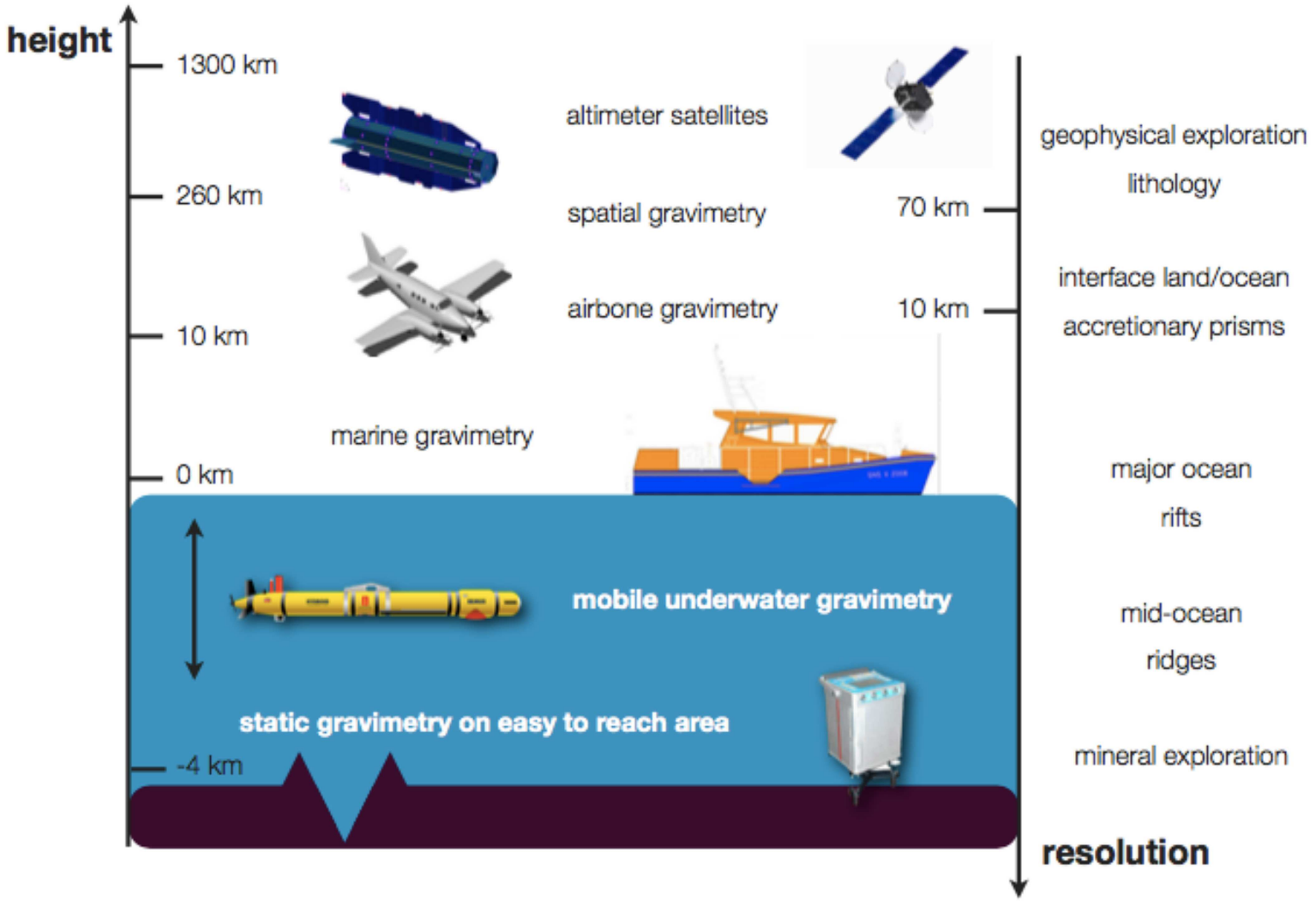
Expérimentation d'un gravimètre mobile léger pour la mesure du champ de pesanteur en fond de mer

Clément Roussel, Jérôme Verdun*, Marcia Maia, José Cali, Jean-François d'Eu, Marie-Françoise Lequentrec-Lalancette, Gwendoline Pajot-Métivier, Marie-Édith Bouhier, Patrick Jaussaud

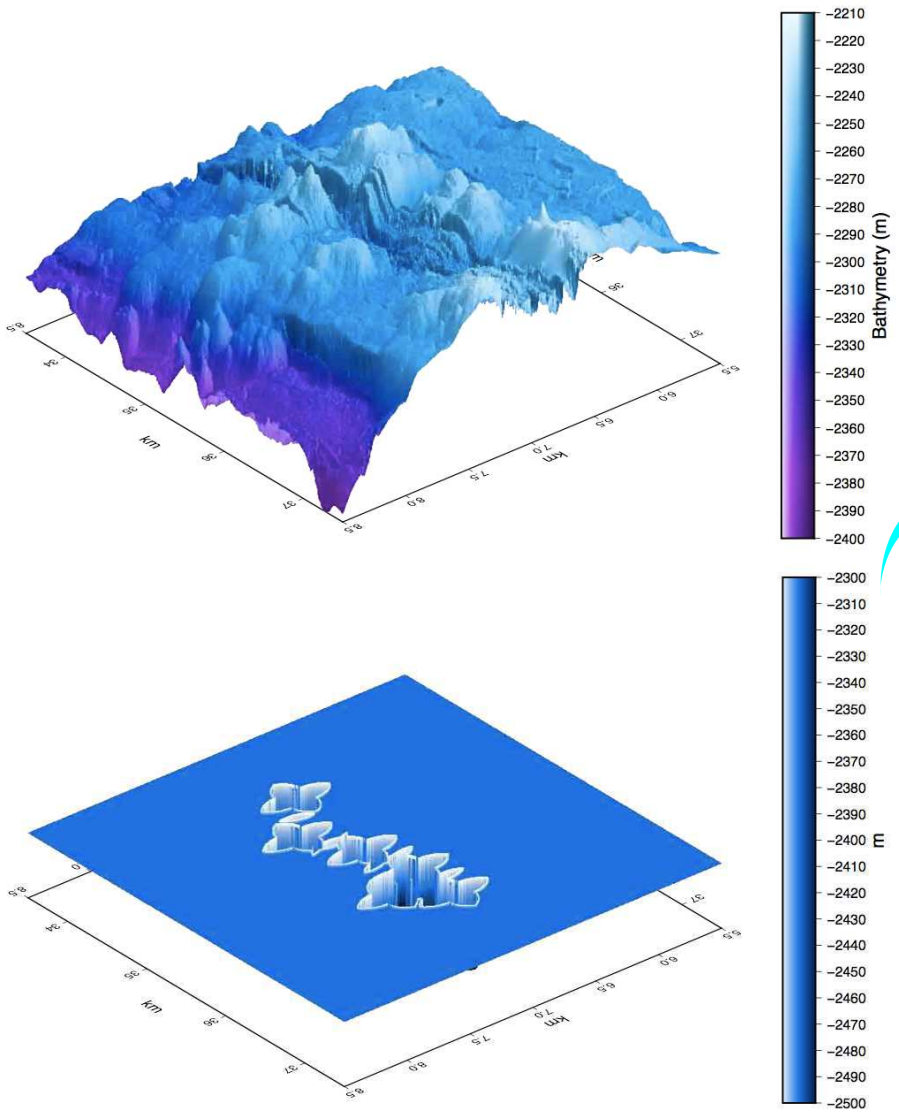
∗ Cnam – Laboratoire Géomatique et Foncier (GεF/EA Cnam 4630)

Colloque G2 – Montpellier 12 – 14 novembre 2018

Mesure du champ de pesanteur en mer



« Cibles » et sensibilité requise



Plan de la présentation

1. Principes généraux de la gravimétrie mobile
2. Le système « GRAVIMOB »
3. Problématique d'ajustage des paramètres
4. Traitement des données
5. Résultats de la campagne d'essai GRAVIMOB
6. Voies d'amélioration

$$\ddot{\mathbf{X}}^i = \mathbf{g}^i + \mathbf{a}^i_{ng}$$

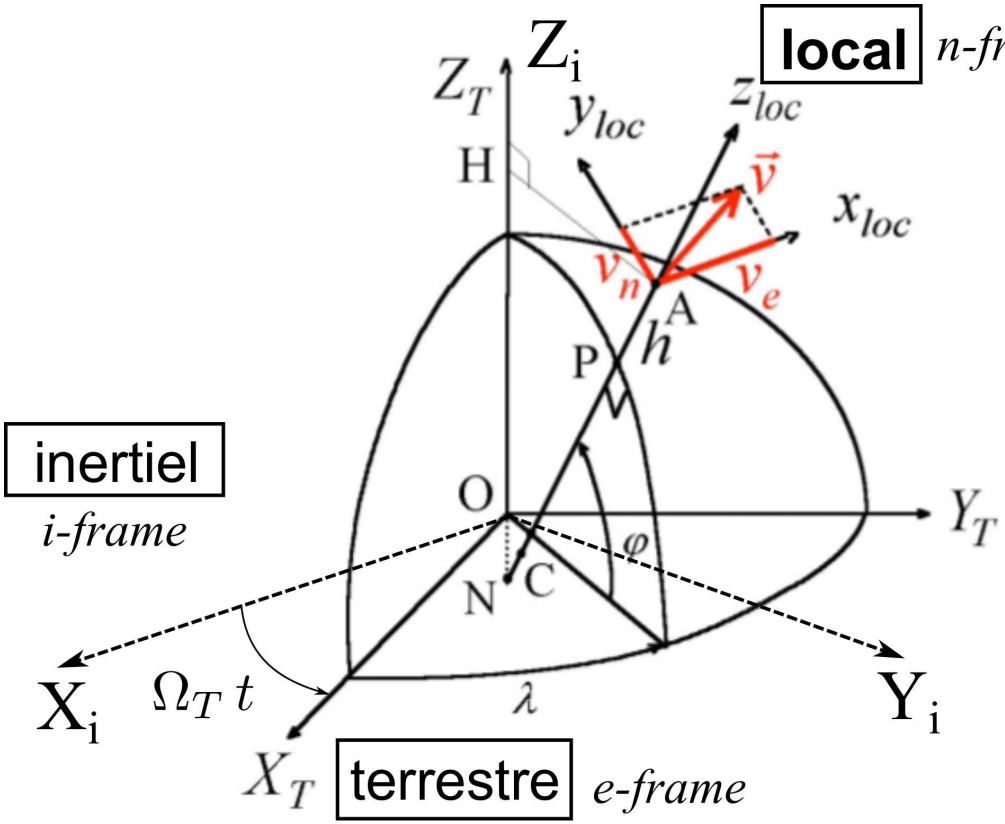
2^{nde} loi de Newton

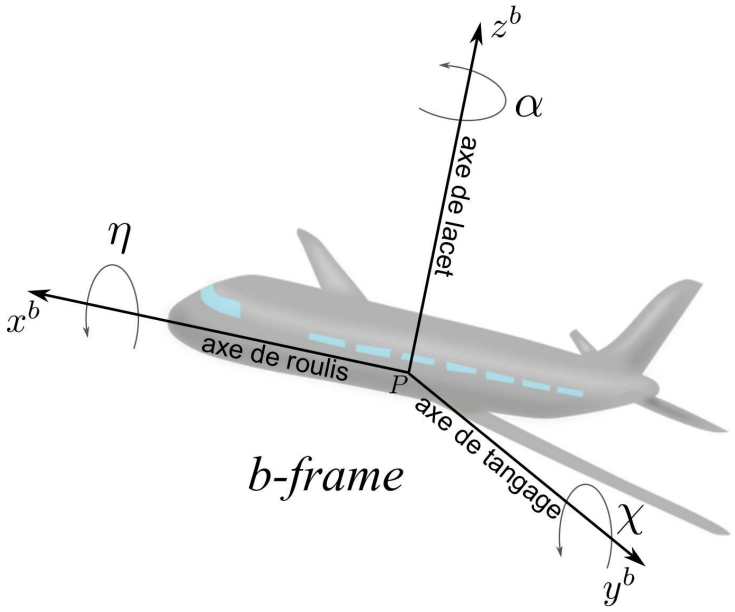
$\ddot{\mathbf{X}}^i \longleftarrow$ mouvement du porteur $\longleftarrow$ **système de positionnement**

