



HAL
open science

Utilisation de capteurs tridimensionnels embarqués pour la capture libre du mouvement fin chez l'athlète d'élite en vue de l'optimisation de sa performance

Didier Seyfried

► To cite this version:

Didier Seyfried. Utilisation de capteurs tridimensionnels embarqués pour la capture libre du mouvement fin chez l'athlète d'élite en vue de l'optimisation de sa performance. [Rapport de recherche] Rapport de projet d'étude 05-011, Institut National du Sport et de l'Education Physique (INSEP). 2008. hal-01988944

HAL Id: hal-01988944

<https://insep.hal.science//hal-01988944>

Submitted on 22 Jan 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Janvier 2008

Rapport de projet d'étude 05 – 011

Mission Recherche de l'INSEP

Utilisation de capteurs tridimensionnels embarqués pour la capture libre du mouvement fin chez l'athlète d'élite en vue de l'optimisation de sa performance

Didier Seyfried¹

Collaborateurs techniciens, ingénieurs : A. Cavel, N. Houel., PA Libourel, J. Sals

Travail effectué par

¹Laboratoire d'Informatique Appliqué au Sport

Mission Recherche de l'INSEP

DIFFUSION RESTREINTE



Utilisation de capteurs tridimensionnels embarqués pour la capture libre du mouvement fin chez l'athlète élite en vue d'optimiser sa performance

Seyfried D. et coll., Laboratoire d'Informatique Appliquée Au Sport

INSEP, 11 avenue du Tremblay, 75012, Paris

lias@insep.fr

Table des matières

<i>I. Résumé</i>	3
<i>II. Rappel du projet</i>	4
1. <i>Présentation de la problématique :</i>	4
2. <i>L'analyse du mouvement</i>	4
3. <i>Objectifs:</i>	5
<i>III. La centrale d'attitude fournie par le LETI</i>	6
1. <i>Description</i>	6
2. <i>Le repérage</i>	7
3. <i>Principe de fonctionnement</i>	7
a. <i>Accéléromètre</i>	7
b. <i>Magnétomètre</i>	8
c. <i>Fonctionnement global</i>	9
4. <i>L'acquisition des signaux</i>	10
5. <i>Le traitement du signal</i>	11
6. <i>Mode d'utilisation du capteur</i>	11
a. <i>Mode statique</i>	11
b. <i>Mode Dynamique</i>	12
<i>IV. Développements effectués par l'INSEP</i>	15
1. <i>La calibration</i>	15
a. <i>Méthode par détection des extremums</i>	15

b. Méthode par régression multiple	16
c. Comparaison des deux méthodes	18
2. Les différents modes d'utilisation	18
V. Caractéristiques des signaux provenant du capteur	21
a. Alimentation	21
b. Bruit sur le calcul de l'angle	21
c. Bruit à la sortie du capteur	21
d. Bruit sur les accélérations	22
VI. Mesures au tir à l'arc	25
1. Problématique	25
2. Protocole expérimental	25
3. Résultats d'une première série de mesures sur site	26
VII. Musculation	29
1. Accéléromètres monoaxes	29
2. Capteur CEA LETI	29
VIII. Utilisation du médaillon CEA-Leti pour l'analyse du geste sportif	31
1. Potentiel	31
2. Limites	32
IX. Conclusion	33
X. Bibliographie	34

I. Résumé

Le CEA LETI a mis au point un capteur mixte accéléromètre/magnétomètre triaxial capable de déterminer en temps réel avec une grande sensibilité des paramètres liés au mouvement. Ce rapport montre dans quelle mesure ce type de technologie peut répondre à des problématiques spécifiques de l'entraînement et de l'évaluation du sportif de haut niveau. Ce projet a notamment permis de mettre en évidence les limites liées à la calibration, par le développement d'algorithmes dédiés à son utilisation par le sportif d'élite. Des essais effectués avec l'équipe nationale de tir à l'arc ont aussi montré la limitation de cette construction de capteur, tout en mettant en avant la nécessité de développer cette approche en la couplant avec des gyroscopes. Ce rapport fait donc office d'étude préliminaire dans l'étude du geste sportif par des techniques accélérométriques triaxiales. Il conclut que l'utilisation de capteurs tridimensionnels embarqués pour la capture libre du mouvement fin chez l'athlète d'élite en vue de l'optimisation de sa performance est incontournable. Par rapport aux configurations « bas-coût » telles que présentée ici par un assemblage d'accéléromètre et de magnétomètres triaxiaux notre équipe considère que l'environnement du sport d'élite aura plus à gagner à s'orienter vers un assemblage augmenté de gyroscopes voire d'une puce GPS de type centrales inertielles, systèmes plus coûteux mais beaucoup plus dédiés aux contraintes du sport d'élite. Une proposition d'étude sera faite en ce sens par l'INSEP.

II. Rappel du projet

1. Présentation de la problématique :

De nombreuses solutions de captures du mouvement sont classiquement utilisées en sport mais elles sont souvent contraignantes pour l'athlète et l'entraîneur soit à cause des installations à mettre en place soit parce que le retour des informations vers l'athlète est trop différé pour que l'« effet feedback » puisse être sérieusement évoqué. Les contraintes liées à l'utilisation de ces outils de capture du mouvement rendent souvent leur application délicate dans le cadre de l'entraînement et de compétition. Par exemple, dans certains sports comme le kayak ou le ski, la performance ne permet pas la mise en place d'un dispositif adéquat. La capture du mouvement devient alors impossible. Dans ce contexte l'INSEP et le CEA-Léti ont décidé de collaborer pour expertiser puis développer, si nécessaire, un dispositif adapté à la capture de mouvement sans contrainte et facile à mettre en oeuvre.

2. L'analyse du mouvement

Le mouvement du sportif se caractérise par une succession de gestes complexes qui contribuent à la production de sa performance. L'amélioration de cette performance passe en partie par l'apprentissage, dont la répétition du mouvement le plus « juste » possible. Le mouvement peut être quantifié grâce à différents paramètres. Des paramètres spatiaux (position, angle, orientation), temporels (temps de réaction, durée, fréquence), et des paramètres liés à la génération du mouvement (Force, puissance, énergie) (Fig. 1).

Pour un praticien (entraîneur, athlète), l'accès à ces paramètres est primordial. Toutefois, le praticien doit porter son attention exclusivement sur certains paramètres qui semble déterminants au regard de la spécificité de l'activité. Pour un sport avec caractère cyclique (course à pied), le praticien s'orientera son attention vers des paramètres comme la fréquence. Pour un sport non cyclique comme l'haltérophilie, l'attention du praticien sera plus orientée sur des notions de puissance ou de vitesse d'action.

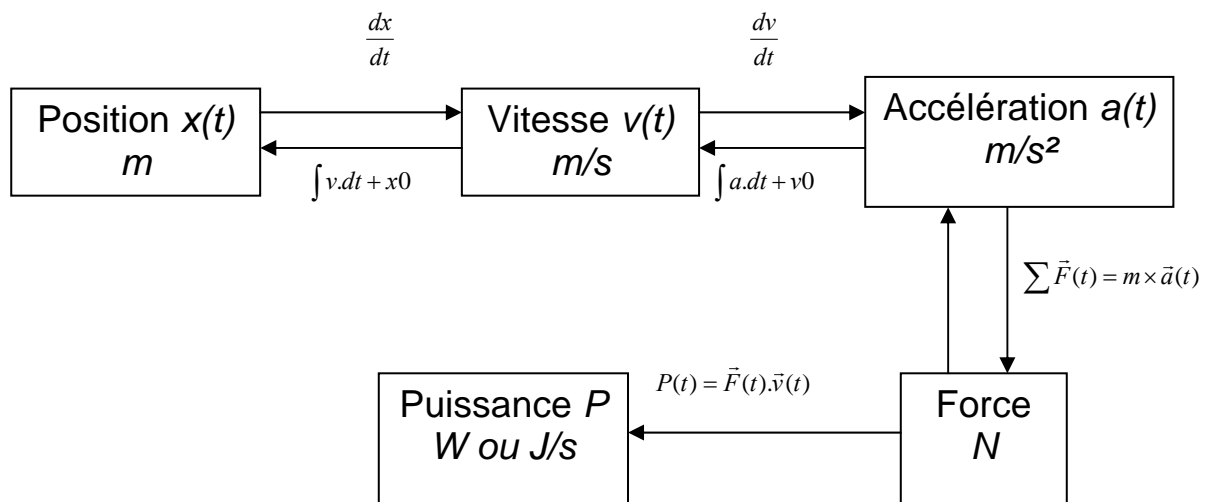


Fig. 1. Relation entre différents paramètres permettant la quantification du mouvement

Les différents systèmes existants sur le marché de l'analyse du mouvement permettent de récupérer ces paramètres, avec plus ou moins de facilité, de précision, d'encombrement. Ainsi les systèmes d'analyse cinématique (type Vicon) permettent d'avoir accès à une très grande précision sur la position des différents segments corporels. Cependant de tels systèmes sont très coûteux, doivent être principalement utilisés en intérieur et pour l'étude de mouvement de à volume limité (quatre à cinq foulées en sprint). Leurs utilisations étant très contraignantes pour le sportif, ces systèmes ne peuvent pas être utilisés quotidiennement lors de l'entraînement. Ces systèmes sont donc essentiellement destinés à des évaluations rigoureuses mais ponctuelles. Le développement d'outils constitués d'accéléromètres présente de nombreux avantages (coût, encombrement, diversité des paramètres potentiellement calculés, liberté d'action, ...). La polyvalence de ces outils devrait favoriser leur utilisation lors de l'entraînement.

3. Objectifs:

La centrale d'attitude étudiée à pour objectif d'analyser la gestuelle en vue de proposer au praticien un retour d'information en temps réel. Cette centrale d'attitude est constituée d'accéléromètres et de magnétomètres. Placés sur des objets ou des segments corporels, les accéléromètres permettent d'obtenir une information sur la dynamique (accélération) du mouvement. La mesure de l'accélération à l'aide de la centrale d'attitude est réalisable en

temps réel et dans tout type d'environnement aérien (salle ou extérieur). Les magnétomètres déterminent l'orientation de la centrale pour une certaine gamme de mouvements. Le développement de cette centrale d'attitude est potentiellement compatible avec les transmissions sans fil. L'association de la centrale d'attitude et de la transmission sans fil permettra de renseigner l'athlète, par exemple à l'aide d'un signal sonore émis en temps réel par une oreillette, sur un élément caractéristique de son geste sportif. Cette centrale d'attitude a été mise à disposition par le LETI, Laboratoire français du CEA et leader européen en micro et nanotechnologies. Le LETI travaille sur les microsystèmes de capture de mouvement qui préfigurent une fonction électronique de mesure du mouvement libre de toute contrainte. Ces microsystèmes devraient prochainement devenir accessibles à tous (capteurs bas coûts).

