الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

**Département du Génie Électrique et de l'Informatique**



**Projet de fin d'étude**

**Présenté pour l'obtention du Diplôme**
**De master en Génie Électrique**

*Spécialité* : Systèmes de Télécommunications

## THEME

# CONCEPTION ET REALISATION D'UNE STATION INERTIELLE (IRS) A 9 AXES

**Proposé et dirigé par,**

M. CHADLI Samir

**Préparé et présenté par,**

M.AMER Amer

M. KONATE Siaka

Dédicace

C’est avec un très grand honneur que je dédie mon travail :

A mes parents : mon père et sur tout à ma mère pour ses sacrifices pour moi depuis ma naissance jusqu’à maintenant et qu’elle n’a jamais cessé de m’encourager, que dieu les gardes

A mes chers frères alaa, Mohamed, Ammar, etlaith.

A toutes mes amis d’étude depuis l’école primaire jusqu’à l’université.

A toute la famille << AMER>

À la fin, je remercie mon ami et binôme siaka qui à contribué beaucoupà la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail a ma mèreet de ses efforts colossaux pour que je puisse grandir et à mon père d’avoir m’inscrire à l’école et pour tout soutient physique ou moral depuis ma naissance jusqu'à ce jour, que Dieu leurs récompense mieux, aussi je dédie ce travail a mon oncle AROUNE pour tout ce qu’il a fait durant mon séjour universitaire en Algérie, je dédie ce travail à mon ami et binôme Mr AMER Amer d’avoir accepté de me prendre comme binôme.

*REMERCIEMENT*

*D’abord nous remercions ALLAH le tous puissant d’avoir nous donner le courage de terminer ce travail, nous remercions notre promoteur Mr CHADLI Samir d’avoir accepté de nous encadré, de sa disponibilité pour qu’on puisse mener a bien notre projet et de sa motivation. Nous remercions tous les professeurs pour leur sincérité dans l’exercice de leurs fonctions d’enseignant et aussi pour les conseils et orientations. Nous remercions aussi tous nos amis pour leur soutient et tous ce qu’on contribués de prés ou de loin dans la réalisation de ce modeste projet.*

**ملخـــص:**

الغرض من هذا المشروع هو تصميم وانجاز محطة قياس بالقصور الذاتي ذات 9 درجاتحرية عن طريق استخدام أجهزة استشعار بالقصور الذاتي. تتمثل الفكرة بوضع أجهزة استشعار بالقصور الذاتي على جسم ثابت أو متحرك من أجل معرفة موضعهواتجاهه في الوقت الحقيقي من خلال الجمع بين جهاز قياس التسارع وجيرو سكوب وحساس مغناطيسي وعرض البيانات على برنامج **processing**. تم تصميم هذا النظام لمتابعة حركةأي جسم مع وجود أكثر من درجة حرية

**كلمات مفتاحية:اردوينو، وحدة قياس العطلة، متابعة الحركة.**

**Résumé :**

Le but de ce projet est de concevoir et réaliser une station de mesure inertielle à 9 degré de liberté par l'utilisation de capteurs inertiels.L'idée consiste à placer des capteurs inertiels sur un objet fixe ou mobile afin de connaitre les informations en temps réel sur sa position angulaire en combinant un accéléromètre et un gyroscope et son orientation par l'utilisation d'un compas magnétique et visualiser les données sur le logiciel processing. Le système est conçu pour suivre le mouvement de n'importe quel objet ayant plusieurs degrés de libertés.

**Mot clé :Arduino, IMU, Suividu mouvement**.

**Abstract**:

The purpose of This project is to design and build a station inertial measurement with 9 degrees of freedom by using inertial sensors. The idea is to place inertial sensors on a fixed or moving object in order to know the real-time information on its angular position by combining an accelerometer and a gyroscope and orientation by using a magnetic compass and view data on the processing. The system is designed to follow the movement of any object having many degree of freedom.

**Key Word:Arduino, IMU, TRACKING**.

**Table des matières**

**LISTE DES FIGURES……I**

**LISTE DES TABLEAUX……III**

**LISTE DES ACRONYMES……..IV**

**Introduction Générale ……....V**

**CHAPITRE I : les systemes de suivi du mouvement……..1**

**1. Introduction ……2**

**2. Le suivi du mouvement ……...2**

**3.Les critères d'évaluation ……..2**

3.1Critères économiques……...3

3.2 Critères techniques……..3

3.3 Critères géométriques……..3

**4. Les différentes Méthodes de suivi de mouvement ……...4**

4.1Capture acoustique……...4

4.2 Capture magnétiques……...5

4.3 Capture radio…….....5

4.4 Capture optique …….....6

4.5La capture inertielle ……..10

**5. Système hybride de suivi de mouvement ……10**

5.1 Suivi inertielle et suivi Vidéo ……..11

5.2 Suivi inertiel et ultrason ……....12

5.3 Suivi inertiel et magnétique ……13

**6. Conclusion……...14**

**CHAPITRE II : Suivi du mouvement par unité inertielle…….....15**

**1. Introduction……16**

**2. La station inertielle……16**

**A. Partie hardware……18**

**3. Schéma bloc……18**

**4. Conception et choix des composants…….....19**

4.1. Choix de la plateforme de programmation…….....19
4.2. Choix du module IMU…….....23
4.3. L'accéléromètre ADXL345……...24
4.4. Le gyroscope ITG3200……..30
4.5. Le magnétomètre HMC5883L…….....34
4.6.Le Bus I2C (Inter Integrated Circuit)…….....38
4.7 Module de communication Bluetooth…….....41
**5. Schéma électrique de la station inertielle…….43**
**B. Partie software……...44**
**6. L'organigramme du programme principal……...……..44**
**7. L'organigramme du sous-programme read_ADXL345……...……...47**
**8. L'organigramme du sous-programme read_ITG3200……47**
**9. L'organigramme du sous-programme read_HMC5883L……48**
**10. L'organigramme de la fonction i2c_read…….....48**
**11. L'organigramme de la fonction i2c_write…….49**
**12.CONCLUSION ……..50**
**CHAPITRE III : Test et mise en marche……51**
**1.Introduction……..52**
**2. Les étapes de mise en marche et interprétation des résultats du système……..52**
**3. Résultats et discussion……57**
3.1. Accéléromètres ……...57
3.2. Gyroscope…….....59
3.3. Les angles de rotation roll, pitch et yaw……..61
**4. Conclusion……62**
**5. conclusion générale……63**
**6.bibliographique……...64**

**Liste des figures :**

Figure I.1 *: Le spectre des longueurs d'ondes*.....6

Figure I.2 : *Les deux configurations d'utilisation d'un système de suivi optique*…….7

Figure I.3 :*Les composantes du système de capture d'image* …….....8

Figure I.4 :*Analyse de la marche par un système de caméras Vicon*……...9

Figure I.5 :Système de capture à sources laser ……9

Figure I.6 : *Comparaison qualitative de la performance d'un système inertiel et les systèmes basés sur les capteurs acoustiques ou optiques en fonction de la vitesse du mouvement* ……..10

Figure I.7 : *structure d'un filtre de fusion* ……..11

Figure I.8 *Structure générale du système inertiel et ultrason* ….....12

Figure I.9 *: Aperçu schématique du matériel e*……...13

Figure I.10 : *La partie matérielle du système*.....13

Figure II.1 *: Schéma bloc de la station inertiell*e ……...18

Figure II.2 *: L'environnement de programmation Arduino*……20

Figure II.3 : *L'Arduino nano*……...22

Figure II.4 *: Brochage de l'Arduino nano*……...22

Figure II.5 *: quelques stations à 9 degré de liber*té…….23

Figure II.6 : *le principe de fonctionnement d'un accéléromètre*…….25

Figure II.7 *: L'ADXL345 et son brochage*……..26

Figure II.8 : *Le Gyroscope et ses axes de rotation*……..30

Figure II.9 : *Ll'ITG3200*……...31

Figure II.10 :*Structure interne de l'ITG3200*…….31

Figure II.11 : *Le magnétomètre HMC5883L*……...35

Figure II.12 : *Structure d'E/S d'un module I2C*……...38

Figure II.13 : Exemple *des conditions de départ et d'arrêt*…….39

Figure II.14 : *Exemple de transmission réussie*……..39

Figure II.15 : *Exemple d'octet d'adresse*…….40

Figure II.16 : *Exemple d'écriture d'une donnée*……..40

Figure II.17 : *Exemple de lecture d'une donnée*……..41

Figure II.18 :*Le module Bluetooth HC-05*…….....41

Figure II.19 : *schéma de câblage du HC-05*……...42

Figure II.20 : *schéma d'assemblage de la station inertielle*……..…43

Figure II.21 :*L'alimentation du système*……..44

Figure II.22 :*L'organigramme du programme principal*……46

Figure II.23 :*L'organigramme du sous-programme read_ADXL345*…….47

Figure II.24 :*L'organigramme du sous-programme read_ITG3200*……..47
Figure II.25 :*L'organigramme du sous-programme read_HMC5883L*……..48
Figure II.26 :*L'organigramme de la fonction i2c_read*……..49
Figure II.27 :*L'organigramme de la fonction i2c_write*……50
Figure III.1 : *La fenêtre du moniteur série*……..53
Figure III.2 : *Le résultat pour l'axe Z de la station est perpendiculaire à la terre*……..……...……54
Figure III.3 *: Le résultat pour l'axe Y perpendiculaire à la terre*……..……55
Figure III.4 : *le résultat pour l'axe X perpendiculaire à la terre*…….…..55
Figure III.5 : *Sorties de l'accéléromètre lorsque l'axe X est orienté vers le bas*……..….57
Figure III.6 : *Sorties de l'accéléromètre lorsque l'axe Y est orienté vers le bas*……....57
Figure III.7 : Sorties de l'accéléromètre lorsque l'axe Z est orienté vers le bas…….58
Figure III.8 : *Rotation autour de l'axe X du gyroscope*……..59
Figure III.9 : *Rotation autour de l'axe Y du gyroscope*……..59
Figure III.10 : *Rotation autour de l'axe Z du gyroscope*…….60
Figure III.11 : *Angles d'inclinaison (roll, pitch et yaw) avec variation du roll (ligne rouge)*……61
Figure III.12 : *Angles d'inclinaison (roll, pitch et yaw) avec variation du pitch (ligne bleue)*…….....62

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 *: liste des modules Arduino et leurs caractéristique*……..21

Tableau II.2 : *description des broches du module Arduino Nano*…….....23

Tableau II.3 : *comparaison entre quelques modules IMU 9 degré de liberté*…….....24

Tableau II.4 : *Description des différents brochent de l'ADXL345*…….....27

Tableau II.5 *: liste des registres de l'ADXL345les plus importants*……..…….28

Tableau II.6 : *Gamme de mesure de l'accéléromètre et les applications correspondantes*……...29

Tableau II.7 : *Les broches nécessaires pour la connexion du capteur sur le bus I2C*…….....32

Tableau II.8 : *liste des registres de l'ITG3200*……33

Tableau II.9 : *liste des registres de l'HMC5883L*…….…..36

Tableau II.10 : *les gains de l'HMC5883L avec la combinaison correspondante*……...37

Tableau II.11 *: les modes de mesure*……....37

Tableau II.12 : *la description des broches du module HC-05*……42

# *Liste des acronyms*

**ACK** *acknowledgment*

**GFSK** *Gaussian Frequency Shift Keying*

**GPS** *Global Positioning System*

**I2C** *inter integrated circuit*

**IMU** *inertial measurement unit*

**INT** *interrupt*

**LED** *light emiting diode*

**LSB** *least significant bit*

**MEMS** *Micro-Electro-Mechanical-System*

**NACK***no acknowledgement*

**PLL** *phase look loop*

**RA** *registre address*

**SCL** *serial clock*

**SDA** *serial data*

**SPI** *serial port interface*

**USB** *universal serial bus*

# *Introduction générale*

La miniaturisation des équipementsélectronique a toujours été une préoccupation majeur, mais depuis l'invention des circuits intégrée 1958 par l'Américain jack KILBY la plus part des équipements portatifs ont vu le jour. De plus l'arrivé des capteurs MEMS qui se fabriquent d'une manière similaire à celle des circuits intégrés, induisant une réduction spectaculaire du cout, de l'encombrement et une amélioration des performances de ces derniers. Ainsi on trouve aujourd'hui beaucoup de systèmes électroniques qui peuvent être embarqués dans d'autres systèmes plus complexes ou sur l'être humain lui-même remplissant des tâches complexes et très variées.

Dans le domaine de l'étude des mouvements des objets simples en robotique, des mouvement des petits engins (modèle réduits d'avions, de voitures, d'UAV,….) ou l'analyse desmouvements ordinaires des animaux et du corps humain tels que la marche, la course, l'extension,….etc., des systèmes complexes, lourds et chères sont généralement utilisés. Ces systèmes sont dans la plus part du temps adaptés pour les laboratoires de recherches et destinés à être utilisés par des expertes à l'intérieur. Hors dans plusieurs situations on éprouve un besoin croissant pour tracer le mouvement d'objets ordinaires comme celui d'une balle ou d'un ballon dans une pratique sportif donnée, le mouvement d'une partie du corps humain afin d'analyser le geste et le quantifier. Pour cela des systèmes portatifs de suivi du mouvement apporterons une grande aide aux chercheurs surtout si ces derniers sont d'un cout modéré.

C'est dans cet esprit que rentre notre travail de fin d'étude, qui vise à concevoir et à réaliser une station inertielle portative à 9 axes afin de suivre des cibles de petites tailles ou simplement un ou plusieurs segments (parties) du corps humain. Cette stationest basée sur l'exploitation d'un ensemble de capteurs inertiels miniatures de faibles couts associés à un capteur magnétique pour fournir un système plus complet, léger et portatif pour des applications mobiles.

Ce système est destiné à être utilisés dans des applications diversesde suivi de mouvement en temps réel tels que ceux utilisés dans plusieurs domaine d'application

Le présent travail est scindé en trois parties, la première est consacrée à l'étude de l'existant en matière de suivi du mouvement, la deuxième présente la conception et la réalisation du système proposé et la dernière partie est consacré à la mise en marche et aux tests pratiques.

# CHAPITRE I : LES SYSTEMESDE SUIVI DU MOUVEMENT

## 1. Introduction :

Dans ce premier chapitre nous allons présenter la technique de suivi du mouvement (motion tracking) d'un objet ou d'un segment du corps humain et l'ensemble des systèmes et des méthodes les plus utilisés actuellement pour traquer une cible donnée, ainsi que les principes de mesures utilisés et la structure des systèmes de captures du mouvement.

## 2.Le suivi du mouvement :

Le suivi du mouvement (motion tracking) d'un objet, d'un ou de plusieurs segmentsdu corps humain est un axe de recherche d'actualité, il regroupe l'ensemble des techniques et des outils utilisés pour la capture, l'analyse et la quantification du mouvement de l'objet ou du corps humain dans l'espace.

Dans la littérature scientifique nous trouvons une grande variété de méthodes de suivi du mouvement qui sont basées sur différents principes physiques, le suivi du mouvement peut être réalisé à l'aide de systèmes [1] :

- acoustique ;
- optique ;
- à base de capteurs radio et hyperfréquences.
- à base d'un ou de plusieurs capteurs inertiels ;
- à base d'une combinaison de deux ou de plusieurs des systèmes précédents.

Les différents besoins de suivi du mouvement qu'éprouvent les utilisateurs et les chercheurs d'aujourd'hui nécessitent différentes solutions, car il n'y a pas de traqueur parfait qui peut satisfaire toutes les exigences. Il est donc essentiel de connaître les avantages et les inconvénients d'un système donné de suivi du mouvement pour qu'il puisse répondre aux besoins de l'utilisateur, ainsi un ensemble de critères d'évaluations sont pris en compte dans le choix d'une solution spécifique.

## 3. Les critères d'évaluation

Pour une évaluation des différentes approches de suivi du mouvement décrites dans cechapitre, quelques critères seront nécessaires, étant donné qu'il n'y est aucun traqueur parfait disponible encore sur le marché et probablement il n'y aura jamais, chaque approche a ses avantages spécifiques et ses inconvénients.

Les critères suivants sont dans la plus part des cas, les plus utilisés pour l'évaluation d'un système de suivi du mouvement [1]:

- Le critère économique : il s'agit du coût d'installation et de maintenance du système ;
- Le critère géométrique : il s'agit du poids et de la taille du système ;
- Les critères techniques : ces critères englobent un ensemble de paramètres tels que : l'exactitude, le débit de données, la latence, la gamme, la fiabilité, le nombre de degrés de liberté (DOF) suivis ou traqué, la consommation en énergie, la robustesse et la capacité de suivre la trace d'objets multiples, …..etc.

### *3.1. Critères économiques*

L'aspect économique (le coût) d'un projet est très important parce qu'il détermine souvent si le projet sera arrêté ou ne commencera même jamais. Ainsi nous ne pouvons pas négliger ce critère, bien que dans des projets de recherche l'amélioration technique soit la priorité absolue.

### *3.2. Critère géométrique*

Poids et Taille : ce critère est surtout important pour certains types d'applications liées au suivi du mouvement des petits objets ou à l'extérieur.

### *3.3. Critères techniques*

- L'exactitude : le suivi d'un objet est souvent utilisé pour des systèmes de contrôle ou une analyse du chemin de l'objet est nécessaire pour assurer une commande donnée, donc il est primordiale pour le traqueur d'avoir une haute exactitude en position et en orientation.
- Le débit de données : la vitesse d'un système de suivi du mouvement est spécifiée par le nombre de mesures qu'il peut prendre dans un temps spécifique.
- La latence : c'est le temps qu'un traqueur a besoinpour fournir l'information relative au mouvement, il est similaire au retard de réponse d'un système.
- La gamme : elle représente l'étendu de mesure (distance max, vitesse max, angle max, …), elle doit être aussi large que possible.
- La fiabilité : c'est la capacité d'un système à exécuter correctement ses fonctions exigées sous différentes conditions.
- Le nombre de degré de liberté : le traqueur parfait doit pouvoir suivre une cible tant en position qu'en orientation (par exemple si un système à 6 DOF : on a accès aux trois inclinaisons et aux trois rotations du système dans l'espace).
- La consommation électrique : ce critère est particulièrement important pour des applications mobiles, parce qu'elles sont alimentéespar des batteries (piles) et non une source d'énergie permanente, ce qui réduit considérablement les temps des mesures.

- La robustesse : les différents systèmes de suivi sont basés sur des phénomènes physiques différents. Ainsi ils sont sensibles aux différentes grandeurs d'influences de l'environnement. Par exemple un suivi basé sur un appareil photo aura des problèmes avec la lumière du soleil brillante ou des réflexions de lumières, d'autres grandeurs physiquestelles que les champs magnétiques, les ondes acoustiques, etc.... peuvent bruiter les systèmes de suivi du mouvement.
- La capacité à suivre des objets multiples : c'est la possibilité d'un système à suivre la trace de plusieurs objets en même tempsqui est souvent nécessaire pour certaines applications.

## 4. Les différentes Méthodes de suivi du mouvement

### *4.1. Capture acoustique*

Les méthodes acoustiques sont basées sur la transmission et la capture d'ondes sonores. En général, ces systèmes utilisent des ondes sonores qui sont transmises vers l'objet à traquer, le temps séparant l'instant d'émission de l'onde acoustique et l'instant d'arrivé de son écho permet d'accéder à la distance qui sépare le traqueur de l'objet traquer. Une combinaison de plusieurs traqueurs acoustiques avec un repère adapté permet de suivre le mouvement de l'objet à traquer.

Les traqueurs acoustiques utilisent par fois une source d'onde continue pour déterminer la distance de l'objet suiviet comme les ondes acoustiques sont extrêmement réfléchis sur les murs et d'autres objets, un problème de trajets multiples apparaît, donc il faut mesurer le changement de phase, car le signal reçu est souvent la superposition du signal directement envoyé avec le signal reflété.

Le problème de trajets multiples peut être évité en travaillant avec des impulsions (émission pulsée). Le système doit attendre jusqu'à ce que la première impulsion arrive pour envoyer la seconde impulsion. Cette méthode est adaptéepour les systèmes acoustiques, mais pas pour les systèmes radio et les systèmes optiques.

Les systèmes de suivi par ultrasons peuvent être classésen deux classes :

- Systèmes basés sur ultrasons uniquement.
- Systèmes hybrides, combinant ultrasons avec Radio Fréquence (RF).

En général la mise en œuvre des systèmes de la première classe implique l'utilisationd'un ensemble de récepteurs distribués dans une chambre (environnement fermé), combiné à un émetteur portable à ultrasons fixé sur l'objet à traquer et un processeur central

qui gère la mesure par traitement de toutes les données reçues des récepteurs pour déduire la position.

Dans le cas des systèmes de la deuxième classe, le récepteur est monté sur un dispositif portableaccroché à l'objet à traquer, le récepteur ultrasons détermine son propre positionnement qui va être transmis au système par voie RF.

### *4.2. Capture magnétique*

Cessystèmes mesurent les vecteurs champs magnétiques locaux ou bien les composantes du vecteur champ magnétique terrestre. Pour déterminer l'orientation et la position d'un objet, en générale, la première classe utilise trois bobines triaxiales orthogonales qui sont utilisées pour générer une excitation magnétique, le vecteur champ magnétique mesuré par un capteur monté sur l'objet à traquer et qui est relativement à cette excitation indique l'orientation de l'objet. Pour le deuxième type un capteur appelée magnétomètre mesure deux ou trois composantes du vecteur champ magnétique pour déterminer l'orientation de l'objet.

Les méthodes de suivi de mouvement par systèmes magnétiques ont leurs inconvénients car ils sont perturbés par tous sorts de sources de champs magnétiques (alimentation à découpage, antennes, …) et par les matériaux ferromagnétiques. Mais d'un autre part, ils présentent des avantages essentiels, l'émetteur (bobines) et le récepteur (magnétomètre) du système de mesure ne doivent pas être en vue. Par conséquent nous pouvons suivre la trace de l'objet à travers certains typesd'obstacles, en plusle suivie des cibles multiples en même temps est réalisé sans aucun effort supplémentaire.

### *4.3. Capture radio :*

Les traqueurs utilisant les ondes électromagnétiques offrent unsuivi de mouvement des objetsdans des espaces (endroits) très larges, ces systèmesne sont pas influencés en général par les conditions d'environnement(vent, température, etc…), de plus, ils subissent detrès faibles pertes d'absorption en l'air.

Le principe de suivi est basé sur la mesure du temps de vol (le temps que l'onde met pour faire un aller-retour entre le traqueur et l'objet à traquer). Comparer aux méthodes acoustiques, la différence principale entre les deux types de systèmes est liée à la vitesse de propagation qui est environ un million de fois plus rapide que celle des ondes sonores. Ce facteur influe sur l'évaluation et la précision de la mesure. Par exemple, pour avoir une résolution de 1 mm cela nécessitera un traqueur radio travaillant à plusieurs GHz,cela implique une consommation électrique très importante.

Par conséquent l'inconvénient de ce type de traqueurs est la grande difficulté de suivi et de positionnement dans les espaces fermés (à l'intérieur)à cause del'influence des trajets multiples dues aux réflexions inévitables des ondes radio à l'intérieur.

Notons que dans ce type de systèmes figurent les traqueurs à base des systèmes RFID et les traqueurs à base de réseaux de capteurs sans fil (WSN).

### *4.4. Capture optique*

Les systèmes de suivi de mouvement par vision sont constitués essentiellement par deux composants, un capteur et un émetteur ou un réflecteur. Théoriquement, ces systèmes fonctionnent avec toutes les longueurs d'ondes présentées dans la figureI.1.

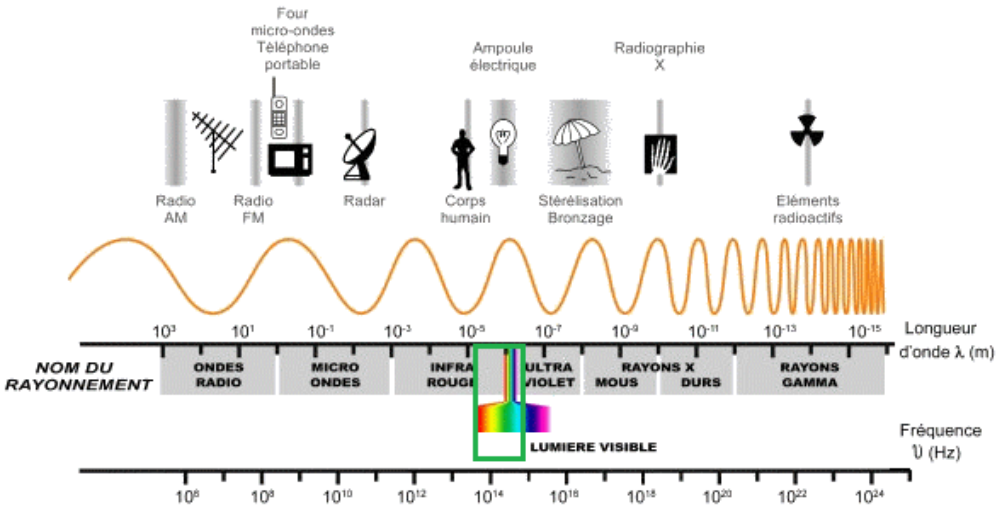



**Figure I.1** : *Le spectre des longueurs d'ondes*

En pratique, seulement une petite partie du spectre de fréquence est utilisée. Les rayons X ont l'avantage de pénétrer dans des objets non métalliques comme la chair et d'autres matériels légers, mais l'utilisation de ce type d'ondes n'est pas évidemment à cause des radiations et leurs conséquences sur la santé. Pareils pour le cas des rayons gamma.

