

# Navigation des véhicules autonomes



Attitude and Heading Reference System : AHRS

*Novembre 2022 – Pr Jean-Philippe BRUNET*

# Sigles et vocabulaire technique

- Centrale de navigation: Ensemble des éléments matériels et logiciels qui permettent à un véhicule de déterminer son vecteur d'état.
- IMU : Inertial Measurement Unit.
  - Capteur permettant au véhicule de déterminer son attitude.
- GPS GNSS: Systèmes de positionnement par satellite
  - Permet d'obtenir sa position a la surface de la terre, Latitude, Longitude, Altitude
- AHRS: Attitude and Heading Reference System:
  - C'est une IMU éventuellement complétée par un GPS permettant d'extraire les informations d'attitude et de cap du véhicule.
- INS: Inertial Navigation System
  - Permet d'obtenir sa position a la surface de la terre par un traitement de données inertielles



# GPS et GNSS

Le terme GNSS (Global Navigation Satellite System) regroupe l'ensemble des moyens satellite de navigation permettant de se positionner à la surface de la terre.

# Différence entre GPS et GNSS

- GPS: Global Positioning System
  - Système américain de positionnement par satellite
- GNSS: Global Navigation Satellite System
  - Exploitation simultanée de l'ensemble des système de positionnement satellite de tous pays existants



# Altimeter – Radioaltimeter

Altimètre Barométrique – Radar de mesure de hauteur

# Altitude hauteur et niveau de vol

- Altitude: c'est l'altitude par rapport à un niveau de référence, par exemple au niveau le plus bas de la mer à Brest (France)
  - Attention ce niveau de référence change avec les pays et parfois même avec les administrations
- Hauteur: C'est la hauteur par rapport au niveau du sol
- Niveau de vol = Flight level = FL : c'est une altitude barométrique par rapport à une pression de référence.
  - Cela signifie l'altitude d'une ISOBARE atmosphérique à un endroit donné (couche d'égale pression)
  - Utilisé en navigation aérienne pour « étager » les avions

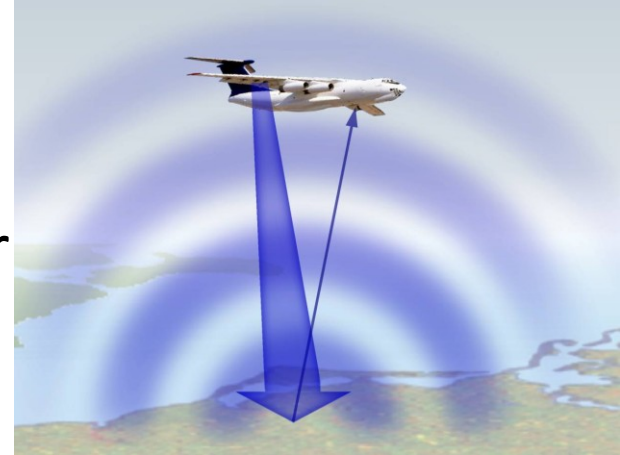
# Altimètre

- Un altimètre est un instrument de positionnement dans le plan vertical
- C'est un instrument qui mesure la différence entre la pression atmosphérique locale et une pression de référence.
- Si cette pression de référence est:
  - la pression du niveau de la mer à l'instant de la mesure (QNH "barometric pressure adjusted to sea level") il fournit l'altitude absolue
  - La pression normalisée au niveau de la mer de 1024 mb, il donne le niveau de vol (flight level = FL) = altitude pour la navigation aérienne. (QNE) Le FL est égal à l'altitude barométrique en « hectopieds » (tranches de 100 pieds = 30 m) et toujours par multiple de 5! (Ne peut se terminer que par 0 ou par 5) ex: FL155 = 15500 pieds = 4724 m
  - La pression au sol sur la piste: alors l'altimètre donne la hauteur par rapport au sol (QNH)



# RadioAltimeter

- C'est un radar qui donne la hauteur du véhicule par rapport au sol
- Le véhicule émet une onde radio qui se réfléchit au sol ou à la surface de l'eau
- On chronomètre le temps d'aller retour de l'impulsion (la réalité est un poil plus subtile) et on en déduit la hauteur par rapport à la surface.
- Il peut être couplé à un système GPWS (Ground Proximity Warning System) qui donne une alarme de proximité du sol en fonction de la vitesse verticale (« vario ») de l'avion