III. La centrale d'attitude fournie par le LETI

1. Description

La centrale d'attitude est composée d'un accéléromètre linéaire triaxial du type LIS3L02AQ produit par la société ST Microelectronics. Cet accéléromètre est capable de mesurer des accélérations dans une gamme de -6 à +6 G ($1G = 9.81 \text{ m/s}^2$), suivant les 3 axes du capteur, il existe aussi dans une version +/- 2 G. L'accéléromètre est couplé à un magnétomètre triaxial du type HMC1023 de la société Honeywell. Sa gamme de mesure est de +/- 6 Gauss. Le capteur a été assemblé et conditionné par le CEA LETI. Il a une forme parallélépipédique dont les dimensions sont 34, 20 et 10 mm.

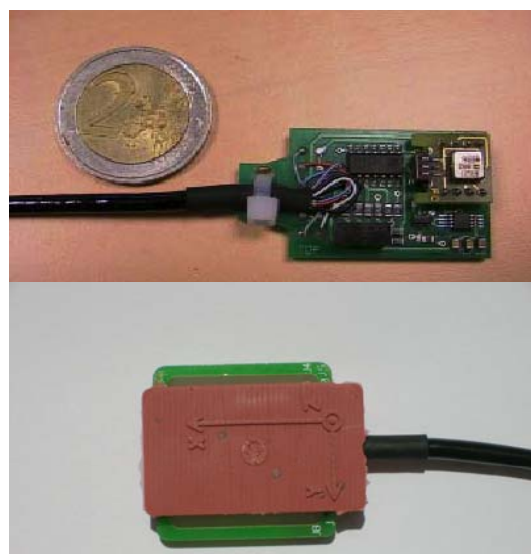


Fig. 2. Médaille du CEA LETI

La centrale d'attitude (capteur) est alimentée par une tension d'alimentation continue, comprise entre 3 et 5 V. Le courant est de 20 mA. Le signal de sorti est continu et compris entre 0V et V_{lim} . La bande passante du capteur est de 200 Hz. Le capteur est calibré grâce à un offset (O) et une sensibilité (S) par voie. Le capteur permet d'obtenir les valeurs $Acx(t)$, $Acy(t)$, $Acz(t)$ et $Hcx(t)$, $Hcy(t)$, $Hcz(t)$, respectivement l'accélération en x, y et z dans un référentiel capteur en m/s^2 , et le champ magnétique terrestre normalisé en x, y et z dans ce même référentiel.

2. Le repérage

Un repère sous la forme d'un trièdre direct est indiqué sur la face moulée (coté composants accéléromètre et magnétomètre). (Fig. 2)

Dans le référentiel terrestre défini par l'axe x orienté vers le nord, y vers l'ouest et z vers le haut la valeur de la gravité est connue : $Gt = (0, 0, 9.81) m/s^2$ ainsi que la valeur du champ magnétique normalisé: à Paris $Ht = (-\cos(64^\circ), 0, \sin(64^\circ))$.

3. Principe de fonctionnement

a. Accéléromètre

Les accéléromètres sont basés sur le principe fondamental de la dynamique $\sum \vec{F} = m \times \vec{a}$. La mesure de l'accélération d'un système en mouvement équivaut à la mesure de la somme des forces externes qui s'appliquent sur ce système. Un accéléromètre est typiquement constitué de trois éléments : un bâti solide du mobile soumis aux accélérations, une masse sismique et une lame flexible reliant la masse avec le bâti (voir figure 3).

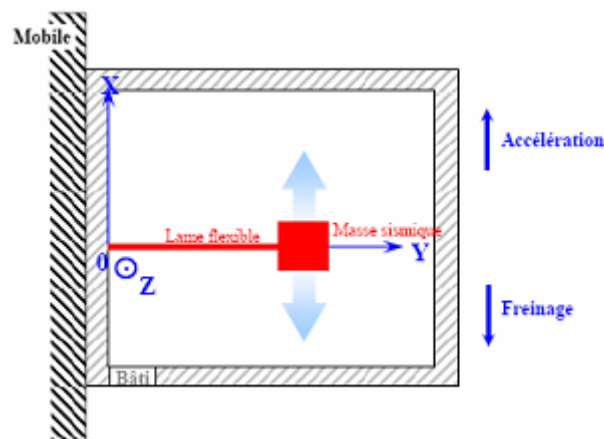


Fig. 3. Schéma de principe d'un accéléromètre

Lorsque le système subit une accélération, une force opposée à l'accélération agit sur la masse sismique et la met alors en mouvement. Le déplacement de la masse est proportionnel à la force et donc à l'accélération. En mesurant le déplacement de la masse sismique on peut déterminer la valeur de l'accélération du système.

Il existe plusieurs manières pour mesurer les déplacements de la masse. Dans le cas de la centrale étudiée, l'accéléromètre fonctionne suivant le principe de mesure de capacité. La masse sismique est une électrode mobile. Une capacité est formée entre la masse et une partie fixe du système. La détection consiste à évaluer, lors de l'accélération, les variations de capacité lorsque la masse s'éloigne ou se rapproche de l'élément fixe.

Les structures capacitives possèdent les avantages suivants : une bonne neutralité aux variations de température, une grande sensibilité, une bonne réponse statique et une bonne performance en terme de bruit. De plus un retour de force peut être utilisé sur les poutres à l'aide d'une force électrostatique. Ce retour de force permet d'augmenter la robustesse du système face à des chocs élevés ou des vibrations de très grande amplitude, d'augmenter la linéarité et la stabilité, d'améliorer la réponse en fréquence, et d'élargir la bande passante. L'utilisation d'une force électrostatique procure également un moyen de pratiquer le test automatique du capteur.

b. Magnétomètre

Le magnétomètre utilise la propriété magnétorésistive de certains conducteurs pour mesurer le champ magnétique. Ces matériaux voient leur résistivité varier en fonction de l'orientation du champ magnétique auquel ils sont soumis. Les magnétomètres sont fabriqués à partir d'une couche ferromagnétique qui présente une anisotropie magnétique obtenue par l'exposition à un champ magnétique fort pendant la formation du cristal. Cette exposition, le type de réseau cristallin et la géométrie déterminent la direction de facile aimantation. La variation de la résistance est reliée à l'angle entre la magnétisation M du matériau et la direction de facile aimantation. Or, lorsque le matériau parcouru par un courant est placé dans un champ magnétique H , sa magnétisation varie en fonction de ce champ : $M = f(H)$. La mesure de variation de résistance permet de remonter au champ magnétique.

Les capteurs magnétorésistifs présentent une forte sensibilité pour les faibles valeurs d'induction et une faible consommation d'énergie. Ils peuvent être produits en grande quantité à des prix très faibles.

c. Fonctionnement global

Le principe de fonctionnement des capteurs est basé sur la mesure tridimensionnelle du champ magnétique (B) et du champ gravitationnel terrestre (G). Le champ gravitationnel a une direction et une valeur constante et indépendante du lieu où est réalisée la mesure (pour une altitude donnée). Le champ magnétique est orienté au Nord avec un angle dépendant de la position sur la Terre. L'utilisation d'un accéléromètre triaxial permet d'accéder à G ainsi qu'à la direction verticale. L'orientation du champ magnétique est définie à partir du magnétomètre triaxial.

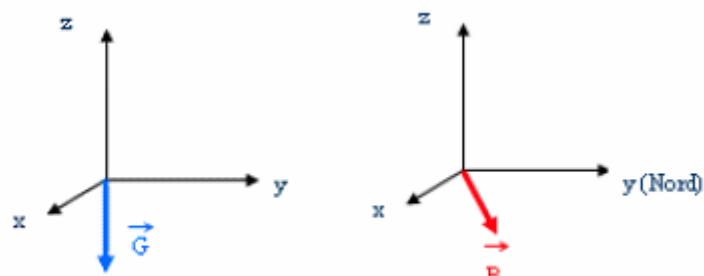


Fig. 4. Champ gravitationnel et magnétique terrestre

Le capteur permet de mesurer les rotations d'un mouvement, plus particulièrement les angles de rotation d'un référentiel lié au capteur par rapport à un référentiel de départ. Ce calcul s'effectue en mesurant le champ magnétique et gravitationnel de positions de départ et de fin statiques. Six équations sont nécessaires pour définir les trois angles de rotation du capteur. En effet, la résolution de deux équations est utilisée pour définir les paramètres trigonométriques de chaque angle (sinus, cosinus).

La mesure de G et H pour la position initiale, permet d'identifier leurs trois composantes selon chaque axe, puis d'en déduire le repère statique de départ. Lorsque le capteur est dans sa position finale, la mesure de G et H permet d'obtenir les composantes répétitives des deux champs dans le nouveau repère. La matrice de passage du repère de départ au repère suivant est fonction des trois angles de rotation. En écrivant l'égalité entre les coordonnées dans l'ancien repère et celles du nouveau repère, via la matrice de passage, six équations à six inconnues sont obtenues. Les équations permettent de définir les angles de rotation (Fig. 5).

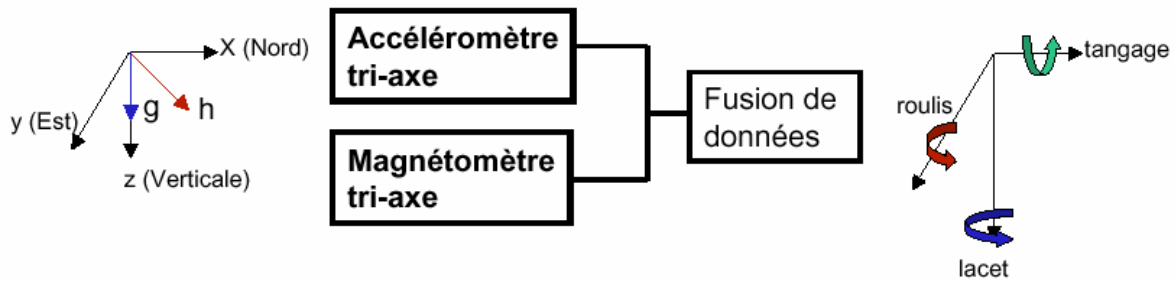


Fig. 5. Schéma de principe

Le calcul des angles à partir des mesures dynamiques (pour un mouvement connu) peut rencontrer des difficultés quant à sa résolution. Des algorithmes ont été mis au point par le LETI afin de pouvoir déterminer les rotations à tout instant. La détermination des angles est obtenue en utilisant un algorithme d'optimisation qui minimise l'erreur quadratique entre les valeurs mesurées et les valeurs théoriques.

Les limites du capteur sont liées aux accéléromètres qui mesurent à la fois la gravité et les accélérations propres du capteur. Dans un système qui accélère, l'accéléromètre est incapable de différencier la composante du champ gravitationnel de l'accélération propre. Il fournit donc un vecteur accélération qui ne donne aucune information sur la direction de la verticale.

