

# Fusion de mesures inertielles pour l'estimation de l'attitude et des accélérations propres

HASSEN FOURATI<sup>1</sup>, LISSAN AFILAL<sup>1</sup>, NOUREDDINE MANAMANNI<sup>1</sup>, YVES HANDRICH<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CReSTIC, URCA, EA 3804 – Université de Reims Champagne-Ardenne  
UFR SEN, Moulin de la Housse Bat 12, 51687 Reims Cedex 2 FRANCE

<sup>2</sup> DEPE-CNRS, UMR 7178 – Université Louis Pasteur,  
23, rue Becquerel, Bat 60, 67087 Strasbourg Cedex 2, FRANCE

<sup>1</sup> {PreNom.Nom}@univ-reims.fr, <sup>2</sup> yves-jean.handrich@c-strasbourg.fr

**Résumé** — Ce travail traite du double problème de l'estimation d'attitude représentée sous forme de quaternion ainsi que de la reconstruction de l'accélération linéaire d'un corps rigide en mouvement. L'objectif étant d'appliquer l'approche proposée dans le domaine de l'écophysiologie animale (localisation et monitoring des activités de l'animal sauvage 'Bio-logging'). Généralement pour ce type d'application, les mesures d'attitude sont obtenues en utilisant des capteurs inertiels à base de microsystèmes électromécaniques (M.E.M.S.) tels que les accéléromètres et les magnétomètres, mais à basses fréquences. Dans cet article, l'estimation est basée sur la fusion non linéaire de données inertielles provenant d'une triade orthogonale composée d'un accéléromètre triaxial, un magnétomètre triaxial, et un gyromètre triaxial. Nous proposons une approche qui combine un observateur non linéaire et un Algorithme des Moindres Carrés Itératifs (A.M.C.I.) pour estimer la meilleure attitude et les accélérations propres du corps rigide. Au cours de cette estimation, les mesures gyrométriques sont corrigées de leur dérive intrinsèque puis réutilisées dans la phase d'estimation. Une étape de correction est introduite pour corriger l'effet de l'accélération subi par le corps rigide. Finalement, quelques simulations et résultats expérimentaux préliminaires sont fournis pour montrer l'efficacité de l'algorithme proposé.

**Mots clés** — Fusion de capteurs, estimation de l'attitude, observateur non linéaire, Algorithme des Moindres Carrés Itératifs, M.E.M.S, Bio-logging.

## I. INTRODUCTION

L'estimation de l'orientation ou de l'attitude d'un corps rigide est traitée depuis les années 60 avec un intérêt grandissant aussi bien pour les communautés scientifiques de l'aéronautique (M.A.V.), de l'aérospatiale, de la robotique ou de la biomécanique. Cet article traite la même problématique appliquée en Bio-logging [1], qui s'intéresse à l'étude du comportement animal. Notre étude se situe dans le cadre d'un projet qui vise à développer un microsystème embarqué de navigation à l'estime appliqué à l'étude du comportement locomoteur et de la dépense énergétique chez l'homme et l'animal sauvage. Cette étude emploie des systèmes électroniques miniaturisés [2] pour enregistrer les données physiques et biologiques (attitude, accélération, position, température...). Ce travail constitue la première étape du projet et traite de l'estimation d'attitude d'un corps rigide dans l'espace pour son application dans le domaine du Bio-logging.

La plupart des applications traitant ce problème exigent des systèmes très miniaturisés permettant une implémentation aisée et une faible consommation en puissance. La prolifération récente des capteurs inertiels basés sur la technologie de microsystèmes électromécaniques (M.E.M.S) a

permis de concevoir de tels systèmes de mesure d'attitude. L'estimation d'attitude basée sur l'utilisation de ces capteurs inertiels (inclinomètre, accéléromètre, gyromètre ou magnétomètre) est généralement déterminée par trois méthodes. La première consiste à intégrer la vitesse angulaire instantanée mesurée par les gyromètres [3]. Cette approche nécessite l'utilisation de gyromètres précis qui sont encombrants et coûteux. La deuxième méthode est basée sur la fusion des mesures obtenues avec les accéléromètres et les magnétomètres [4], [5], [6]. Le principe est basé sur la mesure combinée du champ de pesanteur (accéléromètres) et celui du champ magnétique terrestre (magnétomètres). Cette solution est relativement simple mais elle n'est pas idéale lors d'un mouvement dynamique où l'accélération non gravitationnelle affecte la mesure de la pesanteur, ce qui génère des erreurs dans l'estimation de l'attitude. La troisième méthode utilise la technique de fusion de mesures à partir des trois types de capteurs. Elle est basée sur un estimateur non linéaire du type filtre de Kalman [7], [8], [9] (voir [10] pour plus de détails). Néanmoins, son inconvénient principal réside dans l'approximation linéaire d'un modèle non linéaire. D'autres estimateurs utilisant des observateurs non linéaires peuvent aussi être appliqués [11], [12], [13]. Dans ce cas, l'observateur estime l'attitude représentée par un quaternion unitaire ainsi que le biais inhérent aux gyromètres. Ce biais supposé constant est en réalité légèrement variable au cours du temps. Une deuxième approche non linéaire est basée sur l'estimation de la matrice de rotation en utilisant un filtre complémentaire [14]. Son principal inconvénient est la complexité engendrée par la reconstruction de neuf composantes de la matrice de rotation. Notons que dans tous ces travaux, l'accélération linéaire que subi l'accéléromètre est supposée négligeable. Cette situation n'est pas réaliste lorsque le corps rigide est en mouvement dynamique. A notre connaissance, le seul travail qui a porté une attention réelle à ce problème est abordé dans [15]. Dans ce travail, malgré la dérive du calcul de l'angle de lacet, liée à l'absence des données magnétométriques à cause du manque de capteurs complémentaires tels que les magnétomètres, les auteurs assurent de pouvoir fournir des mesures de vitesse angulaire sans dérive [15].