La lumière ultra-violette (UV) semble être exploitable, mais comme les UV sont généralement bloqués par les lentilles de plastique et de verre, un traqueur UV aurait besoin de lentilles spéciales de quartz qui sont plus chères.

Donc tout ce qui reste de la gamme exploitable est le spectre de la lumière visible et celui de l'infrarouge (IR). Mais pas toute la longueur d'ondes de la lumière IR qui est appropriée pour ce type d'applications. Le milieu du spectre IR,qui contient les ondes de la radiation de chaleur, a aussi besoin d'un type particulier de caméras thermiques qui sont très chères. Pour toutes ces raisons, les longueurs d'ondes préférées pour le suivi du mouvement par systèmes optiquessont la lumière visible et l'infrarouge près.

Comme nous l'avons expliqué au début, un traqueur optique est constitué de deux parties, des émetteurs et des détecteurs (capteurs). Il y a deux configurations pour placer ces deux composants [2], dans la première configuration « Inside-Looking-Out », les détecteurs sont placés sur l'objet en déplacement et les émetteurs dans l'environnement. Dans l'autre cas « Outside-Looking-In » les émetteurs sont fixés dans l'environnement et les détecteurs sont placés sur l'objet à traquer (Figure I.2).

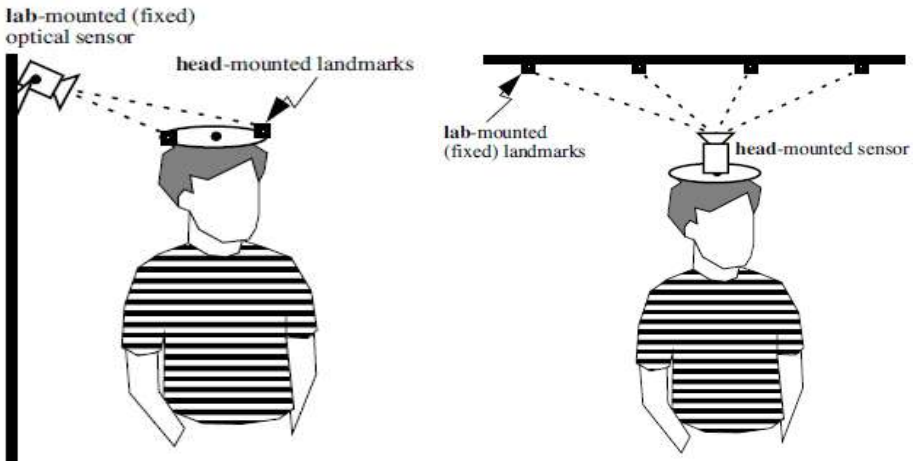



**Figure I.2** :*Les deux configurations d'utilisation d'un système de suivi optique* a- *L'approche outside looking in;* b- *L'approche inside looking out*[2]

Dans la classe desméthodes optiques de suivi du mouvement, on distingue deux types de systèmes :

-Les systèmes de capture d'image(vision) ;

- Les systèmesde capture à base de laser.

*4.4.1.Système de capture d'image :* ces dispositifsse subdivisent en deux catégories en fonction du type des marqueurs utilisés [3]. Nous distinguons les marqueurs actifs et les marqueurs passifs. Les systèmes passifsutilisent des marqueurs lumino-réfléchissants (Figure I.3-a) comme le cas des systèmes : *Vicon, Elite,* etc…, dans ce cas les marqueurs réfléchissent la lumière vers le détecteur, alors que dans le cas des systèmes actifs comme le système *Visualeyez*, ils utilisent des marqueurs qui comportent une source de lumière à base de LED (Light Emitting Diode) (Figure I.3-c).

Les systèmes de suivi du mouvement à base de marqueurs sont de plus en plus utilisés pour l'analyse du mouvement humain. Ces systèmes fournissent une modélisation cinématique ducorps humain et aident à l'analyse de certains paramètres des mouvements du corps tels que la flexion, l'extension, la marche, …. [3].

Contrairement à un système qui utilise des marqueurs actifs, un système à marqueurs passifs est moins encombrant grâce aux marqueurs sans fil.




**Figure I.3** :*Les composantes du système de capture d'image*[3]

*(a) Marqueurs passifs (lumino-réfléchissants) ; (b) Caméra Vicon équipée d'un émetteur/récepteur infrarouge ; (c) Marqueurs actifs (LED) fixés sur une combinaison pour le système Visualeyez*

Le principe de capture de ces systèmes est basé sur l'utilisation de marqueurs attachés à certains points-clés du corps humain (Figure I.4). Ces marqueurs doivent être utilisés dans un espace équipé de plusieurs caméras à émetteurs/récepteurs infrarouges. Chaque marqueur réfléchit le signal infrarouge émispar les caméras (pour les marqueurs passifs) ou au contraire émet un signal infrarouge (pour les marqueursactifs). Ce signal-réponse ne sera capté que par la caméra ayant une ligne de vue directe sur lemarqueur, ce qui rend un certain nombre de marqueurs invisibles et indétectables pour unecaméra donnée à un instant donné, d'où le besoin d'un nombre important de caméras (3 à 6 en général). Pour déterminer la position 3D de chaque marqueur dans le repère absolude l'espace d'expérimentation, une méthode de triangulation est appliquée. Pour pouvoirlocaliser ce marqueur il faut qu'il soit visible par au moins deux caméras. De plus un calibragedes caméras s'avère nécessaire [4].

Pour l'analyse de la marche par exemple, les marqueurs sont souvent placés sur les points-clés dont nous voulons suivre le mouvement. Ainsi, les positions 3D des chevilles, épaules, hanches, genouxetc. sont estimées avec une fréquence allant jusqu'à 100 Hz. Le modèle cinématique en fils defer du corps en mouvement permet aux médecins spécialistes de détecter les anomalies au niveaudes rotations des différentes articulations et du mouvement de certains segments du corpspendant la marche ou tout autre mouvement.

A l'aide d'un système de suivi 3D du mouvement humain (Figure I.4), nous pouvons détecter les positions 3D des segments du corps humain. Toutefois, il n'est pas envisageabled'installer ces systèmes à domicile, car ils sont très chers et ils nécessitant un espace bien dégagépour assurer le recouvrement des champs de vision.

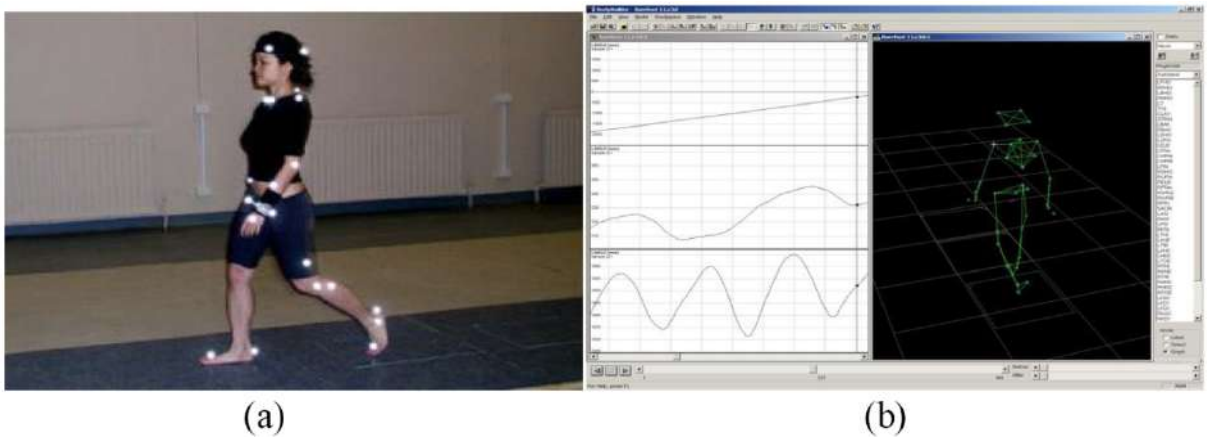



**Figure I.4**:*Analyse de la marche par un système de caméras Vicon*[3]
*(a) Les marqueurs passifs sont fixés sur les points-clés du corps,*
*(b) Capture d'écran du rendu d'un système Vicon*

*4.4.2.Système de capture avec plusieurs sources laser :*Cette approche est très utilisée dans les applications de robotique pour traquer les objets, le suivi du mouvement de l'objet est assuré par un système constitué d'un scannerfixé sur la tête d'une plate-forme motorisée (Figure I.5-a), et une cible réfléchissante. La tête du scanner est composée d'une matrice de diodes laser positionné autour d'un photo-détecteur (Figure I.5-b). Les diodes laser utilisent une stratégie de commutation en série pour la localisation de la cible. Le photo-détecteur mesure la lumière réfléchie, et repèrela cible [1].

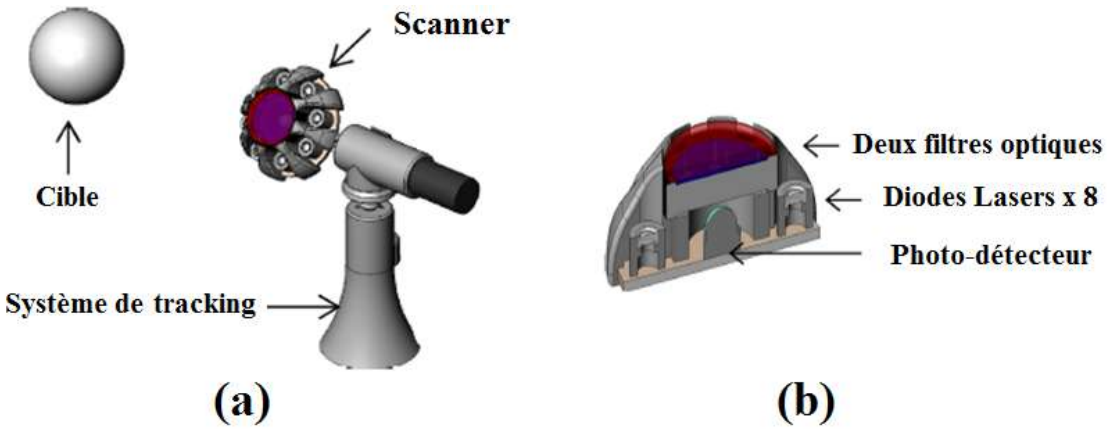



**Figure I.5** : *Système de capture à sources laser*[1]
*(a) La plateforme de traking, (b) La tête du scanner*

### *4.5.La capture inertielle :*

Les traqueurs de mouvement à base de capteurs inertiels mesurent la cinématique d'un système (objet ou segment du corps humain) en translation ou en rotation sans avoir besoin d'un repère externe (les mesures sont en générale relatives). Ces capteurs dits proprioceptifs ont l'avantage de délivrer leurs mesures à grande fréquence, typiquement de 30 à 100 Hz mais donnent information seulement du mouvement du segment ou de l'objet traquer et nous n'avons alors aucune information sur la position initiale du système. Dans cette catégorie de systèmes de suivi du mouvement nous utilisons plusieurs types de capteurs inertiels tels que : les gyroscopes etles accéléromètres.

## 5. Système hybrides de suivi du mouvement :

Tous les systèmes de suivi du mouvement ont leurs points forts et leurs points faibles. Une combinaison de deux ou plusieurs systèmes de suivi en un seul système dit hybride peut être envisageable, dans cette condition les faiblesses d'un système peuvent alors être compensées par l'autre.

La plus part des systèmes hybride utilisés sont basés sur le suivi inertiel et étendu par un autre type de système de suivi (acoustiques, optique, magnétique) de basse fréquence qui fournis des données sur la position absolue de la cible traquée.

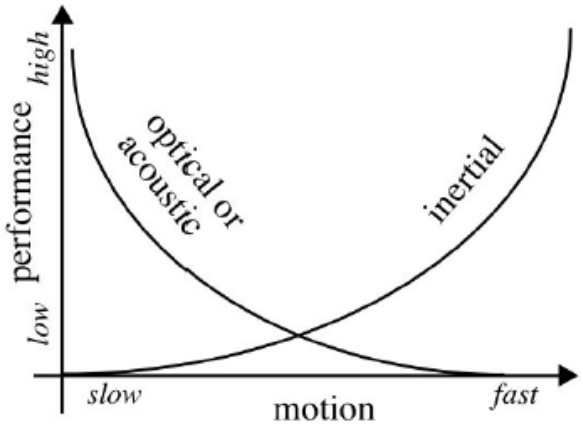



**Figure I.6** *: Comparaison qualitative de la performance d'un système inertiel et les systèmes basés sur les capteurs acoustiques ou optiques en fonction de la vitesse du mouvement*[1]

Comme il est décrit dans la figure I.6, la performance des systèmes de suivi inertiels en fréquence élevées (pour les mouvements rapide) est meilleurs par rapport aux autres systèmes de suivi, mais ne fournissent pas des informations exploitables en basse fréquence.

Alors ils sont combinés avec d'autres capteurs qui peuvent suivre en basse fréquence pour corriger la dérive des gyros et des accéléromètres intégrés dans les capteurs inertiels.

***5.1.Suivi inertielle et suivi Vidéo***

Cette approche a été développée spécialement pour les applications de la réalité augmentée (combinaison des éléments d'une scène réelle et virtuelle), mais elle pourrait également être utilisée pour les applications de la robotique. En remplaçant la reconnaissance des repères avec un algorithme qui détecte les surfaces naturelles d'un environnement donné. Ces systèmes comprennent en général une caméra CCD et un gyroscope qui fournit trois données orthogonales. Les données de la camera sont échantillonnées à 30 Hz, tandis que le gyroscope fournit les données sur les vitesses angulaires dans les trois dimensions à 1 KHz. Avec cette configuration, il est possible de suivre les mouvements lents avec la caméra et les mouvements rapides avec la détection inertielle. Par conséquentla difficulté de la mesure, réside dans la fusion des deux flux de données. Dans une première approche, les chercheurs ont pensésà une solution simple basée sur une combinaison d'un filtre passe-bas pour la caméra et un filtre passe-haut pour les capteurs gyroscopiques. Mais le problème qui se pose est comment choisirions-nous la fréquence de coupure ? En conclusion, il s'agit d'une approche très difficile à mettre en œuvre.

La seconde approche se repose sur l'utilisation d'une chaine de deux filtres de Kalman étendu (EKF) parallèles et qui partagent le même bloc de prédiction, mais qui ont des canaux de correction séparés (Figure I.7). A chaque fois, le filtre prédit les nouveaux états du système, puis les corrigent individuellement avec les mesures actuelles de la caméra et des capteurs gyroscopiques suivis d'une mise à jour des états.

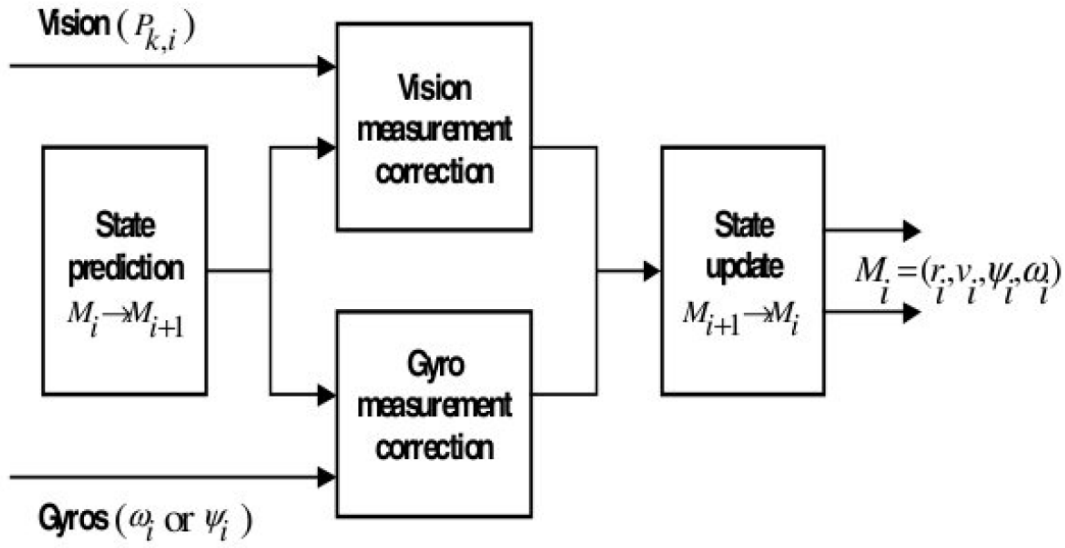



**Figure I.7** *: structure d'un filtre de fusion*[1]

### *5.2. Suivi inertiel et ultrason :*

Le système (figure I.8) se compose d'un ensemble de balises de transpondeurs (dispositif radio qui assure la retransmission des signaux qu'il reçoit) montées sur le plafond, trois unités traqueuses avec des modules ultrasons (URM) «Ultrasonic Range finder Module», pouvant estimer la distance entre deux objet, un dispositif de détection d'inertie et un processeur de base qui collecte et traite les données.

Les balises de transpondeur sont activées seuls ou en même temps, commandées par les modules URM et communiquant par des signaux infrarouges. Par conséquent, chaque balise possède un code unique et répond aux impulsions ultrasons dans le cas du mode actif. Le principe de mesure du temps de vol est utilisé pour estimer la position, le nombre de balises de transpondeur devraient être quatre ou plus pour garantir une estimation acceptable. On utilise en générale trois URM pour obtenir tous les degrés de liberté de l'objet suivi (position et orientation).Un filtre de Kalman étendu fusionne les données et renvoie une estimation de l'erreur minimisée [1].

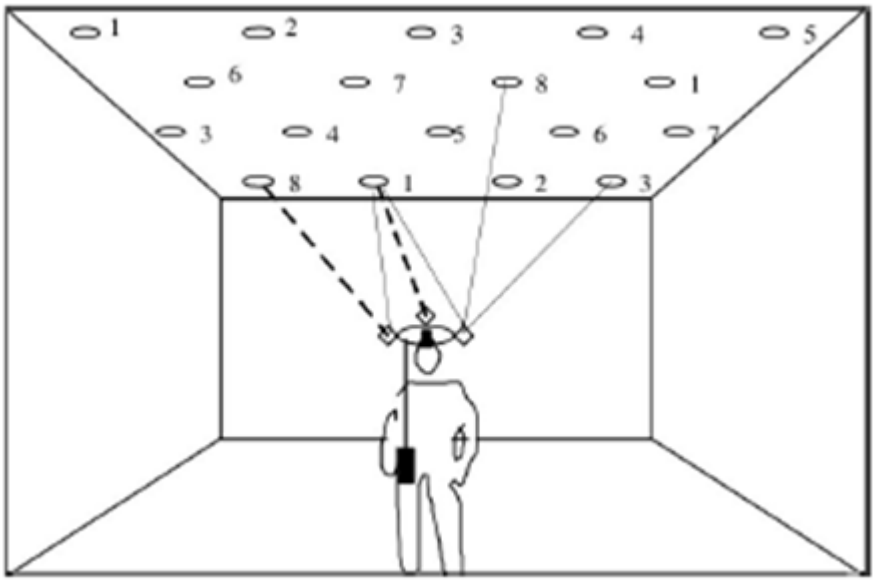



**Figure I.8** : *Structure générale du système inertiel et ultrason*

En raison de l'utilisation spécifique du système, un logiciel pour l'acquisition est nécessaire.L'acquisition a lieu chaque fois que le traqueur mis sous tension entre ou retourne dans une chambre équipée de balises de transpondeurs.

Une fois qu'il ya une acquisition, une deuxièmepartie du logiciel(le logiciel de suivi), prend le relais, l'algorithme de suivi exploite le hardware de la figure I.9.

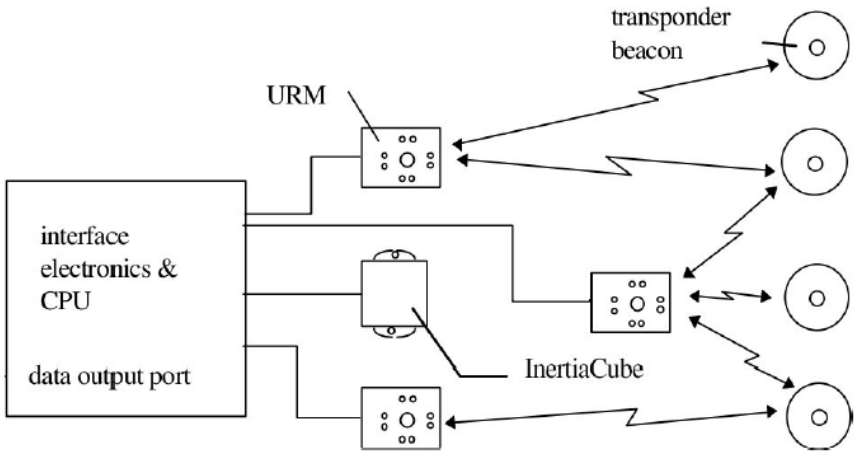



**Figure I.9** :*Aperçu schématique du matériel* [1]

### *5.3. Suivi inertiel et magnétique*

Ce système combine la détection magnétique et inertielle. Dans la figure I.10, l'utilisation des capteurs intégrés (Integrated sensors pack ou ISP) introduits récemment consistant en une station IMU et un petit magnétomètre à 3 axes. L'ISP assure le filtrage et l'estimation des données de la positionde l'IMU et le magnétomètre mesure seulement le vecteur de champ magnétique de la terre pour accéder à l'orientation et donc ne renvoie aucune information sur la position. Comme la plus part des systèmes de suivi hybrides, un filtre de Kalman étendu estutilisé pour l'estimation de l'orientation et de la position via une intégration.

Dans la pratique, le vecteur champ magnétique mesuré est affecté par les matériaux ferreux magnétiques à proximité dans l'environnement. Ces distorsions peuvent avoir des effets différents selon le type d'influence (fer dur ou fer doux). Pour le fer dur, ces distorsions peuvent être compensées par l'utilisation des méthodes d'étalonnages. Les plus difficiles à compensées sont celles d'un fer doux. [1]

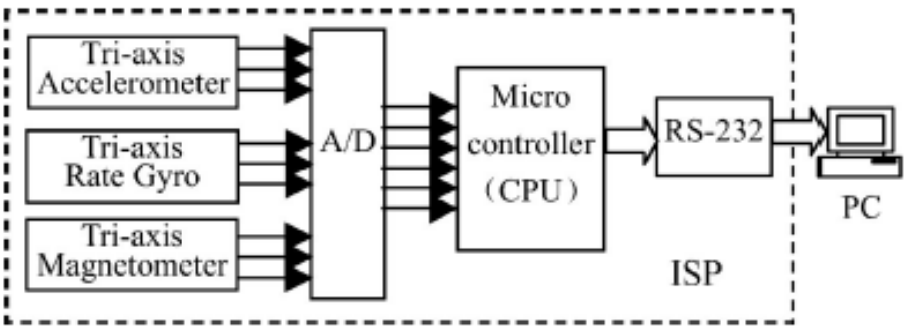



**Figure I.10** :*La partie matérielle du système*

## 6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentéles différent systèmes de suivi du mouvement et les méthodes de détection utilisées dans la plus part de ces systèmes. Connaissant maintenant le principe de fonctionnement de chaque système ainsi que son domaine d'application, nous allons en fin nous intéressé à celui qui est adapté à notre projet, il s'agit d'un système de suivi basé sur l'utilisation des capteurs inertiels et magnétique dont l'étude sera l'objet du chapitre suivant.

# CHAPITRE II : CONCEPTION ET REALISATION DE LA STATION INERTIELLE

## 1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons la conception et la réalisation de notre station inertielle, qui est un système hybride combinant deux capteurs inertiels et un capteur magnétique, ce chapitre est organisé en deux parties, une partie pour décrire le hardware et qui consiste en une étude des différents composants matériels de la station et une partie pour le software qui présente les différents organigrammes de programmation de la station inertielle.