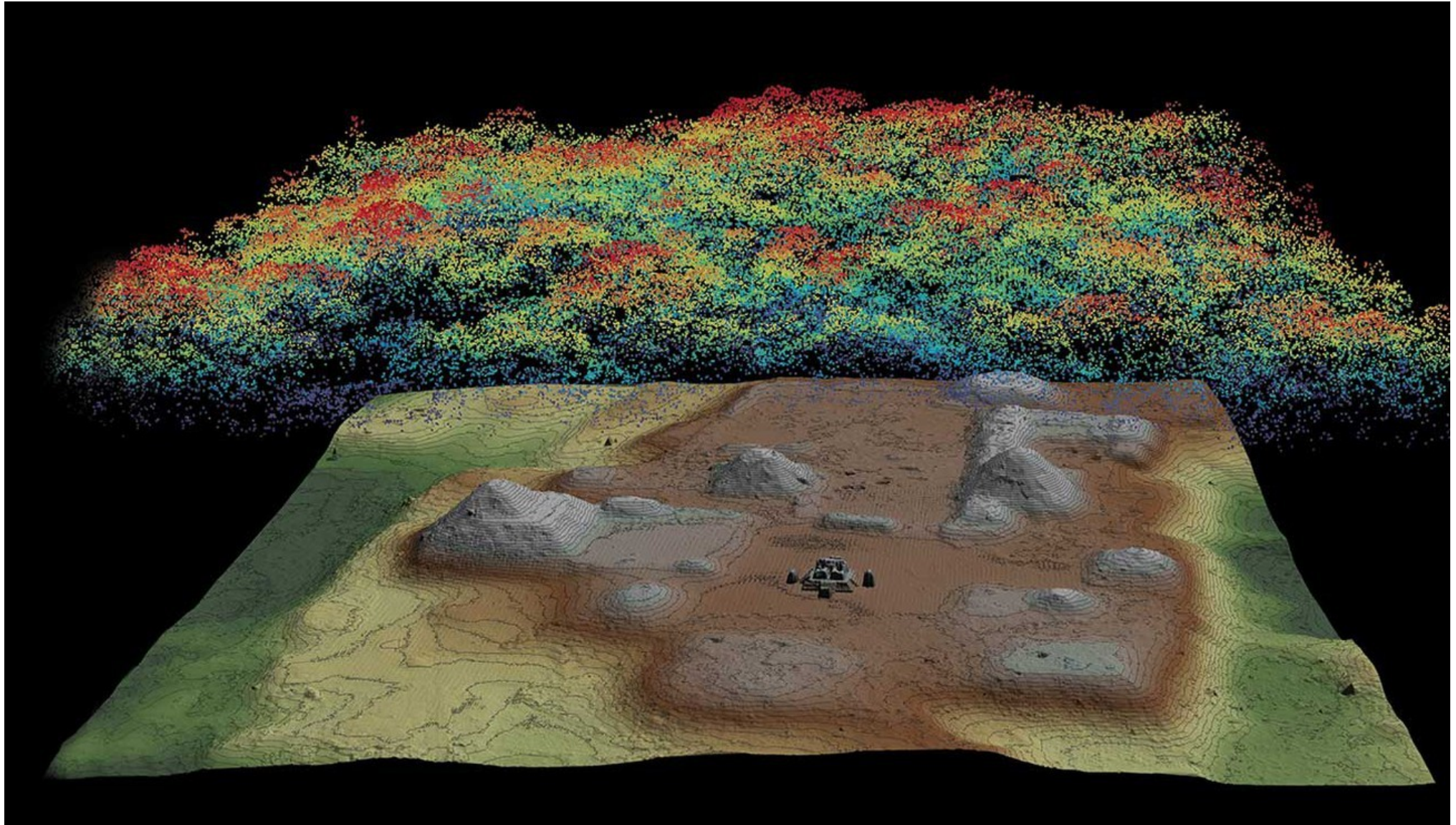


# Lidar altimétrique

- Lidar mesurant la distance entre un point (faisceau étroit) ou une zone (faisceau large) du sol et le véhicule
- A ce jour n'est utilisé que dans les drones.
- L'altimètre à pinceau étroit est dangereux sur les drones en vol stationnaires (multirotors) à cause des échos multiples
- C'est un outil extrêmement précis (pour le faisceau étroit) qui a révolutionné les levés topographiques la bathymétrie côtière et l'archéologie.



