

# Evaluation du modèle d'erreur de capteurs MEMS-IMU

■ Jean-Marie BONNAZ

*Les MEMS (Micro Electronic Mechanical Systems) ou microsystèmes sont des capteurs miniaturisés. Ils sont développés depuis une dizaine d'années et sont basés sur les microtechniques. La technologie des MEMS permet de produire de nouveaux systèmes inertiels : les MEMS-IMU. Ils sont généralement à base de silicium. Un MEMS-IMU est composé d'accéléromètres, de gyroscopes, de magnétomètres et de capteurs de température. Leur taille mais surtout leur coût (une dizaine de dollars) laissent entrevoir des possibilités novatrices dans le cadre d'applications inertielles. Les MEMS-IMU sont cependant entachés d'erreurs importantes. Leur comportement a encore été peu étudié et nous ne savons pas encore modéliser les erreurs qui affectent ces capteurs. L'objectif de cet article est de présenter une démarche visant à comprendre un peu mieux le comportement d'erreur de ces capteurs pour pouvoir le modéliser. Elle se base sur une comparaison de mesures réalisées dans différentes conditions par des MEMS-IMU et une centrale inertielle haut de gamme (LN200) que l'on considère comme référence. Les recherches présentées dans cet article mettent en évidence l'existence de biais et de facteurs d'échelle sur les MEMS-IMU. Sur des durées assez courtes, on observe que les dérives sont négligeables. Aussi cet article présente différentes méthodes d'estimation des erreurs avec leurs avantages et inconvénients.*

## MOTS-CLÉS

MEMS, intégration GPS/MEMS-IMU, filtre de Kalman, modèle d'erreur

tions dans le domaine de l'intégration GPS/INS mais ils sont entachés d'erreurs importantes dont la modélisation a été peu étudiée actuellement.

L'objectif de cet article est de présenter une analyse du comportement d'erreur des capteurs MEMS-IMU.

Pour ce faire, nous avons dans un premier temps comparé les performances des MEMS-IMU à celles d'une centrale inertielle haut de gamme (LN 200). Cette première étude permet d'évaluer un modèle d'erreur. Dans un deuxième temps, nous avons investigué la performance d'un modèle d'erreur statistique.

## Essais à ski et à bicyclette

Afin de comparer les mesures réalisées par des MEMS-IMU aux données d'une centrale inertielle haut de gamme LN 200, l'EPFL et la société TracEdge (Grenoble, Isère) ont réalisé plusieurs tests sur vélo et sur ski. Une centrale inertielle LN 200 et des MEMS-IMU ont été arrimés solidement sur une plaque, elle-même fixée dans un sac à dos (Figure 3). La centrale et les MEMS-IMU sont fixés sur le même support afin qu'ils restent solidaires entre eux. Par la suite les éventuels déplacements de la centrale inertielle LN 200 et des MEMS par rapport à la plaque de fixation seront négligés.

Trois capteurs MEMS MT-9A fabriqués par la société Xsens Motion Technologies ont été utilisés (Figure 1). Ils sont constitués de quatre types de composants : trois accéléromètres, trois gyroscopes, trois magnétomètres et un capteur de température. Les accéléromètres ADXL 202 E sont fabriqués par la société Analog Devices et sont placés sur trois axes orthogonaux. Ils ont un bruit moyen de  $200 \text{ g} \sqrt{\text{Hz}}$  RMS. Le défaut d'alignement des axes est de  $0,01^\circ$ . Ils peuvent travailler entre  $-45^\circ \text{C}$  et  $80^\circ \text{C}$ . Les gyroscopes ENC03J sont

Les capteurs MEMS (Micro Electronic Mechanical Systems) sont des systèmes construits avec des techniques basées sur les circuits intégrés. Ils sont constitués de divers composants électroniques et mécaniques. Leurs principaux avantages sont leur taille minimale ( $10^{-4}$  à  $10^{-6}$  m) pour un coût relativement bas (une dizaine de dollars). Les capteurs MEMS existent depuis deux décennies environ mais leurs performances sont restées très longtemps limitées.

Durant ces dix dernières années, des avancées techniques, de nouveaux composants et des investissements pour des applications technologiques et commerciales ont considérablement amélioré leurs performances. Aujourd'hui ils sont utilisés dans des domaines variés comme la construction automobile, les télécommunications, la médecine, etc. Un MEMS est

constitué d'un résonateur, d'un boîtier et de circuits assurant les fonctions d'oscillation, de compensation de fréquence et de température. Le résonateur vibre à une fréquence spécifique sous l'effet d'une excitation externe. Les MEMS sont généralement à base de silicium mais d'autres composants comme des matériaux piézoélectriques et des polymères peuvent être utilisés pour certaines applications.

Les MEMS-IMU (Inertial Measurement Unit) sont un type de capteurs MEMS constitués de trois accéléromètres et de trois gyroscopes montés orthogonalement. La résolution supérieure à  $15^\circ/\text{h}$  des gyroscopes (rotation terrestre) oblige les fabricants à les coupler avec des magnétomètres pour déterminer l'orientation voulue (les magnétomètres indiquent le Nord magnétique). De part leur taille et leur coût, les MEMS-IMU laissent entrevoir de nouvelles applica-

fabriqués par la société Murata et sont également placés sur trois axes orthogonaux. Ils utilisent le principe de l'effet de Coriolis pour mesurer une vitesse angulaire. Les capteurs ENC03J permettent de mesurer des vitesses angulaires de  $\pm 300^\circ/\text{s}$ . Ils peuvent travailler entre  $-30^\circ\text{C}$  et  $85^\circ\text{C}$ . Les magnétomètres KM251 ont été fabriqués par la société Philips. Bien que leur rôle soit important pour l'orientation, nous ne les avons pas étudiés.