## 2. La station inertielle

Une centrale (station) à inertie ou centrale inertielleest un instrument utilisé généralement en navigation, elle est capable d'intégrer les mouvements d'un mobile (accélération et vitesse angulaire) pour estimer son orientation (angles de roulis, de tangage et de cap), sa vitesse linéaire et sa position. Ces estimations sont relatives au point de départ ou au dernier point de recalage.La station inertielle n'utilise aucune information extérieure au mobile. Malgré les progrès spectaculaires des systèmes de navigation par satellites, elle reste utilisée sur les avions de ligne dont la sécurité des vols ne peut reposer uniquement sur le GPS, insuffisamment fiable à causedes brouillages du GPS susceptibles d'être rencontrés dans certaines situations.[10]

La station inertielle comporte en général six capteurs d'une précision métrologique :

- trois gyromètres mesurant les trois composantes du vecteur vitesse angulaire (vitesses de roulis, de tangage et de lacet);
- trois accéléromètres mesurant les trois composantes du vecteur de la force gravitationnelle ;
- et un calculateur qui réalise l'intégration en temps réel, uniquement à partir des mesures de ses six capteurs.

Des centrales à inertie sont installées à bord de véhicules terrestres, de navires, de sous-marins, d'avions, d'hélicoptères, de missiles et de véhicules spatiaux. Elles sont même parfois transportées par des piétons pour des applications de localisation, de tracking, de localisation de précision en génie civil quand le GPS n'est pas utilisable (forage de tunnels).

Les désignations habituelles des centrales à inertie sont des acronymes issus de l'anglais : Inertiel Reference System (IRS), Inertiel Navigation System (INS), ou Inertiel Measurement Unit (IMU). Cette dernière appellation désigne le sous-système limité aux seuls capteurs inertiels (gyromètres et accéléromètres), sans calculateur.

À partir d'un point de départ connu (repère), la connaissance à chaque instant des mouvements instantanés (déplacements linéaires et rotations) permet d'estimer les angles d'attitude et le vecteur vitesse courant, mais aussi la position de la centrale inertielle.

Par exemple, dans le cas simple d'un mouvement rectiligne et sans rotation (système à un seul degré de liberté), la vitesse peut être calculée par la formule suivante :

$$\vartheta(t + dt) = \vartheta(t) + \gamma(t)dt \qquad \text{(II.1)}$$

Avec :

- **t** est la date ;
- **γ(t)** est l'accélération à l'instant *t* ;
- **υ(t)**est la vitesse à l'instant *t* ;
- ***dt***est un intervalle de temps infinitésimal

La position peut être calculée par la relation :

$$x(t + dt) = x(t) + \vartheta(t)dt \qquad \text{(II.2)}$$

Avec : $x(t)$est la position à l'instant *t*.

Grâce à ces deux équations dites « équations de l'estime », et moyennant la connaissance des vitesse et la position initiales$x(t_0)$, la seule mesure en continu de l'accélération $\gamma(t)$permet d'estimer à chaque instant ultérieur la vitesse $v(t)$et la position $x(t)$.Le principe est similaire dans le cas d'un mouvement quelconque d'un objet dans l'espace.

Dans la pratique, le fonctionnement s'écarte des équations idéales à cause des erreurs qui affectent les mesures des rotations et des accélérations (biais, bruits, facteurs d'échelle, non-linéarités, ...) et qui engendrent des dérives au cours du temps des estimations des assiettes, de la vitesse et de la position. Contrairement à ce que suggère l'exemple simplifié, le plus gros contributeur à l'erreur d'une centrale à inertie est le gyromètre. Ceci est dû au fait qu'il intègre une fois de plus que l'accéléromètre, donc le biais de mesure de la vitesse angulaire engendre de plus grandes erreurs que le biais d'accélération.

Dans les applications nécessitant une grande précision de localisation, de navigation et de tracking, il faut mettre en œuvre des gyromètres présentant des erreurs n'excédant pas quelques centièmes de °/h (degrés par heure) et des accéléromètres de quelques dizaines de µg d'erreur ($10^{-6}$g = millionième de la gravité terrestre). Ces capteurs inertiels doivent de plus être acquis à des cadences de plusieurs centaines de hertz. Le coût d'une telle centrale à inertie se chiffre en centaines de milliers de dollars.

Plutôt que d'utiliser des capteurs inertiels de très haute performance et donc couteux, une autre solution pour limiter les dérives d'une centrale à inertie est de mettre en œuvre des algorithmes d'hybridation avec d'autres capteurs que les capteurs inertiels.De telles hybridations permettent d'utiliser des capteurs inertiels bien moins couteux, en sacrifiant l'indépendance inhérente aux centrales inertielles.

### A. Partie hardware

#### 3. Schéma bloc

La figure suivante présente le schéma bloc retenu pour la conception de notre station inertielle :

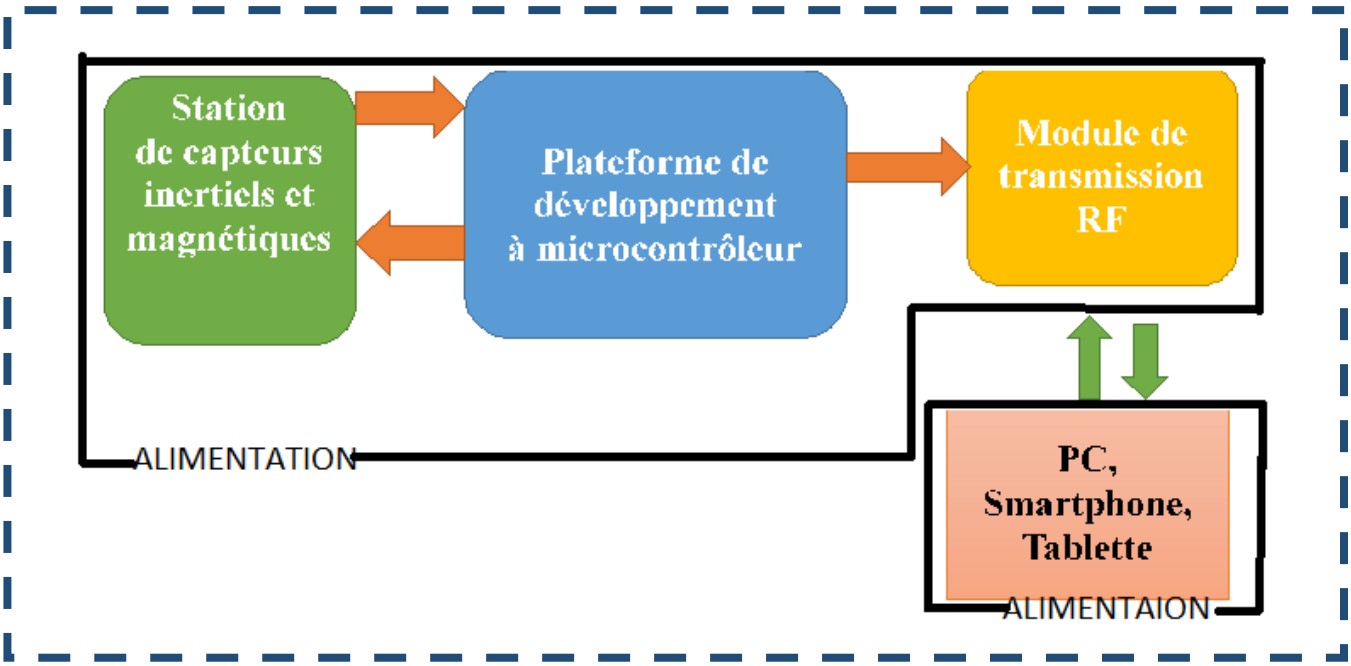



**Figure II.1** : *Schéma bloc de la station inertielle*

Les données fournis par la station des capteurs sont envoyées vers une carte à microcontrôleur, ce dernier s'occupe du traitement à effectuer sur les données reçues tel que, la conversion des données brutes, le calcul des angles roll, pitch et yaw, le calcul des inclinaisons et tout autre calcul élémentaire. En plus il s'occupe de la gestion et de la configuration des différents capteurs.Par la suite les données obtenues par calculs et qui sont liées au suivi du mouvement sont envoyées vers un PC, un Smartphone ou une tablette par voie RF pour stockage, traitement et visualisation. En fin une fois les données sont sur le PC, la visualise des données est réalisée à l'aide d'un programme écrit sous : Matlab, LABVIEW, Processing ou sous d'autres logiciels graphiques.

Pour la partie software, nous avons choisi de travailler avec l'environnement de développement *Processing* pour la représentation graphique à cause de la richesse de ses bibliothèques. Nous avons également utilisé *Matlab* qui est beaucoup plus facile à exploiter pour stocker et pour tracer la variation des données en fonction du temps.

## 4. Conception et choix des composants

### *4.1. Choix de la plateforme de programmation*

Le choix d'un microcontrôleur ou d'une plateforme de programmation repose en générale sur la nature du projet qu'on souhaite réaliser, les délais de développement, le cout du projet, la connaissance de l'architecture interne du microcontrôleur choisis et la maitrise de ses outils de programmation. Comme nous n'avons pas une grande expérience dans la programmation des microcontrôleurs et vue que sur le marché on trouve une grande panoplie de microcontrôleurs qui différents les uns par rapport aux autres, nous avons opté pour l'une des plateformes à microcontrôleur open source les plus utilisés qui est la plateforme Arduino.

Arduino, n'est pas vraiment un microcontrôleur mais une plateforme de développement qui utilise un microcontrôleur ATmega de la famille des microcontrôleurs ATMEL AVR. En plus de ça, le langage de programmation utilisé avec Arduino est une combinaison entre C et C++ qui sont deux langages très utilisés dans les milieux : universitaire, industriel et de recherche.

#### *a- La plateforme Arduino*

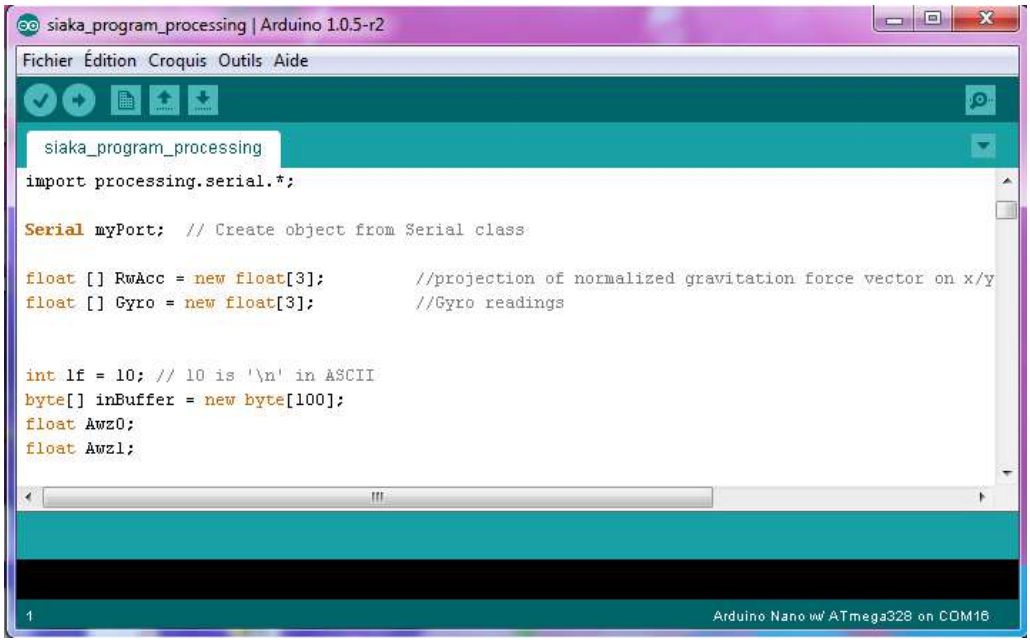
Un module Arduino est généralement construit autour d'un microcontrôleurde la firme Atmel (ATmega328 ou ATmega2560 pour les versions récentes, ATmega168 ou ATmega8 pour les plus anciennes), et de composants complémentaires qui facilitent la programmation et l'interfaçage avec d'autres circuits. Chaque module possède au moins un régulateur linéaire de tension et un oscillateur à quartz (ou un résonateur céramique dans certains modèles).

Le microcontrôleur est préprogrammé grâce à un bootloader de façon à ce qu'un programmateur dédié (externe) ne soit pas nécessaire.

Les modules sont programmés au travers d'une connexion série RS-232, mais les connexions permettant cette programmation diffèrent selon les modèles. Les premiers Arduino possédaient un port série, puis l'USB est apparu sur les modèles récents d'Arduino, tandis que certains modules destinés à une utilisation portable se sont affranchis de l'interface de programmation, relocalisée sur un module USB-série dédié (sous forme de carte ou de câble). L'intérêt principal des cartes Arduino (d'autres modèles existent) est leur facilité de mise en œuvre. Arduino fournit un environnement de développement complet s'appuyant sur des outils open source.

***b- L'environnement de programmation***

Le logiciel de programmation des modules Arduino est une application Java, libre et multiplateforme, servant d'éditeur de code et de compilateur, et qui peut transférer lefirmware développé vers le microcontrôleur au travers de la liaison série (RS-232, Bluetooth ou USB selon le module). Il est également possible de se passer de l'interface Arduino, et de compiler et uploader les programmes via l'interface en ligne de commande.Le langage de programmation utilisé est le C++, compilé avec avr-gC++ , et lié à la bibliothèque de développement Arduino, permettant l'utilisation de la carte et de ses entrées/sorties. La mise en place de ce langage standard rend aisé le développement de programmes sur les plates-formes Arduino, à toute personne maîtrisant le C ou le C++.




**FigureII.2 :** *L'environnement de programmation Arduino*

Il existe une grande variété de modules Arduino dans le commerce, comme on peut le voir sur le tableau II.1 :

**Tableau II.1 :** *liste des modules Arduino et leurs caractéristique*

| Modèle | Processeur | Flash (ko) | EEPROM (ko) | SRAM (ko) | Broches d'E/S numériques | avec PWM | Broches d'entrée analogique |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ***Diecimila*** | ATmega168 | 16 | 0.5 | 1 | 14 | 6 | 6 |
| ***Duemilanove*** | ATmega168/328P | 16/32 | 0.5/1 | 1/2 | 14 | 6 | 6 |
| ***Uno*** | ATmega328P | 32 | 1 | 2 | 14 | 6 | 6 |
| ***Leonardo*** | ATmega32U4 | 32 | 1 | 2.5 | 20 | 7 | 12 |
| ***Mega*** | ATmega1280 | 128 | 4 | 8 | 54 | 15 | 16 |
| ***Mega2560*** | ATmega2560 | 256 | 4 | 8 | 54 | 15 | 16 |
| ***Due*** | Atmel SAM3X8E | 512 | 0 | 96 | 54 | 12 | 12 |
| ***Fio*** | ATmega328P | 32 | 1 | 2 | 14 | 6 | 8 |
| ***Nano*** | ATmega168 or ATmega328 | 16/32 | 0.5/1 | 1/2 | 14 | 6 | 8 |
| ***LilyPad*** | ATmega168V ou 328V | 16 | 0.5 | 1 | 14 | 6 | 6 |
| ***Esplora*** | ATmega32U4 | 32 | 1 | 2.5 | N/A | N/A | N/A |

Notre choix a été orienté vers le modèle ***Arduino nano***, les raisons de ce choix pour la conception de notre projet sont les suivantes :

- Cout faible par rapport à la plus part des autres modèles Arduino et autres microcontrôleurs ;
- Le logiciel de programmation est gratuit et disponible sur le site Arduino ;
- Faible encombrement (dimensions) comparé aux autres versions ;
- Intègre les interfaces I2C et SPI ;
- Facile à utiliser avec une communication série ou USB ;
- Très riche en ressources hardware (ADC, Mémoire, lignes d'E/S, Timers, ….etc).

### *c- L'Arduino Nano*

L'Arduino nano que nous avons utilisé se présente sous forme d'un composant DIL (Figure II-3-a), il intègre un ATmega 328, il possède 30 broches dans 14 lignes d'E/S numériques, 6 sorties PWM et 8 entrées analogiques. L'Arduino nano est doté d'une mémoire de 32 ko, d'une RAM de 2 ko et d'une mémoire data de 1 ko(tableau II.1). Il est aussi équipé de deux régulateurs de tensions (3.3V et 5 V), trois LEDs et un adaptateur d'interfaces RS232-Usb.

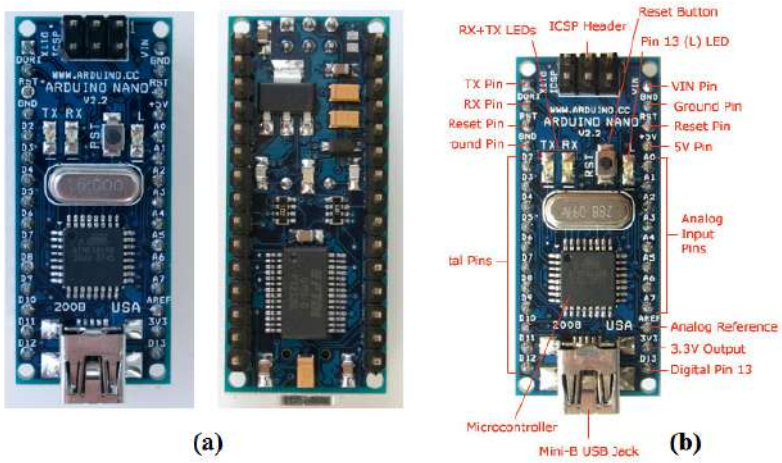



**Figure II.3 :***L'Arduino nano*

*(a) Vues de dessus et de dessous ; (b) constitution du module*

La figure suivante montre le brochage de l'Arduino nono :

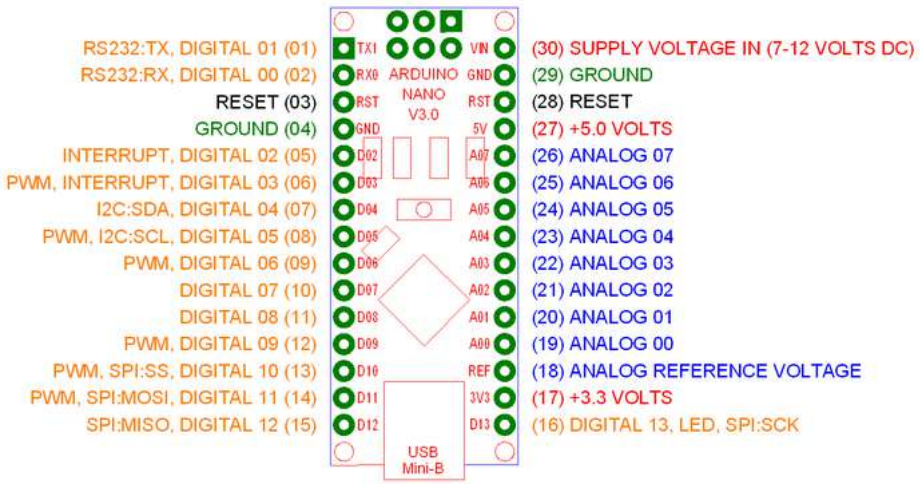



**Figure II.4 :** *Brochage de l'Arduino nano*

Le tableau II-2 résume les fonctions des différentes broches de l'Arduino nano:

**Tableau II.2 :** *description des broches du module Arduino Nano*

| N° de la broche | Nom | Type | Description |
|---|---|---|---|
| *1 à 2 et 5 à 16* | *D0-D13* | *E/S* | *Entrée/sortie numérique* |
| *3,28* | *RESET* | *E* | *Mise a zéro* |
| *4,29* | *GND* | *PWR* | *La masse* |
| *17* | *3V3* | *S* | *Tension de sortie de3.3V* |
| *18* | *AREF* | *E* | *Tension de référence* |
| *19,26* | *A7-A0* | *E* | *8 broches analogiques* |
| *27* | *+5V* | *ENTREE OU SORTIE* | *Tension d'alimentation* |
| *30* | *VIN* | *PWR* | *Tension d'entrée* |

### *4.2. Choix du module IMU*

Les modules IMU sont des stations qui rassemblent plusieurs capteurs inertiels pouvantmesurés des mouvements cinématiques rigides, telles que l'accélération via un accéléromètre, la vitesse angulaire par un gyroscope et l'intensité du champ magnétique à travers un magnétomètre. Ces stations sont fabriquées et développées dans des laboratoires particuliers. Deux grandes catégorie de ses capteurs sont disponible, il y a ceux purement inertiels

(qui contient uniquement des accéléromètres et des gyroscopes) il possède quatre à six degré de liberté, il y a d'autres qui intègrent en plus des capteurs inertiels un autre type de capteurs (magnétomètre, baromètre, …etc).

Il faut noter aussi qu'il existe sur le marché des IMU dotés d'un microcontrôleur qui assure le traitement et la communication, mais ils sont plus chers.

La figure II-5 présente quelque modèle d'IMU et de MPU du commerce :

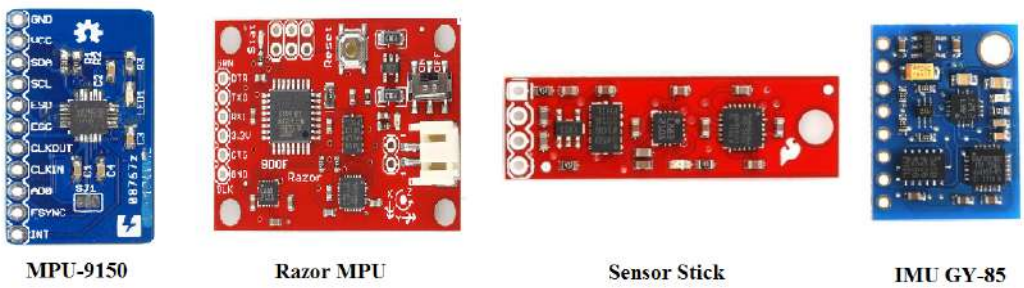



**Figure II.5 :** *quelques stations à 9 degré de liberté*

Le tableau suivant fait une comparaison entre quelques modules IMU qu'on peut trouver dans le marché.

**TableauII.3 :***comparaison entre quelques modules IMU 9 degré de liberté*

| IMU/MPU | Tension d'alimentation | Interface de communication | Axesde mesures | Capteurs élémentaires | prix | dimension |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **GY-85** | 3 -5V | I2C/SPI | 9 axes | -Acc-3 axes<br>-Gyro-3 axes<br>-Compass-3 axes | 9 $ | 22 x 17mm |
| **RAZOR IMU** | 2.4 - 3.6V | / | 9 axes | -Acc-3 axes<br>-Gyro-3 axes<br>-Compass-3 axes | 87 $ | 28x41mm |
| **MPU-9150** | 2.4 - 3.6V | I2C/SPI | 9 axes | -Acc-3 axes<br>-Gyro-3 axes<br>-Compass-3 axes | 45 $ | 15 x 15 mm |
| **Sensor Stick** | 3.3V | I2C | 9 axes | -Acc-3 axes<br>-Gyro-3 axes<br>-Compass-3 axes | 50 $ | 34x 10 mm |

Parmi les modules IMU qui sont illustrés dans le tableau précédent, nous avons choisi l'IMU GY-85 car non seulement il répond aux exigences de notre projet (faible cout, faible encombrement, …) mais aussi car c'est le seul qu'on a pu acquérir durant le projet. Ce dernier intègre un accéléromètre ADXL345, un gyroscope ITG3200 et un magnétomètre HMC5883L.

### *4.3. L'accéléromètre ADXL345*

Comme son nom l'indique, un accéléromètre mesure l'accélération de l'objet qui le supporte suivant un, deux ou trois axes. Dans son principe physique, un accéléromètre peut être vu comme un corps d'épreuve de masse ***m*** attachée à un ressort de raideur ***k*** (très grande) et que nous cherchons à maintenir en position. Dès qu'une force s'applique sur le boîtier de l'accéléromètre, l'accélération qui en résulte tend à mettre en mouvement le corps d'épreuve et à le déplacer de sa position initiale. La force à appliquer en retour pour maintenir le corps en place (par le ressort) fournit la lecture accéléromètrique. La figure II.6 montre le principe de fonctionnement d'un accéléromètre à un axe.

Le principe de tous les accéléromètres est basé sur la deuxième loi fondamentale de la dynamique de Newton :

$$F = m\,a \qquad \text{(II.3)}$$

(F : étant la force de raideur du ressort, m: la masse d'épreuve (kg) et a : l'accélération de l'objet mobile [m/s$^2$] ou la dérivée seconde de la position).

L'interaction entre la force et l'accélération est réciproque. Puisque :

$$F = k\,x \qquad \text{(II.4)}$$

(k : la constante de raideur du ressort en [N/m] et x : longueur de compression ou de rallongement en [m]). La connaissance du déplacement x de la masse attachée au ressort (ou encore la déformation engendrée par la force F) permet d'en déduire l'accélération par la relation :

$$a = k\,\frac{x}{m} \qquad \text{(II.5)}$$

Ce même système est utilisé lorsqu'il s'agit d'un accéléromètre à deux ou trois axes.