L'utilisation de ce capteur en dehors des positions statiques implique de connaître des informations sur la nature du mouvement. En effet, dans le cadre de l'étude de mouvements dont une partie de la cinématique angulaire est connue, la détermination des paramètres angulaires manquants peut être déterminée à l'aide des magnétomètres. La résolution des inconnues des cinématiques angulaires permet d'identifier l'orientation du repère lié au capteur en fonction du temps et d'en déduire à chaque instant la composante du champ gravitationnel et les accélérations du mouvement.

4. L'acquisition des signaux

L'acquisition des signaux a été effectuée à l'INSEP avec une carte National Instrument NI USB 6259. La carte possède 32 entrées analogiques 16 bits capables de faire l'acquisition d'un million d'échantillons par seconde. La masse du capteur est reliée à la masse de la carte. Le capteur est alimenté en 5V par la carte. L'acquisition des 6 voies (accéléromètres/magnétomètres) est faite par le logiciel MAX fourni avec la carte en mode RSE. Les données sont ensuite enregistrées dans un fichier .txt.

5. Le traitement du signal

Le traitement des signaux est réalisé avec Matlab R13. Le fichier .txt est importé puis traité de façon à calculer les paramètres jugés intéressants. Un programme et une interface graphique dédiée ont été développés par le laboratoire d'informatique de l'INSEP pour tester les algorithmes.

6. Mode d'utilisation du capteur

Le médaillon peut être utilisé dans deux configurations. En effet, pour récupérer les valeurs d'accélération, le capteur doit être repositionné dans un référentiel terrestre ; d'où l'intérêt des magnétomètres. Le calcul de la matrice de rotation permettant de passer à des mesures d'accélération calculées à partir de la calibration, implique la détermination à chaque instant la position du capteur en rotation par rapport à un repère fixe. Dans le cas de notre étude, le repère terrestre est défini par un repère orthonormé avec l'axe x vers le nord et l'axe z vers le haut, c'est-à-dire à l'opposé de la gravité. L'identification de la matrice de rotation à partir des données issues du capteur implique de connaître au moins deux vecteurs définis dans le repère capteur et le repère terrestre. Deux modes sont donc requis pour faire la mesure.

a. Mode statique

Quand le capteur ne subit aucune autre accélération que la gravité, c'est à dire quand il ne subit aucune variation de vitesse, A_c est égal à G_c . Deux vecteurs sont donc connus dans 2 repères différents.

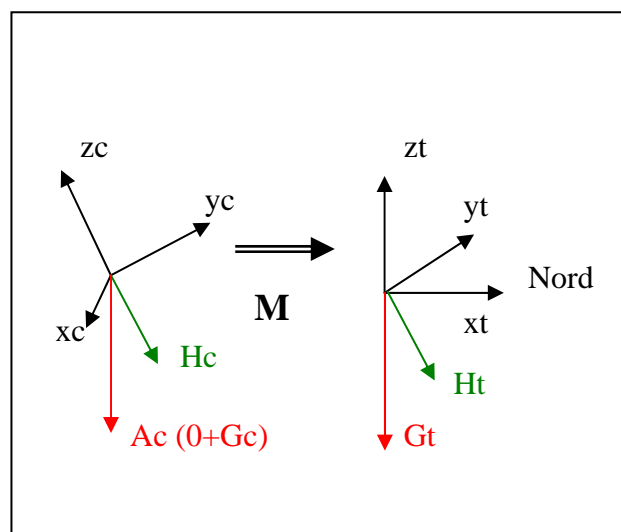


Fig. 6. Schéma de fonctionnement du capteur en mode « statique ».

Une matrice de passage peut donc être calculée. Une matrice contenant les angles de rotation du capteur autour de ces 3 axes (tangage, roulis et lacet).

Yaw ou lacet => rotation autour de z

Pitch ou roulis => rotation autour de y

Roll ou tangage => rotation autour de x

Par composition des matrices de rotation, nous pouvons calculer la matrice de rotation M qui permet de passer du référentiel capteur au référentiel terrestre (Fig. 6.).

Le premier mode de fonctionnement de ce capteur permet de calculer l'inclinaison du capteur par rapport au référentiel terrestre. Le magnétomètre est donc assimilable à un inclinomètre triaxial.

Notons Vc le produit vectoriel de Hc et Vc et Vt celui de Ht et Vt

$$Mc = \begin{bmatrix} Gc_x & Hc_x & Vc_x \\ Gc_y & Hc_y & Vc_y \\ Gc_z & Hc_z & Vc_z \end{bmatrix}$$

$$Mt = \begin{bmatrix} Gt_x & Ht_x & Vt_x \\ Gt_y & Ht_y & Vt_y \\ Gt_z & Ht_z & Vt_z \end{bmatrix}$$

$$M = Mt \times Mc^{-1}$$

b. Mode Dynamique

Ce second mode de fonctionnement a pour but la détermination des accélérations subies par le capteur dans le référentiel terrestre. Pour ce faire, la valeur de la gravité doit être extraite des composantes mesurées par le capteur (Ac). Le système étant sous déterminé (car la valeur de Gc n'est plus connue car comprise dans Ac), les degrés de liberté du capteur en rotation doivent être contraints et limités à une seule, de façon à repositionner les valeurs de Ac dans le référentiel terrestre. Une contrainte autour d'au moins un des trois axes du capteur peut donc être mise en place.

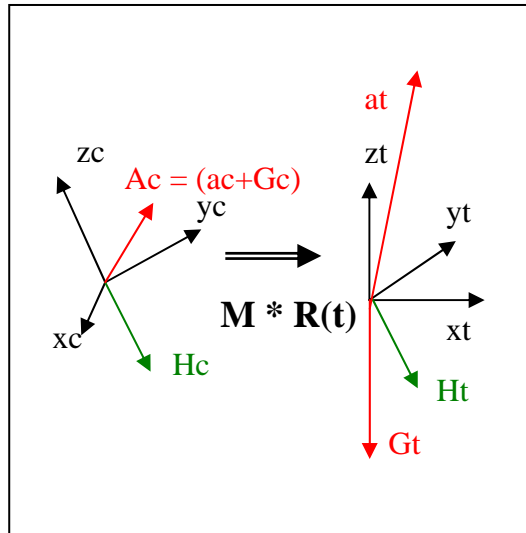


Fig. 7. Schéma du fonctionnement du capteur en mode « dynamique ».

Après avoir déterminé la position initiale du capteur, c'est à dire la matrice M , durant un intervalle de temps « statique » ; à partir de la valeur de $H_{cstatique}$ (mesure du champ magnétique dans un référentiel capteur avant la mesure) et de $H_{cdyn}(t)$ (mesure du champ magnétique au cours du mouvement contraint), la matrice $R(t)$ de rotation peut être calculée à chaque instant de la mesure.

$$1:/ \text{ si rotation autour de } xc : R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(rx) & -\sin(rx) \\ 0 & \sin(rx) & \cos(rx) \end{bmatrix}$$

$$2:/ \text{ si rotation autour de } yc : R = \begin{bmatrix} \cos(ry) & 0 & -\sin(ry) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(ry) & 0 & \cos(ry) \end{bmatrix}$$

$$3:/ \text{ si rotation autour de } zc : R = \begin{bmatrix} \cos(rz) & \sin(rz) & 0 \\ \sin(rz) & \cos(rz) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Les angles rx , ry , ou rz sont calculés à partir des valeurs des magnétomètres. En effet au temps t_0 le champ magnétique a pour valeur mesurée $H_{t_0}(x_0, y_0, z_0)$. Au temps t_1 , ce champ a pour valeur $H_{t_1}(x_1, y_1, z_1)$. Comme le mouvement s'est déroulé dans un plan contraint il suit :

$$H_{t_1} = R(t_0 \rightarrow t_1) \times H_{t_0} \quad Eq.1.$$

A partir de l'équation 1, les équations suivantes dans chacun des plans peuvent être définies :

$$1:/ \text{ si rotation autour de } xc : \sin(rx) = \frac{z_1 y_0 - y_1 z_0}{y_0^2 - z_0^2} \text{ et } \cos(rx) = \frac{y_1 y_0 + z_1 z_0}{y_0^2 + z_0^2}$$

$$2:/ \text{ si rotation autour de } yc : \sin(ry) = \frac{x_1 z_0 - z_1 x_0}{x_0^2 + z_0^2} \text{ et } \cos(ry) = \frac{x_1 x_0 - z_1 z_0}{x_0^2 + z_0^2} \quad Eq.2.$$

$$3:/ \text{ si rotation autour de } zc : \sin(rz) = \frac{y_1 x_0 - x_1 y_0}{x_0^2 - y_0^2} \text{ et } \cos(rz) = \frac{x_1 x_0 + y_1 y_0}{x_0^2 + y_0^2}$$

La matrice de rotation totale ($M \times R(t)$) est calculée de façon à déterminer At à partir de Ac ($At=M*R*Ac$). La gravité est soustraite à At afin d'obtenir les valeurs $at(t)$, accélérations issues du mouvement subit par le capteur.

IV. Développements effectués par l'INSEP

Le programme développé au laboratoire d'informatique de l'INSEP permet de calibrer le capteur grâce à deux méthodes. Ces calibrations permettent d'identifier les paramètres angulaires en mode « statique » et les accélérations **dans un système contraint** en mode « dynamique ».

1. La calibration

La calibration constitue l'une des principales étapes pour obtenir des mesures de bonne qualité. En effet, si les offsets et sensibilités sont mal déterminés, la mesure des composantes de l'accélération sera imprécise. Ce phénomène est lié aux mesures du champ magnétique et d'accélération qui dépendent de l'équation 3 :

$$\begin{aligned} A_c &= (V_{Ac} - V_{cc}/O) / (V_{cc}/S) \\ H_c &= (V_{Hc} - V_{cc}/O) / (V_{cc}/S) \end{aligned} \quad Eq.3.$$

La détermination des 12 paramètres de l'équation 3 est nécessaire avant chaque mesure, puisque ces paramètres peuvent varier notamment en fonction de la température.

Deux méthodes ont été mises en place pour répondre au mieux aux contraintes imposées par l'utilisation dans le sport : calibrage rapide, simple et précis.

a. Méthode par détection des extremums

Aussi bien pour le calibrage des magnétomètres que des accéléromètres, cette méthode permet de déterminer ces paramètres en récupérant le maximum et le minimum sur chaque voie. La mesure est réalisée en tournant le capteur dans l'espace de façon à pointer le minimum de champ magnétique et de gravité sur tous les axes.

Pour cette méthode, la valeur de la gravité mesurée sur l'accéléromètre a un sens si et seulement si aucune accélération parasite n'est appliquée pendant la calibration. Cette contrainte constitue la limite de ce calibrage. Pour supprimer les micro-accélérations pendant

le positionnement du capteur, un filtre passe bas de type butterworth est utilisé sur les mesures d'accélération.