$\mathbf{a}^i_{ng} \longleftarrow$ accéléromètre $\longleftarrow$ **stabilisation ou détermination de l'attitude**

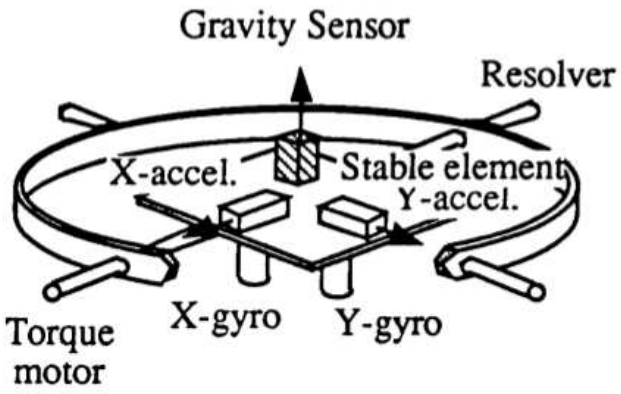
Mesure d'accélération sur un porteur mobile

Repères de la gravimétrie mobile

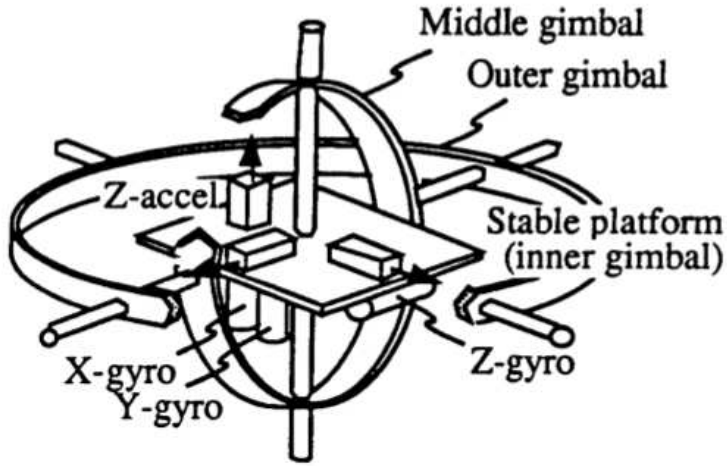




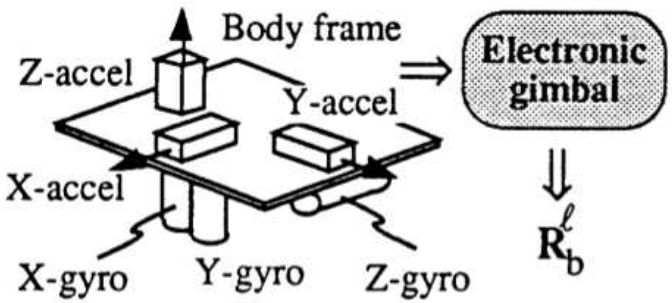
Les « grands principes »



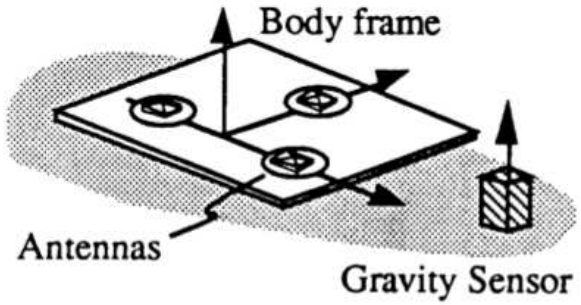
a) Damped platform



b) Schuler-tuned platform

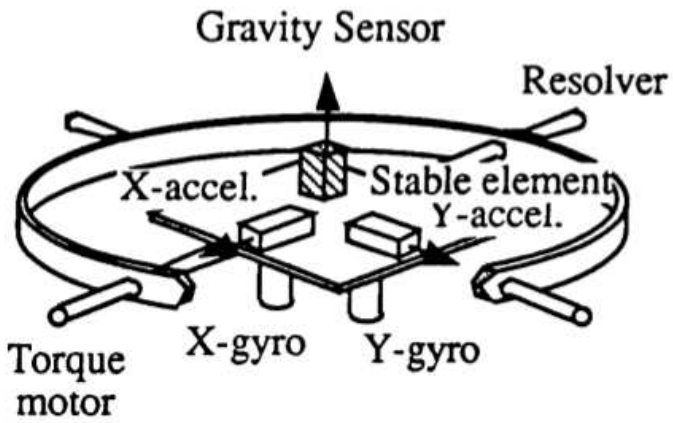


c) Strapdown INS

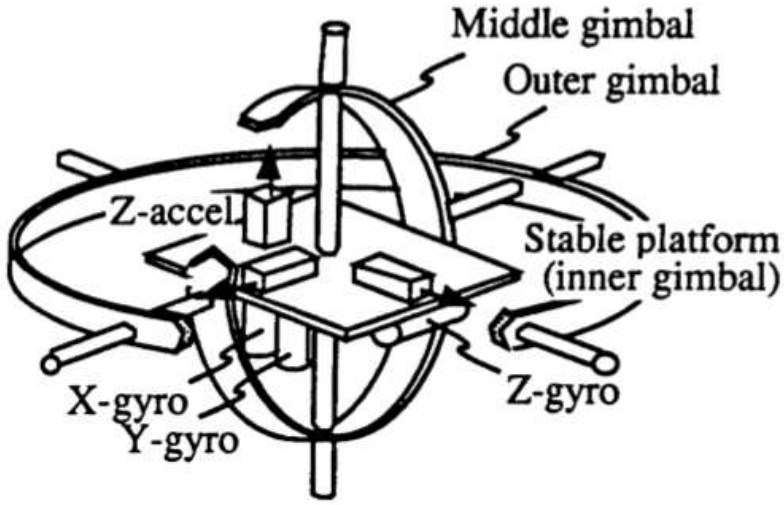


d) GPS multi-antenna

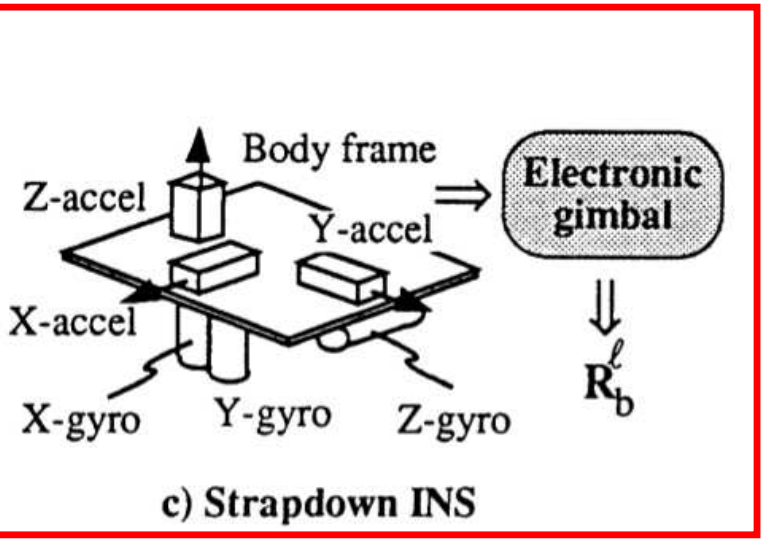
Les « grands principes »



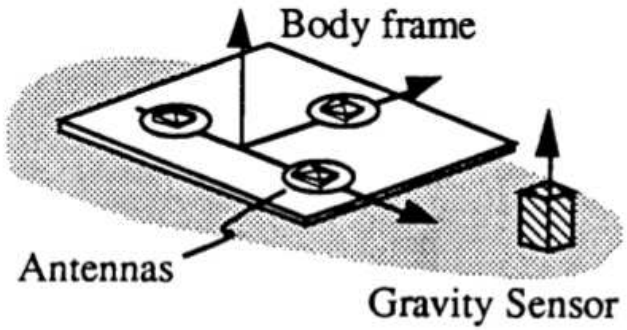
a) Damped platform



b) Schuler-tuned platform



c) Strapdown INS



d) GPS multi-antenna

« GRAVIMOB » : Gravimétrie et gradiométrie mobiles en milieu sous-marin

Thèse de Clément Roussel (2014 - 2017), Cnam, ED SPIGA - Projet GRAVIMOB (LDO, Cnam-GεF-L2G, IFREMER, MAPPEM Geophysics)

Expérimentation d'un gravimètre mobile léger et novateur pour la mesure du champ de gravité en fond de mer

- intéresse la prospection et l'étude des structures en fond de mer
- opère dans un environnement favorable = faibles accélérations perturbatrices et température constante
- utilise une nouvelle méthode de filtrage de Kalman « unscented » (UKF)
- mesure l'accélération gravitationnelle et ses gradients dans une direction