Figure 1. MEMS-IMU MT-9A XSens

La centrale inertielle LN 200 est un système équipé de trois accéléromètres et de trois gyroscopes montés orthogonalement. Les accéléromètres comportent un biais de 300 g et un facteur d'échelle de 300 ppm alors que les gyroscopes comportent un biais de  $1^\circ/\text{h}$  et un facteur d'échelle de 100 ppm.

Dans le cadre d'une autre étude, des GPS ont également été fixés dans le sac à dos. Il s'agit de récepteurs Javad Legacy bi-fréquence et blox mono-fréquence. Ils ont permis le calcul de solutions GPS /INS.

Une fois le dispositif mis au point, plusieurs tests ont été réalisés sur vélo et sur ski afin de pouvoir étudier le comportement d'erreur des MEMS-IMU dans différentes conditions de dynamisme.



Figure 2. Centrale inertielle LN 200.

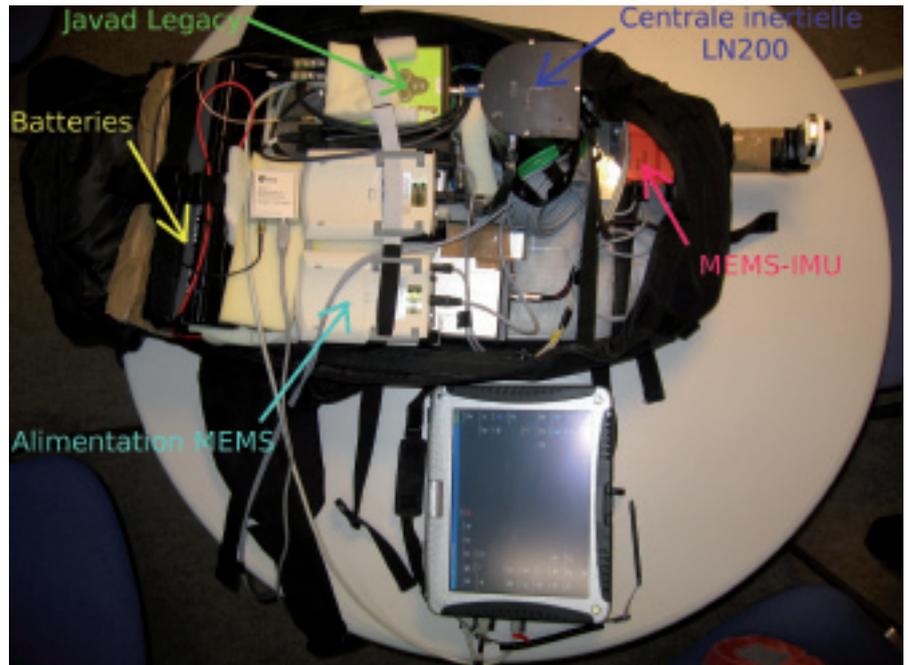


Figure 3. Dispositif expérimental.

### Etapes préalables à la comparaison des signaux

Pour pouvoir comparer au mieux les signaux MEMS-IMU aux données de la centrale inertielle de référence LN 200, plusieurs phases ont été nécessaires :

- Filtrage des mesures
- Synchronisation des données
- Rééchantillonnage
- Calcul d'un défaut d'alignement

Les données LN 200 et MEMS-IMU ont été filtrés afin d'éliminer le maximum de bruit en utilisant un filtre passe-bas. Ensuite, il a été nécessaire de synchroniser les données. En effet, la centrale inertielle LN 200 fournit des mesures basées sur le temps GPS (la centrale inertielle était en liaison avec le récepteur GPS Javad Legacy) alors que les MEMS-IMU ont leur propre base de temps. Dans un premier temps, nous avons synchronisé grossièrement les données MEMS-IMU et LN200. Nous avons synchronisé plus finement les signaux en utilisant un procédé d'autocorrélation.

Nous avons ensuite rééchantillonné les données de la centrale inertielle de référence LN200 à la même fréquence que celle des MEMS-IMU afin de pouvoir comparer deux signaux qui sont à la même fréquence (nous avons préféré rééchantillonner les mesures LN200

plutôt qu'interpoler les mesures MEMS-IMU pour ne pas introduire de bruit).

Après avoir filtré, synchronisé puis rééchantillonné les données, nous avons été obligés de calculer un défaut d'alignement entre les axes liés à la centrale inertielle LN200 et ceux liés aux MEMS-IMU. La détermination du défaut d'alignement a nécessité le calcul de deux solutions GPS/INS. Une première a été calculée en utilisant le récepteur GPS bifréquence Javad Legacy et la centrale inertielle de référence LN 200. Cette solution fournit des angles d'orientation. Par la suite, nous avons réintroduit ces angles d'orientation en tant qu'observations dans un filtre de Kalman développé à l'EPFL et intégrant des mesures GPS (L1 uniquement ou L1/L2) et des données MEMS-IMU (Waegli, 2007) :

$$h(\hat{x}) = (I_3 + B) \cdot \Phi_{LN200} + \omega_\Phi$$

$$\dot{B} = -\beta \cdot B + \sqrt{2\Phi_B \beta_B} \cdot \omega_\beta$$

avec  $B$  la matrice symétrique gauche des angles de boresight (angles entre les repères liés à la centrale inertielle de référence LN200 et ceux liés aux MEMS-IMU),  $\Phi_{LN200}$  les angles d'orientation fournis par l'intégration des données GPS L1/L2 avec les mesures de la centrale inertielle de référence LN200,  $\omega_\Phi$  le bruit de mesure,  $\beta_B$  l'inverse du temps de corrélation fixé à l'infini. Ces défauts d'ali-



gnement sont estimés avec une précision de 0,5° (Waegli, 2007). Ils permettent de calculer une nouvelle orientation :

$$(\hat{R}_b^n) = (I - E^n)R_b^n$$

avec  $R_b^n$  l'orientation initiale,

$(\hat{R}_b^n)$  l'orientation estimée,

$$E^n = \begin{bmatrix} 0 & -\varepsilon_z & \varepsilon_y \\ \varepsilon_z & 0 & -\varepsilon_x \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 0 \end{bmatrix}$$

matrice gauche symétrique des angles de boresight.