L'idée principale de notre travail est de combiner une approche basée sur un observateur non linéaire avec un Algorithme des Moindres Carrés Itératifs [16]. Ici, une méthode permettant de résoudre le problème de Wahba [2], [6] est employée afin de fournir un quaternion utilisable comme mesure pour l'observateur non linéaire. Cet algorithme permet d'estimer le quaternion d'attitude et les accélérations linéaires d'un corps rigide en mouvement en tenant compte de la variation du biais dans les gyromètres. Notons que les données

inertielles utilisées proviennent d'une triade orthogonale composée d'un accéléromètre triaxial, un magnétomètre triaxial, et un gyromètre triaxial. Nous présentons également une première évaluation expérimentale de l'algorithme avec les mesures d'une station inertielle.

Ce papier est organisé comme suit : La section II explicite la représentation de l'attitude et les systèmes de coordonnées considérés. La section III décrit le modèle cinématique d'un corps rigide en rotation et ceux des capteurs inertiels. La structure de l'observateur non linéaire d'attitude est ensuite détaillée dans la section IV. Après avoir rappelé quelques notions sur la détermination d'attitude à partir de vecteurs d'observation dans la section V, la section VI présente l'approche proposée pour l'estimation de l'attitude et de l'accélération linéaire en tenant compte du biais dans les gyromètres. La section VII est consacrée à la simulation et aux premiers résultats expérimentaux obtenus.

## II. REPRESENTATION DE L'ATTITUDE

Dans la littérature, il existe une variété de forme de représentations d'attitude. Parmi ces représentations, on peut distinguer celles basées sur : les angles d'Euler ou la matrice de rotation, ou bien encore les quaternions. Dans ce travail, nous avons opté pour les quaternions car c'est la forme la plus simple à programmer et la plus efficace en temps de calcul. Notons également que l'utilisation des quaternions permet de s'affranchir du problème de singularité présent avec les angles d'Euler par exemple.

Un quaternion unitaire est un nombre hypercomplexe. Il est composé d'un vecteur unitaire  $\vec{u}$ , dit axe d'Euler et d'un angle de rotation  $\phi$  autour de cet axe. Une description détaillée du formalisme des quaternions est donnée dans [17], [18].

Un quaternion unitaire est défini par :

$$q = q_0 + q_1i + q_2j + q_3k = \left[ \cos \frac{\phi}{2} \quad \vec{u} \sin \frac{\phi}{2} \right]^T = \begin{pmatrix} q_0 \\ \vec{q} \end{pmatrix} \in \mathcal{Q} \quad (1)$$

avec  $q_1$ ,  $q_2$ , et  $q_3$  des nombres réels et  $i$ ,  $j$ , et  $k$  les composantes du vecteur  $\vec{u}$ .

Définissons également la multiplication de deux quaternions

$$q_a = \begin{bmatrix} q_{a0} & \vec{q}_a^T \end{bmatrix}^T \text{ et } q_b = \begin{bmatrix} q_{b0} & \vec{q}_b^T \end{bmatrix}^T \text{ par :}$$

$$q_a \otimes q_b = \begin{pmatrix} q_{a0} & -\vec{q}_a^T \\ \vec{q}_a & I_{3 \times 3} q_{a0} + [\vec{q}_a^\times] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_{b0} \\ \vec{q}_b \end{pmatrix} \quad (2)$$

Ainsi, la matrice de rotation  $M$  s'exprime en termes de quaternion par la formule de Rodrigues suivante [18] :

$$M(q) = (q_0^2 - \vec{q}^T \vec{q}) I_{3 \times 3} + 2(\vec{q} \vec{q}^T - q_0 [\vec{q}^\times]) \quad (3)$$

où  $[\vec{q}^\times]$  représente un tenseur antisymétrique associé au vecteur  $q$ , il est défini par :

$$[\vec{q}^\times] = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix}^\times = \begin{pmatrix} 0 & -q_3 & q_2 \\ q_3 & 0 & -q_1 \\ -q_2 & q_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

d'où

$$M(q) = \begin{pmatrix} 2(q_0^2 + q_1^2) - 1 & 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_0^2 + q_2^2) - 1 & 2(q_0q_1 + q_2q_3) \\ 2(q_0q_2 + q_1q_3) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) & 2(q_0^2 + q_3^2) - 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Cette matrice de rotation appartient au groupe spécial orthogonal, représenté par  $SO(3)$  et défini par :

$$SO(3) = \{ M / M \in \mathbb{R}^{3 \times 3}, M^T M = I_{3 \times 3}, \det(M) = 1 \} \quad (6)$$

Grâce à l'algèbre des quaternions, on peut exprimer la rotation d'un corps rigide dans l'espace de deux façons.

