtre de Kalman, filtre de Kalman étendu, INS, CI, GPS, modes de couplages, filtrage direct, et filtrage indirect.

## Abstract

In our work, the inertial centrals , both « strap down » present the advantage of a very good précision at short term , but errors derive at the time and could cause a derive of trajectory far from authrised limits. Our memory should solve the problem by doing a correction using Kalman filters on inertial trajectory thanks to positions and speeds given by a navigation system of high precision at long time but really different wich is the GPS. The results proff the efficiency of the INS/GPS solution if we compare it to the two individual solutions.

## Key words

Kalman filter, Extended Kalman filter, INS, GPS, coupled mode, direct filtering, and indirect filtering.

## ملخص

تطرقنا في عملنا هذا الى نظام الملاحة العطالية الذي يتميز بالدقة على المدى القصير. و لكن الاخطاء تتراكم مع الوقت و تؤدي الى انحراف المسار اكثر من المقبول. الهدف من هذه الاطروحة هو حل المشكل. و ذلك بالتصحيح باستعمال مرشحات كالمان بفضل الموقع و السرعة المعطاة من نظام ملاحة ذو دقة عالية على المدى البعيد. و لكنه يختلف عن الاول. و هو نظام التمووقع العام. النتائج تبرهن فعالية تهجين النظامين مقارنة بالحلول الفردية.

## المفاتيح

مرشح كالمان, مرشح كالمان الممدد, نظام الملاحة العطالية, نظام التمووقع العام, اشكال التهجين, ترشيح مباشر, ترشيح غير مباشر.

# Introduction

***L**e sujet de cette thèse est le contrôle par une combinaison entre INS et GPS pour localiser automatiquement l'avion sans pilote avec les filtres de robustes et suivre ces missions de façon autonome. Cette introduction présente la motivation, les objectifs et les Contributions des avions sans pilote et la navigation autonome.*

## 1.1 Motivation

Les engins aériens sans pilote existent depuis longtemps et leur domaine d'application n'a cessé de croître ces dernières années. Développés à l'origine par les militaires, on les trouve aujourd'hui dans différentes activités telles que la surveillance des frontières, la protection civile, l'agriculture, le cinéma. . .

Ils ne se limitent d'ailleurs plus à de simples missions d'observation et sont désormais équipés de systèmes d'armes mis en œuvre sur les champs de bataille. De nouvelles applications sont à l'étude, aussi bien pour des avions de grande envergure que pour des micro-drones capables d'assister les soldats sur le terrain.

Ces engins volants sont très différents et les missions qui leurs sont confiées sont de plus en plus variées. Leur préparation devient par la même occasion plus complexe. Il faut être capable de définir des trajectoires avec des points de passage pour tous les avions évoluant sur la zone de conflit.

Bien que la navigation autonome d'un drone isolé pose encore quelques défis pratiques, les technologies utilisées ont fait leurs preuves et ont aujourd'hui une bonne maturité.

Les premières questions que l'on se pose sont : « Comment assurer la poursuite des avions ? » ou « Comment faire pour suivre une géométrie donnée ? » Ces questions relèvent de ce qu'on peut qualifier de stratégies de commandes et sont à l'origine de très nombreuses études, tant théoriques que pratiques. Bien qu'elles ne soient pas au centre de cette étude, y répondre est un passage obligé, et assez délicat, pour arriver à une expérimentation réelle.

Naviguer, qui provient du mot latin "navis" signifiant bateau, veut dire se déplacer sur une trajectoire tout en ayant les informations sur la position, sur la vitesse et sur l'attitude.

Avant notre ère, les grands navigateurs et les marins comptaient sur le soleil et les astres pour se diriger. De nos jours, des systèmes de navigations très élaborés sont capables de déterminer la position, la vitesse et l'orientation d'un mobile en tout point du globe. La navigation, de façon générale qu'elle soit aérienne, maritime ou terrestre, repose sur l'utilisation de divers instruments que nous pouvons classer de façon générale en deux catégories :

- Instruments de navigation autonomes : centrales inertielles (CI), compas magnétique, horizon artificiel, etc. ...

- Instruments de radio navigation : GPS, Radar, etc. ...

Dans ce travail, nous nous intéressons en particulier à la navigation :

- inertielle
- par GPS
- hybride : association de l'INS et du GPS

Les premiers systèmes de navigation inertielle (INS) étaient des CI à plateforme [6]. Ensuite, petit à petit, de nouvelles centrales dites à composants liés sont apparues [6]. Ces centrales dotées d'une autonomie "quasi-totale" et d'une immunité contre le brouillage sont devenues l'élément clef de navigation en particulier pour les applications militaires [3]. Pour que les CI permettent de déterminer l'attitude, la position et la vitesse d'un mobile, il faut que celles-ci soient initialisées. Le résultat de l'initialisation et la technologie des CI influent pour

beaucoup dans la précision du calcul [8].

Depuis les années 80, le système de positionnement global (GPS) par satellites, développé par l'armée américaine, est de plus en plus utilisé dans le domaine de la navigation [2]. Dans certaines applications, il est même un sérieux concurrent pour les CI vu sa précision parfois centimétrique via des traitements spécifiques sur lesquels nous reviendrons ultérieurement [2]. Toutefois, le GPS présente certains inconvénients : entre autres il reste totalement dépendant de l'armée américaine et il est très souvent sensible au brouillage intentionnel ou non [2] [7].

Par ailleurs, très récemment de nombreux travaux de recherche s'intéressent à l'utilisation simultanée des données issues du GPS et celles de l'INS pour une meilleure communément appelé hybridation INS/GPS. Ce dernier nécessite très souvent l'utilisation d'outils de filtrage notamment le filtrage de Kalman (FK) et ses variantes

### **1.2 Objectifs**

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- Comprendre la navigation inertielle et la navigation par GPS.
- La relation entre les avions sans pilotes et la navigation autonome
- Parvenir aux avantages du drone par rapport à un aéronef standard étudier
- proposer des solutions et des algorithmes pour Faire une hybridation INS/GPS par le filtrage de kalman afin de localiser automatiquement l'avion sans pilote avec des filtres robuste
- Réaliser une validation expérimentale des algorithmes développés à travers différents outils de simulation et par des expérimentations réelles.

### **1.3 Contributions**

Les principales contributions de cette thèse, avec les références associées, sont :

- La mise en place d'une architecture logicielle, pour réaliser des simulations réalistes aussi bien que les expérimentations réelles ;

Les outils que nous avons mis en œuvre ou réalisés sont :

- Une bibliothèque Matlab rassemblant les algorithmes de génération de *trajectoires et de gestion de la configuration d'une fusion* ;
- l'intégration des algorithmes dans le simulateur

## **1.4 Organisation du document**

Afin de mieux résumer, le projet de fin d'études qui s'inscrit dans le cadre de la navigation INS/GPS, nous avons organisé le présent rapport comme suit:

Outre d'introduction, ensuite Le premier chapitre est destiné à présenter la définition, état de l'art et généralités sur les drones, dans le deuxième chapitre, nous allons présenter la navigation autonome et les capteurs utilisés pour un drone ,le troisième chapitre nous présentons les différentes configurations d'hybridation possibles entre l'INS et le GPS qui nécessitent l'utilisation, comme annoncée au préalable, d'outils de filtrage tels que le FK et le filtrage de Kalman étendu, le quatrième chapitre Etude des performances de l'hybridation INS/GPS et avec des implémentations et des expérimentations, simulées et réelles. Enfin la conclusion et perspectives

# Chapitre 1

## Définitions, état de l'art et généralités sur les drones

*D*ans ce chapitre, nous allons proposer dans un premier temps une définition de ce qu'est un drone avec des exemples. Ensuite, nous traitons le mode d'utilisation d'un drone.

## **1.1. Introduction**

Les drones sont des engins volants qui sont capables de transporter des caméras, des capteurs, des équipements de communication ou d'autres dispositifs. Ils sont utilisés pour réaliser des missions de reconnaissance, de recherche d'informations ou des opérations de combat.

Dans ce chapitre, nous présentons les drones, leurs historiques, leurs classifications ainsi que leurs champs d'application. Nous décrivons également les capteurs généralement utilisés par ces engins volant ainsi que l'intelligence embarquée qui leurs permettent de remplir les missions accordées.

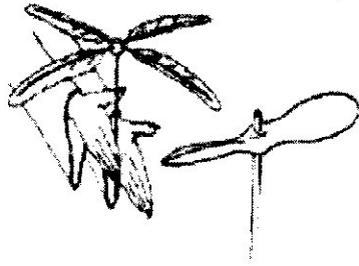
## **1.2. Définition d'UAV**

Un UAV (Unmanned Aerial Vehicle) ou drone est : un véhicule aérien motorisé, qui ne transporte pas d'opérateur humain, utilise la force aérodynamique pour assurer sa portance, peut voler de façon autonome ou être piloté à distance, être non réutilisable ou récupérable et qui emporte une charge utile létale ou non létale.

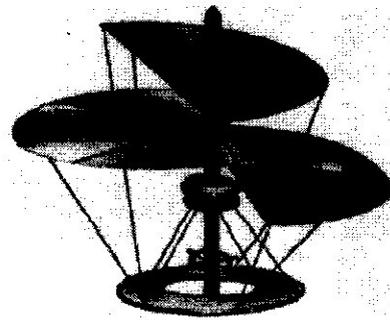
## **1.3. Historique**

### **1.3.1. La genèse du vol verticale**

Il semble que ce sont les Chinois qui ont eu la première idée du vol vertical 400 ans avant J-C en inventant un jouet qui s'élevait en le faisant tourner rapidement entre les mains, dit « toupie chinoise » **Figure 1.1** [1]. Il est probable, cependant, que la première personne à avoir envisagé la possibilité d'un hélicoptère assez puissant pour soulever un être humain, et à avoir effectivement procédé à des expériences avec des maquettes de sa conception fut Léonard de Vinci, qui a conçu en 1483 un appareil à rotor hélicoïdal appelé « la vis aérienne », identifié en tant qu'ancêtre de l'hélicoptère **Figure 1.2**.



*Figure 1.1. Toupie chinoise*

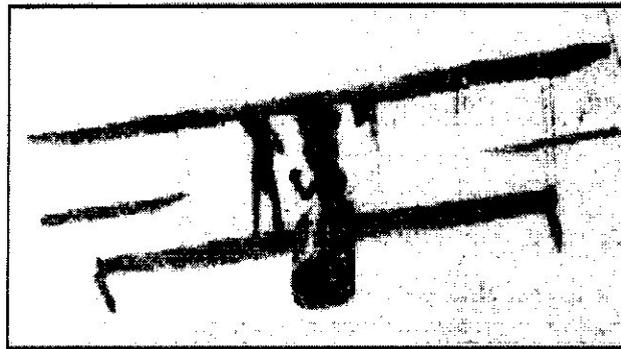


*Figure 1.2. Vis aérienne*

### 1.3.2. La naissance du vol autonome

Nikola Tesla était le premier à développer le concept d'une machine volante contrôlée à distance et il l'a démontré avec ce qui l'a appelé "tele-automation" en 1898. Tesla a transmis son idée à Peter Cooper Hewitt, qui l'a fait passer à Elmer Sperry, ce dernier a établi le domaine de l'aviation sans pilote.

En 1914, le fils de Sperry a démontré publiquement une stabilisation automatique d'un avion **Figure 1.3** [2].

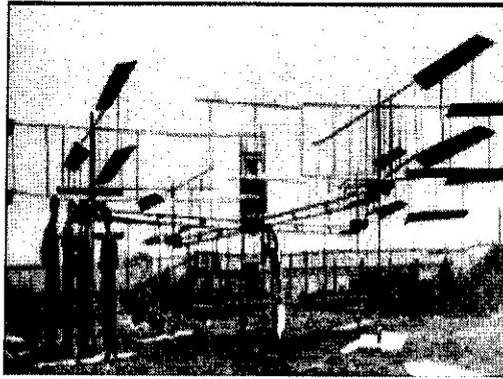


*Figure 1.3. La stabilisation automatique de Sperry*

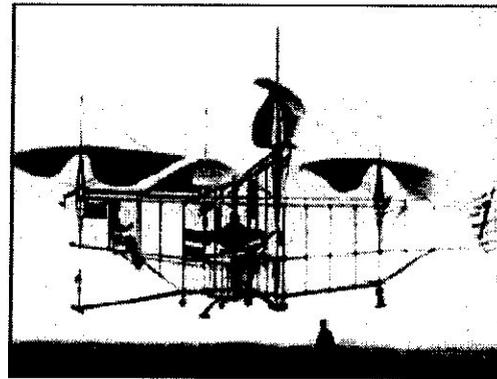
### 1.3.3. Du premier Quadrotor vers celui d'aujourd'hui

Au début du 20ème siècle on a commencé à construire des hélicoptères à quatre rotors. Le Quadrotor de Breguet-Richet **Figure 1.4** en 1907 fut le premier, il avait des rotors de 8.1m de largeur chacun à quatre pales [3, 2].

En 1908 et 1912 on a rapporté d'autres tentatives de construction/vol des frères Breguet et de Richet.



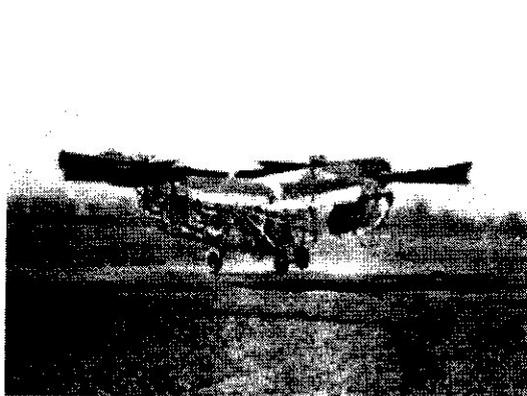
*Figure 1.4. Quadrotor Breguet-Richet*



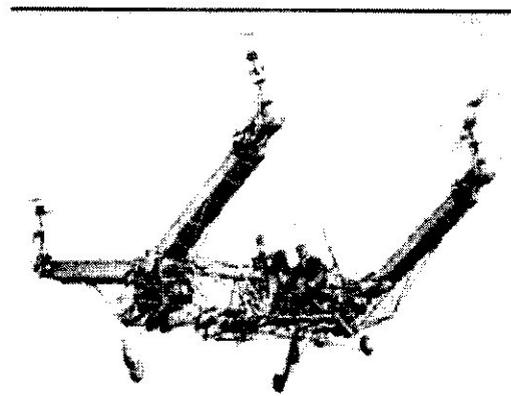
*Figure 1.5. Quadrotor Oemichen*

En 1920, Etienne Oemichen a construit un quadrotor **Figure 1.5** de 800kg qui a réussi à voler en 1924, en effectuant un circuit fermé de 1km avec une vitesse moyenne de 2.2 m/s, ce record de vol a été battu par Raul Pateras Pescara 9 mois après, et son quadrotor s'est abîmé en faisant un crash.

Sous le patronage de l'armée américaine, George de Bothezat a construit en 1922 un hélicoptère de 1678Kg Voir la **figure 1.6**. L'hélicoptère avait quatre rotors à six pales montés aux extrémités des faisceaux de 18 m de longueur [3, 2].



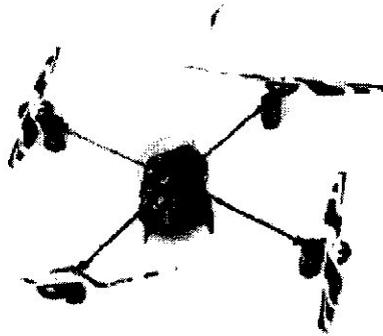
**Figure 1.6. Quadrotor Bothezat**



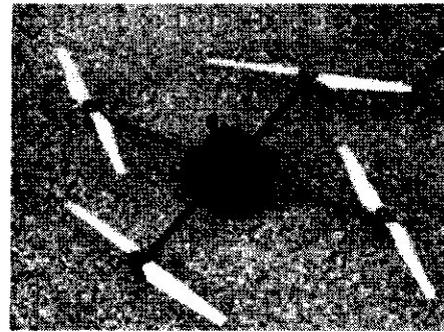
**Figure 1.7. Quadrotor Convertawings**

Dans les années 50, Convertawings a construit un quadrotor (**Figure 1.7**) disposant de rotors de 5.92 mètres de diamètre et des ailes pour générer une portance vers l'avant. Un quadrotor appelé Curtiss-Wright X-19A a aussi été conçu et testé en vol en 1963.

Malgré la multitude de conception, la configuration quadrotor n'était pas mise en application et n'a pas obtenu beaucoup d'attention. La miniaturisation de l'électronique, le développement des microprocesseurs et des capteurs inertiels a poussé les concepteurs et chercheurs à s'intéresser à la configuration 'Quadrotor' de taille réduite dans des applications mini drones ce qui a donné naissance à des séries de cet hélicoptère en version radio commandé (RC) tels que Roswell flyer, Airrobot, Quattrocopter et le draganflyer.



*Figure 1.8. Le Draganflyer*

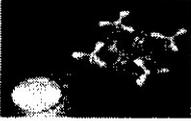


*Figure 1.9. Le Quattrocopter*

Le champ d'application des drones est très vaste et ceci a fait que plusieurs projets de recherche à travers le monde ont vu le jour. Des chercheurs de plusieurs communautés scientifiques, telles que la robotique, l'aéronautique, l'automatique, le traitement du signal et l'informatique, avec le support de l'industrie et des gouvernements, participent au développement de telles robots (de la conception à la commande en passant par la réalisation), le but est de développer des prototypes fortement manœuvrables, fiables et extrêmement stables.

Il semble que les américains sont les pionniers dans les mini quadrotor avec : Le projet Hoverbot de l'université de Michigan en 1993, le projet Gizmocopter en Californie et d'autres, la plupart des premiers projets ont été abandonnés à cause des difficultés matérielles [69].

Depuis 2001, plusieurs centres de recherche et de groupes de spécialistes en aéronautique ont commencé à publier les premiers résultats de la modélisation et la commande de cet hélicoptère à quatre rotors tels que : les travaux de l'université de Compiègne et le projet 'Robovolint' en France, ceux de l'université de Lakehead au Canada et beaucoup d'autres. Le tableau ci-dessous dénombre des projets de conception de quadrotor, la liste n'est pas exhaustive :

Projets	Université / Ecole	Plateforme
Le Mesicopter (1999-2001)	Stanford aux USA	
Le X4-Flyer (2002,2004)	Université Nationale Australienne	
Le X4-Flyer	CEA en France	
OS4 (2003-2007)	EPFL en Suisse	
Quentin H4	EITA en France.	
Le quadrotor de Pennsylvanie	Pennsylvanie en USA	
STARMAC	l'université de Stanford aux USA	

*Tableau. 1.1. Projets de conception du Quadrotor*

## 1.4. Classification des drones

Il n'existe pas une façon unique pour classer les drones, ils peuvent être répartis selon plusieurs critères : autonomie, portée, altitude, mission, systèmes de contrôles...etc.

### 1.4.1. Classification selon la taille

Les drones sont classiquement répartis selon leurs taille (ou leurs capacité d'emport, ce qui est sensiblement équivalent). On distingue ainsi les drones HALE, MALE, les micros drones et les mini drones. Ces catégories sont résumées ci-après :

**HALE** (Haute Altitude Longue Endurance) : Ce sont des drones de grande taille, le plus souvent à voilure fixe. Ils sont capables de rester très longtemps en vol et de collecter des informations sur de très longues périodes (entre 12 et 48 heures).

**MALE** (moyenne Altitude Longue Endurance) : sont utilisés pour des vols de longue durée à une moyenne altitude opérationnelle, ayant une grande autonomie.

Ces deux types de drones font partie de la classe de grande taille. Ils peuvent embarquer des armes, ce qui nécessite généralement d'avoir un humain dans la boucle, ce dernier doit garder la décision de tir et pouvoir à tout moment annuler la mission.

**Micro drones** : Ce sont des drones ayant des tailles variant du centimètre à quelques dizaines de centimètres. Généralement propulsés électriquement. Ainsi, ils permettent de faire des vols à l'intérieur. Elles se caractérisent par une faible charge.

**Mini drones** : Ce sont des drones plutôt légers et de taille réduite (jusqu'à quelques kilogrammes et d'une envergure jusqu'à 1 à 2 mètre) facilitant la mise en œuvre d'une autonomie relativement faible (de 10 à 30 minutes) et généralement utilisés pour l'observation de zones difficiles d'accès.

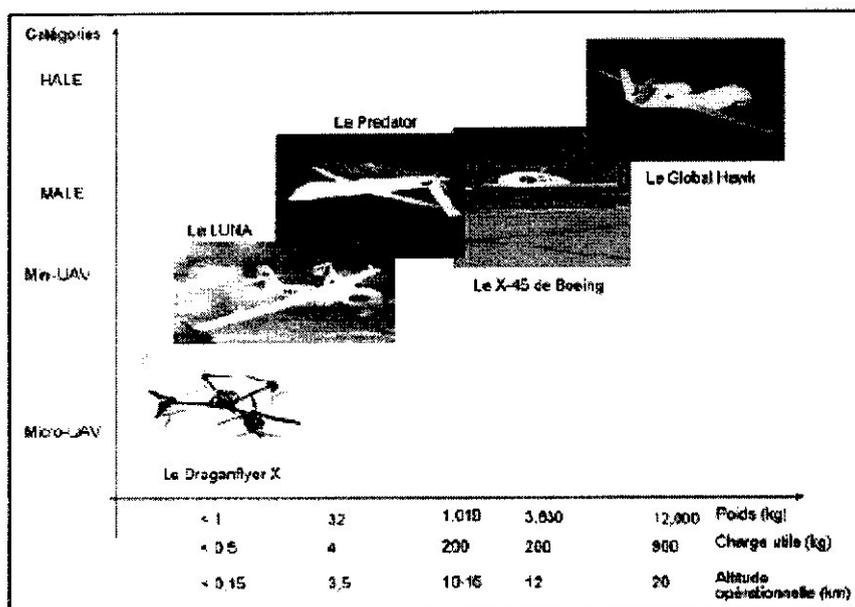


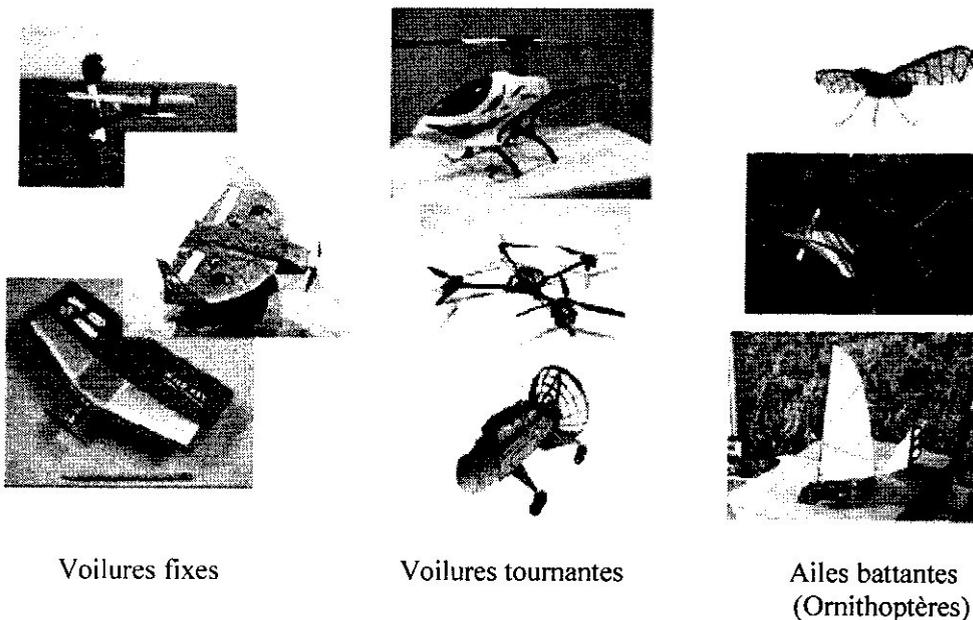
Figure 1.10. Catégories des drones

Ces différentes classes correspondent naturellement à différentes applications.

### 1.4.2. Classification selon le mode de propulsion

Le fonctionnement aérodynamique fournit une autre possibilité de classification. Ainsi, les drones peuvent être structurés principalement en trois familles :

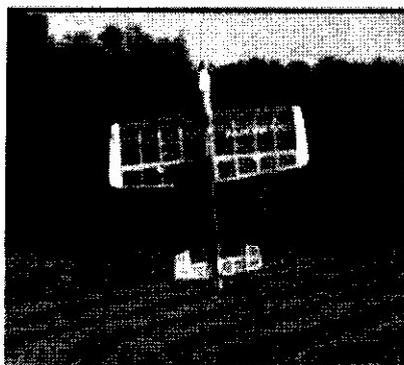
- **Drones à Voilures fixes** : sont des drones utilisant les ailes fixes dans leur mode de déplacement. Qui sont soit :
  - Plus lourd que l'air : type avion.
  - Plus léger que l'air : type Dirigeable.
- **Drones à ailes battantes** : de type oiseau ou insecte.
- **Drones à voilures tournantes** : Une étude bibliographique montre que la recherche en robotique aérienne s'est principalement focalisée sur ce type qui présente les avantages suivants [1] :
  - Un décollage et atterrissage vertical, ce qui réduit l'espace de décollage/atterrissage.
  - La capacité d'effectuer un vol stationnaire à basse vitesse et à faible altitude.



*Figures 1.11. Classification selon le mode de propulsion*

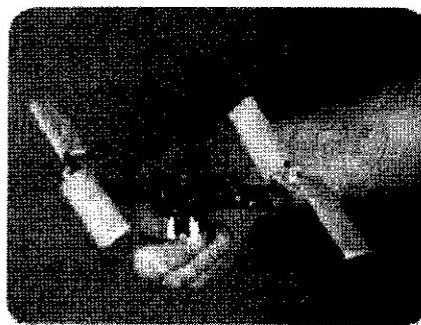
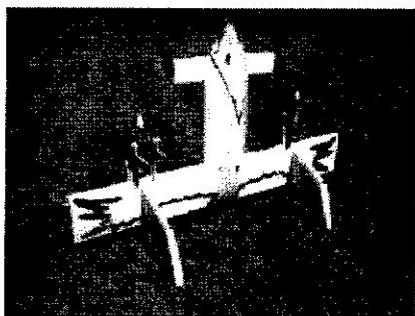
Les drones à voilure tournante se subdivisent, quant à eux, en quatre sous-classes qui sont comme suit :

**Les Mono-rotor** : Ils sont caractérisés par l'utilisation d'un seul rotor comme actionneur principal. Dans cette catégorie, nous trouvons essentiellement les convertibles **Figure 1.12**.



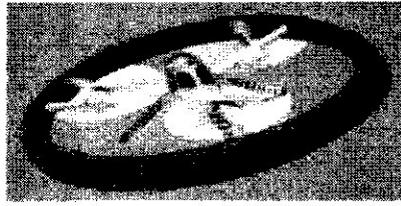
*Figure 1.12. Avion 3D*

**Les birotors** : Il existe plusieurs types de configurations à deux rotors tels que l'hélicoptère classique composé d'un rotor principal et d'un rotor en queue. Les appareils sans plateaux cycliques (autre que les hélicoptères notamment) utilisent des ailerons pour faire pivoter les rotors. Il existe aussi des appareils possédant deux rotors sur le même axe tournant dans des sens opposés et des ailerons qui baignent dans le flux d'air de ces rotors **Figure 1.13**.

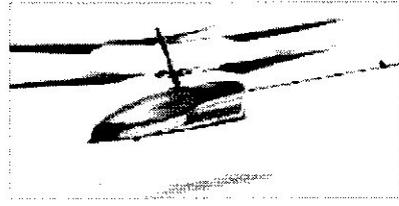


*Figure 1.13. Le T-Wing et l'HoverEye*

**Les tri-rotors** : Moins performant en vol que le quadrotor, le tri-rotor **Figure 1.14** est constitué de deux rotors à l'avant qui tournent dans des sens opposés pour modifier le tangage et d'un rotor en arrière pour régler le roulis.



(a)



(b)

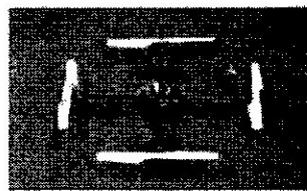


(c)

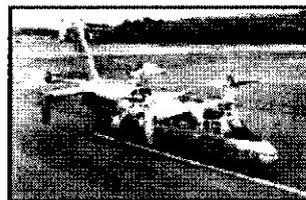
*Figure 1.14. Hélicoptères à trois hélices. Le Vectron (a), l'hélicoptère auto-stable (b) et le Tri-rotor de Compiègne (c).*

**Les Quadrotors:** Un quadrotor est un engin volant doté de quatre rotors placés aux extrémités d'une armature en croix **Figure 1.15**. Ces quatre rotors lui fournissent la force verticale (portance) qui lui permet de décoller.

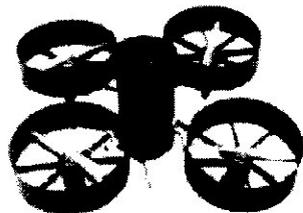
Son principe de fonctionnement est comme suit : Deux rotors de même axe tournent dans le sens horaire tandis que les deux autres tournent dans le sens inverse. Ses mouvements possibles sont le Gaz (montée ou descente verticale), le Roulis ou Tangage qui est une orientation que prend le quadrotor, et le Lacet qui est une rotation du quadrotor autour de lui même.



(a)



(b)



(c)



(d)

*Figure 1.15. Hélicoptères à quatre hélices: quadrotor de pennsylvanie (a), X19 quadtilt-rotor aircraft (b), le drone du laboratoire IBISC (c) et le drone de la NASA (d).*

La conception du quadrotor offre des avantages par rapport à d'autres plateformes, à savoir :

- Sa simple mécanique.
- Sa manœuvrabilité élevée.
- Son décollage et atterrissage verticaux.

Une telle plateforme est commandée en variant seulement la vitesse de rotation des quatre moteurs.

Son aptitude de voler près d'un obstacle, alors que pour d'autres configurations conventionnelles ce comportement est difficile.

L'agilité et l'interconnexion du quadrotor offrent une bonne dynamique et ses quatre rotors peuvent permettre une charge utile accrue.

Par contre, le quadrotor reste limité en termes de durée d'autonomie qui est dû à la forte consommation de l'énergie électrique. En plus le décollage de cet engin nécessite de fortes considérations sur le poids et la répartition des charges.

## **1.5. Applications et utilisation**

Les drones sont développés à l'origine pour remplacer l'homme dans des environnements ou des situations dangereuses. Ces engins sans pilote présentent de nombreux avantages [4] :

- Diminution des contraintes liées à la sécurité
- Missions à haut risque, zone non accessible à l'homme;
- Réduction des coûts.

### **1.5.1. Applications militaires**

Les lourdes pertes subies pendant la seconde guerre mondiale par les aviations d'observation de chacun des antagonistes suscitérent l'idée d'un engin d'observation militaire sans équipage (ni pilote, ni observateur). Pendant la guerre du Vietnam, les Américains ont utilisé des drones (Firebee) pour localiser les rampes de lancement des missiles sol-air soviétiques «SAM-2».

Lors de la guerre du Golfe, les britanniques, les français commencèrent à se servir de drones et les américains l'ont fait appel au drone (Pioneer) pour la surveillance jour/nuit, l'acquisition des objectifs, et les réglages de l'artillerie.

De leur côté, les Israéliens ont saturé les défenses aériennes le long du canal de Suez lors de la guerre du Kippour (1973) et ce, avec un grand nombre de drones bon marché.

Mais c'est surtout au cours des trois derniers conflits majeurs impliquant les forces internationales de l'OTAN (intervention au Kosovo, en Afghanistan et en Irak) que les drones ont vraiment pu démontrer leurs capacités opérationnelles, accomplissant indifféremment des missions d'observation aérienne ou d'attaque au sol. En règle générale, on peut décomposer en trois grandes catégories, les missions militaires confiées aux drones :

- La surveillance et le renseignement,
- Le support au combat,
- Le combat proprement dit.