Le filtrage des données (élimination des hautes fréquences), la synchronisation des mesures effectuées par la centrale inertielle de référence LN200 et les MEMS-IMU, le rééchantillonnage des données LN200 et la correction du défaut d'alignement sont les quatre étapes préalables à la comparaison des données. Elles ont été décrites successivement ci-dessus. A celles-ci, nous pouvons également ajouter l'estimation statistique d'un modèle d'erreur (biais, facteurs d'échelle, dérives) sur la centrale inertielle de référence LN200. Celui-ci a été estimé par le calcul d'une solution de référence (GPS L1/L2 et centrale inertielle LN200).

## Estimation d'un modèle d'erreur par comparaison des signaux MEMS/IMU et LN 200

Nous avons fait l'hypothèse que les erreurs que comportait le signal pou-

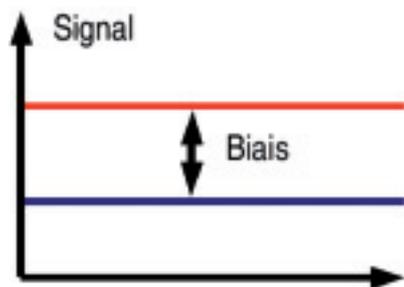


Figure 4. Biais.

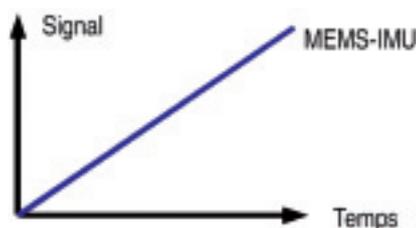


Figure 5. Facteur d'échelle.

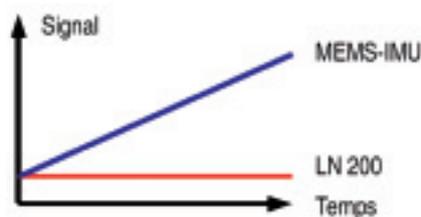


Figure 6. Dérive.

vaient être de trois natures : biais (Figure 4), facteurs d'échelle (Figure 5) et dérives linéaires (Figure 6).

Nous avons essayé de voir s'il était possible de modéliser le comportement d'erreur des MEMS-IMU avec cette hypothèse.

Une descente à ski et un tour de bicyclette sont composés de diverses périodes pendant lesquelles le dynamisme de l'athlète varie (Figure 7). On peut décomposer chaque descente en trois temps. Deux périodes pendant lesquelles le skieur est en position immobile (les capteurs mesurent des données constantes). Elles sont situées avant le départ et après l'arrivée (Figure 7, Figure 9, Figure 10). Leurs durées sont de trois minutes environ. Entre ces deux périodes statiques, on considère une période dynamique pendant laquelle le sportif est en plein effort. Durant cette dernière, les capteurs sont soumis à diverses variations.

Nous avons commencé l'étude du modèle d'erreur sur les deux parties où l'athlète est en position immobile (avant le départ, après l'arrivée). Nous rappelons que notre hypothèse considère que les capteurs sont affectés par des biais, des facteurs d'échelle et des dérives linéaires. Le fait que les don-

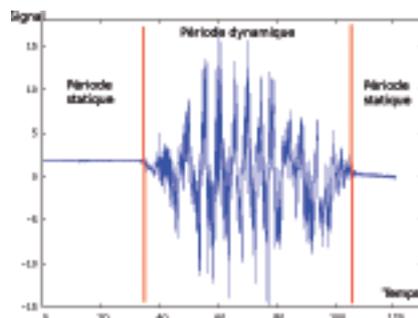


Figure 7. Décomposition d'une série de mesure (tour de vélo ou descente à ski).

nées mesurées soient constantes lorsque l'athlète est immobile, ne nous permet pas de mettre en évidence des facteurs d'échelle. Nous ne pouvons étudier que l'existence de biais et de facteurs d'échelle. Nous travaillons alors avec le modèle d'erreur suivant :

$S_{LN200} = S_{MEMS-IMU} + b$  avec  $S_{LN200}$  signaux de la centrale inertielle de référence,  $S_{MEMS-IMU}$  signaux des MEMS-IMU,  $b$  biais sur les MEMS-IMU.

$$a \cdot \frac{dS_{MEMS}}{dt} + b \cdot S_{MEMS} \cdot t = 0$$

avec  $a$  et  $b$  constantes,

$S_{MEMS-IMU}$  signaux des MEMS-IMU.

Une première étape dans le traitement des données en position statique a été la soustraction durant les périodes statiques des données MEMS-IMU aux données de la centrale inertielle de référence LN200 :

$d = S_{LN200} - S_{MEMS-IMU}$  avec  $d$  différence,  $S_{LN200}$  signaux de la centrale inertielle de référence,  $S_{MEMS-IMU}$  signaux des MEMS-IMU.

On calcule par la suite un biais en faisant la moyenne des différences sur chaque axe de chaque capteur :

$b = \bar{d} = \overline{(S_{LN200} - S_{MEMS-IMU})}$  avec  $b$  biais,  $\bar{d}$  différence moyenne,  $S_{LN200}$  signaux de la centrale inertielle de référence,  $S_{MEMS-IMU}$  signaux des MEMS-IMU.