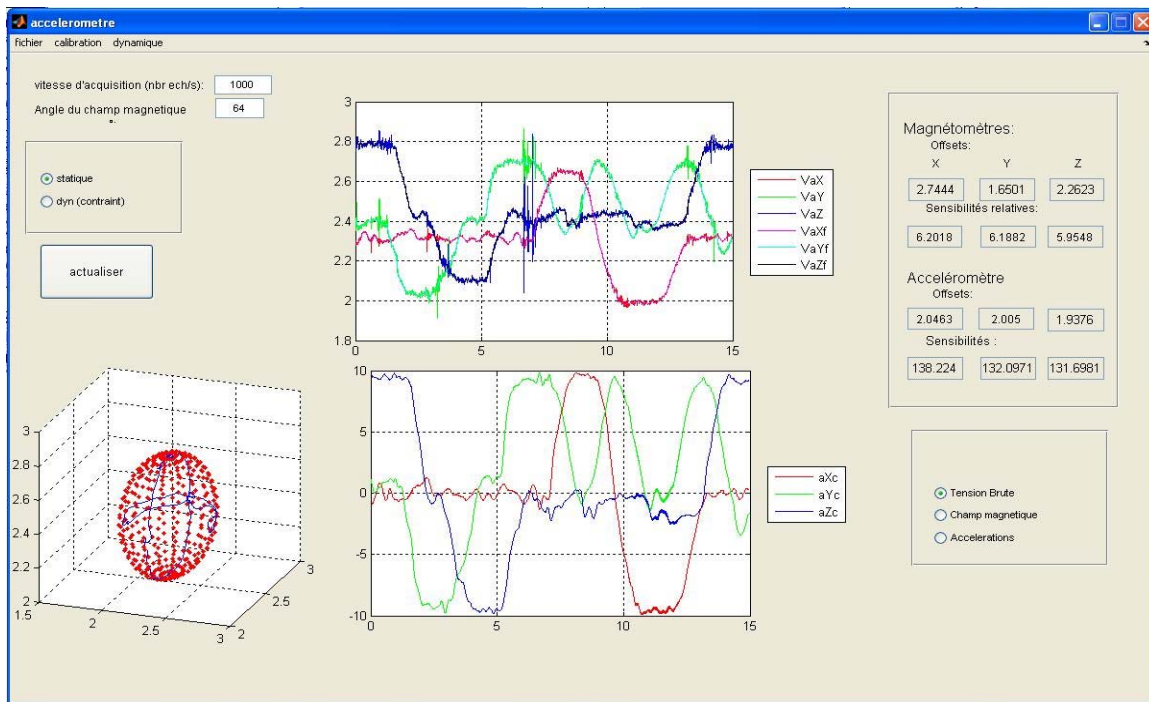


Fig. 8. Capture d'écran du programme pendant une calibration des accéléromètres

Les valeurs de calibration sont obtenues par transformation affine.

Magnétomètre :

$$\text{Offset} = V_{cc} / ((V_{Hcmax} + V_{Hcmin}) / 2) \quad \text{Eq.4.}$$

$$\text{Sensibilité} = 2 \times V_{cc} / (V_{Hcmax} - V_{Hcmin})$$

Accéléromètre :

$$\text{Offset} = V_{cc} / ((V_{Acmax} + V_{Acmin}) / 2) \quad \text{Eq.5.}$$

$$\text{Sensibilité} = 2 \times 9.81 \times V_{cc} / (V_{Acmax} - V_{Acmin})$$

b. Méthode par régression multiple

Cette méthode sensiblement plus précise, vise à faire une régression multiple des valeurs des vecteurs V_{Hc} et V_{Ac} , tensions proportionnelles au champ magnétique et à l'accélération, avec un ellipsoïde. En effet, si le capteur est tourné aléatoirement dans l'espace (toujours sans accélération parasite), les tensions mesurées et représentées dans un repère 3D, sont

assimilables à un ellipsoïde. Les valeurs des coefficients de calibration sont les coefficients de cet ellipsoïde. (Fig. 9).

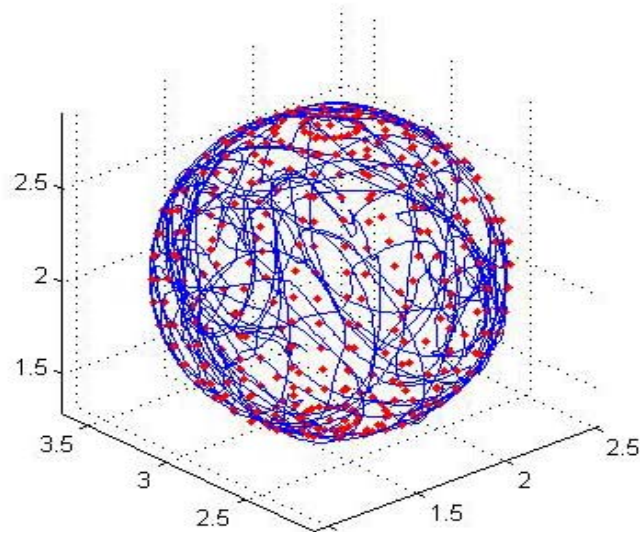


Fig. 9. Représentation de la variation du champ magnétique calculé au cours du temps lors de rotations successives et aléatoires du capteur.

Equation d'un ellipsoïde :

Pour le magnétomètre :

$$(X-O_x)^2 / (V_{cc}/S_x)^2 + (X-O_x)^2 / (V_{cc}/S_x)^2 + (X-O_x)^2 / (V_{cc}/S_x)^2 = 1 \quad \text{Eq.6.}$$

Pour les accéléromètres :

$$(X-O_x)^2 / (V_{cc}/S_x)^2 + (X-O_x)^2 / (V_{cc}/S_x)^2 + (X-O_x)^2 / (V_{cc}/S_x)^2 = 9.81 \quad \text{Eq.7.}$$

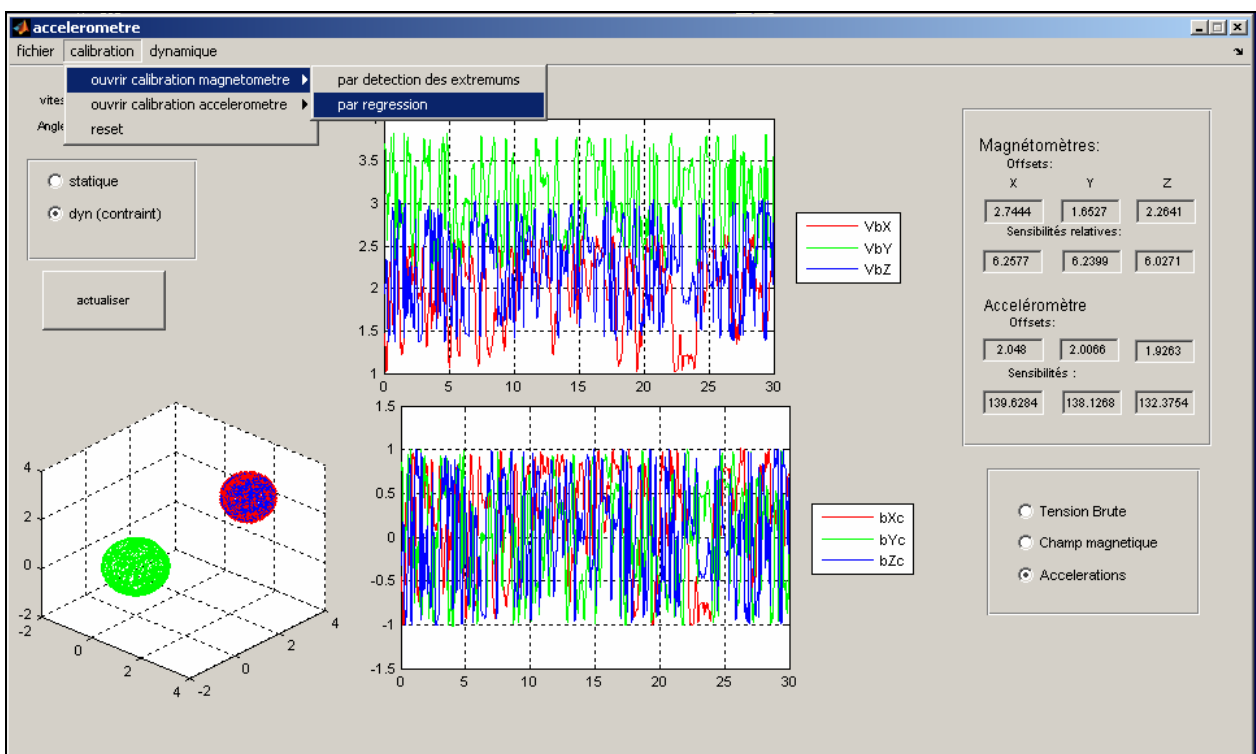


Fig. 10. Capture d'écran du programme pendant une calibration des magnétomètres

c. Comparaison des deux méthodes

Afin de pouvoir vérifier la fiabilité d'une méthode par rapport à une autre, 10 calibrations des accéléromètres et des magnétomètres ont été réalisées dans les mêmes conditions.

Magnétomètres	extremum					
	SX	SY	SZ	OX	OY	OZ
moyenne	6,1587	6,10425	5,88715	2,73695	1,65243	2,2606
écart type	0,06080795	0,13147542	0,0998989	0,01049468	0,00797121	0,00812212
	régression multiple					
	SX	SY	SZ	OX	OY	OZ
moyenne	6,22544	6,21277	5,98496	2,74272	1,65162	2,26297
écart type	0,04034268	0,05914827	0,07610048	0,00355084	0,0013734	0,00206185

Accéléromètres	extremum					
	SX	SY	SZ	OX	OY	OZ
moyenne	138,50988	135,84873	131,0666	2,04563	2,00622	1,93783
écart type	0,98806811	2,73651473	1,51244016	0,00219041	0,00316221	0,0048118
	régression multiple					
	SX	SY	SZ	OX	OY	OZ
moyenne	140,28346	139,40389	134,79482	2,04626	2,00455	1,93976
écart type	0,56898927	0,27728736	0,23280862	0,00093595	0,00053177	0,00027568

Le tableau précédent présente les moyennes et écarts types sur chacun des axes pour les magnétomètres et les accéléromètres avec les deux méthodes. On en déduit une nette amélioration de la calibration à l'aide de la méthode de régression multiple surtout dans le cas des sensibilités des accéléromètres où les écarts types mesurés sont relativement importants.

2. Les différents modes d'utilisation

Le programme développé à l'INSEP permet de faire **travailler le système en inclinomètre** grâce à une fonction développée au LETI. Une fois le capteur calibré, chaque séquence de données acquise peut être enregistrée au format txt. Ce fichier peut être importé dans le programme qui, configuré en mode statique, va recalculer et afficher les angles d'inclinaison du capteur par rapport au référentiel terrestre. (Cf. Fig. 11.).