*Figure 1.16. Support au combat : coopération UAV-UGV (à gauche), éclaireur (à droite)*

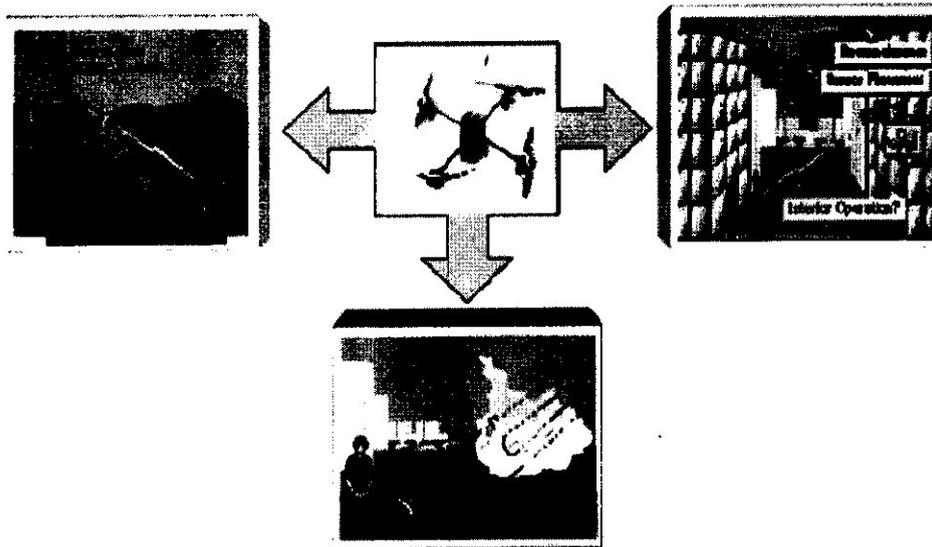
### 1.5.2. Applications civiles

Tous les avantages reconnus des drones pour les applications militaires sont transposables aux applications civiles. On peut citer :

- Dans le domaine de la sécurité: surveillance de l'espace aérien, du trafic urbain et interurbain ;
- Dans la gestion des risques naturels: surveillance de l'activité des volcans;
- La protection de l'environnement: mesure de la pollution de l'air, surveillance des forêts ;
- L'intervention dans des sites hostiles: milieux radioactifs, déminage des terrains (cartographie de terrains minés);
- La gestion des grandes infrastructures: barrages, lignes à haute tension, pipelines;
- L'agriculture: détection et traitement des cultures;

- La prise de vue aérienne dans la production des films ;
- Télécommunications mobiles, publicité et radiodiffusion (télévision, ...) ;
- Géodésie et mesures atmosphériques.

Ils sont destinés à servir d'œil déporté du fantassin dans des environnements urbains **Figure 1.17** à gauche, ils peuvent également servir de capteur déposé (ou relais de communication) pour observer une zone de combat **Figure 1.17** à droite, collecte de gaz sur un nuage suspect **Figure 1.17** en bas.



*Figure 1.17. Quelques missions des drones*

Toutes ces missions nécessitent un contrôle performant de l'appareil et par conséquent des informations précises sur son état absolu et / ou relatif à son environnement.

Si drone veut d'abord dire engin volant, drone veut aussi dire engin autonome. Un drone est un robot capable de se mouvoir seul et de planifier ses actions avec un degré d'autonomie plus ou moins grand. Mais pour se mouvoir seul, il faut d'abord s'orienter dans l'espace, se repérer dans l'environnement, détecter les obstacles, etc. C'est cet aspect que nous allons aborder à présent, en faisant un tour d'horizon des capteurs actuels qui permettent aux drones de construire leur connaissance de leur état et de l'environnement.

## **1.6. Conclusion**

Nous avons pu constater la grande diversité des techniques existantes dans le domaine des drones que ce soit au niveau de leur grande variété de configuration, ou encore de l'intelligence embarquée. Nous allons à présent nous concentrer sur l'une des configurations qui a connu un grand intérêt dans cette dernière décennie, que ce soit à l'échelle scientifique ou industrielle à savoir le quadrotor pour lequel nous allons faire une fusion entre deux systèmes de navigation afin de localiser le drone, puis nous allons définir des stratégies de commande et en fin on va citer l'erreur entre les deux systèmes

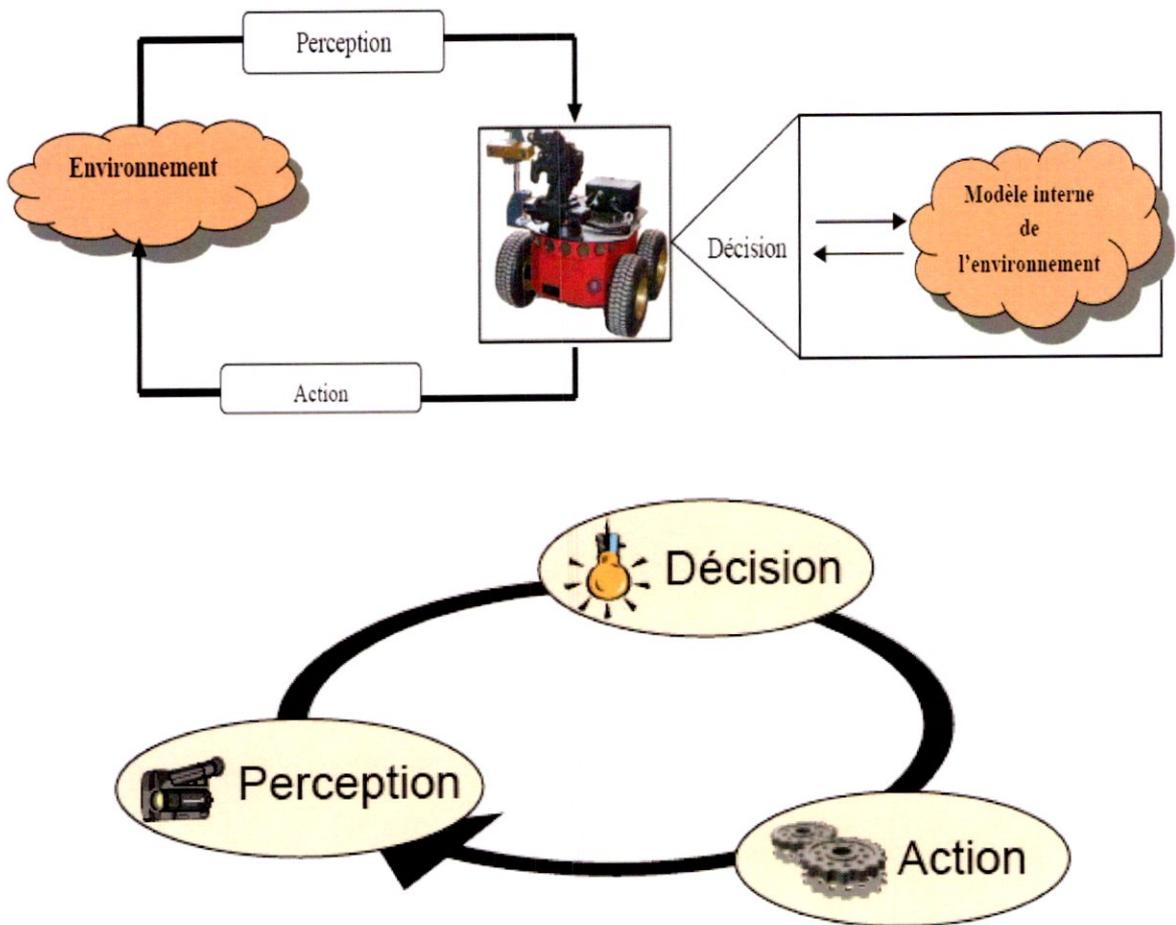
# Chapitre 2

## Navigation autonome et cartographie

*L*a navigation autonome d'un robot mobile est, depuis une dizaine d'années, un sujet qui passionne beaucoup les chercheurs, aussi bien dans le domaine de l'automatique et du traitement du signal que dans celui de l'informatique. La robotique mobile trouve ses applications dans divers domaines [5] La sécurité, l'aide à la personne, le transport, et plus récemment dans la grande distribution avec l'apparition des chariots intelligents. Le marché est énorme et les retombées économiques très importantes.

## 2.1. Introduction

L'un des buts majeurs de la robotique mobile réside en la création de robots autonomes. Un robot est une machine agissant physiquement sur son environnement en vue d'atteindre un objectif qui lui a été assigné. Cette machine est polyvalente et capable de s'adapter à certaines variations de ses conditions de fonctionnement. Un robot est doté de fonctions de perception, de décision et d'action. Le robot réalise donc de façon continue la boucle illustrée par la figure **Fig. 2.1**. Il possède des capacités de mouvement propres et peut entrer en interaction avec des objets de son environnement. Il a, en outre, la faculté de coopérer à divers degrés avec l'homme.



*Fig. 2.1: Boucle de perception-décision-action d'un robot.*

Un robot est dit autonome si, moyennant une spécification externe “ de haut niveau ” de la tâche à accomplir, il est capable de la mener à bien sans intervention humaine [6]. Le

développement d'un robot autonome pose de nombreux problèmes fondamentaux dans des domaines variés et bien distincts.

En robotique mobile, la navigation est définie comme une tâche qui consiste, pour le robot, à atteindre un point but dans l'environnement. Le contexte de réalisation de la tâche va conditionner les moyens nécessaires à mettre en œuvre pour permettre au robot de naviguer. Parmi toutes les fonctions requises par un système robotique mobile pour atteindre cet objectif, certaines sont primordiales [7] :

- **Perception et modélisation de l'environnement** : Le robot mobile doit être muni d'un système de perception capable de fournir des informations précises sur l'état de l'environnement qui l'entoure, afin de pouvoir identifier et regrouper des éléments utiles pour une représentation fiable et consistante de cet environnement.

- **Localisation** : Le succès dans l'exécution d'une tâche associée à un déplacement est directement lié à la capacité du robot mobile à se positionner par rapport à son environnement. Cette localisation doit être la plus précise possible, et dépend de la fiabilité de la représentation de l'environnement construite par le système de perception du robot.

- **Planification et exécution de mouvements** : Le robot mobile doit être capable de se déplacer de façon sûre à travers l'espace libre de l'environnement, en prenant en compte la présence d'éventuels obstacles statiques et mobiles. Le problème du déplacement du robot dans l'environnement rencontre les mêmes difficultés que la localisation et la modélisation liées à la présence d'incertitudes qui font que le déplacement commandé ne sera pas de manière générale exécuté parfaitement.

Ces fonctions ne sont pas indépendantes. On note, bien évidemment, que la perception de l'environnement intervient dans toutes. La planification de mouvement s'intéresse au calcul automatique de chemins sans collision pour un robot quelconque (robot mobile, bras manipulateur, manipulateur mobile...) évoluant dans un environnement encombré d'obstacles. Appréhender le domaine de la planification de mouvement nécessite une formalisation mathématique du problème, lié notamment à l'introduction de l'espace des configurations.

Dans ce chapitre, nous allons uniquement nous intéresser par la navigation autonome et la cartographie. Nous ne nous préoccupons ni des problèmes que peut poser le suivi d'une trajectoire, ni même des problèmes liés à la localisation du robot. Nous voulons viser comme objectif, dans le contexte de la robotique mobile, de sensibiliser le lecteur sur les travaux qu'il reste à mener pour aboutir à la réalisation d'un robot mobile totalement autonome.

## 2.2. La navigation autonome

### 2.2.1. Robot mobile autonome

De manière générale, on regroupe sous l'appellation *robots mobiles* l'ensemble des robots à base mobile, par opposition notamment aux robots manipulateurs. L'usage veut néanmoins que l'on désigne le plus souvent par ce terme les robots mobiles à roues. Ce sont en effet les systèmes les plus étudiés, parce qu'ils sont plus simples à réaliser que les autres types de robots mobiles, ce qui permet d'en venir plus rapidement à l'étude de leur navigation. Ce type de robots est notamment très souvent utilisé pour l'étude des systèmes autonomes. Vient ensuite la robotique mobile à pattes, avec notamment la robotique humanoïde, mais également des robots avec un nombre de pattes plus élevé qui offrent de bonnes propriétés pour la locomotion en milieu difficile (milieux forestiers et agricoles). La stabilité des mouvements de ce type de robots est en particulier un thème de recherche important. Enfin il existe également de nombreux autres types de robots mobiles sont en effet le plus souvent désignés par leur type de locomotion, qu'ils soient marcheurs, marins, sous marins, drones volants, aériens, micro et nano robots. Généralement, l'étude de ce type de robots se fait dans des thématiques spécifiques avec des problèmes particuliers à l'application visée.

On peut estimer que les robots mobiles à roues constituent le gros des robots mobiles. Historiquement, leur étude est venue assez tôt, suivant celle des robots manipulateurs, au milieu des années 70. Leur faible complexité en a fait de bons premiers sujets d'étude pour les roboticiens intéressés par les systèmes autonomes. Cependant, malgré leur simplicité apparente (mécanismes plans, à actionneurs linéaires), ces systèmes ont soulevé un grand nombre de problèmes difficiles. Nombre de ceux-ci ne sont d'ailleurs toujours pas résolus. Ainsi, alors que les robots manipulateurs se sont aujourd'hui généralisés dans l'industrie, rares sont les applications industrielles qui utilisent des robots mobiles. Si l'on a vu depuis peu apparaître quelques produits manufacturiers (chariots guidés) ou grand public (aspirateur), l'industrialisation de ces systèmes bute sur divers problèmes délicats. Ceux-ci viennent essentiellement du fait que contrairement aux robots manipulateurs prévus pour travailler exclusivement dans des espaces connus et de manière répétitive, les robots mobiles sont destinés à évoluer de manière autonome dans des environnements peu ou pas *structurés*<sup>1</sup>.

Néanmoins, l'intérêt indéniable de la robotique mobile est d'avoir permis d'augmenter considérablement nos connaissances sur la *localisation* et la *cartographie* de systèmes autonomes. La gamme des problèmes potentiellement soulevés par le plus simple des robots mobiles à roues en fait

---

<sup>1</sup> Environnement structuré : terminologie consacrée habituelle pour dire que l'on connaît la géométrie de l'environnement dans lequel évolue le robot.

un sujet d'étude à part entière et forme une excellente base pour l'étude de systèmes mobiles plus complexes. On pourra néanmoins jeter un œil curieux

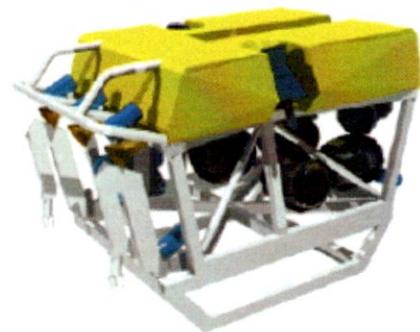
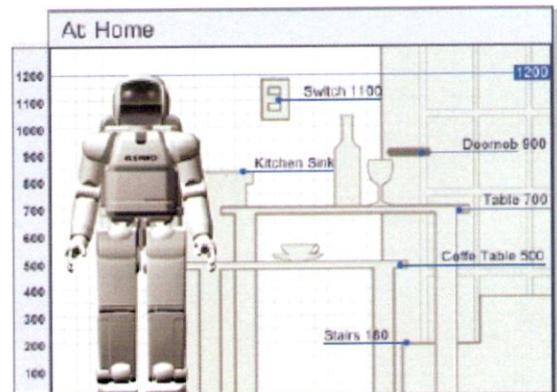
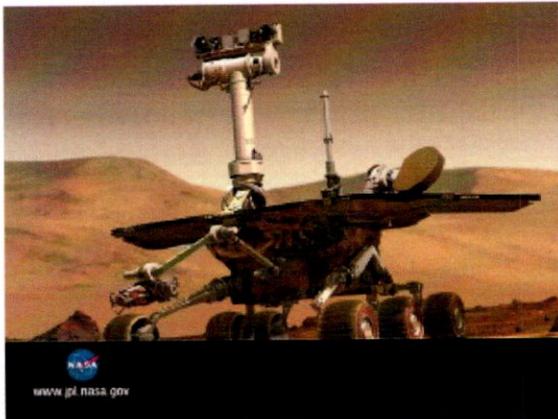
**Fig.2.** 2aux robots mobiles qui **se moquent** définitivement de ce que le sol soit plat ou non. On notera à cette occasion que tout engin mobile autonome peut se voir affublé du qualificatif de robot par les roboticiens, qu'il marche, rampe, vole ou nage.

## 2.2.2. Les grandes classes de robots mobiles et leurs modèles

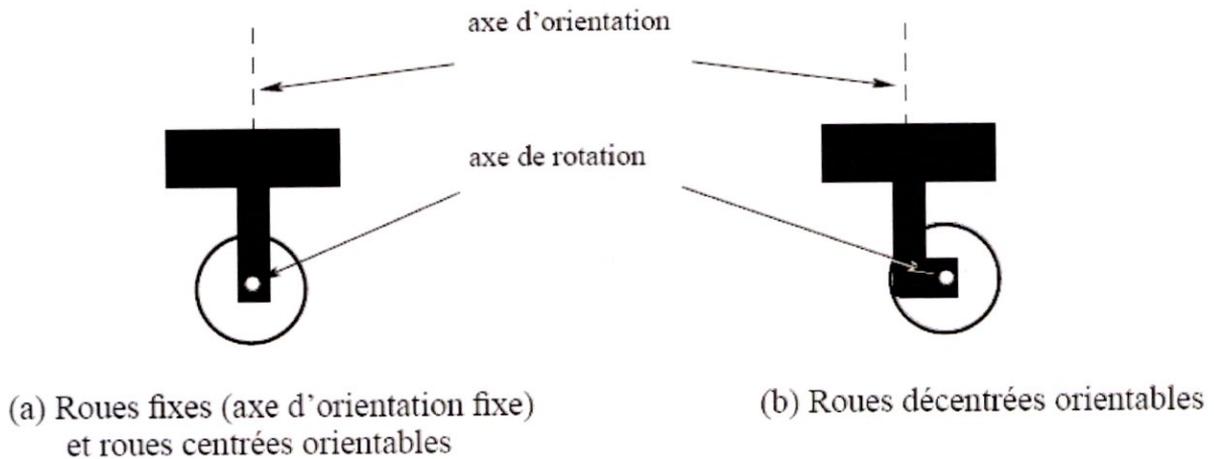
### 2.2.2.1. Disposition des roues et centre instantané de rotation

C'est la combinaison du choix des roues et de leur disposition qui confère à un robot son mode de locomotion propre. Sur les robots mobiles, on rencontre principalement trois types de roues voir **Fig.2. 3** :

- les **roues fixes** dont l'axe de rotation, de direction constante, passe par le centre de la roue ;
- les **roues centrées orientables**, dont l'axe d'orientation passe par le centre de la roue ;
- les **roues décentrées orientables**, souvent appelées *roues folles*, pour lesquelles l'axe d'orientation ne passe pas par le centre de la roue.



**Fig.2. 2.** Les robots mobiles



**Fig.2.3 : Les principaux types de roues des robots mobiles**

De manière anecdotique, on rencontrera aussi des systèmes particuliers, tels que les roues suédoises, les roues à plusieurs directions de roulement, etc.

Bien évidemment, pour un ensemble de roues donné, toute disposition ne conduit pas à une solution viable. Un mauvais choix peut limiter la mobilité du robot ou occasionner d'éventuels blocages. Par exemple, un robot équipé de deux roues fixes non parallèles ne pourrait pas aller en ligne droite ! Pour qu'une disposition de roues soit viable et n'entraîne pas de glissement des roues sur le sol, il faut qu'il existe pour toutes ces roues un unique point de vitesse nulle autour duquel tourne le robot de façon instantanée. Ce point, lorsqu'il existe, est appelé *centre instantané de rotation* (CIR). Les points de vitesse nulle liés aux roues se trouvant sur leur axe de rotation, il est donc nécessaire que le point d'intersection des axes de rotation des différentes roues soit unique. Pour cette raison, il existe en pratique trois principales catégories de robots mobiles à roues, que l'on va présenter maintenant.

### 2.2.2.2. Robots mobiles de type unicycle

#### Description

On désigne par *unicycle* un robot actionné par deux roues indépendantes et possédant éventuellement un certain nombre de roues folles assurant sa stabilité. Le schéma des robots de type unicycle est donné à la figure **Fig. 2.4**. On y a omis les roues folles, qui n'interviennent pas dans la cinématique, dans la mesure où elles ont été judicieusement placées.

Ce type de robot est très répandu en raison de sa simplicité de construction et de propriétés cinématiques intéressantes. La figure **Fig. 2.4** présente différents robots de type unicycle, depuis Hilare, en 1977, jusqu'aux modèles actuels, qui, à l'instar du robot Khepera, tendent parfois vers l'extrême miniaturisation.

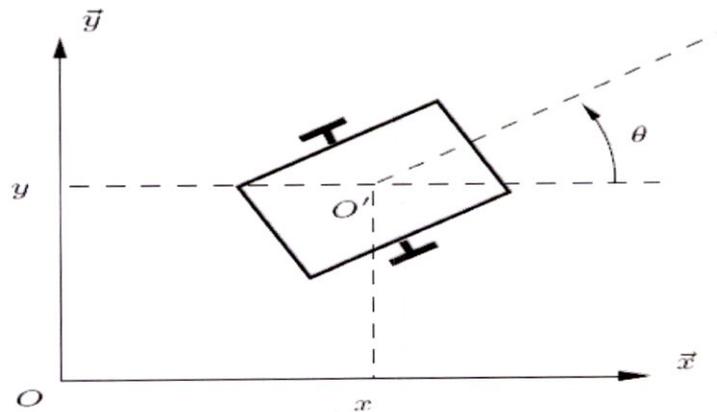


Fig. 2.4. Robot mobile de type unicycle



*Hilare*, LAAS-CNRS, Toulouse, 1977 [8]

*Entraînement* : batteries au plomb 24V, 2 moteurs DC avec codeurs incrémentaux

*Calculateur* : 4 processeurs Intel 80286, pas d'OS, multi-bus, modem série radio à 9600 bauds

*Capteurs* : odométrie, 16 capteurs US, un télémètre laser

*Dimensions* (L × l × h) : 80 cm × 80 cm × 60 cm

*Poids*: 400 kg



*Pioneer P3-DX*, ActiveMedia Robotics, 2004 [9]

*Entraînement* : batteries 252Wh, 2 moteurs DC avec codeurs incrémentaux

*Calculateur* : microcontrôleur Hitachi HS-8, I/O Bus, 2 ports série

*Capteurs* : odométrie, 8 capteurs US en façade + options (bumpers, télémètre laser, gyroscope)

*Autonomie* : 24 – 30 h

*Vitesse* : maximum 1,6 m/s

*Dimensions* (L × l × h) : 44 cm × 38 × 22 cm

*Poids*: 9 kg (charge admissible: 23 kg)



*Khepera II*, K-team, EPFL, Lausanne, 2002 [10]

*Entraînement* : adaptateur secteur ou accus NiMH, 2 moteurs DC avec codeurs incrémentaux

*Calculateur* : processeur Motorola 68331 @25 MHz, 512 Ko RAM, 512 Ko mémoire Flash

programmable par le port série, communication par port série jusqu'à 115 Kbauds (limitée à 9600 bauds en liaison radio), 3 entrées analogiques 0 à 4.3 V, 8 bits

*Capteurs* : 8 capteurs infrarouges de luminosité et de proximité (100 mm de portée) et un détecteur de batteries faibles

*Autonomie* : 1 h en fonctionnement continu, l'ajout d'extensions diminuant l'autonomie

*Vitesse*: maximum 1 m/s, minimum 0,02 m/s

*Dimensions* (D × h) : 7 cm × 3 cm

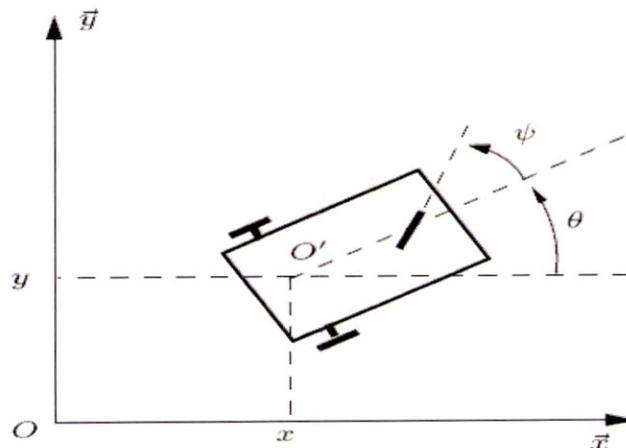
*Poids*: 80 g (charge admissible: 250 g)

**Fig. 2.5** : Évolution des robots mobiles de type unicycle

### 2.2.2.3. Robots mobiles de type tricycle et de type voiture

#### Description :

Considérons tout d'abord le cas du *tricycle*, représenté à la figure de la figure **Fig. 2.6**. Ce robot est constitué de deux roues fixes de même axe et d'une roue centrée orientable placée sur l'axe longitudinal du robot. Le mouvement est conféré au robot par deux actions : la vitesse longitudinale et l'orientation de la roue orientable. De ce point de vue, il est donc très proche d'une voiture. C'est d'ailleurs pour cela que l'on étudie le tricycle, l'intérêt pratique de ce type de robot (peu stable !) restant limité [ref.](#)



**Fig. 2.6** : Robot mobile de type tricycle

Le cas du robot *de type voiture* est très similaire à celui du tricycle. La différence se situe au niveau du train avant, qui comporte deux roues au lieu d'une. Cela va de soit, on rencontre beaucoup plus souvent ce type de systèmes. On parle de robot dès lors que la voiture considérée est autonome [11], donc sans chauffeur ni télépilotage. Il s'agit là d'un des grands défis issus de la robotique mobile. Deux réalisations sont montrées à la figure **Fig. 2.7**, basées sur des voitures de série instrumentées.



Fig. 2.7 : Projets de voitures autonomes à l'université de Carnegie Mellon [11]

#### 2.2.2.4. Robots mobiles omnidirectionnels :

##### Description :

Un robot mobile est dit *omnidirectionnel* si l'on peut agir indépendamment sur les vitesses : vitesse de translation selon les axes  $\vec{x}$  et  $\vec{y}$  et vitesse de rotation autour de  $\vec{z}$ . D'un point de vue cinématique, il est montré que cela ne soit pas possible avec des roues fixes ou des roues centrées orientables [Campion 96]. On peut en revanche réaliser un robot omnidirectionnel en ayant recours à un ensemble de trois roues décentrées orientables ou de trois roues suédoises disposées au sommet d'un triangle équilatéral voir figure Fig.2. 8. Du point de vue de la transmission du mouvement, ceci ne va pas sans poser de problème.

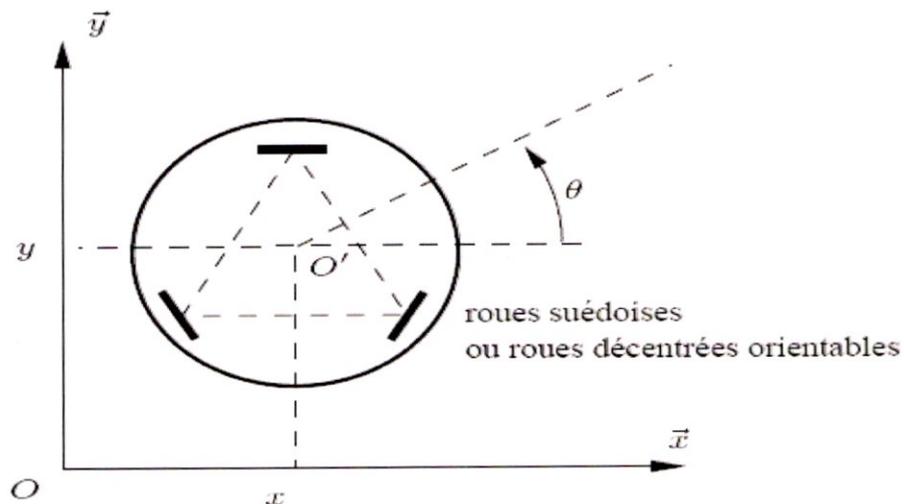


Fig.2. 8 : Représentation d'un robot mobile omnidirectionnel

On citera pour mémoire le cas du XR4000 Nomadic représenté à la figure **Fig.2. 9**.



*Fig.2. 9 : Robot mobile omnidirectionnel Nomadic XR4000*

### 2.2.3. Mode de fonctionnement de robot mobile :

Les robots mobiles peuvent intervenir dans la génération de flux de marchandises, dans des entrepôts (ex. le projet MARTHA [12]) ou des hôpitaux (ex. le robot HelpMate [13]). Ils peuvent également servir pour explorer et opérer dans des milieux inaccessibles ou hostiles à l'homme, tels des terrains minés, la surface d'une autre planète, ou des zones radioactives de centrales nucléaires (par exemple, le robot *Sojourner* de la NASA qui a été utilisé pour explorer in situ le sol de la planète Mars<sup>2</sup> ; le robot d'exploration NOMAD mis au point par l'Université Carnegie Mellon aux États-Unis, etc.).

Il existe deux principaux modes de fonctionnement pour un robot mobile : téléopéré et autonome. En mode téléopéré, une personne pilote le robot à distance. Elle donne ses ordres via une interface de commande (joystick, clavier/souris...), et ceux-ci sont envoyés au robot via un lien de communication (internet, satellite ...).

À l'inverse, en mode autonome le robot doit prendre ses propres décisions. Cela signifie qu'il doit être capable à la fois de percevoir correctement son environnement, mais également de savoir comment réagir en conséquence, suivant le niveau d'autonomie. C'est à lui de planifier son parcours et de déterminer avec quels mouvements il va atteindre son objectif. Les recherches dans ce domaine portent principalement d'une part sur la localisation du véhicule autonome et la cartographie de son environnement, d'autre part sur le contrôle de tels véhicules (structure de contrôle, stratégies de commande, planification).

<sup>2</sup> <http://mars.jpl.nasa.gov/MPF/rover/sojourner.html>

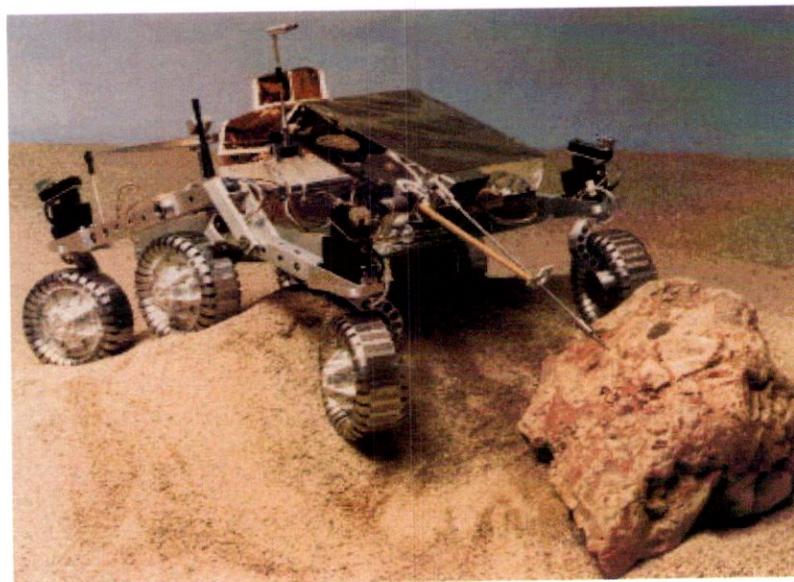
Cette notion d'autonomie, que nous pourrions qualifier de décisionnelle, ne doit pas être confondue avec celle d'autonomie énergétique (capacité du robot à gérer efficacement son énergie, à la préserver, voire à se ravitailler), même si ces deux notions sont étroitement liées : idéalement une des préoccupations principales d'un robot mobile totalement autonome (du point de vue décisionnel), serait en effet de pouvoir gérer de lui-même ses réserves d'énergie.

Voyons maintenant les différents types d'environnement dans lesquels les robots mobiles sont amenés à se mouvoir.

Nous rencontrons principalement 3 types d'espaces de navigation : les terrains plats **Fig. 2.10**, les terrains accidentés **Fig2.11** et les espaces 3D **Fig. 2.12**.



*Fig. 2.10: Robucab.*



*Fig2.11: Le robot martien Sojourner. (rovers)*



*Fig. 2.12: Le robot sous Marin TAIPAN*

#### 2.2.4. Navigation autonome des robots mobiles :

Le navigateur a donc pour mission de générer des trajectoires pour le robot. La notion de trajectoire est différente de celle de chemin dans le sens où elle intègre des informations temporelles le long du parcours du robot, c'est-à-dire des vitesses et parfois des accélérations (dérivées premières et secondes) [6]. Concrètement, un navigateur se différencie d'un planificateur de chemin par les éléments suivants :

- il travaille sur une carte de l'environnement plus localisée autour du robot,
- il travaille à plus court terme que le planificateur, il prévoit moins loin dans le temps,
- il intègre les contraintes liées au robot, il doit s'assurer que le robot est capable physiquement de réaliser les trajectoires demandées.