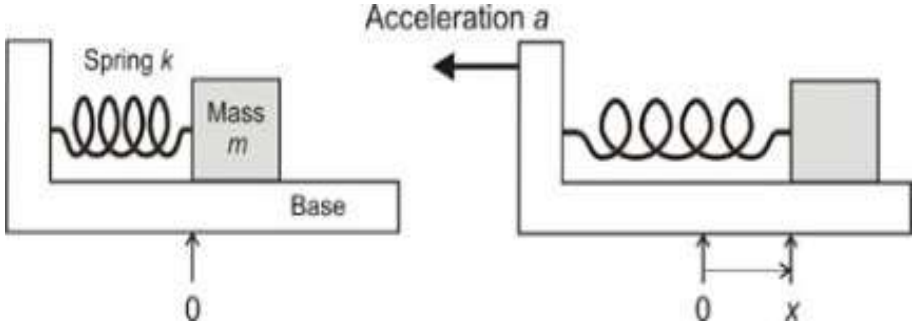



**Figure II.6** : *le principe de fonctionnement d'un accéléromètre*

***Les domaines d'application des accéléromètres***

Les accéléromètres sont utilisés dans beaucoupd'objets du quotidien, sans savoir on utilise des accéléromètres à l'intérieur des différents appareils tel que le disque dur, les automobiles, le gyropode, manette d'une console de jeu, appareil photo numérique, smart phone,… etc.

***•La détection des chocs***

Par exemple dans les automobiles les accéléromètres sont utilisés pour déclencher l'air bag de la voiture lors d'un arrêt brusque. Ils sont utilisés aussi dans le chronomètre du coureur pour mesurer le nombre de pas parcouru par le coureur.

***•La détection de l'orientation d'un objet dans l'espace***

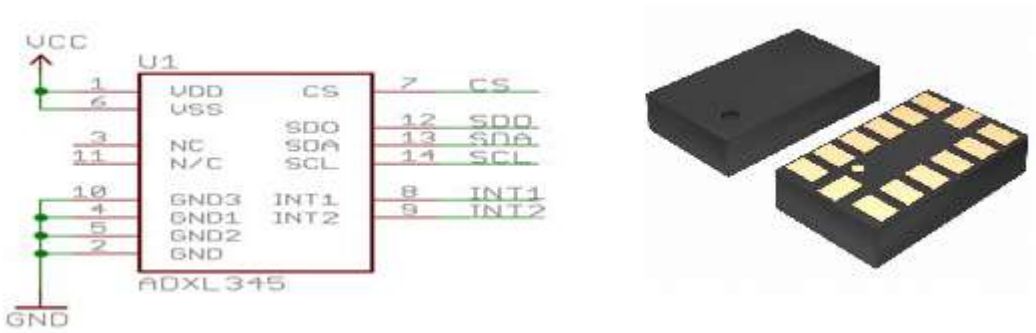
Ces accéléromètres sont intégrés aux téléphones portables puis aux « Smartphones » pour passer l'affichage en mode paysage ou portrait selon la façon dont l'appareil est tenu.

***•La détection de la chute libre***

Cette fonction est utilisé dans les disques durs de l'ordinateur lorsque les trois axes de l'acétomètre tombe à zéro suite à une chute (l'appareil est en apesanteur) le disque dur place les têtes de lecture dans une zone sécurisé pour les protégées du choc induit par la chute.

***L'ADXL345 : c'est*** un système complet à 3 axes de mesure d'accélération avec une plage de mesure configurable de ± 2g, ± 4g, ± 8g, ou de ± 16g (1 g = 9.81 $m/s^2$). Il mesure l'accélération dynamique résultant d'un mouvement ou d'un choc et l'accélération statique, telque la gravité, ce qui permet à l'appareil d'être utilisé comme un capteur d'inclinaison[7]. Il est livré dans un boitier (circuit intégré) miniature de faibles dimensions : 3 x 5 x 1 mm, il a 14-broches, et possède les caractéristiques suivantes :

- Faibles consommation en puisance 23 µA en mode de mesure et 0.1 µA en mode de veille (sous une alimentation typique de 2.5V).
- Une resolution de 10 bits.
- Une resolution selectionnable avec la gamme en g, la resolution peut passer à 13 bits pour une gamme de +/-16g.
- Large gamme de tempeturation de fonctionnement (40°c à 85°c).
- La communication se fait via l'interface numérique SPI (3 ou 4 fils) ou via le bus I2C.




**FigureII.7** ***:*** *L'ADXL345 et son brochage*

Le tableau suivant donne le brochage de l'Adxl 345 :

**TableauII.4 :** *Description des differents broches de l'ADXL345*

| ***N*** | ***mnémonique*** | ***Description*** |
|---|---|---|
| ***1*** | $V_{DD\ I/O}$ | *Interface numérique Tension d'alimentation.* |
| ***2*** | GND | *La masse* |
| ***3*** | RESERVED | *Cette broche doit être reliéé à Vs ou laissée libre* |
| ***4*** | GND | *Cette broche doit être reliée à la masse* |
| ***5*** | GND | *La masse* |
| ***6*** | $V_S$ | *Tension d'alimentation.* |
| ***7*** | CS | *Chip Select* |
| ***8*** | INT1 | *Sortie d' interruption 1* |
| ***9*** | INT2 | *Sortie d' interruption 2* |
| ***10*** | NC | *Non Connecté en interne* |
| ***11*** | RESERVED | *Cette broche doit être reliéé à la terre ou laissée libre* |
| ***12*** | SDO/ALT ADDRESS | *Sortie des données série (SPI 4 fils) / I2C Autre adresse Select (I2C)* |
| ***13*** | SDA/SDI/SDIO | *Ligne de données série (I2C) / entrée de données série (SPI 4 fils) / entrée et sortie de données série (SPI 3 fils).* |
| ***14*** | SCL/SCLK | *L'horloge des ports série, SCL est l'horloge I2C et SCLK est l'horloge SPI* |

Les interfaces de communication numériques I2C et SPI sont disponibles, dans les deux cas, l'ADXL345 fonctionne comme un esclave. Le mode I2C est activé si la broche CS est reliée à la ligne $V_{DD}$ I/O. Dans le mode SPI, la broche CS est commandée par le maître (microcontrôleur). La broche CS doit toujours être reliée soit à $V_{DD}$ I/O ou à un contrôleur externe, car il n'y a pas de mode par défaut si la broche CS n'est pas connectée ceci entraîne une incapacité à communiquer. Notons que dans le cadre de notre projet nous avons exploité seulement l'interface I2C car elle est simple à mettre en œuvre.

En mode I2C, le capteur Adxl 345 nécessite une simple connexion à 2 fils (la ligne SDA et SCL). Il opère suivant deux modes de transfert, le mode de transfert standard (100Khz) et le mode rapide (400Khz). La lecture et l'écriture d'un ou de multiples octets sont pris en charge par la broche d'adresse ***ALT***(Pin 12), à l'état haut, l'adresse I2C 7 bits du dispositif est ***0x1D***, suivi par le bit R/W.Cela se traduit par l'adresse 0x3A pour une écriture et ***0x3B*** pour une lecture. Une adresse I2C alternative : ***0x53*** (suivi par le bit R/W) peut être choisi en mettant la broche ALT à la masse. Cela se traduit par ***0xA6*** pour une écriture et ***0xA7*** pour une lecture.

Le tableau suivant donne les registres internes les plus importants de l'ADXL345

**TableauII.5***: liste des registres de l'ADXL345les plus importants*

| Adresse | | Nom | Type | Reset value | Description |
|---|---|---|---|---|---|
| **Hex** | **Dec** | | | | |
| 0x00 | 0 | DEVID | R | 11100101 | Device ID |
| 0x27 | 39 | ACT_INACT_CTL | R/W | 00000000 | Axis enable control for activity and inactivity detection |
| 0x28 | 40 | THRESH_FF | R/W | 00000000 | Free-fallthreshold |
| 0x29 | 41 | TIME_FF | R/W | 00000000 | Free-fall time |
| 0x2C | 44 | BW_RATE | R/W | 00001010 | Data rate and power mode control |
| 0x2D | 45 | POWER_CTL | R/W | 00000000 | Power-savingfeatures control |
| 0x2E | 46 | INT_ENABLE | R/W | 00000000 | Interruptenable control |
| 0x2F | 47 | INT_MAP | R/W | 00000000 | Interruptmapping control |
| 0x30 | 48 | INT_SOURCE | R | 00000010 | Source of interrupts |
| 0x31 | 49 | DATA_FORMAT | R/W | 00000000 | Data format control |
| 0x32 | 50 | DATAX0 | R | 00000000 | X-Axis Data 0 |
| 0x33 | 51 | DATAX1 | R | 00000000 | X-Axis Data 1 |
| 0x34 | 52 | DATAY0 | R | 00000000 | Y-Axis Data 0 |
| 0x35 | 53 | DATAY1 | R | 00000000 | Y-Axis Data 1 |
| 0x36 | 54 | DATAZ0 | R | 00000000 | Z-Axis Data 0 |
| 0x37 | 55 | DATAZ1 | R | 00000000 | Z-Axis Data 1 |
| 0x38 | 56 | FIFO_CTL | R/W | 00000000 | FIFO control |
| 0x39 | 57 | FIFO_STATUS | R | 00000000 | FIFO status |

Dans la programmation de notre application et l'exploitation du capteur ADXL345, seuls quelques registres ont été utilisés,nous présontons dans ce qui suitces registres utilisés :

***Le registre0:*** *Register 0x00—DEVID (Read Only)*

C'est un registre a 8 bits (1 octet) qui contient un code fixe du dispositif ADXL345 (0xE5 ou 229 en décimal). Ce code peut être changé en écrivant dans le registre lorsqu'on a deux capteurs ADXL345 différents qui communiquent avec un maitre.

***Les registers 30 à 32:*** *Register 0x1E, Register 0x1F, Register 0x20—OFSX, OFSY, OFSZ*
Ces registres sont utilisés pour l'étalonnage (élimination de l'offset) des du capteur, les valeurs stockées dans ces registres sont automatiquement ajouté aux données de l'accélération et la valeur résultante est stockée dans le registre de sortie de données.

***Le register 45:*** *Register 0x2D—POWER_CTL (Read/Write)*

Ce registre permet notamment la sélection du mode mesure ou de mettre le capteur en mode veille pour réduire la consommation d'énergie.

***Registre49 :*** *Register 0x31—DATA_FORMAT (Read/Write)*ce registre controle la présentation des données presents dans les registres data qui vont suivres notament le choix de la gamme de mesure. L'ADXL345 a differentes gammes de mesure possibles dont le choix est en fonction de l'application qu'on veut réaliser. Le tableau qui suit illustre quelques appilcations des accelerometre en fonction de la gamme de mesure.

**TableauII.6 :** *Gamme de mesure de l'accelerometre et les applications correspondantes*

| **Plage de mesure** | **Application** |
|---|---|
| 1g | Accélération exercée par le champ de gravité terrestre sur les objets ou personnes |
| 0 - 2g | Domaine d'expérimentation de l'accélération des personnes lors de la marche |
| 10 - 50g | Tests d'accélération sur les crashes typiques d'automobiles |
| 100 – 2000g | Tests de chutes libres d'une hauteur de 3 pieds sur un planché en béton |
| 50000g | Test d'accélération de projectile de canon |

Dans notre application, nous avons configuré notre capteur pour une gamme de mesure de +/-2g ce qui est suffisant pour la mesure de l'inclinaison puisque nous allons mesurer l'acceleration terrestres qui ne depasse pas 1g.

**Le registre 50 à 55** *: DATAX0, DATAX1, DATAY0, DATAY1, DATAZ0, DATAZ1 (Read Only)***,** Ces six registres contiennent les données ralative à l'accélération sur chaque axes du capteur, les registres 50 et 51 contiennent l'accélération sur l'axe X, les registre 52 et 53 contiennent l'accélération sur l'axe Y et en fin les registres 54 et 55 contiennent l'accélération sur l'axe Z, les données sont représentées en complement à 2 ( l'octet data0 est le poid le plus faible et l'octet data1 est le poid le plus fort). Les valeurs des axes X, Y et Z sont calculées en concaténant les données des deux octets avec un decalage à gauche de 8 bit de l'octet de poids fort. Les valeurs fournissent par ces registres doivent etre convertie en accélérations en [g] en utilsant la formule suivante :

$$Acc=acc_data_output/sensilibité \qquad \text{(II.6)}$$

ou **acc_data_output** est la valeur numérique fournit par le capteur et la **sensibilté** depend de la gamme de mesure. Par exemple :

- Une gamme +/-2g correspond à une senbilité de 256 LSB/g ;
- Une gamme +/-4g correspond à une senbilité de 128 LSB/g ;
- Une gamme +/-8g correspond à une senbilité de 64 LSB/g ;
- Une gamme +/-16g correspond à une senbilité de 32 LSB/g.

### *4.4. Le gyroscope ITG3200*

Un gyroscope permet de maintenir ou de mesurer une direction d'après le principe de conservation du moment angulaire. Un gyroscope est composé d'un rotor tournant autour d'un axe monté sur un anneau intérieur tournant sur un axe perpendiculaire au précédent lui-même monté sur un anneau extérieur dont l'axe de rotation est perpendiculaire aux 2 précédents.La figure II.8 montre un gyroscope et montre ses axes de rotation :

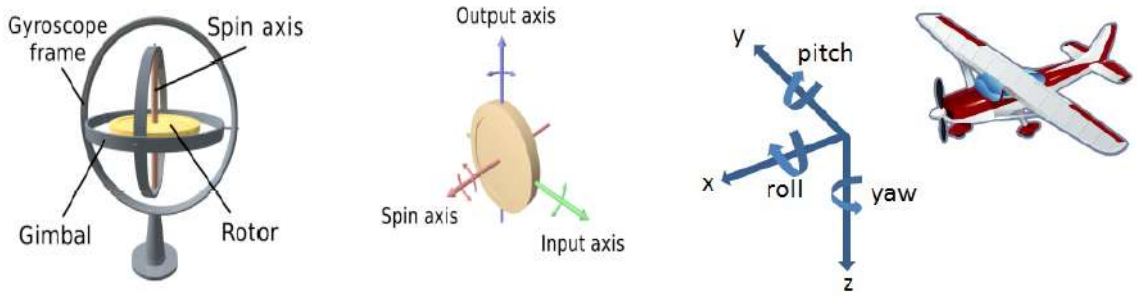



**Figure II.8 :** *Le Gyroscopeet ses axes de rotation*

Le moment du gyroscope est fourni par un couple de forces : la gravité pousse vers le bas le centre de la masse tandis qu'une force égale la pousse vers le haut. Le déplacement résultant n'est pas vers le bas comme nous pourrions le supposer mais perpendiculaire à la fois à son poids et à l'axe de rotation c'est à dire dans la direction horizontale.
L'équation fondamentale qui décrit le mouvement est :

$$\boldsymbol{\tau = \frac{dL}{dt} = \frac{d(I_\omega)}{dt} = I_\alpha} \text{(II.7)}$$

Où τ est le moment du gyroscope et L le moment cinétique, le scalaire I est le moment d'inertie, le vecteur ω est la vitesse angulaire et α l'accélération angulaire. Ceci est analogue à la loi de Newton F = ma pour le mouvement rectiligne. [3]

Un gyroscope se retrouve dans de nombreuses applications : les objets comme les vélos ou les toupies ou l'effet gyroscopique permet de maintenir l'objet en équilibre, les compas gyroscopiques qui remplacent ou complètent les boussoles magnétiques utilisées dans les navires et les aéronefs par exemple pour le pilotage automatique. La station russe Mir utilisait 11 gyroscopes pour garder son orientation vers le soleil etle télescope spatial Hubble a aussi utilisé des gyroscopes pour maintenir son orbite autour de la Terre. Les gyroscopes servent aussi à stabiliser les images dans les caméras, les appareils photo ou les jumelles lors de prises de vues en hélicoptère ou en bateau par exemple.

***L'ITG3200 :*** C'est un capteur gyroscopique MEMS (Micro-Electro-Mecanical-System) à 3 axes optimisé pour les jeux, les souris 3D et pour les applications 3D de contrôle à distance [8].Pour une plus grande souplesse d'alimentation, l'ITG-3200 offre une broche de référence VLOGIC séparée en plus de sa broche d'alimentation analogique, qui fixe les niveaux de son interface I2C logiques. La tension VLOGIC peut être n'importe où de 1.71V min à VDD max. cette tension est toujours inferieur ou égale à VDD. La figure suivante montre à quoi ressemble le capteur gyroscope ITG3200.




**Figure II.9 :***Ll'ITG3200*

Il est caractérisé par :

- Des sorties numériques : X, Y, et Z- ;
- Un filtre passe-bas Numérique programmable ;
- Une faible consommation de courant 6,5 mA et un courant de veille : 5uA ;
- Une large plage de tension d'alimentation $V_{DD}$ de 2,1 à 3,6 V ;
- Un capteur de température à sortie numérique intégré ;
- Une interface de communication série I2C en mode rapide (400kHz) ;
- Une entrée d'horloge externe en option de 32,768 kHz ou 19.2MHz à synchroniser avec l'horloge système ;
- Une plage de mesure allant jusqu'à +/- 2000 °/s.

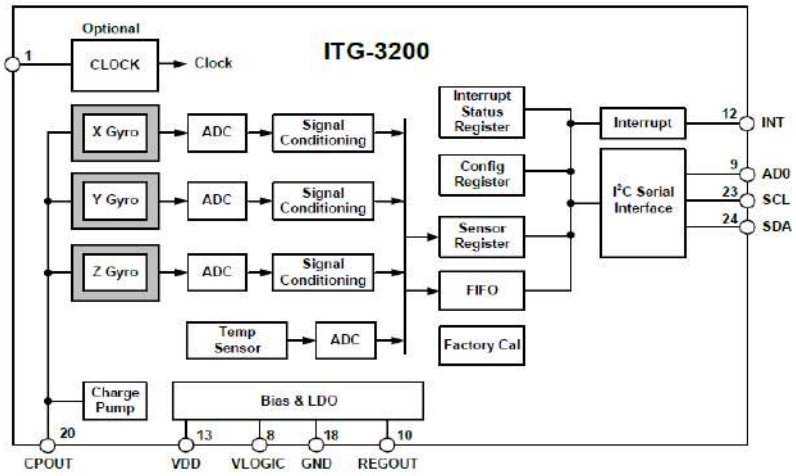



**Figure II.10:** *Structure interne de l'ITG3200*

L'ITG3200 intègre trois structures vibrantes independamant l'une de l'autre, ces structures detectent une rotation autour de l'axe X (roll), Y (pitch) et Z (yaw). Lorsque le gyroscope ne tourne autour d'aucun de ses axes, l'effet de coriolis produit une deflection qui est detectée par un condensateur de pickoff. Le signal resultant est amplifié, demodulé et filtré pour produire une tension proportionnelle à l'angle de rotation. Cette tension est numerisée en utilisant des convertisseur analogique-numérique séparés pour chaque axe.

- ***Interface de communication serie I2C***

L'ITG3200 communique avec un microcontrolleur via une interface serie I2C, et le dispositif agit toujour comme un esclave dans une communication avec un microcontrolleur. Le niveau logic pour une communication avec le maitre est fixépar la tension de la broche VLOGIC.

- ***Les registres de données du capteur***

Les registres de données contiennent les derniers octets de données du gyroscope et de la temperature, ce sont des registres qui peuvent etre lus uniquement et sont accessibles via l'interface I2C. les données de ces registes doivent etre lu en temps réel, cependant, la fonction d'interruption peut etre utilisée pour determiner quand une nouvelle donnée est disponible.

- ***Polarisation et LDO***

Les sections de polarisation et LDO prennent une alimentation VDD non réglementée entre 2,1 V à 3,6 V et génèrent l'alimentation interne et les tensions et courants de références requis par l'ITG -3200. La sortie LDO est retournée via un condensateur à REGOUT. En outre, le dispositif a une tension de référence qui fixe les niveaux de tension logiques VLOGIC pour son interface I2C.

L'ITG3200 dispose uniquement une interface numérique I2C contrairement a l'ADXL345

**TableauII.7** *: Les broches necessaires pour la connection du capteur sur le bus I2C*

| Numero de la broche | Nom de la broche | Description |
|---|---|---|
| **8** | VLOGIC | Tension d'entrée-sortie numerique tourjour inferieure ou égale $V_{DD}$ |
| 9 | AD0 | LSB de l'adresse du l'esclave de la communication I2C |
| 23 | SCL | L'horloge série |
| 24 | SDA | Les données séries |

L'ITG- 3200 fonctionne toujours comme un dispositif esclave lors de la communication avec le processeur, qui joue ainsi le rôle du maître. Les lignes SDA et SCL doiventêtre liées à des résistances de pull-up. La vitesse maximale du bus est 400kHz.

L'adresse de l'ITG-3200 est *b110100X* (7 bits). Le bit le moins significatif de l'adresse est déterminé par le niveau logique sur la broche 9. Ceci permet à deux dispositifs ITG- 3200 d'être interconnectés au même bus I2C. Quand ils sont utilisés dans cette configuration, l'adresse de l'un des dispositifs doit être *b1101000* (broche 9 à l'état logique bas) et l'adresse de l'autre devrait être *b1101001* (broche 9 à l'état logique haut). L'adresse I2C est stockée dans le registre 0 (registre WHO_AM_I).

Le tableau suivant donne les registres internes les plus importants de l'ITG3200 :

**Tableau II.8** *: liste des registres de l'ITG3200*

| Adressehex | Adressedécimale | Nom du Registre | R/W |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | WHO_AM_I | R/W |
| 15 | 21 | SMPLRT_DIV | R/W |
| 16 | 22 | DLPF_FS | R/W |
| 17 | 23 | INT_CFG | R/W |
| 1A | 26 | INT_STATUS | R |
| 1B | 27 | TEMP_OUT_H | R |
| 1C | 28 | TEMP_OUT_L | R |
| 1D | 29 | GYRO_XOUT_H | R |
| 1E | 30 | GYRO_XOUT_L | R |
| 1F | 31 | GYRO_YOUT_H | R |
| 20 | 32 | GYRO_YOUT_L | R |
| 21 | 33 | GYRO_ZOUT_H | R |
| 22 | 34 | GYRO_ZOUT_L | R |
| 3E | 62 | PWR_MGM | R/W |

**Le registre 0** (le registre « WHO_AM_I ») contient l'adresse uniquesur 7 bits qui permet d'identifier le dispositif sur le bus I2C. Cette adresse peut être changée en écrivant dans le registre.

**Les registres 1 à 20** ne sont pas utilisés.

**Le registre 21** (registre « SMPLRT_DIV) permet de sélectionner le débit des échenillons à livrer aux différents registres du capteur.

Les sorties du gyro sont échantillonné et filtrées numériquement puis délivrée aux registres du capteur. Cette fréquence se calcul par la formule suivante :

$$F_{sample} = F_interne / (divider + 1) \quad \text{(II.8)}$$

Dans le cas de notre projet on a choisi un F_ineterne=1kHz et le divider=9, ce qui donne un débit de 100Hz.

**Le registre 22** contient deux champs : le champ FS_SEL qui permet la sélection la gamme de mesure, dans notre cas, on travaille en plein échelle c'est-à-dire +/- 2000°/s, car les autres gammes sont réservées et le champ DLPF_CFG qui est utilisé pour la sélection de la fréquence d'échantillonnage interne (F_ineterne) définie plus haut.

**Les registres 29 à 34** contiennent les six octets de données des trois axes dudispositif ITG3200. Deux octets sont concaténés pour pouvoir lire la valeur de la vitesse de rotation d'un axe donné, de ce fait les octets 0 et 1 représente l'axe X, les 2 et 3 l'axe Y, et les deux derniers représente l'axe Z. Les valeurs fournis par ces registres ne sont pas en degré par seconde (°/s). On utilise la formule suivante pour la conversion des données en (°/s)

$$gyroX = (gyro_data_X - offset_X) / sensibilité \quad \text{(II.9)}$$

La sensibilité est donnée en (LSB/°/s). On peut avoir besoins de l'offset (ZeroRate) qui correspond à la valeur fournit par le dispositif ITG3200 lorsqu'aucun mouvement de rotation n'est effectué.