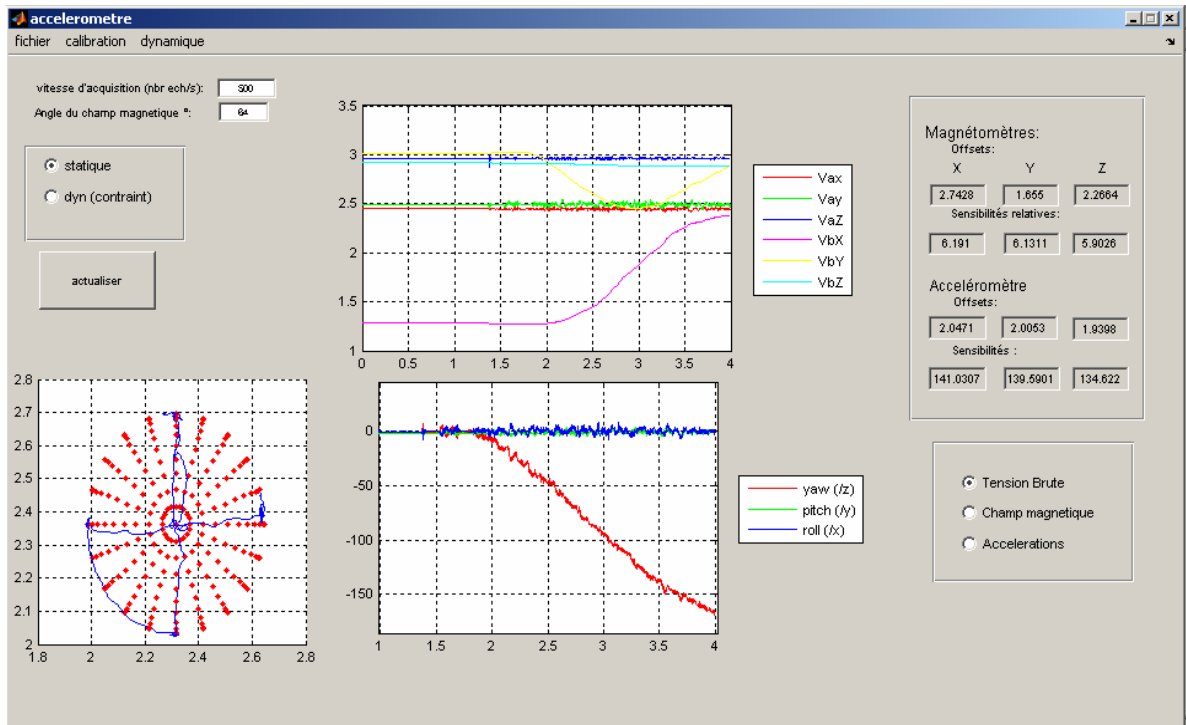


Fig. 11. Capture d'écran du programme en mode statique (rotation du capteur de 180° autour l'axe terrestre z)

Quand le capteur est configuré en mode « dynamique », et une fois la contrainte définie (rotation libre autour de x ou y ou z), le programme calcule les valeurs de l'accélération dans le repère terrestre. Les données affichées peuvent être zoomées, enregistrées.

La figure 12 représente une série de données réalisées avec le capteur posé sur un plan, la rotation autour de l'axe z est libre, les autres rotations sont contraintes. Les courbes montrent une accélération puis une décélération vers le sud (axe x), et quasiment aucune accélération sur l'axe z car le capteur est toujours resté sur le plan xy.

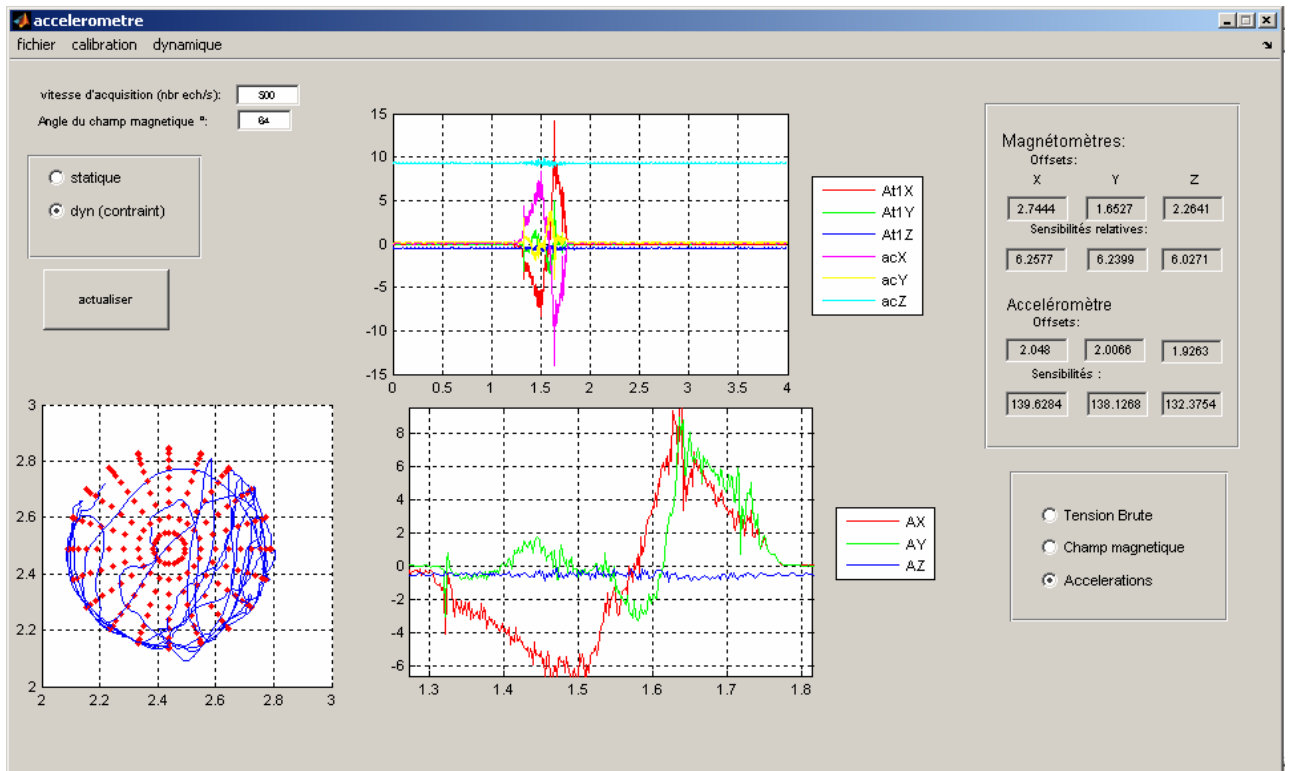


Fig. 12. Capture d'écran du programme en mode dynamique. Données acquises en déplaçant le capteur manuellement, bloqué en rotation autour de x et de y, vers le sud

Ce programme peut être exporté sur d'autres ordinateurs ne disposant pas de Matlab. Ce programme peut donc être utilisé sur le terrain pour une analyse après acquisition.

V. Caractéristiques des signaux provenant du capteur

a. Alimentation

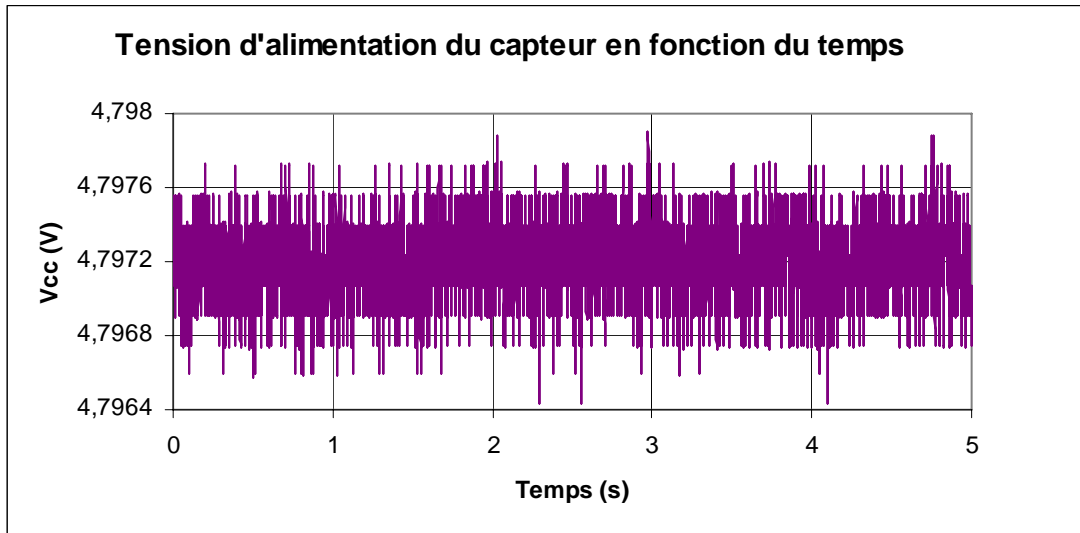


Fig. 13. Représentation de la tension d'alimentation en fonction du temps sur 5 secondes

La tension d'alimentation est la tension de référence du capteur. Cette tension doit être la plus stable possible. La tension utilisée lors des expérimentations provient de la carte d'acquisition. L'écart type de cette tension est 0.2 mV. La tension ne dérive pas dans le temps. Les caractéristiques de cette tension sont suffisamment stables pour effectuer des mesures précises.

b. Bruit sur le calcul de l'angle

Si le capteur est parfaitement statique, l'écart type de la dispersion maximale de mesure d'un angle est **estimé à 0.5°**. Si par contre, lors d'un mouvement, l'accélération n'est pas composée uniquement de la gravité, la quantité de bruit augmente rapidement.

c. Bruit à la sortie du capteur

Lorsque le capteur est en position statique, l'écart type de la dispersion de la tension mesurée après acquisition est de 0.7 mV sur toutes les voies de l'accéléromètre et 1 mV pour les magnétomètres. En conséquence, les magnétomètres sont plus bruités que les accéléromètres.

d. Bruit sur les accélérations

Toujours mesuré en statique, l'écart type du bruit contenu dans le signal des accélérations est de l'ordre 0,001 m/s². Le calcul de la propagation des erreurs lors de la calibration met en évidence que la précision obtenue diminue proportionnellement avec l'amplitude de l'accélération (Fig. 14.).