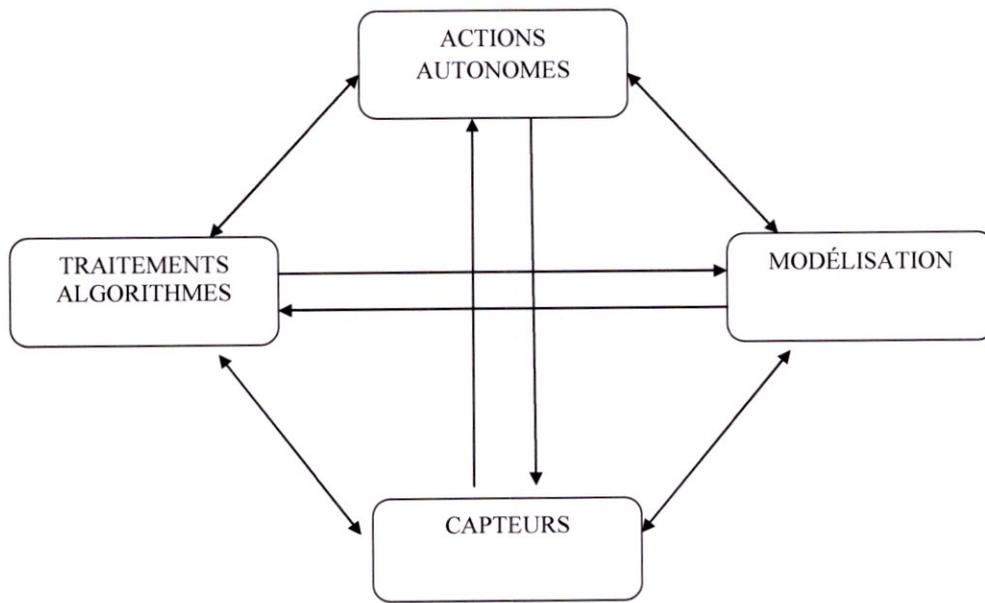
On peut définir la navigation autonome comme étant **Fig. 2.13** :

- **Un domaine de recherche très actif depuis 1995** : qui a plusieurs problèmes :
  - le problème du passage à l'échelle.
  - de nouvelles problématiques (par exemple, traiter des environnements évolutifs, coopération de robots, etc.)
- **Des enjeux économiques importants** :
  - la réalisation de base de données géoréférencées (urbanisme, IGN, Mappy, etc.),
  - la robotique autonome d'extérieur (militaire, urbaine, aérienne, etc.),
  - la surveillance environnementale et l'intervention après catastrophe

- la robotique d'aide aux handicapés (chaise roulante, assistance aux malvoyants, etc.).

### 2.2.5. Les problèmes-clés de la robotique mobile autonome :

- Modéliser et contrôler les robots mobiles
- Percevoir et interagir avec son environnement local
- Explorer et représenter son environnement global.



*Fig. 2.13: Schéma synoptique de la navigation autonome.*

### 2.2.6. Technologie des capteurs pour la localisation des drones

Les capteurs sont habituellement classés en deux familles [5, 6, 7] :

1. Les capteurs proprioceptifs mesurent le déplacement du drone entre deux instants. L'intégration de leurs mesures permet d'estimer la situation courante du véhicule relativement à sa situation initiale. Ces capteurs donnent des résultats qui se dégradent avec le temps. Il faut donc leur adjoindre un système permettant de recalibrer périodiquement la situation absolue du véhicule.

2. Les capteurs extéroceptifs mesurent la situation absolue du drone par observation de points de repère naturels (amers visuels) ou artificiels (balises, satellites...) dont la situation est connue dans un référentiel attaché à l'environnement. Ces capteurs peuvent être utilisés tout au long du parcours soit pour mesurer en permanence la situation absolue du mobile, soit pour recalibrer périodiquement la navigation à l'estime. Ils peuvent intervenir également pour assurer la sécurité du véhicule (perception de l'environnement proche, contrôle de l'attitude de la plate-forme) et pour construire en ligne un modèle de l'environnement exploré.

Nous décrirons les capteurs appartenant à ces deux grandes familles, en limitant notre étude aux capteurs susceptibles d'être embarqués par des engins volants, et de petite taille

### 2.2.6.1. Capteurs Proprioceptifs

#### ▪ Accéléromètres

Les accéléromètres peuvent être utilisés pour déterminer la position du véhicule par double intégration. C'est le principe de la navigation inertielle.

Leurs mesures ne sont pas encore suffisamment précises pour être directement exploitées en navigation.

Dans le cas de véhicules qui ont une accélération faible par rapport à la gravité, les accéléromètres peuvent être utilisés pour fournir la direction de la gravité. Ils fonctionnent alors comme des inclinomètres.

#### ▪ Gyroscopes

Un gyroscope est un appareil permettant d'effectuer une mesure de la rotation absolue de son boîtier. On retrouve deux types les gyroscopes mécaniques et les gyroscopes à laser (fibres optiques). Il faut tenir compte de la dérive des mesures au cours du temps et effectuer régulièrement des recalages absolus (on ne les utilise pas seuls, mais en composants intégrés de centrales inertielles).

#### ▪ Centrales inertielles

Une centrale inertielle (IMU) est un système complet, composé au minimum de trois accéléromètres et de trois gyroscopes permettant de mesurer les composantes selon les trois axes de l'accélération non gravitationnelle et de la vitesse instantanée de rotation du véhicule par rapport à un référentiel inertielle (qui est confondu avec le repère terrestre dans la plupart des cas). Les centrales inertielles sont des systèmes complexes et chers. Elles intègrent une électronique permettant de corriger les données capteurs :\*

Compensation de l'accélération au niveau de la mesure des gyroscopes, auto-compensation en température, orthogonalité des axes de mesures, etc. On distingue deux types principaux de centrales inertielles : les centrales strap-down et les centrales à plate forme stabilisées.

### 2.2.6.2. Capteurs Extéroceptifs

#### ▪ Compas magnétiques

Le compas magnétique, appelé aussi magnétomètre, indique la direction du nord magnétique. Généralement, la déclinaison magnétique est compensée pour que le capteur délivre en permanence une mesure absolue du cap par rapport à la direction du nord géographique. L'inconvénient majeur de ces capteurs est leur perturbation par les masses

magnétiques environnantes ainsi que par les champs magnétiques parasites, induits par la proximité de moteurs électriques par exemple.

- **Gyrocompas**

Le premier effet des gyroscopes est la permanence de l'axe de rotation de la toupie dans une direction donnée, ce qui permet de les utiliser comme indicateurs de direction à condition que leur dérive soit la plus faible possible.

Plus lourds et plus onéreux que les compas magnétiques, mais insensibles aux perturbations magnétiques, les gyrocompas constituent une solution intéressante pour les drones de grande taille.

- **Localisation sur balises : Global Positioning System GPS**

Ce système comporte 24 satellites répartis de telle sorte qu'en tout point du globe, on peut en observer simultanément 4 à 8, avec une élévation d'au moins 15°.

Pour le positionnement absolu, le mobile à localiser est muni d'un récepteur qui mesure sa distance par rapport à plusieurs satellites. Chaque satellite envoie un message qui permet de calculer ses coordonnées spatiales dans un repère terrestre à l'instant de l'observation. La distance entre le satellite et le récepteur est estimée à partir du temps mis par le signal du satellite pour atteindre le récepteur.

En pratique, l'information redondante de 8 à 11 satellites permet un positionnement avec une erreur allant de quelques mètres à 20 m, suivant le code utilisé (civil ou militaire), la qualité des éphémérides, etc.

Pour obtenir des précisions meilleures, il faut utiliser un mode de positionnement relatif, c'est à dire la position d'un récepteur GPS par rapport à un autre récepteur GPS.

C'est ce qu'on appelle le GPS différentiel ou DGPS, et la précision est réduite aux centimètres.

- **Capteurs télémétriques**

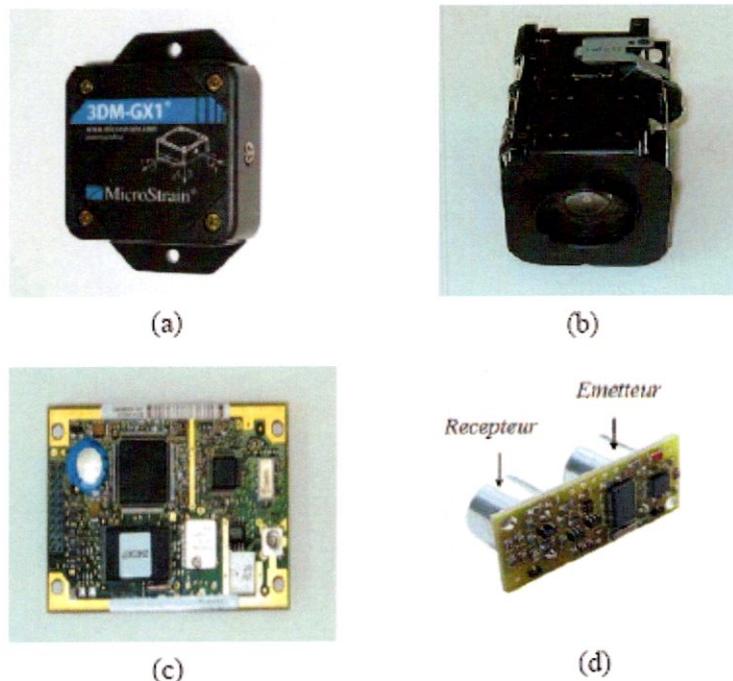
Cette catégorie regroupe les capteurs permettant d'acquérir des mesures sur l'environnement qui les entoure. Leur principe est toujours le même : le télémètre émet un signal qui lui est renvoyé par l'obstacle le plus proche dans la direction d'émission. L'écart de temps entre le signal émis et le signal reçu permet de retrouver la distance à l'obstacle. Mais ils diffèrent par la nature des signaux qu'ils émettent (acoustiques, optiques,...). On distingue ainsi :

1. Les télémètres à ultrasons

- 2. Les télémètres laser à balayage
- 2. Les télémètres radars Ultra-Large-Bande

- **La caméra**

La camera vidéo est un des capteurs extéroceptifs les plus performants, qui fournit une information particulièrement riche sur l'environnement. Elle permet de transmettre les images vues par le drone, vers l'opérateur au sol. Dans certains cas, on traite les informations transmises par la caméra sur un PC au sol via une carte d'acquisition d'images pour déterminer la position de l'engin, pour faire du suivi de trajectoire, ou bien pour la détection d'obstacles voir la figure 2.14.



*Figure 2.14. Centrale inertielle (IMU) (a), camera (b), GPS (c) et capteur à ultrason (d).*

### 2.3. Percevoir et interagir avec son environnement local :

La notion de perception en robotique mobile est relative à la capacité du système à recueillir, traiter et mettre en forme des informations utiles au robot pour agir et réagir dans le monde qui l'entoure. Alors que pour des tâches de manipulation on peut considérer que l'environnement du robot est relativement structure, ce n'est plus le cas lorsqu'il s'agit de naviguer de manière autonome dans des lieux très partiellement connus. Aussi, pour extraire les informations utiles à l'accomplissement de sa tâche, il est nécessaire que le robot dispose de nombreux capteurs mesurant aussi bien son état interne que l'environnement dans lequel il évolue. Le choix des capteurs dépend bien évidemment de l'application envisagée. Pour se focaliser sur le problème de navigation, nous allons nous restreindre dans cette partie aux capteurs utiles à cette tâche. Dans un second temps, nous expliquerons comment utiliser les

données issues de ces capteurs pour obtenir une représentation fiable de l'état du système et de l'environnement. Ces capteurs nécessitent différents traitements :

- modélisation et calibration des capteurs (vision, vision omni, télémétrie, INS, odométrie, GPS...),
- techniques de fusion (lâche, serrée, probabiliste, "voting"...),
- algorithmes temps réel pour la commande,
- algorithmes "robustes" aux erreurs de modélisation.

Ces capteurs rencontrent des complexités de scènes comme les scènes (objets) déformables et/ou articulées et le changement de géométrie, d'éclairage et ombres.

Ces capteurs permettent au robot mobile de : se déplacer et de se positionner par rapport à son environnement (par asservissement visuel, par exemple). Dans ce cadre on trouve diverses applications, parmi elles :

- application en robotique sous-marine
- application au suivi de véhicules
- asservissement visuel d'un dirigeable

### **2.3.1. Capteurs en robotique mobile :**

En robotique mobile, on classe traditionnellement les capteurs en deux catégories selon qu'ils mesurent l'état du robot lui-même ou l'état de son environnement. Dans le premier cas, à l'image de la perception chez les êtres vivants, on parle de proprioception et donc de capteurs proprioceptifs. On trouve par exemple dans cette catégorie les capteurs de position ou de vitesse des roues et les capteurs de charge de la batterie. Les capteurs renseignant sur l'état de l'environnement, donc de ce qui est extérieur au robot lui-même, sont eux appelés capteurs extéroceptifs. Il s'agit de capteurs donnant la distance du robot à l'environnement, la température, signalant la mise en contact du robot avec l'environnement, etc.

L'étude détaillée des capteurs, qui relève à la fois de la physique, de l'électronique et du traitement du signal, ne sera pas vue ici. Nous nous contenterons d'expliquer les principes de fonctionnement des capteurs présentés. On tâchera simplement de garder à l'esprit que les défauts inhérents aux différents systèmes de mesure utilisés (bruit, erreurs ou échecs de mesures, difficulté de modélisation) influents fortement sur la perception que le robot a de l'environnement.

### 2.3.1.1. Mesure de la position : le GPS

Il existe très peu de systèmes donnant la position absolue d'un point dans un repère fixe donné. Le GPS (Global Positioning System), initialement développé pour les applications militaires américaines [15] est actuellement à la disposition du grand public. On peut cependant considérer que son utilisation dans ce cadre n'est pas garantie. La mise en place du projet civil européen Galileo [16] devrait offrir une alternative au GPS. Le GPS fonctionne avec un ensemble de satellites, qui effectuent des émissions synchronisées dans le temps. Par recoupement des instants d'arrivée des signaux et de la position des satellites émetteurs, les récepteurs peuvent calculer leur position. Le principe de calcul de la position est basé sur une triangulation, à l'aide de quatre signaux reçus simultanément (le quatrième signal assure la robustesse de la mesure).

En ce qui concerne la précision, la localisation ainsi obtenue est entachée d'une erreur de l'ordre de la quinzaine de mètres, ce qui n'est bien évidemment pas suffisant pour permettre à un robot de naviguer de manière robuste. Ainsi, on a systématiquement recours à une méthode différentielle pour obtenir des résultats plus satisfaisants. La localisation se fait à l'aide de deux récepteurs, dont l'un est statique et positionné avec précision dans l'environnement. On peut alors obtenir une précision de l'ordre du centimètre. Pour capter les signaux émis par des satellites, ce type de dispositif est donc plutôt destiné au positionnement en extérieur. Par ailleurs, sa faible précision et son prix élevé le réservent plutôt à des systèmes multirobots, associant par exemple des robots mobiles à des engins volants et sous-marins, comme cela est à l'étude dans les applications militaires les plus récentes. Enfin, ce système de mesure, autorisant des rafraîchissements à des fréquences de l'ordre de seulement 5 Hz, n'est pas utilisable pour une commande en temps réel. Il est donc principalement utile pour des recalages ponctuels.

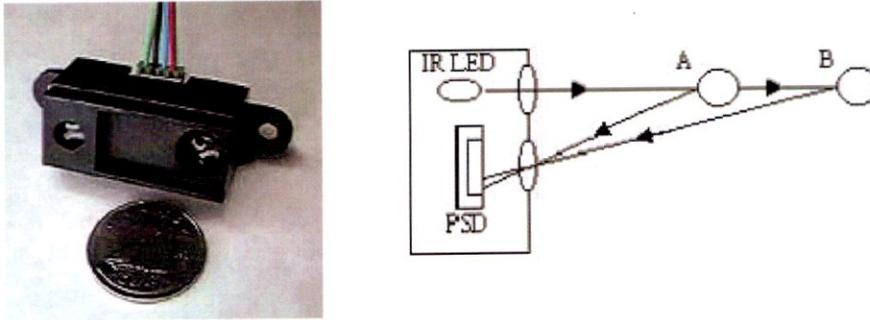
### 2.3.1.2. Mesure de proximité et de distance :

On appelle télémétrie toute technique de mesure de distance par des procédés acoustiques, optiques ou radioélectriques. L'appareil permettant de mesurer les distances est lui appelé télémètre. De même qu'il existe différentes techniques de mesure de distance (mesure du temps de vol d'une onde, triangulation), il existe différentes technologies pour réaliser des télémètres. Nous présentons ici les plus répandues en robotique mobile, en donnant une idée de leur gamme de mesure et d'application. Tous les capteurs télémétriques, basés sur des mesures de l'environnement, sont bien évidemment actifs et extéroceptifs.

### ▪ Capteurs infrarouges :

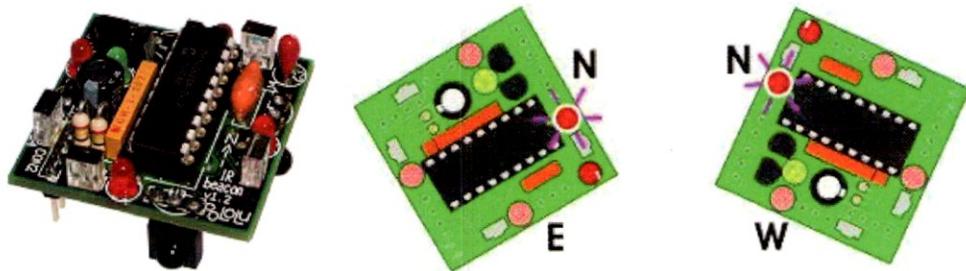
Les capteurs infrarouges sont constitués d'un ensemble émetteur/récepteur fonctionnant avec des radiations non visibles, dont la longueur d'onde est juste inférieure à celle du rouge visible. La mesure des radiations infrarouges étant limitée et, en tout état de cause, la qualité très dégradée au-delà d'un mètre, ces dispositifs ne servent que rarement de télémètres. On les rencontrera le plus souvent comme détecteurs de proximité, ou dans un mode encore plus dégradé de présence. Il faut noter que ce type de détection est sensible aux conditions extérieures, notamment à la lumière ambiante, à la sécularité des surfaces sur lesquelles se réfléchissent les infrarouges, à la température et même à la pression ambiantes. Ces capteurs ne sont pas complètement directionnels et leur caractéristique (à l'image des capteurs ultrasons présentés par la suite) présente une zone de détection conique à l'origine d'incertitudes. Enfin, l'alternance de phases d'émission et de réception impose une distance de détection minimale.

Les capteurs infrarouges Sharp de la famille GP2 voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** sont des télémètres de portée réduite. Ces modules permettent de mesurer des distances absolues ou relatives par détection infrarouge et disposent, selon les modèles, de sorties numériques ou analogiques. La mesure est établie à partir de l'inclinaison du rayon réfléchi : le rayon est en effet dévié à l'aide d'un système optique sur une matrice de photodiodes (PSD), comme cela est représenté à la figure **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Sur des robots mobiles, ces capteurs ne sont généralement pas utilisés pour repérer l'ensemble des corps présents dans l'environnement, car leur portée est trop faible. Ils servent plutôt à mesurer la proximité de corps proches du robot. À titre d'exemple, le GP2D120 est un télémètre dont la plage d'utilisation est comprise entre 4 et 30 cm, alors que le GP2Y0A02YK, qualifié de télémètre longue distance, travaille entre 20 et 150 cm. Ces télémètres sont disponibles à des coûts relativement faibles, de l'ordre de 20 \$US.



*Fig. 2.14 : Télémètres infrarouges Sharp*

Les détecteurs infrarouges Pololu voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** sont des balises infrarouges destinées à fonctionner par paires. Chacune des balises est équipée de 4 diodes émettrices et de quatre diodes détectrices, qui fonctionnent en alternance. Si les balises se font face, il y a détection de la direction émettrice, dans la limite d'une distance de 6 m. On peut choisir de faire tourner les balises pour rendre actif ce type de mesure. Il n'est a priori pas question dans ce cas de télémétrie. Néanmoins, on pourrait estimer qu'il est possible, en utilisant plus de balises d'estimer la distance à l'aide de plusieurs balises, par triangulation. Dans ce cas, le robot comme l'environnement doivent être équipés de balises, ce qui est généralement évité pour des applications de robotique mobile autonome.



*Fig. 2.15 : Détecteurs infrarouges Pololu*

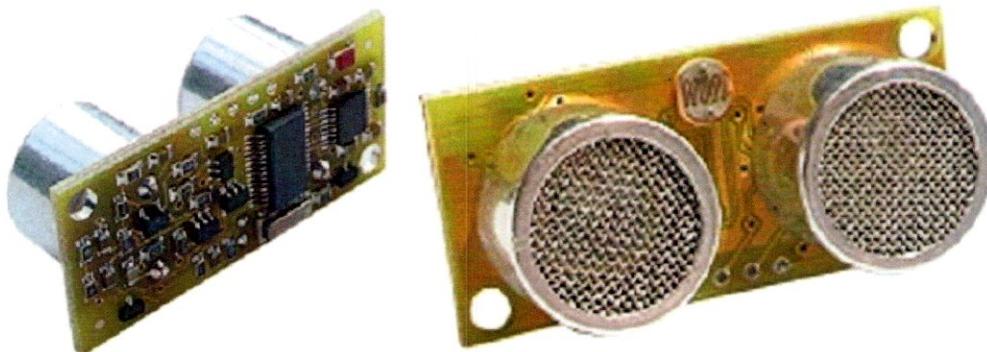
#### ▪ Capteurs ultrasonores :

Les capteurs ultrasonores utilisent des vibrations sonores dont les fréquences ne sont pas perceptibles par l'oreille humaine. Les fréquences couramment utilisées dans ce type de technologie vont de 20 kHz à 200 kHz. Les ultrasons émis se propagent dans l'air et sont réfléchis partiellement lorsqu'ils heurtent un corps solide, en fonction de son impédance acoustique. L'écho en retour prend la forme d'une onde de pression à l'image des vaguelettes circulaires déformant la surface de l'eau lorsqu'on y jette une pierre. La distance entre la

source et la cible peut être déterminée en mesurant le temps de vol séparant l'émission des ultrasons du retour de l'écho. Plusieurs exemples de télémètres ultrasonores sont présentés aux figures **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. Il existe notamment des modules ultrasonores qui, à l'image du télémètre MSU08 présenté à la figure **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, sont de faible encombrement ( $L \times l \times h = 43 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 17 \text{ mm}$ ) et peu onéreux (moins de 60 \$ US).



*Fig. 2.16 : Télémètres ultrasonores Polaroid USP 3 et Migatron RPS 409 IS*



*Fig. 2.17 : Télémètre ultrasonore MSU08 (commercialisé par Lextronic (Lextronic, 2004))*

Les systèmes ultrasonores présentent un certain nombre de défauts. Le premier d'entre eux résulte d'une émission imparfaite : au lieu d'être canalisées dans une seule direction, les ondes se propagent selon un cône dont le sommet est la source d'émission. Plus l'angle d'ouverture du cône est grand, plus cela influe sur la détection des objets. Ces capteurs ne peuvent ainsi pas percevoir des objets trop proches. À l'inverse, à cause de l'atténuation de la puissance des ondes, il existe aussi une distance maximale, déterminée dans les meilleures

conditions possible (matériau parfaitement réfléchissant, angle d'incidence idéal). La plage de pleine variation de la mesure (généralement 0-10 V analogiques) est ainsi adaptée au capteur proposé et la distance effective de mesure se situe aux alentours des deux tiers de la plage de mesure. Enfin, la fréquence maximale des mesures est variable, liée à la distance de mesure maximale autorisée et à la fréquence des ultrasons. Par exemple, un capteur dédié à des mesures aux alentours de 1,5 m donnera une nouvelle mesure toutes les 10 ms, alors qu'un capteur prévu pour mesurer des distances jusqu'à 30 m sera limité à 5 mises à jour par seconde [17]. À ces défauts s'ajoute la sensibilité à la densité de l'air : ainsi, ces capteurs sont sensibles aux changements de température (vitesse des ondes modifiée de 1 % pour 10 C) et de pression (vitesse des ondes modifiée de 5 % pour 1000 m de dénivélé). Ils doivent être stabilisés en température et recalibrés pour fonctionner à des pressions différentes de la pression atmosphérique.

- **Télémètres laser**

Les télémètres laser sont à ce jour le moyen le plus répandu en robotique mobile pour obtenir des mesures précises de distance. Leur principe de fonctionnement est le suivant. À un instant donné, une impulsion lumineuse très courte est envoyée par l'intermédiaire d'une diode laser de faible puissance. La réflexion de cette onde donne un écho qui est détecté au bout d'un temps proportionnel à la distance capteur-obstacle. La direction des impulsions est modifiée par rotation d'un miroir, l'angle de balayage couvrant généralement entre 100 et 180 degrés sur des produits commerciaux [18].

La portée du capteur dépend de la réflectivité des milieux rencontrés, mais une valeur typique de 30 mètres est atteinte avec un télémètre de bonne qualité. Outre cette portée relativement satisfaisante pour une application de navigation à basse vitesse, les autres performances de ces capteurs en termes de précision de mesure, de résolution angulaire et de stabilité en température font d'eux les meilleurs télémètres pour la robotique mobile. La gamme de produits de la marque Sick voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** fait référence pour la navigation des robots mobiles. Les performances d'un modèle tel que le LMS200 sont données dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**



*Fig.2. 18 : La famille des télémètres lasers Sick (Sick, 2004)*

Angle d'ouverture	180 °
Résolution angulaire	0,25 – 0,5 – 1 °
Temps de réponse (fonction de la résolution)	13 – 26 – 52 ms
Résolution	10 mm
Erreur systématique	±15 mm
Erreur statistique	5 mm
Classe d'équipement laser	classe 1
Températures de fonctionnement	0 °C ... + 50 °C
Distance maximale de mesure	80 m
Interface	RS-422 et RS-232
Taux de transmission	9,6 – 19,2 – 38,4 – 500 kBaud
Consommation	20 W
Poids	4,5 kg
Dimensions	(L × l × h) 156 × 155 × 210 mm

**Tableau 2.1 : Caractéristiques du télémètre laser Sick LM200**

Les télémètres lasers ne sont néanmoins pas sans défauts. On peut noter tout d'abord qu'un balayage complet sur 180 degrés prend quelques secondes, si bien que ces capteurs ne sont généralement utilisables qu'en mode recalage. Enfin, le prix de ces dispositifs ne les destine aucunement à des applications grand public. À titre d'exemple, un télémètre Sick LMS200 reviendra approximativement à 6000 \$US.

### 2.3.1.3 Vision par ordinateur

La vision par ordinateur est bien évidemment largement utilisée en robotique mobile. L'utilisation d'une caméra pour percevoir l'environnement est une méthode attractive, car elle semble proche des méthodes utilisées par les humains. Le traitement des données

volumineuses et complexes fournies par ces capteurs reste cependant difficile à l'heure actuelle, même si cela reste une voie de recherche très explorée.

- **Caméras simples**

Une caméra standard peut être utilisée de différentes manières pour la navigation d'un robot mobile. Elle peut être utilisée pour détecter des amers visuels (des points particuliers qui servent de repère, tels que des portes ou des affiches) à partir desquels il sera possible de calculer la position du robot. Si ces amers sont simplement ponctuels, ou de petite taille, il sera en général simplement possible d'estimer leur direction. Dans le cas où les amers sont des objets connus en 2 ou 3 dimensions, il sera en général possible d'estimer complètement la position du robot par rapport à la leur. Elle peut également être utilisée pour détecter des "guides" de navigation pour le robot, tels que des routes ou des couloirs. Il est également possible d'utiliser globalement une image pour caractériser une position ou un point de vue dans l'environnement. Il faudra alors comparer cette image aux nouvelles images acquises par le robot pour savoir si le robot est revenu à cette position. Cette comparaison peut faire appel à de très nombreuses techniques, notamment à celles utilisées dans le domaine de l'indexation d'image.

- **Caméras stéréoscopiques**

Lorsque l'on dispose de deux caméras observant la même partie de l'environnement à partir de deux points de vue différents, il est possible d'estimer la distance des objets et d'avoir ainsi une image de profondeur, qui peut être utilisée pour l'évitement d'obstacles ou la cartographie. Cette méthode suppose toutefois un minimum d'éléments saillants dans l'environnement (ou un minimum de texture) et peut être limitée, par exemple dans un environnement dont les murs sont peints de couleurs uniformes. La qualité de la reconstruction risque également de dépendre fortement des conditions de luminosité.

## 2.4. Localisation :

Afin de remédier aux faiblesses des capteurs, on a tendance à les multiplier. Cette redondance d'information, nécessaire à bien des égards, implique bien évidemment un recoupement cohérent de l'information. Or les capteurs ne fournissent pas tous, comme on l'a vu, le même type d'informations. Il s'agit principalement, pour les capteurs présentés, de la posture absolue ou relative et de la distance aux corps présents dans l'environnement. Dans le premier cas, on peut parler de *représentation allocentrée*<sup>3</sup> de l'espace et dans le second de *représentation égocentrée*. Par la suite, l'utilisation que l'on fait des données des capteurs est

---

<sup>3</sup> ... c'est-à-dire déportée

le plus souvent liée à la façon dont on modélise mathématiquement l'environnement pour résoudre les différents problèmes posés. Ainsi, le plus traditionnellement, on utilise à un repérage absolu qui correspond à une vision mathématique simple de l'espace, au prix du traitement adéquat des données. Des stratégies basées sur l'utilisation directe des informations issues directement de mesures existent néanmoins [19], mais ne sont pas à l'heure actuelle généralisées.

Quel que soit le type de robot, la connaissance de sa position dans son environnement est importante pour s'y déplacer.

Il existe principalement deux types de localisation. La localisation topologique et la localisation métrique.

Dans le cas de la localisation topologique, le robot se situe de manière abstraite. Il utilise des primitives de haut niveau pour se situer : je suis dans tel endroit par exemple je suis dans le bureau B10 ou dans le couloir C2. À l'opposé, la localisation métrique donne les coordonnées du robot dans un repère fixe. Dans le cas où l'espace de travail est le plan, il s'agit donc de l'abscisse, de l'ordonnée et de l'orientation du corps principal du robot.

La localisation métrique d'un robot dans son espace de travail est un thème de recherche très actif [20]. La difficulté de connaître la position exacte d'un robot vient de l'impossibilité de mesurer précisément ses déplacements. Différentes techniques existent parmi lesquelles l'odométrie mécanique par intégration du mouvement des roues du robot, l'odométrie optique ou estimation visuelle du mouvement par stéréo vision [21] ou vision monoculaire, utilisation d'un GPS, etc.

Mais chaque méthode présente des inconvénients. L'odométrie, par exemple, intègre au cours du temps le déplacement du robot mesuré par des roues odométriques placées sur les roues motrices du robot. Ces mesures ont une certaine précision et donc l'odométrie mécanique est fiable sur des petites distances. Sur de longues distances, la dérive devient trop importante.

Il existe des techniques qui tentent de pallier les défauts de telle ou telle méthode en fusionnant les données issues de plusieurs capteurs. Elles sont difficiles à mettre en œuvre, car il faut prendre en compte les incertitudes de chaque mesure, la date d'acquisition des données, la date de production du résultat, la période d'acquisition. Quoi qu'il en soit, les algorithmes

de navigation doivent, par une méthode ou une autre, prendre en considération le fait qu'il ne connaît jamais sa position avec exactitude.