« GRAVIMOB » : le porteur

AUV

-

Autonomous

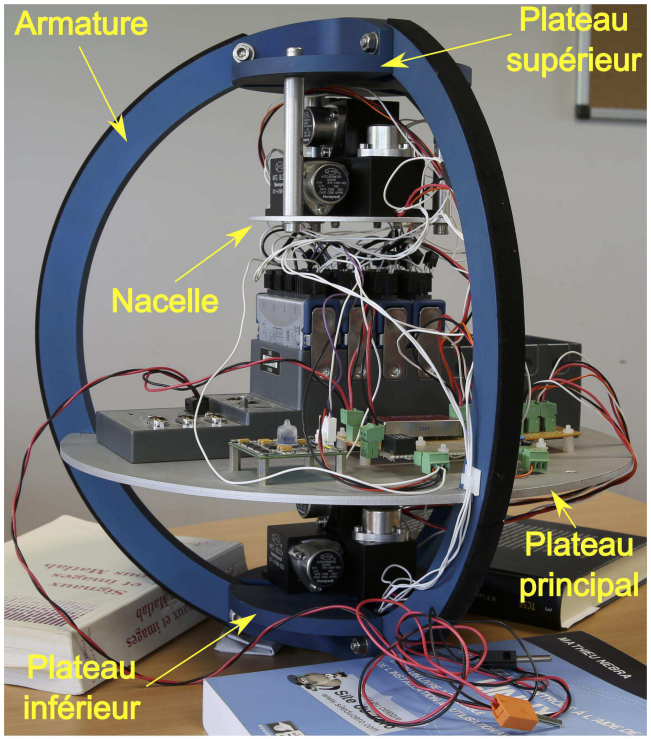
Underwater

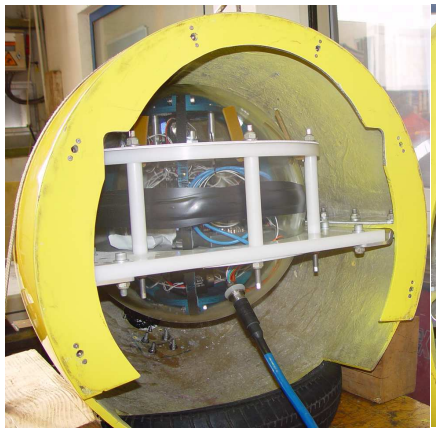
Vehicule

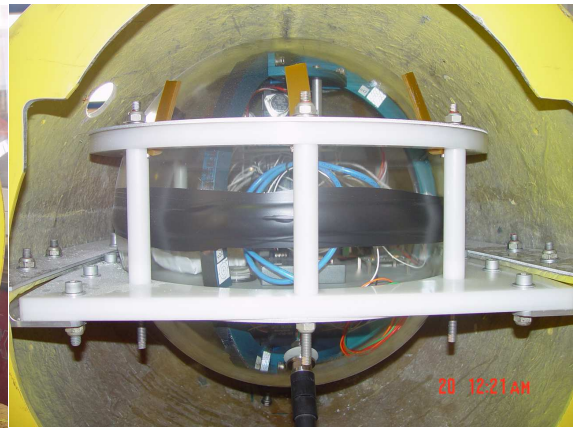
-

IFREMER

« GRAVIMOB » : les capteurs







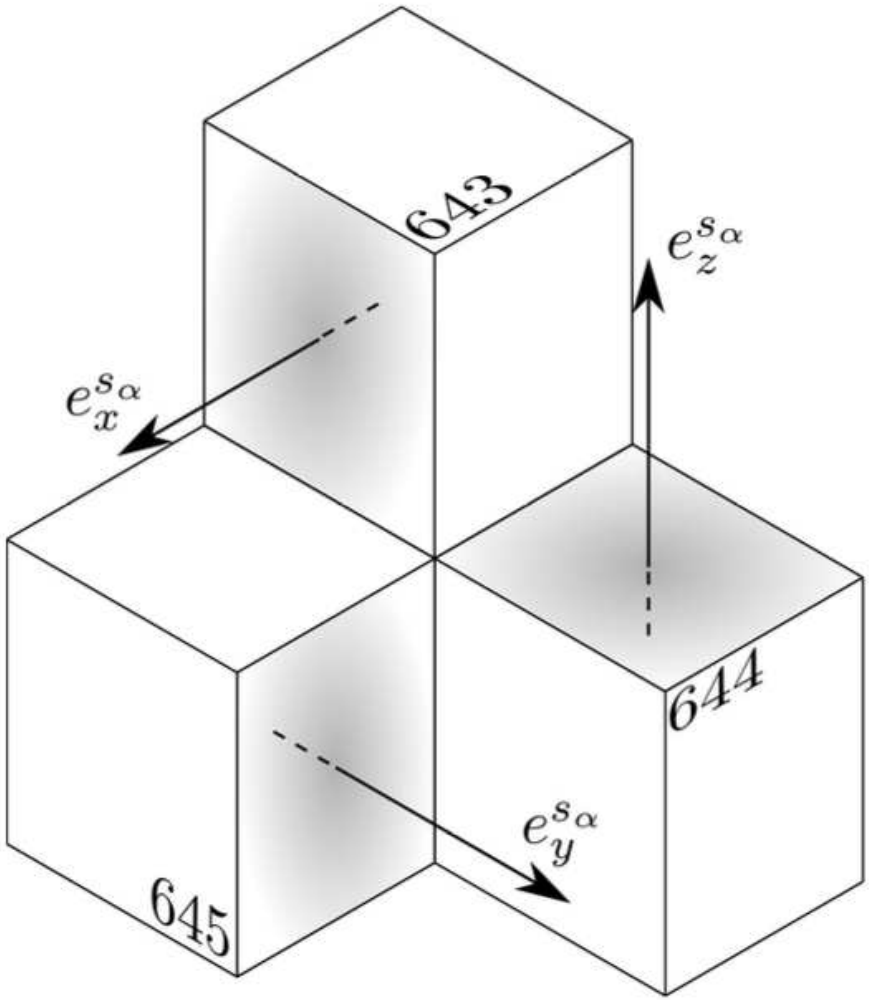
Les accéléromètres de GRAVIMOB

Performances	
Plage d'entrée	$\pm\, 60\mathrm{g}$
Résolution	$<\, 1\ \mu\mathrm{g}$
Biais	$<\, 4\ \mathrm{mg}$
Facteur d'échelle	1,20 à 1,46 $\mathrm{mA/g}$
Mésalignement	$<\, 1\,\mathrm{mrad}$
Résistance aux chocs	$150\mathrm{g}$
Bande passante	$>\, 300\ \mathrm{Hz}$
Sensibilité à la température	$\approx\, 60\ \mathrm{mGal/^\circ C}$

Performances de l'accéléromètre « Q-Flex QA-3000 » déterminées dans les laboratoires d'essais de la société ®Honeywell et au laboratoire GeF. La valeur de g correspond ici à la valeur $9,80708\,\mathrm{m\ s^{-2}}$

Le repère du capteur accélérométrique

« sensor frame » (s-frame)



Problématique d'ajustage des paramètres

Équation d'ajustage

$$\boldsymbol{a}^b = C_s^b \boldsymbol{a}^s = C_s^b \, \boldsymbol{b}_T^s + C_s^b \, C_r^s(T) \, K(T) \, \boldsymbol{u} + C_s^b \, \boldsymbol{\varepsilon}_T^s$$

- $\boldsymbol{a}^b$, $\boldsymbol{a}^s$, accélérations de rappel dans les repères « body » et « sensor » ;
- $\boldsymbol{b}_T^s$, biais ;
- $\boldsymbol{u}$, tensions électriques ;
- $\boldsymbol{\varepsilon}_T^s$, bruit ;
- $K(T)$, matrice des facteurs d'échelle ;
- $C_r^s(T)$, matrice des mésalignements ;
- C_s^b, matrice de passage « sensor » vers « body ».

Détermination expérimentale des paramètres d'ajustage

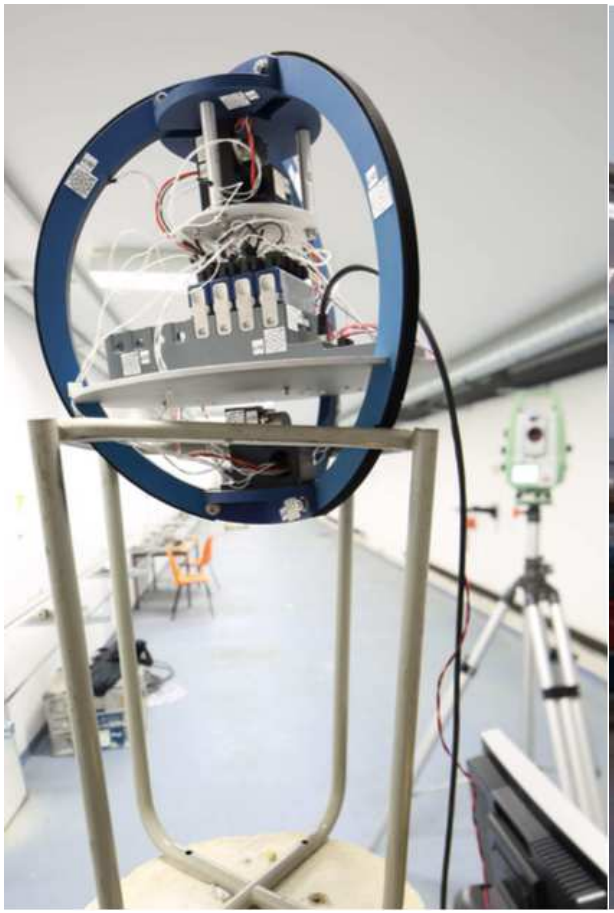
Mesure statique $\Rightarrow \boldsymbol{a}^b = -C_n^b \boldsymbol{g}^n$ où

- C_n^b est la matrice de passage du « navigation » vers « body »,
- $\boldsymbol{g}^n$ est le vecteur accélération de la pesanteur au point considéré.

On impose N inclinaisons arbitraires au capteur ; on mesure, à $T = \mathrm{cste}$, $[\boldsymbol{u}_1, \boldsymbol{u}_2, \ldots, \boldsymbol{u}_N]$ et $\left[\boldsymbol{a}_1^b, \boldsymbol{a}_2^b, \ldots, \boldsymbol{a}_N^b\right]$, soit directement ($\Rightarrow$ accéléromètre étalon), soit indirectement ($\Rightarrow$ mesures d'orientation en un point gravimétrique) $\Rightarrow$ Problème d'optimisation

Détermination expérimentale des paramètres d'ajustage

Vues du protocole expérimental



Détermination expérimentale des paramètres d'ajustage

Résultats

Deux méthodes testées :

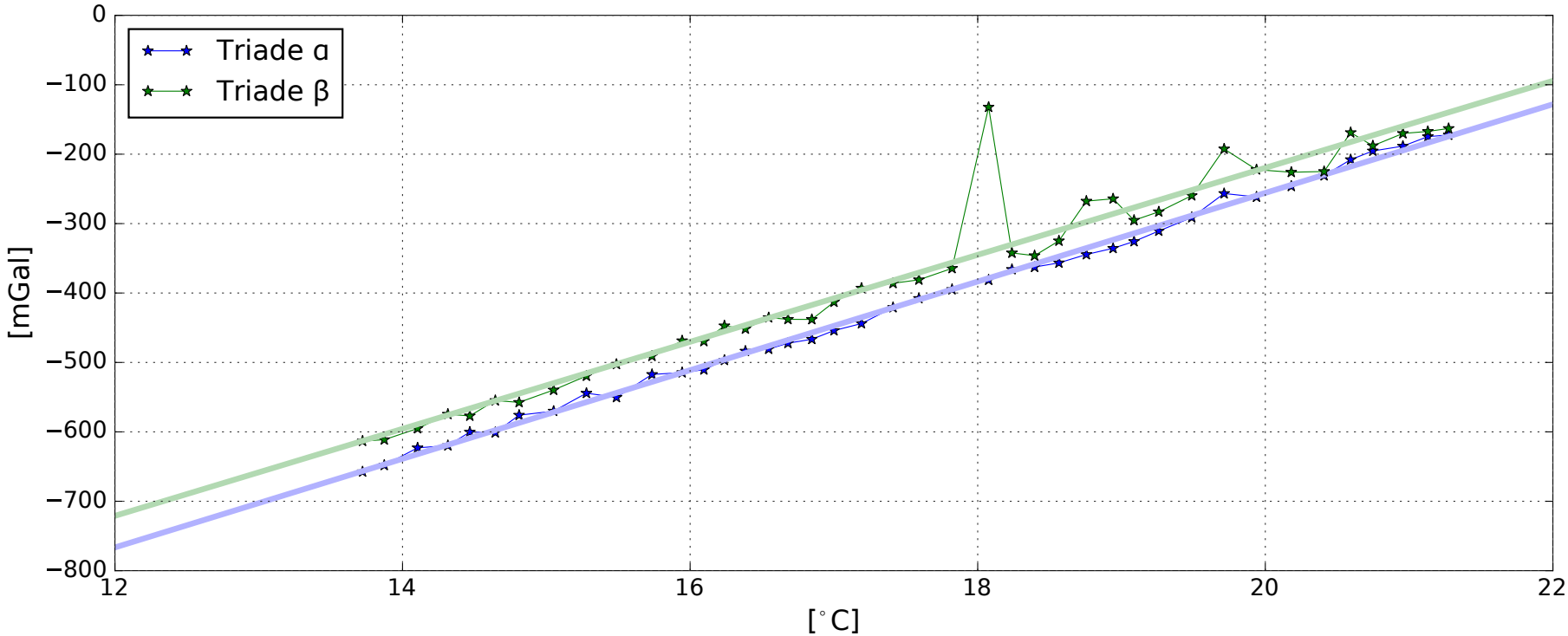
1. Transformation de Helmert $\Rightarrow$ grande dispersion des valeurs d'ajustage voire divergence
2. Multiplicateurs de Lagrange $\Rightarrow$ faible dispersion des paramètres d'ajustage ; résidus de l'ordre de 1 mGal $\Rightarrow$ Bonne méthode