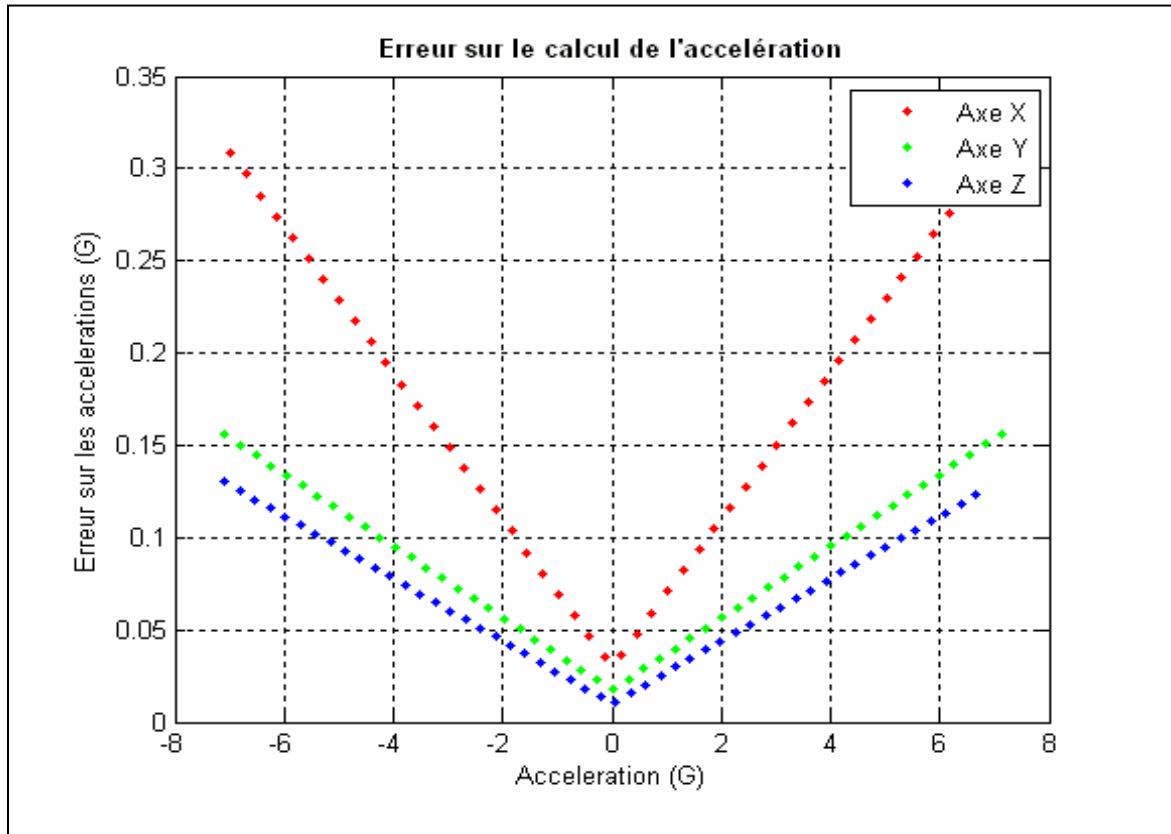


Fig. 14. Représentation de l'erreur estimée sur l'accélération en fonction de l'accélération subie par le capteur

Détails du calcul de la propagation des erreurs :

L'équation Eq.2 exprimée en fonction de tous ses paramètres s'écrit sous la forme :

$$Ac(Vac, Vcc, O, S) = (VAc - Vcc/O) / (Vcc/S) \quad Eq.8.$$

Le calcul d'incertitude sur l'accélération est défini par la somme des dérivées partielles (équation 9).

$$\Delta Ac \leq \left| \frac{\partial Ac}{\partial VAc} \right| \Delta VAc + \left| \frac{\partial Ac}{\partial Vcc} \right| \Delta Vcc + \left| \frac{\partial Ac}{\partial O} \right| \Delta O + \left| \frac{\partial Ac}{\partial S} \right| \Delta S \quad Eq.9.$$

$$\text{Soit : } \Delta Ac \leq \underbrace{\frac{S}{Vcc} \Delta VAc}_{\text{Erreur sur VAc}} + \underbrace{\frac{S \times VAc}{Vcc^2} \Delta Vcc}_{\text{Erreur sur Vcc}} + \underbrace{\frac{S}{O^2} \Delta O}_{\text{Erreur sur O}} + \underbrace{\left| \frac{VAc}{Vcc} - \frac{1}{O} \right| \Delta S}_{\text{Erreur sur S}}$$

Erreur sur VAc

Erreur sur Vcc

Erreur sur O

Erreur sur S

ΔV_{cc} et ΔV_{Ac} étant respectivement de 0.2 mV et de 1mV, les erreurs sur V_{cc} (tension d'alimentation) et V_{Ac} (signal mesuré) sont très faibles par rapport aux erreurs sur l'offset (O) et sur la sensibilité (S). La principale source d'erreur réside donc dans la précision de la calibration. La réduction des erreurs lors de la calibration correspond à la réduction des écarts types, soit à l'augmentation la précision sur l'accélération. La mesure du champ magnétique est soumise aux mêmes conditions puisqu'elle utilise la même équation.

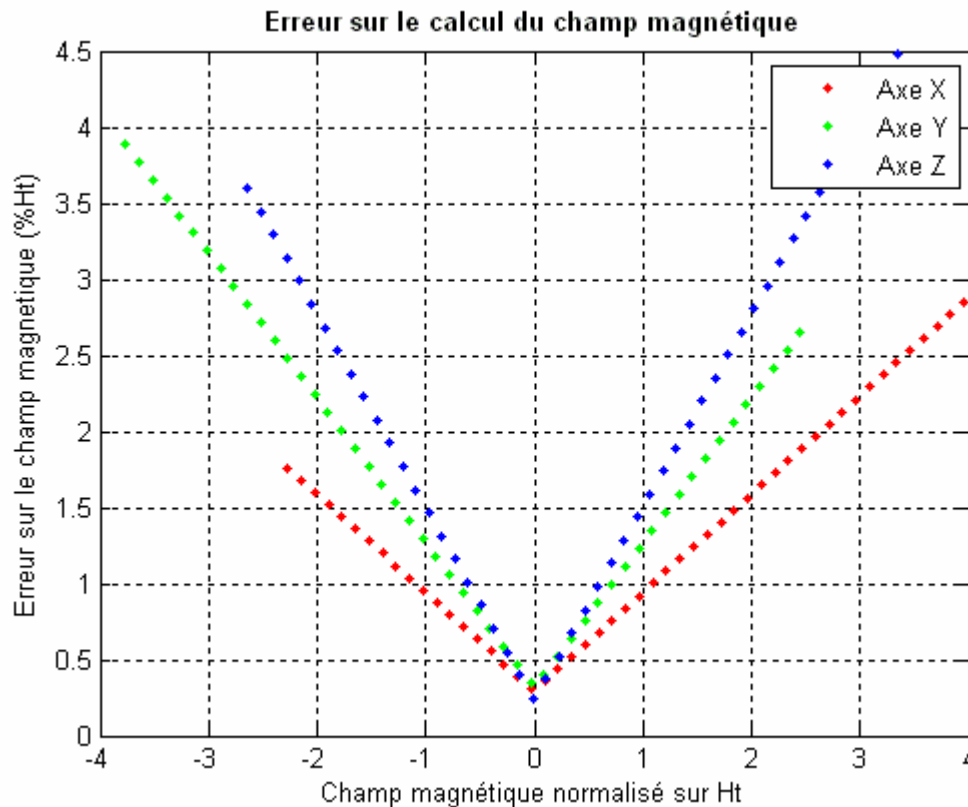


Fig. 15. Représentation de l'erreur estimée sur le champ magnétique en fonction de la valeur mesurée.

Les figures 14 et 15 mettent en évidence l'influence de l'amplitude des paramètres d'accélération et d'orientation du capteur sur l'incertitude de mesure. Pour des mouvements subissant de fortes accélérations, la précision de mesure diminue donc avec l'intensité de l'accélération. Les résultats de cette étude mettent en évidence l'importance de la calibration et la nécessité de l'effectuer dans des conditions optimales. En effet, l'absence de champs magnétiques parasites pour la calibration des magnétomètres (téléphone portable, transformateur électrique, pièces métalliques,...) et la minimisation des mouvements saccadés lors de la calibration des accéléromètres favorisent la précision de la calibration et des mesures. Par ailleurs, la calibration des magnétomètres est faite à partir des valeurs réelles de

ces champs (9.81 m/s^2 pour la gravité et 64° vers le nord pour le champ magnétique terrestre). Ces valeurs sont susceptibles d'évoluer en fonction de l'altitude, et de la latitude auxquelles sont effectuées les mesures. L'emploi des valeurs des champs propres au site de mesures doit donc être défini avec le plus de précision possible, car une erreur sur ces constantes cumulerait aussi des erreurs lors de la calibration. Ces erreurs se répercuteraient alors sur les accélérations et le champ magnétique.

VI. Mesures au tir à l'arc

1. Problématique

Dans le cadre du tir à l'arc de haut niveau, l'une des problématiques des entraîneurs français est la maîtrise de la traction de l'archer assurant le recul de la corde. Lorsque qu'un archer tend son arc, la vitesse de sa main exercée vers l'arrière devrait s'effectuer sans à coups dans les derniers centimètres jusqu'au lâcher de la corde. L'objectif d'une étude préliminaire avait donc été de fixer un accéléromètre sur une partie du tireur ou de l'arc où la vitesse serait la même que celle de la corde. Les mesures obtenues permettraient dans le futur, d'effectuer un feed back sur l'accélération de la corde. Dans le cas où cette accélération ne serait pas nulle dans les derniers centimètres, un signal pourrait être émis en vue de prévenir le tireur avant son lâcher de ne pas décocher sa flèche, lui permettant de recommencer une traction de corde plus linéaire et donc plus précise.

2. Protocole expérimental

Cependant, une telle utilisation du capteur n'est pas sans problèmes. Tout d'abord, la **fixation du capteur doit être réellement solidaire de la corde** sans gêner le mouvement du sportif. Fixer le capteur sur la main tirant la corde paraît donc être la solution la plus pratique et la plus simple.

Utilisé en tant qu'accéléromètre, le capteur doit par ailleurs être contraint à une seule rotation dans l'espace. Cette étude préliminaire émet donc comme hypothèse **que le capteur ne subit aucune rotation**, car la main du tireur « doit » effectuer un mouvement linéaire de traction de la corde. Toutefois, cette supposition reste à vérifier, une rotation parasite induisant des erreurs dans le re-calcul de l'accélération.

Une autre limite de cette étude préliminaire est l'obligation d'avoir un moment en « statique » avant la mesure. Cependant, lorsqu'un archer s'apprête à tirer une flèche, le mouvement de ses bras peut partir d'une « position basse ». Le mouvement n'est alors plus assimilable à une trajectoire rectiligne. La vérification de l'absence d'un moment dynamique est alors indispensable juste avant le tir rectiligne de la corde.