### 2.4.1. Odométrie

#### 2.4.1.1. Principe

On se pose ici le problème de déterminer la posture du robot de la manière la plus simple, c'est-à-dire l'aide de capteurs proprioceptifs disposés sur les roues elles-mêmes. Dans la littérature on trouvera souvent le terme anglais « dead-reckoning » (navigation à l'estime). Les hypothèses de r.s.g. (roulement sans glissement) permettent de relier les commandes cinématiques des roues du robot à la dérivée de sa posture [19]. Pour déterminer la posture du robot à l'instant,  $t$  il reste alors à intégrer cette dérivée :

$$\dot{x}(t) = \int_0^t \dot{x}(\tau) d\tau$$

$$\dot{y}(t) = \int_0^t \dot{y}(\tau) d\tau$$

$$\dot{\theta}(t) = \int_0^t \dot{\theta}(\tau) d\tau$$

De manière pratique, ce calcul se fera bien évidemment de façon discrète sur un ordinateur, par un algorithme approprié d'intégration numérique. Bien qu'il soit évidemment possible de connaître également la position angulaire des roues, celle-ci n'est pas utile pour connaître la posture du robot, ni d'ailleurs pour commander le robot. En effet, à une même position instantanée des roues correspondent une infinité de postures. À l'inverse, la posture ne peut s'obtenir qu'en utilisant l'évolution du robot sur sa trajectoire, d'un instant à un autre. Ceci justifie l'appellation d'odométrie (du grec odos : chemin). Il est à noter que l'odométrie ne donne qu'une posture relative du robot, la posture initiale devant être obtenue par d'autres moyens. L'odométrie est un mode de localisation d'une simplicité remarquable. Aussi, tout robot mobile un tant soit peu évolué en est équipé. En revanche, il s'agit aussi d'un mode de mesure particulièrement imparfait. Le calcul de la posture est fait en supposant qu'il n'y a pas de glissement et que les paramètres géométriques du robot sont parfaitement connus, notamment le diamètre des roues et la longueur de l'entraxe. Comme nous le verrons plus loin, l'accumulation d'erreurs dues à l'intégration et à l'inexactitude des hypothèses formulées; justifie l'association de l'odométrie à au moins un autre mode de localisation, ne serait-ce que pour son initialisation.

#### 2.4.1.2. Erreurs et correction

La validité de l'odométrie est basée sur l'hypothèse de r.s.g. qui permet de supposer que la rotation propre d'une roue engendre une translation à vitesse connue de son centre. Cette hypothèse, conformément aux différents travaux de Borenstein en la matière, s'avère d'une validité très limitée [20]. Un certain nombre d'erreurs viennent entacher la précision de l'odométrie :

- des erreurs systématiques : erreur sur le diamètre des roues par rapport à la valeur nominale attendue, diamètres différents, erreurs sur la disposition des roues, résolution des codeurs ;
- des erreurs non systématiques : sol non plan ou irrégulier, glissements divers (dus à la nature du sol, à une accélération trop brutale, à un obstacle, un défaut mécanique, etc.), contact au sol non ponctuel.

La propagation des erreurs systématiques au travers de l'odométrie est très gênante, car elle est cumulative. En environnement d'intérieur, les erreurs non systématiques auront moins d'importance, notamment parce qu'elles ne s'accumulent pas constamment, comme c'est le cas des erreurs systématiques.

Quantitativement, l'estimation de l'incertitude de l'odométrie d'un robot mobile peut être donnée par la matrice de covariance de bruit associée à la posture du robot. Sa détermination n'est cependant pas une tâche facile. En particulier, à moins de faire des mouvements découplés de translation et de rotation, il est clair que les erreurs correspondantes sont elles relativement couplées. Par ailleurs, la matrice de covariance de bruit dépend du véhicule, du type de mouvement effectué, des capteurs et de leur modélisation. Pour illustrer l'erreur de manière graphique, on peut également propager une ellipse le long du trajet du robot pour décrire l'incertitude en position et un cône pour illustrer l'incertitude en orientation. Tous les deux sont déterminés à partir de la matrice de covariance de bruit. À mesure que le robot avance et que l'erreur s'accumule, ces motifs géométriques grandissent.

Pour en savoir plus concernant la modélisation des erreurs odométriques, on se référera aux rapports techniques [23] et [22]. Sans rentrer dans le détail, on notera simplement qu'il n'est pas possible de prendre en compte les erreurs non systématiques, leur amplitude

imprévisible ne permettant pas une prédiction. Quant aux erreurs systématiques, il est souvent préférable de les identifier préalablement et de les corriger [24].

#### 2.4.2. Explorer et représenter son environnement global :

Dans cette tâche, le problème canonique est le SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) : Comment, partant d'une position inconnue dans un environnement inconnu, reconstruire incrémentalement une carte de cet environnement et l'utiliser simultanément pour se localiser?

Les difficultés intrinsèques à ce problème sont :

- la corrélation entre position du robot et éléments de la carte => complexité en  $O(N^2)$ , où  $N$  est le nombre d'éléments de la carte.
- La non-linéarité et la dérive des modèles d'évolution du véhicule,
- l'association des données (hypothèses sous-jacentes: scène statique, amers discernables, etc.).

Les problèmes abordés :

##### a. SLAM dans des environnements d'intérieur

- Navigation réactive et complétude des explorations qui a pour objectif d'explorer et cartographier un environnement d'intérieur « inconnu » en garantissant une navigation sûre.
- Compensation des dérives et construction des représentations globales (cartographie) qui se base sur la structuration en lieux, l'identification des lieux et fermeture de boucle et l'optimisation sur un modèle semi-rigide contraint par l'observabilité.

##### b. SLAM dans des environnements d'extérieur

- SLAM visuel monoculaire qui a pour objectif d'identifier et suivre les structures de l'environnement, d'estimer la trajectoire de la caméra et d'estimer les plans de la scène 3D tout en respectant la robustesse aux changements d'illumination et les performances « temps réel ».
- SLAM visuel stéréo dans des scènes dynamiques qui a pour objectif la localisation précise et, reconstruction dense sans modèle a priori, l'aide à la conduite et la conduite automatique en environnement urbain sachant les difficultés concernant les scènes complexes et dynamiques, les changements d'illumination et ombres portées et les grands déplacements dans les images.

#### 2.4.3. Technique de localisation et cartographie

Cet axe regroupe tous les développements autour de la perception et de la localisation du robot [19]. On y retrouve notamment les méthodes SLAM (Localisation et Cartographie

Simultanées). Plus récemment l'utilisation de bases de données sous forme de cartes 2D ou 3D, mais également sous forme SIG (Système d'Informations Géographiques) a ouvert de nouvelles perspectives dans ce domaine. De manière générale, la fusion de données est également un thème important, tant la nécessité de coupler diverses sources de mesures apparaît nécessaire pour améliorer la précision et garantir l'intégrité des informations.

## 2.5. Cartographie

La construction d'une carte locale de l'environnement est un problème dual du problème de localisation. Dans le cas de la localisation, à partir de mesures d'un environnement connu a priori, le problème consistait à estimer la localisation courante du robot. Ici, il s'agit de déterminer une représentation de l'environnement, en supposant connue la position du robot. La modélisation de l'environnement obtenue apparaît généralement sous la forme d'une carte géométrique ou d'une carte d'occupation.

### 2.5.1. Définition

La cartographie est une représentation sociale et spatiale du territoire. Le SIG (Système d'Information Géographique) permet de poser une multitude de couches d'informations sur une carte donnée. On l'appelle aussi SIRS (Système d'Information à Référence Spatiale) ou en Anglais GIS (Geographical Information System) [26].

Un robot qui ne possède a priori aucune information sur l'environnement, dans lequel il doit se déplacer et agir, doit être capable de modéliser son environnement grâce à l'ensemble de ses capteurs. Ce modèle est indispensable pour sa localisation ainsi que pour planifier ses mouvements afin d'accomplir ses missions. Dans certaines applications robotiques, une carte de l'environnement peut être fournie par des sources extérieures comme les images aériennes ou satellites, mais dans la plupart des cas, ces données sont insuffisantes pour les applications qui ont besoin de perception précise dans une zone d'activité locale du robot. D'autre part, un robot autonome doit être capable de réagir à des modifications inattendues dans son environnement. La construction d'une telle carte devra être incrémentale, en fusionnant les perceptions successives acquises par les capteurs du robot au cours de son déplacement.

La difficulté d'un problème comme la cartographie vient généralement de plusieurs raisons parmi lesquelles :

1. La taille de la carte construite : plus l'environnement décrit par une carte est grand, plus les traitements seront lourds et l'espace mémoire pour la stocker important.

2. Le bruit : si les mesures des capteurs et les mouvements effectués par les actionneurs du robot ne sont pas bruités, la cartographie devient un problème simple. Mais le bruit est toujours présent et son traitement est essentiel.

3. Ambiguïté perceptuelle : plus les différents endroits ont les mêmes aspects, plus il est difficile d'établir des bonnes correspondances entre ces endroits traversés avec le temps aux différents points. De manière plus générale, le problème de l'association de données doit être traité correctement.

4. Fermeture de la boucle : construire une carte dans une boucle fermée exige de corriger les erreurs odométriques qui s'accumulent, sous peine d'obtenir une carte incohérente. La carte construite incrémentalement peut se déformer si aucun amer n'est revu pendant le déplacement pour localiser le robot. La reconnaissance des amers vus à la position de départ et la construction de la carte par l'utilisation d'une technique du (SLAM) permet d'obtenir une carte cohérente.

### 2.5.2. Type de cartes

La construction d'une carte exige d'autre part de choisir la nature des représentations qui vont la composer. Trois types de modèles de l'environnement sont utilisés en général [24]:

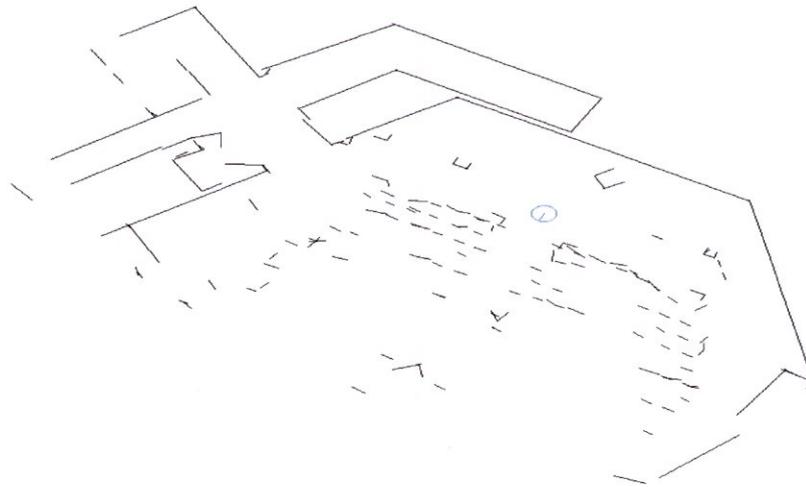
#### 2.5.2.1. Carte géométrique Fig.2.

Que ce soit pour se localiser ou pour planifier une trajectoire, il est utile de disposer d'un environnement structuré, dont le modèle peut être issu d'une connaissance a priori, sous la forme d'une carte ou d'un plan CAO enrichie par l'acquisition de mesures.

La carte géométrique est un modèle qui contient des informations métriques sur l'environnement. C'est souvent une représentation de base utilisant l'ensemble des primitives 2D acquises par un balayage horizontal d'un télémètre laser, ou des primitives 3D comme les segments regroupés en facettes ,ce qui permet de décrire des amers dédiés à la localisation et de représenter aussi l'espace navigable. Selon Rives et la sélection des amers devrait répondre à divers critères, en particulier : pouvoir discriminant, domaine de visibilité important, stabilité, invariance et bonne adaptation à la métrologie. Plusieurs types d'amers géométriques peuvent être distingués, comme les points, les coins, les segments, les polygones,...etc.

La construction d'une carte géométrique de primitives représentant localement l'environnement peut être obtenu par traitement de mesures télémétriques. Comme on l'a déjà évoqué, dans le cas d'un robot mobile naviguant en intérieur, il est pratique de distinguer certains motifs classiques, notamment les murs et coins. Les problématiques sont les mêmes

que pour la localisation (si bien que ces opérations sont souvent effectuées conjointement). Ainsi, si la tâche principale du robot est la navigation, l'extraction de primitives à des hauteurs faibles, c'est-à-dire, à portée du robot, suffit dans un premier temps. Néanmoins, pour effectuer une cartographie qui contienne un nombre important de primitives significatives, il faut examiner où ces primitives se trouvent et éventuellement les utiliser.



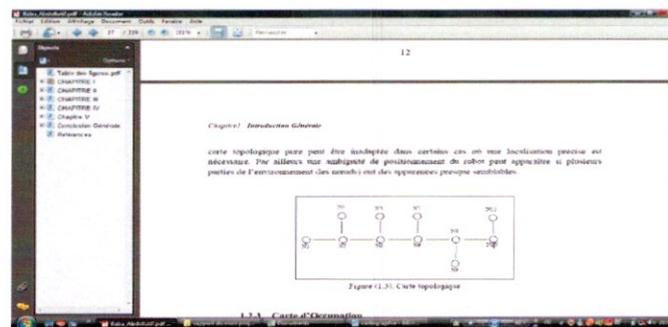
*Fig.2. 20. Carte géométrique*

### 2.5.2. 2. Carte topologique Fig. 2.19

Dans le cas d'environnements de grande taille, la construction d'une représentation purement géométrique peut s'avérer insuffisante et trop lourde à manipuler. Il est alors pertinent d'ajouter une information topologique, correspondant typiquement à un graphe discret représentant différentes zones et donc différentes cartes géométriques locales dans lesquelles évolue le robot. La décision d'utiliser une nouvelle carte locale peut être prise pour plusieurs raisons, par exemple parce qu'on rencontre une configuration particulière de l'environnement, comme un passage, ou parce que l'erreur de localisation dans la carte précédente est grande. La rencontre d'une boucle dans le graphe peut permettre une remise à jour des différentes cartes géométriques locales.

La carte topologique représente l'espace navigable du robot sous la forme d'un graphe qui contient toutes les informations sur la connexité et l'ordre des entités incluses. Autrement dit, c'est une représentation qui décrit les relations entre des éléments potentiels de l'environnement sans utiliser une référence globale absolue, ni une métrique en général. Nous pouvons distinguer deux méthodes pour la construire :

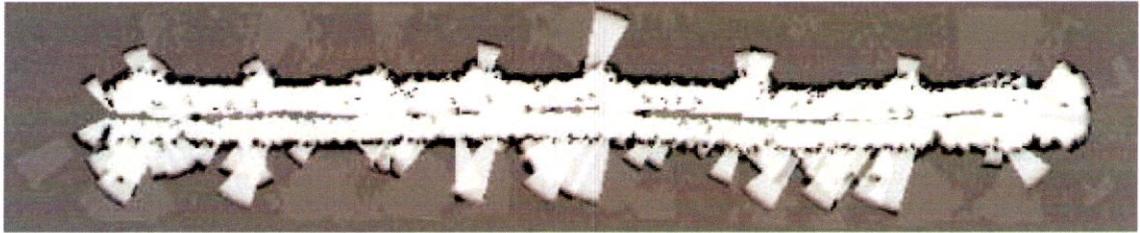
- Élaborer un modèle géométrique puis chercher ses propriétés topologiques. Où la définition du nœud est liée à une unité fonctionnelle ou topologique (corridor, bureau, etc.), alors que les connecteurs entre les nœuds représentent des portes ou des escaliers.
- Construire une carte topologique qui s'appuie sur des informations qualitatives ou physiques comme des couleurs ou des textures qui permettent de distinguer la nature physique d'une partie du terrain traversé pour la considérer comme une entité discrète dans le graphe bâti, et de rajouter éventuellement des informations métriques locales (distances et directions) sur des entités déjà perçues. Une telle carte topologique est construite par Brooks en utilisant des informations visuelles, où les nœuds sont appelés (meadows) et les connecteurs sont des (freeways).



**Fig. 2.19 : Carte topologique.**

### 2.5.2.3. Carte d'occupation Fig. 2.20

La grille d'occupation est une représentation de l'environnement qui décompose l'espace dans lequel un robot mobile évolue en un ensemble de cellules. La probabilité d'occupation de chaque cellule est une valeur estimée à partir des mesures fournies par les capteurs. Alors que beaucoup d'approches qui traitent du SLAM supposent que les environnements d'un robot mobile sont statiques (hypothèse peu compatible avec des robots de services interagissant avec des humains), la grille d'occupation représente un modèle capable de faire la mise à jour de l'environnement à une fréquence élevée, et permettant de réviser facilement les probabilités d'occupation, donc de suivre l'évolution de l'environnement autour du robot, ce qui est indispensable pour une meilleure réactivité. De plus, une grille d'occupation est capable de modéliser des environnements de forme quelconque, et ne cherche pas à approximer les données par des primitives qui peuvent être inadéquates. Elle est en général préférée pour les applications qui reposent sur la détection de l'espace navigable (espace libre) ou pour l'évitement d'obstacles. En revanche, elle souffre de la discrétisation par une grille qui induit des déformations et exige un espace de stockage important pour de grandes résolutions.



*Fig. 2.20 : grille d'occupation.*

#### 2.5.2.4. Carte de points d'intérêt :(Landmark map) Fig. 2.21:

C'est une carte construite à partir des primitives (points clés) extraites d'une séquence d'images en utilisant la vision stéréoscopique lors du déplacement d'un robot mobile. Dans ce cas, la carte de l'environnement est représentée par un nuage de points défini dans  $R^3$  et elle est utilisée comme aide à la navigation autonome.



*Fig. 2.21 : Landmark map.*

#### I.1.1. 2.5.3. Comparaison entre les différents types de carte voir

**Tableau 2.2 :**

Type de carte	Avantages	inconvénients
Carte géométrique	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Une carte géométrique peut être une représentation incluant tout type d'objets de n'importe quelle taille ou n'importe quelle forme</li> <li>-Les primitives sont construites par fusions successives de données élaborées à partir d'autres données métriques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-une carte géométrique est plus difficile à construire en comparaison avec une grille d'occupation, en particulier avec des données bruitées, à cause des approximations nécessaires il faut mettre en œuvre des traitements de mise en forme sur l'ensemble des données acquises chaque fois que</li> </ul>

	brutes (non traitées), comme les points directement issus des mesures, ce qui permet la réduction de l'espace mémoire nécessaire pour stocker la carte.	le robot effectue un raisonnement sur sa propre carte.
<b>Carte topologique</b>	<p>-Sa structure peut être exploitée par les algorithmes de planification de mouvement.</p> <p>-C'est de plus une représentation très économe de l'espace mémoire (structure de graphe)</p>	-l'absence d'informations géométriques dans une carte topologique pure peut être inadaptée dans certains cas où une localisation précise est nécessaire. Par ailleurs, une ambiguïté de positionnement du robot peut apparaître si plusieurs parties de l'environnement (les nœuds) ont des apparences presque semblables.
<b>Carte d'occupation</b>	<p>— la simplicité de sa construction, la possibilité de la construire passivement (« en passant », sans contrainte particulière sur la trajectoire du robot), la facilité d'intégrer divers types de capteurs et son adaptabilité pour modéliser un environnement dynamique</p> <p>-la carte d'occupation était la base pour créer une carte topologique.</p> <p>— La conception de grille d'occupation peut être aussi utile dans une autre application qui extrait une silhouette 3D.</p>	<p>le type du capteur utilisé (le sonar) à cause de ses défaillances nombreuses (fausses alarmes, détections manquées, difficulté de détection d'espaces étroits, données reflétées tardivement par une forme circulaire ou angulaire, ou même données diffusées face à une surface de verre, etc.)</p> <p>— problème de compatibilité entre les capteurs.</p>
<b>Carte de points d'intérêt</b>	-valable pour n'importe quel environnement.	— Nécessité d'un très grand nombre de points d'intérêt détectés.

	— Représente le mieux possible n'importe quelle forme.	
--	--------------------------------------------------------	--

*Tableau 2.2 : Tableau comparatif entre les différents types de carte.*

## 2.6.1 Construction d'une carte 3D :

### 2.6.1.1. Caméras et nuage de points reconstruits :

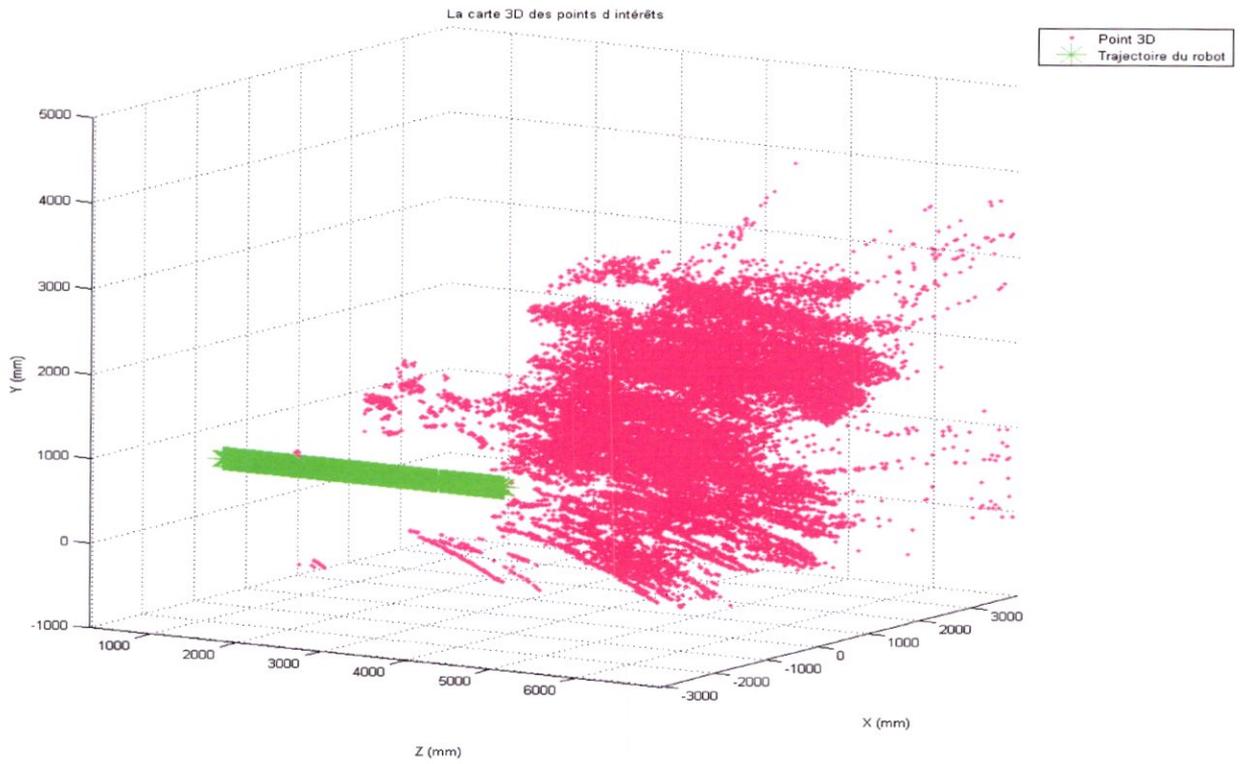
Lorsqu'on dispose d'un ensemble de points homologues donnés dans une séquence d'images, la détermination de la localisation des caméras et la détermination de la position 3D des points observés sont deux problèmes intimement liés.

En effet, dès que le positionnement relatif des caméras est connu il devient possible de calculer la position 3D des points par simple triangulation. De même, si l'ensemble des points 3D est connu, alors le calcul de la pose de chaque caméra est un problème simple. Chacun de ces problèmes peut être traité par de multiples méthodes et variantes.

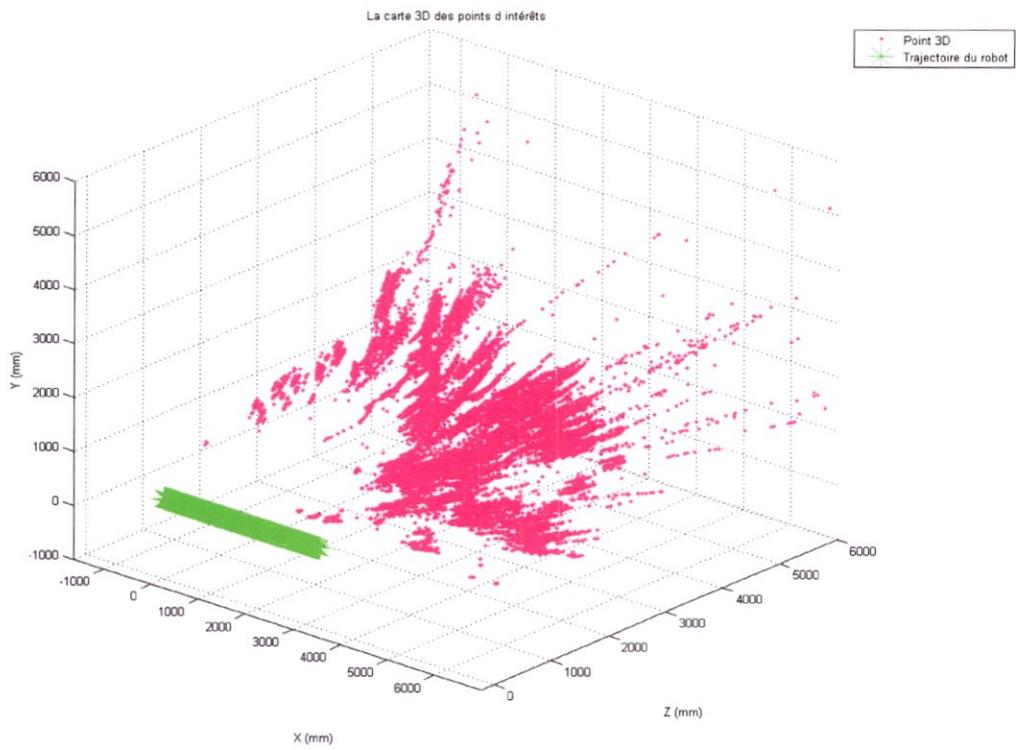
### 2.6.1.2. D'une séquence d'images à un modèle tridimensionnel :

À partir des algorithmes de base, des systèmes complets de reconstruction 3D ont été mis au point et publiés. Certains de ces algorithmes sont capables de calculer un modèle tridimensionnel texturé de la scène à partir d'une séquence d'images et sans aucune autre information. Dans ce domaine, on peut par exemple citer les travaux de Nistér, de Fitzgibbon et Zisserman [5], de Pollefeys, de Beardsley et al. [9] ou encore de Lhuillier et Quan.

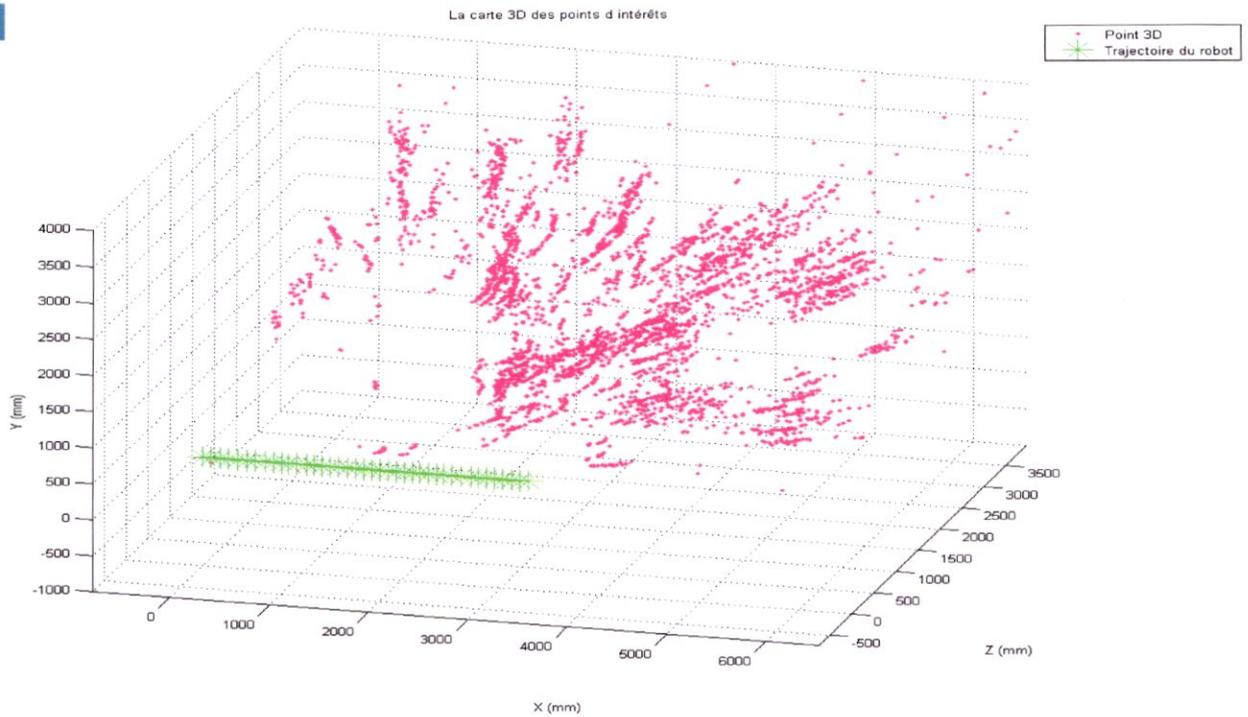
D'autre part, la reconstruction 3D à partir d'une séquence d'images provenant d'une caméra vidéo a fait apparaître le problème de la sélection des images à utiliser. En effet, il n'est pas judicieux d'utiliser toutes les images de la vidéo dans la reconstruction. Cela augmenterait inutilement le temps de calcul. La sélection d'un ensemble d'images clef pour la reconstruction 3D a été étudiée par exemple par Nistér et Torr. Enfin, lorsque le but est la construction d'un modèle surfacique, il faut développer une méthode de triangulation pour reconstruire des facettes à partir du nuage de points reconstruit.



**Fig. 2.22 : Carte 3D avec toute la séquence**



**Fig. 2.23 : Carte 3D avec sélection des images clés**



**Fig.2.24 : Carte 3D avec une autre sélection des images clefs**

- Dans les trois exemples précédant **Fig. 2.22**, **Fig. 2.23** et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, nous remarquons très bien l'influence du choix des images clefs sur le nuage de point 3D reconstruit d'une part, et d'autre part sur le temps de calcul présenté dans le
- **Tableau 2.3.**

Le temps de calcul (en s)	
Toutes les images	30
Sélection 1	5
Sélection 2	0.3

**Tableau 2.3 : Influence du choix d'images sur le temps de calcul**

### 2.6.1.3. Algorithme de cartographie 3D :

Pour construire une cartographie 3D de l'environnement, nous disposons d'une séquence d'images de luminance ainsi que des paramètres intrinsèques de la caméra. De plus, comme les images sont issues d'un banc stéréoscopique, nous pouvons faire l'hypothèse que le mouvement entre l'image gauche et l'image droite de la paire stéréoscopique n'est jamais une rotation.

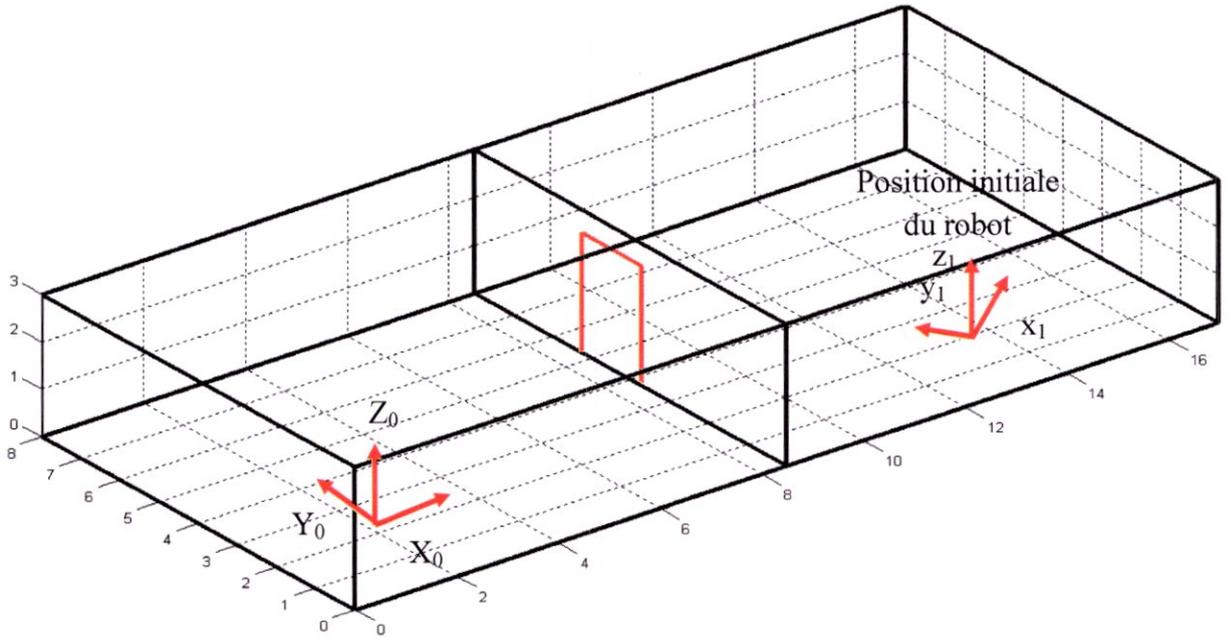
L'objectif est d'obtenir la pose de la caméra pour chaque image de la séquence ainsi qu'un nuage de points reconstruits. Le nuage de points devra être aussi riche que possible, car ce sont ces points qui serviront à localiser le robot [26].