### *4.5. Le magnétomètre HMC5883L*

Le compas ou magnétomètre est un capteur qui indique une référence de direction dans le plan horizontal par rapport au cap de l'objet sur lequel il est fixé, et permet ainsi de connaître l'angle de lacet par rapport à la direction de référence qui peut être le nord magnétique, souvent confondu avec le nord géographique. Il existe différentes technologies de compas, dont :

• Le compas magnétique encore appelé magnétomètre, fonctionne sur le principe de la boussole dont l'orientation dépend des lignes du champ magnétique terrestre. Toutefois, la mesure absolue du cap de l'objet a pour référentiel le nord géographique qui ne coïncide pas avec l'axe du nord magnétique (phénomène de déclinaison magnétique). Il faut donc compenser la déclinaison magnétique selon la position de l'appareil à la surface du globe.

• Le compas électronique basé soit sur l'effet Hall, ou bien la magnéto résistivité ou encore le principe dit « fluxgate ». Tous exploitent le principe de magnéto conductivité. Les compas « fluxgate » mesurent la projection du champ magnétique terrestre sur un axe.

Deux dispositifs « fluxgate » permettent de déterminer la valeur absolue de l'azimut, sans considérer la valeur du champ magnétique par rapport à l'axe vertical. Leur conception rigide les rend insensibles aux chocs et aux vibrations par rapport au compas magnétique classique pendulaire.

***LeHMC5883L***

C'est un magnétomètre numérique à 3 axes conçu pour détection du champ magnétique terrestre. Le capteur a une plage pleine échelle de ± 8 Gauss et une résolution maximale de 5 milli-Gauss. [9]

La communication avec le HMC5883L est simple à travers une interface I2C.




**Figure II.11 :** *Le magnétomètre HMC5883L*

Ce magnétomètre est caractérisé par :

- Une gamme de mesure pleine échelle de +/- 8 Gauss ;
- Tension d'alimentation allant de 2,16 à 3,6 V avec une faible consommation 100 µA ;
- Interface de communication numérique I2C ;
- Un débit de sortie maximal de 160 Hz.

Le control de ce dispositif est assuré via le bus I2C. L'HMC5883L est connecté sur ce bus en tant qu'un esclave sous le contrôle d'un maitre tel qu'un microcontrôleur. En tant que dispositif compatible I2C, l'HMC5883L possède aussi une adresse sur 7 bits et supporte le mode de transfert standard et rapide 100KHz et 400KHz respectivement. Des Résistances de pull-up sont nécessaires pour supporter ces deux modes. Pour éviter de mettre le maitre en attente, certaine priorité sont données aux activités du maitres (lecture et l'écriture) sur celles de l'esclave (activités internes tel que les mesures)

Le tableau suivant présente les registres de l'HMC5883L les plus importants :

**TableauII.9 :** *liste des registres de l'HMC5883L*

| Adresse | Nom du registre | Accès |
|---|---|---|
| 00 | Configuration Registre A | Read/Write |
| 01 | Configuration Registre B | Read/Write |
| 02 | Mode Registre | Read/Write |
| 03 | Data Output X MSB Register | Read |
| 04 | Data Output X LSB Register | Read |
| 05 | Data Output Z MSB Register | Read |
| 06 | Data Output Z LSB Register | Read |
| 07 | Data Output Y MSB Register | Read |
| 08 | Data Output Y LSB Register | Read |
| 09 | RegistreStatus | Read |
| 10 | RegistreIdentification A | Read |
| 11 | RegistreIdentification B | Read |
| 12 | registreIdentification C | Read |

***Remarque :*** dans le tableau ci-dessus, noter bien l'odre de lectures des octets de donneés pour les axes X,Y et Z. L'axe X est lus en premier suivi de l'axe Z au lieu de l'axe Y. On a aperçu ce problème lors du calul de l'azimut dans la partie programmtion.

***Le registre à l'adresse (00)*** est utilisé pour configurer le capteur pour la représentation des données de sorties mais aussi pour la sélection du mode de mesure. Ce registre contient huit bits à partir de CRA7 jusqu'à CRA0. Le premier bit le plus à gauche n'est pas utilisé, les deux qui suivent représente le nombre d'échantillon moyen par mesure, en suite les trois bits à partir de DO2 à DO0 pour le débit de données de sortie et le deux derniers permet le choix du mode de mesure.

***Le registre d'adresse (01)*** permet la sélection du gain de l'appareil, celle-ci nécessite seulement trois bitsà partir de GN2 jusqu'à GN0. Le tableau II.10montre le gain correspondant pour chaque combinaison des trois bits

**Tableau II.10 :** *les gains de l'HMC5883L avec la combinaison correspondante*

| GN2 | GN1 | GN0 | Plage de capture du champ | Gain (LSB/Gauss) |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | ± 0.88 Ga | 1370 |
| 0 | 0 | 1 | ± 1.3 Ga | 1090 (valeur par défaut) |
| 0 | 1 | 0 | ± 1.9 Ga | 820 |
| 0 | 1 | 1 | ± 2.5 Ga | 660 |
| 1 | 0 | 0 | ± 4.0 Ga | 440 |
| 1 | 0 | 1 | ± 4.7 Ga | 390 |
| 1 | 1 | 0 | ± 5.6 Ga | 330 |
| 1 | 1 | 1 | ± 8.1 Ga | 230 |

***Le registre d'adresse (02)*** ou ***registre mode*** permet le choix du mode de fonctionnement de l'appareil. Il s'agit d'un registre de 8 bits. Les six premiers bits sont à négliger, les deux derniers forme une combinaison de quatre mots de deux bit et permettent le choix du mode de fonctionnement comme indiqué dans le tableau II.11

**Tableau II.11 *:*** *les modes de mesure*

| MD1 | MD0 | Mode d'opération |
|---|---|---|
| 0 | 0 | ***Mode de mesure continue*** |
| 0 | 1 | ***Mode de mesure simple*** (mode par défaut). |
| 1 | 0 | ***Mode veille*** |
| 1 | 1 | ***Mode veille*** |

***Les registres (03)*** au ***registre (08)*** contiennent les données brutes des différents axes du capteur magnétique. Pour convertir les données du magnétomètre en gauss, on utilise le facteur gain mentionné plus haut, pour ce faire on utilise la formule suivante :

$$\text{magneto_x (gauss)} = (\text{magnetometer_data (0)})/\text{gain} \qquad \text{(II.10)}$$

$$\text{magneto_y (gauss)} = (\text{magnetometer_data (1)})/\text{gain} \qquad \text{(II.11)}$$

$$\text{magneto_z (gauss)} = (\text{magnetometer_data (2)}) / \text{gain} \qquad \text{(II.12)}$$

Avec : magnetometer_data (0), magnetometer_data (1) et magnetometer_data (2) sont les données délivrées par les sorties du capteur magnétique.

### *4.6.Le Bus I2C (Inter Integrated Circuit)*

Le bus I2C a été développé au début des années 80 par Philips Semi-conducteurs pour permettre de relier facilement à un microprocesseur les différents circuits d'un téléviseur moderne.Le bus I2C permet de faire communiquer divers composants électroniques entre eux en utilisant seulement trois fils : un signal de données/adresses (SDA), un signal d'horloge (SCL) et un signal de référence électrique (masse).

Ceci a permet de réaliser des équipements ayant des fonctionnalités très puissantes (en apportant toute la puissance des systèmes micro programmés) tout en conservant un circuit imprimé très simple par rapport à un schéma classique (8 bits de données, 16 bits d'adresse + les bits de contrôle).

Les données sont transmises en série à 100 Kbits/s en mode standard et jusqu'à 400 Kbits/s en mode rapide. Ce qui ouvre la porte de cette technologie à toutes les applications où la vitesse n'est pas un facteur primordial.

De nombreux fabricants ayant adopté ce bus, la variété des circuits disponibles disposant d'une liaison I2C est énorme : ports d'E/S bidirectionnels, convertisseurs A/N et N/A, mémoires (RAM, EPROM, EEPROM,...), circuits audio (égaliseur, contrôle de volume,...) et autre drivers (LED, LCD,...).Le nombre de composants qu'il est ainsi possible de relier est essentiellement limité par la charge capacitive des lignes SDA et SCL à 400 pF.

***Principe***

Afin de d'éviter les conflits électriques, les Entrées/Sorties SDA et SCL sont de type "collecteur ouvert".Voici un schéma de principe :

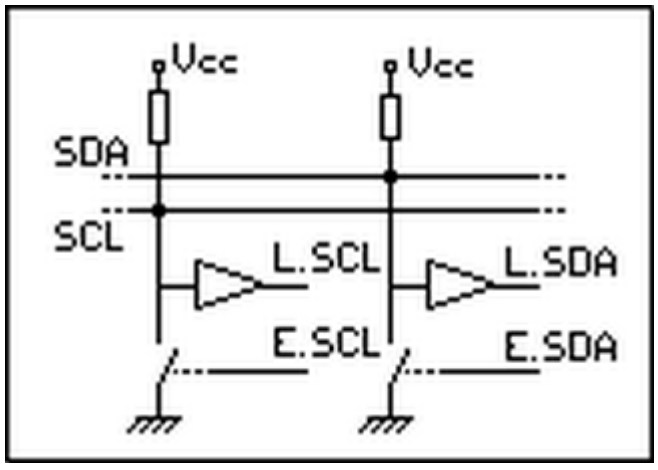



**Figure II.12 :** *Structure d'E/S d'un module I2C*

***Le protocole I2C***

Comme plusieurs circuits peuvent être branchés en même temps sur le même bus, il a été nécessaire d'instaurer un protocole de communication entre eux, afin d'éviter les problèmes dus à une prise de parole simultanée de différents modules. C'est le protocole I2C. Celui-ci définit la succession des états logiques possibles sur SDA et SCL, et la façon dont doivent réagir les circuits en cas de conflits.

***Prise de contrôle du bus***

Pour prendre le contrôle du bus, il faut que celui-ci soit au repos (SDA et SCL à '1'). Pour transmettre des données sur le bus, il faut donc surveiller deux conditions particulières : la condition de départ (SDA passe à '0' alors que SCL reste à '1') et la condition d'arrêt (SDA passe à '1' alors que SCL reste à '1').

Lorsqu'un circuit prend le contrôle du bus après avoir vérifié qu'il était pris, il en devient le maître. C'est lui qui génère alors le signal d'horloge.

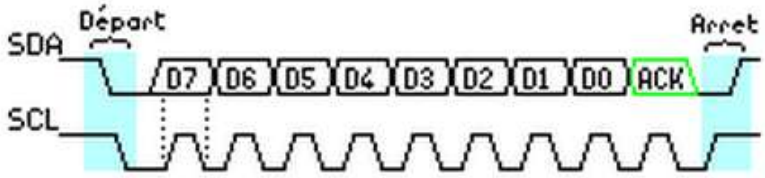



**Figure II.13 :***Exemple des conditions de départ et d'arrêt*

***Transmission d'un octet***

Après avoir imposé la condition de départ, le maître applique sur SDA le bit de poids fort D7. Il valide ensuite la donnée en appliquant pendant un instant un niveau '1' sur la ligne SCL. Lorsque SCL revient à '0', il recommence l'opération jusqu'à ce que l'octet complet soit transmis. Il envoie alors un bit ACK à '1' tout en scrutant l'état réel de SDA. L'esclave doit alors imposer un niveau '0' pour signaler au maître que la transmission s'est effectuée correctement. Les sorties de chacun étant à "collecteur ouvert", le maître voit le '0' et peut alors passer à la suite.

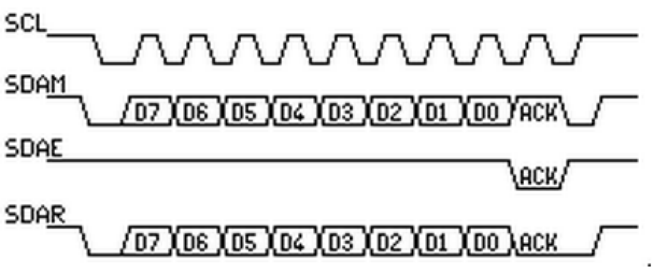



**Figure II.14** *: Exemple de transmission réussie*

Dans cet exemple : SCL (horloge imposée par le maître), SDAM (niveaux de SDA imposés par le maître), SDAE (niveaux de SDA imposés par l'esclave), SDAR (niveaux de SDA réels résultants).

***Transmission d'une adresse***

Le nombre de composants qu'il est possible de connecter sur un bus I2C étant largement supérieur à deux, il est nécessaire de définir pour chacun une adresse unique. L'adresse d'un circuit, codée sur sept bits, est définie d'une part par son type et d'autre part par l'état appliqué à un certain nombre de ses broches. Cette adresse est transmise sous la forme d'un octet au format particulier.

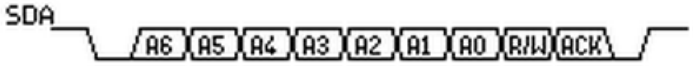



**Figure II.15** *: Exemple d'octet d'adresse*

On remarque ici que les bits D7 à D1 représentent les adresses A6 à A0, et que le bit D0 est remplacé par le bit de R/W qui permet au maître de signaler s'il veut lire ou écrire une donnée. Le bit d'acquittement ACK fonctionne comme pour une donnée, ceci permet au maître de vérifier si l'esclave est disponible.

***Ecriture d'une donnée***

L'écriture d'une donnée par le maître ne pose pas de problème particulier :

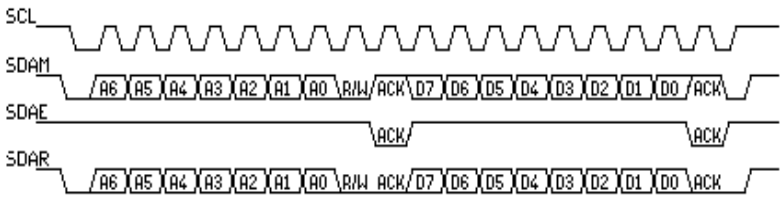



**Figure II.16** *: Exemple d'écriture d'une donnée*

***Cas particulier d'utilisation d'ACK***

L'écriture d'un octet dans certains composants (mémoires, microcontrôleur,...) peut prendre un certain temps. Il est donc possible que le maître soit obligé d'attendre l'acquittement ACK avant de passer à la suite.

***Lecture d'une donnée***

La lecture d'une donnée par le maître se caractérise par l'utilisation spéciale qui est faite du bit ACK. Après la lecture d'un octet, le maître positionne ACK à '0' s'ilveut lire la donnée suivante (cas d'une mémoire par exemple) ou à '1' le cas échéant. Il envoie alors la condition d'arrêt.

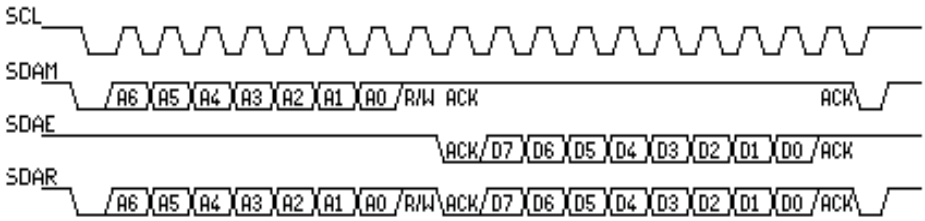



**Figure II.17** *: Exemple de lecture d'une donnée*

### *4.7 Module de communication Bluetooth*

Il existe plusieurs modules pour la communication série entre un module Bluetooth et un microcontrôleur. Ces modules sont généralement des produits comme les : HC-03, HC-04, HC-05, HC-06, HC-07, HC-08 et HC-09. Les deux premiers (HC-03, HC-04) sont des versions industrielles alors que les deux qui leurs suivent (HC-05, HC-06) sont leurs versions commerciales correspondant. Quantaux autres, ils sont d'autres versions commerciales de la même famille. HC-05 et HC-06 sont deux modules ayant le même hardware (matérielle informatique) mais c'est les firmeware (ou microprogramme) qui diffèrent. De plus le HC-05 peut fonctionner comme maitre ou comme esclave à la foi dans une communication avec un microcontrôleur alors que l'HC-06 ne fonctionne qu'en esclave. Dans notre application, nous avons utilisé un module HC-05.




**FigureII.18** :Le *module Bluetooth HC-05*

Ce module Bluetooth est caractérisé par :

- Une fréquence de travail est de 2.4GHz ;
- Une modulation de type GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying);
- Une puissance d'émission inférieure à 4dBm ;
- Un débit : allant de 160à 2100 kb/s en mode asynchrone et 1Mb/s en mode synchrone ;
- Une alimentation en 3.2V continu avec une consommation de 50mA ;
- De faibles dimensions : 26.9 x 13 x 2.2 mm.

La figure suivante présente le schéma de câblage de ce module :

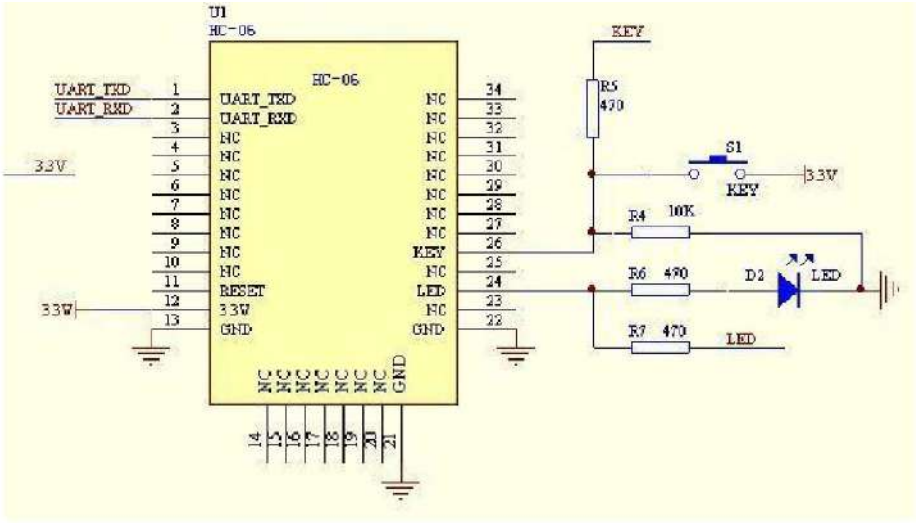



**Figure II.19 :***schémade câblage du HC-05*

Le tableau suivant donne les fonctions des broches les plus importantes du module HC-05 :

**Tableau II.12**: *la description des broches du module HC-05*

| Broches | Description |
|---|---|
| 1 | UART_TXD : broche de transmission série du signal, elle se connecte avec la broche RXD du microcontrôleur ; |
| 2 | UART_RXD : broche de réception série du signal Bluetooth, elle est connectée à la broche TXD du microcontrôleur ; |
| 11 | RESET : broche de mis à zéro, lors que le module est en utilisation, cette broche est mise à la masse |
| 12 | VCC : d'alimentions 3.3V en standard mais peut fonctionner dans la plage 3.0-4.2V |
| 13 | GND |
| 31 | Cette broche est connectée à une LED, lorsque le module est mis sous tension, la LED clignote. Selon la fréquence de clignotement on peut distinguer le mode de fonctionnement. |
| 32 | PIO9 Connectée aussi à une LED, elle indique si la connexion est établie ou non. Lors que le Bluetooth est apparié, la LED s'allume et cela signifie que la connections est établi avec succès. |
| 34 | La broche PIO11 commutateur du mode de fonctionnement. Lors que cette broche est mise à l'état haut, le mode de fonctionnement devient le mode ordre-réponse. Lorsqu'elle est au niveau bas ou laissé en l'air, le mode devient le mode de connections automatique. |

## 5. Schéma électrique de la station inertielle

Le schéma électrique est réalisé autour d'un module Arduino Nano qui joue le rôle d'un microcontrôleur connecté avec un module IMU GY-85 et un module Bluetooth HC-05.

La connexion entre le module Arduino et la station IMU se fait à travers 4 fils, deux fils pour la communication avec le bus I2C, un fil d'alimentation et un fil de masse. La broche analogique A5 de l'Arduino est connecté à la broche de données série de la station IMU et la broche analogique A4 est reliée à la broche d'horloge série de l'IMU. Les fils de masse et de l'alimentation de part et d'autre sont connectés entre eux.

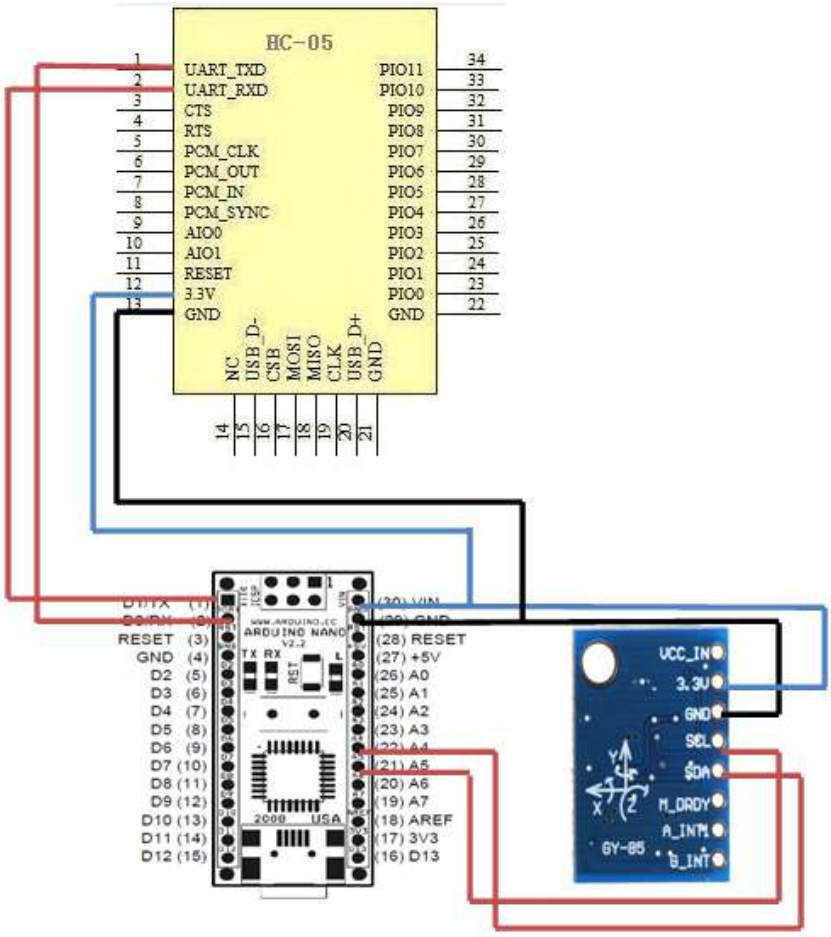



**Figure II.20***schéma d'assemblage de la station inertielle*

Quant à la connexiond'Arduino au module HC-05, elle nécessite quatre fils, la broche UART-TXD du HC-05 est connectéeà la broche D1/RX de l'Arduino et la broche UART-RXD du HC-05 est connectée à la broche D0/TX de l'Arduino ainsi que la broche d'alimentation (3.3V et GND).Une alimentation de 5V est prévue pour mettre sous tension l'ensemble du système (IMU, Module HC-05 et Arduino).

Pour ce faire, on a pensé à utiliser deux batteries de téléphone portable de 3.7V chacune, assemblées en série elles constituent une source de7.4 V et comme la station ne nécessite que 5V, il faudra donc penser à un régulateur pour ramener cette tension a 5V comme le montre la Figure II.21.

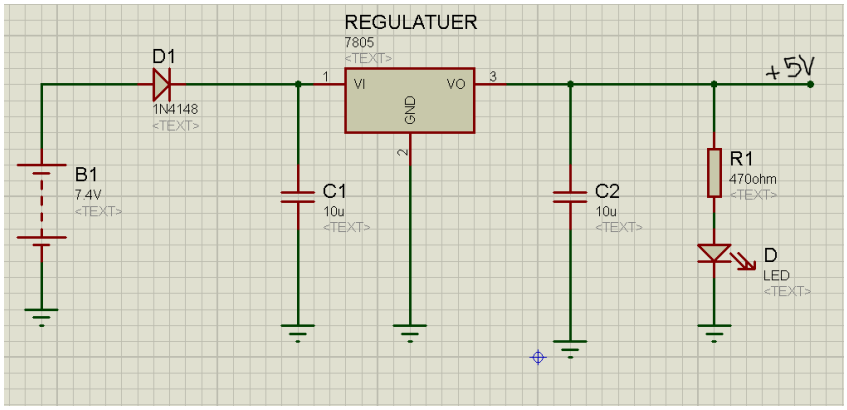



**Figure II.21***L'alimentation du système*

**B. Partie software**

Dans ce qui suit nous présentons les organigrammes généraux des fonctions, des sous programmes et du programme principal de notre application afin de décrire les différentes étapes de calculs nécessaires pour le fonctionnement de la station.