ATTENTION :

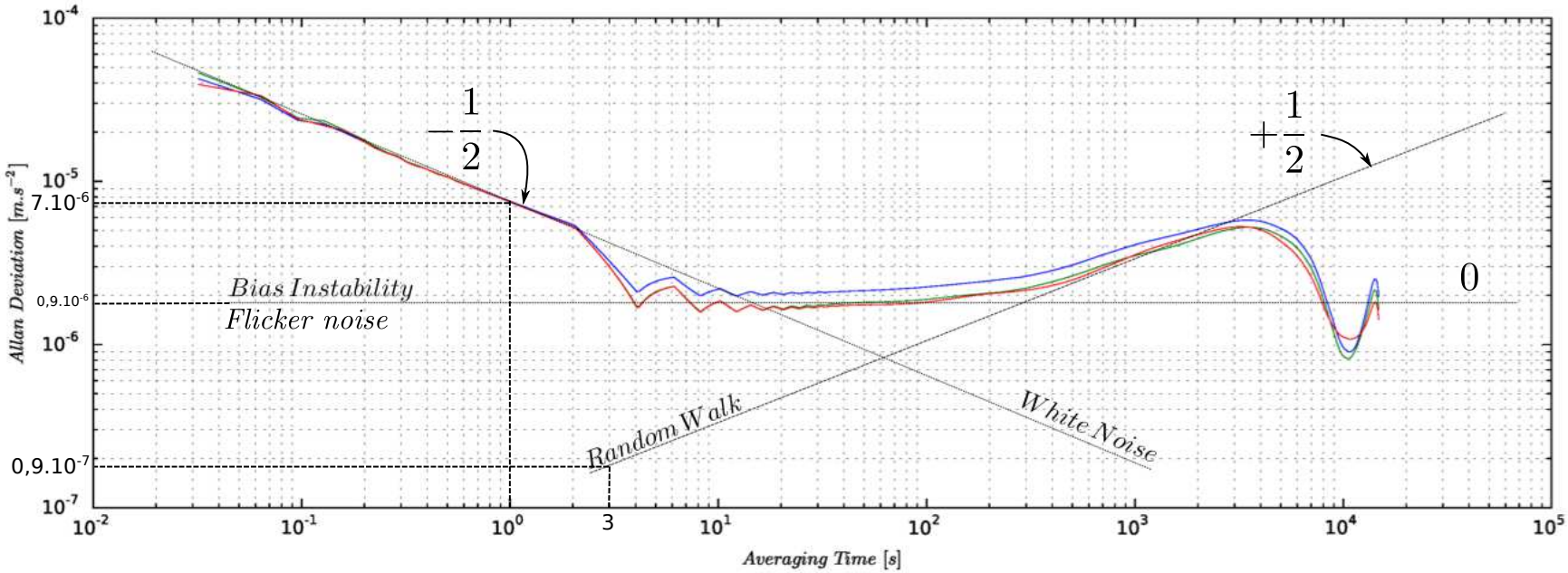
- Nécessite une plage d'inclinaisons la plus large possible (limite de saturation des capteurs)
- Stabilisation de la température indispensable

Détermination expérimentale des paramètres d'ajustage

Effet des variations de température



Bruit de mesure des accéléromètres



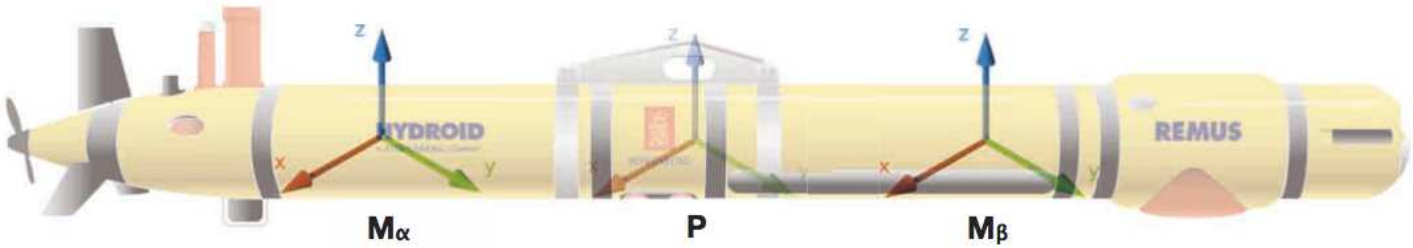
Traitement des données

Équation d'observation

$$\boldsymbol{g}^b = \left[\left(\Omega_{ib}^b\Omega_{ib}^b + \dot{\Omega}_{ib}^b\right)\boldsymbol{X}_P^b + 2\Omega_{ib}^b\dot{\boldsymbol{X}}_P^b + \ddot{\boldsymbol{X}}_P^b\right] + \left[\left(\Omega_{ib}^b\Omega_{ib}^b + \dot{\Omega}_{ib}^b\right)\boldsymbol{L}^b\right] - \boldsymbol{a}^b$$

- $\boldsymbol{g}^b$, accélération de la pesanteur dans le repère « body » ;
- Ω_{ib}^b, matrice des vitesses angulaires du repère « body »/« inertial »
- $\dot{\Omega}_{ib}^b$, matrice des accélérations angulaires du repère « body »/« inertial »
- $\boldsymbol{X}_P^b$, vecteur position du véhicule porteur ;
- $\dot{\boldsymbol{X}}_P^b$, vecteur vitesse du véhicule porteur ;
- $\ddot{\boldsymbol{X}}_P^b$, vecteur accélération du véhicule porteur ;
- $\boldsymbol{L}^b$, bras de levier ;
- $\boldsymbol{a}^b$, accélération de rappel dans le repère « body ».

Équation d'observation du système GRAVIMOB



$$g_\alpha^b = \left[(\Omega_{ib}^b\Omega_{ib}^b + \dot{\Omega}_{ib}^b)X_P^b + 2\Omega_{ib}^b\dot{X}_P^b + \ddot{X}_P^b\right] + \left[(\Omega_{ib}^b\Omega_{ib}^b + \dot{\Omega}_{ib}^b)L_\alpha^b\right] - a_\alpha^b$$

$$g_\beta^b = \left[(\Omega_{ib}^b\Omega_{ib}^b + \dot{\Omega}_{ib}^b)X_P^b + 2\Omega_{ib}^b\dot{X}_P^b + \ddot{X}_P^b\right] + \left[(\Omega_{ib}^b\Omega_{ib}^b + \dot{\Omega}_{ib}^b)L_\beta^b\right] - a_\beta^b$$

$$\begin{array}{l} g_\alpha^b \approx g_P^b + \nabla g_P.PM_\alpha \\ g_\beta^b \approx g_P^b + \nabla g_P.PM_\beta \\ \hline g_\alpha^b + g_\beta^b \approx 2g_P^b \end{array} \quad (+)$$

$$(-) \quad \begin{array}{l} g_\alpha^b \approx g_P^b + \nabla g_P.PM_\alpha \\ g_\beta^b \approx g_P^b + \nabla g_P.PM_\beta \\ \hline g_\alpha^b - g_\beta^b \approx \nabla g_P.M_\beta M_\alpha \end{array}$$

$\Rightarrow$ **Mesures doubles (différentielle et de mode commun)**

$\Longleftarrow$ centrale inertielle (INS) + vélocimètre à effet Doppler (DVL) + liaison acoustique avec la navire (USBL) ; données post traitées par filtrage de Kalman

Incertitudes

- planimétrique : 1,0 m à 2,5 m
- altimétrique : 0,3 m

$\Longleftarrow$ angles d'attitude qui découlent du calcul de position en post traitement

Incertitudes

- cap : 0,02 à 0,05 deg
- roulis et tangage : 0,002 à 0,005 deg

$\Longleftarrow$ l'analyse des variances d'Allan confirme les données constructeur

Niveau de bruit

accéléromètre n°	$N\ [mGal/\sqrt{Hz}]$
643	1.05
645	0.95
644	0.88
646	0.95
648	0.85
647	0.80