Enfin, si l'accéléromètre est fixé sur la main pendant que l'archer tire la corde, il arrive que l'athlète « pousse » avec son autre membre supérieur sur l'arc. L'accéléromètre de la main ne mesurerait alors pas toute la composante d'accélération portée. L'accéléromètre négligerait en particulier la composante liée au bras portant l'arc. Afin de mieux prendre en considération ce phénomène, deux accéléromètres (un sur la main et un sur l'arc) sont nécessaires. La soustraction des signaux issus des 2 capteurs permettrait de déduire l'accélération de la corde par rapport à un référentiel terrestre.

Ce type de mesures est particulièrement dépendant de la sensibilité du capteur. Après discussion avec des experts de cette discipline, les vitesses en fin de course seraient estimées entre 1 à 2 mm/s. Les accélérations à mesurer sont donc extrêmement faibles, de l'ordre de 10^{-4} m/s². Le capteur proposé à l'heure actuelle sans filtrage et en statique comprend un bruit de 10^{-3} m/s². La précision du capteur du capteur 6G est donc a priori insuffisante pour mesurer une aussi faible variation de vitesse. La version 2G de ce capteur, non disponible pour cette étude, pourrait permettre des acquisitions de signaux avec une précision supérieure.

3. Résultats d'une première série de mesures sur site

Le 24 avril 2007 une série de mesures a été effectuée à l'INSEP avec l'entraîneur national de tir à l'arc, Marc Dellenbach.

Le médaillon a été fixé sur le poignet du tireur, puis sur l'arc. Dans chacune de ces conditions, les mesures ont été effectuées à partir d'une position « bras gauche tendu, bras droit prêt à tirer la corde », et « bras gauche tendu, main droite au niveau du menton » (quelques centimètres avant le lâcher de la flèche), jusqu'au tir. Par la suite, d'autres mesures ont été acquises avec deux capteurs en simultané.



Fig. 16. Marc Dellenbach équipé de 2 capteurs pendant un tir sur cible



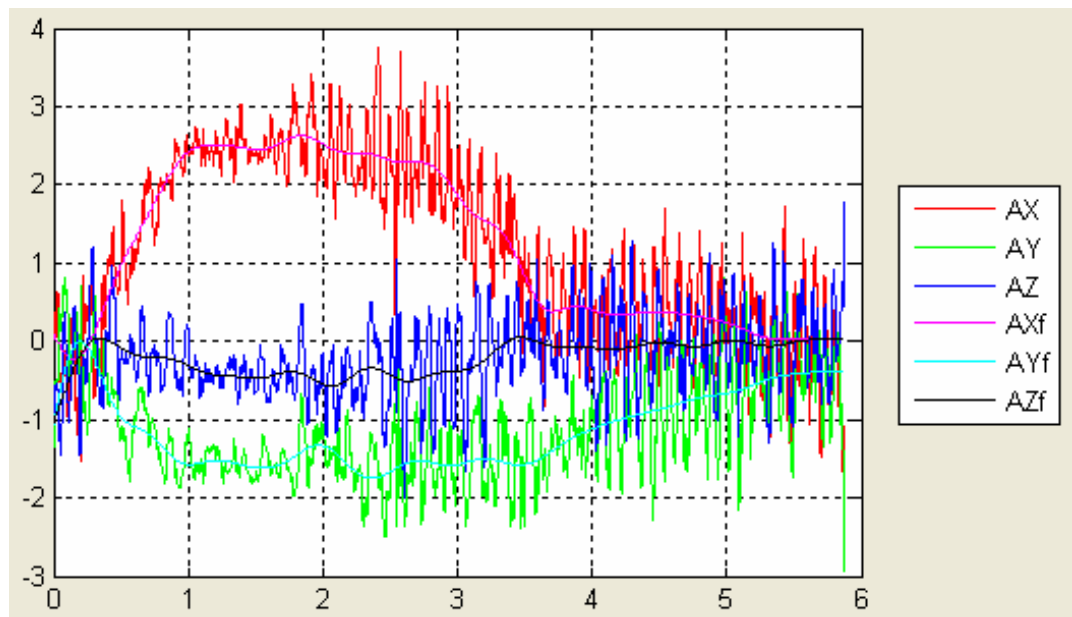
Fig.17. capteur1 fixé sur l'arc



Fig.18. capteur2 fixé sur le poignet du tireur

Les données obtenues ont permis de valider l'hypothèse de départ qui était que les accélérations seraient extrêmement faibles. Durant la dernière partie du tir de la corde (de 4 à 6s), le bruit semble trop important pour en retirer de l'information utile facilement. (Fig. 19.). L'accélération étant extrêmement faible pendant cette phase, le mouvement peut être

Accélérations (m/s^2)



Temps (s)

Fig. 19. Accélérations brutes et filtrées (Butterworth passe bas, f_c 2Hz, ordre 5) issues du capteur 2 pendant tout le tir de la corde

considérée comme quasi statique et le capteur utilisé en mode statique (Fig. 20.). Le calcul des angles est lui aussi très bruité mais semble contenir de faibles variations qui pourraient être caractéristiques du mouvement du poignet pendant le tir. Toutefois, la présence du bruit implique la plus grande prudence au niveau de l'interprétation de l'information recueillie.

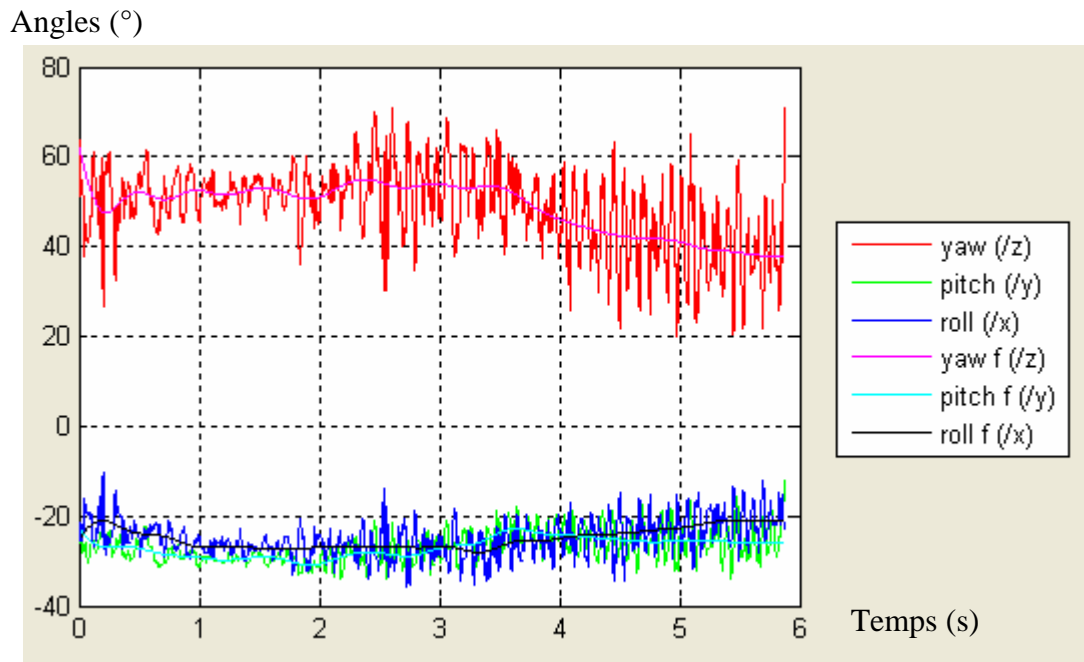


Fig. 20. Angles bruts et filtrés (Butterworth passe bas, f_c 2Hz, ordre 5) issus du capteur 2 pendant tout le tir de la corde

VII. Musculation

L'utilisation du capteur dans le cadre de mouvements contraints sur un axe comme lors de mouvements de musculation ayant été mis en évidence au cours de cette étude, une expérimentation a été mise en place afin de vérifier si ce capteur pouvait suppléer les accéléromètres monoaxes qui servent à l'heure actuelle d'outil d'évaluation.

1. Accéléromètres monoaxes

Les salles de musculation sont équipées de différents systèmes destinés à faire travailler séparément les différentes parties du corps. Aussi sont-elles souvent construites autour d'une contrainte mécanique. La notion de puissance, d'énergie dépensée, est omniprésente dans la quantification de ce type de mouvement. Les contraintes des mouvements sur un seul axe justifient l'utilisation du capteur présenté dans cette étude. La mesure de l'accélération est déjà utilisée à l'INSEP sur ces bancs de musculation de façon à évaluer les performances et surtout l'évolution de ces performances au cours de différentes phases de la préparation d'athlètes. Actuellement les mesures sont effectuées grâce à un accéléromètre mono axial (MYOTEST). Le capteur ne contient pas de magnétomètre et mesure l'accélération uniquement le long d'un axe. Ces capteurs ne peuvent donc pas subir de rotation pendant la mesure, sans perturber la précision de celle-ci. Les caractéristiques de l'accéléromètre mono-axe limitent donc champ d'utilisation à des mouvements de translations (tractions de poids principalement). Un capteur triaxial, permettrait donc de s'affranchir de cet inconvénient.

2. Capteur CEA LETI

Les mesures ont été effectuées au Laboratoire de Physiologie et de Biomécanique de l'INSEP. La première étape a été de calibrer le capteur. Toutefois, la présence de masses métalliques importantes perturbant fortement la mesure de la norme du champ magnétique n'a pas permis la calibration des magnétomètres. La figure 21 montre les variations importantes du champ magnétique allant jusqu'à 2 fois la valeur de référence. Les mesures issues des magnétomètres étant inutilisables, le protocole expérimental a été interrompu.

