

# Colloque Géodésie et Géophysique Marine

Océan, Atmosphère, Géodynamique, **méthodes d'observations**

14 - 16 novembre 2016

ENSTA-Bretagne - Brest

---

La mission d'expérimentation du système  
de gravimétrie mobile sous-marine

## **GraviMob**

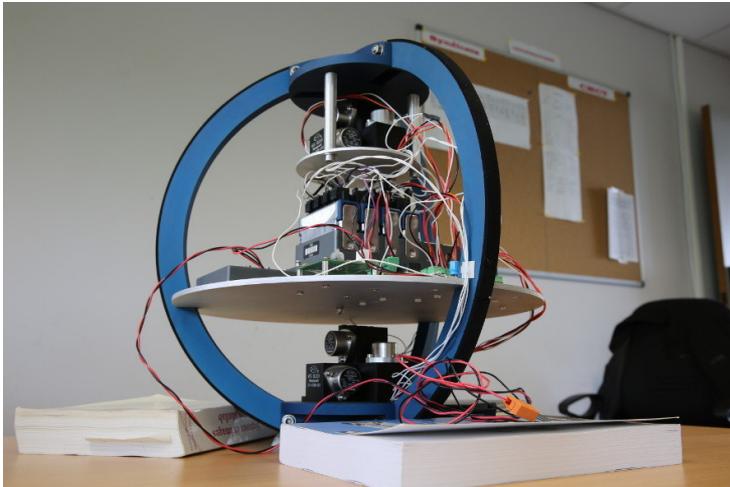
---

Clément Roussel, Jérôme Verdun, Marcia Maïa, José Cali



# GraviMob

## Systeme de Gravimétrie Mobile



capteur accélérométrique

+



véhicule autonome sous-marin

## Objectif

La mesure **dynamique** du **vecteur** accélération de pesanteur

(précision  $\sim 1 \text{ mGal} = 0.00001 \text{ m/s}^2$ )

# Plan

## 1. La mesure dynamique et vectorielle du champ

Principe

Équation d'observation & filtre de Kalman

## 2. Instrumentation

Le capteur accélérométrique

Le véhicule porteur

## 3. **La mission d'expérimentation**

**Profils de référence du SHOM**

**Résultats**

## 4. Conclusion

# La mesure dynamique et vectorielle du champ

La mesure **statique** et vectorielle du champ de pesanteur

→  $\ddot{X} = 0$

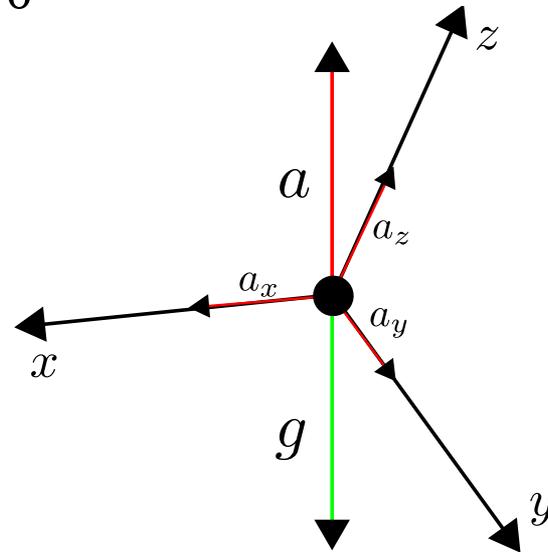
$x, y, z$  : axes sensibles

$a$  : accélération spécifique

$g$  : accélération de pesanteur

● masse d'épreuve

$$g = -a$$



Triade accélérométrique

**immobile**

# La mesure dynamique et vectorielle du champ

La mesure **dynamique** et vectorielle du champ de pesanteur

$$\rightarrow \ddot{X} \neq 0$$

$x, y, z$  : axes sensibles

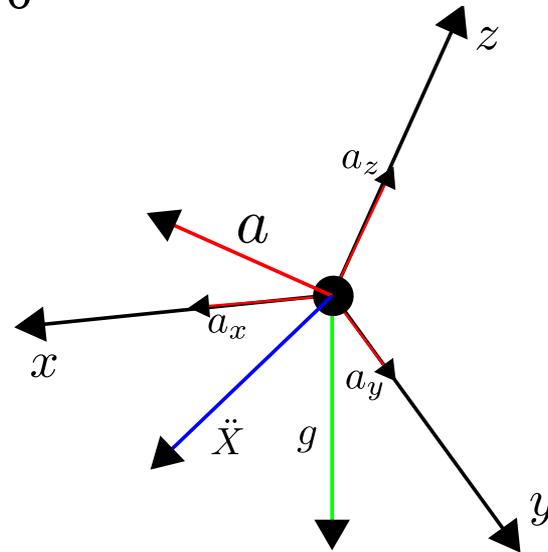
$a$  : accélération spécifique

$g$  : accélération de pesanteur

$\ddot{X}$  : accélération du porteur

● masse d'épreuve

$$g = \ddot{X} - a$$



Triade accélérométrique

**en mouvement**

# La mesure dynamique et vectorielle du champ

## Équation d'observation

matrices de passage entre les différents repères de travail

$$g^n = C_e^n \left( \ddot{X}^e + 2\Omega_{ie}^e \dot{X}^e \right) - C_b^n a^b$$

accélération de pesanteur

accélération d'entraînement

accélération de Coriolis

accélération spécifique

i : repère inertiel   e : repère terrestre   n : repère de navigation   b : repère du véhicule porteur