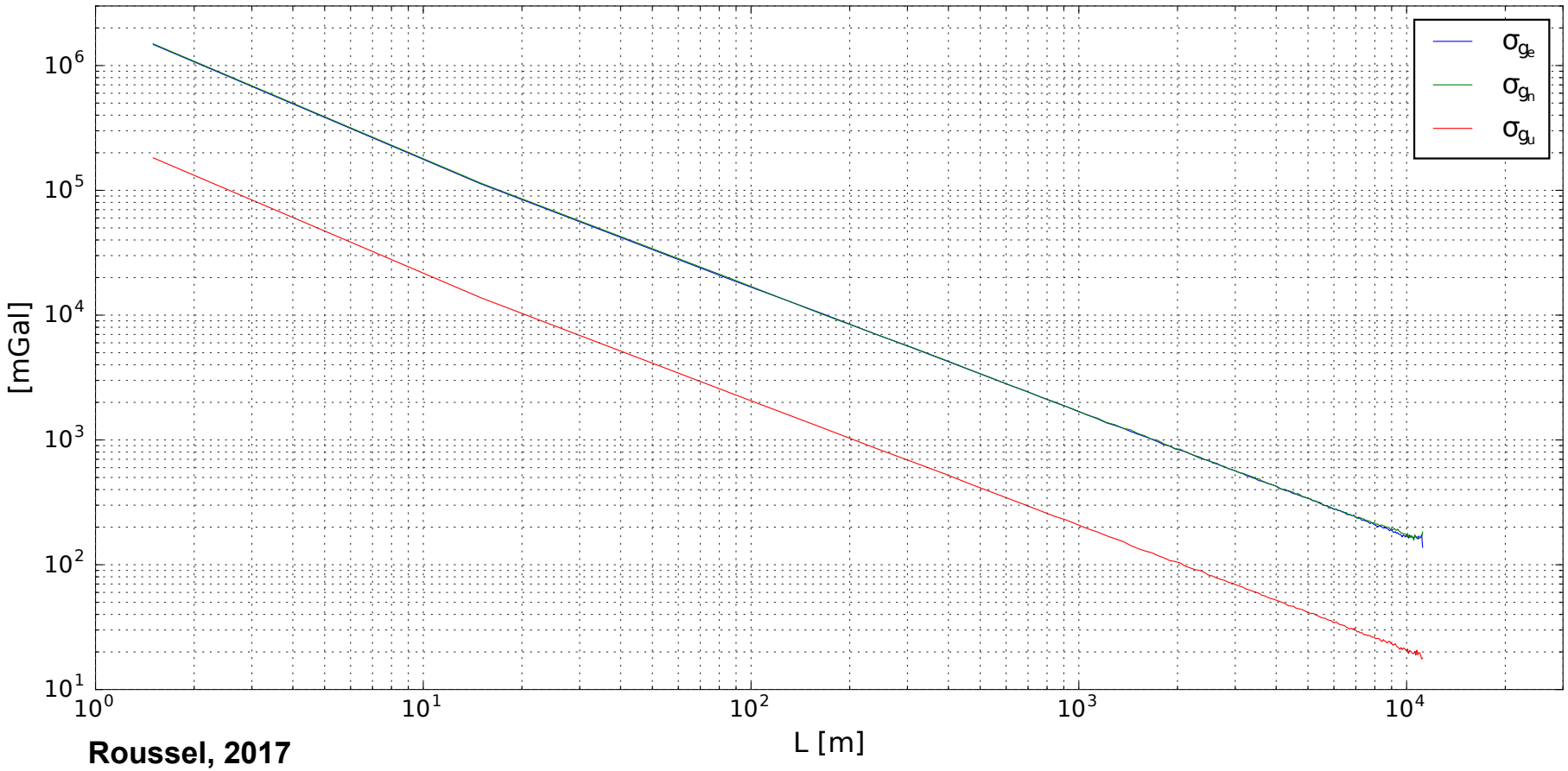
Corrélation avec la température

accéléromètre n°	corrélation
643	88.8 %
645	-75.0 %
644	-92.5 %
646	90.7 %
648	-88.3 %
647	-86.4 %

Stratégie de traitement

Filtrage optimal indispensable

$\Longleftarrow$ résultats de simulations numériques à partir d'un champ de gravité synthétique et de niveaux de bruit estimés des capteurs $\Longrightarrow$ filtrage passif inopérant



Vecteur de paramètres à déterminer

$$\mathbf{Z_k} = \left[\ldots, \mathbf{g}_k, \mathbf{X}_k, \dot{\mathbf{X}}_k, \ddot{\mathbf{X}}_k, \ldots\right]^T$$

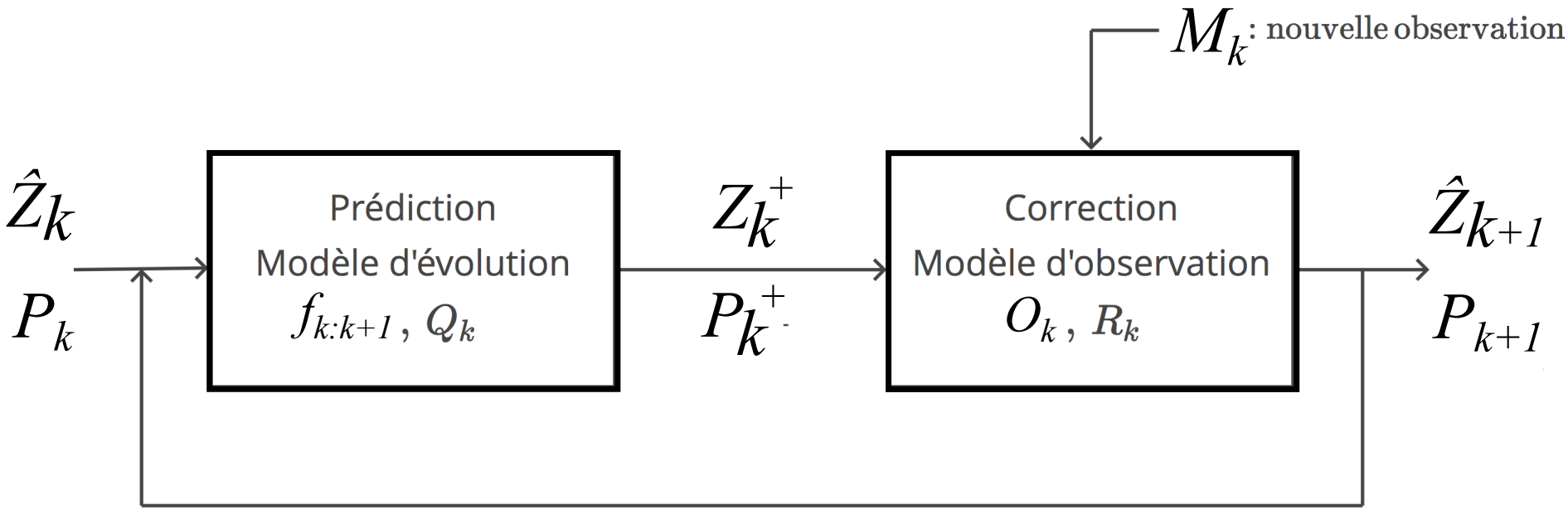
Système non linéaire gaussien

$$\begin{cases} \mathbf{Z}_{k+1} = f_{k:k+1}\left(\mathbf{Z}_k\right) + \Sigma_k\, \varepsilon_k \\ \mathbf{M}_k = O_k\left(\mathbf{Z}_k\right) + \tilde{\Sigma}_k\, \tilde{\varepsilon}_k \end{cases}$$

$\Rightarrow$ **Approche récursive ; nombre de paramètres estimés constant**

Stratégie de traitement

Version « unscented » du filtre de Kalman (UKF)



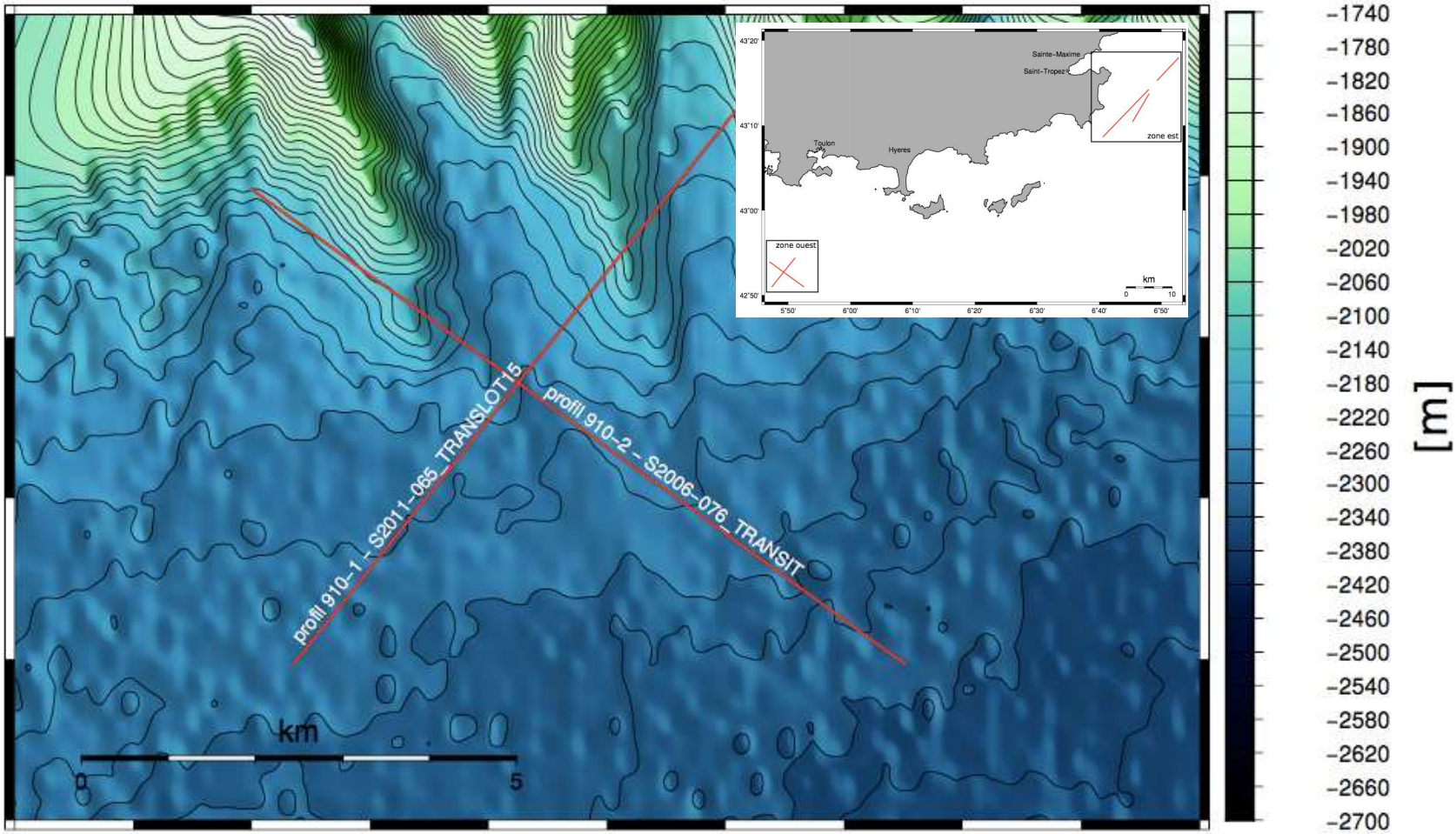
Roussel, 2017

Modèle d'évolution : $\dfrac{d^3\boldsymbol{g}}{dt^3} = \Sigma_g\, \boldsymbol{\varepsilon}(t)$

$\Longrightarrow$ processus de Markov d'ordre 3 à longueur de corrélation infinie.