# Apport du lidar altimétrique a faisceau étroit



# Danger du lidar altimétrique a faisceau étroit en navigation aérienne

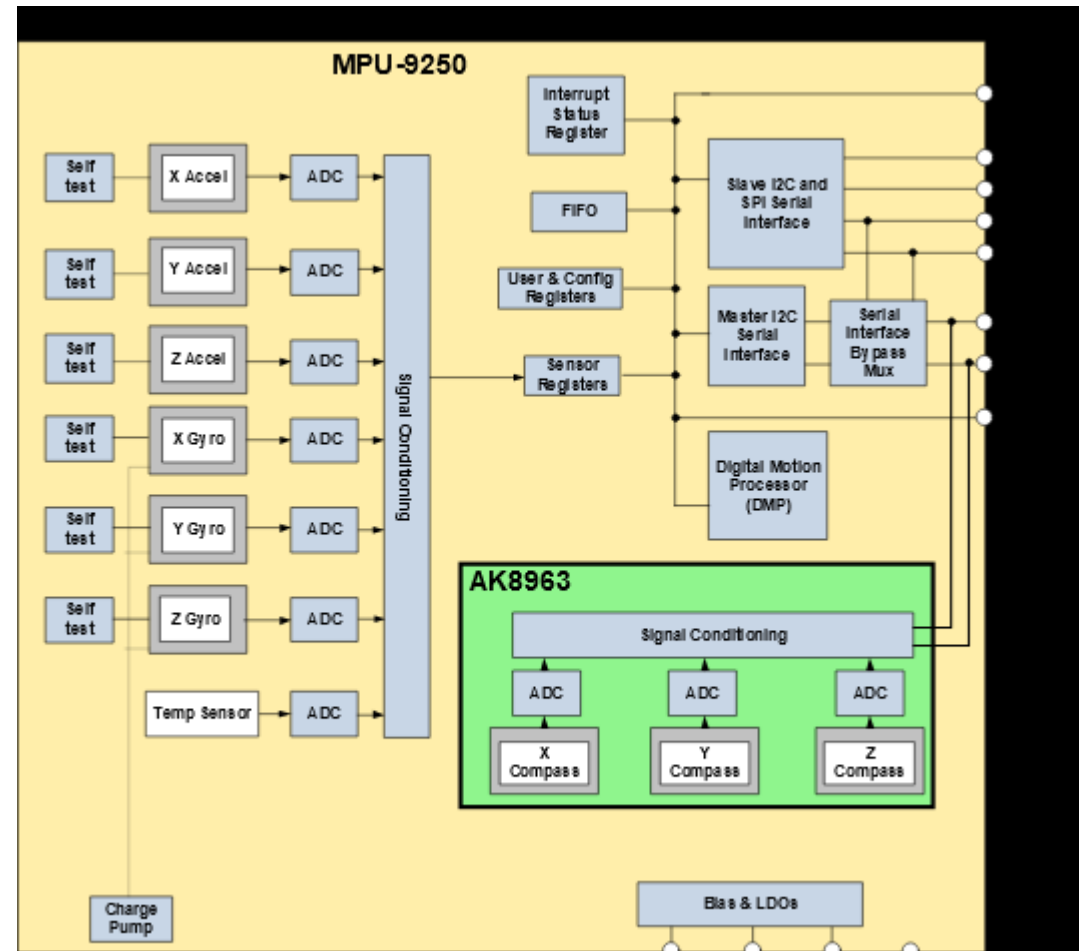
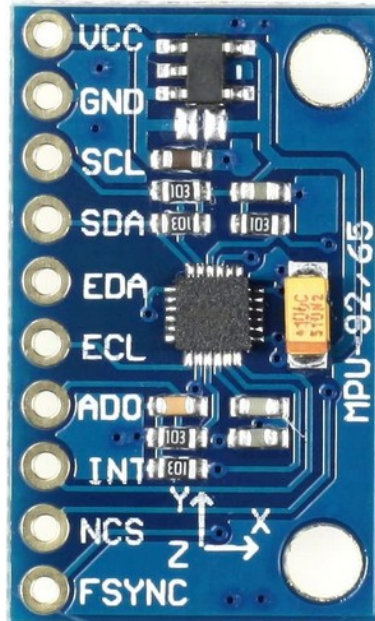
- Le lidar a faisceau large donne « l'enveloppe » des altitudes. C'est comme si on avait couvert le sol d'une bache et qu'on en mesure la hauteur.
  - C'est parfait en navigation aérienne car on ne voit que les points les plus hauts.
- Le lidar a faisceau étroit donne l'altitude du point précis au dessous du lidar.
  - Cela est intéressant pour« décamoufler » des structures sous l'herbe ou sur une forêt, mais en navigation aérienne cela donne un signal extrêmement bruité et peut conduire dans certains cas a ne pas « voir » des pylones, des arbres ou des bâtiments et conduire à un crash.

# Attitude and Heading Reference System: AHRS:

Un système AHRS permet de fusionner les données des différents capteurs de navigation (IMU, GPS, centrale inertielle, lidar, caméra...) pour obtenir une information « calculée » des paramètres fondamentaux: attitude, altitude, position

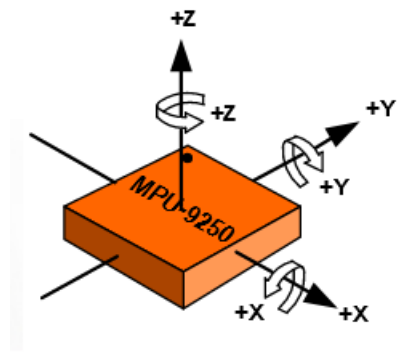
# Introduction: calculer le cap magnétique

- La centrale de navigation (IMU) nous fournit les mesures magnétiques:  $B_x, B_y, B_z$ 
  - (« Compass »)
- Ici un MPU-9250

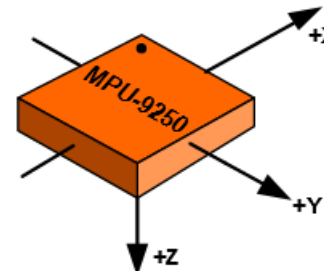


# Orientation des axes

- On voit dans la documentation du constructeur que l'axe Z du compas est orienté à l'inverse des autres dans le cas du MPU 9250



Orientation of Axes of Sensitivity  
and Polarity of Rotation  
for Accelerometer and Gyroscope



Orientation of Axes of Sensitivity  
for Compass

# Comment calculer le cap magnétique?

- Facile : on va prendre les composantes horizontales et calculer l'angle correspondant
- Attention: c'est un passage de cartésien à polaire. Surtout ne pas utiliser d'arctangeante ( $\text{atan}$ ) et d'algorithme
- La bonne approche est la fonction «  $\text{atan2}$  » qui donne l'angle polaire « principal » correspondant aux deux composantes cartésiennes:
  - En trigonométrie, la fonction  $\text{atan2}$  à deux arguments est une variante de la fonction arc tangente.
  - Pour tous les arguments réels  $x$  et  $y$  non nuls,  $\text{atan2}(y, x)$  est l'angle en radians entre la partie positive de l'axe des abscisses d'un plan, et le point de ce plan de coordonnées  $(x, y)$ .
  - Cet angle est positif pour les angles dans le sens anti-horaire dit sens trigonométrique (demi-plan supérieur,  $y > 0$ ) et négatif dans l'autre (demi-plan inférieur,  $y < 0$ ).