Soit  $x_q$  et  $y_q$  deux quaternions associés aux vecteurs  $\vec{x}$  et  $\vec{y}$ , alors :

$$x_q = \begin{bmatrix} 0 & \vec{x}^T \end{bmatrix}^T ; \quad y_q = \begin{bmatrix} 0 & \vec{y}^T \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

1. Les deux quaternions sont liés par la relation suivante :

$$x_q = q \otimes y_q \otimes q^{-1} \quad (8)$$

2. L'opération utilisant l'équation (12) est équivalente à une multiplication par une matrice de rotation :

$$\vec{x} = M(q) \vec{y} \quad (9)$$

L'étude du mouvement d'un corps rigide dans l'espace nous conduit à définir deux systèmes de coordonnées comme ceux représentés dans la Fig. 1.

1.  $G(x_g, y_g, z_g)$  : Système de coordonnées inertielles fixe lié à la terre, tangent à sa surface (NED: North, East, Down).
2.  $S(x_s, y_s, z_s)$  : Système de coordonnées inertielles mobiles attachées au corps. Souvent l'origine de ce repère coïncide avec le centre de gravité du corps mobile. Les axes de ce repère coïncident aussi avec les principaux axes d'inertie du corps rigide.

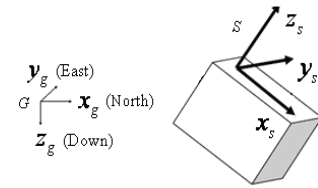


Fig. 1. Définition des systèmes de coordonnées

## III. MODELES UTILISES

L'application Bio-Logging considérée traite du problème d'estimation d'attitude et de l'accélération linéaire d'un animal se déplaçant dans son milieu naturel. Cela permettra de décrire son comportement au cours de son mouvement quotidien. Aussi le modèle cinématique d'un corps rigide peut être employé pour décrire un animal équipé d'une station inertielle composée d'un accéléromètre triaxial, d'un gyromètre triaxial et d'un magnétomètre triaxial. L'ensemble de ces capteurs est mis de telle façon qu'il soit le plus proche possible du centre de gravité du mobile (animal).

### A. Modèle cinématique d'un corps rigide

On considère que  $\vec{\omega} = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$  est un vecteur de vitesse angulaire du corps rigide mesuré dans le repère  $S$ .

L'équation cinématique exprimée en termes de quaternion unitaire a été initialement définie dans [18]. Elle décrit la relation entre la variation de l'attitude d'un corps rigide et la vitesse angulaire. Elle est représentée par l'équation suivante:

$$\begin{pmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{\vec{q}} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -q^T \\ I_3 q_0 + [\vec{q}^\times] \end{pmatrix} \vec{\omega} \quad (10)$$

### B. Modèles de mesure des capteurs inertiels

Dans cette section, on rappelle les différents modèles mathématiques des capteurs inertiels utilisés dans ce travail. Ces capteurs fonctionnent sur la base d'un microsystème électromécanique. Une étude détaillée de ces capteurs est donnée dans [19] et [20].

1. Les accéléromètres : Un accéléromètre à trois axes mesure la force spécifique  $\vec{f}$  dans le repère mobile  $S$  tel que :

$$\vec{f} = (f_x, f_y, f_z) = M(q) \vec{v} + \vec{\delta}_A \quad (11)$$

avec  $\vec{v} = (\vec{a} - \vec{g})$ , où  $\vec{g} = [0 \ 0 \ g]^T$ ,  $g = 9.81 m/s^2$  et  $\vec{a} \in \mathfrak{R}^3$  représentent respectivement le vecteur de gravité, la constante gravitationnelle et le vecteur accélération propre du corps. Les vecteurs  $\vec{a}$  et  $\vec{g}$  sont exprimés dans le repère fixe  $G$ .  $\vec{\delta}_A \in \mathfrak{R}^3$  représente un vecteur de bruit supposé indépendant, blanc et Gaussien tel que  $E[\delta_A] = 0$  et  $E[\delta_A^2] = \sigma^2$ . La matrice  $M(q)$  est une matrice de rotation exprimée en fonction du quaternion  $q$ . Ce dernier caractérise l'attitude du corps par rapport au repère inertiel  $G$ . On procède alors à une normalisation du vecteur  $\vec{g}$  pour permettre une meilleure manipulation des mesures. Ainsi  $\vec{g}$  devient :

$$\vec{g} = [0 \ 0 \ g]^T = \frac{[0 \ 0 \ 9.81]}{\sqrt{9.81^2}} = [0 \ 0 \ 1]^T \quad (12)$$

2. Les gyromètres : Un gyromètre à trois axes mesure la vitesse angulaire  $\vec{\omega}_G$  dans le repère mobile  $S$  tel que :

$$\vec{\omega}_G = \vec{\omega} + \vec{b} + \vec{\delta}_G \quad (13)$$

où  $\vec{\omega} = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$  représente la vitesse angulaire réelle dans le repère mobile  $S$  et  $\vec{\delta}_G$  est un bruit blanc Gaussien.  $\vec{b}$  est une fonction qui varie lentement dans le temps et qui représente le biais du gyromètre. Elle est modélisée par un processus de Gauss-Markov [19] et s'écrit :

$$\dot{\vec{b}} = -N^{-1} \vec{b} + \vec{\delta}_b \quad (14)$$

avec  $N = \tau I_3$  est une matrice diagonale construite à partir d'une constante de temps  $\tau$  et  $\vec{\delta}_b$  est un bruit blanc Gaussien.