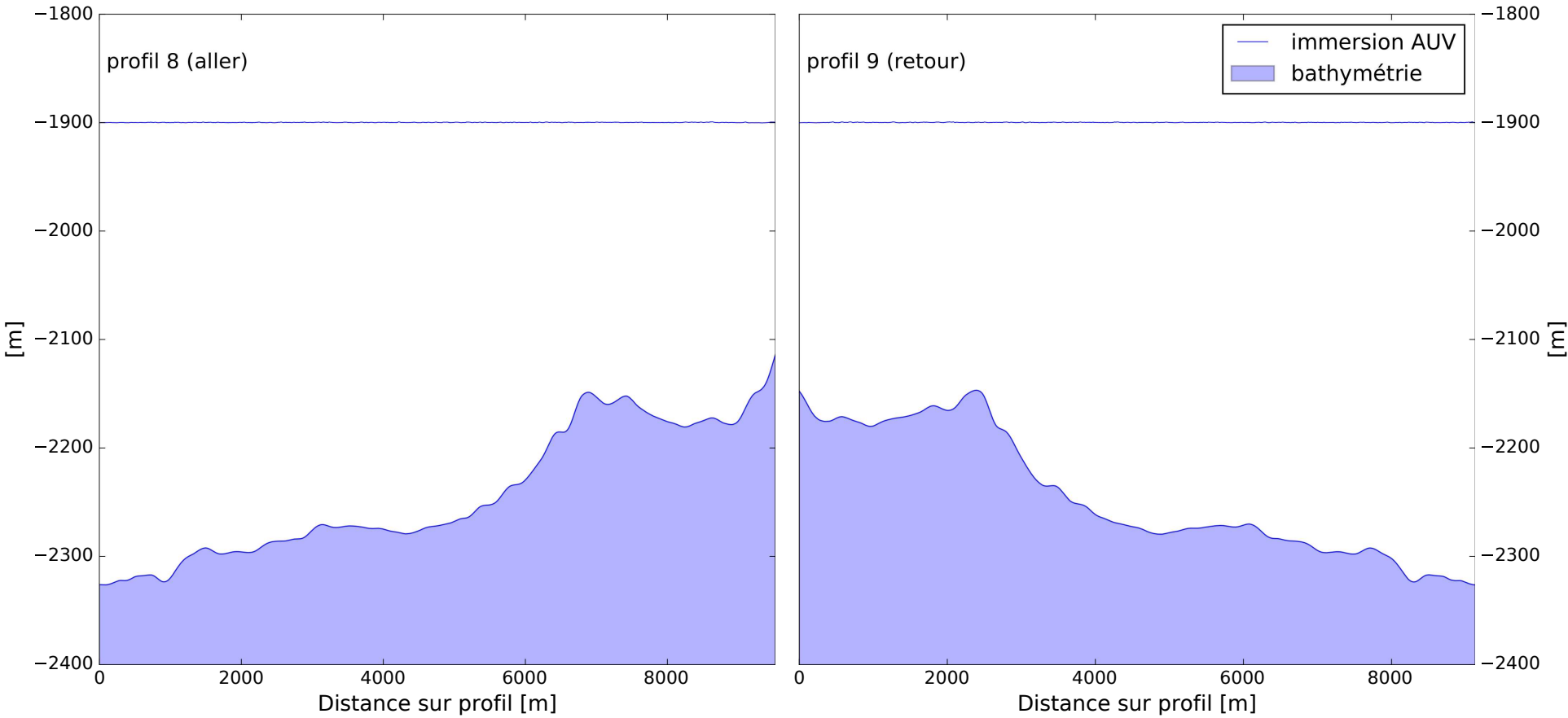
Résultats de la campagne d'essai GRAVIMOB

Lever test en Méditerranée



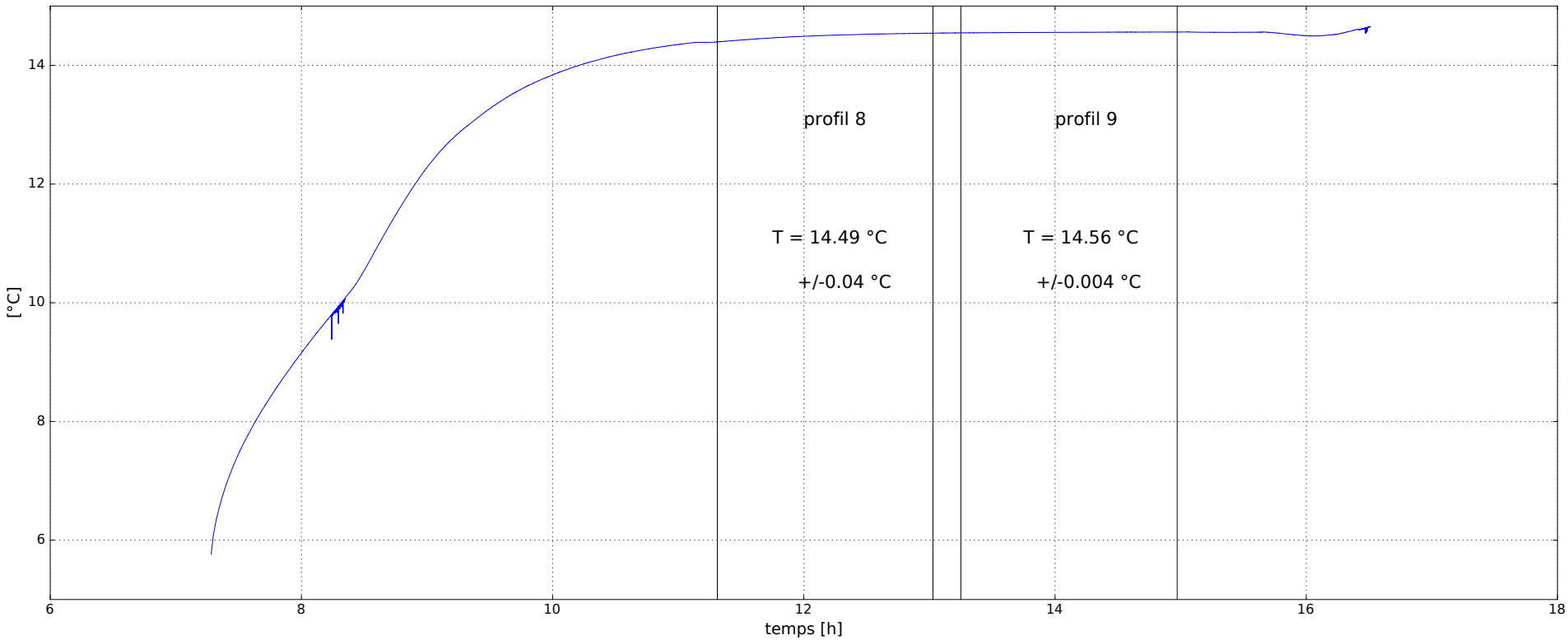
Résultats de la campagne d'essai GRAVIMOB

Profil étudié

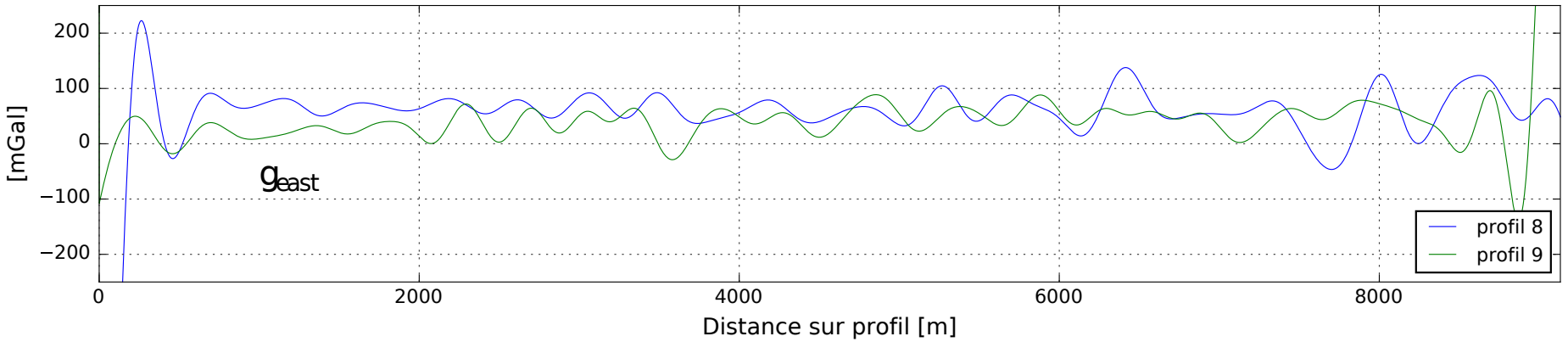


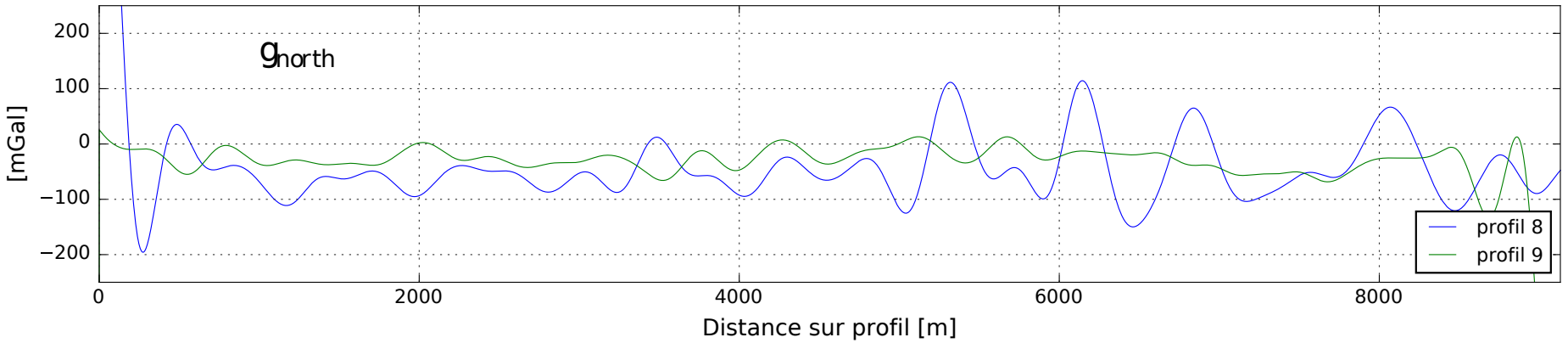
Résultats de la campagne d'essai GRAVIMOB

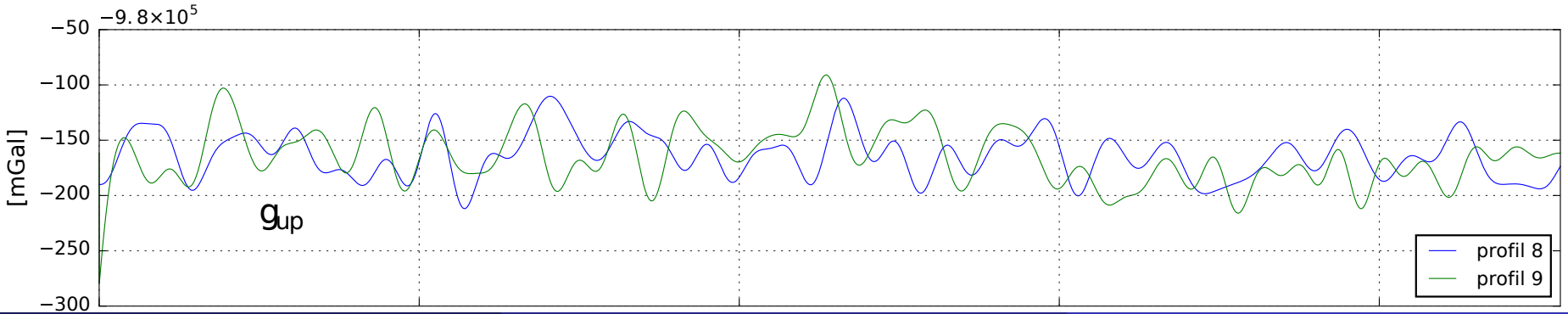
Remarquable stabilité de la température



Résultats du filtrage UKF : $|\bar{g}^8_{up} - \bar{g}^9_{up}| = 9\,\mathrm{mGal}$