# Oui mais?

- Le calcul précédent n'est valable que si notre axe  $z$  est vertical
- Dans le cas contraire, il va falloir prendre en compte les trois composantes du champ et se ramener à un axe  $z'$  vertical. Pour cela il va falloir utiliser
  - une matrice de rotation 3D à 9 composantes
  - 9 multiplications, 3 additions
- Une autre approche est d'utiliser un produit de quaternions
  - 4 composantes seulement : 1 scalaire (angle) + 1 vecteur 3 d
    - $a+bi+cj+dk = a + \text{vecteur}$  ( ou  $i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$  )
    - On ne gagne rien en calcul mais on gagne en mémoire (composantes)

# Matrices de rotation

- En dimension 2:  $\begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$

- En dimension 3:

$$R_x(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}, \quad R_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}, \quad R_z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

- En choisissant l'ordre des rotations (par exemple Eulérien) puis en faisant le produit des trois matrices on obtient la matrice de rotation proprement dite.
- On peut utiliser aussi la notion angle + vecteur en remarquant qu'il existe toujours en 3D un vecteur non transformé par la rotation qu'on appelle « axe de rotation »
- Ce qui peut se représenter par un quaternion
  - Avantage : bibliothèque dans les DSP, directement câblé dans les GPU.

# Matrice de rotation pour un axe donné

- Soit  $\theta$  l'angle de rotation. Posons  $c = \cos(\theta)$  et  $s = \sin(\theta)$ .
- L'axe de rotation est défini par un vecteur unitaire «  $u$  »
  - C'est-à-dire tel que  $u_x^2 + u_y^2 + u_z^2 = 1$
- La matrice de rotation correspondante est alors:

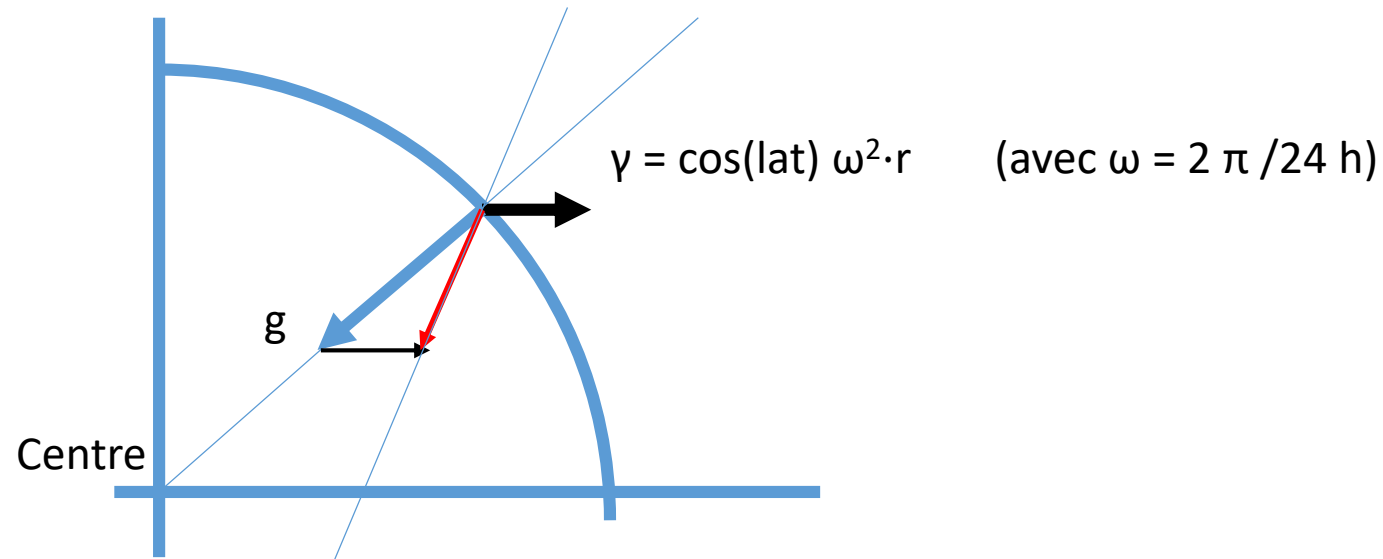
$$R = \begin{pmatrix} u_x^2(1-c) + c & u_x u_y(1-c) - u_z s & u_x u_z(1-c) + u_y s \\ u_x u_y(1-c) + u_z s & u_y^2(1-c) + c & u_y u_z(1-c) - u_x s \\ u_x u_z(1-c) - u_y s & u_y u_z(1-c) + u_x s & u_z^2(1-c) + c \end{pmatrix}$$

# Détermination de l'axe vertical: pesanteur

- Par définition (conférence des poids et mesures de 1901) la valeur normale de la pesanteur terrestre est  $g_n = 9,806\,65 \text{ m/s}^2$  d'où la valeur de 9,81 utilisée en général dans les calculs.
- Elle est égale à la pesanteur à la latitude de  $45^\circ$  et au niveau de la mer.
- Il faut lui ajouter une différence due à la force centrifuge. La formule générale est:
  - $g = 9,780318 \times (1 + 5,3024 \times 10^{-3} \times \sin^2(\text{lat}) - 3,15 \times 10^{-7} \times \text{altitude})$
- Au niveau du sol elle varie donc de 9,7803 à 9,8321 au niveau de la mer (écart 0,5%)
- Des variations naturelles dues à la densité des sols s'ajoutent à ces chiffres