# La mesure dynamique et vectorielle du champ

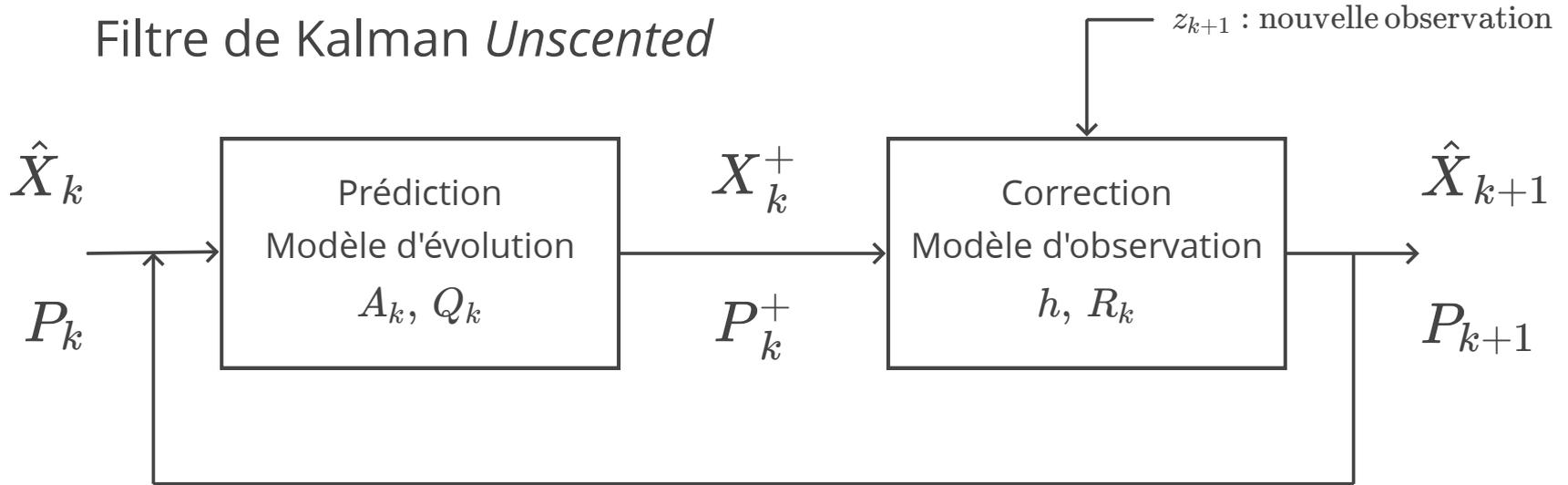
Équation d'observation

$$\begin{array}{c}
 \lambda \varphi h \qquad \delta \chi \eta \\
 \swarrow \qquad \searrow \\
 \mathbf{g}^n = \mathbf{C}_e^n \left( \ddot{\mathbf{X}}^e + 2\boldsymbol{\Omega}_{ie}^e \dot{\mathbf{X}}^e \right) - \mathbf{C}_b^n \mathbf{a}^b \\
 \swarrow \qquad \searrow \qquad \swarrow \qquad \searrow \\
 \begin{pmatrix} g_{east} \\ g_{north} \\ g_{up} \end{pmatrix} \qquad \lambda \dot{\lambda} \ddot{\lambda} \varphi \dot{\varphi} \ddot{\varphi} h \dot{h} \ddot{h} \qquad \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix}
 \end{array}$$

$\lambda$  : longitude    $\varphi$  : latitude    $h$  : hauteur    $\delta$  : cap    $\chi$  : tangage    $\eta$  : roulis

# La mesure dynamique et vectorielle du champ

Filtre de Kalman *Unscented*



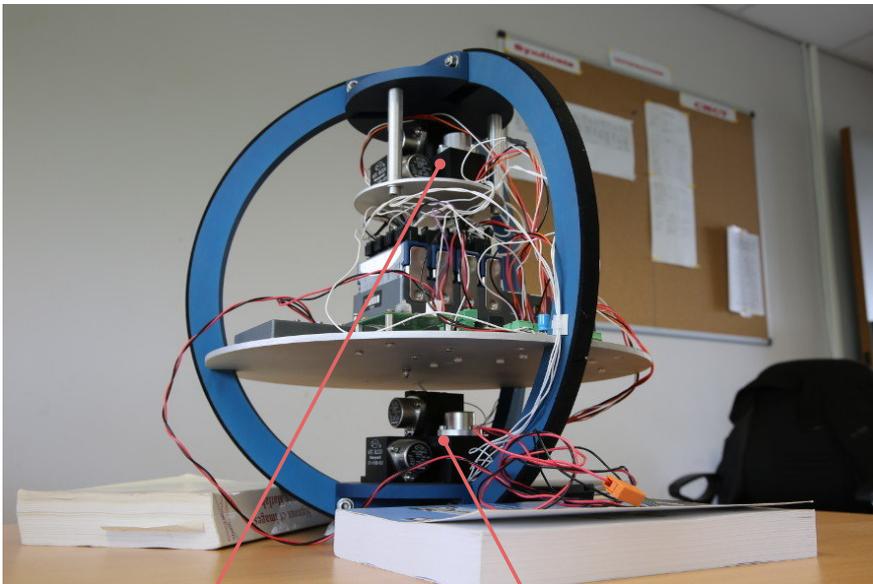
$$\begin{aligned}\sigma_\lambda &= 3.07 \times 10^{-5} \text{ deg} (\approx 2 \text{ m}) & \sigma_\varphi &= 2.25 \times 10^{-5} \text{ deg} (\approx 2 \text{ m}) & \sigma_h &= 0.30 \text{ m} \\ \sigma_\delta &= 0.05 \text{ deg} & \sigma_\chi &= 0.005 \text{ deg} & \sigma_\eta &= 0.005 \text{ deg} \\ \sigma_a &= 1 \text{ mGal}\end{aligned}$$

```
from gKalmanTools import *  
  
...  
  
for i in arange(0, n, 1) :  
    X, P = ukf_predict(X, P, A, Q)  
    X, P = ukf_update(X, P, h, z, R)
```

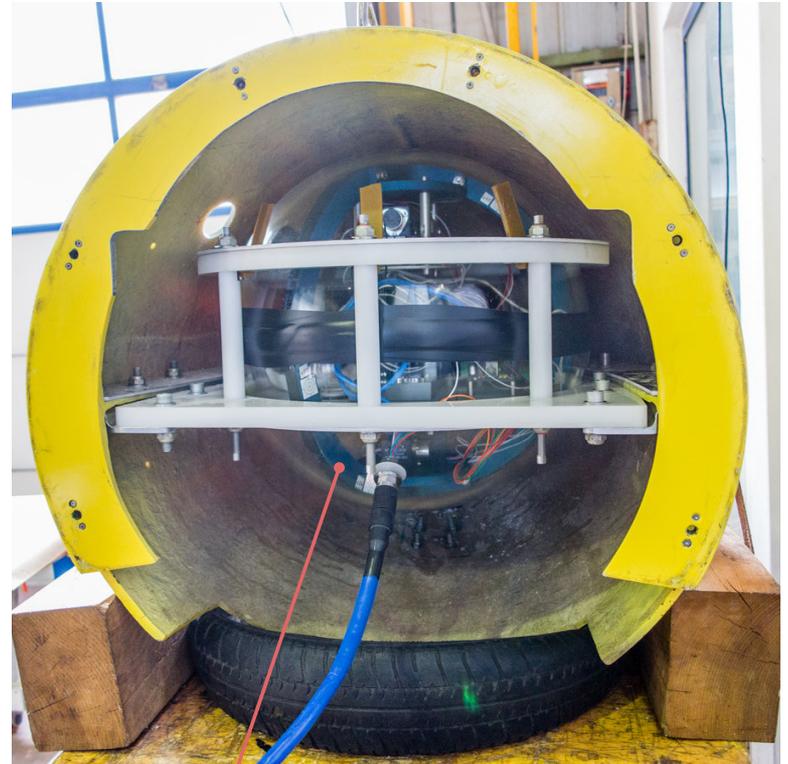
# Instrumentation

Le capteur accélérométrique

$$\begin{matrix} \lrcorner \\ \rightarrow \end{matrix} (a_x \quad a_y \quad a_z)^T$$