L'algorithme mis au point pour cela peut être résumé de la façon suivante, plus de détails seront présentés aux chapitres suivants :

- 
1. sélection d'un ensemble d'images clefs parmi toutes les images de la séquence vidéo,
  2. extraction des points d'intérêt dans les images,
  2. mise en correspondances des images stéréoscopiques,
  4. reconstruction 3D des points,
  5. maillage et plaquage de texture.
- 

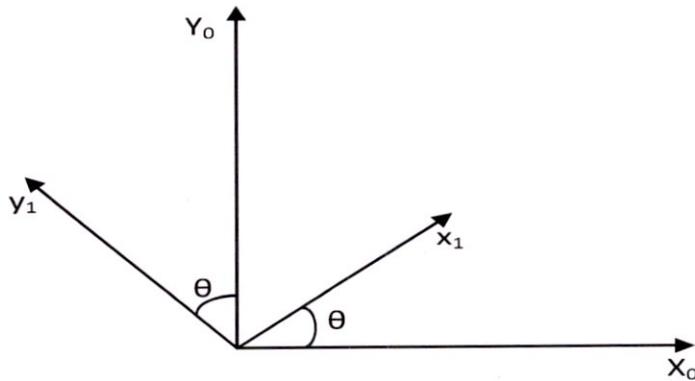
#### **2.6.1.4. Passage à un repère lié au sol :**

Le processus de reconstruction 3D utilise seulement des images. La reconstruction est donc faite à un facteur d'échelle près. De plus, l'origine et l'orientation du repère sont choisies de façon arbitraire (dans notre cas, le milieu du banc stéréoscopique est à l'origine du repère). Cela est gênant lorsqu'on veut utiliser la cartographie construite pour commander un robot. En effet, la commande du robot est faite dans un plan horizontal et l'échelle est importante. Il faut donc, une fois la reconstruction 3D effectuée, replacer le modèle obtenu dans un repère lié au sol et avec le mètre comme unité de longueur. Cette méthode présente comme inconvénient la connaissance de position initiale du robot par rapport au repère global lié au sol.



**Fig.2.25 : Passage du repère lié à la caméra au repère lié au sol**

Le passage du repère lié au robot au repère lié au sol s'effectue à travers d'une rotation au tour de l'axe  $\overline{Z_0}$  :



**Fig.2.26 : Schéma illustratif des repères**

$$\begin{cases} x_1 = X_0 \cos \theta + Y_0 \sin \theta \\ y_1 = -X_0 \sin \theta + Y_0 \cos \theta \end{cases} \quad (2.1)$$

Donc

$$R_{1 \rightarrow 0} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Une fois, la matrice de passage est déterminée, chaque point représenté dans le repère relatif au robot peut être transformé au repère global absolu lié au sol.

## 2.7. Architecture de contrôle des drones

Nous avons présenté dans la section précédente les organes sensoriels des drones. Il s'agit maintenant de décrire le "cerveau" de ces machines, c'est à dire l'intelligence embarquée qui leur permet de tirer parti des informations de l'environnement pour réaliser des tâches plus ou moins autonomes [7]. Cette intelligence embarquée réalise trois fonctions :

- La localisation, qui fusionne les informations des capteurs pour donner au véhicule une conscience de son environnement,
- Le guidage/pilotage qui agit sur les actionneurs du véhicule pour la mise en mouvement ou le suivi de trajectoire,
- La navigation, qui détermine les trajectoires à suivre en vue de réaliser des tâches de haut niveau demandées par l'opérateur (observation, suivi de cibles, etc.).

Nous allons expliquer, par la suite, les méthodes traditionnelles pour la réalisation de ces trois fonctions.

### 2.7.1. Méthodes pour la localisation

Aucun capteur ne fournit par lui même une information satisfaisante sur l'état du véhicule, à savoir sa position, sa vitesse et son attitude. L'information brute doit être traitée pour en éliminer les bruits de mesure et les dérives. Les meilleures méthodes de navigation sont celles qui fusionnent les informations provenant de différents capteurs pour obtenir l'estimation de l'état du véhicule la plus crédible. Les techniques optimales telles que les moindres carrés ou le filtrage de Kalman sont déjà couramment utilisées dans les systèmes aéronautiques et spatiaux, dans le domaine militaire ou civil. Des techniques issues de la robotique mobile, telles que le SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) ou le filtrage particulaire sont encore à l'état de recherche.

#### 2.7.1.1. Navigation inertielle

La navigation inertielle, ou navigation à l'estime, consiste à prédire la position d'un véhicule par intégration des données délivrées par les gyroscopes et les accéléromètres. Cette méthode de navigation a l'avantage de n'utiliser que les données proprioceptives de la centrale inertielle. Par contre, le biais sur la mesure des accélérations et des vitesses angulaires conduit à une dérive au cours de l'intégration. Typiquement, de tels modes de navigation sont viables pour des systèmes dont la durée de vie ne dépasse pas quelques

minutes. Par contre, elle doit être recalée par des mesures externes dès lors que la mission dépasse une certaine durée.

### 2.7.1.2. Navigation inertielle hybridée

La navigation inertielle hybridée consiste à prédire la position du véhicule par intégration des gyromètres et des accéléromètres et à recalculer cette prédiction par des capteurs extéroceptifs.

L'hybridation la plus fréquente sur les avions est l'hybridation baro-GPS. Une telle hybridation permet de tirer parti de la bonne précision à court terme de la position prédite par la centrale inertielle, et de la précision long terme du GPS. Elle permet en outre d'assurer une continuité de la mesure de position lorsque le GPS est momentanément indisponible.

L'hybridation est généralement réalisée par les techniques optimales de filtrage de Kalman étendu.

### 2.7.1.3. Navigation par mise en correspondance de carte

La localisation sur cartes est basée sur la mise en correspondance d'un modèle local de l'environnement acquis en ligne par télémétrie ou par cartographie radar et un modèle global préalablement mémorisé. En général, le guidage par cartographie est utilisé comme recalage basse fréquence d'une navigation inertielle fonctionnant à haute fréquence.

Au delà de la localisation sur une carte préalablement mémorisée, le problème du positionnement et de la construction simultanée d'une carte de l'environnement (SLAM) est sans doute l'enjeu le plus important de la localisation de véhicules autonomes.

### 2.7.2. Méthodes pour le pilotage et le guidage

L'enjeu de la fonction de pilotage et de guidage est de définir une loi de commande agissant sur les actionneurs du système physique et assurant le contrôle des mouvements du véhicule. Cette loi de commande s'interface entre le pilote humain et la machine, en interprétant des consignes de haut niveau (consigne en attitude ou en vitesse) pour délivrer des ordres aux actionneurs mécaniques. Elle tire parti des informations capteurs pour produire un comportement en boucle fermée rapide, stable, et robuste aux perturbations. Les méthodes de contrôle en boucle relevant de l'Automatique sont nombreuses. Nous citons ici quelques méthodes employées dans les applications de robotique aérienne.

- La commande par retour d'état linéaire
- La commande par retour d'état non linéaire
- La commande prédictive à base de modèle
- La commande référencée vision

### 2.7.3. Méthodes pour la navigation autonome

Traditionnellement, la navigation dans les applications aéronautiques est consacrée au contrôle en position alors que le guidage recouvre le contrôle en vitesse et le pilotage le contrôle en attitude.

Le contrôle en position 3D est séparé en deux objectifs : évolution le long de l'axe vertical et évolution dans le plan horizontal. Les enjeux de la navigation autonome sont alors les suivants:

#### **2.7.3.1. Le suivi de terrain**

Le problème du suivi de terrain a motivé de nombreuses recherches dans le domaine militaire pour le guidage des missiles de croisière et la pénétration de chasseurs bombardiers en territoire ennemi. La méthode classique pour les avions de combat consiste à définir, à partir d'un relevé radar du terrain situé à l'avant du véhicule, une commande en accélération verticale qui maintient le véhicule dans un domaine acceptable d'altitude par rapport au sol.

La trajectoire calculée est constituée de morceaux de lignes droites et d'arcs de paraboles. Des applications par retour visuels sont aussi utilisées, où une caméra remplace le radar.

#### **2.7.3.2. La navigation par points de passage**

La navigation proportionnelle, où navigation par point de passage, est la méthode classique pour le contrôle en position des engins aériens. Pour gagner un point de référence défini par l'opérateur, le véhicule applique une consigne de vitesse portée par la droite liant le point cible au véhicule. Pour les véhicules à voilure fixe, le module de la vitesse est maintenu constant et l'algorithme agit uniquement sur le cap. Pour les drones à voilure tournante, aptes au vol stationnaire, il est possible d'immobiliser le véhicule sur un point de passage. La navigation proportionnelle est ensuite utilisée pour amener le drone dans un voisinage de la cible.

Un contrôle en position est alors utilisé pour le maintien à poste. Cette stratégie de contrôle très simple peut être enrichie par des asservissements sur trajectoires.

#### **2.7.3.3. L'évitement d'obstacle et la gestion de zones d'exclusion**

Il faut reconnaître que la conception de stratégies de contournement d'obstacle dans le plan horizontal, bien que largement explorée dans les applications de robotique mobile, reste encore un axe de recherche récent dans le domaine aéronautique.

Les besoins militaires d'évoluer au plus près du sol, en dessous de la couverture radar adverse, ont néanmoins conduit chercheurs et ingénieurs à s'intéresser à des stratégies de contournement dans le plan horizontal, mais relevant davantage d'une gestion de zones d'exclusions (No-fly zone). La navigation en milieu urbain de mini drones de surveillance

implique des stratégies de contournement efficaces dans le plan horizontal ainsi qu'une capacité à détecter des obstacles imprévus et à réagir en temps réel à ces obstacles.

## **2.8. Conclusion**

Nous avons développé dans ce chapitre certaines notions très importantes sur la navigation autonome et sa relation avec les drones, nous avons aussi énuméré quelque méthode pour la poursuite et de la diversité des technologies des capteurs.

# Chapitre 3

## Hybridation INS/GPS et filtrage de kalman

*L*'utilisation, de nos jours, des SN dans de nombreuses applications technologiques s'avère, de plus en plus, indispensable et doit répondre assez souvent à des impératifs de sécurité et aux soucis de rentabilité. Les systèmes de navigation inertielle et satellitaire sont très largement répandus de nos jours. Ils sont utilisés dans beaucoup d'applications militaires et/ou civiles (aérienne, maritime, terrestre, spatiale, robotique, etc. ...). Toutefois, ces derniers présentent des avantages et des inconvénients induisant leur complémentarité. C'est pourquoi, l'utilisation simultanée des données issues de l'INS et du GPS a été nouvellement introduite

### 3.1 Introduction

A titre d'exemple, nous pouvons citer l'utilisation des SN dans les domaines suivants :

- Navigation aérienne (maritime) où l'utilisation de ces systèmes est nécessaire d'une part pour se localiser et par conséquent trouver son chemin et d'autre part pour assurer la sécurité des passagers.
- Industrie automobile où l'utilisation de ces systèmes permet d'éviter les encombrements dans les routes et de trouver le "bon" chemin.
- Robotique où l'utilisation des SN prend de plus en plus d'ampleur.

Ainsi, en vue de l'utilisation des SN, l'étude et la compréhension de ces systèmes sont, dans un premier temps, plus que nécessaires. A travers, le présent chapitre consacré à la présentation des SN les plus utilisés, nous tenterons de répondre à l'objectif cité au préalable.

Concrètement, en plus la présentation de plusieurs types d'hybridation possibles, qui existent dans la littérature, et à un rappel succinct d'outils de filtrage en l'occurrence le filtrage de Kalman (FK) et sa variante la plus naturelle : le filtrage de Kalman étendu (FKE).

Concrètement le chapitre est organisé comme suit :

- ✓ Dans le paragraphe 3.2, nous allons décrire le principe d'un navigateur inertiel.

Nous verrons, en particulier, les deux types de CI. Nous rappellerons brièvement les systèmes de coordonnées, où s'effectue la navigation, puis nous présenterons les équations de navigation et les erreurs susceptibles d'affecter le fonctionnement d'une CI. Enfin, nous terminerons par simuler le comportement d'une CI dans certaines situations.

- ✓ Dans le paragraphe 3.3, nous présenterons très succinctement le système de positionnement GPS. Précisément, nous décrirons son principe de fonctionnement. Ensuite, nous insisterons sur d'une part l'exploitation des mesures GPS et d'autre part sur les erreurs possibles affectant ce système.

Enfin, nous terminerons par simuler le comportement d'un système GPS dans plusieurs situations.

- ✓ Les avantages et les inconvénients de chaque système de navigation sont présentés dans le paragraphe 3.4.

- ✓ Dans le paragraphe 3.5, nous présenterons les différents types de couplage : mode non couplé, mode indirect avec couplage faible (en boucle ouverte et en boucle fermée), mode indirect avec couplage fort et enfin le mode direct.

- ✓ Dans le paragraphe 3.6, nous allons présenter les différents modèles d'état possibles

en vue de leur utilisation par les outils de filtrage.

- ✓ Dans le paragraphe 3.7, nous rappellerons très brièvement les équations du FK (respectivement FKE).
- ✓ Enfin, nous clôturons le chapitre par une conclusion.

## 3.2 Navigation inertielle

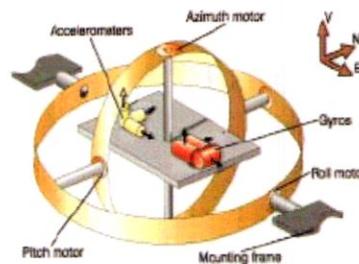
L'objectif de la navigation inertielle est d'estimer de façon autonome la position (attitude) et la vitesse d'un mobile par rapport à la terre à partir d'une CI composée de [27] :

- unité de mesure inertielle (UMI) comprenant des capteurs inertiels : accéléromètres et gyromètres.
- un calculateur de bord qui délivre les grandeurs de navigation.

### 3.2.1 Types de centrale inertielle

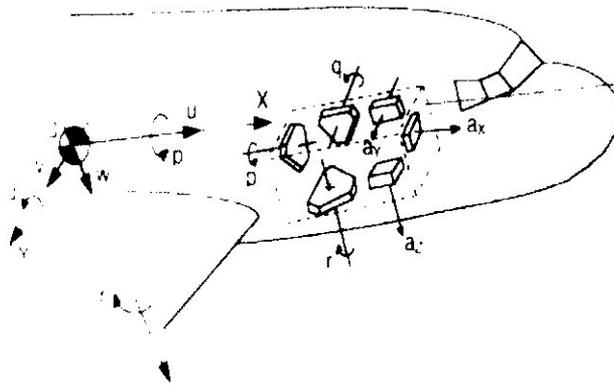
Il existe deux types de CI : Celle à plate-forme et celle à composants liés [27] [28].

**CI à plate-forme.** Dans ces CI (figure 2.1), les accéléromètres sont installés sur une plate-forme mécanique isolée des mouvements angulaires du véhicule, à l'aide de cadrans, et asservie à une orientation choisie [28]. Ce type de CI est utilisé lorsqu'une précision importante est requise en particulier à long terme (Exemple : un sous marin). Toutefois, il faut souligner la complexité de la mise en œuvre de l'algorithme de navigation dans ce type de CI.



**Figure 3.1.** CI à plate forme [28].

**CI à composants liés (Strap-down).** Dans une CI à composants liés, illustrée dans la figure 3.2, les capteurs inertiels sont rigidement fixés au mobile [1]. Les capteurs inertiels mesurent ainsi l'accélération et la vitesse angulaire dans un repère, sur lequel nous reviendrons ultérieurement, lié au mobile. Nous soulignons au passage que cette CI est, de nos jours, la plus utilisée. En effet, la raison du succès de ces centrales est intimement liée aux avantages qu'elles procurent, par rapport aux CI à plate-forme, en termes de coût et d'encombrement. Toutefois, un bémol nuance ce succès puisqu'en contre partie la technologie n'atteint pas encore les performances des CI à plate-forme.

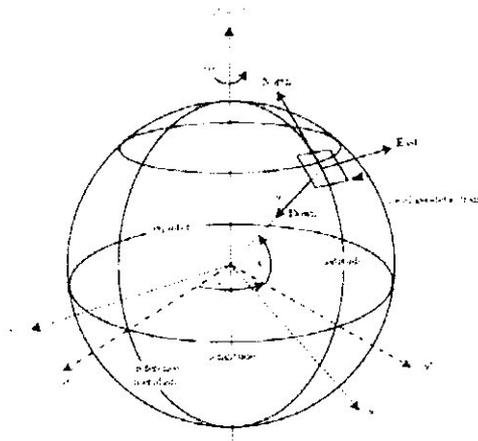


**Figure 3.2.** CI à composants liés embarqué à bord d'un avion [29].

**Remarque 3.1** Dans ce travail, nous allons utiliser le principe des CI à composants liés.

### 3.2.2 Systèmes de coordonnées

Plusieurs systèmes de coordonnées peuvent être adoptés en pratique [27] [30] [31]. Nous nous contentons ici de présenter les plus souvent utilisés. La figure 2.3 résume les repères que nous allons citer dans ce paragraphe [16].



**Figure 3.3.** Différents systèmes de coordonnées

**Repère inertiel [i].** Ce repère, dont chaque axe garde une direction fixe par rapport aux étoiles, est centré sur la terre [27]. L'axe

$x'$  pointe vers l'équinoxe vernal, l'axe  $z'$  coïncide avec l'axe du moment angulaire de la terre et l'axe  $y'$  complète le trièdre direct.

**Repère terrestre [e].** Ce repère est déduit du précédent par la rotation de la terre [28].

**Repère géographique local (TGL) ou de navigation [n].** C'est un repère couramment utilisé en navigation [27] [28]. Il se déplace à la surface de l'ellipsoïde terrestre en même temps que le mobile. L'origine (respectivement les trois axes) de ce repère est située à la verticale du centre de masse du mobile (respectivement pointent vers le nord, l'est et la verticale descendante).

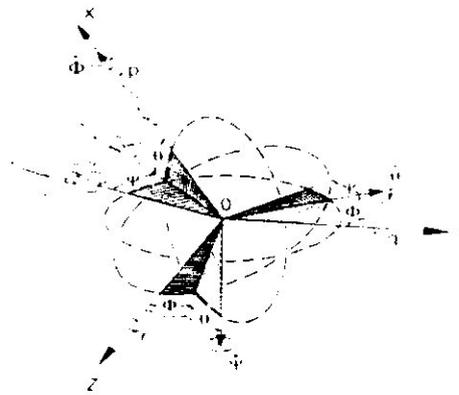
**Trièdre lié au mobile [b].** C'est le repère lié au mobile.

**Remarque 3.2.** Dans la technologie strap-down, le repère du mobile est confondu avec le repère des capteurs inertiels [27].

**Remarque 3.3.** Le choix du repère de navigation se fait en fonction de l'application [31]. En effet, le principe strap-down ne limite pas la formulation des équations de navigation à un repère unique.

### 3.2.3 Equations de navigation

L'orientation d'un mobile relativement à un repère inertiel est définie par les trois angles d'Euler. Une série de rotations le ramène à l'orientation des axes du repère [b] comme cela est illustré dans la figure 3.4 [29] :



**Figure 3.4.** Angles d'Euler  $(\psi, \theta, \phi)$

- une rotation dans le sens des aiguilles d'une montre autour de l'axe du lacet, avec un angle  $\psi$ , suivie par :
  - une rotation autour de l'axe du tangage, avec un angle  $\theta$  suivie par :
  - une rotation dans le sens des aiguilles d'une montre autour de l'axe du roulis avec un angle  $\phi$

La relation qui relie les vitesses angulaires  $p, q, r$  (mesurées par les gyromètres) aux  $(\psi, \theta, \phi)$

dérivées des angles d'Euler

est donnée par [29] :

$$\rho = \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = C_{\phi\theta\psi/pqr} \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi \sec\theta & \cos\phi \sec\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

L'intégration de cette équation, à partir des conditions initiales de l'attitude du mobile, permet d'obtenir les angles d'Euler. Cependant, dès que l'angle de tangage  $\theta$  tend vers  $\pm 90^\circ$ , les erreurs divergent. Pour pallier ce problème, nous pouvons utiliser les quatre paramètres d'Euler  $(e_0, e_1, e_2, e_3)$ , communément appelés quaternions, qui sont reliés aux angles d'Euler  $(\psi, \theta, \phi)$  par les quatre expressions analytiques ci-dessous [29] :

$$\dot{e}_0 = -\frac{1}{2}(e_1 p + e_2 q + e_3 r) \quad (3.2)$$

$$\dot{e}_1 = \frac{1}{2}(e_0 p + e_2 r - e_3 q) \quad (3.3)$$

$$\dot{e}_2 = \frac{1}{2}(e_0 q + e_3 p - e_1 r) \quad (3.4)$$

$$\dot{e}_3 = \frac{1}{2}(e_0 r + e_1 q - e_2 p) \quad (3.5)$$

Avec la condition suivante qui doit être satisfaite tout le temps :

$$e_0^2 + e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 = 1 \quad (3.6)$$

Ainsi, les équations (2.2) à (2.5) peuvent être utilisées pour obtenir les quaternions à partir des leurs conditions initiales directement reliées à celles des angles d'Euler  $(\psi, \theta, \phi)$ , par les équations suivantes [3] :

$$e_0 = \cos\frac{\psi}{2} \cos\frac{\theta}{2} \cos\frac{\phi}{2} + \sin\frac{\psi}{2} \sin\frac{\theta}{2} \sin\frac{\phi}{2} \quad \text{à } t=0 \quad (3.7)$$

$$e_1 = \cos\frac{\psi}{2} \cos\frac{\theta}{2} \sin\frac{\phi}{2} - \sin\frac{\psi}{2} \sin\frac{\theta}{2} \cos\frac{\phi}{2} \quad \text{à } t=0 \quad (3.8)$$

$$e_2 = \cos\frac{\psi}{2} \sin\frac{\theta}{2} \cos\frac{\phi}{2} + \sin\frac{\psi}{2} \cos\frac{\theta}{2} \sin\frac{\phi}{2} \quad \text{à } t=0 \quad (3.9)$$

$$e_3 = -\cos\frac{\psi}{2} \sin\frac{\theta}{2} \sin\frac{\phi}{2} + \sin\frac{\psi}{2} \cos\frac{\theta}{2} \cos\frac{\phi}{2} \quad \text{à } t=0 \quad (3.10)$$

Une fois, les quaternions calculés, nous pouvons évaluer les angles d'Euler en utilisant les équations suivantes [3] :

$$\theta = \sin^{-1}(-2(e_1e_3 - e_0e_2)) \quad (3.11)$$

$$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{e_0^2 - e_1^2 - e_2^2 + e_3^2}{\sqrt{1 - 4(e_1e_3 - e_0e_2)^2}}\right) \text{sign}(2(e_2e_3 + e_0e_1)) \quad (3.12)$$

$$\psi = \cos^{-1}\left(\frac{e_0^2 + e_1^2 - e_2^2 - e_3^2}{\sqrt{1 - 4(e_1e_3 - e_0e_2)^2}}\right) \text{sign}(2(e_1e_2 + e_0e_3)) \quad (3.13)$$

Par conséquent, une fois l'attitude obtenue il est possible de calculer la position en utilisant les accélérations ( $a_x$ ,  $a_y$  et  $a_z$ ) mesurées par les accéléromètres de la CI dans le repère [b]. Après plusieurs étapes de calcul, il est possible d'obtenir les dérivées, des positions géographiques, à intégrer [29] :

$$\dot{\lambda} = \frac{V_N}{R_e} \quad (3.14)$$

$$\dot{\mu} = \frac{V_E}{R_e \cos \lambda} \quad (3.15)$$

$$\dot{h} = -V_D \quad (3.16)$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} V_N \\ V_E \\ V_D \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} c\theta c\psi & c\theta s\psi & -s\theta \\ s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi & s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi & s\phi c\theta \\ c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi & c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi & c\phi c\theta \end{bmatrix}}_{DCM}^T \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\dot{U} = a_x + Vr - Wq + g \sin \theta \quad (3.18)$$

$$\dot{V} = a_y - Ur - Wp - g \cos \theta \sin \phi \quad (3.19)$$

$$\dot{W} = a_z + Uq - Vp - g \cos \theta \cos \phi \quad (3.20)$$

$$\begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix}_{\text{mesuré}} - DCM \begin{bmatrix} \Omega \cos \lambda + \dot{\mu} \cos \lambda \\ -\dot{\lambda} \\ -\Omega \sin \lambda - \dot{\mu} \sin \lambda \end{bmatrix} : \Omega \text{ vitesse de rotation de la terre}$$

### 3.2.4 Erreurs dans les INS

Le fonctionnement idéal d'une CI est impossible. Beaucoup d'erreurs affectent, en effet, les performances de cette dernière. Nous pouvons citer les erreurs suivantes que nous allons décrire très brièvement [32] :

- Erreurs instrumentales
- Erreurs d'alignement
- Erreurs du calculateur
- Erreurs de modélisation
- Phénomène de Schuler

**Erreurs instrumentales.** Elles sont liées aux imperfections des capteurs. En effet, la sortie d'un capteur n'est pas forcément l'image de l'entrée. Ceci se traduit par la relation suivante :

$$f_a = (1 + K_a)f + b_a \quad (3.20)$$

Où  $f$  (respectivement  $f_a$ ) désigne l'entrée qui peut être une accélération ou une vitesse de rotation (respectivement la sortie), le paramètre  $k_a$  est un facteur d'échelle généralement petit et  $b_a$  représente un biais qui dépend des conditions d'étalonnage. Une modélisation simple consiste à prendre un biais constant.

**Erreurs d'alignement.** L'objectif de l'opération d'alignement de la CI, au début de chaque mission, consiste à transmettre au mobile les valeurs initiales de la position, celles de la vitesse et celles de l'orientation. Toutefois, il est important de noter que cet objectif ne peut pas toujours être atteint en raison d'erreurs appelées "erreurs d'alignement", supposées centrées et uniforme, qui vont se propager au fur et à mesure des opérations d'intégration.

**Erreurs du calculateur.** L'utilisation de calculateurs numériques induit inexorablement des erreurs de quantification, des dépassements de capacités et des erreurs de troncature.

**Erreurs de modélisation.** La méconnaissance de l'environnement se traduit par des erreurs de modélisation (Exemple : Influence de l'environnement sur les capteurs inertiels).

**Phénomène de Schuler.** Ce phénomène, lié à l'évaluation de la pesanteur, est à double effet puisque le double intégrateur de l'INS (passage de l'accélération vers la position) d'une part se comporte comme un oscillateur pour les grandeurs horizontales de navigation et d'autre part entraîne une divergence en exponentiel pour les grandeurs verticales.

### 3.2.5. Simulation d'une CI à composants liés

Nous allons dans ce paragraphe, simuler le fonctionnement d'un INS pour différentes configurations d'un mobile aérien (L'annexe A présente quelques résultats obtenus pour un

véhicule terrestre que nous pouvons considérer comme un cas particulier du cas 3D) :

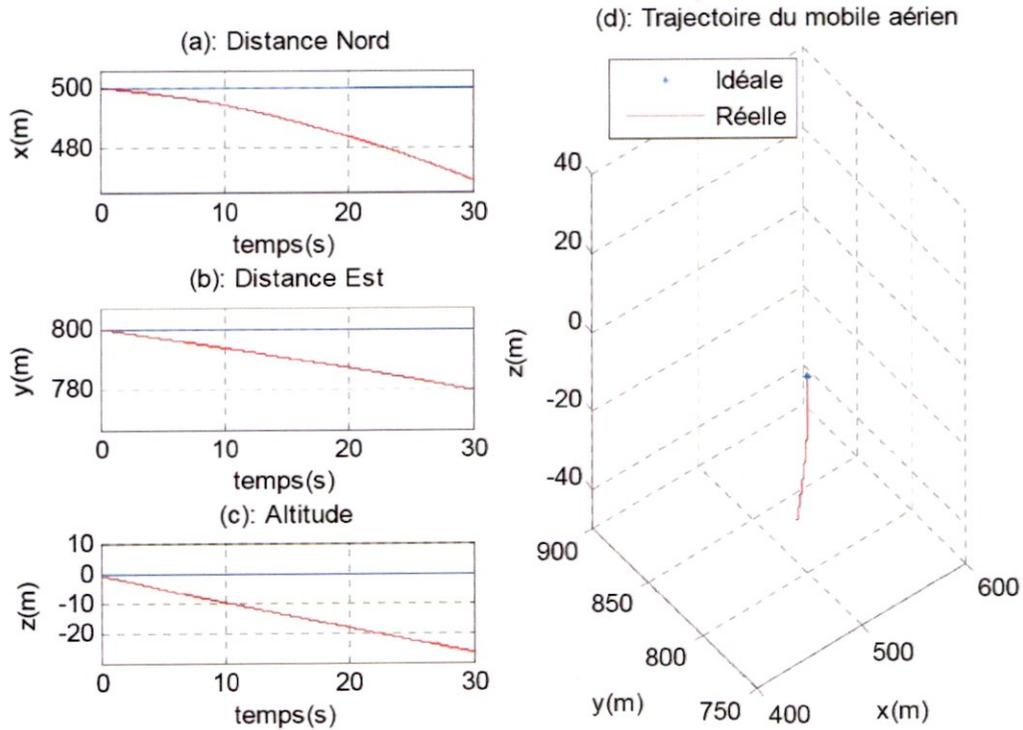
- C1 : à l'arrêt.
- C2 : décrivant une trajectoire rectiligne.
- C3 : décrivant une trajectoire circulaire.
- C4 : décrivant un contour carré.

Les valeurs de simulations sont les suivantes :

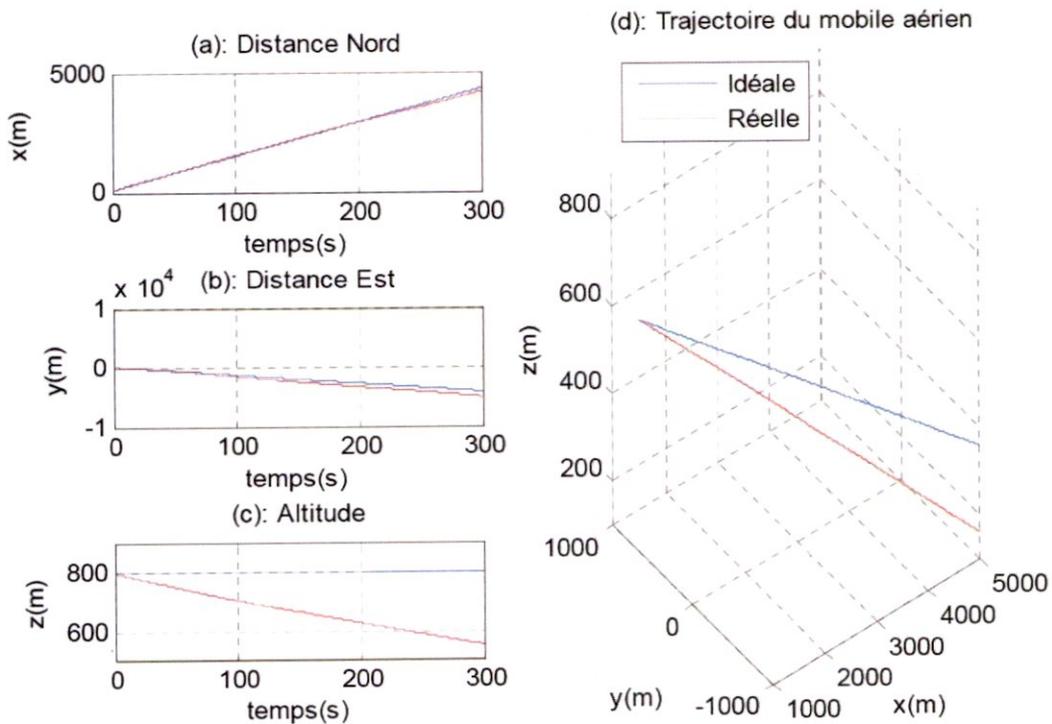
- La fréquence de l'INS est de 100Hz.
- L'écart-type des erreurs d'alignement sont [5m, 1m/s, 9°]
- Le facteur d'échelle des capteurs de 0.01%.
- Le biais des gyromètres (respectivement accéléromètres) est de 0.12°/s

(Respectivement 0.98 m/s<sup>2</sup>).