La plupart du temps on observe que les écarts-types associés aux moyennes ne sont pas très élevés sur toutes les descentes (Tableau 1). Les biais calculés sur chaque axe ne sont cependant pas tous significatifs (on considère qu'une mesure est significative dès lors que la barre d'erreur associée à la mesure ne coupe pas l'axe des abscisses). Les biais non significatifs sont colorisés en rouge dans le Tableau 1. Sur trois MEMS-IMU les biais suivant les mêmes axes varient fortement suivant les capteurs. Malgré le fait que les trois MEMS soient identiques, on observe que chacun comporte ses propres biais (Figure 8). On constate également que pour un même capteur, les biais suivant les différents axes sont très différents. Les valeurs des biais suivant chaque axe ne semblent pas être corrélées.

		$f_x$ (m/s <sup>2</sup> )	$f_y$ (m/s <sup>2</sup> )	$f_z$ (m/s <sup>2</sup> )	$\omega_x$ (°/s)	$\omega_y$ (°/s)	$\omega_z$ (°/s)
Capteur 1	Biais	0.034	-0.087	-0.021	-0.072	0.170	1.000
	Ecart-type	0.020	0.100	0.024	0.076	0.076	0.160
Capteur 2	Biais	0.013	-0.003	-0.034	-0.460	-0.740	0.530
	Ecart-type	0.010	0.024	0.016	0.089	0.089	0.110
Capteur 3	Biais	0.060	-0.038	-0.011	0.150	-0.310	0.160
	Ecart-type	0.014	0.082	0.021	0.240	0.240	0.160

Tableau 1. Biais sur la période statique.

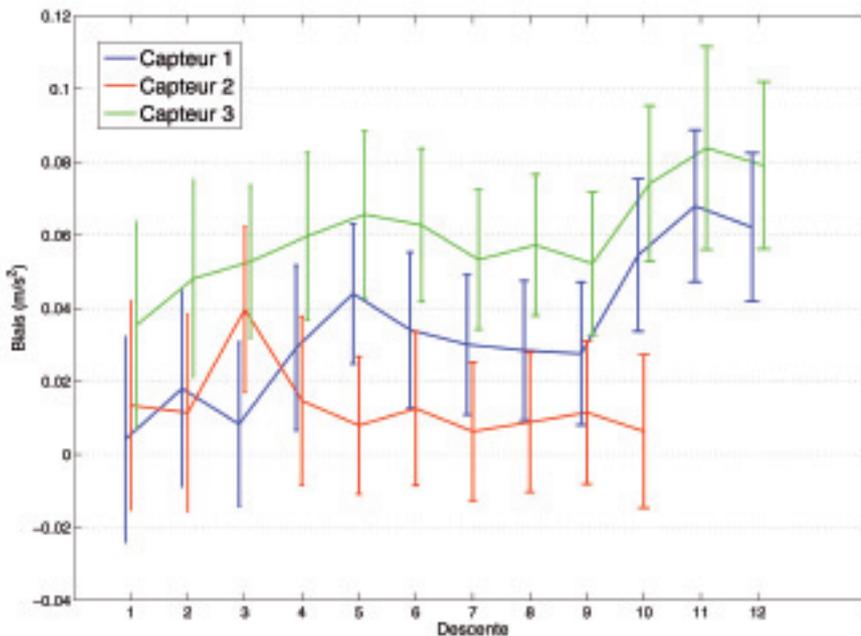


Figure 8. Biais en période statique sur trois capteurs MEMS-IMU.

▶ Par ailleurs, si l'on compare les biais calculés pendant la période statique précédant le départ et celle suivant l'arrivée, nous remarquons que les valeurs sont quasiment identiques (Tableau 2). Cela nous conduit à négliger l'existence

des dérives sur des durées de 90 secondes (temps moyen d'un skieur pour réaliser une descente). De cette première étape portant sur l'analyse des données pendant les périodes statiques, nous retiendrons trois éléments :

	Biais (périodes statiques)	
	Avant départ	Après arrivée
$f_x$ (m/s <sup>2</sup> )	0.034	0.038
$f_y$ (m/s <sup>2</sup> )	-0.087	-0.097
$f_z$ (m/s <sup>2</sup> )	-0.021	-0.019
$\omega_x$ (°/s)	-0.072	-0.073
$\omega_y$ (°/s)	0.170	0.171
$\omega_z$ (°/s)	1.000	0.997

Tableau 2. Biais avant le départ et après l'arrivée.



Figure 9 : Initialisation statique (avant départ).



Figure 10 : Phase statique après l'arrivée.

Les biais calculés sont pour la plupart statistiquement significatifs (les écarts-types ne sont pas trop grands). Les biais sont très différents d'un capteur à l'autre et d'un axe à l'autre (ils ne semblent pas être corrélés). Les dérives peuvent être négligées sur des périodes assez courtes (90 secondes).

La deuxième étape porte sur l'analyse des données lorsque l'athlète est en mouvement (période dynamique). Notre hypothèse de départ est toujours valable : les capteurs MEMS-IMU peuvent être affectés de biais, de facteurs d'échelle et de dérives linéaires. L'analyse en période statique décrite précédemment nous conduit à négliger l'influence des dérives. Il nous reste à étudier le rôle des biais et des dérives en partie dynamique.

En partie dynamique, nous modélisons les erreurs de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fe_x & 0 & 0 \\ 0 & fe_y & 0 \\ 0 & 0 & fe_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_x - b_x \\ s_y - b_y \\ s_z - b_z \end{bmatrix}$$

avec  $S_i$  forces spécifiques ou mesures angulaires,  $fe_i$  facteurs d'échelle,  $b_i$  biais suivant les axes.