triades accélérométriques



sphère étanche

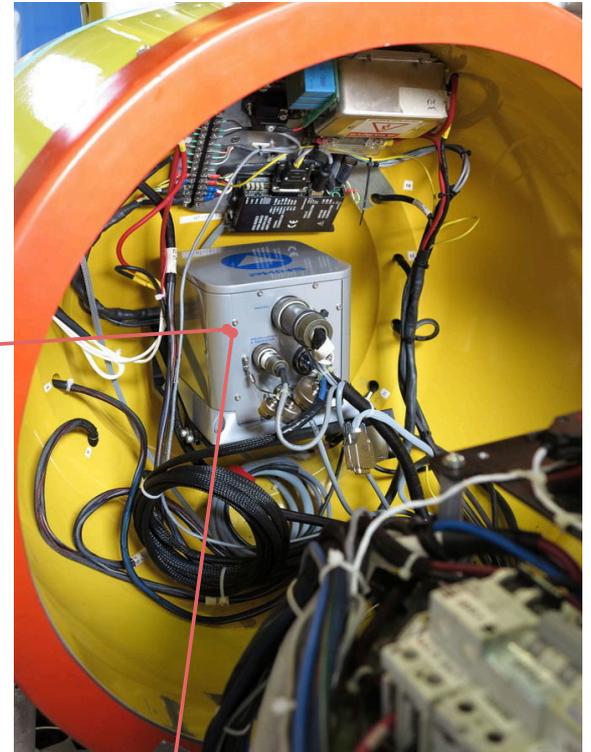
# Instrumentation

Le véhicule autonome sous-marin (AUV)

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda \\ \varphi \\ h \\ \delta \\ \chi \\ \eta \end{array} \right\}^T$$



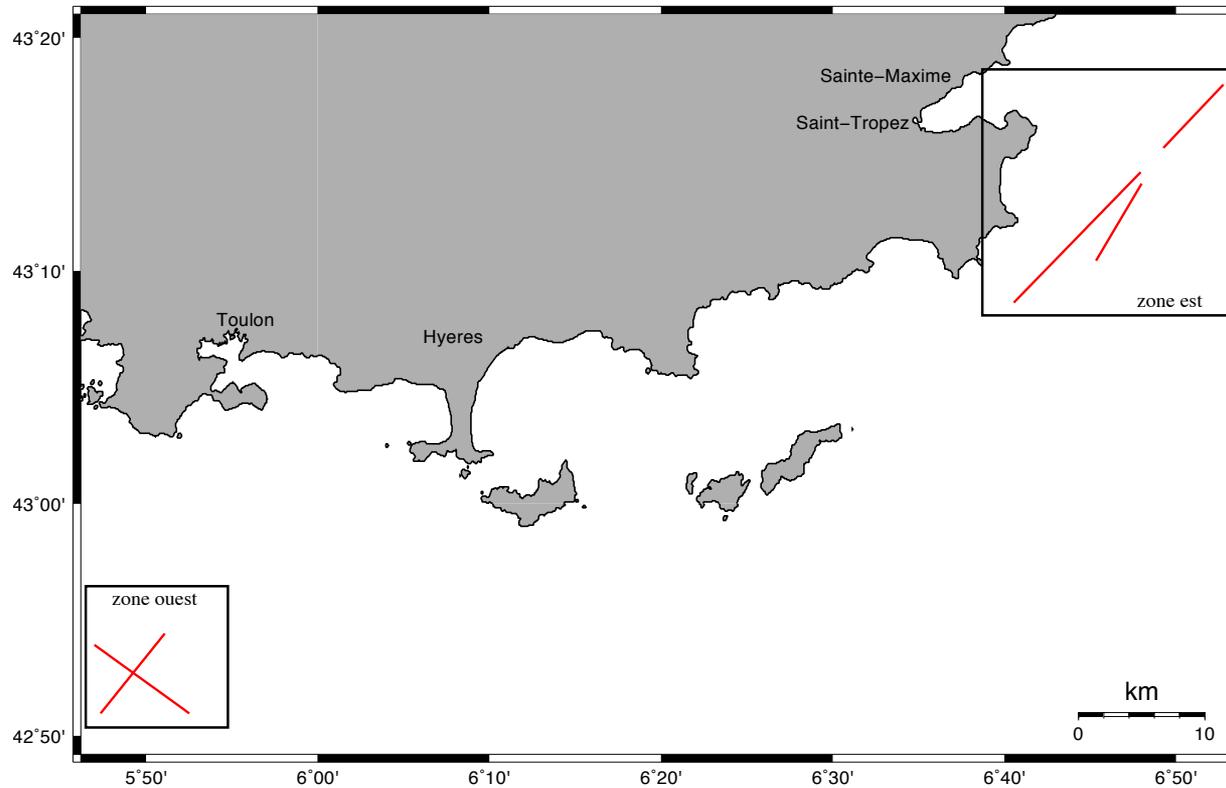
capteur accélérométrique



centrale inertielle

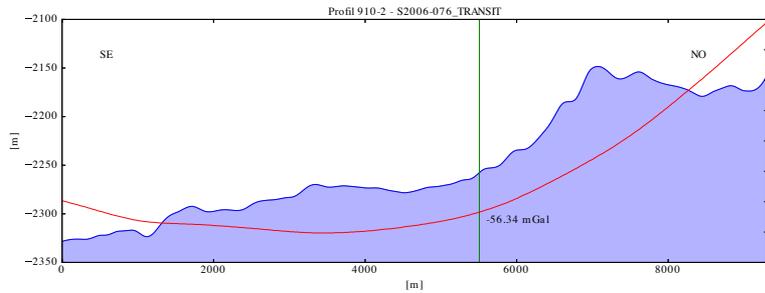
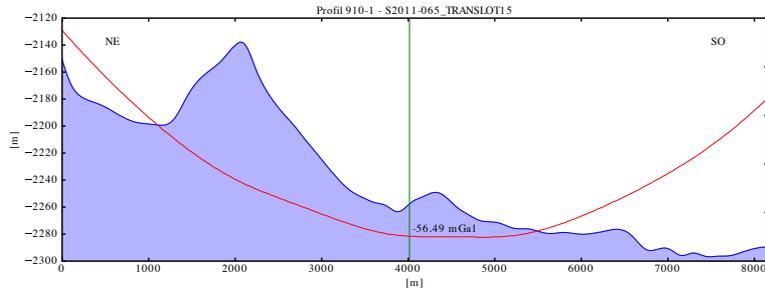
# La mission d'expérimentation