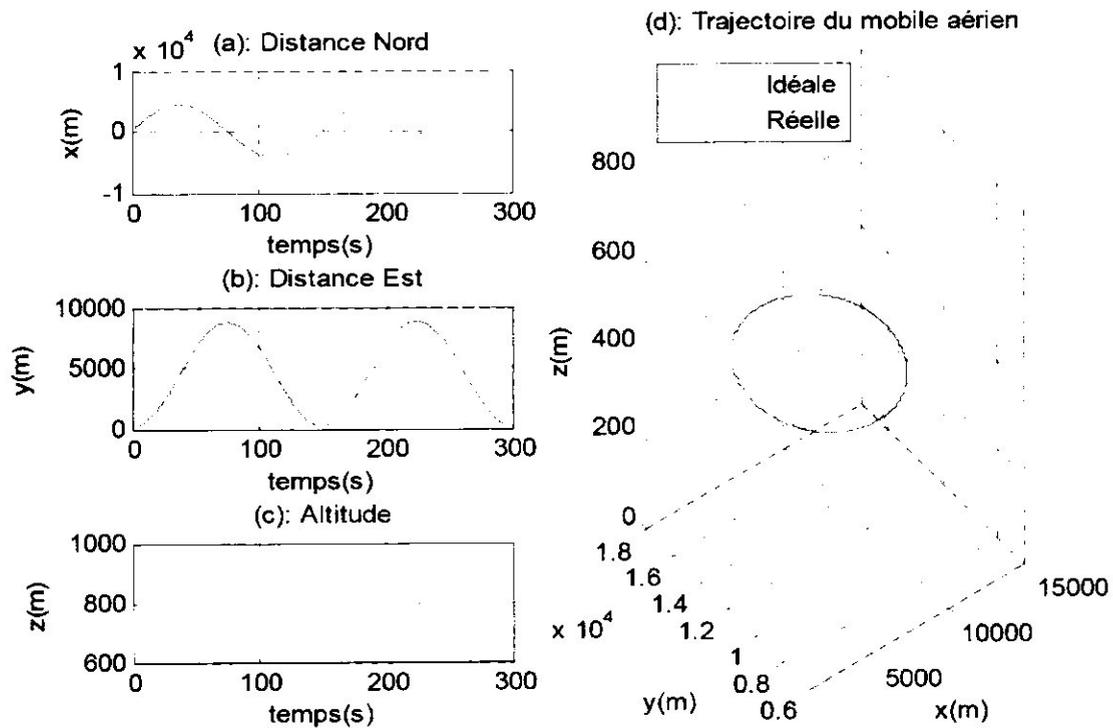
• La mesure des  $(p, q, r)$  (respectivement  $(a_x, a_y, a_z)$ ) est affectée par un bruit gaussien centré d'écart type 0.5°(respectivement 0.98 m/s<sup>2</sup>). Dans les figures 2.5 à 2.8, la trajectoire idéale (respectivement issue de l'INS) est représentée en bleu (respectivement en rouge).



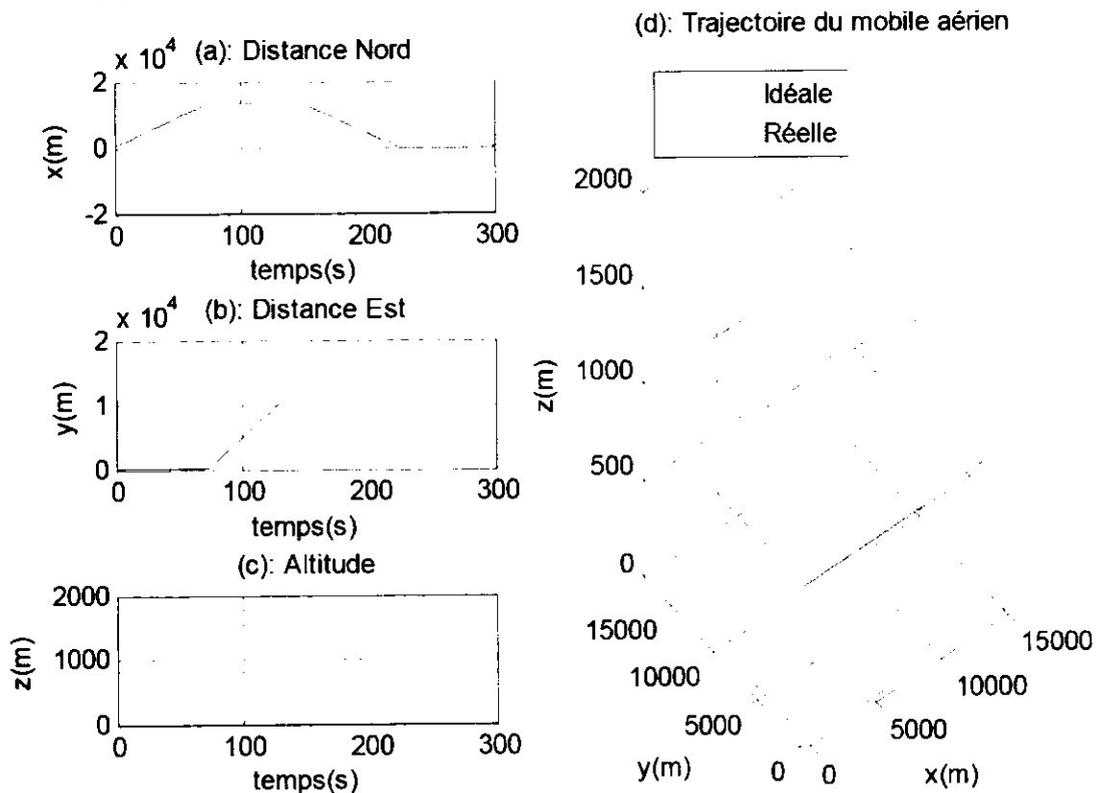
**Figure (3.5)** Mobile aérien à l'arrêt :  $X(0)=[500,800,0]^T$ ,  $V(0)=[0,0,0]^T$ , Attitude(0)=[0,0,0]<sup>T</sup>, Temps=30s. (\*) Mobile à l'arrêt idéalement, (-) trajectoire réelle. (a) Distance nord, (b) distance est, (c) altitude, (d) représentation 3D.



**Figur (3.6)** Mobile aérien décrivant une trajectoire rectiligne :  $X(0)=[80,80,800]^T$ ,  $V(0)=[180,0,0]^T$ , Attitude(0)=[0,0,0]<sup>T</sup>, Temps=300s. (-) Trajectoire idéale, (-) trajectoire réelle. (a) Distance nord, (b) distance est, (c) altitude, (d) représentation 3D.



**Figure (3.7)** Mobile aérien décrivant une trajectoire circulaire :  $X(0) = [100,200,800]^T$ ,  $V(0)=[0,0,0]^T$ ,  $Attitude(0)=[0,0,0]^T$ , Temps=300s, Rayon=258m. (-) Trajectoire idéale, (-) trajectoire réelle. (a) Distance nord, (b) distance est, (c) altitude, (d) représentation 3D.



**Figure (3.8)** Mobile aérien décrivant une trajectoire carrée :  $X(0) = [100,200,800]^T$ ,  $V(0)=[0,0,0]^T$ ,  $Attitude(0)=[0,0,0]^T$ , longueur d'un côté =13500m, Temps=300s. (-) Trajectoire idéale, (-) trajectoire réelle. (a) Distance nord, (b) distance est, (c) altitude, (d) représentation 3D.

Tous les résultats obtenus dans les figures 2.5 à 2.8 montrent assez clairement les effets de la propagation temporelle des erreurs affectant le fonctionnement d'un INS. En particulier, nous remarquons que le phénomène de Schuler influe énormément sur le calcul de l'altitude. Nous retrouvons ainsi les résultats obtenus dans la littérature [27] [32].

### 3.3 Navigation par GPS

Le système GPS, développé par l'armée américaine, est un système de radio navigation, par satellites qui envoient des signaux codés, entre autres, code C/A et code P sur lesquels nous n'allons pas nous étendre afin d'alléger la lecture du rapport. Ces codes sont traités par des récepteurs GPS qui mesurent la distance entre la station et plusieurs satellites. Il faut noter que trois satellites sont nécessaires pour déterminer la position du récepteur (principe de la triangulation). Un quatrième satellite est nécessaire pour tenir compte de la non-synchronisation de l'horloge du récepteur et des horloges des satellites.

#### 3.3.1 Description du système

Le système GPS se décompose en trois segments : Segment spatial, segment de contrôle et segment utilisateur.

**Segment spatial.** Il est composé de "31" satellites, en orbite quasi-circulaire autour de la terre, à une hauteur d'environ 20000 Km et dont la période de révolution est d'environ 12 heures. Ces satellites sont répartis sur 6 plans orbitaux inclinés à 55° par rapport à l'équateur.

**Segment de contrôle.** Le segment de contrôle doit maintenir en permanence le système GPS opérationnel. Pour cela cinq stations de poursuites sont nécessaires. Elles sont situées à Colorado Springs (station principale), Hawaii, Ascension Island, Diego Garcia et Kwajalein.

**Segment utilisateur.** Il représente les utilisateurs. Nous distinguons deux types de service :

- Un service SPS (Standard Positioning Service) gratuit, anonyme, accessible à tous les utilisateurs, mais il est soumis à 2 types de dégradations volontaires :

SA (Selective Availability) qui consiste à dégrader les performances nominales du système (celle-ci n'est plus active théoriquement depuis le 2 mai 2000) et l'AS (Anti Spoofing) qui consiste à rendre inconnu une partie des informations transmises afin qu'elles ne puissent pas être reproduites.

- Un service PPS (Precise Positioning Service) réservé aux militaires américains et leurs alliés. Il consiste en l'utilisation de clés de décodage permettant d'éliminer les dégradations volontaires (SA et AS).

### 3.3.2 Types de mesures GPS

Il y a 3 types de mesures GPS possibles : pseudo distance, mesures de phase de l'onde porteuse et mesures de fréquence doppler.

**Mesure de pseudo distance (mesure par code).** C'est une mesure du temps de propagation qu'a pris le signal pour parcourir la distance satellite-récepteur. Cette différence de temps, multipliée par la vitesse de la lumière, donne une mesure de distance qui est toutefois faussée par la propagation de l'onde dans l'atmosphère ainsi que par les erreurs de synchronisation entre les horloges du satellite et du récepteur. Une erreur de 1 ms représente une erreur de distance de 300 Km . Pour ces raisons, cette mesure de distance est appelée pseudo distance.

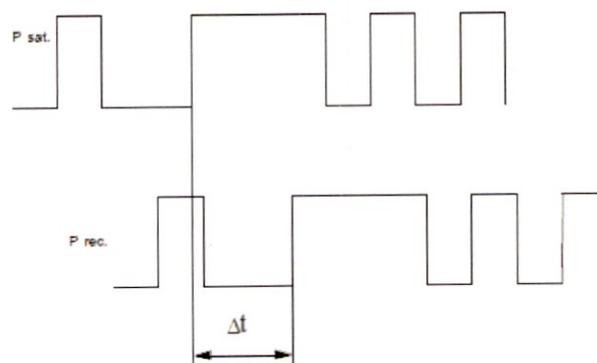


Figure 3.9. Mesure de pseudo distance.

**Mesure de phase.** Pour des applications plus précises, nous exploitons la différence de phase entre l'onde reçue au récepteur et la réplique du signal généré par ce dernier. Il faut souligner que ce mode de mesure est plus compliqué à mettre en oeuvre que celui basé sur le code.

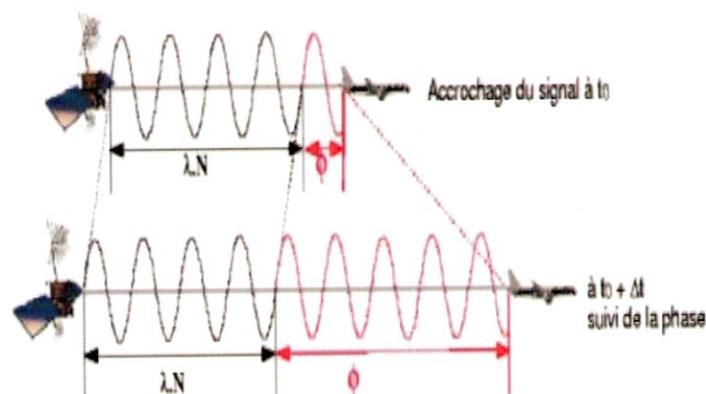


Figure 3.10 Mesure par la phase.

**Mesure de fréquence doppler.** C'est la différence entre la fréquence reçue et la fréquence nominale de transmission causée par le mouvement relatif entre le satellite et le récepteur

(Delta-range). Cette mesure est utilisée pour déterminer la vitesse instantanée des récepteurs mobiles et pour détecter et corriger les sauts de cycle présents dans les mesures de phase.

### 3.3.3 Précision du positionnement GPS

Jusqu'à présent, nous avons parlé du positionnement absolu (à l'aide d'un seul récepteur GPS) dont la précision théorique est d'environ 10 m. Un moyen efficace permettant d'avoir une précision meilleure est le positionnement relatif dont le principe consiste à utiliser une station de référence, dont les coordonnées sont connues *a priori*, dont le but est de transmettre, en temps réel, un modèle corrigé au récepteur mobile. Cette approche est connue sous le nom "differential GPS" (DGPS) dont la précision peut atteindre le centimètre (voire le millimètre).

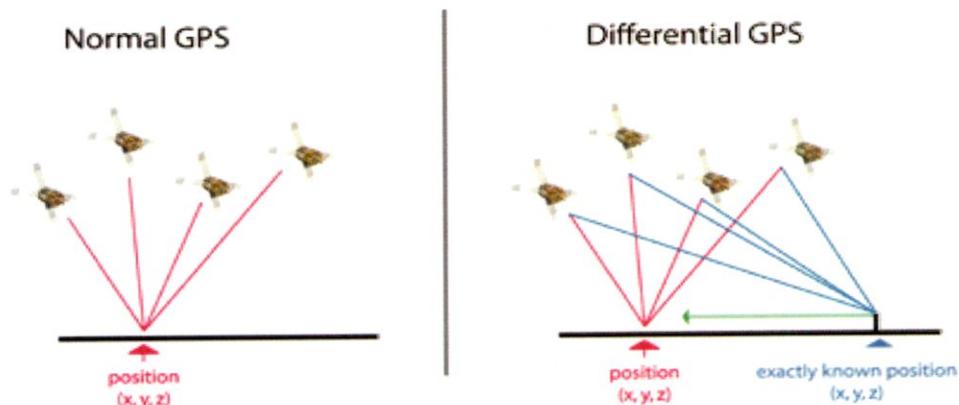
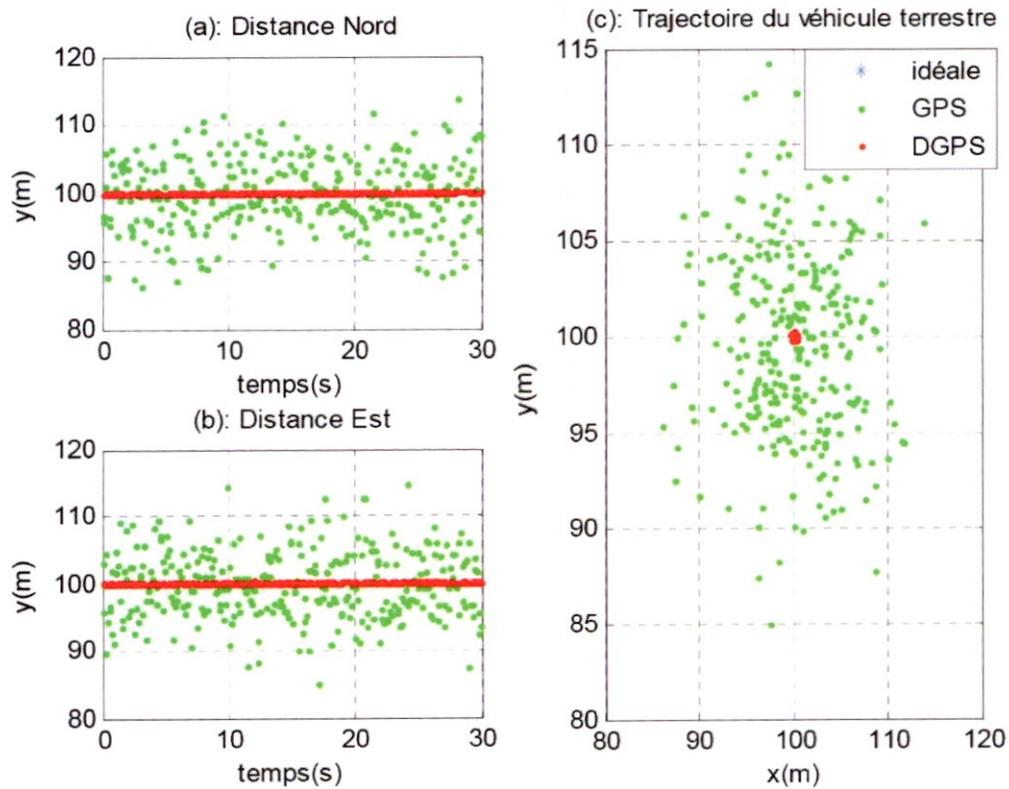


Figure 3.11 Positionnement absolu et différentiel

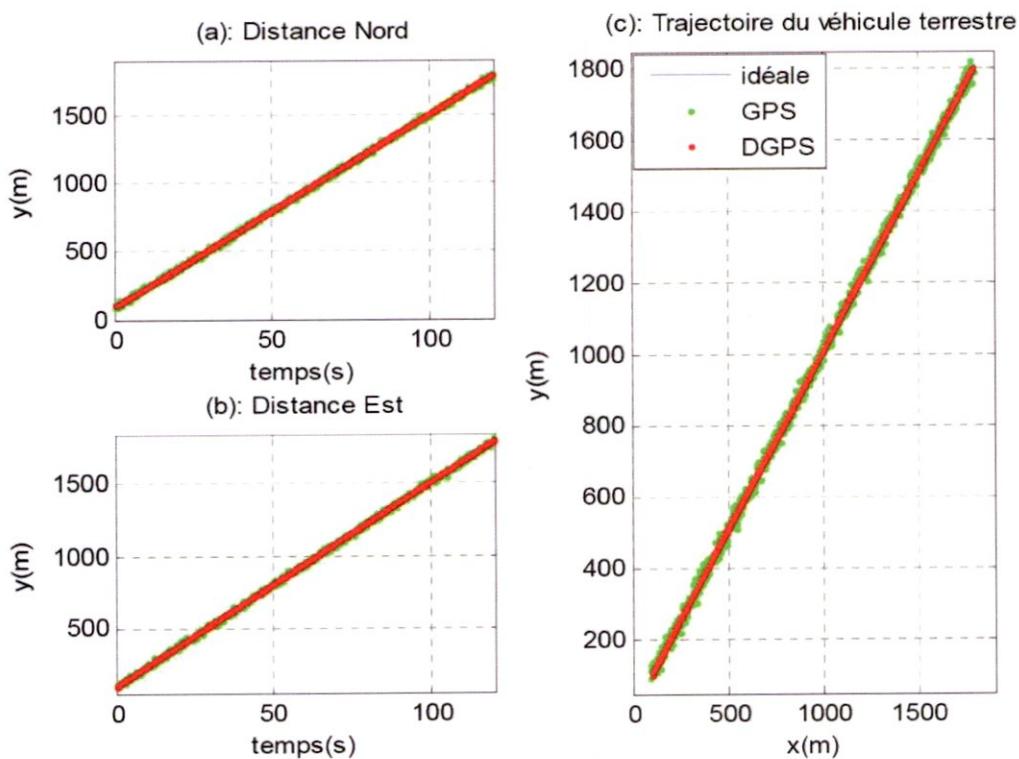
### 3.3.4. Simulation des observations délivrées par le GPS

Nous allons dans ce paragraphe, simuler le fonctionnement d'une navigation par GPS d'un mobile pour les quatre configurations énumérées dans le paragraphe 3.2.5. Les données GPS, dont la fréquence est de 10Hz, ont été simulées à partir de la trajectoire idéale (issue d'un INS dont les caractéristiques sont présentées dans le paragraphe 3.2.5) soumise à un bruit additif  $N(0,100)$ .

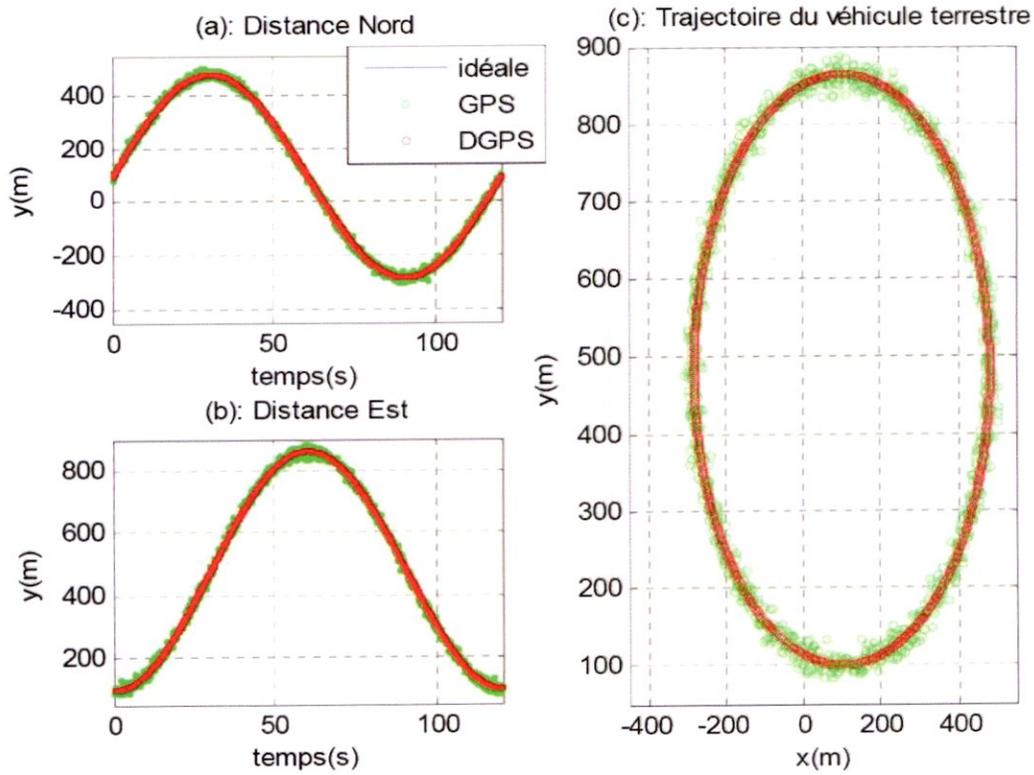
Pour les simulations numériques, nous allons commencer, dans un premier temps, par présenter, pour un véhicule terrestre, l'avantage incontestable de l'utilisation d'un DGPS sur celle d'un GPS. Les données DGPS, dont la fréquence est de 10Hz, ont été simulées à partir de la trajectoire idéale soumise à un bruit additif  $N(0,0.01)$ . Puis, dans un deuxième temps, nous abordons le cas d'un mobile aérien et nous nous contentons de présenter les performances de la navigation GPS uniquement.



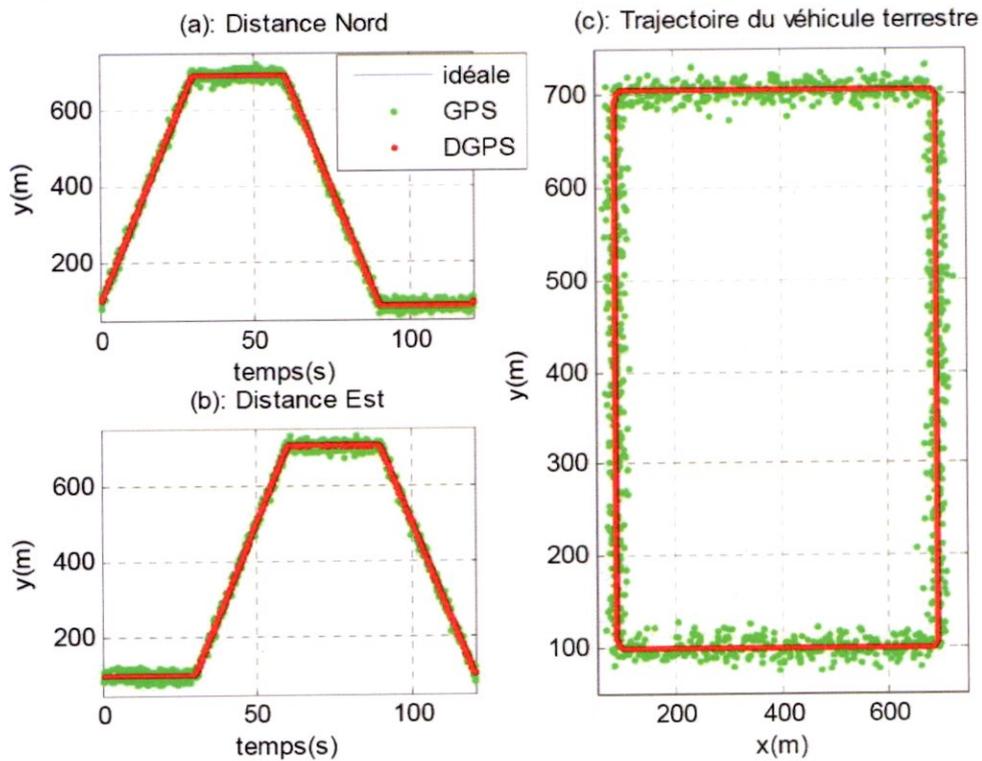
**Figure(3.12)** Véhicule terrestre à l'arrêt :  $X(0)=[100,100,200]^T$ ,  $V(0)=[0,0,0]^T$ ,  $Attitude(0)=[0,0,0]^T$ , Temps=30s. (\*) Mobile à l'arrêt idéalement, (°) trajectoire GPS, (°) trajectoire DGPS. (a) Distance nord, (b) distance est, (d) représentation 2D.



**Figure (3.13)** Véhicule terrestre décrivant une trajectoire rectiligne :  $X(0)=[100,100,200]^T$ ,  $V(0)=[0,20,0]^T$ ,  $Attitude(0)=[0,0,0]^T$ , Temps=120s. (-) Trajectoire idéale, (°) trajectoire GPS, (°) trajectoire DGPS. (a) Distance nord, (b) distance est, (d) représentation 2D.



**Figure (3.14)** Véhicule terrestre décrivant une trajectoire circulaire :  $X(0)=[100,100,200]^T$ ,  $V(0)=[20,0,0]^T$ ,  $Attitude(0)=[0,0,0]^T$ , Temps=120s, Rayon =325m. (-) Trajectoire idéale, (°) trajectoire GPS, (°) trajectoire DGPS. (a) Distance nord, (b) distance est, (c) représentation 2D.



**Figure(3.15)** Véhicule terrestre décrivant une trajectoire carrée :  $X(0)=[100,100,200]^T$ ,  $V(0)=[20,0,0]^T$ ,  $Attitude(0)=[0,0,0]^T$ , longueur d'un côté =600m, Temps=120s. (-) Trajectoire idéale, (°) trajectoire GPS, (°) trajectoire DGPS. (a) Distance nord, (b) distance est, (c) représentation 2D.

Dans les figures 3.12 à 3.19, la trajectoire idéale (respectivement issue du GPS) est représentée en bleu (respectivement en vert). Enfin, la trajectoire issue du DGPS est représentée en rouge dans les figures 3.12 à 3.15.

Les résultats obtenus dans les figures 3.9 à 3.12 montrent la supériorité incontestable du DGPS sur le GPS dans la navigation. Toutefois, au regard des résultats obtenus, dans les figures 3.5 à 3.6, il s'avère que lorsque les données GPS sont disponibles, la navigation GPS est meilleure que celle de l'INS. Dans la suite de ce travail, nous allons nous contenter de l'utilisation du GPS:

- pour mieux apercevoir les effets du filtrage
- en raison de l'absence de stations de référence pour la navigation aérienne à long termes
- en raison du souci de sécurité en particulier lors de phase d'atterrissage.

### **3.4 Avantages et inconvénients**

Les deux systèmes de navigation présentés précédemment diffèrent par leur principe de fonctionnement ainsi que leur réalisation. Dans ce paragraphe nous allons citer quelques avantages et inconvénients propres à chacun de ces systèmes.

#### **Avantages d'un INS**

- Solution complète (obtention de la position, la vitesse et les angles d'orientation du mobile).
- Haut débit de données (fréquence d'échantillonnage des CI élevée).
- Haute précision à court terme.
- Immunité contre le brouillage.

#### **Inconvénients d'un INS**

- Forte dérive (augmentation de l'erreur au cours du temps).
- Indisponibilité des conditions initiales et erreur d'alignement.
- Phénomène de Schuler.

#### **Avantages du système GPS**

- Précision à long terme (précision indépendante du temps).
- Indépendance vis-à-vis de conditions initiales (position absolue).

### Inconvénients du système GPS

- Dépendance vis-à-vis de l'armée américaine.
- Erreur de positionnement en présence d'obstacles (phénomène du multi trajet).
- Intermittence des données GPS (fréquence d'échantillonnage faible).

### 3.5 Hybridation INS/GPS

Plusieurs types de couplage existent dans la littérature. Dans ce paragraphe nous nous proposons de présenter les plus répandus:

- Mode non couplé
- Mode indirect faiblement couplé (en boucle ouverte et en boucle fermée)
- Mode indirect fortement couplé
- Mode direct

Nous soulignons, ici, le fait que le choix d'une hybridation est fortement lié à la qualité des capteurs utilisés et le domaine d'application.

#### 3.5.1 Mode non couplé

Dans ce mode (figure 3.20), le GPS et l'INS produisent indépendamment les solutions de navigation sans l'influence des unes sur les autres. La solution intégrée de navigation est mécanisée par un processus externe d'intégration. Il peut être simplement un « interrupteur ».