**6. L'organigramme du programme principal**

Le programme principale commence par l'initialisation de tous les variables et constantes utilisées puis on initialise le port série a une vitesse de transmission de 9600 baud dans la partie setup du programme et en fin dans la dernière partie du programme qui présente une boucle qui s'exécute sans fin (boucle loop). Dans cette boucle, nous exécutant une série d'instructions de manière infinie pour réaliser des mesures en continues, par appel aux fonctions de lecture des six octets des différents capteurs (read_ADXL345, read_ITG3200, et read_HMC5883L), à partir de ces valeurs lues, on calcul les accélérations sur les axes X, Y et Z en g en utilisant l'équation(II.6), de même pour les deux autres capteurs, on convertie les valeurs lues sur les sorties du gyroscope (en °/s) et les sorties du compas (en Gauss) via les équations suivantes (II.9) et (II.10, II.11, II.12) respectivement.

On determine le roll et pitch qui decrivent l'inclinaison autour des axes X et Y a partir des données de l'acceleration et on combine avec le roll et le pitch calculer via le gyroscope par une simple integration de la sotie du gyroscope en utilisant un filtre de kalman.

Ces deux données issue de la sortie du filtre seront utiliser pour compenser l'inclinaison dans le calcul de l'azimut.

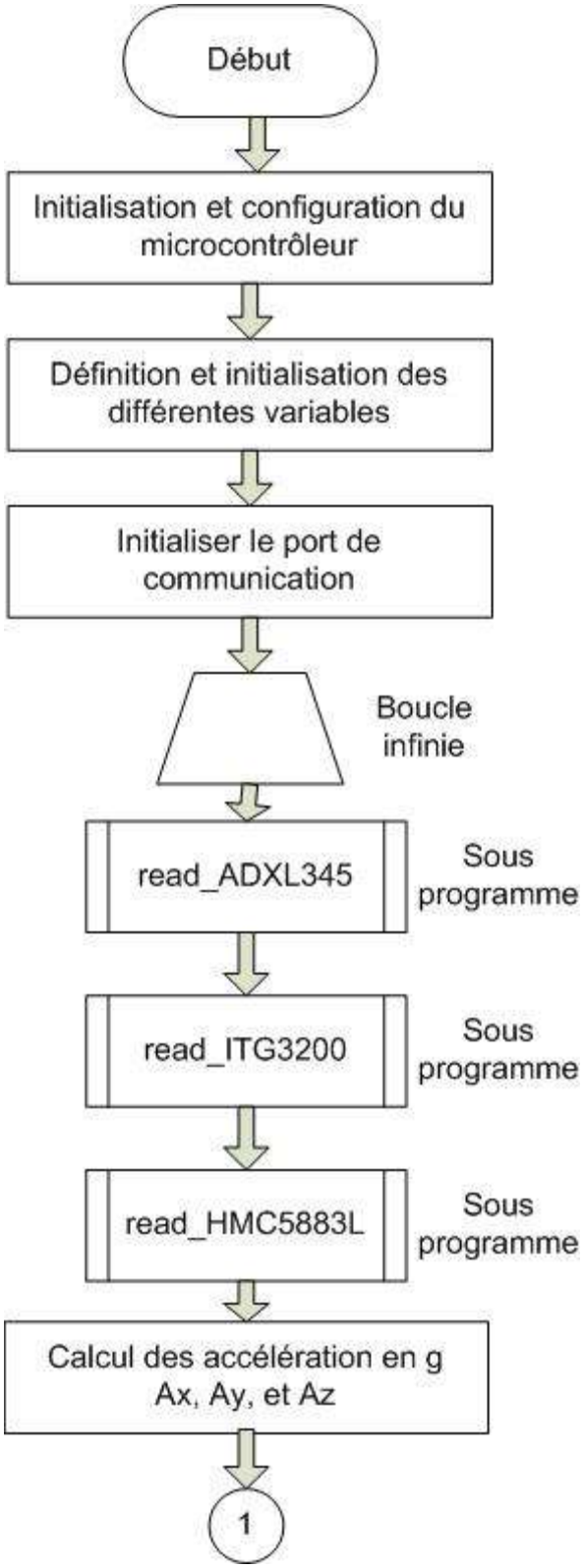





**Figure II.22***L'organigramme du programme principal*

### 7. L'organigramme du sous-programme read_ADXL345

Ce sous-programme permet de lire les six octets de données de l'accéléromètre et les stockent dans un vecteur de données, ensuite on concatène chaque deux octets pour calculer l'accélération sur l'axe X, Y et Z.

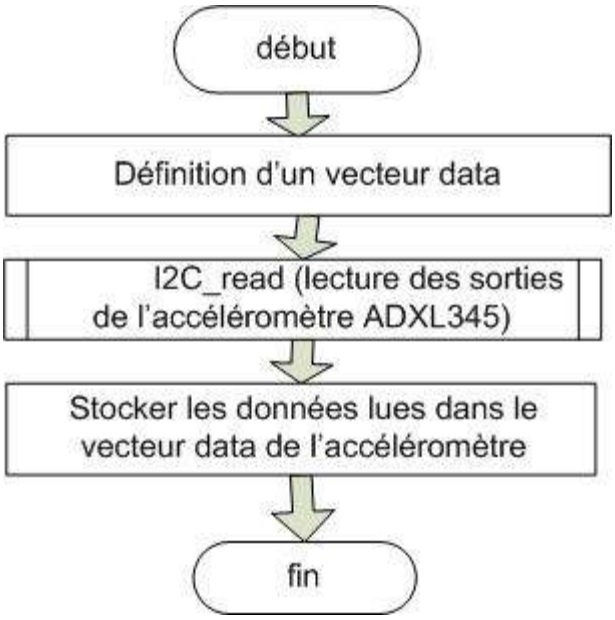



**Figure II.23***L'organigramme du sous-programme read_ADXL345*

### 8. L'organigramme du sous-programme read_ITG3200

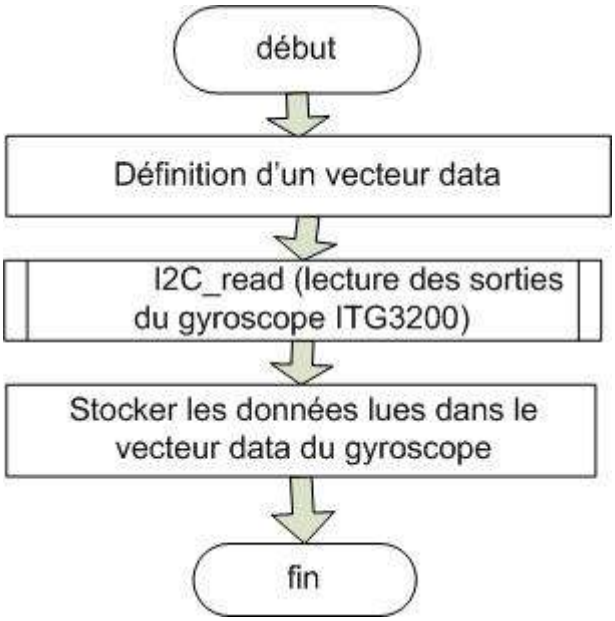



**Figure II.24***L'organigramme du sous-programme read_ITG3200*

Ce sous-programme permet de lire les six octets de données du gyroscope et les stockent dans un vecteur de données,par la suite on concatène chaque deux octets pour calculer la rotation autour de chaque axe (X, Y et Z).

### 9. L'organigramme du sous-programme read_HMC5883L

Ce sous-programme permet de lire les six octets de données de l'accéléromètre et les stockent dans un vecteur de données, ensuite on concatène chaque deux octets pour calculer les champs magnétique suivant les axes X, Y et Z.

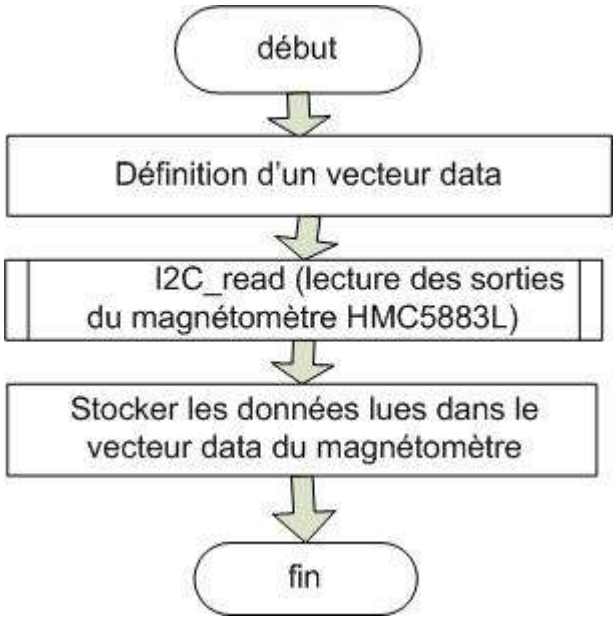



**Figure II.25***L'organigramme du sous-programme read_HMC5883L*

### 10. L'organigramme de la fonction i2c_read

Cette fonction permet de lire des octets de données d'un capteur via le bus I2C en utilisant la bibliothèque « wire » d'Arduino. Dans cette fonction, on envoi en premier temps l'adresse du capteur à lire, puis l'adresse du registre à lire dans le capteur et on fait une demande de ***i*** octets (avec ***i*** un compteur initialisé au début à zéro), on sauvegarde les données lues, puis on incrémente le compteur, si la valeur de ***i*** atteint la valeur max indiquée dans les paramètres de la fonction, on sort de la boucle, sinon et recommence la lecture.

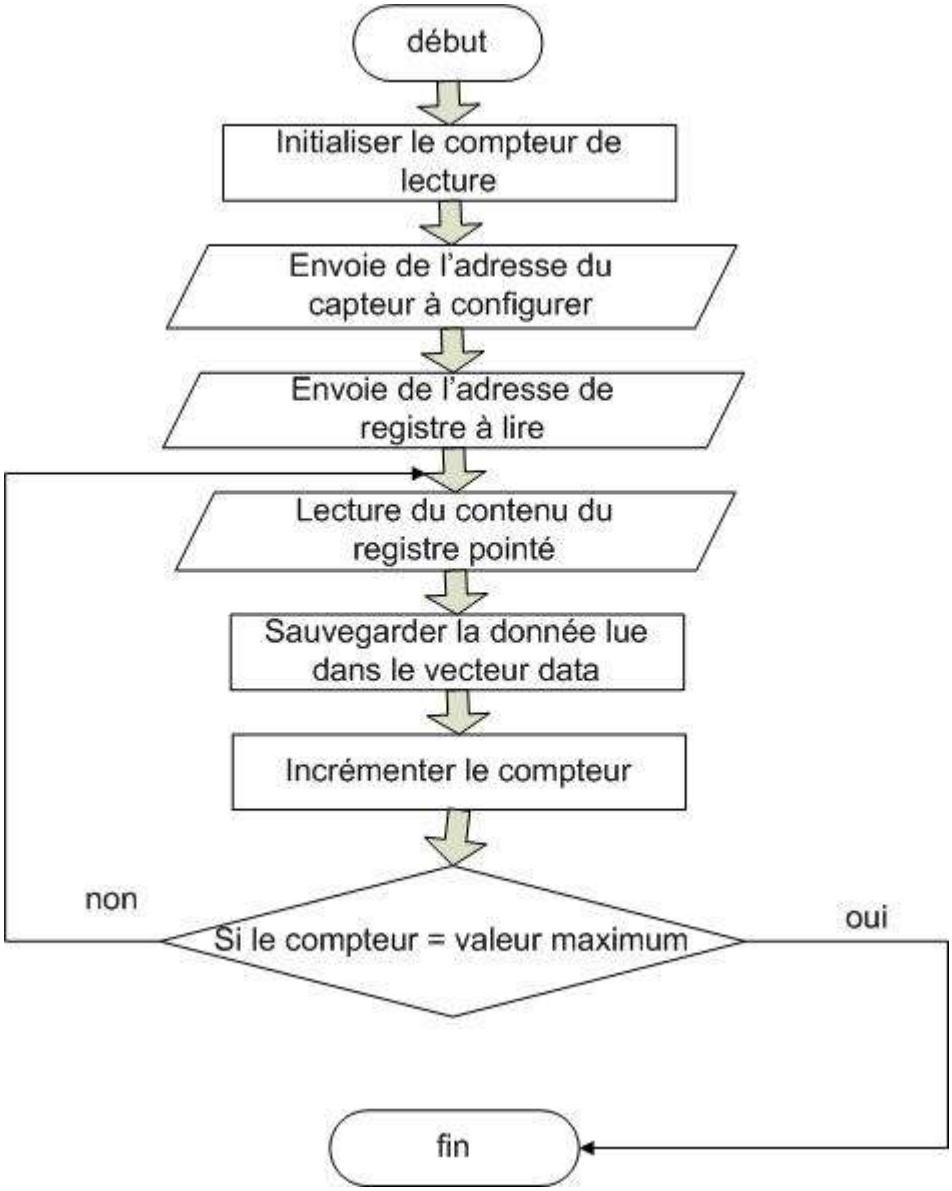



**Figure II.26***L'organigramme de la fonction i2c_read*

### 11. L'organigramme de la fonction i2c_write

Cette fonction permet d'écrire des octets de données sur un capteur (données de configuration) en utilisant toujours la bibliothèque « wire » dans une communication s'effectuant sur le bus I2C. Dans cette fonction, on envoi pour un premier temps l'adresse du capteur à configurer, puis l'adresse du registre à configurer dans le capteur adressé, enfin on envoie la données qu'on désire mettre dans le registre.

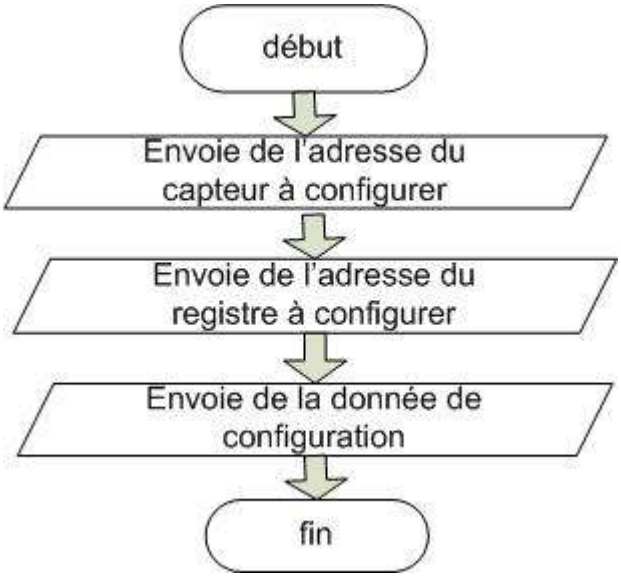



**Figure II.27***L'organigramme de la fonction i2c_write*

## 12. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté la conception de notre station inertielle, le choix établi des composants qui la constitue. Ainsi que les informations nécessaires pour la configuration des différents modules élémentaires ayant été assemblés,par conséquent,nous passerons à la mise en marche et aux tests de notre station objet du chapitre suivant.

# CHAPITRE III : TEST ET MISE EN MARCHE

## 1.Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenterles étapes demise en marche de notre station inertielle, pour cela nous avons fait appel à plusieurs logicielsde programmation tels que l'environnement de développent Arduinoet les deux logiciels de visualisation Processing et Matlab.Par la suite nous présentons les différents tests et leurs résultats qui seront commenté par des graphes et des interprétations.

## 2. Les étapes de mise en marche et interprétation des résultats du système

***Etape 1 :***

Lematérielnécessaire pour les tests :

- Une station inertielle à 9 degré de liberté (GY-85) ;
- Une carte Arduino nano ;
- Un module Bluetooth HC-05 ;
- Une alimentation (une pile, batterie ou câble USB) ;
- Un ordinateur.

***Etape 2 :***

Après installation sur PC et vérification du bon fonctionnement des environnements de Programmation Arduino et celui de visualisation Processing. Ainsi que le logiciel Matlab qui sera utilisé pour tracer les données issues du port série en temps réel, on passe à l'étape suivante.

***Etape 3 :***

Nous commençons par la compilation du programme élaboré, nous avons opté au début, pour des programmes très courts qui permettent d'exploiter un seul capteur de la station à la fois, afin de s'assurer du bon fonctionnement de chaque capteur. De même les premiers essais étés réalisés par liaison filaire (câble USB entre la station et le Pc) avant de passer à la transmission par Bluetooth.

Après avoirtransféréle programme compilé vers la carte Arduino, nous avons utilisé le moniteur série intégré à l'IDE Arduino pour visualiséles données brutes et traitées, la figure III.1 présente un aperçu des données envoyées de la station vers le Pc. Dans ce test il s'agit

des accélérations Ax, Ay et Az, des pitch et roll, des vitesses de rotation angulaire et du l'azimut de la station.

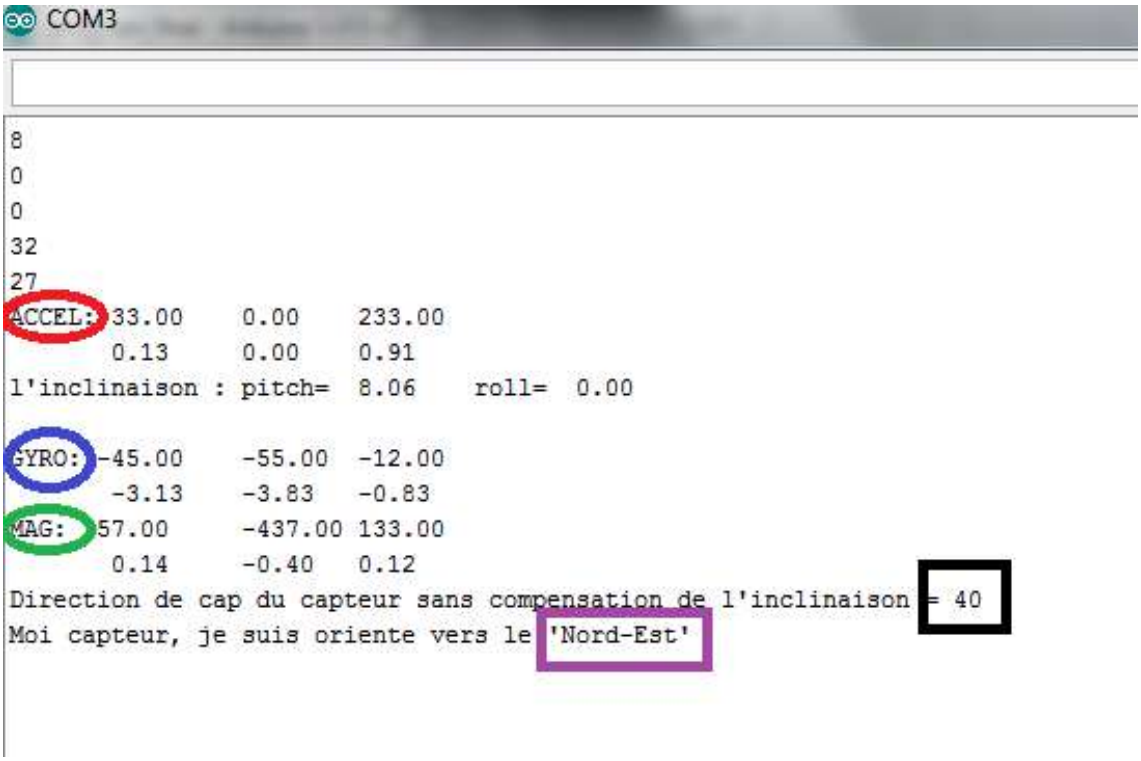



**Figure III.1** *: La fenêtre du moniteur série*

On remarque bien à travers les valeurs d'accélération que la station est sur l'axe Z car l'accélération suivant Z vaut presque 1g (cercle rouge), alors que pour les deux autres axes elle vaut presque 0 g (les deuxièmes valeurs de l'accélération) mais on peut toujours ajuster la précision de ces valeurs (étalonner le système) en utilisant le registre offset de l'ADXL345 (voir chapitre 2), nous remarquons également que les valeurs du gyroscope sont tous presque nulles (cercle bleu) ceci est due du fait qu'il n'ya pas de rotation au moment du test (le capteur n'est pas en mouvement), en suite le cap indique 40° (carré noir) ce qui correspond au Nord-estmagnétique, en ajoutant ladéclinaison relative ànotre ville à cette valeur on accède au cap géographique.

***Etape 4 :***

***Visualisation des données avec le processing***

Apres avoir vérifié que le programme fonctionne correctement, nous allons maintenant passer sur Processing afin de visualiser les inclinaisons et l'orientation de la station et suivre son mouvement en temps réel. Pour ce faire un code Processing doit être écrit et compilé (voir l'annexe).

D'abord, on a assimilé notre station a une rectangle avec une vision 3D,mais d'autre personne pourrons choisir d'autres formes géométriques comme unesphère ou un cylindre par exemple, et on a essayé d'appliquer des rotationsà la station dans diverssens, nous avons commencé par l'orientation de la station selon les axes du repère (OXYZ) pour voir si le rectangle en 3D va suivre le mouvement de la station.

Voici les résultats obtenu lorsque le capteur est disposé de telle sorte que l'axe X, Y ou Z soit perpendiculaire à la terre

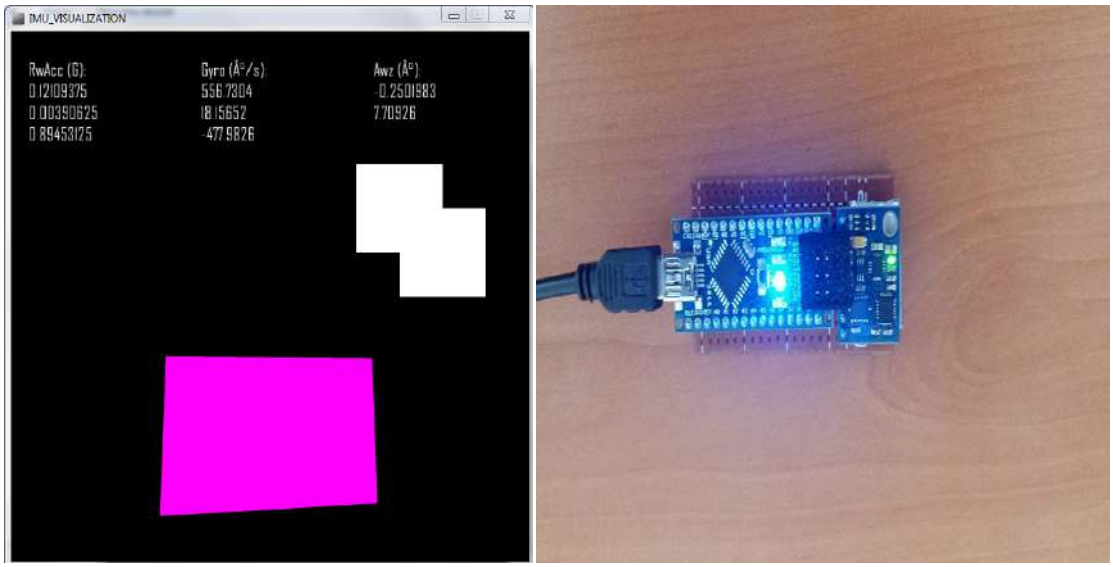



**Figure III.2 :** *Le résultat pour l'axe Z de la station est perpendiculaire à la terre*

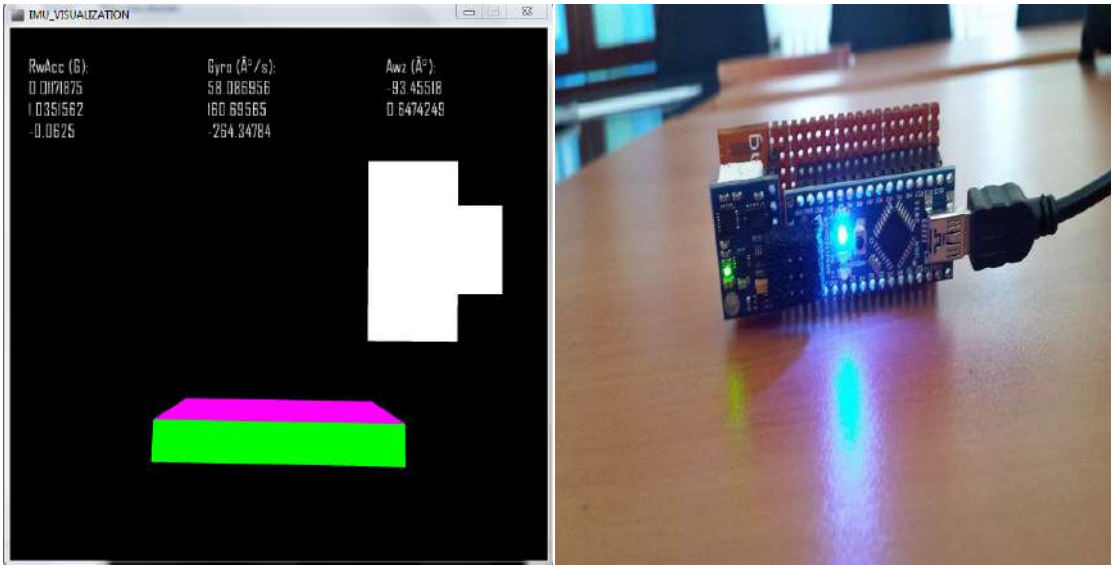



**Figure III.3 :** *Le résultat pour l'axe Y perpendiculaire à la terre*

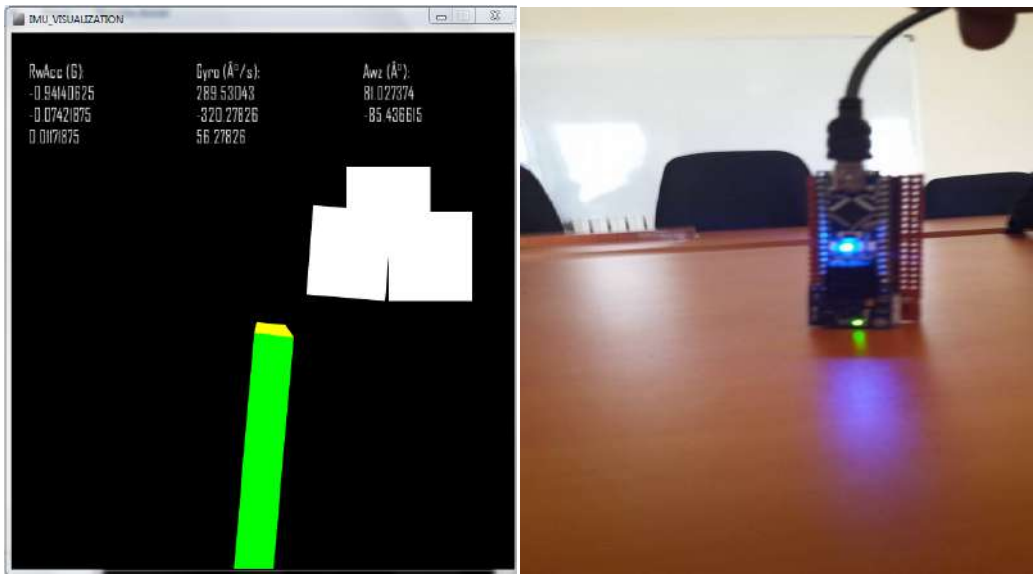



**Figure III.4 :** *le résultat pour l'axe X perpendiculaire à la terre*

Nous avons remarqué sur les premiers tests que le rectangle manipulé par le code Processing en fonction des données collectées par la station, que le rectangle présente une stabilité médiocre due à des vibrations qui apparient sur la fenêtre de visualisation de Processing malgré que la station a été posé sur un plan fixe, pour cela nous avons pensé à ajouter un filtre de kalman pour stabiliser d'avantage la représentation de la station.