17 au 25 mars 2016 - Navire L'EUROPE de l'IFREMER

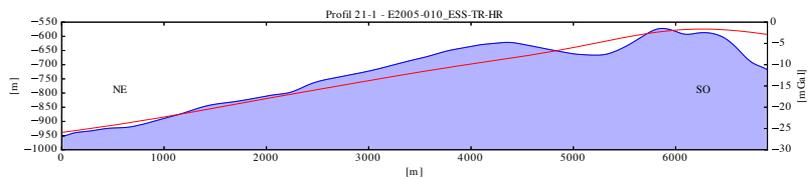
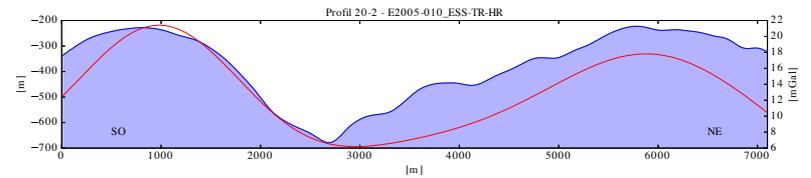
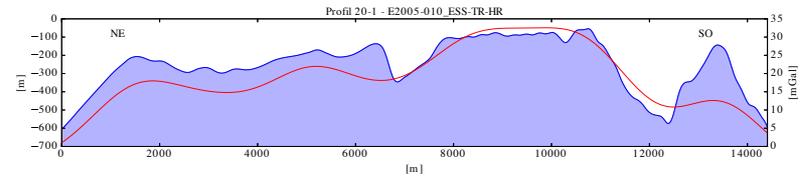


# La mission d'expérimentation

## Anomalies gravimétriques de surface du SHOM



zone ouest



zone est

# La mission d'expérimentation

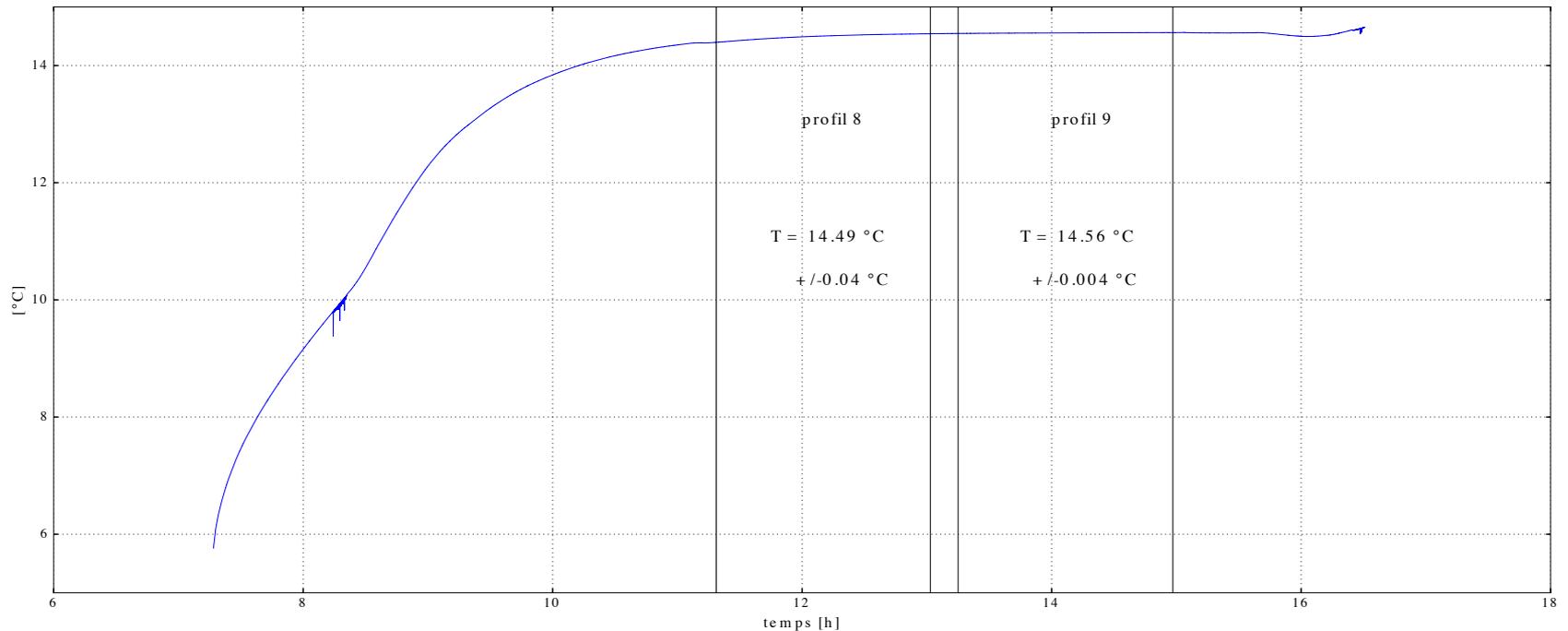
## Résumé des profils navigués

date	n° de profil	nom du profil	mode de navigation	distance parcourue [km]
18 mars 2016	1	profil 910 - S2011-065_TRANSLOT15	immersion constante (1900 m)	7
	2		immersion constante (1800 m)	8
	3		immersion constante (1800 m)	8
19 mars 2016	4		suivi de topo (100 m)	7.5
	5			7.5
	6			8
20 mars 2016	7	profil 910 - S2006-076_TRANSIT	8.5	
	8		immersion constante (1900 m)	9
	9		immersion constante (1850 m)	3
	10			
22 mars 2016	11	profil 21-1 - E2005-010_ESS-TR-HR	suivi de topo (100 m)	7
	12		7	
	13		immersion constante (600 m)	6
	14		3	
23 mars 2016	15	profil 20-2 - E2005-010_ESS-TR-HR	suivi de topo (85 m)	7
	16		7.5	
	17		immersion constante (100 m)	8
	18		8.5	
	19		immersion constante (80 m)	7.5
	20		8	
24 mars 2016	21	profil 20-1 - E2005-010_ESS-TR-HR	suivi de topo (100 m)	4
	22		4	
	23		immersion constante (100 m)	4
	24		4	
	25		immersion constante (80 m)	4
	26		4	