L'analyse en période statique nous a permis de mettre en évidence uniquement l'existence de biais sur les capteurs que nous avons pu calculer. Le traitement des facteurs d'échelle était impossible (dynamisme trop faible). En partie dynamique, plusieurs méthodes de calcul sont envisageables pour analyser le comportement d'erreur des capteurs MEMS-IMU. Cela dépend du nombre d'inconnues que nous considérons. Cherchons-nous à déterminer uniquement des facteurs d'échelle, uniquement des biais ou des biais et des facteurs d'échelle ?



		$f_x$ (m/s <sup>2</sup> )	$f_y$ (m/s <sup>2</sup> )	$f_z$ (m/s <sup>2</sup> )	$\omega_x$ (°/s)	$\omega_y$ (°/s)	$\omega_z$ (°/s)
Capteur 1	Biais	-0.110	-0.017	-0.130	-0.220	0.200	1.300
	Ecart-type	0.035	0.026	0.048	0.049	0.120	0.098
Capteur 2	Biais	-0.160	-0.057	-0.190	-0.520	-0.600	0.530
	Ecart-type	0.052	0.009	0.059	0.031	0.054	0.052
Capteur 3	Biais	0.010	0.005	-0.100	-0.140	-0.350	0.210
	Ecart-type	0.030	0.022	0.037	0.180	0.160	0.110

Tableau 3. Biais.



Figure 12 : Porte droite, le corps est penché de l'autre côté.

		$f_x$ (m/s <sup>2</sup> )	$f_y$ (m/s <sup>2</sup> )	$f_z$ (m/s <sup>2</sup> )	$\omega_x$ (°/s)	$\omega_y$ (°/s)	$\omega_z$ (°/s)
Capteur 1	FE	-0.004	-0.039	-0.024	-0.004	-0.010	0.002
	Ecart-type	0.005	0.007	0.006	0.002	0.003	0.001
Capteur 2	FE	-0.017	-0.038	-0.024	-0.005	-0.003	-0.001
	Ecart-type	0.006	0.006	0.008	0.001	0.002	0.001
Capteur 3	FE	0.008	-0.043	-0.022	-0.003	-0.008	-0.003
	Ecart-type	0.006	0.007	0.006	0.001	0.002	0.001

Tableau 4. Facteurs d'échelle.

	$f_x$ (m/s <sup>2</sup> )	$f_y$ (m/s <sup>2</sup> )	$f_z$ (m/s <sup>2</sup> )	$\omega_x$ (°/s)	$\omega_y$ (°/s)	$\omega_z$ (°/s)
Capteur 1	0.96	-0.33	0.98	0.29	0.45	0.25
Capteur 2	-0.96	0.31	0.98	0.32	0.50	0.31
Capteur 3	0.96	0.35	0.98	0.28	0.48	0.31

Tableau 5. Corrélations entre biais et facteurs d'échelle.



Figure 11 : Porte gauche, le corps est penché d'un côté.

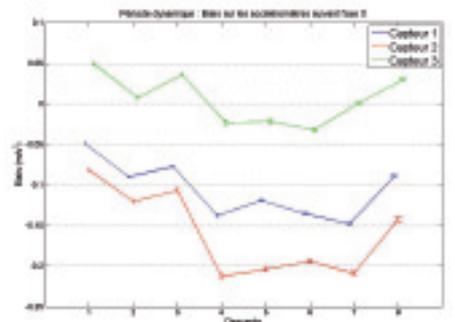


Figure 13 : Biais sur les accéléromètres en période dynamique.

Comme nous avons calculé des biais sur les parties statiques, nous pouvons considérer en premier lieu que nous cherchons à déterminer uniquement des facteurs d'échelle (on considère les biais connus) :

$$fe = \frac{S_{LN200}}{S_{MEMS-IMU} - b_i}$$

Cette méthode fournit des facteurs d'échelle importants avec des écarts-types grands. Elle n'est pas concluante et nous fait en partie douter quant à la validité de notre hypothèse.

Une autre méthode de calcul consiste à ne pas tenir compte des biais calculés en partie statique. Notre système comporte deux inconnues : un biais et un facteur d'échelle. Les dérives sont toujours négligées (période courte). Avec la méthode des moindres carrés, nous pouvons estimer les paramètres sur tous les axes des capteurs.

Les résultats révèlent que les biais et les facteurs d'échelle varient assez fortement suivant les séries de mesure (on rappelle qu'une série de mesure correspond à une descente à ski ou à un tour de bicyclette) (Tableau 3 et

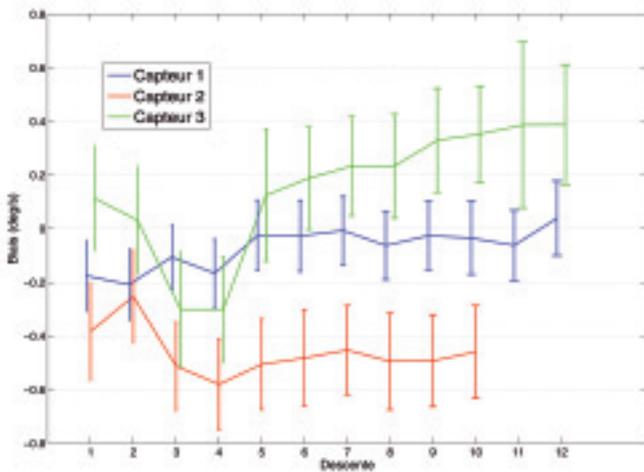


Figure 14. Biais sur les gyroscopes en période dynamique.