3. Les magnétomètres : Un magnétomètre à trois axes mesure la direction du champ magnétique terrestre dans le repère mobile  $S$  tel que :

$$\vec{h} = T(q) \vec{m} + \vec{\delta}_h \quad (15)$$

avec

$$\vec{m} = [m_x \ 0 \ m_z]^T = [0.5 \cos(60) \ 0 \ 0.5 \sin(60)] \quad (16)$$

$\vec{m}$  représente le champ magnétique mesuré dans le repère inertiel fixe  $G$ . Un modèle réaliste du champ magnétique considère un vecteur avec un angle d'inclinaison  $\theta = 60^\circ$  et de norme  $\|\vec{m}\| = 0.5$  Gauss. On procède aussi à une normalisation du vecteur  $\vec{m}$ . Ainsi  $\vec{m}$  devient :

$$\vec{m} = \frac{[0.5 \cos(60) \ 0 \ 0.5 \sin(60)]}{\sqrt{0.5^2 \cos^2(60) + 0.5^2 \sin^2(60)}} = [0.5 \ 0 \ \frac{\sqrt{3}}{2}]^T \quad (17)$$

$\vec{\delta}_h \in \mathfrak{R}^3$  est un bruit blanc Gaussien.

## IV. SYNTHÈSE DE L'OBSERVATEUR POUR L'ESTIMATION DE L'ATTITUDE ET DU BIAIS

La dynamique d'un corps rigide dans lequel un accéléromètre triaxial, un magnétomètre triaxial et un gyromètre triaxial sont montés en triade orthogonale, est modélisée par :

$$\mathfrak{S} : \begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{q} \\ \dot{\vec{b}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \Gamma(q) \vec{\omega} \\ -N^{-1} \vec{b} + \vec{\delta}_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \Gamma(q) [\vec{\omega}_G - \vec{b} - \vec{\delta}_G] \\ -N^{-1} \vec{b} + \vec{\delta}_b \end{pmatrix} \\ y = q_m \end{cases} \quad (18)$$

où

$$\Gamma(q) = \begin{pmatrix} -\vec{q}^T \\ I_{3 \times 3} q_0 + [\vec{q}^\times] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_3 & q_0 & -q_1 \\ -q_2 & q_1 & q_0 \end{pmatrix} \quad (19)$$

$q \in \mathfrak{R}^4$  et  $b \in \mathfrak{R}^3$  sont les états,  $q_m \in \mathfrak{R}^4$  est la sortie du système qui peut être estimée à partir de la fusion des mesures des accéléromètres et des magnétomètres. Cette fusion emploie les vecteurs d'observation pour estimer  $q_m$ . L'estimateur considéré dans notre cas est de type observateur. Il a été initialement proposé afin d'estimer la vitesse angulaire et le moment angulaire d'un rigide corps dans l'espace [11]. La convergence de cet observateur est prouvée dans [11]. Néanmoins dans ce cas se base sur un autre modèle cinématique pour décrire la variation de l'attitude en fonction de la vitesse angulaire. Nous cherchons plutôt ici à estimer le quaternion d'attitude, le biais dans les gyromètres et les accélérations linéaires.

Ainsi, l'Observateur Non Linéaire d'Attitude (O.N.L.A.) possède la forme suivante :

$$(O.N.L.A.) : \begin{cases} \dot{\hat{q}} = \frac{1}{2} \Gamma(\hat{q}) [\vec{\omega}_G - \hat{\vec{b}} + k_q \vec{q}_{er}] \\ \dot{\hat{\vec{b}}} = -N^{-1} \hat{\vec{b}} - k_b \vec{q}_{er} \end{cases} \quad (20)$$

$\hat{q}$  et  $\hat{\vec{b}}$  représentent les états estimés.  $k_q$ ,  $k_b \in \mathfrak{R}$  sont des constantes positives qui représentent les gains de l'observateur.  $N^{-1} \in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$  est une matrice diagonale construite à partir d'une

constante de temps  $\tau$  et  $\vec{q}_{er}$  représente la partie vectorielle du quaternion d'erreur.  $\vec{q}_{er}$  est calculé à partir du produit de quaternion entre le quaternion mesuré  $q_m$  et la solution de l'équation (20) :

$$q_{er} = \hat{q}^{-1} \otimes q_m = \vec{q} \otimes q_m = \begin{bmatrix} q_{er0} & \vec{q}_{er}^T \end{bmatrix} \quad (21)$$

L'avantage de cette méthode est que l'algorithme ne nécessite pas de connaissance d'un modèle du système. Par conséquent, le calcul ne dépend pas de la masse du corps sur lequel est placé le capteur ni de sa matrice d'inertie par exemple mais seulement des modèles de mesures des capteurs. Ainsi, il peut être appliqué à l'estimation de l'attitude de différents types de systèmes (les animaux dans notre cas, les drones, animation virtuelle, biomécanique...).