# La mission d'expérimentation

Stabilité en température

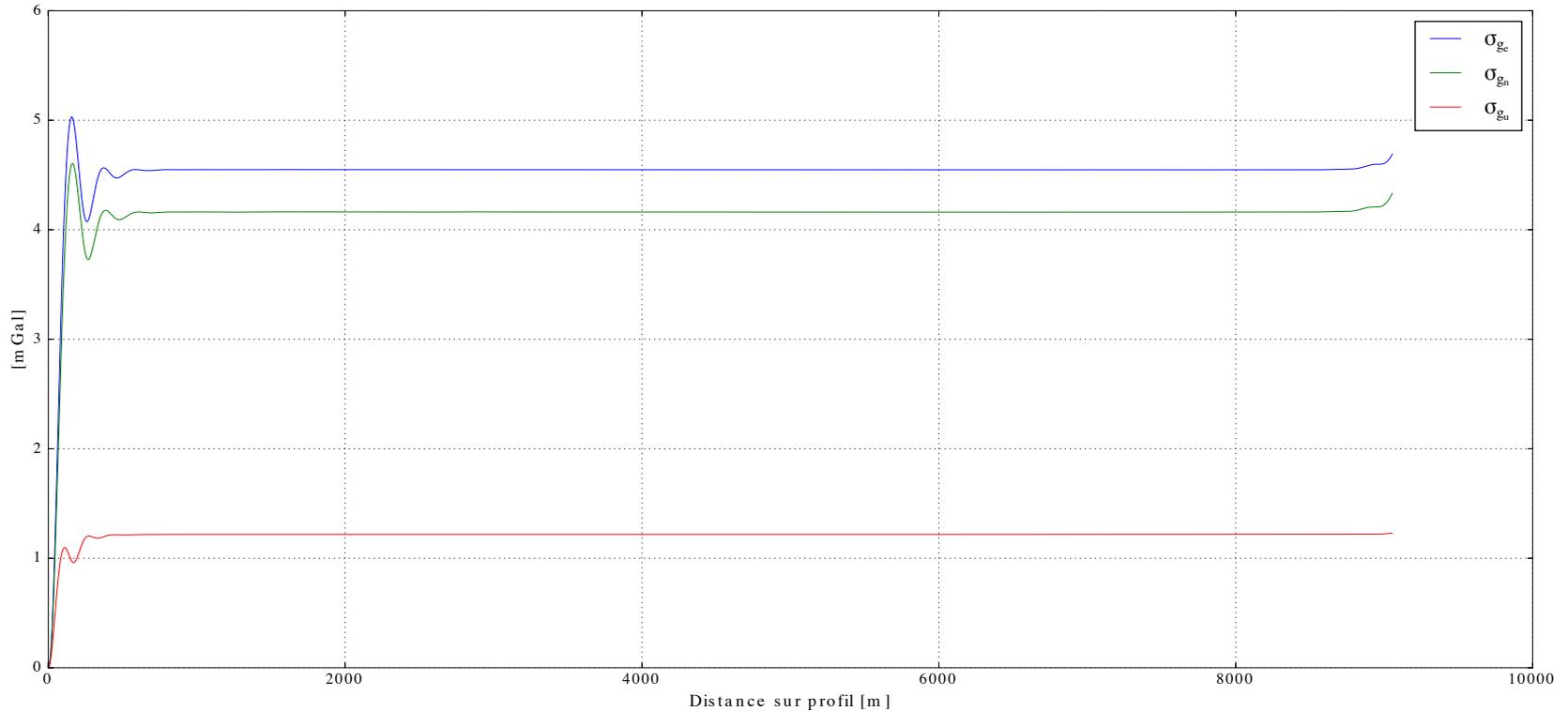
→ assurée par l'environnement naturel



# La mission d'expérimentation

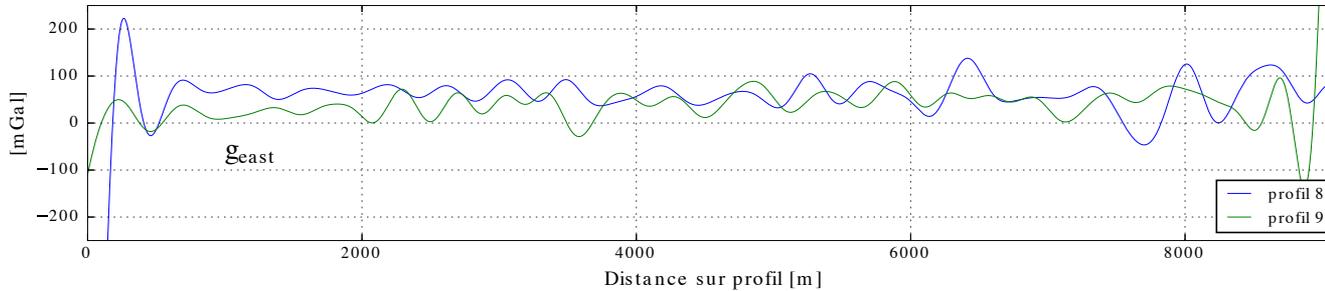
Convergence du filtre de Kalman *Unscented*

→ erreur formelle donnée par la matrice de covariances  $P_k$

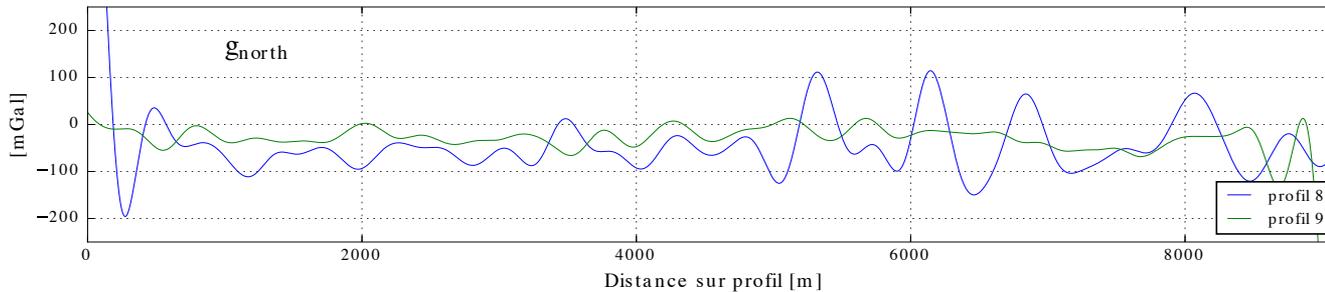


# La mission d'expérimentation

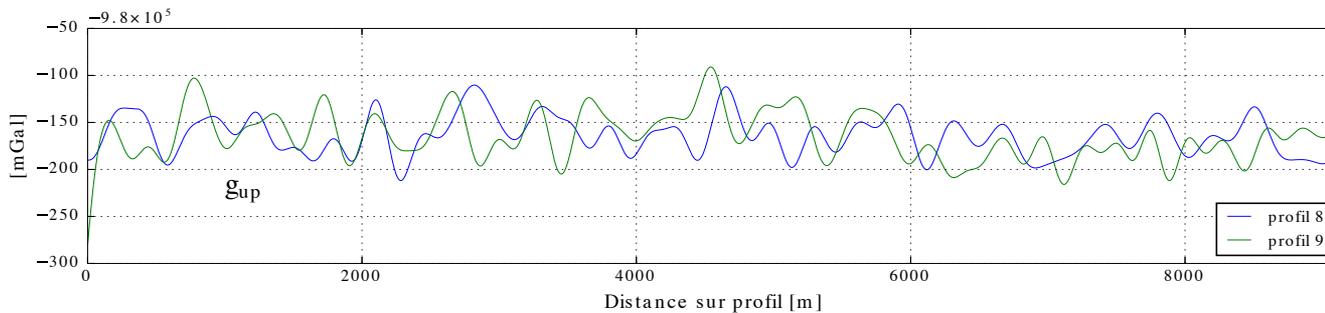
## 3 composantes du champ en sortie du filtre