Bon à savoir:

**En dehors des pôles et de l'équateur la verticale ne passe pas par le centre de la terre**



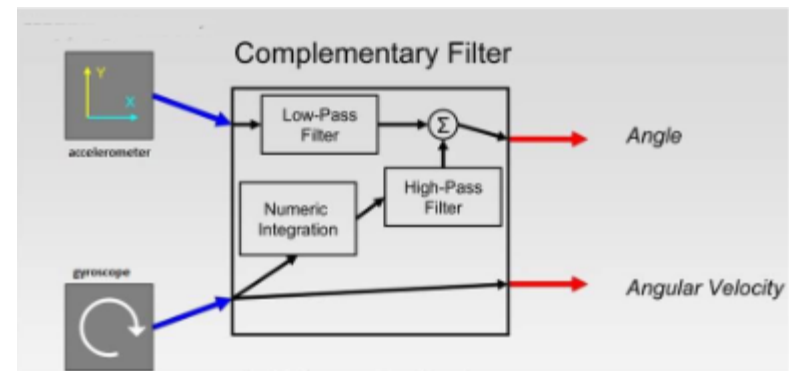
# Utilisation de la pesanteur

- Nous disposons de trois données d'accélération  $x, y$  et  $z$
- L'accélération propre du mobile s'ajoute à l'accélération de la pesanteur.
  - Le poids est une accélération qui compense la pesanteur: Le sol nous pousse vers le haut en permanence.
  - Pour être en apesanteur  $\Rightarrow$  Vol parabolique (dont cas particulier de la chute libre)
- Si on mesure une valeur d'accélération inférieure à  $9,7803 \text{ ms}^{-2}$  ou supérieure à  $9,8321 \text{ ms}^{-2}$  c'est qu'on accélère.
- Si on n'accélère pas, on peut normaliser  $(g_x, g_y, g_z)$ , c'est-à-dire diviser par racine  $(g_x^2 + g_y^2 + g_z^2)$  et en déduire l'axe de pesanteur (verticale)

# Alignement des axes

- Tout ce qui précède suppose bien évidemment que la centrale a été parfaitement alignée avec les axes du mobile et qu'elle est rigidement liée à celui-ci sans aucun jeu
  - Remarque => une fixation élastique est possible et agira comme un filtre, mais elle doit être obligatoirement amortie. Toute oscillation posera problème.
- Si ce n'est pas le cas, il faudra calibrer la centrale et calculer les matrices de rotation correspondantes pour aligner ses axes
- En pratique on aligne toujours les axes d'une centrale et on en profite pour la calibrer.

# Et si on accélère?



Complementary filter process schematic (SegBot, 2014)

- Si il existe un vecteur accélération il va falloir l'évaluer.
- Pour cela nous allons utiliser les données fournies par les gyroscopes dont disposent l'IMU (voir figure)
  - Les gyroscopes mesurent les vitesses de rotation autour des axes de la centrale
  - A partir d'une position initiale l'intégration des données de rotation permet de calculer l'orientation des axes
  - La dérive des mesures est compensée par des filtrages lents utilisant l'attitude moyenne
  - Pour des mobiles au sol, on recalcule nos dérives à chaque arrêt du mobile

# Algorithmes d'attitude

- Pour cela la solution est d'utiliser un algorithme de minimisation d'erreur, en général un **filtre de Kalman** qui va nous permettre d'estimer le vecteur accélération instantané et par intégration les axes du mobile.
- d'une façon générale chaque fournisseur d'ARHS va utiliser un algorithme propriétaire optimisé pour sa centrale.
- Des algorithmes éprouvés existent. De nombreux autres en ont été dérivés pour des applications spécifiques, ou des matériels spécifiques.
  - Filtre de Mahony
  - Filtre de Madwick
  - ../..

# Filtres de Mahony et de Madgwick

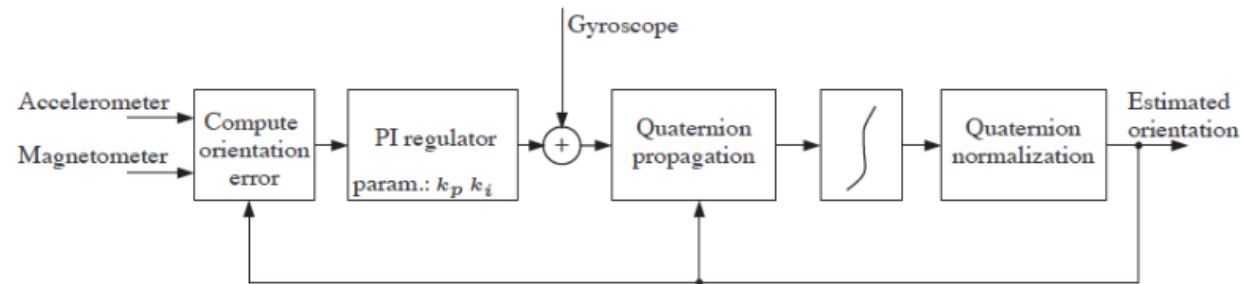


Fig. 2. Block diagram of Mahony Filter [16]