## V. MODELE DE MESURE DU QUATERNION $q_m$

On présente dans cette section l'algorithme de détermination d'attitude permettant d'estimer  $q_m$  à partir des vecteurs d'observation (fusion de mesures à partir des accéléromètres et des magnétomètres) utilisés dans [2], [6]. Cette méthode est considérée comme une solution au problème de Wahba [21]. L'algorithme de détermination d'attitude emploie le vecteur champ magnétique terrestre  $\vec{h}$  et le vecteur champ de pesanteur  $\vec{g}$  comme vecteurs d'observation à partir desquels l'attitude est déduite. Lors d'un mouvement statique ou quasi-statique, l'accéléromètre mesure la projection du champ de pesanteur. En fait, les accéléromètres sont sensibles non seulement au champ de pesanteur mais également aux accélérations linéaires du corps et aux vibrations.

Dans ce travail, on suppose que le corps peut être soumis à des accélérations faibles ou importantes au cours de son mouvement. Alors, si l'accélération linéaire  $\vec{a}$  n'est pas négligeable, l'estimation de  $q_m$  est éloignée du vecteur d'attitude vrai. Ainsi, il est nécessaire d'effectuer une minimisation de l'effet de l'accélération linéaire lorsque le corps est soumis à des accélérations importantes :

1. Initialement, on estime les accélérations linéaires en utilisant l'équation suivante :

$$\vec{a} = M(\hat{q})^T (\vec{f} - M(\hat{q})\vec{g}) \quad (22)$$

2. Ensuite, il est possible de calculer la projection du champ de pesanteur dans le repère  $S$  en utilisant la différence entre  $\vec{f}$  et  $\vec{a}$ .
3. Une fois que la projection du champ de pesanteur est obtenue, on l'exploite avec les mesures issues des magnétomètres pour calculer  $q_m$ . Pour cela, on utilise l'algorithme des moindres carrés itératifs [6]. On suppose que  $\hat{q}_m$  est le quaternion estimé et  $q_e$  est le quaternion d'erreur. La solution à ce problème d'estimation de l'attitude est réalisée selon la procédure suivante :

*Procédure de l'Algorithme des Moindres Carrés Itératifs (A.M.C.I.) :*

1. Mesurer  $\vec{f}$  et  $\vec{h}$  dans  $S$ .
2. Initialiser  $\hat{q}_m = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$  et  $q_e = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ .
3. Calculer le vecteur  $\vec{g}^n = \hat{q} \otimes \vec{g}^b \otimes \hat{q}^*$  et même chose pour  $\vec{h}^n$ . On note que  $\vec{g}^n$  est la projection du champ de

pesanteur dans  $G$  et  $\vec{h}^n$  représente le champ magnétique mesuré aussi dans  $G$ .

4. Calculer l'erreur de navigation  $\delta \hat{g}^n = \vec{g}^n - \hat{g}^n$  et même chose pour  $\delta \hat{h}^n$  pour former  $z = \begin{bmatrix} \delta \hat{h}^n & \delta \hat{g}^n \end{bmatrix}^T$ .
5. Calculer la matrice d'observation :
$$O = \begin{bmatrix} \left[ -2 \begin{bmatrix} \vec{h}^n \end{bmatrix}^\times \right]^T & \left[ -2 \begin{bmatrix} \vec{g}^n \end{bmatrix}^\times \right]^T \end{bmatrix}^T$$
6. Calculer le pseudo-inverse  $O^* = \begin{bmatrix} O^T & O \end{bmatrix}^{-1} O^T$ .
7. Mise à jour du quaternion d'erreur  $q_e = \alpha \begin{bmatrix} O^T & O \end{bmatrix}^{-1} O^T z$ .
8. Mise à jour du quaternion estimé  $\hat{q}_m(+) = \hat{q}_m(-) \otimes q_e$ .
9. Retourner à l'étape 3, répéter jusqu'à la convergence vers une valeur stable du quaternion  $q_m$ .

## VI. METHODE D'ESTIMATION DE L'ATTITUDE, DU BIAIS ET DE L'ACCELERATION LINEAIRE

L'estimation d'attitude et du biais lorsque le corps rigide est dans le cas quasi-statique ou quand il est soumis à des accélérations linéaires importantes se base sur la méthodologie suivante. Le corps est supposé être immobile pendant les cinq premières secondes. Ceci permet de travailler dans le cas d'un mouvement quasi-statique. Aucune correction aux mesures d'accéléromètre ne sera faite puisque les mesures du capteur reflètent seulement la projection du champ de pesanteur, ce qui permet à l'observateur de converger vers les vraies valeurs à la fin de cette période (au bout de 5s). Ensuite, n'importe quelle accélération subie par le corps peut être estimée, puisqu'on est certain que l'attitude a été préalablement correctement estimée. Afin de ne pas répéter cette étape de correction des mesures de l'accéléromètre à chaque pas d'échantillonnage, même si le corps est statique, on procède à une étape de test sur les mesures indiquées par l'accéléromètre. Ce test est exprimé par la condition suivante [15] :

1. En présence des accélérations linéaires :

$$A(f_x, f_y, f_z) = |f_x^2 + f_y^2 + f_z^2 - 1| \geq \beta \quad (23)$$

2. En absence des accélérations linéaires :

$$A(f_x, f_y, f_z) = |f_x^2 + f_y^2 + f_z^2 - 1| \leq \beta \quad (24)$$

où  $\beta$  est un paramètre scalaire qui dépend du bruit présent dans l'accéléromètre. La structure de l'algorithme d'estimation est donnée dans la Fig. 2.