$$\eta = \frac{\bar{g}_{east}}{\|g\|} \approx 10.2''$$



$$\xi = \frac{\bar{g}_{north}}{\|g\|} \approx 8.1''$$



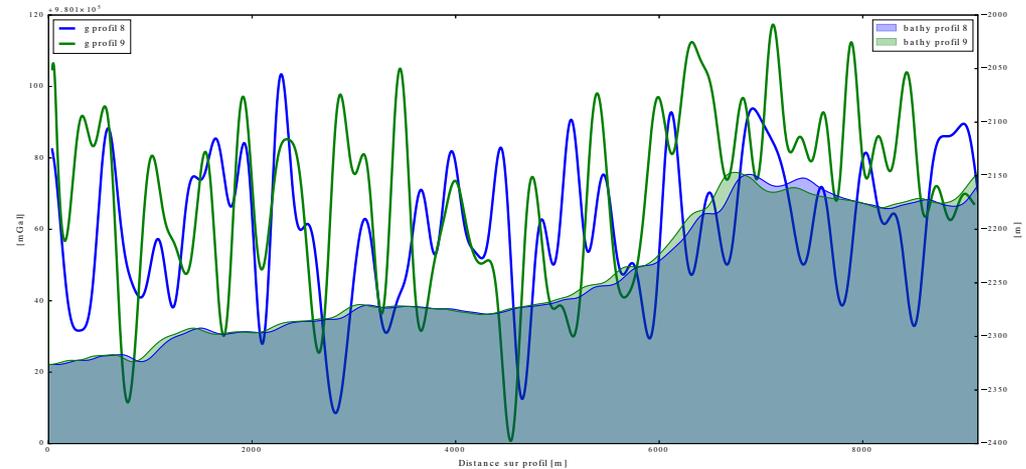
# La mission d'expérimentation

## Norme du champ de pesanteur

sortie du filtre



$$980\,100 < \|g\| < 980\,220 \text{ mGal}$$

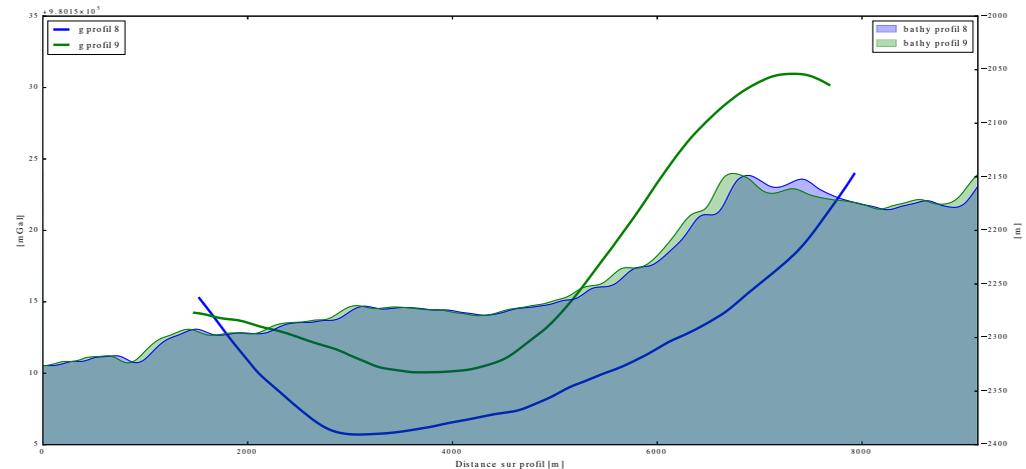


après moyenne

$$L = 3500 \text{ m}$$



$$980\,155 < \|g\| < 980\,185 \text{ mGal}$$

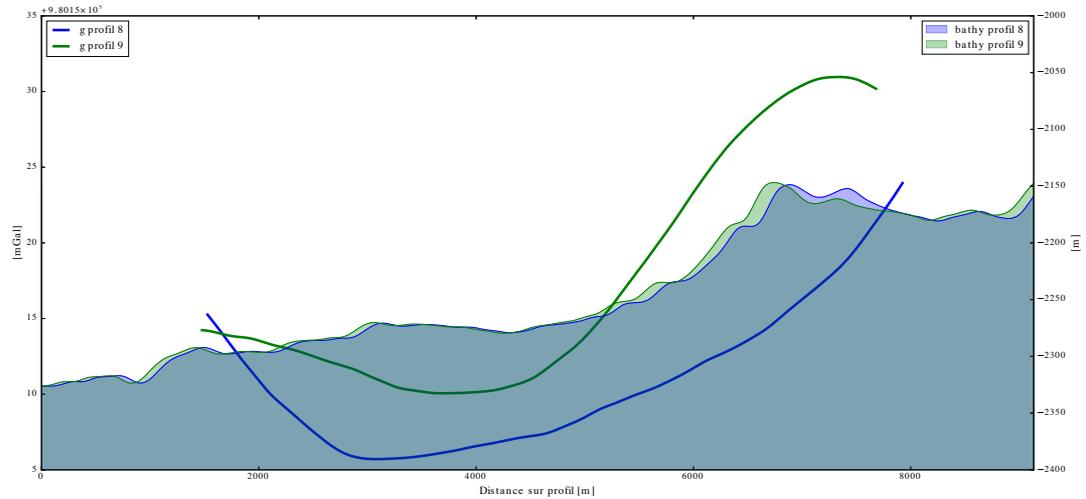