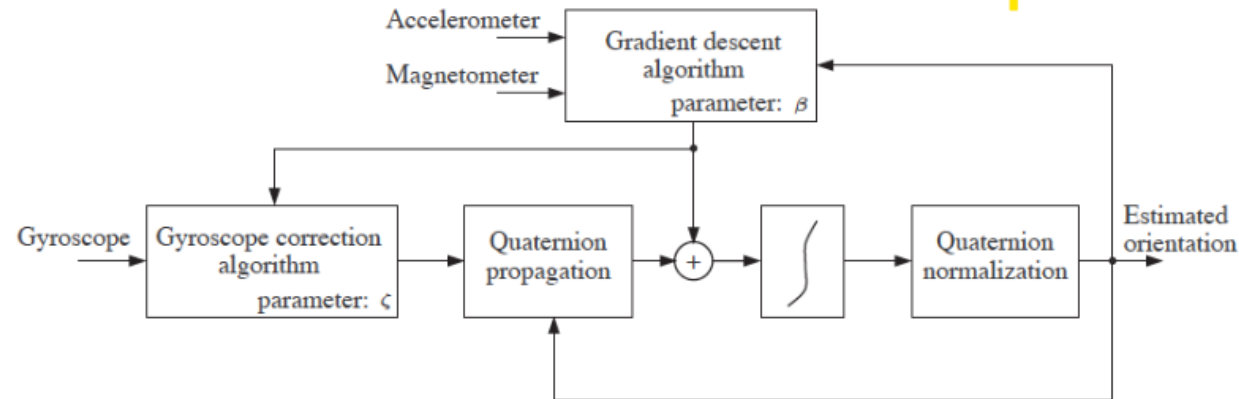
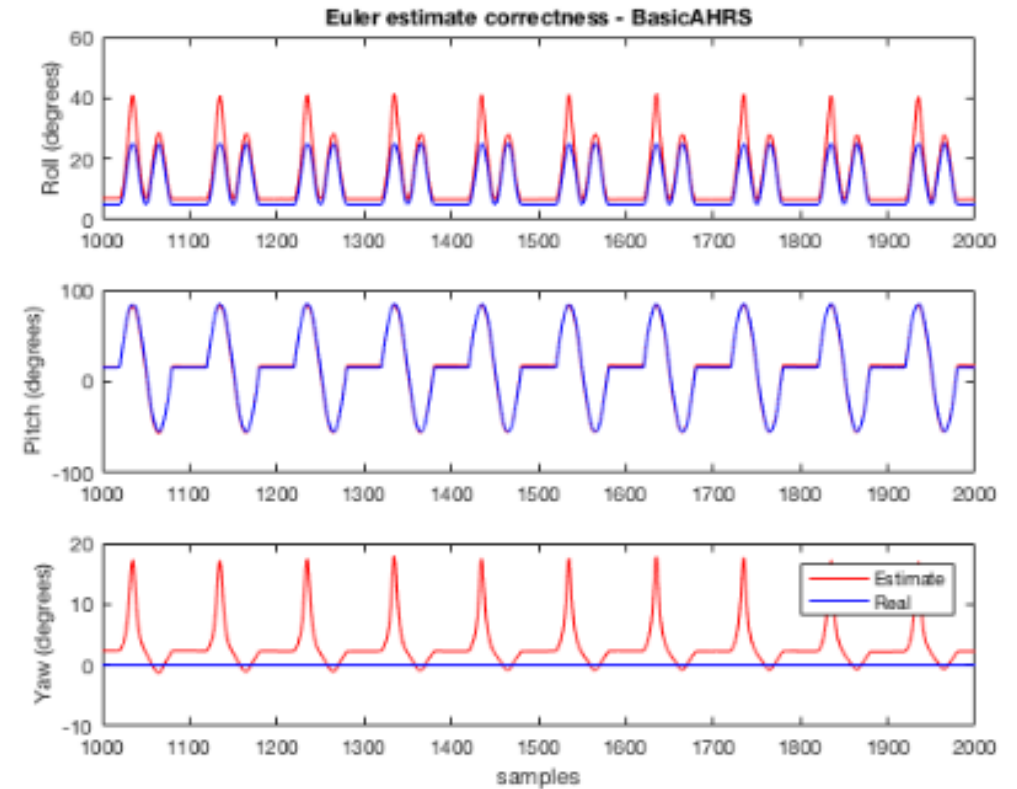
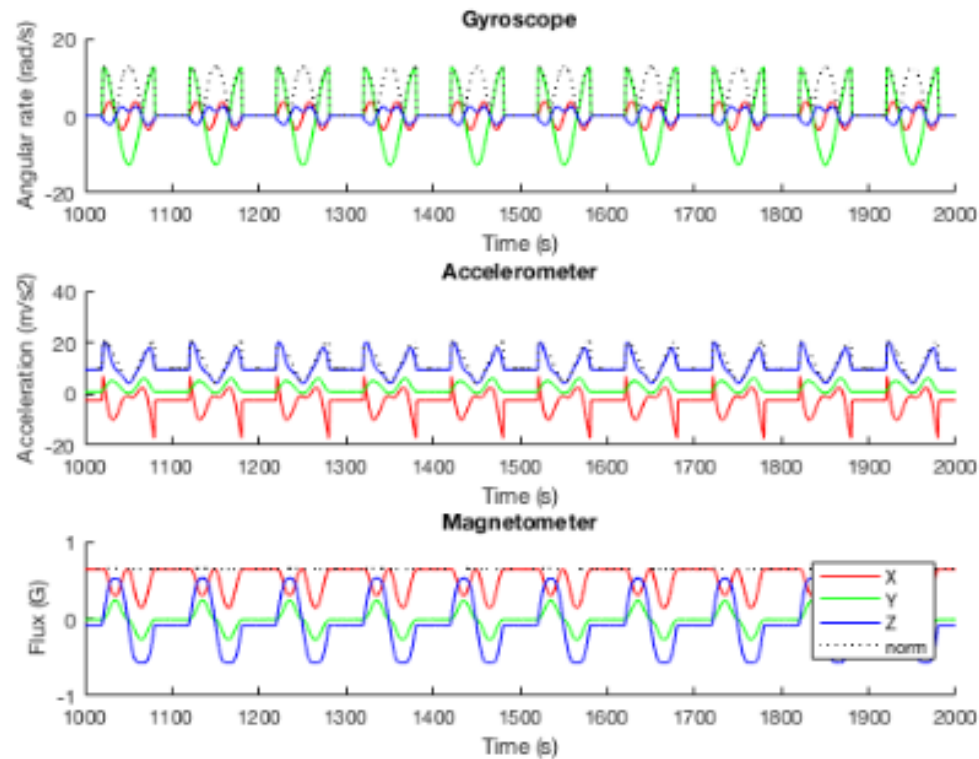