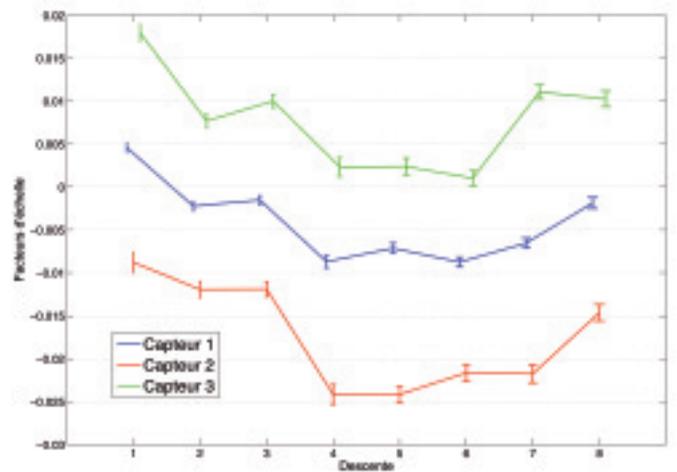


Figure 15. Facteurs d'échelle sur les accéléromètres.

Tableau 4, Figure 13 et Figure 14). Les corrélations entre les biais et les facteurs d'échelle sont également très fortes sur les accéléromètres (Tableau 5). Néanmoins sur l'axe Y des accéléromètres, la corrélation entre les paramètres est nettement plus faible. Cela peut s'expliquer par le mouvement du skieur lors de la descente : l'axe Y est orienté de telle manière que l'accéléromètre mesure un signal de forte amplitude (Figure 11 et Figure 12). Sur les gyroscopes les corrélations entre les biais et les facteurs d'échelle ne sont pas trop importantes. Nous pouvons retenir que cette méthode de calcul consistant à estimer deux paramètres (biais et facteurs d'échelle) fournit des résultats très précis (les écarts-types associés aux biais sont faibles). Néanmoins, les corrélations sur les accéléromètres sont élevées, excepté sur celui qui mesure les plus grandes variations.

Une autre méthode consiste à calculer des biais en considérant que le signal n'est pas affecté par un facteur d'échelle (ce qui revient à refaire l'étude faite en partie statique sur la période dynamique). On considère le modèle d'erreur :

$S_{LN200} = S_{MEMS-IMU} + b$  avec  $S_{LN200}$  signaux de la centrale inertielle de référence,  $S_{MEMS-IMU}$  signaux des MEMS-IMU,  $b$  biais sur les MEMS-IMU et on calcule le biais en faisant la moyenne de la différence :

$b = \bar{d} = \frac{(S_{LN200} - S_{MEMS-IMU})}{n}$  avec  $b$  biais,  $\bar{d}$  différence moyenne,  $S_{LN200}$  signaux de la centrale inertielle de référence,  $S_{MEMS-IMU}$  signaux des MEMS-IMU.

Les résultats montrent des biais constants suivant les séries de mesures (Tableau 6). Par contre les écarts-types associés sont très importants et les biais calculés sont non significatifs.

### Estimation d'un modèle d'erreur par méthode statistique

Dans la partie précédente, nous avons cherché à comprendre le comportement d'erreur des capteurs MEMS-IMU par comparaison des données avec des mesures faites par une centrale inertielle de référence LN 200.

Or, il existe des procédés statistiques qui permettent d'estimer un modèle d'erreur au cours du temps. Les principaux sont la marche constante, la marche aléatoire, le procédé de Gauss-Markov du 1<sup>er</sup> ordre. Ce dernier permet d'estimer un modèle d'erreur en temps réel. Ces méthodes de calcul sont couramment utilisées dans les filtres de Kalman pour le calcul de solution GPS/INS.

Nous avons donc essayé de calculer plusieurs solutions GPS/INS en se servant de données GPS L1/L2 et de mesures MEMS-IMU. Nous avons pu estimer des biais de manière assez précise avec un procédé de Gauss-Markov du 1<sup>er</sup> ordre :

$$\hat{l}^b = l^b + b_{\rho} + w_{\rho}$$

$$b_{\rho} = -\beta_{\rho} + \sqrt{2\sigma_{\rho}^2 \beta_{\rho}^2} \cdot w_{\rho}$$

avec  $\hat{l}^b$  la mesure MEMS-IMU compensée (force spécifique, mesure angulaire),  $l^b$  l'observation,  $b_{\rho}^b$  le biais de la mesure inertielle,  $w_{\rho}^b$  le bruit de mesure,  $\sigma_{\rho}^b$  l'amplitude de la densité spectrale et  $\beta_{\rho}^b$  l'inverse du temps de corrélation.

		$f_x$ (m/s <sup>2</sup> )	$f_y$ (m/s <sup>2</sup> )	$f_z$ (m/s <sup>2</sup> )	$\omega_x$ (°/s)	$\omega_y$ (°/s)	$\omega_z$ (°/s)
Capteur 1	Biais	-0.078	-0.009	0.042	-0.226	0.151	1.323
	Ecart-type	0.012	0.030	0.007	0.050	0.116	0.099
Capteur 2	Biais	-0.047	-0.051	-0.018	-0.530	-0.612	0.525
	Ecart-type	0.012	0.005	0.008	0.031	0.049	0.053
Capteur 3	Biais	-0.041	0.014	0.059	-0.142	-0.393	0.201
	Ecart-type	0.012	0.025	0.004	0.180	0.150	0.107

Tableau 6. Biais.