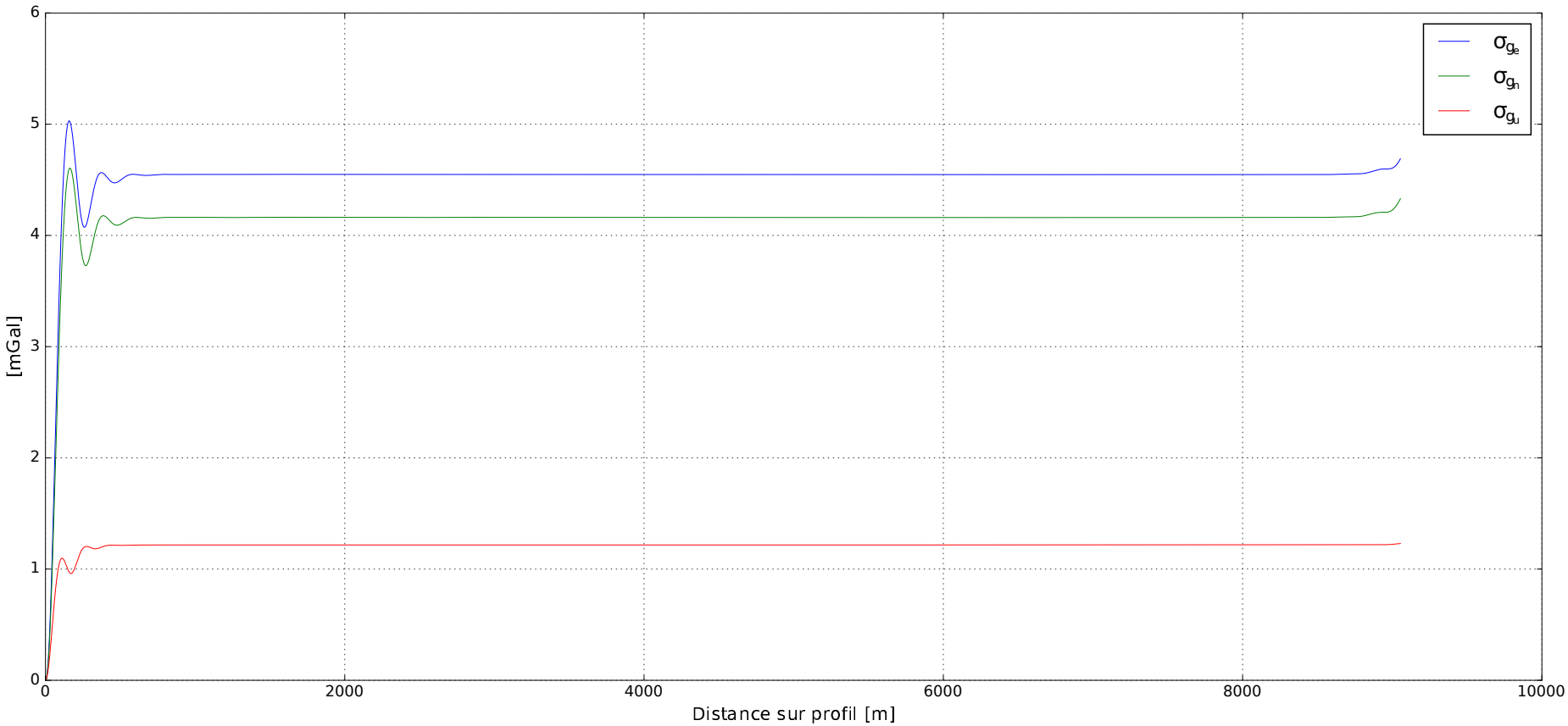






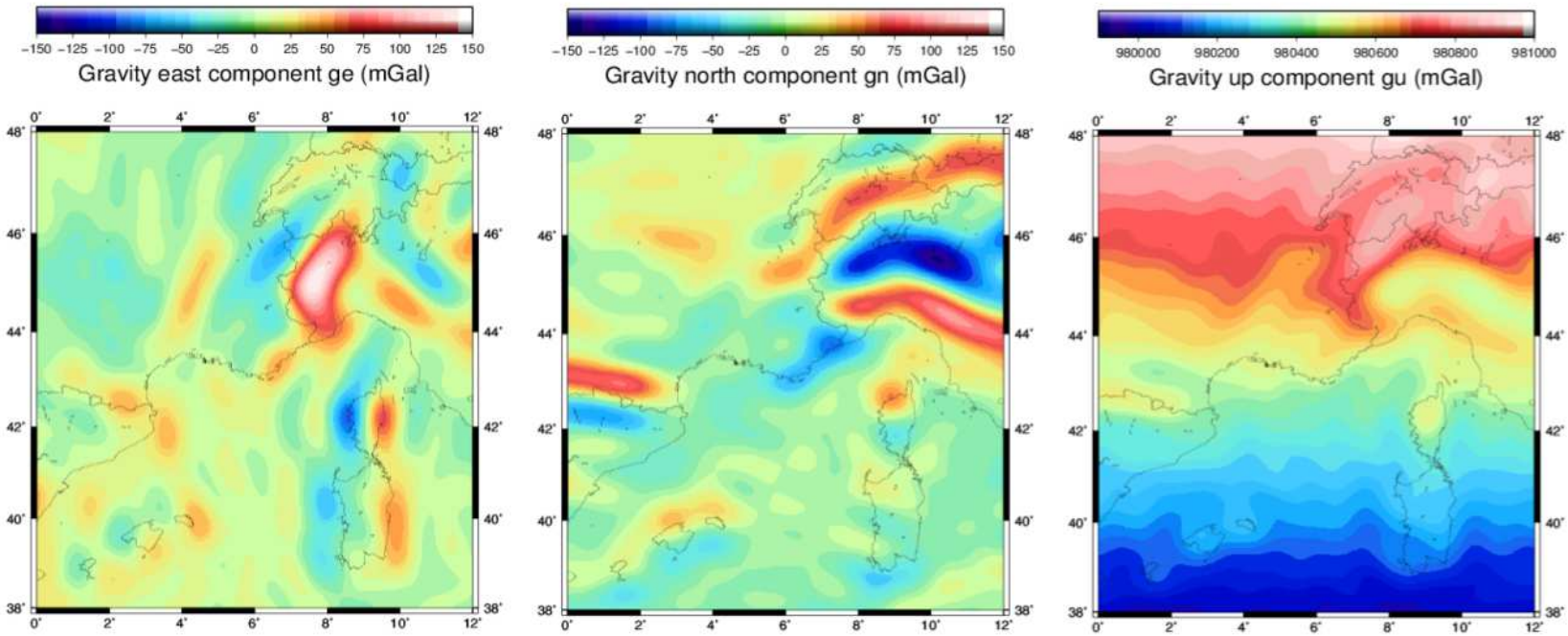
Preuve du filtrage réussi

Convergence de l'erreur formelle



Comparaison à des données externes

Modèle global EGM2008 (Pavlis et al., 2008)



Mesures en moyenne

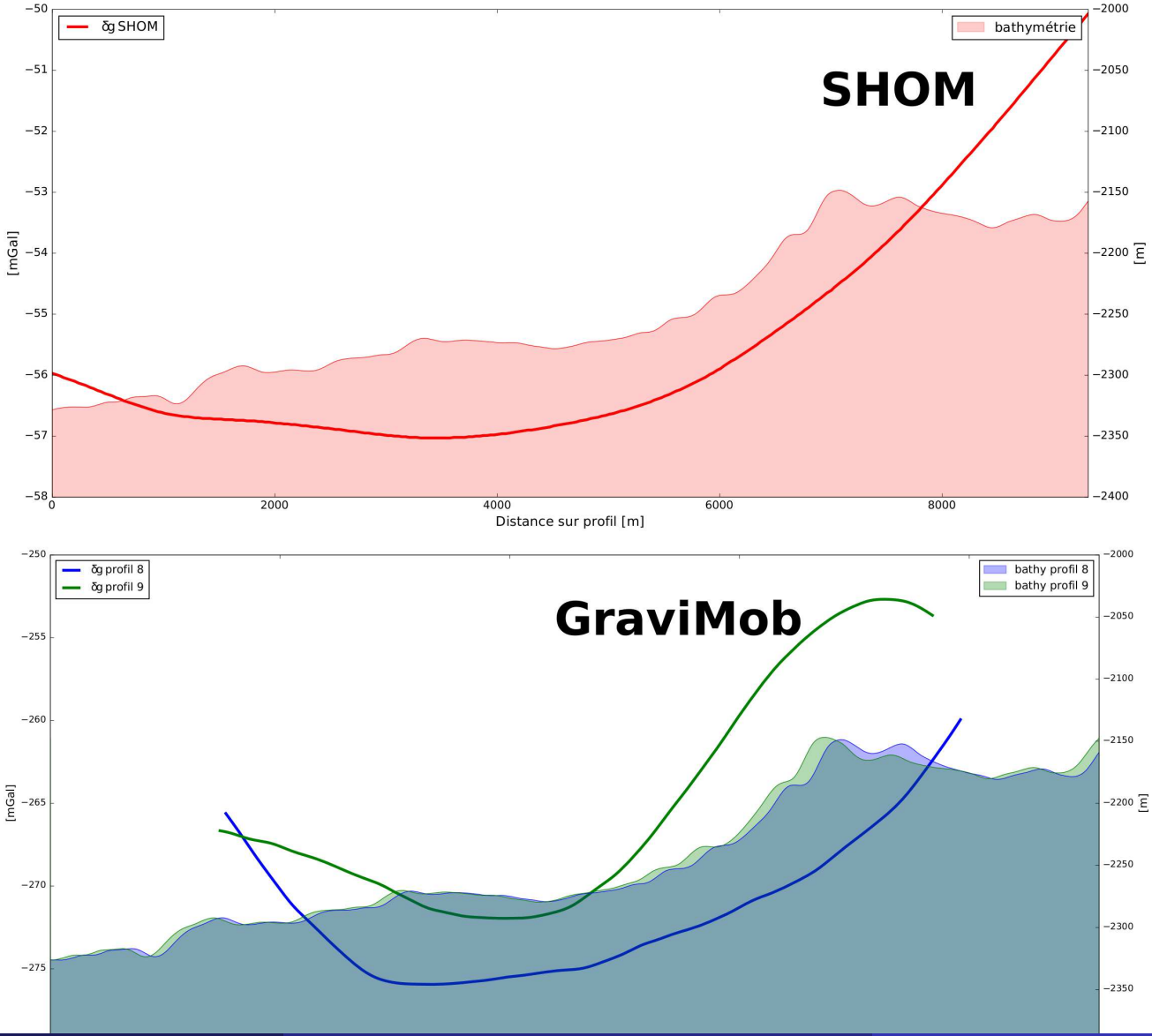
$$\eta = \frac{\overline{g}_{east}}{\|\boldsymbol{g}\|} = 10,2" \quad ; \quad \xi = \frac{\overline{g}_{north}}{\|\boldsymbol{g}\|} = -8,1"$$