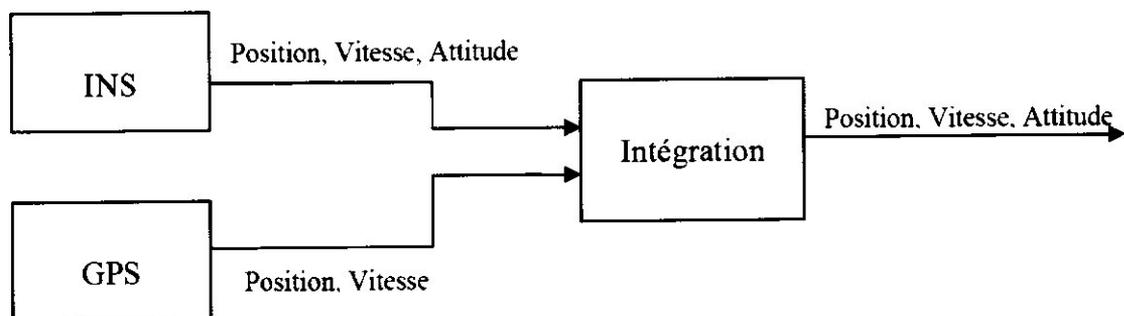
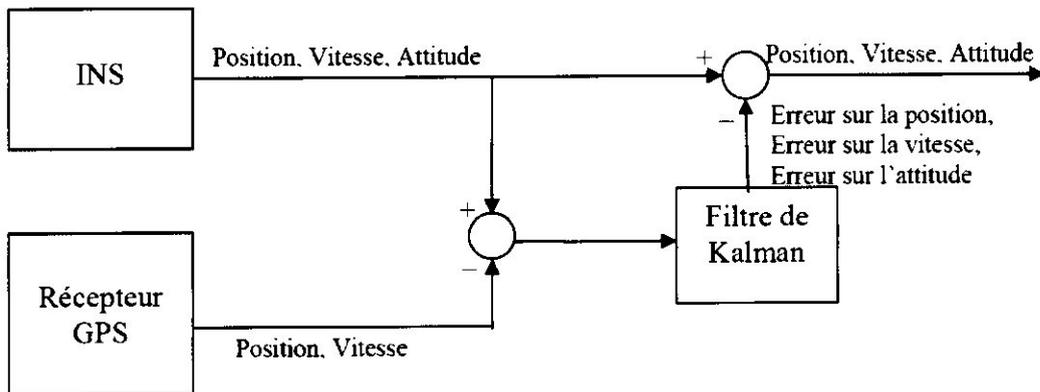


Figure 3.20 mode non couplé

#### 3.5.2 Mode indirect faiblement couplé

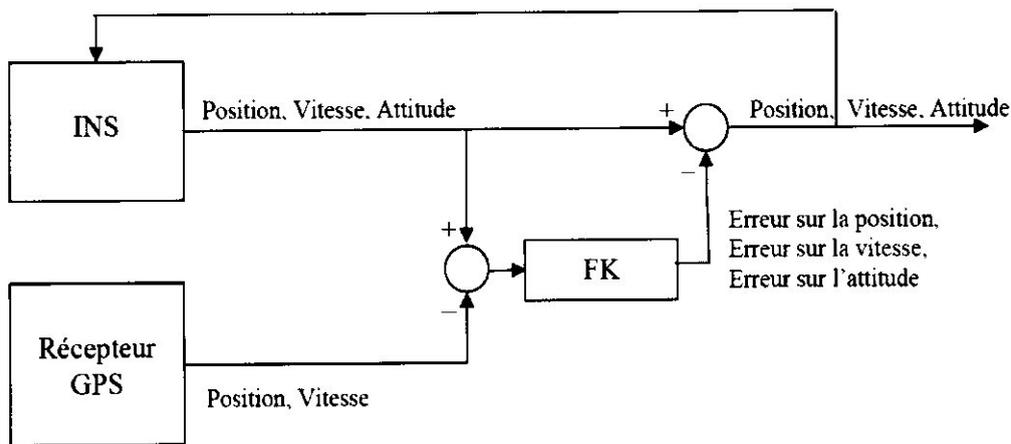
Avec un mode faiblement couplé, la différence entre la sortie du GPS, “position” ou “position et vitesse”, et celle de l'INS constitue l'entrée du FK pour l'estimation des erreurs sur les positions, des erreurs sur les vitesses et des erreurs sur l'attitude qui serviront à corriger la sortie de l'INS selon les deux types de configurations suivantes [30] [34] [42]:

**Boucle ouverte.** La sortie du système global est la différence entre celle de l'INS et l'état estimé du FK (figure 3.21).



**Figure 3.21** Mode indirect faiblement couplé en boucle ouverte

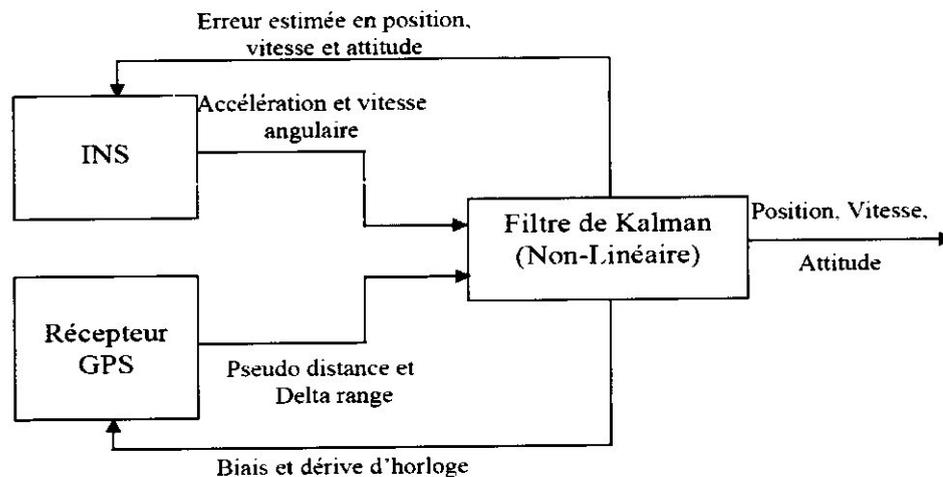
**Boucle fermée.** La différence entre la sortie de l'INS et l'état estimé du FK est réinjectée pour actualiser l'INS (figure 3.22).



**figure 3.22** Mode indirect faiblement couplé en boucle fermée

### 3.5.3 Mode indirect fortement couplé

Dans ce mode, la fusion (figure 3.23) s'effectue cette fois-ci entre les données brutes du GPS (mesure doppler, pseudo distance) et celles de l'INS (forces spécifiques, vitesses angulaires) afin d'augmenter la robustesse (élimination de la propagation des erreurs). Cette manière d'associer les données entraîne l'apparition de modèles non linéaires (les mesures doppler et les pseudos-distance sont non linéaires) [28] [16] [34].

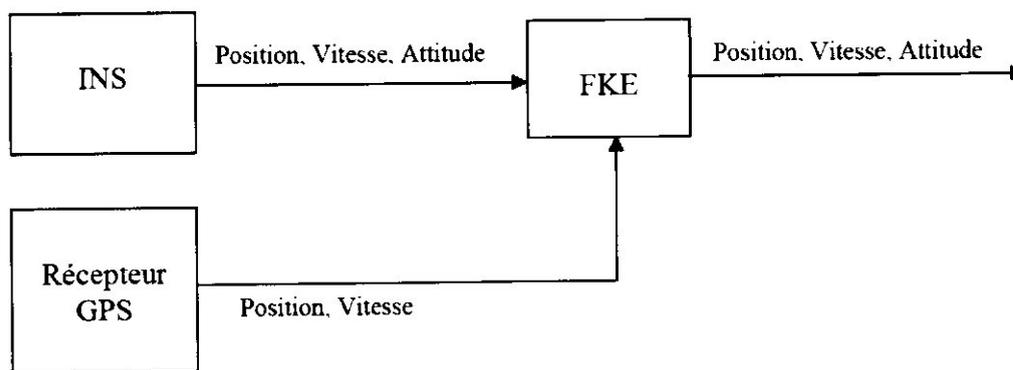


**figure 3.23** Mode indirect fortement couplé

Néanmoins, il faut noter ce nouveau est plus coûteux et plus difficile à mettre en œuvre en raison de l'inaccessibilité, par le grand public, aux données brutes. C'est pourquoi, cette approche ne sera pas traitée dans notre travail.

### 3.5.4 Mode direct

Dans ce mode, la sortie du GPS, "position" ou "position et vitesse", constitue l'entrée du filtre pour l'estimation des positions, des vitesses et de l'attitude qui serviront à actualiser l'INS comme cela est illustré dans la figure suivante [31] [16] [34]. Il faut noter que l'utilisation, de ce mode, entraîne le traitement d'un modèle non linéaire. FIG 3.24



**Figure 3.24** mode direct

### 3.6. Modèles d'état

Nous venons de voir dans le paragraphe précédent différentes configurations pour le couplage des observations issues de l'INS et du GPS. Aussi, chaque configuration nécessite un modèle d'état approprié.

#### 3.6.1 Mode indirect faiblement couplé

Dans ce mode, nous avons [29] [33] :

$$X_{k+1} = \Phi_k X_k + W_k \quad (3.1)$$

$$Z_k = H_k X_k + V_k \quad (3.2)$$

où

- $X_k = [\Delta x \ \Delta y \ \Delta z \ \Delta V_N \ \Delta V_E \ \Delta V_D \ \Delta \phi \ \Delta \theta \ \Delta \psi]^T$  représente l'erreur à l'instant  $k$ .
- $\Phi_k$  est la matrice de transition donnée par :

$$\Phi_k = \exp(F\Delta t) \approx I + F\Delta t \quad (3.3)$$

$F$  est donnée en Annexe B et  $\Delta t$  est la période d'échantillonnage de l'INS.

- $W_k$  est un bruit blanc stationnaire centré gaussien de matrice de covariance  $Q_k$  donnée par :

$$Q_k = E[W_k W_k^T] \approx \Phi_k G Q G^T \Phi_k^T \Delta t \quad (3.4)$$

$$G = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ DCM^T & 0 \\ 0 & -DCM^T \end{pmatrix} \text{ et } Q = \text{diag}(\sigma_{\delta ax}^2 \quad \sigma_{\delta ay}^2 \quad \sigma_{\delta az}^2 \quad \sigma_{\delta \omega x}^2 \quad \sigma_{\delta \omega y}^2 \quad \sigma_{\delta \omega z}^2)$$

$\sigma_{\delta \omega i}$  et  $\sigma_{\delta \omega o}$  sont respectivement l'écart type des erreurs sur les accélérations et les vitesses de rotation.

- $Z_k$  est l'observation bruitée en "position" ou en "position et vitesse"

$$Z_k = \begin{pmatrix} (R_e + h)(\lambda_{INS} - \lambda_{GPS}) \\ (R_e + h)\cos\lambda(\mu_{INS} - \mu_{GPS}) \\ h_{INS} - h_{GPS} \end{pmatrix} \text{ où } \begin{pmatrix} (R_e + h)(\lambda_{INS} - \lambda_{GPS}) \\ (R_e + h)\cos\lambda(\mu_{INS} - \mu_{GPS}) \\ \frac{h_{INS} - h_{GPS}}{(V_{INS} - V_{GPS})_N} \\ (V_{INS} - V_{GPS})_E \\ (V_{INS} - V_{GPS})_D \end{pmatrix}$$

- $H_k$  est la matrice d'observation donnée par :

$$H_k = \underbrace{\begin{pmatrix} (R_e + h) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (R_e + h)\cos\lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}}_S \text{ où } \left( \begin{array}{c|c|c} S & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ \hline 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{array} \right)$$

- $V_k$  est un bruit blanc, indépendant de  $W_k$ , stationnaire centré gaussien de matrice de covariance  $R_k$  donnée par :

$$R_k = \text{diag}(\sigma_{\delta \lambda}^2, \sigma_{\delta \mu}^2, \sigma_{\delta h}^2) \text{ où } \text{diag}(\sigma_{\delta \lambda}^2, \sigma_{\delta \mu}^2, \sigma_{\delta h}^2, \sigma_{\delta v_N}^2, \sigma_{\delta v_E}^2, \sigma_{\delta v_D}^2)$$

$\sigma_{\delta \lambda}, \sigma_{\delta \mu}, \sigma_{\delta h}, \sigma_{\delta v_N}, \sigma_{\delta v_E}$  et  $\sigma_{\delta v_D}$  sont les écarts-type sur les mesures.

### 3.6.2 Mode direct

Dans ce mode, nous avons [4] :

$$\dot{X}(t) = f(X(t), U(t), t) \quad (3.5)$$

$$Z(t) = h(X(t), t) \quad (3.6)$$

- $X(t)$  représente l'état du mobile :  $X(t) = [x \ y \ z \ U \ V \ W \ \phi \ \theta \ \psi]^T$ .
- $U(t)$  représente les mesures des accéléromètres et des gyromètres.
- $Z(t)$  représente l'observation donnée par le GPS.
- $f(X(t), U(t), t), h(X(t), t)$ , sont données en Annexe C.

Le modèle étant non linéaire [11], deux manières de procéder sont alors possibles, un FK linéarisé, et un FKE. La différence entre les deux, réside dans l'ordre dans lequel sont

disposés les étapes de linéarisation et discrétisation du modèle. Nous décrivons brièvement les deux modèles utilisés.

**Modèle linéarisé discret.** Celui-ci impliquera plus tard l'application d'un FK [4].

$$X_{k+1} = \Phi_k X_k + W_k \quad (3.7)$$

$$Z_k = H_k X_k + V_k \quad (3.8)$$

- $X_k = [x \ y \ z \ U \ V \ W \ \phi \ \theta \ \psi]^T$  représente l'état du mobile à l'instant k.
- $\Phi_k$  et  $H_k$  sont données en Annexe C.
- $W_k$  est un bruit blanc stationnaire centré gaussien de matrice de covariance  $Q_k$  donnée par :

$$Q_k = E[W_k W_k^T] \approx \Phi_k G Q G^T \Phi_k^T \Delta t \quad (3.9)$$

$$Q = \text{diag}(\sigma_{ax}^2, \sigma_{ay}^2, \sigma_{az}^2, \sigma_{\omega_x}^2, \sigma_{\omega_y}^2, \sigma_{\omega_z}^2)$$

$\sigma_a$  et  $\sigma_\omega$  sont respectivement l'écart type sur les accélérations et les vitesses de rotation.

- $V_k$  est un bruit blanc, indépendant de  $W_k$ , stationnaire centré gaussien de matrice de covariance  $R_k$  donnée par :

$$R_k = \text{diag}(\sigma_\lambda^2, \sigma_\mu^2, \sigma_h^2) \quad \text{où} \quad \text{diag}(\sigma_\lambda^2, \sigma_\mu^2, \sigma_h^2, \sigma_{VN}^2, \sigma_{VE}^2, \sigma_{VD}^2)$$

$\sigma_\lambda, \sigma_\mu, \sigma_h, \sigma_{VN}, \sigma_{VE}$  et  $\sigma_{VD}$  sont les écarts-type sur les mesures.

**Modèle discret non linéaire.** Cette fois ci, c'est un FKE qui sera appliqué [5], étant donné le modèle non linéaire ci-dessous :

Ce qui nous ramène après linéarisation :

$$X_{k+1} = F_k X_k + W_k \quad (3.10)$$

$$Z_k = H_k X_k + V_k \quad (3.11)$$

- $W_k$  est un bruit blanc stationnaire centré gaussien de matrice de covariance  $Q_k$  donnée par :

$$Q_k = E[W_k W_k^T] \approx F_k G Q G^T F_k^T \Delta t \quad (3.12)$$

- $V_k$  est un bruit blanc, indépendant de  $W_k$ , stationnaire centré gaussien de matrice de covariance  $R_k$  donnée par :

$$R_k = \text{diag}(\sigma_\lambda^2, \sigma_\mu^2, \sigma_h^2) \quad \text{où} \quad \text{diag}(\sigma_\lambda^2, \sigma_\mu^2, \sigma_h^2, \sigma_{VN}^2, \sigma_{VE}^2, \sigma_{VD}^2)$$

$\sigma_\lambda, \sigma_\mu, \sigma_h, \sigma_{VN}, \sigma_{VE}$  et  $\sigma_{VD}$  sont les écarts-type sur les mesures.

Les Jacobiennes de  $f_k$  ( $F_k(X_k) = \frac{\partial f_k}{\partial X_k}$ ) et  $h_k$  ( $H_k(X_k) = \frac{\partial h_k}{\partial X_k}$ ) sont données en Annexe C.

### 3.7 Filtre de Kalman

Le FK est une méthode récursive pour le filtrage linéaire des données à temps discret. C'est un filtre optimale eu sens de la minimisation de l'erreur quadratique moyenne pour les systèmes linéaires affectés par des bruit additifs blancs gaussiens [37] [38]. Pour la mise en œuvre de ce filtre une modélisation d'état est requise.

#### 3.7.1 Modèle d'état

Soit le système linéaire à temps discret défini par le modèle suivant :

$$\begin{cases} X_{k+1} = \Phi_k X_k + W_k \\ Z_k = H_k X_k + V_k \end{cases} \quad k \geq 0 \quad (3.13)$$

où :  $\Phi_k$  ( respectivement  $H_k$ ) est la matrice de transition (respectivement d'observation).  $W_k$

### 3.8 Filtre de Kalman étendu

Lorsque le système est non linéaire, nous pouvons le linéariser pour utiliser le FK ou utiliser le FKE [13] [14] [15] basé sur :

- une linéarisation de l'état (de la sortie) par développement de Taylor au premier ordre autour de l'état prédit (estimé).
- l'application du FK.

#### 3.8.1 Modèle d'état et linéarisation

Soit le modèle d'état non linéaire suivant :

$$\begin{cases} X_{k+1} = f_k(X_k) + W_k \\ Z_k = h_k(X_k) + V_k \end{cases} \quad k \geq 0 \quad (3.14)$$

où :  $f_k(\bullet)$  est la fonction de transition non linéaire et dérivable,

$h_k(\bullet)$  est la fonction d'observation non linéaire et dérivable,

$W_k$  et  $V_k$  sont définis dans le modèle précédent.

Ainsi, puisque le modèle d'état est non linéaire, nous allons utiliser la linéarisation suivante :

$$\begin{cases} X_{k+1} = f_k(\hat{X}_k) + F_k(\hat{X}_k)[X_k - \hat{X}_k] + W_k \\ Z_k = h_k(\hat{X}_{k/k-1}) + H_k(\hat{X}_{k/k-1})[X_k - \hat{X}_{k/k-1}] + V_k \end{cases} \quad (3.15)$$

où  $F_k(\bullet)$  est le jacobien de  $f_k(\bullet)$ ,  $H_k(\bullet)$  et le jacobien de  $h_k(\bullet)$ .

### 3.8.2 Algorithme

L'algorithme du FKE est le suivant :

- Initialisation :  $\hat{X}_0$  et  $P_0$ .

- Prédiction :

$$\hat{X}_{k+1/k} = f_k(\hat{X}_k)$$

$$P_{k/k-1} = F_k(\hat{X}_k)P_{k-1}F_k(\hat{X}_k)^T + Q_k$$

- Actualisation :

$$K_k = P_{k/k-1} H_k^T(\hat{X}_{k/k-1}) \left[ H_k(\hat{X}_{k/k-1})P_{k/k-1} H_k^T(\hat{X}_{k/k-1}) + R_k \right]^{-1}$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k/k-1} + K_k \left[ Z_k - h_k(\hat{X}_{k/k-1}) \right]$$

$$P_k = P_{k/k-1} - K_k H_k(\hat{X}_{k/k-1})P_{k/k-1}$$

- $k = k + 1$

### 3.9 Conclusion

Nous avons présenté deux systèmes de navigation (l'INS et le GPS) qui sont très largement utilisés dans beaucoup d'applications et qui s'avèrent très souvent complémentaires.

Dans un premier temps, nous avons rappelé les deux types de CI qui existent et nous avons signalé le choix relatif à l'utilisation des CI "*strap-down*". En outre, nous avons, en particulier, insisté sur les erreurs qui affectent le fonctionnement d'une CI et qui ne cessent de croître au cours du temps rendant ainsi la navigation incompatible avec les objectifs de la mission du mobile. Les résultats obtenus, de simulations numériques, sont semblables à ceux présentés dans la littérature.

Dans un second temps, nous avons présenté très brièvement le système de navigation par GPS. Nous avons cité les différents types d'observations GPS et les erreurs possibles et les dégradations (volontaires ou non) pouvant affecter ce système. Les résultats obtenus, de simulations numériques, sont semblables à ceux présentés dans la littérature.

Ensuite, nous avons présenté les avantages et les inconvénients de chaque système rendant ainsi l'un complémentaire de l'autre. C'est pourquoi, l'utilisation à la fois des données issues de l'INS et du GPS pour une navigation "*optimale*" a été introduite récemment. Cette

approche est communément appelée hybridation INS/GPS dans laquelle une opération de filtrage s'avère très souvent indispensable. Ces deux aspects font l'objet du chapitre suivant.

Nous avons présenté les différents modes d'hybridation possible, le FK et FKE qui vont être utilisés dans le chapitre suivant relatif aux simulations numériques du système hybride.

# Chapitre 4

## Etude des performances de l'hybridation INS/GPS

*Dans ce chapitre nous allons présenter les performances obtenues des filtres de Kalman dans la navigation hybride INS/GPS avec Modèle direct. Dans cette situation, il s'agit d'appliquer un FKE puisque le modèle est non linéaire.*

## 4.1. Introduction

Pour les besoins de simulation, nous avons :

- dans un premier temps reproduit le fonctionnement pur de l'INS à partir des équations de navigation. Les trajectoires seront dans toute la suite représentées par des courbes bleues vert rouge.
- Dans un second temps, dans le but d'observer le comportement effectif de l'INS qui est caractérisé par une grande dérive à long terme, nous avons introduit dans les équations de navigation précédentes les erreurs (biais, facteur d'échelle, bruit) qui altèrent le fonctionnement idéal des capteurs inertiels ainsi que les erreurs d'alignements et d'initialisations
- Ensuite, nous avons simulé les données de FKE représentées par le vert qui est généralement confondu avec l'estimation théorique

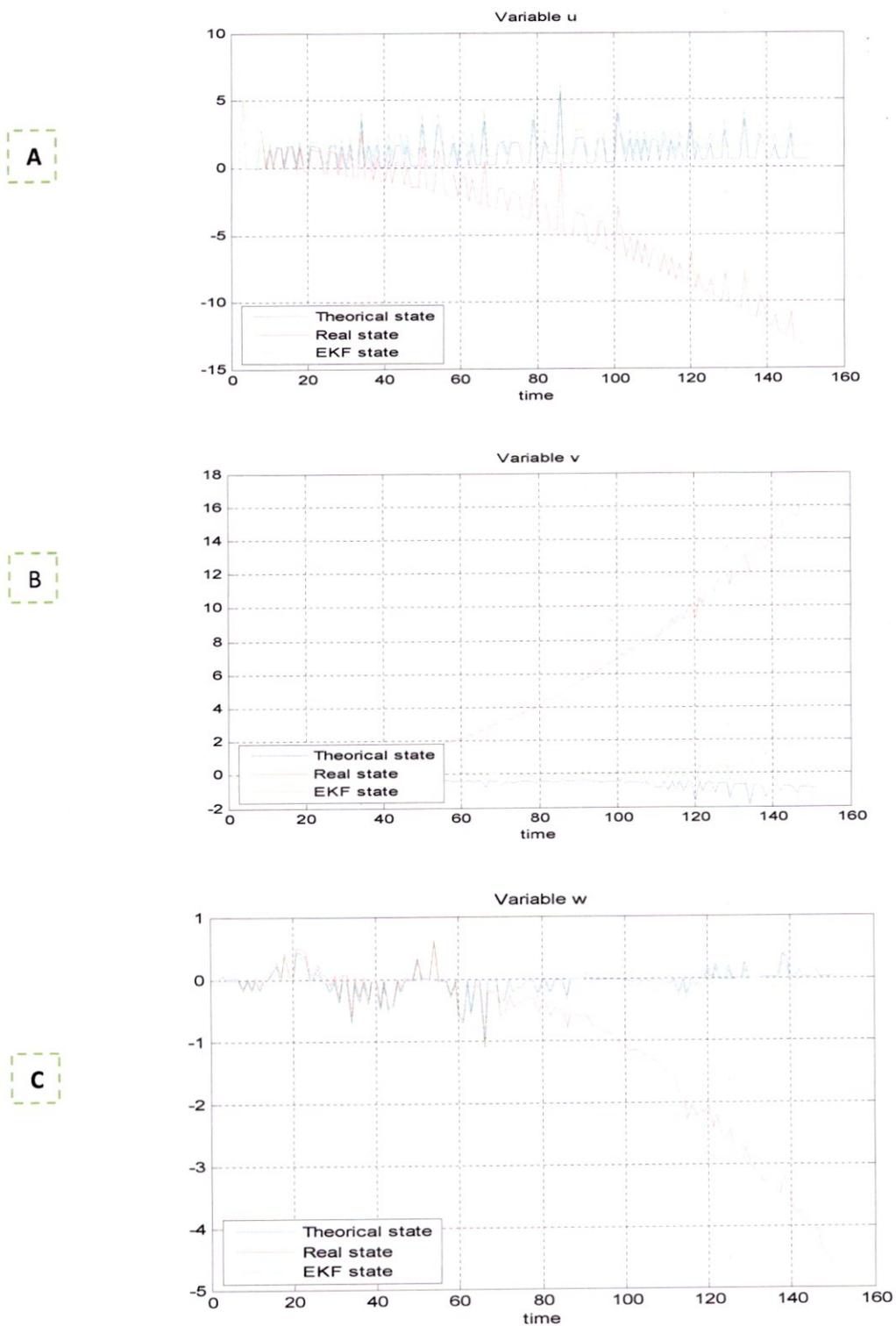
## 4.2. Modèle direct étendu

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les résultats de simulation dans le cas où l'observation est une position et vitesse

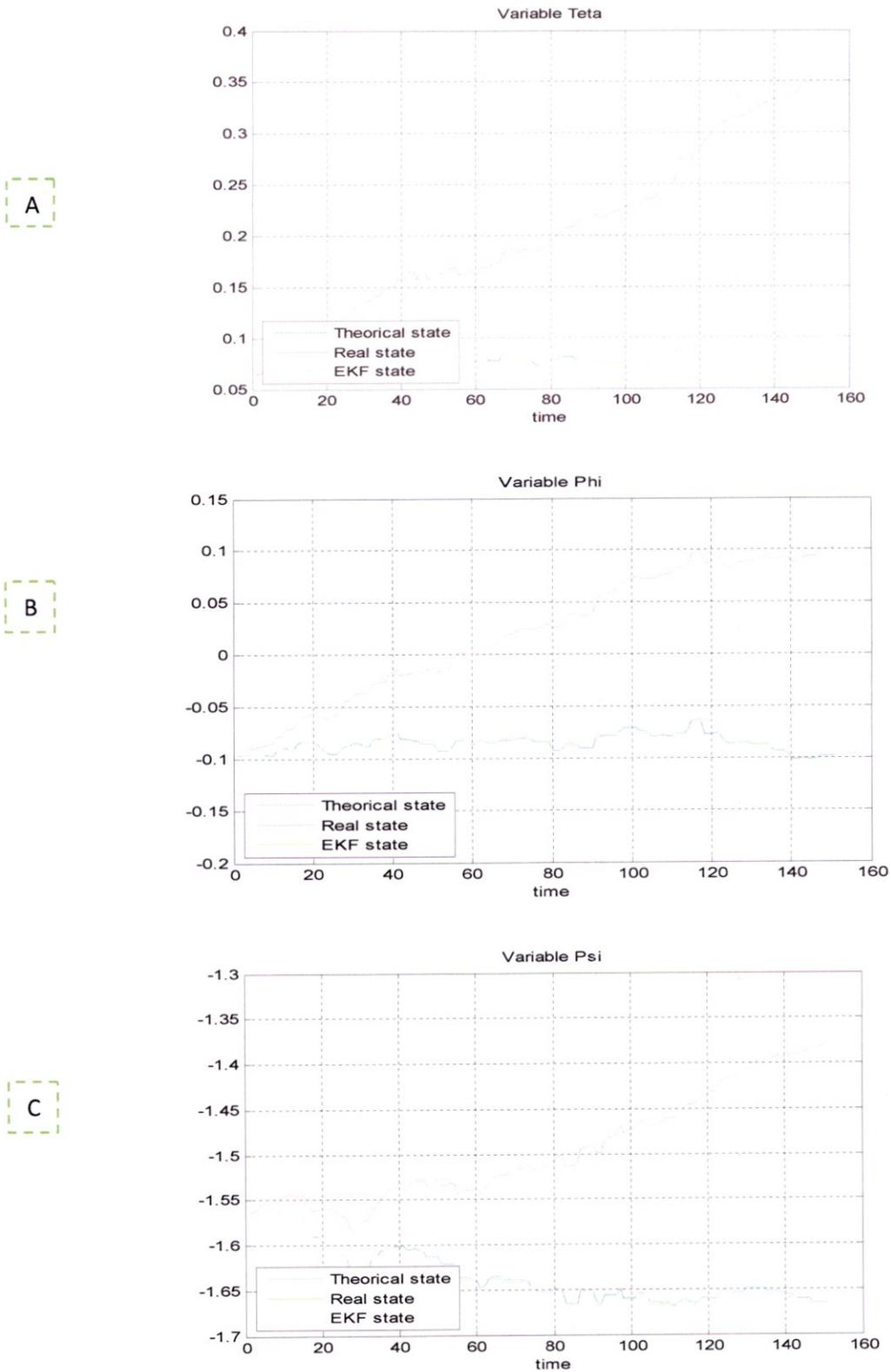
Nous signalons au passage que dans ce paragraphe nous allons présenter les performances du FKE implanté avec des (u, v, w) idéales et les performances du FKE implanté avec des (u, v, w) mesurées (réellement bruitées) puisque le vecteur d'état considéré ne prend pas en compte ces vitesses de rotations. Toutefois, comme perspective, il s'agira d'augmenter le vecteur d'état, afin de pouvoir les estimer quoique les résultats obtenus avec les deux (u, v, w) soient relativement semblables.

$$\checkmark \text{ Position théorique} = p \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix}, \text{ GPS} = P + \text{randn}(\cdot, \cdot, \cdot), \begin{cases} X_{gps} = X_{th} + \text{randn} \\ Y_{gps} = Y_{th} + \text{randn} \\ Z_{gps} = Z_{th} + \text{randn} \end{cases}$$

## 4.3. Résultats des simulations

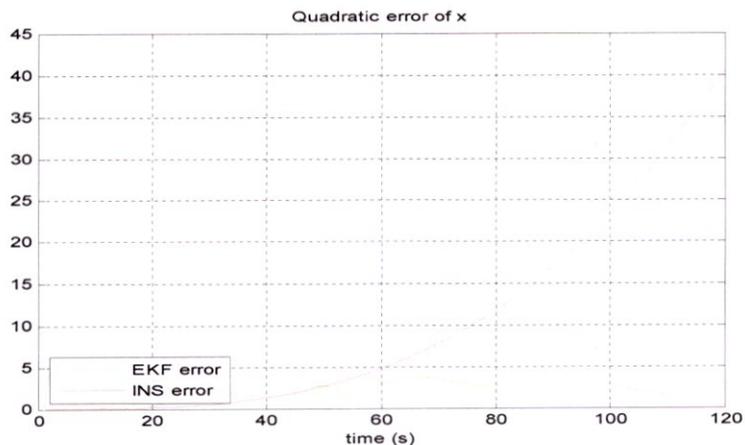


**Fig.4.1** Performance des techniques de couplage en mode direct pour un drone suivant un trajet ,(A) vitesse U,(B)vitesse V,(C)vitesse W ,

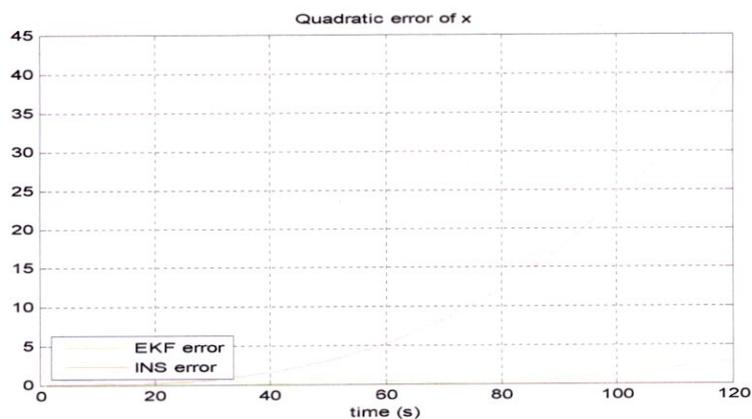


**Fig.4.2** Performance des techniques de couplage en mode direct pour un drone suivant un trajet ,(A) attitude teta ,(B)attitude phi,(C)attitude psi ,

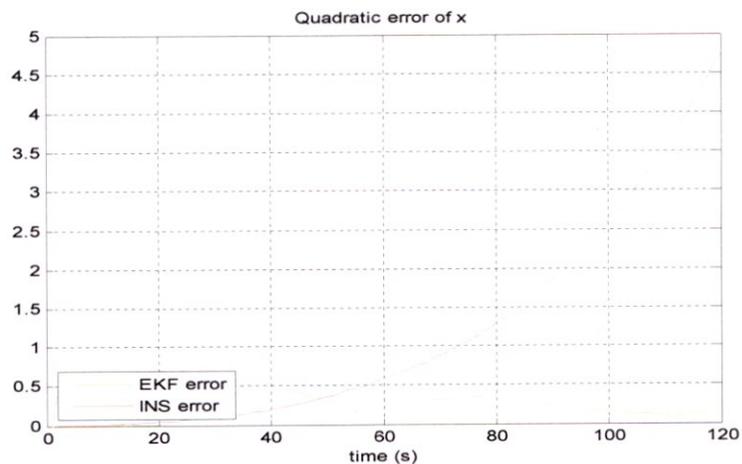
A



B



C



**Fig.4.6.** Evolution d'erreur quadratique de X

✓

On remarque que l'erreur quadratique de X est très faible on utilisant le FKE pour (hybridation INS+GPS)

✓

Par contre deuxième courbe l'erreur quadratique de X est évolué en fonction du temps

Nous allons présenter l'**erreur quadratique moyenne** sur la position estimée par notre

algorithme qui donne par : 
$$EQM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((x_i) - \hat{x}_i)^2$$

$x_i$  : des observations de mesure réel.