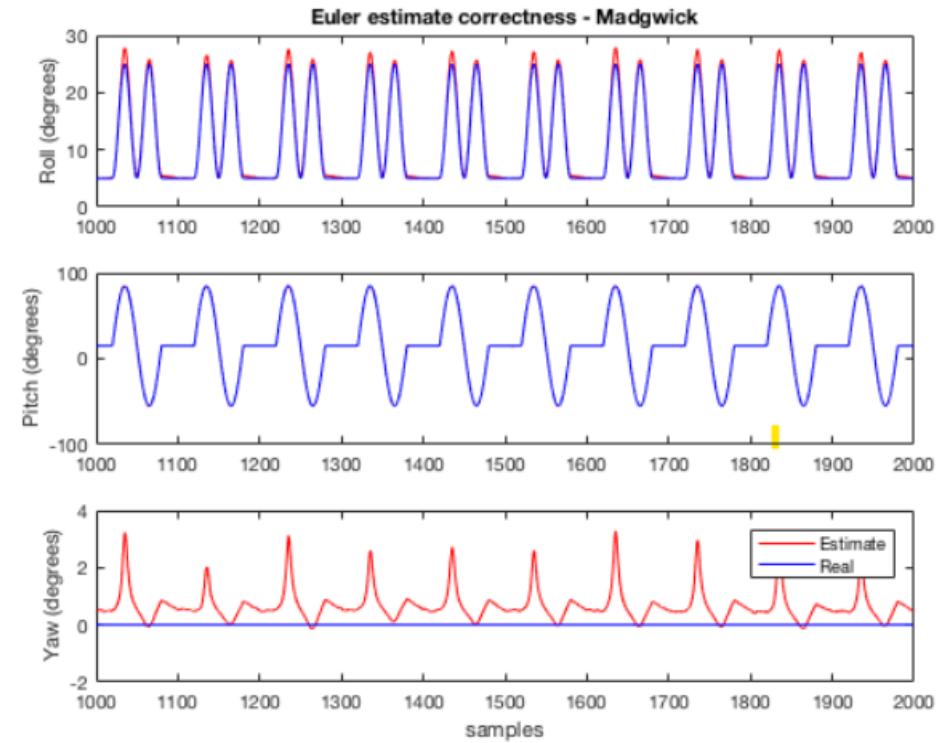
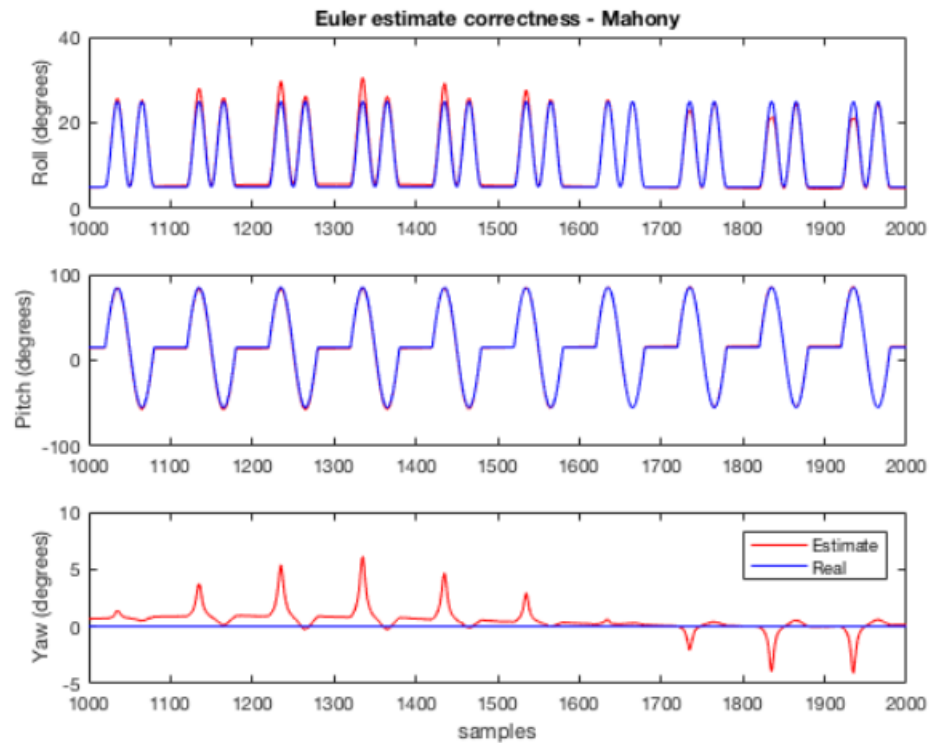