Modèle

$$1,22" \leq \eta \leq 2,15" \quad ; \quad -9,77" \leq \xi \leq -9,72"$$

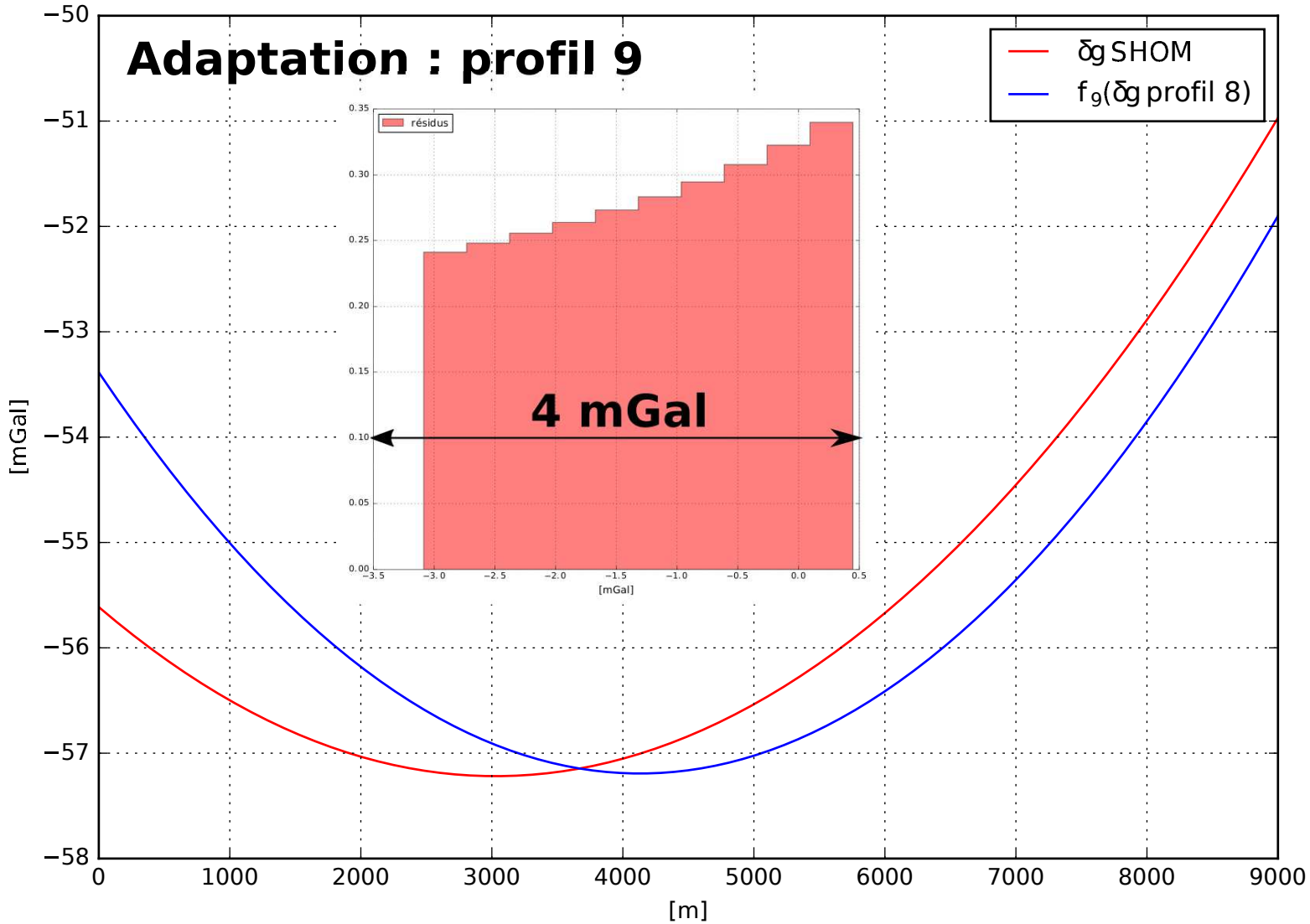
Comparaison à des données externes

Anomalie à l'air libre de surface (SHOM)



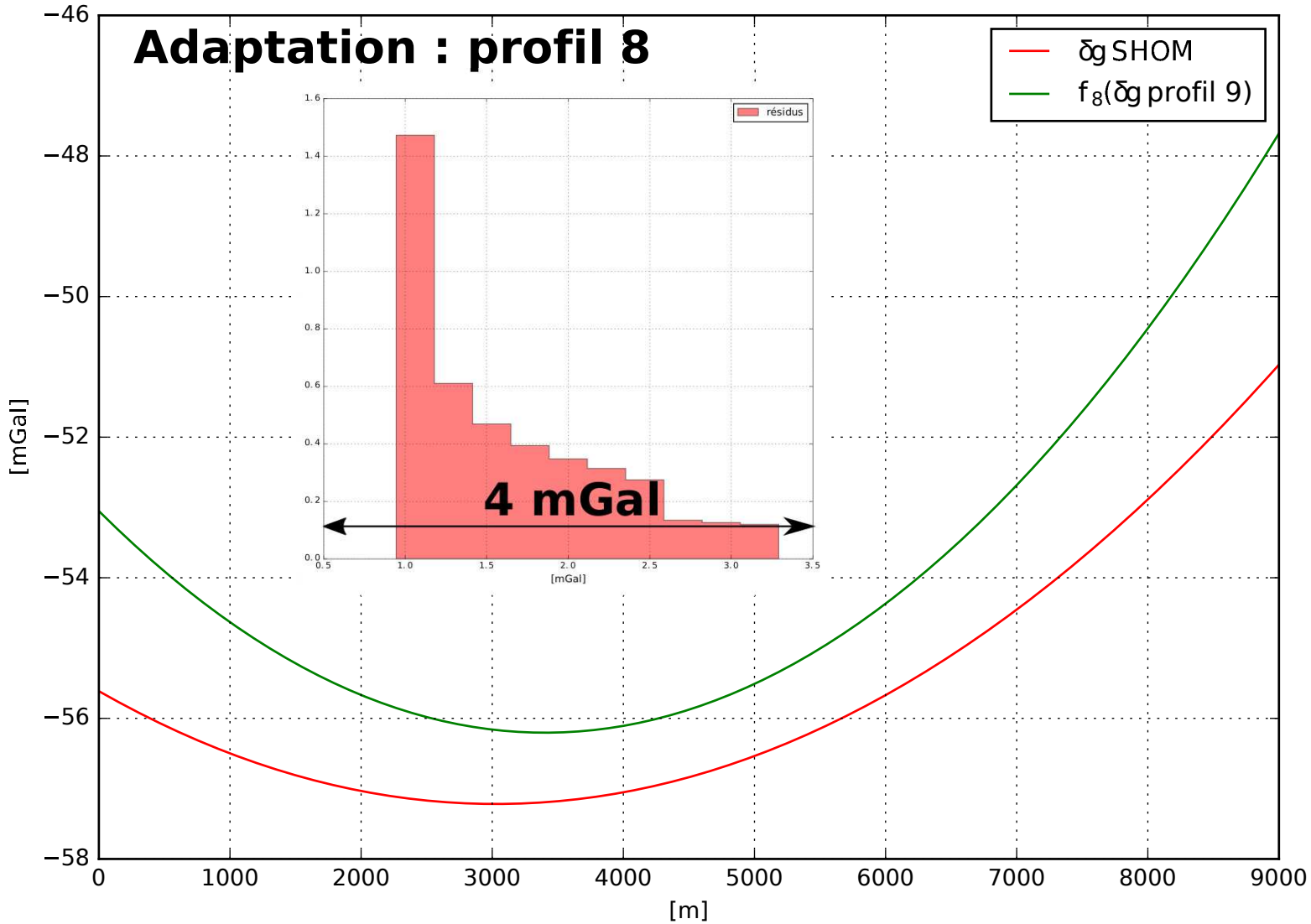
Comparaison à des données externes

Anomalie à l'air libre de surface (SHOM)



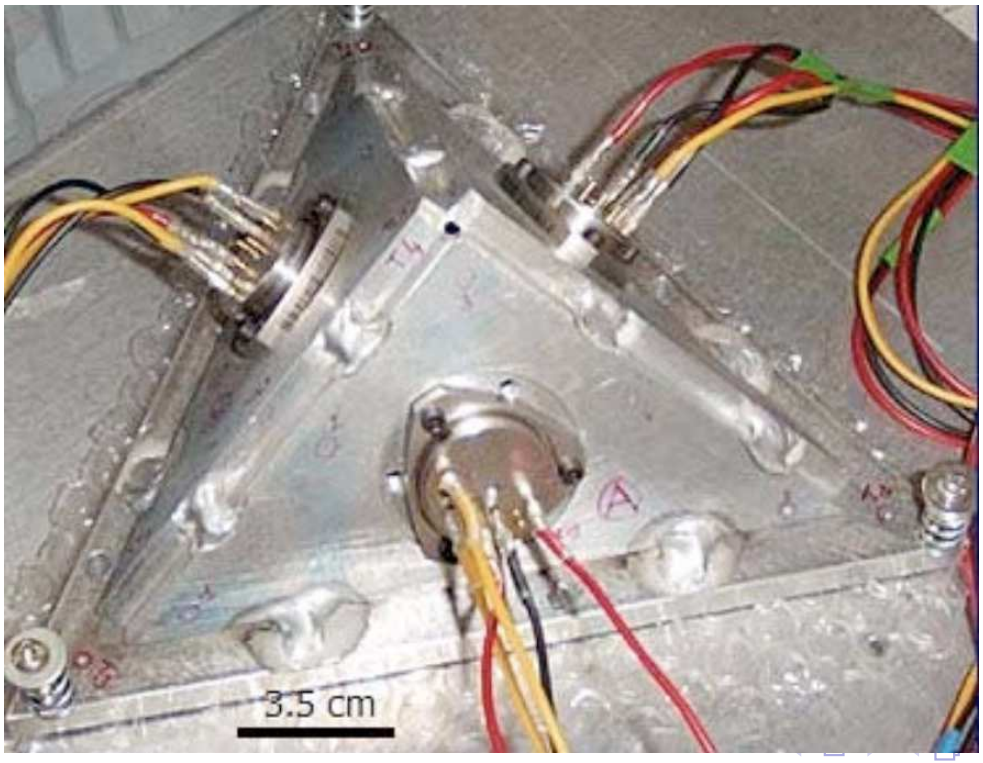
Comparaison à des données externes

Anomalie à l'air libre de surface (SHOM)



Points clés la gravimétrie « strapdown »

- Triade pyramidale du type « LIMO-g » préférable
- Régulation de la température
- Système de positionnement et d'orientation de haut grade (< 1 m ; $< 0,01°$)
- Gradiométrie possible si sensibilité des accéléromètres $\times 1000$
- Lever avec points de croisement et réoccupation de profils



« GRAVIMOB » : Résultats essentiels

1. Méthode d'ajustage des paramètres du système de gravimétrie mobile sous-marine
2. Méthode opérationnelle de traitement de données de gravimétrie mobile sous-marine

- Roussel, C., Verdun, J., Cali, J. and F. Masson, *Complete gravity field of an ellipsoidal prism by Gauss-Legendre quadrature*, Geophys. J. Int., 203(3), 2 220-2 236, 2015.
- Roussel, C., Verdun, J., Cali, J., Maia, M. and J.-F. d'Eu, *Integration of a strapdown gravimeter system in an autonomous underwater vehicle*, in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W5, Underwater 3D Recording and Modeling, 16-17 April 2015, Piano di Sorrento, Italy, pp. 199-206, 2015.
- Roussel, C., Verdun, J., Cali, J., D'Eu, J.-F., Bouhier, M.-E. and P. Jaussaud, *First tangible results of undersea gravity field measure achieved by an innovative light mobile gravimetric system called "GraviMob"*, Geophys. J. Int., soumission imminente, 2018.

Amélioration du traitement du signal

- Modèle d'évolution du champ de gravité qui respecte les covariances naturelles

  $\Longrightarrow$ processus de Markov d'ordre **6** à longueur de corrélation **finie**

- Modélisation affinée du mouvement du porteur basée sur l'hydrodynamique navale

  $\Longrightarrow$ **Assimilation** de données d'accélération, de position et d'orientation pour aboutir à une succession de synthèse de données dont la **pesanteur**

Merci pour votre aimable attention !