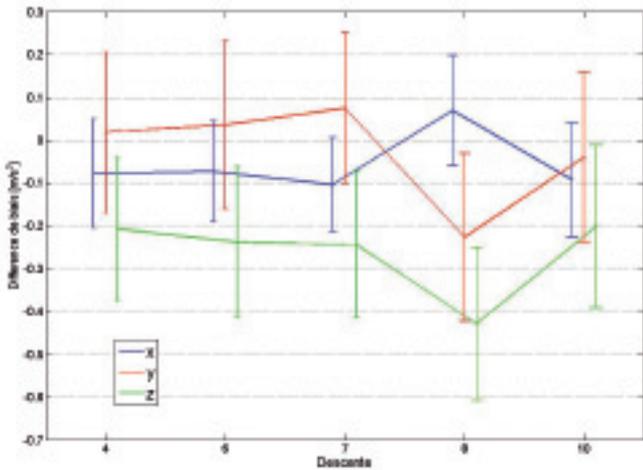


Figure 16. Comparaison des biais issus de la comparaison LN 200 / MEMS-IMU avec ceux estimés statistiquement (accéléromètres)

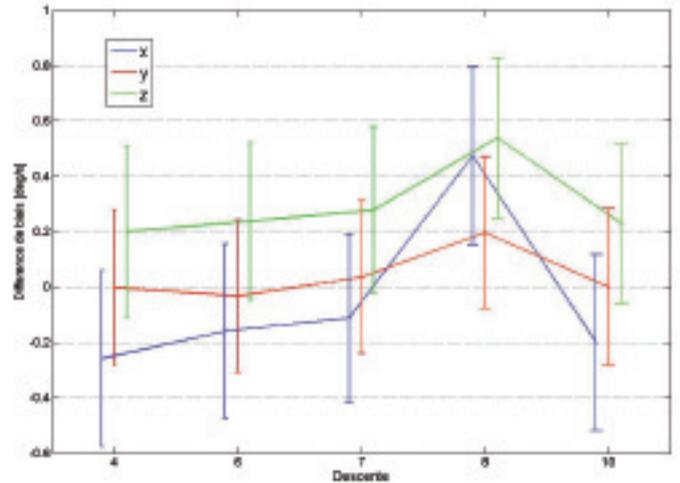


Figure 17. Comparaison des biais issus de la comparaison LN 200 / MEMS-IMU avec ceux estimés statistiquement (gyroscopes)

## Confrontation des résultats obtenus par comparaison des signaux

Jusqu'à présent, nous avons réfléchi à différentes manières de modéliser les erreurs que pouvaient comporter les capteurs MEMS-IMU. Nous avons comparé les mesures MEMS-IMU aux données d'une centrale inertielle de référence LN200 dans différentes conditions de dynamisme. Nous avons vu que nous pouvions également estimer un modèle par des méthodes statistiques. Il nous reste maintenant à comparer les résultats obtenus qui devraient normalement être assez proches.

Rappelons que la comparaison des données MEMS/IMU avec celles de la centrale inertielle de référence LN 200 nous permet d'estimer des biais dans différentes configurations de mouvement. Nous avons pu déterminer trois biais :

Lorsque l'athlète est en position immobile (période statique) :

$S_{LN200} = S_{MEMS-IMU} + b$  avec  $S_{LN200}$  signaux de la centrale inertielle de référence,  $S_{MEMS-IMU}$  signaux des MEMS-IMU,  $b$  biais sur les MEMS-IMU.

Lorsque l'athlète réalise son effort (période dynamique), nous avons calculé des biais par deux méthodes :

- Régression linéaire (moindres carrés) :

$$\begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fe_x & 0 & 0 \\ 0 & fe_y & 0 \\ 0 & 0 & fe_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_x - b_x \\ s_y - b_y \\ s_z - b_z \end{bmatrix}$$

avec  $s_i$  forces spécifiques ou mesures angulaires,  $fe_i$  facteurs d'échelle,  $b_i$  biais suivant les axes.

Nous estimons des biais avec des facteurs d'échelle.

- En considérant que les facteurs d'échelle sont négligeables :  $S_{LN200} = S_{MEMS-IMU} + b$  avec  $S_{LN200}$  signaux de la centrale inertielle de référence,  $S_{MEMS-IMU}$  signaux des MEMS-IMU,  $b$  biais sur les MEMS-IMU.

La méthode statistique (procédé de Gauss-Markov du 1<sup>er</sup> ordre) estime également des biais.

Dans l'idéal, il faudrait que les différents biais estimés soient identiques.

Dans un premier temps nous allons vérifier si les biais calculés sur la partie statique sont compatibles avec ceux estimés en période dynamique par régression linéaire. On observe des différences importantes qui peuvent provenir des coefficients de corrélation importants qui biaisent l'estimation.

Dans un deuxième temps, nous allons vérifier la compatibilité des biais estimés en partie dynamique par moindres carrés avec ceux calculés en ne tenant pas compte des facteurs d'échelle. On observe des différences importantes, notamment sur les axes X et Z des accéléromètres. Cela peut s'expliquer par l'existence de facteurs d'échelle qui ne sont soit pas pris en compte, soit très corrélés avec les biais. On remarque sur l'axe Y des différences moindres comparées aux autres axes.

## Confrontation des résultats obtenus par comparaison des signaux bruts avec ceux estimés statistiquement

Un procédé de Gauss-Markov du 1<sup>er</sup> ordre permet d'évaluer des biais de manière statistique en temps réel. Ces biais estimés sont-ils compatibles avec ceux calculés par comparaison des signaux MEMS-IMU / LN 200.

Pour répondre à cette question, nous avons réalisé trois comparaisons. Dans les paragraphes précédents, nous avons vu que les biais estimés par comparaison des signaux ne sont pas les mêmes selon que l'athlète soit en mouvement ou non. Nous allons maintenant les comparer aux biais estimés par la méthode statistique (procédé de Gauss-Markov du 1<sup>er</sup> ordre).