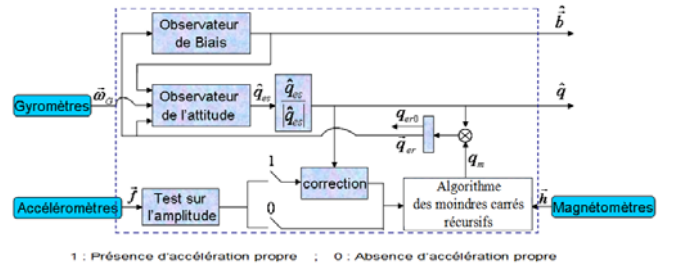


Fig. 2. Schéma fonctionnel de l'algorithme d'estimation

Cet algorithme est destiné à des calculs hors ligne pour avoir une durée plus longue de la batterie qui alimente le système en énergie. Une fois que l'animal est revenu à sa zone de départ (surtout pour les manchots), on récupère le système embarqué

et tout le calcul se fait par la suite en analysant l'ensemble les mesures enregistrées puis on applique l'approche proposée.

## VII. VALIDATION DE L'APPROCHE PROPOSEE

### 1. Résultats de simulation

Afin de montrer la performance de l'algorithme proposé, des simulations numériques sous MATLAB sont effectuées avec un mouvement le plus réaliste possible d'un corps rigide. Le mouvement considéré se compose d'une période où les accélérations linéaires sont nulles et d'une période où les accélérations linéaires sont importantes. Les mesures des différents capteurs sont générées au cours du temps avec une période d'échantillonnage de 100Hz, alors qu'un bruit blanc a été ajouté aux différentes mesures. On initialise l'algorithme de sorte que les conditions relatives à l'attitude (quaternion) et au biais soient loin des valeurs théoriques initiales (Tableau 1). Les gains d'observation sont choisis tels que  $k_q = 100$  et  $k_b = 200$ . La constante  $\alpha$  utilisée dans l'A.M.C.I pour fixer la vitesse de convergence est  $\alpha = 1/3$  et on choisit  $\tau = 100s$ . La convergence de l'A.M.C.I est obtenue à la fin de huit itérations. Les caractéristiques du bruit des différents capteurs inertiels sont récapitulées dans le Tableau 2.

TABLE. 1. CONDITIONS INITIALES

	Quaternion	Biais
Valeurs théoriques	$q(t_0) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$	$b(t_0) = [0 \ 0 \ 0]^T$
Valeurs pour l'observateur	$\hat{q}(t_0) = [0.7 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.8]^T$	$\hat{b}(t_0) = [-0.2 \ 0.5 \ 0.5]^T$

TABLE. 2. CARACTERISTIQUES DES DIVERS BRUITS DANS LES MESURES DE CAPTEURS

Capteurs	Paramètres	Ecart types	Unités
Accéléromètre	$\delta_A$	0.002	$m/s^2$
Magnétomètre	$\delta_h$	0.0007	$mgauss$
Gyromètre	$\delta_G$	0.01	$rad/s$
Biais	$\delta_b$	0.001	$rad/s$

Les résultats de simulation au bout de 10s sont illustrés par les Figs. 3 et 4. Ils correspondent respectivement à l'attitude estimée sous forme de quaternion et au biais variables estimés. Bien que l'observateur soit initialisé avec des conditions relatives à une attitude initiale aléatoire, on peut noter que le quaternion ainsi que le biais estimés convergent rapidement vers leurs valeurs théoriques.

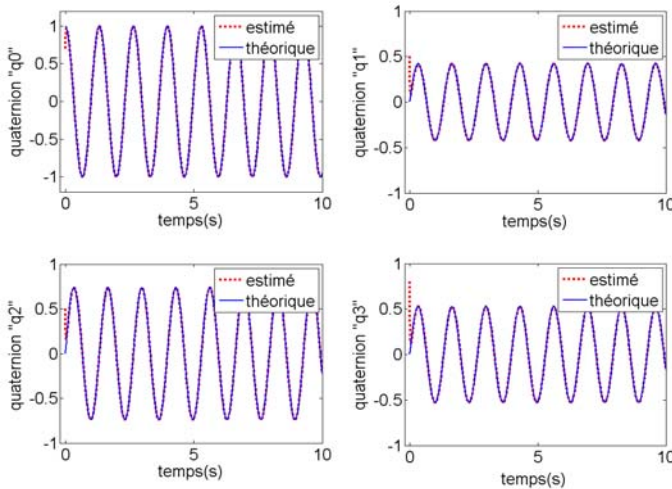


Fig. 3. Quaternion simulé et estimé.

Les courbes de la Fig. 5 représentent une fenêtre agrandie de celles de la Fig. 3, afin de juger de la performance de l'observateur. La Figure 6 illustre les accélérations linéaires simulées et estimées. Le mouvement considéré se compose d'une accélération linéaire nulle pendant 5s, puis d'une accélération importante pendant les 4s suivantes. On constate que l'algorithme proposé est capable d'estimer les accélérations théoriques.