Fig. 3. Block diagram of Madgwick Filter [16]

# Comparaison: données de référence



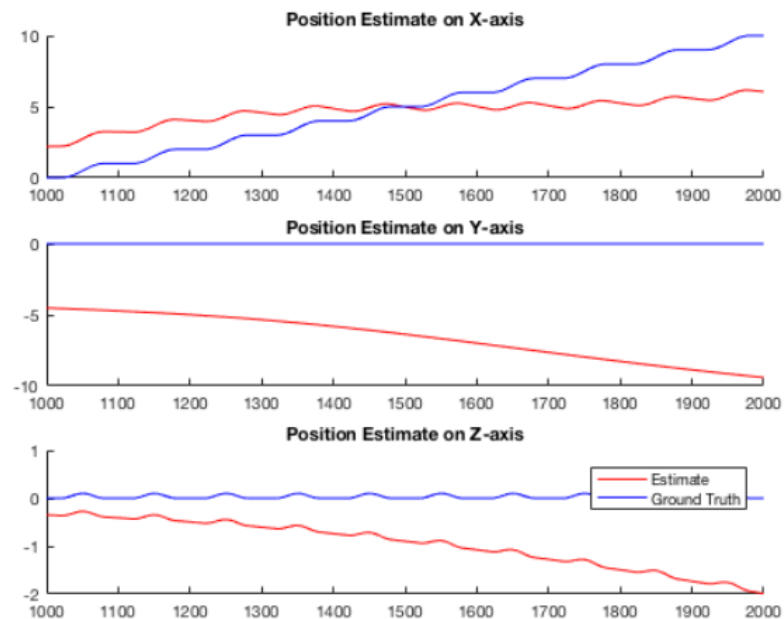
# Performance Manhony et Madgwick



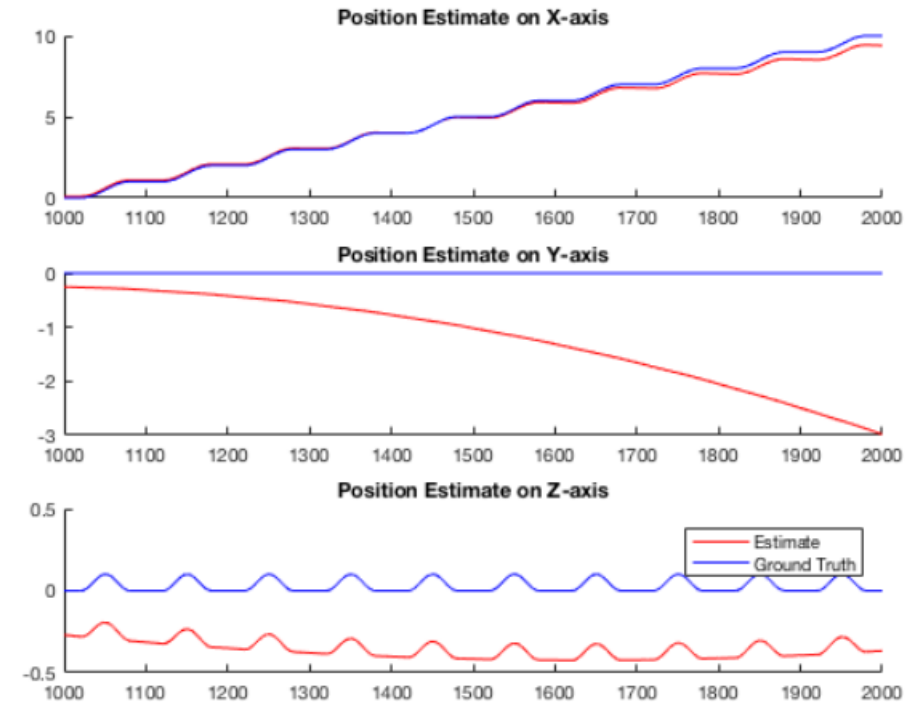
AHRS	Execution time (s)
Basic	4.1083
Madgwick	3.3308
Mahony	3.1663

# Intégration Manhony et Madgwick (dead reckoning)

## Mahony (sans gyro)



## Madgwick (avec gyro)



Tendances actuelles

# Utilisation du traitement d'image

## Airbus Dragonfly Demonstrator



<https://www.youtube.com/watch?v=IOAQkAGxWAE>

# Gravimètres à atomes froids