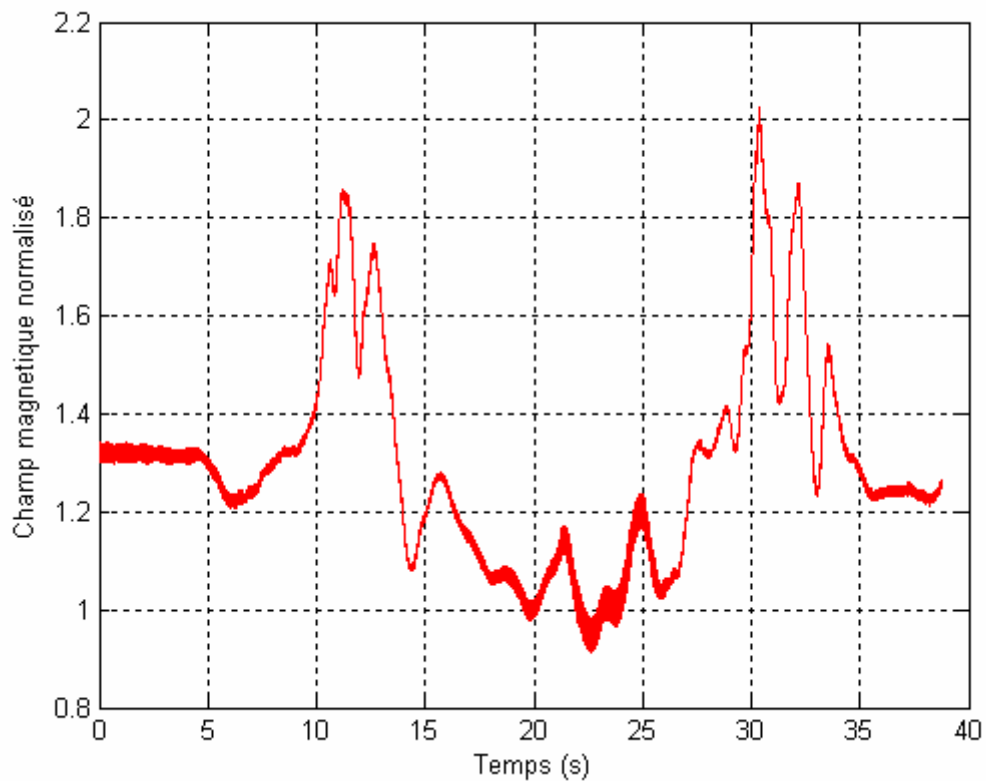


Fig. 21. Représentation des variations de la norme du champ magnétique lorsque le capteur est déplacé près du banc de musculation

Dans le cadre de cette étude, l'objectif étant de montrer le potentiel novateur du couplage accéléromètres/magnétomètres, la comparaison entre le capteur du CEA LETI et le MYOTEST n'a pas fait l'objet de mesures approfondies. Toutefois, d'autres travaux faisant l'objet de projets de recherches ultérieurs devraient pouvoir mettre en évidence l'intérêt et les limites de la mesure à l'aide d'accéléromètres 3D pour des mouvements simples par rapport à des accéléromètres 1D dont la précision de la mesure peut rapidement être limitée dès que le mouvement n'est plus guidé.

VIII. Utilisation du médaillon CEA-Leti pour l'analyse du geste sportif

1. Potentiel

Le travail effectué jusqu'à présent à l'INSEP permet de mettre en évidence l'intérêt que ce type de capteur peut avoir pour le sportif d'élite et son encadrement. Aussi bien pendant l'entraînement que dans l'évaluation de la performance.

Ce capteur possède une **précision satisfaisante dans les conditions définies dans ce rapport**. La bande du capteur passante étant de 200Hz, **sa résolution temporelle** devrait aussi favoriser la visualisation de phénomènes brefs.

Des mesures complémentaires pourront être mises en place afin d'identifier le traitement du signal qui permettrait de déduire les paramètres cinématiques (vitesse, position) par double intégration. En effet, L'intégration numérique d'un signal correspond à sommer les valeurs dans le temps, dont le bruit contenu dans le signal. Cette erreur s'accumule avec la durée de l'intégration et la quantité de bruit. La calibration et le traitement du signal issu du capteur sont donc des aspects qui affectent directement la précision de mesure des paramètres cinématiques.

La force et la puissance pouvant être déduites à partir de l'accélération issue du capteur, la connaissance des accélérations subies dans les 3 dimensions de l'espace offre donc toutes les données nécessaires à leur calcul.

La possibilité de travailler **sans fil, en « temps réel »**, potentiellement **sans limite de distance**, et pour **un coût bien inférieur** aux autres techniques d'analyse du mouvement (système 3D par camera infrarouge, ultrasons,...) semble très prometteur. Par rapport aux autres techniques d'analyse du mouvement, ce capteur offre une liberté et une facilité, d'utilisation et de mise en place bien supérieure.

Le couplage de ce capteur avec d'autres capteurs similaires devrait permettre d'améliorer la quantité d'information recueillie. Equipé de **gyroscopes**, ce capteur offrirait une plus grande liberté des conditions de mesures car il ne serait plus limité aux systèmes contraints. Dans ce cadre, l'étude du potentiel de capteurs comme les centrales inertiels (accéléromètre, magnétomètres, gyroscopes) devrait contribuer à l'analyse du geste sportif. L'ajout des **GPS** permettrait de suivre le sportif sur de longues distances et relier l'information locale à une information globale. En effet, le dénivelé, l'altitude, la distance parcourue, voire la vitesse du

sportif sont aussi des paramètres à prendre en considération dans le cadre de l'analyse des activités de pleine nature.

Enfin, un tel capteur offre la possibilité de calculer aisément des **fréquences, des temps de réaction, des durées**, à partir des accéléromètres. Dans le cas de sports cycliques ce type d'informations se révèle intéressant.

2. Limites

Cette centrale d'attitude possède néanmoins des inconvénients non négligeables pour son utilisation dans l'analyse du geste du sportif de haut niveau.

Certaines des limites sont inhérentes à la construction même du capteur, comme le fait que les accélérations dans les trois axes n'ont de sens que si la capteur est fixée sur un système contraint, ce qui est rarement le cas en sport de haut niveau.

D'autres limites, par contre, peuvent être diminuées voire même supprimées. C'est le cas de la limite en précision aussi bien en « statique » qu'en « dynamique ». La calibration constitue une phase primordiale pour obtenir la qualité de donnée maximale. Les calibrations développées au cours de cette étude sont à la fois nécessaires, peu contraignantes et suffisamment précises pour répondre aux problématiques du sport. La sensibilité du capteur, notamment celle des accéléromètres pouvant varier légèrement avec la température, ces calibrations devraient néanmoins être réalisées avant chaque mesure.

Quant aux magnétomètres, ils mesurent des champs magnétiques. Il convient donc toujours d'être dans des conditions où il n'y a pas de parasite magnétique. Dans le cas contraire, la mesure finale est faussée. Si le capteur devait être utilisé sur de longs parcours il faudrait prendre en compte la variation du champ magnétique terrestre et celles liées à la variation de l'altitude.

Une autre limite est la nécessité d'avoir un **moment « statique » avant la mesure**. Les données acquises pendant cette faible durée permettant de recalculer la matrice d'angle M. Le capteur doit donc être statique, même sur un temps très court. Lorsque le capteur est fixé à un sportif pendant la phase dite « statique », la mesure peut comporter d'infimes variations dues à des tremblements par exemple, diminuant par conséquent la fiabilité de la mesure.

Un défaut de ce type de capteurs est aussi leur grande sensibilité aux vibrations. Si le capteur est fixé sur un système mécanique rigide (vélo, appareil de musculation, ...), cette grande sensibilité peut rapidement devenir gênante. Le **filtrage**, avec ses avantages et ses inconvénients deviendra donc nécessaire dans beaucoup d'utilisations de ce capteur, notamment les utilisations où une grande précision est demandée.

IX. Conclusion

A l'heure actuelle, l'INSEP et la POP sont conscients du potentiel de ce type de capteurs pour l'analyse et l'évaluation du geste sportif, notamment dans l'amélioration de la performance. Cependant, cette centrale d'attitude, dans son état actuel et cette configuration 6G ne semble pas disposer de tous les atouts nécessaires à une utilisation en condition réelle pour des sports où le geste n'est pas contraint dans l'espace. Seul le développement de techniques de filtrage et une calibration plus précise permettraient d'affiner le signal pour obtenir une amélioration de la précision des mesures. Dans le cas plus général du sport de haut niveau, le potentiel de ce capteur semble donc s'orienter vers de la mesure temporelle. Ce capteur pourrait permettre alors de déterminer l'absence de mouvement, la durée de ces périodes statiques, voire de déterminer l'orientation des segments pendant ces périodes. Des applications peuvent alors se dégager notamment en gymnastique où la position et l'orientation du corps sont importantes.

Les questions soulevées sont alors : ce capteur est-il le mieux adapté pour quantifier le geste du sportif de haut niveau ? Des gyroscopes ne permettraient-ils pas d'obtenir plus facilement cette donnée ? Le capteur en version 2G ne serait-il pas plus adapté pour une application « accélération » dans le domaine du tir à l'arc ?

L'élaboration de protocoles de calibration adaptés au sport de haut niveau est indispensable pour que ce type de capteur montre son réel potentiel. A l'image des calibrations proposées, l'utilisation de cet outil doit rester simple et peu contraignante pour le sportif et l'entraîneur.

Des capteurs construits autour de magnétomètres, accéléromètres mais aussi gyroscopes (centrales inertielles) permettraient de s'affranchir des limites d'utilisation actuelles, en permettant de travailler dans un espace à trois dimensions sans se limiter à un mouvement uniquement en translation ou avec une rotation. L'avenir de ce type de capteurs pour une utilisation dans le domaine du sport d'élite semble donc s'orienter vers le développement de capteurs incluant ces 3 types de mesure voire aussi le GPS dans le cas de longs déplacements.

C'est le choix actuel d'études effectué notamment par nos concurrents australiens.

X. Bibliographie

- [1] Chang M. (2006). Evaluation of accelerometers mounted on wireless sensor motes. *Technical Repprt n°06/02*.
- [2] Cho S.Y., Gook Park C., In Jee G. (2002). Measurement of walking distance using low cost accelerometers. *4th Asian Control Conference*, September 25-27, 1799-1803.
- [3] H. Dejnabadi et al., A new approach to accurate measurement of uniaxial joint angles based on a combination of accelerometers and gyroscopes, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 52, NO. 8, August20
- [4] Fong T.W., Wong J.C.Y., Lam A.H.F., Lam R.H.W., Li W.J. (2004). A wireless motion sensing system using ADXL MEMs accelerometers for sports science applications. *5th world congress on intelligent control and automation, 15-19 june*, 5635-2640.
- [5] D. Fontaine et al., Sourceless Human Body Motion Capture, *Smart Objects Conf., sOc'*, 2003
- [6] W. Hernandez, Improving the response of an accelerometer by using optimal filtering, *Sensors and Actuators A: Physical* 88 (2001) 198–208.
- [7] King K., Yoon S. W., Perkins N.C. Najafi K. (2007). Wireless MEMS inertial sensor system for golf swing dynamics. *Sensors and Actuators*, 2007.
- [8] Mayagoita R.E., Nene A.V., Veltink P.H. (2002). Accelerometer and rate gyroscope measurement of kinematics: an inexpensive alternative to optical motion analysis system. *Journal of Biomechanics*, 35, 537-542.
- [9] Moix, S., Stiner C., Ladetto Q., Merminod B. (2007). Capteur et analyse de signaux pour la navigation pédestre.

- [10] Morris J.R.W. (1973). Accelerometry-a technique for the measurement of human body movements. *Journal of Biomechanics*, 6, 729-736.
- [11] Y.K. Thong et al., Dependence of inertial measurements of distance on accelerometer noise, *Measurement Science and Technology* (2002) 1163-1172
- [12] Y.K. Thong et al., Numerical double integration of acceleration measurements in noise, *Measurement* .2004.04.005
- [13] Vieilledent S. (2002). Comparaison de systèmes d'analyse du mouvement 3D. *Rapport Interne Laboratoire Mouvement, Action et Performance, INSEP*.
- [14] Y. Fujii, Impact response measurement of an accelerometer, *Mechanical Systems and Signal Processing* .2006.08.014