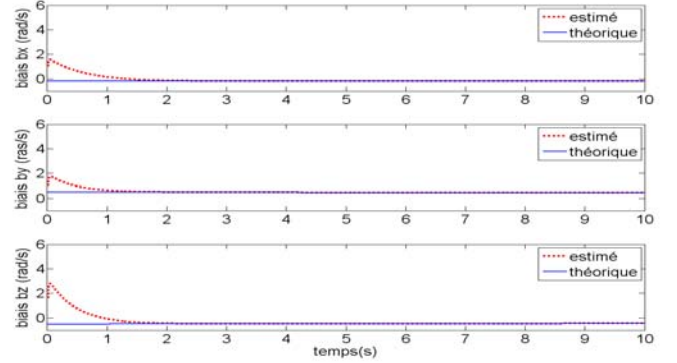


Fig. 4. Biais simulés et estimés.

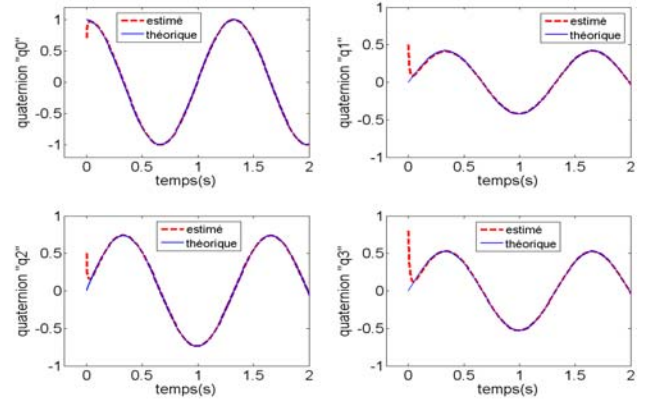


Fig. 5. Convergence de l'observateur.

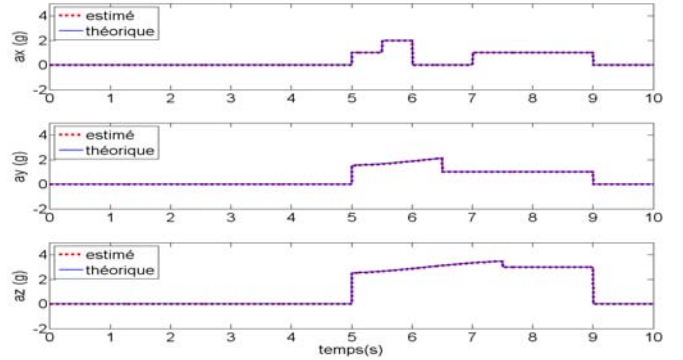


Fig. 6. Accélération linéaire simulé et estimé.

### 2. Résultats expérimentaux

Nous présentons dans cette section nos premiers résultats expérimentaux, pour un mouvement quasi-statique. Par conséquent pour cet essai, nous employons une station inertielle « MTi » de Xsens [22] afin d'avoir les trois types de mesure (accélération, vitesse angulaire et champ magnétique terrestre). En outre, cette station fournit les mesures relatives au quaternion d'attitude. Les expériences ont été réalisées comme suit : la centrale est fixée au bras d'une personne de telle façon que son centre de gravité et ses axes coïncident avec ceux du bras. Au début le bras est sans aucun mouvement pendant une petite période, puis on lui fait subir un mouvement lent et aléatoire dans l'espace de telle sorte à avoir des accélérations relativement faibles pendant le mouvement (entre

0.1 et 0.3g). Enfin, on retourne de nouveau à la position statique. La Figure 7 illustre le quaternion calculé par la centrale MTi et celui estimé par l'approche proposée. On note que l'algorithme est capable de reconstruire le mouvement réalisé lors d'une dynamique de rotation.

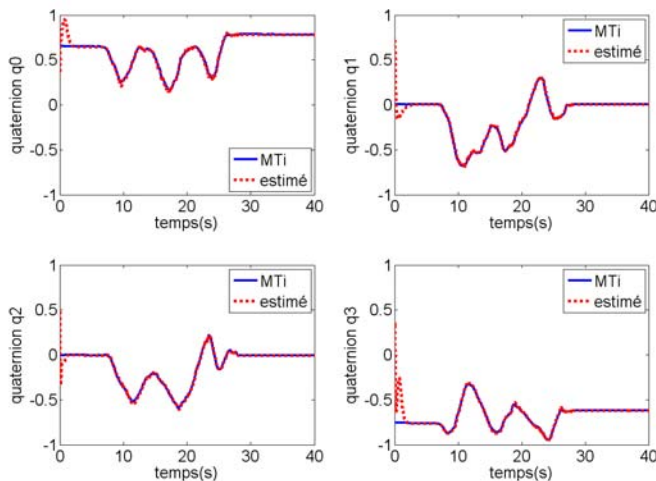


Fig. 7. Quaternion estimé et expérimental

### VIII. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous avons proposé dans ce travail une approche originale pour estimer l'attitude, le biais variable dans les gyromètres et les accélérations linéaires pour un corps rigide accéléré. L'objectif est une application au monitoring des mouvements et attitude de l'animal sauvage, grâce à l'utilisation d'électronique embarquée « Bio-logging ». Dans ce type d'application, on peut s'attendre à ce que les mouvements observent des dynamiques importantes en rotation (vitesse angulaire) et en translation (accélération linéaire). Les mesures de l'attitude, fournies par les accéléromètres et les magnétomètres, représentent l'attitude vraie seulement à basses fréquences. Elles deviennent perturbées lorsque les accéléromètres subissent des vibrations et des bruits. Aussi nous avons proposé d'associer les mesures d'attitude aux mesures gyrométriques à l'aide d'un observateur non linéaire pour estimer la valeur du quaternion et du biais.