***Etape 5***

Pour exploiter les données des mesures d'une autre façon(à l'aide de graphes), nous avons décidé de tracer l'évolution de ces données en fonction du temps sur le Matlab. Pour ce faire, quelques lignes de codes Matlab sont nécessaires. D'abord, il faudra initialiser le port série en sélectionnant la « COM » convenable (pour notre cas c'est le COM3)

*s = serial ('COM3');*

*Set (s, 'BaudRate', 9600);*

*fopen (s) ;*

Ensuite la deuxième ligne sélectionne le débit de données, ici ce débit est de 9600 baud, cette vitesse est égale à celle fixé dans le programme de la station, ce qui signifie que seulement 9600 bits peuvent être transférés au maximum. Et finalement le port est ouvert avec la troisième ligne.

*str = fscanf(s) ;*

cette lecture de données (dans notre cas 6 données) s'effectue de façon continu sur le moniteur série, mais le problèmec'est que cette commande lie tous les données comme une chaine de caractère alors on a pensé àinsérer des caractères d'identification entre les données en utilisant la commande *« index1 = find(str == 'g'); »*, comme ça on pourra lire séparément les données en utilisant la commande *« str1 = str(1:index1-1); »* et par la suite il faudra convertir l'octet lue en tant que chaine de caractère en nombre avec la commande « Gx(i) = str2double(str1); ». En fin, en utilisant ces quelques lignes de commandes ci-dessous, on pourra tracer les différents graphes comme le montre la figureIII.5

*Subplot (2, 1, 2), title ('Gyroscope Data'),*

*ylim([-2000 2000]),xlabel('Time'),ylabel('Deg/sec');*

*i = 20;*

*Plot (SR.*(i-10: i), Gx(i-10: i),'--b','LineWidth', 2)*

i =i+1 ;

drawnow;

## 3. Résultats et discussion

### *3.1. Accéléromètres*

Les figures suivantes montrent les accélérations en fonction du temps pour des positions bien choisies de la station :

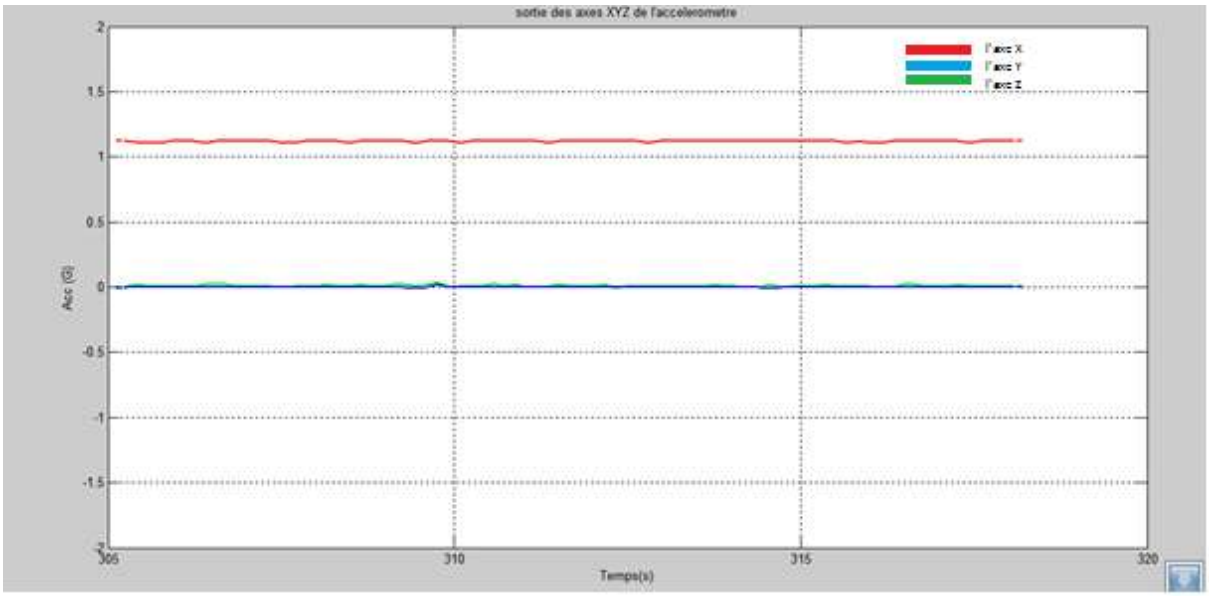



**Figure III.5** *: Sorties de l'accéléromètre lorsque l'axeX est orienté vers le bas*

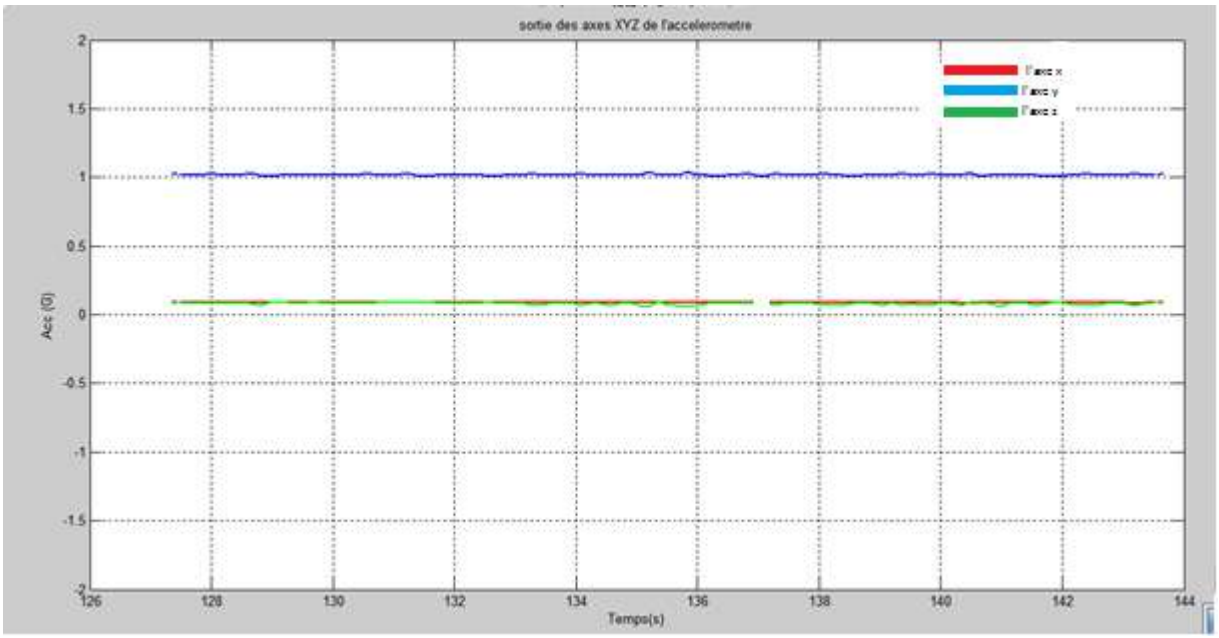



**Figure III.6** *: Sorties de l'accéléromètre lorsque l'axeY est orienté vers le bas*

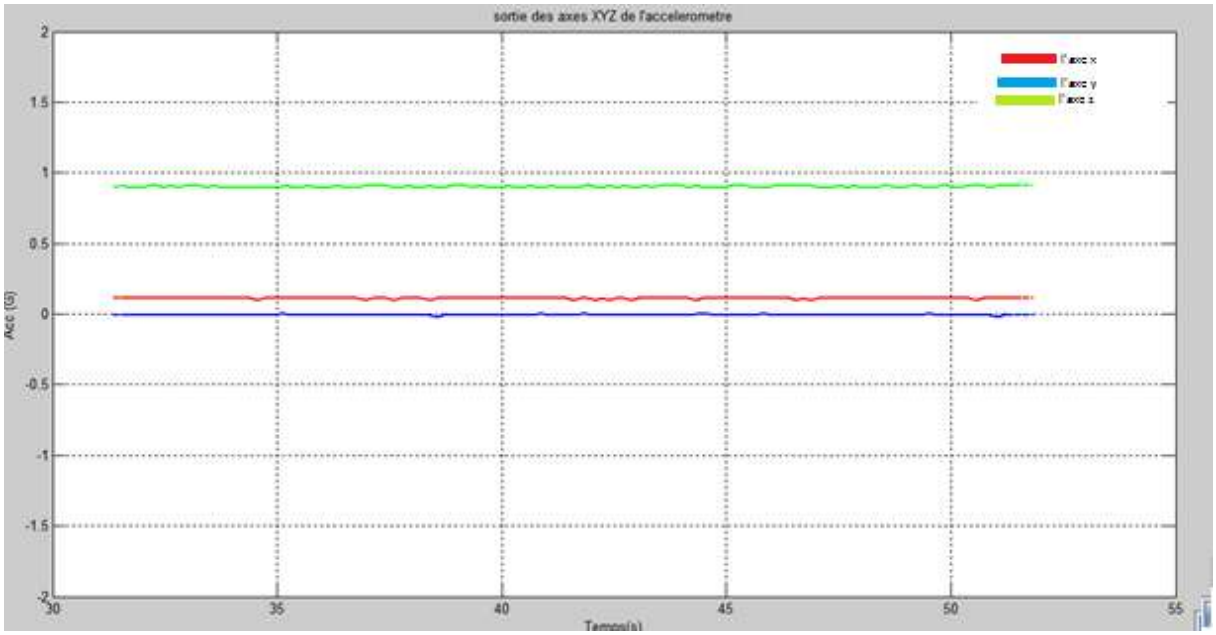



**Figure III.7 :** *Sorties de l'accéléromètrelorsque l'axe Z est orienté vers le bas*

**Interprétation**

Le comportement de l'allure du graphe est représenté sur chaque figure selon que la station est orientée de façon à ce son axe X, Y ou Z soit dirigé vers le bas (dans le sens de pesanteur).

La ligne rouge représente l'accélération suivant l'axe X, la ligne bleu représente l'accélération suivant l'axe Y et la ligne vert l'accélération suivant l'axe Z. Lorsque c'est l'axe X qui est orienté vers le bas (Figure III.5), la ligne rouge s'approche de la valeur 1g qui est la valeur de la pesanteur terrestre et les deux autres lignes (bleu et vert) sont proche du 0g puisqu'ils sont dans un plan perpendiculaire à la verticale, autrement dit il n'ya pas d'accélération suivant ces deux axes. C'est le même raisonnement pour les deux autres cas (Figures III.6 et III.7).

Mais il faut noter qu'on a observé des offset sur les deux dernières figures, ces incertitudes peuvent êtreéliminé par un bon étalonnage de la station en mesurant l'offset dans chaque orientation et en prenant ces valeurs en considération lors du calcul.

### *3.2. Gyroscope*

De même nous avons procédé par la suite à appliquer une rotation simple autour de chaque axe séparément. Les figures suivantes montrent les vitesses de rotation angulaires en fonction du temps pour des sens de rotation bien choisies :

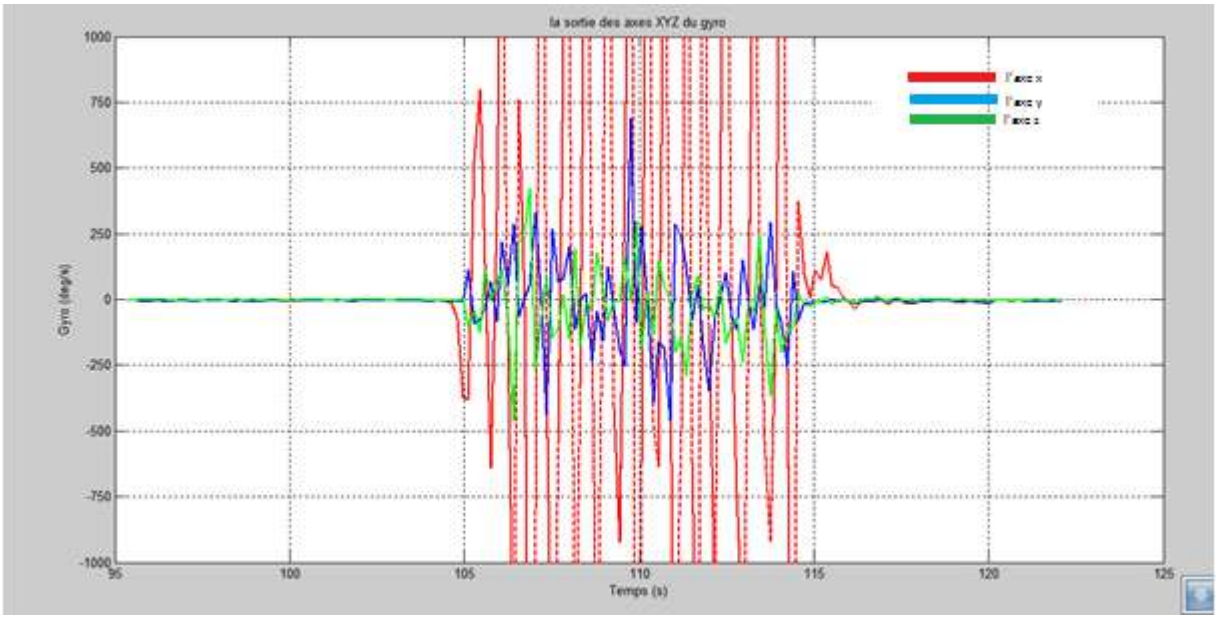
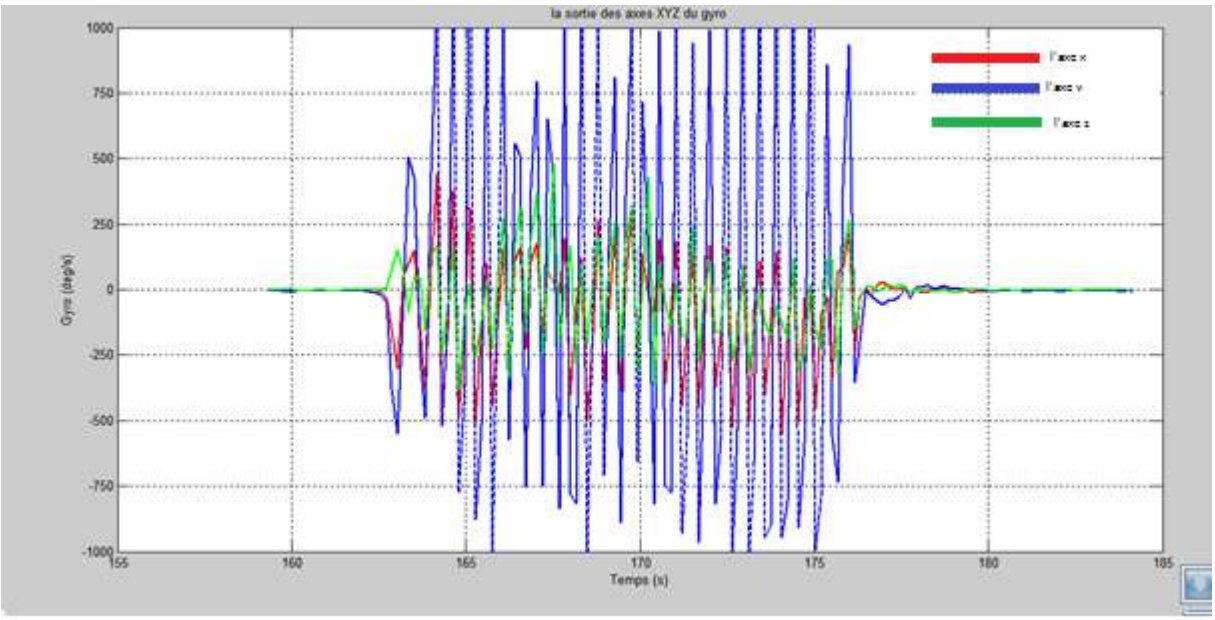



**Figure III.8** : *Rotation autour de l'axe X du gyroscope*




**FigureIII.9** : *Rotation autour de l'axe Y du gyroscope*

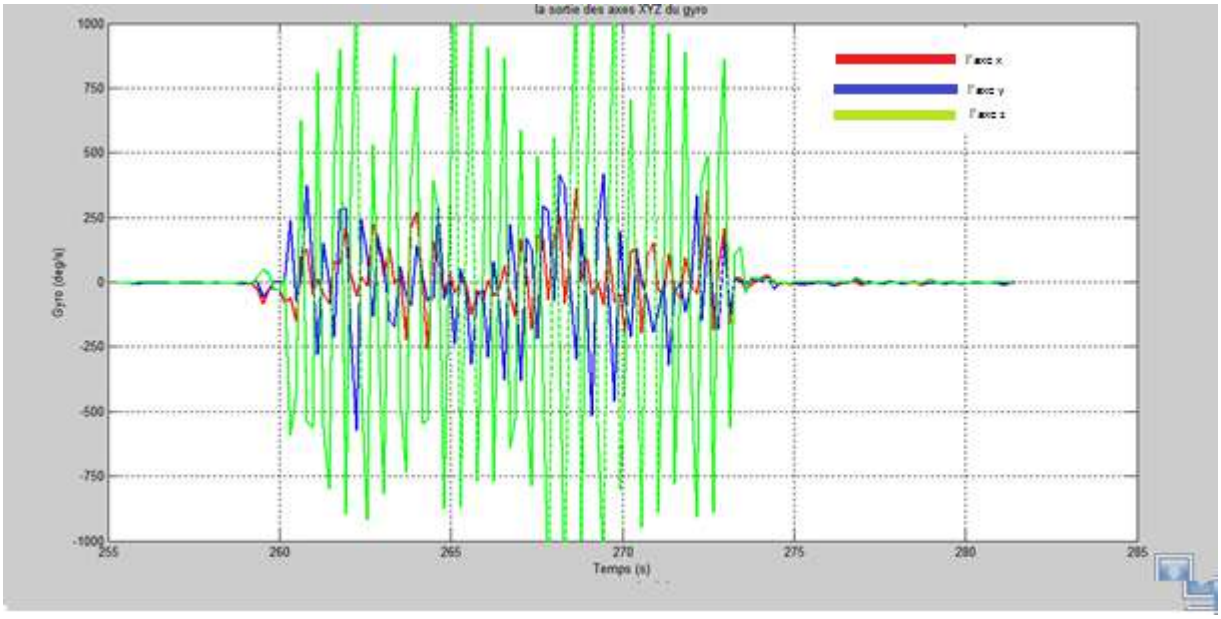



**Figure III.10 :***Rotation autour de l'axe Z du gyroscope*

***Interprétation***

D'abord il faut rappeler que le gyroscope est sensible au mouvement de rotation.Donc un gyroscope trois axes mesure la rotation autour des axes X, Y et Z. Dans cette expérience, la ligne rouge représentela vitesse de rotation angulaire autour de l'axe X, la ligne bleu celle de la rotation autour de l'axe Y et la ligne verte celle de la rotation autour de l'axe Z.

On remarque sur les trois figures qu'il arrive souvent que les trois lignes (rouge, bleu et vert) se superposent sur le niveau zéro, ceci explique en fait que le capteur n'est soumis à aucune rotation.

Mais par contre lorsqu'on s'amuse à tourner la station autour d'un axe quelconque, on trouve les résultats montrés sur les Figure III.8, III.9 et III.10.Dans laFigure III.8 la ligne rouge est beaucoup plus sensible à cette rotation par rapport aux deux autres lignes ceci explique que la rotation est effectué autour de l'axe X, de la même manière si on tourne la station autour de l'axe Y la ligne bleu devient plus sensible Figure III.9.

### *3.3. Les angles de rotation roll, pitch et yaw.*

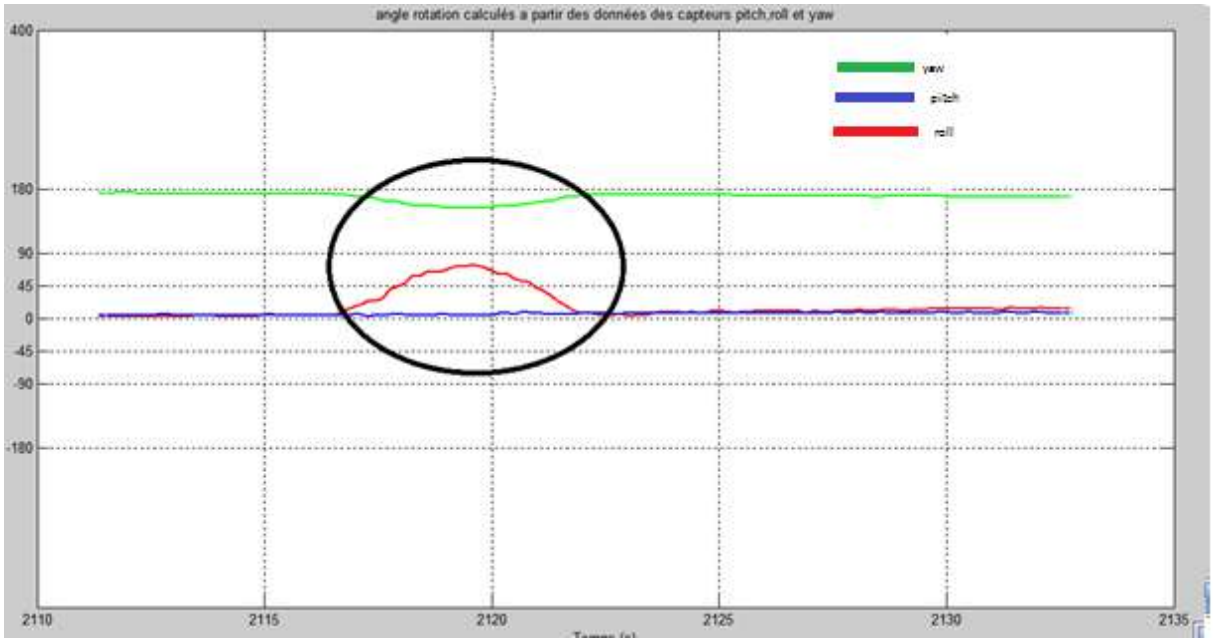



**Figure III.11 :***Angles d'inclinaison (roll, pitch et yaw) avec variation du roll (ligne rouge)*

***Interprétation***

Sur la (Figure III.11) on a tracé les trois angles roll, pitch et yaw sur un même graphe (le roll est représenté en rouge, le pitch en bleu et le yaw en vert). Le yaw est en fait ce qu'on a appelé l'azimut dans le chapitreI, ce dernier indique comme nous l'avons déjà expliqué l'orientation géographique du capteur.