# La mission d'expérimentation

## Comparaison

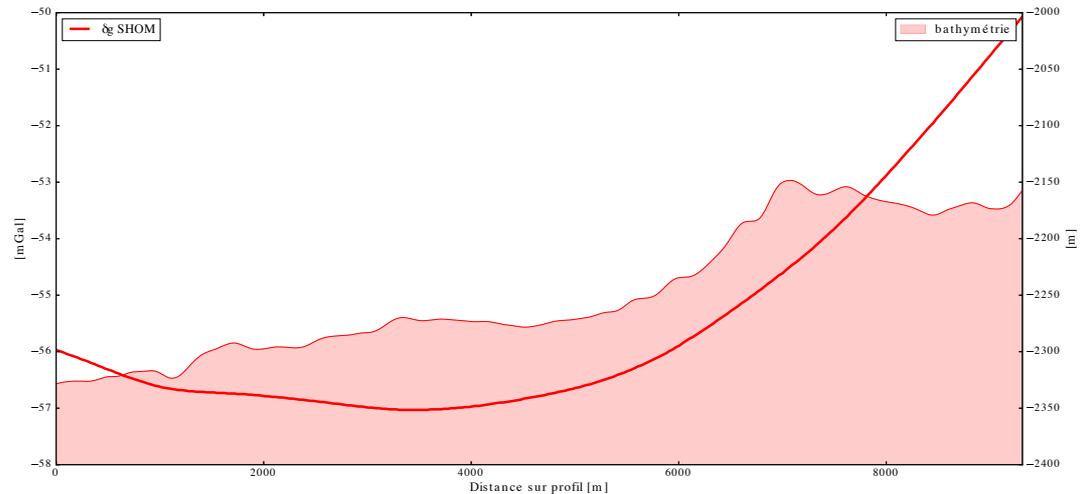
GraviMob

$$980\,155 < \|g\| < 980\,185 \text{ mGal}$$



SHOM

$$-58 < \delta g < -50 \text{ mGal}$$

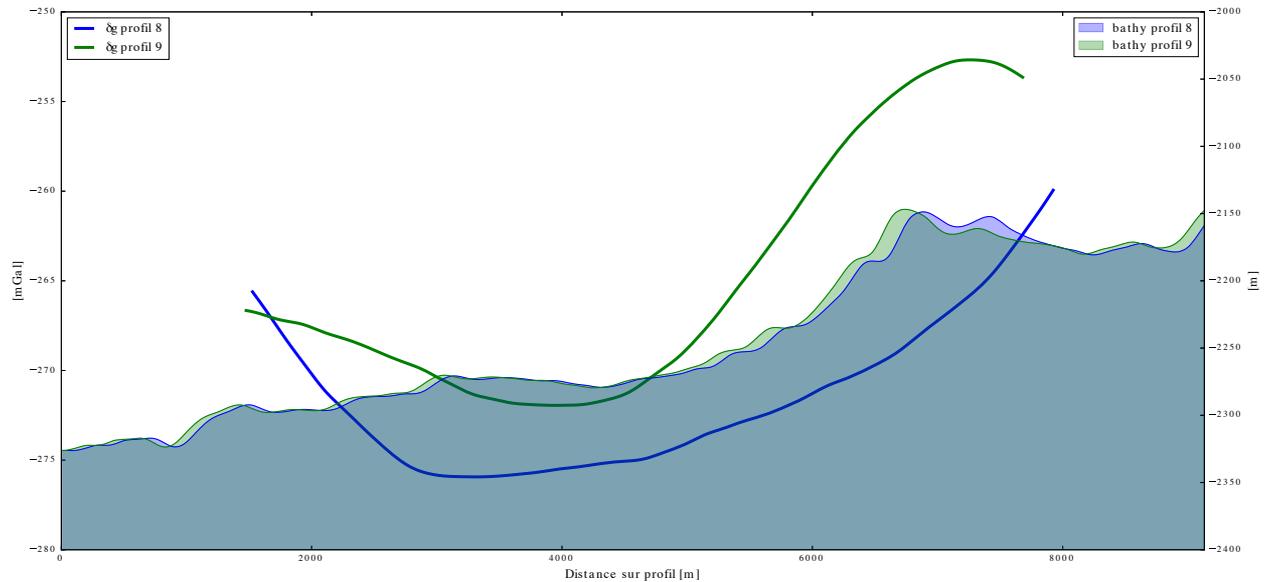


# La mission d'expérimentation

Retrait d'un champ normal (Somigliana)

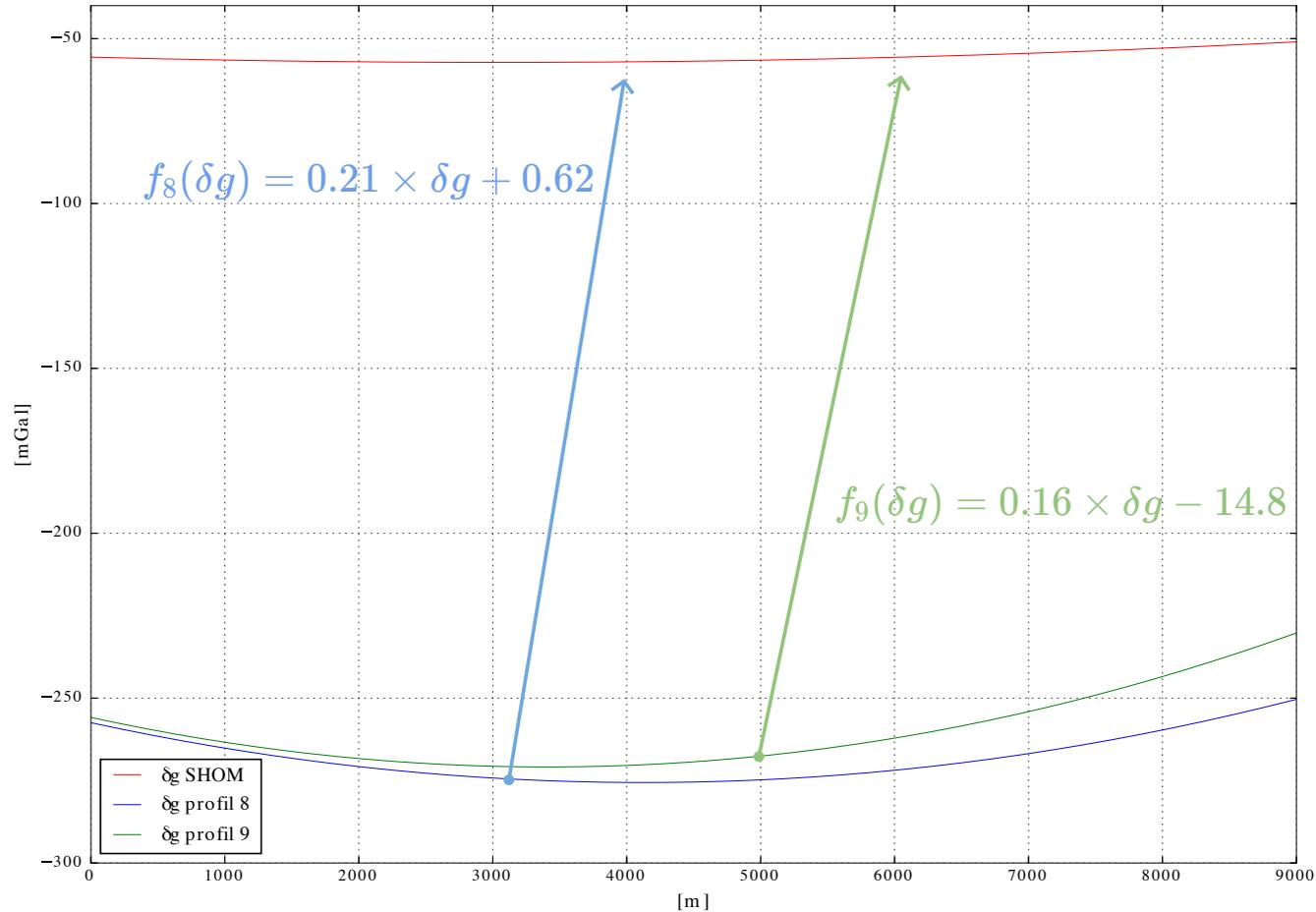
$$\gamma = \frac{a\gamma_e \cos^2 \varphi + b\gamma_p \sin^2 \varphi}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}}$$