$\hat{x}_i$  : des observations de mesure de l'algorithme.

$n$  : angle de mesure.

**Remarque 1** : cette erreur est due par l'erreur effectuée par le filtre de Kalman .

**Remarque 2** : afin de réaliser une analyse objective nous avons besoin d'un grand nombre d'échantillon (donnée réel) ,ca n'est pas possible à cause de la non disponibilité ,pour évaluer les performances de notre algorithme de localisation des sur des données réel on était effectué dont le but est de déterminer les erreurs estimées par cet algorithme

#### 4.4. Conclusion

Il est important de souligner, avant tout, le nombre des simulations effectuées le long de notre travail. Le présent chapitre n'en présente qu'un nombre réduit. Il n'en demeure pas moins que ce chiffre reste relativement élevé. A travers les résultats obtenus, dans les figures présentées dans ce chapitre, il est tout à fait clair que la solution hybride INS/GPS, sous ses différentes configurations, apporte une amélioration perceptible aux deux systèmes de navigation utilisés individuellement.



#### Mode direct

D'une manière générale, les résultats relatifs au mode direct montrent que le FKE se comporte relativement bien à court, moyen et long termes. En effet, l'INS qui souffre de dérives à long terme est périodiquement actualisé par les sorties du filtre.

Par ailleurs, d'autres résultats peuvent être signalés :

- Une durée courte d'observation altère le fonctionnement des filtres.
- L'initialisation étudiée dans ce chapitre montre que le FKE est robuste vis-à-vis de cette étape. Ce résultat, certes très intéressant, doit être relativisé. En effet, si l'initialisation est trop éloignée de l'état initial, alors les deux filtres ne vont pas correctement fonctionner. Cette situation apparaît, en particulier, lorsque l'erreur sur l'état initial est de l'ordre de centaine de Km pour la position et de centaine de m/s pour la vitesse. Toutefois, si l'initialisation est correcte alors le FKE va correctement fonctionner
- Robustesse du FKE vis-à-vis d'une dégradation volontaire "sensible" du signal GPS.
- L'observation en vitesse améliore considérablement l'estimation de celle-ci par le filtre par rapport au cas où la vitesse n'est pas observée (résultats non présentés).

# Conclusion générale et perspectives

## Conclusion générale

La navigation fait partie des domaines de recherche les plus convoités depuis déjà plus d'un demi siècle. En effet, elle suscite un très fort intérêt chez la communauté scientifique. Les besoins en matière de navigation généralement directement liés aux facteurs suivants :

- sécurité,
- coût,
- performances

Les systèmes de navigation inertielle, entre autres, les centrales inertielles (CI) à composants liés restent les plus utilisées de nos jours en raison de leur autonomie, leur faible coût ainsi que leur structure modulaire qui facilite leur maintenance [1-2] [5]. Cependant, ces CI présentent l'inconvénient de dériver à long terme, ce qui rend leur utilisation non recommandée pour des missions de longue durée. Un moyen efficace de lutter contre cette dérive est la correction via un système auxiliaire de positionnement ou de navigation donnant ainsi naissance à une solution de navigation hybride .

Dans ce travail, le système auxiliaire auquel nous nous sommes intéressés est le système de positionnement global (GPS) qui délivre les données de position et/ou de vitesse qui servent à corriger l'INS de la manière suivante :

- Hybridation directe qui fait appel à des modèles des non linéaires nécessitant l'utilisation d'un FK sur un modèle non linéarisé un FK étendu (FKE) [1] [4].

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de l'hybridation INS/GPS par filtrages de Kalman. Les simulations effectuées (présentées et non), dans ce travail, dont le nombre est très élevé, pour un mobile aérien (un drone) effectuant différents mouvements, montrent les limites de chaque système de navigation considéré individuellement. Pour remédier à ce problème une hybridation, selon différentes configurations, des deux systèmes s'est avérée nécessaire et a montré des résultats très satisfaisants dans certaines situations pour le mode indirect et pour le mode direct. Par ailleurs, les simulations numériques ont montré, en mode indirect, la robustesse en particulier du FK vis-à-vis d'une dégradation volontaire "sensée" du signal GPS. Enfin, quelques simulations préliminaires à confirmer, suggèrent *Priori* l'utilisation du mode indirect en boucle fermée.

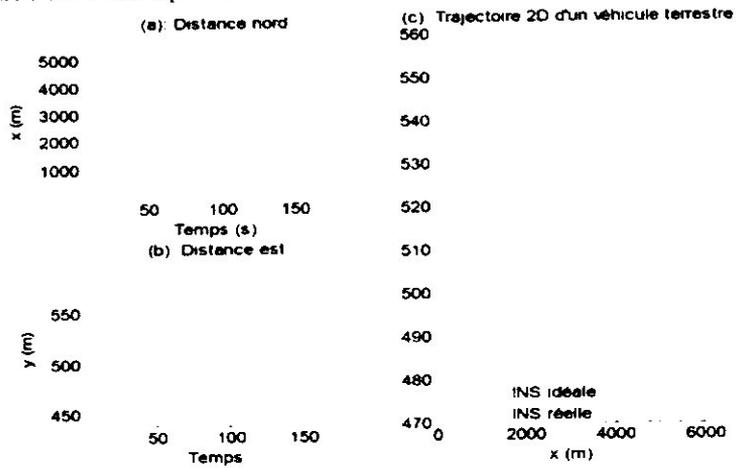
## 5.2 Perspectives

Comme perspectives pour ce travail, nous proposons :

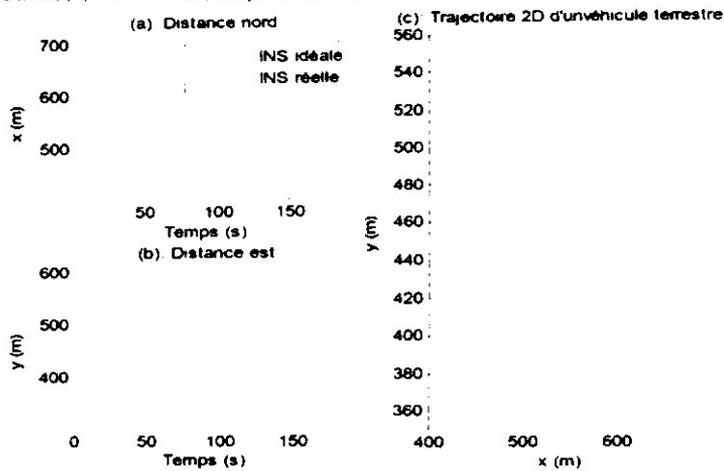
- Intégrer un module de localisation et de cartographie.
- Etudier du mode d'hybridation indirect fortement couplé.
- Appliquer d'autres filtres non linéaires pour le couplage direct.
- Elaborer une méthode d'initialisation du FKE ou autre filtre non linéaire lors d'un couplage direct.
- Robustifier la navigation en diversifiant le moyen et le mode d'observation.
- Augmenter l'intégrité du système hybride en utilisant plusieurs CI et GPS
- Implanter pratiquement des algorithmes.

## ANNEXE A

Nous présentons dans cette annexe quelques résultats de simulations pour un véhicule terrestre d'une CI à composants liés :



**Figure A.1.** Véhicule terrestre décrivant une trajectoire rectiligne :  $X(0) [500,560,0]^T$ ,  $V(0) [20,0,0]^T$ , Attitude(0)  $[0,0,0]^T$ , Temps 180 s. (-) trajectoire idéale, (·) trajectoire réelle. (a) Distance nord, (b) distance est, (c) représentation 2D.



**Figure A.2.** Véhicule terrestre décrivant une trajectoire circulaire :  $X(0) [560,560,0]^T$ ,  $V(0) [20,0,0]^T$ , Attitude(0)  $[0,0,0]^T$ , Temps 180s, Rayon 100m. (-) Trajectoire idéale, (·) trajectoire réelle. (a) Distance nord, (b) distance est, (c) représentation 2D.

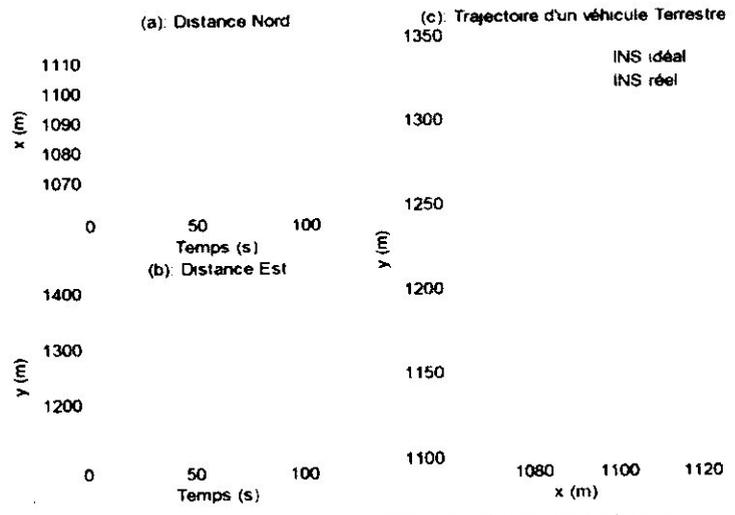


Figure A.3. Véhicule terrestre à l'arrêt :  $X(0) [1105,1110,0]^T$ ,  $V(0) [0,0,0]^T$ ,  $Attitude(0) [0,0,0]^T$ , Temps 120s. (-) Trajectoire idéale, (-) trajectoire réelle. (a) Distance nord, (b) distance est, (c) représentation 2D.

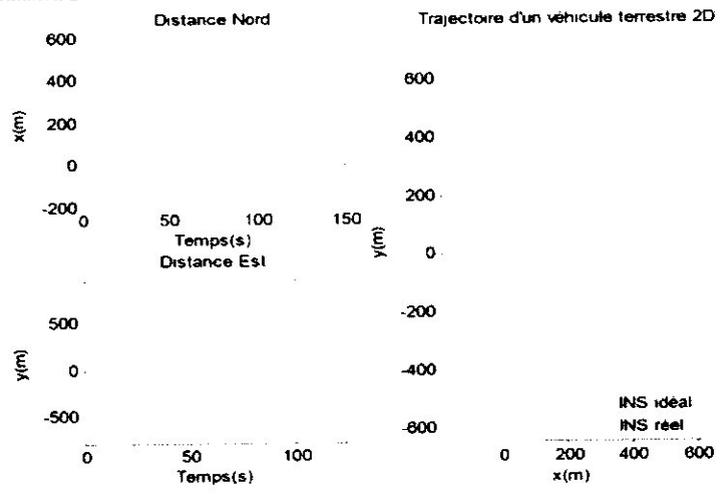


Figure A.4. Véhicule terrestre décrivant une trajectoire carrée :  $X(0) [0,0,0]^T$ ,  $V(0) [0,0,0]^T$ ,  $Attitude(0) [0,0,0]^T$ , Temps 120s. (-) Trajectoire idéale, (-) trajectoire réelle. (a) Distance nord, (b) distance est, (c) représentation 2D.

## ANNEXE B

Nous présentons dans cette annexe les éléments de la matrice F [3] :

$$F_{11} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \dot{\lambda}}{\partial \lambda} & \frac{\partial \dot{\lambda}}{\partial \mu} & \frac{\partial \dot{\lambda}}{\partial h} \\ \frac{\partial \dot{\mu}}{\partial \lambda} & \frac{\partial \dot{\mu}}{\partial \mu} & \frac{\partial \dot{\mu}}{\partial h} \\ \frac{\partial \dot{h}}{\partial \lambda} & \frac{\partial \dot{h}}{\partial \mu} & \frac{\partial \dot{h}}{\partial h} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{-V_v}{(R_e + h)^2} \\ \frac{V_e \sin(\lambda)}{(R_e + h) \cos^2(\lambda)} & 0 & \frac{-V_e}{(R_e + h)^2 \cos(\lambda)} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (B.1)$$

$$F_{12} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \dot{\lambda}}{\partial V_N} & \frac{\partial \dot{\lambda}}{\partial V_E} & \frac{\partial \dot{\lambda}}{\partial V_D} \\ \frac{\partial \dot{\mu}}{\partial V_N} & \frac{\partial \dot{\mu}}{\partial V_E} & \frac{\partial \dot{\mu}}{\partial V_D} \\ \frac{\partial \dot{h}}{\partial V_N} & \frac{\partial \dot{h}}{\partial V_E} & \frac{\partial \dot{h}}{\partial V_D} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{R_e + h} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(R_e + h) \cos(\lambda)} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (B.2)$$

$$F_{13} = 0_{3,3} \quad (B.3)$$

$$F_{21} = \begin{pmatrix} -2V_e \omega_0 \cos(\lambda) - \frac{V_e^2}{(R_e + h) \cos^2(\lambda)} & 0 & \frac{-V_N V_D + V_e^2 \tan(\lambda)}{(R_e + h)^2} \\ 2\omega_0 (V_N \cos(\lambda) - V_D \sin(\lambda)) + \frac{V_e V_N}{(R_e + h) \cos^2(\lambda)} & 0 & \frac{V_e V_D - V_e V_N \tan(\lambda)}{(R_e + h)^2} \\ 2V_e \omega_0 \sin(\lambda) & 0 & \frac{V_N^2 + V_e^2}{(R_e + h)^2} - \frac{2\gamma}{R_e + h} \end{pmatrix} \quad (B.4)$$

$$F_{22} = \begin{pmatrix} \frac{V_D}{R_e + h} & -2\omega_0 \sin(\lambda) - 2 \frac{V_e \tan(\lambda)}{R_e + h} & \frac{V_N}{R_e + h} \\ 2\omega_0 \sin(\lambda) + \frac{V_e \tan(\lambda)}{R_e + h} & \frac{V_D + V_N \tan(\lambda)}{R_e + h} & 2\omega_0 \cos(\lambda) + \frac{V_e}{R_e + h} \\ -2 \frac{V_N}{R_e + h} & -2\omega_0 \cos(\lambda) - 2 \frac{V_e}{R_e + h} & 0 \end{pmatrix} \quad (B.5)$$

$$F_{23} = \begin{pmatrix} 0 & -f_D'' & f_E'' \\ f_D'' & 0 & -f_N'' \\ -f_E'' & f_N'' & 0 \end{pmatrix} \quad (B.6)$$

tel que :  $f''$  et l'accélération du mobile dans le repère [n], ( $f'' = DCM^T f''^b$ ).

$$F_{31} = \begin{pmatrix} -\omega_0 \sin(\lambda) & 0 & \frac{-V_r}{(R_r + h)^2} \\ 0 & 0 & \frac{V_v}{(R_r + h)^2} \\ -\omega_0 \cos(\lambda) - \frac{V_r}{(R_r + h) \cos^2(\lambda)} & 0 & \frac{V_r \tan(\lambda)}{(R_r + h)^2} \end{pmatrix} \quad (\text{B.7})$$

$$F_{32} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{R_r + h} & 0 \\ \frac{1}{R_r + h} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-\tan(\lambda)}{R_r + h} & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{B.8})$$

$$F_{33} = \begin{pmatrix} 0 & E_D & -E_L \\ -E_D & 0 & E_N \\ E_L & -E_N & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{B.9})$$

où :

$$E = \begin{pmatrix} \Omega \cos \lambda + \mu \cos \lambda \\ -\dot{\lambda} \\ -\Omega \sin \lambda - \mu \sin \lambda \end{pmatrix} \quad (\text{B.10})$$

## ANNEXE C

Nous présentons dans cette annexe le modèle direct non linéaire, le modèle linéarisé discret, et les Jacobiennes du modèle discret non linéaire [4] :

$$f(X(t), U(t), t) = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & -c\phi s\psi + s\phi s\theta c\psi & s\phi s\psi + c\phi s\theta c\psi \\ c\theta s\psi & c\phi c\psi + s\phi s\theta s\psi & -s\phi c\psi + s\phi s\theta s\psi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ \Gamma \\ W \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U \\ \Gamma \\ W \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -s\theta \\ c\theta s\phi \\ c\theta c\phi \end{bmatrix} g + \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (C.1)$$

$$h(X(t), U(t), t) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & s\phi \tan\theta & c\phi \tan\theta \\ 0 & c\phi & s\phi \\ 0 & s\phi c\theta & c\phi \sec\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c\theta c\psi & -c\phi s\psi + s\phi s\theta c\psi & s\phi s\psi + c\phi s\theta c\psi \\ c\theta s\psi & c\phi c\psi + s\phi s\theta s\psi & -s\phi c\psi + s\phi s\theta s\psi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ \Gamma \\ W \end{bmatrix} \quad (C.2)$$

### 1. Matrice de transition

$$F = \frac{\partial f}{\partial X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial y} & \frac{\partial f}{\partial z} & \frac{\partial f}{\partial U} & \frac{\partial f}{\partial \Gamma} & \frac{\partial f}{\partial W} & \frac{\partial f}{\partial \phi} & \frac{\partial f}{\partial \theta} & \frac{\partial f}{\partial \psi} \end{bmatrix} \quad (C.3)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} & \frac{\partial h}{\partial y} & \frac{\partial h}{\partial z} \end{bmatrix} = 0^{3 \times 3} \quad (C.4)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial U'} \\ \frac{\partial f}{\partial V'} \\ \frac{\partial f}{\partial W'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & -c\phi s\psi + s\phi s\theta c\psi & s\phi s\psi + c\phi k c\psi \\ c\theta s\psi & c\phi c\psi + c\phi s\theta s\psi & -s\phi c\psi + c\phi k s\psi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & r & -q \\ -r & 0 & p \\ q & -p & 0 \end{bmatrix} \quad (C.5)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \phi} = \begin{bmatrix} 0 & s\phi s\psi + c\phi s\theta c\psi & c\phi s\psi - s\phi s\theta c\psi \\ 0 & -s\phi c\psi - c\phi s\theta s\psi & -c\phi c\psi + c\phi s\theta s\psi \\ 0 & c\phi c\theta & -s\phi c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U' \\ V' \\ W' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ c\theta c\phi \\ -c\theta s\phi \end{bmatrix} g e + \begin{bmatrix} 0 & c\phi \tan \theta & -s\phi \tan \theta \\ 0 & -s\phi & -c\phi \\ 0 & c\phi \sec \theta & -s\phi \sec \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (C.6)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \theta} = \begin{bmatrix} -s\theta c\psi & s\phi c\theta c\psi & c\phi c\theta c\psi \\ -s\theta s\psi & c\phi c\theta s\psi & c\phi c\theta s\psi \\ -c\theta & -s\phi s\theta & -c\phi s\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U' \\ V' \\ W' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c\theta \\ s\theta s\phi \\ s\theta c\phi \end{bmatrix} g e + \begin{bmatrix} 0 & s\phi(1 + \tan^2 \theta) & c\phi(1 + \tan^2 \theta) \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi \sec \theta \tan \theta & c\phi \sec \theta \tan \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (C.7)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \psi} = \begin{bmatrix} -c\theta s\psi & -c\psi c\phi - s\psi s\theta s\phi & c\psi s\phi - s\psi s\theta c\phi \\ c\theta c\psi & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi - s\psi s\theta c\phi \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U' \\ V' \\ W' \end{bmatrix} \quad (C.8)$$

$$\frac{\partial f}{\partial U'} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial a_1} & \frac{\partial f}{\partial a_2} & \frac{\partial f}{\partial a_3} & \frac{\partial f}{\partial p} & \frac{\partial f}{\partial q} & \frac{\partial f}{\partial r} \end{bmatrix} \quad (C.9)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial a_1} & \frac{\partial f}{\partial a_2} & \frac{\partial f}{\partial a_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0^{1 \times 1} \\ I^{1 \times 1} \\ 0^{1 \times 1} \end{bmatrix} \quad (C.10)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial p} & \frac{\partial f}{\partial q} & \frac{\partial f}{\partial r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0^{3 \times 3} \\ U^* \\ I^* \\ W^* \end{bmatrix} \times I^{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0 & -W^* & I^* \\ W^* & 0 & -U^* \\ -I^* & U^* & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & s\phi \tan \theta & c\phi \tan \theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi \sec \theta & c\phi \sec \theta \end{bmatrix} \quad (\text{C.11})$$

## 2. Matrice d'entrée

$$G = \frac{\partial \vec{f}}{\partial \vec{u}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -W^* & I^* \\ 0 & 1 & 0 & W^* & 0 & -U^* \\ 0 & 0 & 1 & -I^* & U^* & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & s\phi \tan \theta & c\phi \tan \theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c\phi & s\phi \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -s\phi \sec \theta & -c\phi \sec \theta \end{bmatrix} \quad (\text{C.12})$$

## 3. Matrice d'observation

$$H = \frac{\partial h}{\partial X} = \left[ \frac{\partial h}{\partial \alpha} \quad \frac{\partial h}{\partial \beta} \quad \frac{\partial h}{\partial \alpha} \quad \frac{\partial h}{\partial \alpha} \quad \frac{\partial h}{\partial \beta} \quad \frac{\partial h}{\partial \beta} \quad \frac{\partial h}{\partial \phi} \quad \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad \frac{\partial h}{\partial \mu} \right] \quad (\text{C.13})$$

$$H_{xyz} = \begin{bmatrix} I^{3 \times 3} & 0^{6 \times 3} \end{bmatrix} \quad (\text{C.14})$$

$$H_{xyz} = \begin{bmatrix} 0^{3 \times 3} & DCM^T & 0^{6 \times 3} \end{bmatrix} \quad (\text{C.15})$$

$$H_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} 0^{6 \times 3} & I^{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (\text{C.16})$$

## 4. Modèle linéarisé discret

$$\Phi_k = I^{n \times n} + FM \quad (\text{C.17})$$

$$H_k = H \quad (\text{C.18})$$

## 5. les Jacobiennes du modèle discret non linéaire

$$H_k = \frac{\partial h_k}{\partial X_k} = H \quad (\text{C.19})$$

$$F_k = \frac{\partial f_k}{\partial X_k} = [F_k^1 \quad F_k^2 \quad F_k^3] \quad (C.20)$$

où :

$$F_k^1 = \begin{bmatrix} I^{3 \times 3} \\ 0^{3 \times 3} \\ 0^{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (C.21)$$

$$F_k^2 = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta_k c\psi_k & -c\phi_k s\psi_k + s\phi_k s\theta_k c\psi_k & s\phi_k s\psi_k + c\phi_k s\theta_k c\psi_k \\ c\theta_k s\psi_k & c\phi_k c\psi_k + c\phi_k s\theta_k s\psi_k & -s\phi_k c\psi_k + c\phi_k s\theta_k s\psi_k \\ -s\theta_k & s\phi_k c\theta_k & c\phi_k c\theta_k \end{bmatrix} M \\ \begin{bmatrix} 1 & r_k M & -q_k M \\ -r_k & 1 & p_k M \\ q_k M & -p_k M & 1 \end{bmatrix} \\ 0^{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (C.22)$$

$$F_k^3 = [\Omega_1 \quad \Omega_2 \quad \Omega_3] \quad (C.23)$$

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & s\phi_k s\psi_k + c\phi_k s\theta_k c\psi_k & c\phi_k s\psi_k - s\phi_k s\theta_k c\psi_k \\ 0 & -s\phi_k c\psi_k - c\phi_k s\theta_k s\psi_k & -c\phi_k c\psi_k + c\phi_k s\theta_k s\psi_k \\ 0 & c\phi_k c\theta_k & -s\phi_k c\theta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_k \\ V_k \\ W_k \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 \\ c\theta_k c\phi_k \\ -c\theta_k s\phi_k \end{bmatrix} g_e \\ \begin{bmatrix} 0 & c\phi_k \tan \theta_k & -s\phi_k \tan \theta_k \\ 0 & -s\phi_k & -c\phi_k \\ 0 & c\phi_k \sec \theta_k & -s\phi_k \sec \theta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_k \\ q_k \\ r_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (C.24)$$

$$\Omega_2 = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} -s\theta_k c\psi_k & s\phi_k c\theta_k c\psi_k & c\phi_k c\theta_k c\psi_k \\ -s\theta_k s\psi_k & c\phi_k c\theta_k s\psi_k & c\phi_k c\theta_k s\psi_k \\ -c\theta_k & -s\phi_k s\theta_k & -c\phi_k s\theta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_k \\ V_k \\ W_k \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} c\theta_k \\ s\theta_k s\phi_k \\ s\theta_k c\phi_k \end{bmatrix} g_e \\ \begin{bmatrix} 0 & s\phi_k (1 + \tan^2 \theta_k) & c\phi_k (1 + \tan^2 \theta_k) \\ 0 & c\phi_k & -s\phi_k \\ 0 & s\phi_k \sec \theta_k \tan \theta_k & c\phi_k \sec \theta_k \tan \theta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_k \\ q_k \\ r_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (C.25)$$

$$\Omega_3 = \begin{bmatrix} -c\theta_k s\psi_k & -c\psi_k c\phi_k - s\psi_k s\theta_k s\phi_k & c\psi_k s\phi_k - s\psi_k s\theta_k c\phi_k & \begin{bmatrix} U_k \\ \Gamma_k \\ W_k \end{bmatrix} \\ c\theta_k c\psi_k & -s\psi_k c\phi_k + c\psi_k s\theta_k s\phi_k & s\psi_k s\phi_k - s\psi_k s\theta_k c\phi_k & \\ 0 & 0 & 0 & \\ 0^{k-1} & & & \\ 1 & & & \end{bmatrix} \quad (\text{C.26})$$

## REFERENCE

- [1] P. Castillo, R. Lozano and A. E. Dzul, "*Modelling and Control of Mini-Flying Machines, Advances in Industrial Control*", Springer-Verlag London Limited 2005.
- [2] S.D. Hanford, "*A Small Semi-Autonomous Rotary-Wing Unmanned Air Vehicle*", a master Thesis, Pennsylvania State University, USA 2005.
- [3] C. A. Patel, "*Building A Testbed For Mini Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle With Protective Shroud*", A Master of Science Thesis, Wichita State University, USA, July 2006.
- [4] K. P. Valavanis, "*Advances in Unmanned Aerial Vehicles: State of the Art and the Road to Autonomy*", International series on intelligent systems, control, and automation: science and engineering, volume 33, Springer 2007.
- [5]. **KÖKÖSY, W. PERRUQUETTI et AM.** *Stratégies de navigation autonome pour une flottille des robots mobiles coopératifs.* 2009.
- [6]. **LOPEZ, Abraham SANCHEZ.** *Contribution à la planification de mouvements en robotique : Approches probabilistes et approches déterministes.* 2002.
- [7]. **Chatila, R.** *Deliberation and reactivity in autonomous mobile robots.* Robotics. 1995.
- [8]. **G. Giralt, R. Chatila et M. Vaisset.** *An Integrated Navigation and Motion Control System for Autonomous Multisensory Mobile Robots.* Cambridge : First International Symposium on Robotics Research, pages 191–214., 1984.
- [9]. **ActivMedia.** *P3-DX : World's Most Popular Intelligent Wheeled Robot.* s.l. : Lien : <http://www.activrobots.com.>, 2004.
- [10]. **K-team.** *Khepera II user manual,* . s.l. : Lien : <http://www.k-team.com/download/khepera/documentation/Kh2UserManual.pdf.>, 2002.
- [11]. **T. Kanade, C. Thorpe et W. Whittaker.** *Autonomous Land Vehicle Project at CMU.* In ACM Annual Computer Science Conference, pages 71–80. ACM Press, : s.n., 1986.
- [12]. **N. M. Amato, B. O. Burchan, L. K. Dale, C. Jones, and D. Vallejo.** *Choosing good distance metrics and local planners for probabilistic roadmap methods.* Computer Science Dpto, Texas A & M University. 1998. Technical Report 98-010.
- [13]. *An autonomous mobile robot courier for hospitals.* **Helpmate, J. M. Evans.** 1994. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems.
- [14]. **BABA, Abdellatif.** *Cartographie de l'Environnement et Suivi Simultané de Cibles Dynamiques par Un Robot Mobile.* 2007.
- [15]. **Dana, Peter H.** *Global Positioning System Overview.* s.l. : Lien : [http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps\\_f.html](http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html), 2001.
- [16]. **Galileo, ESA.** *Système européen de navigation par satellite.* 2004.

- [17]. **EMS**. *Industrial Sensors and Controls*. s.l. : Lien: <http://www.emssensors.com>, 2004.
- [18]. **Sick**. *Scanners de mesure à laser*. s.l. : <http://www.sick.fr/fr/produits/vision/lasermesurementsystemsindoor/fr.html>, 2004.
- [19]. **C. Samson, M. Leborgne et B. Espiau**. *Robot control. the task function approach*. s.l. : Oxford University, 1991. Vol. volume 22 of Oxford Engineering Series.
- [20]. **Patrick, Rives**. *Navigation autonome des robots mobiles: des problèmes de modélisation, perception et contrôle*. 2004.
- [21]. **A.NASRALLAH, M.ECHERGUI**. *LOCALISATION D'UN ROBOT MOBILE PAR ODOMETRIE VISUELLE STEREOSCOPIQUE*. s.l. : EMP, 2010.
- [22]. **BAYLE, Bernard**. *Robotique mobile*. Strasbourg : Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg , 2005.
- [23]. **J. Borenstein, B. Everett et L. Feng**. *Navigating mobile robots : Systems and techniques*. s.l. : A. K. Peters, 1996.
- [24]. **Kelly, A**. *Some Useful Results for Closed Form Propagation of Errors in Vehicle Odometry*. Pittsburg, Etats-Unis : Université de Carnegie Mellon, 2000.
- [25]. **UMBmark, J. Borenstein et L. Feng**. *A Method For Measuring, Comparing, and Correcting Dead-reckoning Errors in Mobile Robots*. s.l. : University of Michigan, 1994. Rapport technique UM-MEAM-94-22, .
- [26]. **MORETTE, Nicolas**. *Contribution à la Navigation de robots mobiles : approche par modèle direct et commande prédictive*. 2009.
- [27] Karim Dahia : 'Nouvelles méthodes en filtrage particulière Application au recalage de navigation inertielle par mesures altimétriques', Doctorat de l'université de Joseph Fourier (spécialité Mathématiques et applications), Office National d'études et de recherches Aérospatiales, Janvier 2004.
- [28] Iyad Abuhadrous : 'Système embarqué temps réel de localisation et de modélisation 3D par fusion multi-capteur', Doctorat de l'Ecole des Mines Paris (spécialité Informatique temps réel- Robotique - Automatique), Janvier 2005.
- [29] Vikas Kumar : 'Integration of Inertial Navigation System and Global Positionning System Using Kalman Filtering', Dual Degree Program in Aerospace Engineering, Department of Aerospace Engineering Indian Institute of Technology, Bombay, juillet 2004.
- [30] Jonghyuk Kim : 'Autonomous Navigation for Airborne Applications', Australian Center for Field Robotics, Department of Aerospace, Mechanical and Mechatronic Engineering, The University of Sydney, Mai 2004.
- [31] Pierre Faure : 'Navigation inertielle optimale et filtrage statistique', Collection
- [32] Eun-Hwan Shin : 'Accuracy Improvement of Low Cost INS/GPS for Land Applications', Degree of Master of Science, The university of Calgary, Department Geomatics Engineering, December 2001.
- [33] Walid Abdel- Hamid : 'Accuracy Enhancement of integrated MEMS-IMU/GPS

System for land Vehicular Navigation Applications', Ph.D. Thesis, The University of Calgary, Janvier 2005.

[34] Johan Malmström : 'Robotique Navigtion with GPS/INS and Adaptive Beamforming', Scientific report, Swedish Defence Research Agency. Avril 2003.

[35] Kalman, R.E. : 'A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems', Transaction of the ASME Journal of Basic Engineering, March 1960, pp.35-45.

[36] Grewal, Mohinder.S, and Angus P.Andrews. : 'Kalman Filtering Theory and Practice', Upper Saddle River, NJ USA, Prentice Hall, 1993

[37] Fabien. Campillo. : 'Filtrage en temps discret', DEA de Mathématiques Appliquées, Université de Provence, 1997.

[38] Fabien. Campillo. : 'Filtrage Linéaire, Non Linéaire et Approximation Particulaire pour le Praticien', Notes de cours, Version V.1, Universités Aix Marseille \_ , Mars 2005.