Pour cette expérience, on a fixé l'orientation du capteur vers le sud (180 °)(indiqué par la ligne verte) et on essaye d'incliner la station autour de l'axe X (variation du roll). On remarque que le yaw (azimut) changemalgré que la station est toujours orientée vers le sud. Ceci est justifié par le fait que la valeur de l'orientation dans notre programme se calculer en utilisant uniquement les données issues du magnétomètre, dont l'inconvénient est que cette mesure de l'azimut ne sera valable que lorsque le capteur n'est pas incliné (en position horizontale). On voit sur la figure III.11 que la valeur du yaw à automatiquement changé lorsqu'on a incliné le capteur autour de l'axe X (la variation de la ligne rouge ou ligne représentant le roll). Ce même phénomène ne se produirais pas si on incline le capteur autour de l'axe Y (variation de la ligne bleu ou du pitch) ou du moins le phénomène n'est pas perceptible pour des inclinaisons inférieures ou égales 45° d'après ce qu'on a remarqué après une série de tests de variation du pitch (Figure III.12).

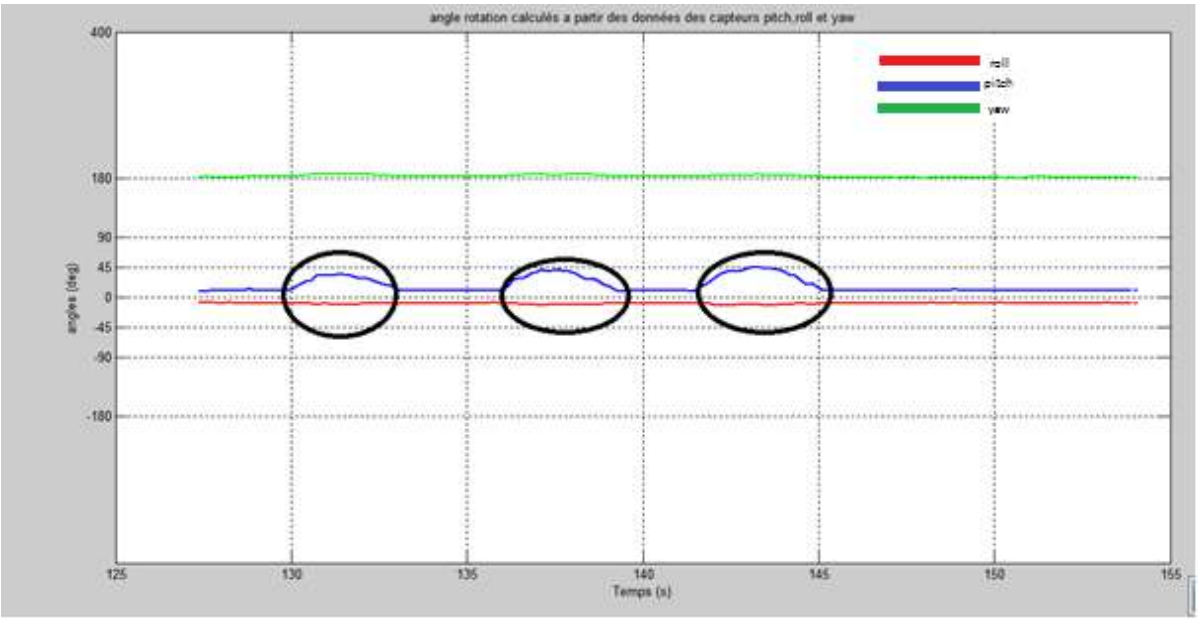



**Figure III.12 :***Angles d'inclinaison (roll, pitch et yaw) avec variation du pitch (ligne bleue)*

## 4. Conclusion

Apres tout une série d'expériences, on remarque que les résultats obtenus sont acceptables pour une première approche, donc on peut conclure que la station est fonctionnelle.

# *Conclusion générale*

Unestation inertielle portative à 9 axesa été est conçue et réalisée en utilisantdes capteurs inertiels et magnétiques comportant un accéléromètre trois axes, un gyroscope trois axes et un magnétomètre trois axes.

Les données des différents capteurssont lues et traités par un microcontrôleur 8 bits qui assure un post traitement (filtrage, calcul, gestion, calibrage) et la transmission par voie RF à travers un module Bluetooth bon marché des données vers un système de traitement et de visualisation tels qu'un PC.

La stationréaliséepermet dedéterminer l'inclinaison, l'orientation d'un objet, en plus de cela, le système est capable de suivre le mouvement del'objet comme ça été montre avec le logiciel Processing.

Malgré que quelquesréglagesseront encore indispensables. On espèreaméliorernotresystème dans l'avenir. Cette réalisation nous a permet d'apprendre et de manipuler un ensemble d'outils de programmation comme l'IDE Arduino, Processinget Matlab.

## Bibliography:


| | |
|---|---|
| [1] D. Jud, A. Michel, | '' Motion Tracking Systems An overview of motion tracking methods", swiss federal institute of technology Zurich, Zurich, Suisse, 2011 |
| [2] | G.Welch, G. Bishop, L. Vicci, S. Brumback, and K. Keller |
| [3] | J. Guérin, I. Jalliffier-V. |
| [4] F.Abyarjoo, A. Barreto, J. Cofino, F. R. Ortega, | [4] '' Implementing a Sensor Fusion Algorithm for 3D Orientation Detection with Inertial/Magnetic Sensors'', Electrical and Computer Engineering Department. Florida International University. Miami, FL. USA<br>School of Computing and Information Science. Florida International University. Miami, FL. USA.<br>{fabya001, barretoa, jcofi001, forte007}@fiu.edu |
| [5] BOUKRMA HOUCINE et KERBOUCI ABDELHAK | « Conception et réalisation d'un dispositif de mesure de l'azimut d'un mobile en déplacement", Université Dr. YAHIA FARES de MEDEA, MEDEA, Algerie, 2011. |
| [6] T. Stork, | ''Electronic Compass Design using KMZ51 and KMZ52'', Philips Semiconductors<br>AN00022 |

| | |
|---|---|
| [7] Data sheet | http://www.analog.com/ |
| [8] Data sheet | http://www.invensense.com/ |
| [9] Data sheet | http://www.honeywell.com/ |
| [10] | http://www.sparkefun.com/ |

# ANNEXES

# 3-Axis, ±2 *g*/±4 *g*/±8 *g*/±16 *g* Digital Accelerometer

Data Sheet

# ADXL345

## FEATURES

- Ultralow power: as low as 23 µA in measurement mode and 0.1 µA in standby mode at $V_S$ = 2.5 V (typical)
- Power consumption scales automatically with bandwidth
- User-selectable resolution
  - Fixed 10-bit resolution
  - Full resolution, where resolution increases with *g* range, up to 13-bit resolution at ±16 *g* (maintaining 4 mg/LSB scale factor in all *g* ranges)
- Patent pending, embedded memory management system with FIFO technology minimizes host processor load
- Single tap/double tap detection
- Activity/inactivity monitoring
- Free-fall detection
- Supply voltage range: 2.0 V to 3.6 V
- I/O voltage range: 1.7 V to $V_S$
- SPI (3- and 4-wire) and $I^2C$ digital interfaces
- Flexible interrupt modes mappable to either interrupt pin
- Measurement ranges selectable via serial command
- Bandwidth selectable via serial command
- Wide temperature range (−40°C to +85°C)
- 10,000 *g* shock survival
- Pb free/RoHS compliant
- Small and thin: 3 mm × 5 mm × 1 mm LGA package

## APPLICATIONS

- Handsets
- Medical instrumentation
- Gaming and pointing devices
- Industrial instrumentation
- Personal navigation devices
- Hard disk drive (HDD) protection

## GENERAL DESCRIPTION

The ADXL345 is a small, thin, ultralow power, 3-axis accelerometer with high resolution (13-bit) measurement at up to ±16 *g*. Digital output data is formatted as 16-bit twos complement and is accessible through either a SPI (3- or 4-wire) or $I^2C$ digital interface.

The ADXL345 is well suited for mobile device applications. It measures the static acceleration of gravity in tilt-sensing applications, as well as dynamic acceleration resulting from motion or shock. Its high resolution (3.9 mg/LSB) enables measurement of inclination changes less than 1.0°.

Several special sensing functions are provided. Activity and inactivity sensing detect the presence or lack of motion by comparing the acceleration on any axis with user-set thresholds. Tap sensing detects single and double taps in any direction. Free-fall sensing detects if the device is falling. These functions can be mapped individually to either of two interrupt output pins. An integrated, patent pending memory management system with a 32-level first in, first out (FIFO) buffer can be used to store data to minimize host processor activity and lower overall system power consumption.

Low power modes enable intelligent motion-based power management with threshold sensing and active acceleration measurement at extremely low power dissipation.

The ADXL345 is supplied in a small, thin, 3 mm × 5 mm × 1 mm, 14-lead, plastic package.

## FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

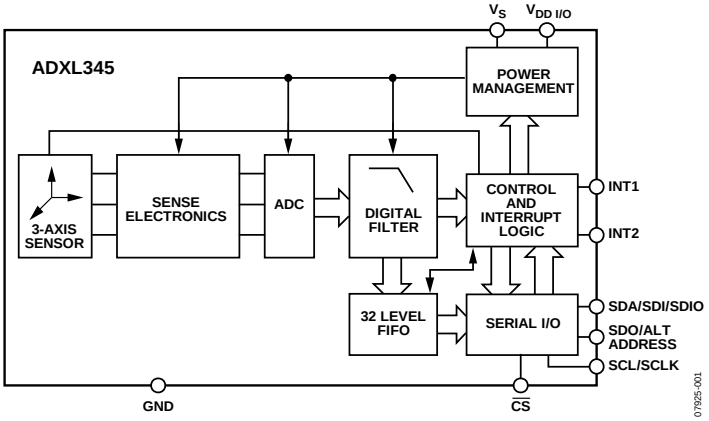



*Figure 1.*

Rev. D

Document Feedback

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 781.329.4700 ©2009–2013 Analog Devices, Inc. All rights reserved.
Technical Support www.analog.com

# SPECIFICATIONS

$T_A$ = 25°C, $V_S$ = 2.5 V, $V_{DD\ I/O}$ = 1.8 V, acceleration = 0 *g*, $C_S$ = 10 µF tantalum, $C_{I/O}$ = 0.1 µF, output data rate (ODR) = 800 Hz, unless otherwise noted. All minimum and maximum specifications are guaranteed. Typical specifications are not guaranteed.

**Table 1.**

| Parameter | Test Conditions | Min | Typ[1] | Max | Unit |
|---|---|---|---|---|---|
| SENSOR INPUT | Each axis | | | | |
| Measurement Range | User selectable | | ±2, ±4, ±8, ±16 | | *g* |
| Nonlinearity | Percentage of full scale | | ±0.5 | | % |
| Inter-Axis Alignment Error | | | ±0.1 | | Degrees |
| Cross-Axis Sensitivity[2] | | | ±1 | | % |
| OUTPUT RESOLUTION | Each axis | | | | |
| All *g* Ranges | 10-bit resolution | | 10 | | Bits |
| ±2 *g* Range | Full resolution | | 10 | | Bits |
| ±4 *g* Range | Full resolution | | 11 | | Bits |
| ±8 *g* Range | Full resolution | | 12 | | Bits |
| ±16 *g* Range | Full resolution | | 13 | | Bits |
| SENSITIVITY | Each axis | | | | |
| Sensitivity at $X_{OUT}$, $Y_{OUT}$, $Z_{OUT}$ | All *g*-ranges, full resolution | 230 | 256 | 282 | LSB/*g* |
| | ±2 *g*, 10-bit resolution | 230 | 256 | 282 | LSB/*g* |
| | ±4 *g*, 10-bit resolution | 115 | 128 | 141 | LSB/*g* |
| | ±8 *g*, 10-bit resolution | 57 | 64 | 71 | LSB/*g* |
| | ±16 *g*, 10-bit resolution | 29 | 32 | 35 | LSB/*g* |
| Sensitivity Deviation from Ideal | All *g*-ranges | | ±1.0 | | % |
| Scale Factor at $X_{OUT}$, $Y_{OUT}$, $Z_{OUT}$ | All *g*-ranges, full resolution | 3.5 | 3.9 | 4.3 | mg/LSB |
| | ±2 *g*, 10-bit resolution | 3.5 | 3.9 | 4.3 | mg/LSB |
| | ±4 *g*, 10-bit resolution | 7.1 | 7.8 | 8.7 | mg/LSB |
| | ±8 *g*, 10-bit resolution | 14.1 | 15.6 | 17.5 | mg/LSB |
| | ±16 *g*, 10-bit resolution | 28.6 | 31.2 | 34.5 | mg/LSB |
| Sensitivity Change Due to Temperature | | | ±0.01 | | %/°C |
| 0 *g* OFFSET | Each axis | | | | |
| 0 *g* Output for $X_{OUT}$, $Y_{OUT}$ | | −150 | 0 | +150 | m*g* |
| 0 *g* Output for $Z_{OUT}$ | | −250 | 0 | +250 | m*g* |
| 0 *g* Output Deviation from Ideal, $X_{OUT}$, $Y_{OUT}$ | | | ±35 | | m*g* |
| 0 *g* Output Deviation from Ideal, $Z_{OUT}$ | | | ±40 | | m*g* |
| 0 *g* Offset vs. Temperature for X-, Y-Axes | | | ±0.4 | | mg/°C |
| 0 *g* Offset vs. Temperature for Z-Axis | | | ±1.2 | | mg/°C |
| NOISE | | | | | |
| X-, Y-Axes | ODR = 100 Hz for ±2 *g*, 10-bit resolution or all *g*-ranges, full resolution | | 0.75 | | LSB rms |
| Z-Axis | ODR = 100 Hz for ±2 *g*, 10-bit resolution or all *g*-ranges, full resolution | | 1.1 | | LSB rms |
| OUTPUT DATA RATE AND BANDWIDTH | User selectable | | | | |
| Output Data Rate (ODR)[3, 4, 5] | | 0.1 | | 3200 | Hz |
| SELF-TEST[6] | | | | | |
| Output Change in X-Axis | | 0.20 | | 2.10 | *g* |
| Output Change in Y-Axis | | −2.10 | | −0.20 | *g* |
| Output Change in Z-Axis | | 0.30 | | 3.40 | *g* |
| POWER SUPPLY | | | | | |
| Operating Voltage Range ($V_S$) | | 2.0 | 2.5 | 3.6 | V |
| Interface Voltage Range ($V_{DD\ I/O}$) | | 1.7 | 1.8 | $V_S$ | V |
| Supply Current | ODR ≥ 100 Hz | | 140 | | µA |
| | ODR < 10 Hz | | 30 | | µA |
| Standby Mode Leakage Current | | | 0.1 | | µA |
| Turn-On and Wake-Up Time[7] | ODR = 3200 Hz | | 1.4 | | ms |

# 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L

Honeywell

*Advanced Information*

The Honeywell HMC5883L is a surface-mount, multi-chip module designed for low-field magnetic sensing with a digital interface for applications such as low-cost compassing and magnetometry. The HMC5883L includes our state-of-the-art, high-resolution HMC118X series magneto-resistive sensors plus an ASIC containing amplification, automatic degaussing strap drivers, offset cancellation, and a 12-bit ADC that enables 1° to 2° compass heading accuracy. The $I^2C$ serial bus allows for easy interface. The HMC5883L is a 3.0x3.0x0.9mm surface mount 16-pin leadless chip carrier (LCC). Applications for the HMC5883L include Mobile Phones, Netbooks, Consumer Electronics, Auto Navigation Systems, and Personal Navigation Devices.



The HMC5883L utilizes Honeywell's Anisotropic Magnetoresistive (AMR) technology that provides advantages over other magnetic sensor technologies. These anisotropic, directional sensors feature precision in-axis sensitivity and linearity. These sensors' solid-state construction with very low cross-axis sensitivity is designed to measure both the direction and the magnitude of Earth's magnetic fields, from milli-gauss to 8 gauss. Honeywell's Magnetic Sensors are among the most sensitive and reliable low-field sensors in the industry.

| FEATURES | BENEFITS |
|---|---|
| 3-Axis Magnetoresistive Sensors and ASIC in a 3.0x3.0x0.9mm LCC Surface Mount Package | Small Size for Highly Integrated Products. Just Add a Micro-Controller Interface, Plus Two External SMT Capacitors<br>Designed for High Volume, Cost Sensitive OEM Designs<br>Easy to Assemble & Compatible with High Speed SMT Assembly |
| 12-Bit ADC Coupled with Low Noise AMR Sensors Achieves 2 milli-gauss Field Resolution in ±8 Gauss Fields | Enables 1° to 2° Degree Compass Heading Accuracy |
| Built-In Self Test | Enables Low-Cost Functionality Test after Assembly in Production |
| Low Voltage Operations (2.16 to 3.6V) and Low Power Consumption (100 µA) | Compatible for Battery Powered Applications |
| Built-In Strap Drive Circuits | Set/Reset and Offset Strap Drivers for Degaussing, Self Test, and Offset Compensation |
| $I^2C$ Digital Interface | Popular Two-Wire Serial Data Interface for Consumer Electronics |
| Lead Free Package Construction | RoHS Compliance |
| Wide Magnetic Field Range (+/-8 Oe) | Sensors Can Be Used in Strong Magnetic Field Environments with a 1° to 2° Degree Compass Heading Accuracy |
| Software and Algorithm Support Available | Compassing Heading, Hard Iron, Soft Iron, and Auto Calibration Libraries Available |
| Fast 160 Hz Maximum Output Rate | Enables Pedestrian Navigation and LBS Applications |

## SPECIFICATIONS (* Tested at 25°C except stated otherwise.)

| Characteristics | Conditions* | Min | Typ | Max | Units |
|---|---|---|---|---|---|
| ***Power Supply*** | | | | | |
| Supply Voltage | VDD Referenced to AGND<br>VDDIO Referenced to DGND | 2.16<br>1.71 | 2.5<br>1.8 | 3.6<br>VDD+0.1 | Volts<br>Volts |
| Average Current Draw | Idle Mode<br>Measurement Mode (7.5 Hz ODR;<br>No measurement average, MA1:MA0 = 00)<br>VDD = 2.5V, VDDIO = 1.8V (Dual Supply)<br>VDD = VDDIO = 2.5V (Single Supply) | -<br>- | 2<br>100 | -<br>- | µA<br>µA |
| ***Performance*** | | | | | |
| Field Range | Full scale (FS) | -8 | | +8 | gauss |
| Mag Dynamic Range | 3-bit gain control | ±1 | | ±8 | gauss |
| Sensitivity (Gain) | VDD=3.0V, GN=0 to 7, 12-bit ADC | 230 | | 1370 | LSb/gauss |
| Digital Resolution | VDD=3.0V, GN=0 to 7, 1-LSb, 12-bit ADC | 0.73 | | 4.35 | milli-gauss |
| Noise Floor<br>(Field Resolution) | VDD=3.0V, GN=0, No measurement average, Standard Deviation 100 samples<br>(See typical performance graphs below) | | 2 | | milli-gauss |
| Linearity | ±2.0 gauss input range | | | 0.1 | ±% FS |
| Hysteresis | ±2.0 gauss input range | | ±25 | | ppm |
| Cross-Axis Sensitivity | Test Conditions: Cross field = 0.5 gauss, Happlied = ±3 gauss | | ±0.2% | | %FS/gauss |
| Output Rate (ODR) | Continuous Measurment Mode<br>Single Measurement Mode | 0.75 | | 75<br>160 | Hz<br>Hz |
| Measurement Period | From receiving command to data ready | | 6 | | ms |
| Turn-on Time | Ready for I2C commands<br>Analog Circuit Ready for Measurements | | 200<br>50 | | µs<br>ms |
| Gain Tolerance | All gain/dynamic range settings | | ±5 | | % |
| $I^2C$ Address | 8-bit read address<br>8-bit write address | | 0x3D<br>0x3C | | hex<br>hex |
| $I^2C$ Rate | Controlled by $I^2C$ Master | | | 400 | kHz |
| $I^2C$ Hysteresis | Hysteresis of Schmitt trigger inputs on SCL and SDA - Fall (VDDIO=1.8V)<br>Rise (VDDIO=1.8V) | | 0.2*VDDIO<br>0.8*VDDIO | | Volts<br>Volts |
| Self Test | X & Y Axes<br>Z Axis | | ±1.16<br>±1.08 | | gauss |
| | X & Y & Z Axes (GN=5) Positive Bias<br>X & Y & Z Axes (GN=5) Negative Bias | 243<br>-575 | | 575<br>-243 | LSb |
| Sensitivity Tempco | $T_A$ = -40 to 125°C, Uncompensated Output | | -0.3 | | %/°C |
| ***General*** | | | | | |
| ESD Voltage | Human Body Model (all pins)<br>Charged Device Model (all pins) | | | 2000<br>750 | Volts |
| Operating Temperature | Ambient | -30 | | 85 | °C |
| Storage Temperature | Ambient, unbiased | -40 | | 125 | °C |

## 1.2 Purpose and Scope

This document is a preliminary product specification, providing a description, specifications, and design related information for the ITG-3205™. Electrical characteristics are based upon simulation results and limited characterization data of advanced samples only. Specifications are subject to change without notice. Final specifications will be updated based upon characterization of final silicon.

## 1.3 Product Overview

The ITG-3205 is the world's first single-chip, digital-output, 3-axis MEMS gyro IC optimized for gaming, 3D mice, and 3D remote control applications. The part features enhanced bias and sensitivity temperature stability, reducing the need for user calibration. Low frequency noise is lower than previous generation devices, simplifying application development and making for more-responsive remote controls.

The ITG-3205 features three 16-bit analog-to-digital converters (ADCs) for digitizing the gyro outputs, a user-selectable internal low-pass filter bandwidth, and a Fast-Mode $I^2C$ (400kHz) interface. Additional features include an embedded temperature sensor and a 2% accurate internal oscillator. This breakthrough in gyroscope technology provides a dramatic 67% package size reduction, delivers a 50% power reduction, and has inherent cost advantages compared to competing multi-chip gyro solutions.

By leveraging its patented and volume-proven Nasiri-Fabrication platform, which integrates MEMS wafers with companion CMOS electronics through wafer-level bonding, InvenSense has driven the ITG-3205 package size down to a revolutionary footprint of 4x4x0.9mm (QFN), while providing the highest performance, lowest noise, and the lowest cost semiconductor packaging required for handheld consumer electronic devices. The part features a robust 10,000*g* shock tolerance, as required by portable consumer equipment.

For power supply flexibility, the ITG-3205 has a separate VLOGIC reference pin, in addition to its analog supply pin, VDD, which sets the logic levels of its $I^2C$ interface. The VLOGIC voltage may be anywhere from 1.71V min to VDD max.

## 1.4 Applications

- Motion-enabled game controllers
- Motion-based portable gaming
- Motion-based 3D mice and 3D remote controls
- "No Touch" UI
- Health and sports monitoring

## 2 Features

The ITG-3205 triple-axis MEMS gyroscope includes a wide range of features:

- Digital-output X-, Y-, and Z-Axis angular rate sensors (gyros) on one integrated circuit with a sensitivity of 14.375 LSBs per °/sec and a full-scale range of ±2000°/sec
- Three integrated 16-bit ADCs provide simultaneous sampling of gyros while requiring no external multiplexer
- Enhanced bias and sensitivity temperature stability reduces the need for user calibration
- Low frequency noise lower than previous generation devices, simplifying application development and making for more-responsive motion processing
- Digitally-programmable low-pass filter
- Low 6.5mA operating current consumption for long battery life
- Wide VDD supply voltage range of 2.1V to 3.6V
- Flexible VLOGIC reference voltage allows for $I^2C$ interface voltages from 1.71V to VDD
- Standby current: 5μA
- Smallest and thinnest package for portable devices (4x4x0.9mm QFN)
- No high pass filter needed
- Turn on time: 50ms
- Digital-output temperature sensor
- Factory calibrated scale factor
- 10,000 *g* shock tolerant
- Fast Mode $I^2C$ (400kHz) serial interface
- On-chip timing generator clock frequency is accurate to +/-2% over full temperature range
- Optional external clock inputs of 32.768kHz or 19.2MHz to synchronize with system clock
- MEMS structure hermetically sealed and bonded at wafer level
- RoHS and Green compliant