### IX. REMERCIEMENTS

Ce travail entre dans le cadre du projet NaviMeles financé par les régions d'Alsace et Champagne-Ardenne et dans le cadre du projet Interreg C2A.

### X. REFERENCES

[1] I. L. Boyd, A. Kato, and Y. Ropert-Coudert, « Bio-logging science: sensing beyond the boundaries », *Memoirs of the National Institute of Polar Research*, vol. 58, pp. 1-14, 2004.

[2] G.H Elkaim, E.B. Decker, G. Oliver, and B. Wright, « Marine Mammal Marker (MAMMARK) dead reckoning sensor for In-Situ environmental monitoring », *In Proc. IEEE Position, Loc. and Navigation Symposium*, Monterey, pp. 976-987, April 2006.

[3] P.G. Savage, « Strapdown inertial navigation integration algorithm design. Part 2: Velocity and position algorithms », *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 21, no. 2, 208-221, 1998.

[4] M.D. Shuster, and S.D. Oh, « Three-axis attitude determination from vector observations », *Journal of Guidance & Control*, vol. 4, no. 1, pp. 70-77, 1981.

[5] X. Yun, E. Bachmann, and R.B. McGhee, « A Simplified Quaternion-Based Algorithm for Orientation Estimation From Earth Gravity and Magnetic Field Measurements », *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, vol. 57, no. 3, March 2008.

[6] D.G. Egziabher, G.H. Elkaim, J.D. Powell, and B.W. Parkinson, « A gyro-free quaternion-based attitude determination system suitable for implementation using low cost sensors », *In Proc. IEEE Position Loc. and Nav. Symposium.*, San Diego, CA, March 2000, pp. 185-192.

[7] X. Yun, and E. Bachmann, « Design, implementation, and experimental results of a quaternion-based Kalman filter for human body motion tracking », *IEEE Trans on Robotics*, vol. 22, no. 6, pp.1216-1227, Dec 2006.

[8] R. Zhu, D. Sun, Z. Zhou, and D. Wang, « A linear fusion algorithm for attitude determination using low cost MEMS-based sensors », *Measurement*, vol. 40, no. 3, pp. 322-328, April 2007.

[9] I.Y. Bar-Izthack, J. Deutschmann, and F.L. Markley, « Quaternion normalization in additive EKF for spacecraft attitude estimation », *AIAA Guidance Navigation, and Control Conference*, New Orleans, pp. 908-916, Aug 1991.

[10] F.L. Markley, J.L. Crassidis, and Y. Cheng, « Nonlinear attitude filtering methods », *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, San Francisco, CA, USA, 15-18 Aug 2005.

[11] S. Salcudean, « A globally convergent angular velocity observer for rigid body motion », *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 36, no. 12, pp. 1493-1497, 1991.

[12] B. Vik, and T.I Fossen, « A Nonlinear observer for GPS and INS integration », *In 40<sup>th</sup> IEEE CDC*, Florida, Dec 4-7, 2001.

[13] J. Thienel, and R.M. Sanner, « A coupled nonlinear spacecraft attitude controller and observer with an unknown constant gyro bias and gyro noise », *IEEE Trans. on Automatic Cont.*, vol. 48, no. 11, Nov. 2003.

[14] N. Metni, J.M. Pflimlin, T. Hamel, and P. Souères, « Attitude and gyro bias estimation for a VTOL UAV », *Journal of Control Engineering Practice*, vol. 14, no. 12, pp. 1511-1520, Dec. 2006.

[15] H. Rehbinder, and X. Hu, « Drift-free attitude estimation for accelerated bodies », in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, Detroit, MI, pp.4244-4249, May 2001.

[16] H. Fourati, L. Afilal, and N. Manamanni, « Data fusion solution for orientation of a slow-moving rigid body: Bio-logging application », *9th International conference on Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering*, Sousse, Tunisia, 20-23 December 2008.

[17] J.B. Kuipers, *Quaternion and Rotation Sequences*, Princeton, NJ: Princeton University Press, 1999.

[18] M.D. Shuster, « A survey of attitude representations », *Journal of the Astronautical Science*, vol. 41, no. 4, pp. 493-517, Oct-Dec 1993.

[19] R.G. Brown, and P.Y.C Hwang, *Introduction to Random Signal and Applied Kalman Filtering*, 3<sup>rd</sup> Ed. New York: John Wiley, 1997.

[20] S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, and N. White, *MEMS Mechanical Sensors*, House Publishers, 2004.

[21] G. Wahba, « A least squares estimate of spacecraft attitude », *SIAM, Review*, vol. 7, no. 3, pp. 409, 1965.

[22] Xsens Technologies, Available: <http://www.xsens.com>, July 2008.