$-280 < \delta g < -250 \text{ mGal}$



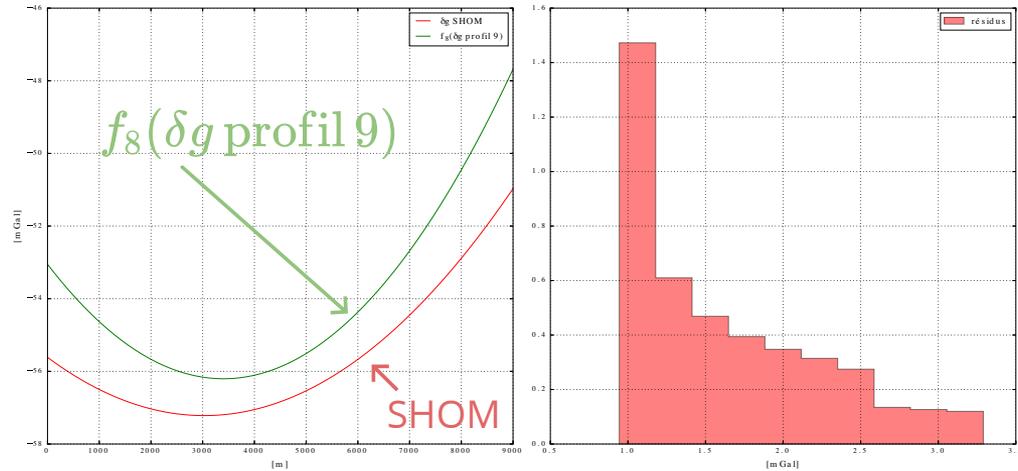
# La mission d'expérimentation

Comparaison des tendances (ordre 2)

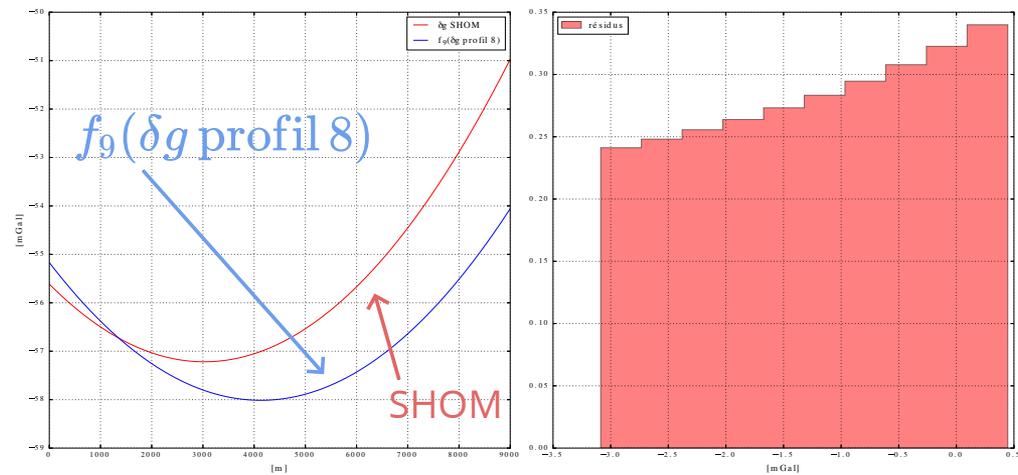


# La mission d'expérimentation

## Résidus



$$0.5 < v_g < 3.5 \text{ mGal}$$



$$-3 < v_g < 0.5 \text{ mGal}$$

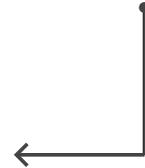
# Perspectives

Prolongement vers le haut

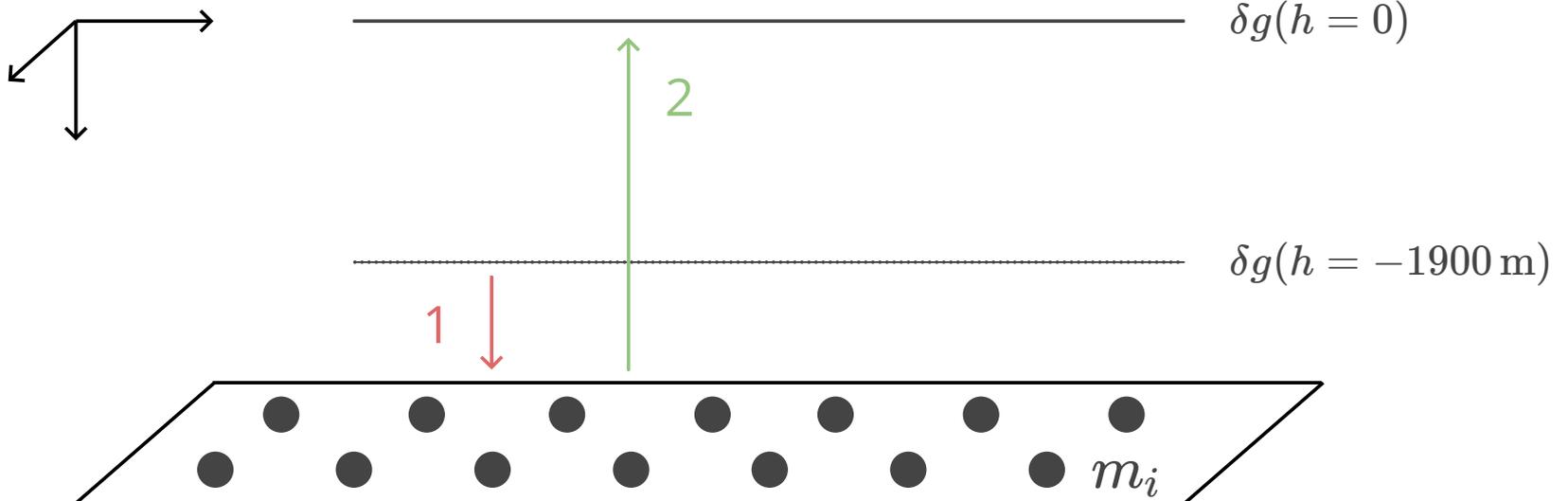
$$F(u, v, 0) = F(u, v, -h) \times e^{(-h \times \sqrt{u^2 + v^2})}$$



carte **2D** de l'anomalie



Estimation d'un modèle de masses ponctuelles



# Conclusion

- Résultats **encourageants**
- Voies d'amélioration :
  - montage électrique / géométrique du capteur
  - calibration du capteur dans l'AUV
  - température de calibration / de levé