Dans un premier temps, nous avons confronté les biais calculés lorsque l'athlète est immobile avec ceux estimés statistiquement. On observe sur les gyroscopes que les biais calculés en période statique sont quasiment identiques à ceux estimés par un procédé de Gauss-Markov du 1<sup>er</sup> ordre. Ces résultats sont néanmoins à nuancer car les écarts-types associés à la comparaison sont importants (Figure 16 et Figure 17).

La comparaison des biais calculés sur la partie dynamique avec ceux estimés statistiquement ne fournit pas des résultats satisfaisants. Les écarts sont importants.

## Tableau récapitulatif

		Paramètre estimé	Avantages	Limites
Comparaison des signaux	Partie statique	Biais	Influence des facteurs d'échelle négligeable	Certains biais sont non significatifs
		Biais	Valeurs proches de celles estimées en partie statique	Biais non significatifs
	Partie dynamique	Biais et facteur d'échelle	Précision élevée	Corrélations fortes
		Facteur d'échelle	Correction par les biais calculés en partie statique	Facteurs d'échelle proches de 1
Méthode statistique	Tout le signal	Biais	Précision	Facteurs d'échelle difficilement estimables

Tableau 7. Bilan.



Le Tableau 7 récapitule les méthodes que nous avons utilisées pour l'estimation d'un modèle d'erreur. En règle générale, la précision des résultats obtenus est le facteur limitant. Certains paramètres ne sont pas significatifs statistiquement. La méthode consistant à estimer un biais et un facteur d'échelle sur la partie dynamique fournit des résultats extrêmement précis. Cependant les biais et facteurs d'échelle sont très corrélés sur deux axes des accéléromètres.

## Conclusion

Le comportement d'erreur des capteurs MEMS-IMU est peu connu. De part les possibilités novatrices qu'offrent de tels capteurs, il était nécessaire de se pencher sur les erreurs qui pouvaient les affecter. Dans un premier temps, nous avons cherché à comparer des mesures MEMS-IMU avec celles réalisées par une centrale inertielle de référence LN 200. Nous avons fait l'hypothèse que les capteurs pouvaient être affectés de biais, de facteurs d'échelle et de dérives linéaires. La comparaison des données MEMS-IMU et des mesures réalisées par la centrale inertielle de référence LN200 nous a permis de calculer des biais et des facteurs d'échelle dans différentes configurations de dynamisme. Cette comparaison nous a aussi conduit à considérer l'influence des dérives sur des intervalles de temps assez courts. La modélisation des biais

par un procédé de Gauss-Markov du 1<sup>er</sup> ordre offre une estimation qui est quasiment identique aux résultats issus de la comparaison des données.

La décorrélation des biais et des facteurs d'échelle reste cependant difficile à effectuer. Aussi il est possible que le modèle d'erreur choisit ne convienne pas vraiment. On peut imaginer un modèle dans lequel les facteurs d'échelle ne soient pas linéaires mais suivent une autre fonction (polynomiale par exemple).

Dans le cas de futures intégrations GPS/MEMS-IMU, il conviendra de déterminer la meilleure méthode d'estimation de biais. C'est-à-dire celle qui permettra d'atteindre les meilleurs résultats par rapport à une intégration GPS /INS calculée avec du matériel performant. ●

## Contact

Jean-Marie BONNAZ  
jmbonnaz@gmail.com

NDLR : D'une façon générale, le sujet a été abordé dans le n° 113 sous la signature de A. Waegli, J. Skaloud et J.-M. Bonnaz. Ce dernier étant lauréat du prix AFT 2007, XYZ a le plaisir de porter à la connaissance de ses lecteurs le développement complet de sa propre recherche. L'AFT renouvelle ses félicitations à J.-M. Bonnaz.

## Bibliographie

- A. Waegli, "Assessment of GPS/MEMS-IMU Integration Performance in Ski Racing", in ENC, Geneva, Switzerland, 2007.
- A. Waegli and J. Skaloud, "Turning Point - Trajectory Analysis for Skiers", InsideGNSS, 2007.
- A. Waegli, J. Skaloud, P. Tomé, and J.-M. Bonnaz, "Assessment of the Integration Strategy between GPS and Body-Worn MEMS Sensors with Application to Sports", in ION GNSS, Fort Worth, Texas, 2007.
- A. Waegli, J.-M. Bonnaz, J. Skaloud, "Evaluation de capteurs inertiels de type MEMS intégrés avec GPS pour l'analyse de performance sportive", XYZ, 2007.
- N. El-Sheimy and X. Niu, "The Promise of MEMS to the Navigation Community", InsideGNSS, 2007.
- J.-M. Bonnaz, "Analyse du comportement de capteurs inertiels en trajectographie", vol. Travail de fin d'études : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 2007.

## Remerciements

L'auteur remercie M. Adrian Wägli et le Dr Jan Skaloud, encadrants de ce travail et l'équipe du professeur Merminod pour son accueil dans le laboratoire de l'EPFL, sans oublier également la fondation Besnard de Quelen, les régions Rhône-Alpes, Pays de la Loire et le Conseil Général de l'Ain pour leur aide financière.

## ABSTRACT

MEMS (Micro Electronic Mechanical Systems) are new sensors which have been developed during the last decade. They are used in a lot domain such as medicine, biology, car, airline etc. MEMS are both smaller and cheaper than IMU (Inertial Measurement Unit). Nevertheless MEMS-IMU are less accurate than conventional systems. Error behavior of MEMS-IMU is still unknown. The aim of this paper is to present research about error behavior of MEMS sensors. MEMS data had been compared with IMU data. This research presents the existence of important systematic errors in the MEMS data. Moreover, these errors are a fluctuating character. Considering a relative short duration (90 seconds), they are no drifts but they are important biases and scale factors.