

Gravimétrie absolue marine à l'aide d'atomes froids : GIRAFE 2

*Yannick Bidel, Nassim Zahzam, Malo Cadoret, Cédric Blanchard, Alexandre Bresson
Didier Rouxel, Marie Françoise Lalancette*

16 novembre 2016, ENSTA-Brest, Colloque CNFG2 - Géodésie & Géophysique marine



retour sur innovation

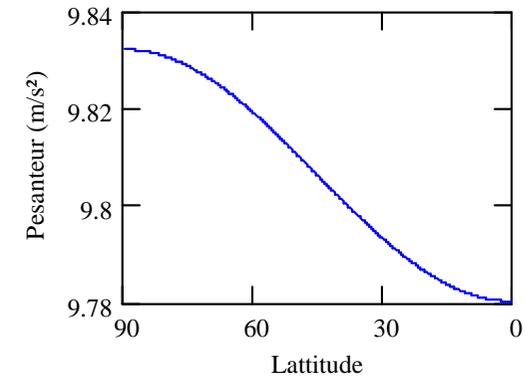
La gravimétrie

Mesurer le **champ de pesanteur terrestre** et ses variations spatiales et temporelles

$$g = 9,81 \dots\dots m.s^{-2}$$

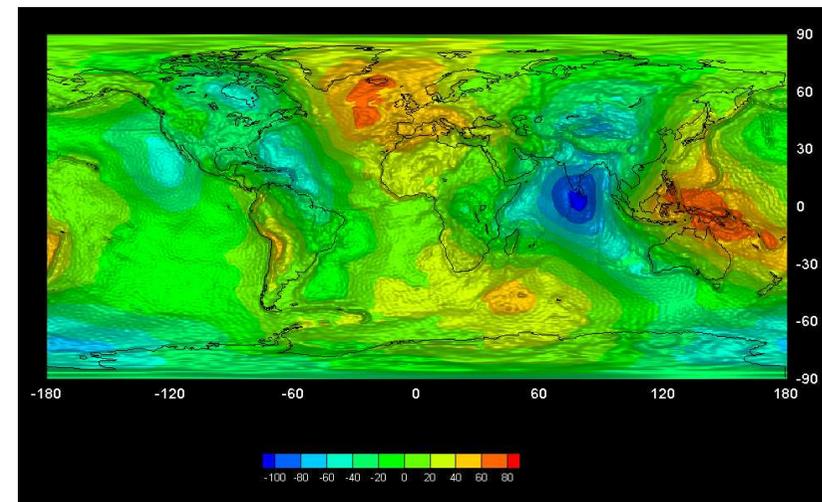
Pesanteur = Accélération gravitationnelle + Accélération axifuge

$$\vec{g}_G \approx -\frac{G M_T}{r^3} \vec{r} + \vec{\Omega}_{terre} \times (\vec{\Omega}_{terre} \times \vec{r})$$



Quelques ordres de grandeur :

- Mouvements de masse interne ~ 10 μ Gal
- Marée : ~ 300 μ Gal sur 24 h
- Gradient vertical ~ 300 μ Gal/m
- Gradients horizontaux ~ 1 à 1000 μ Gal/km

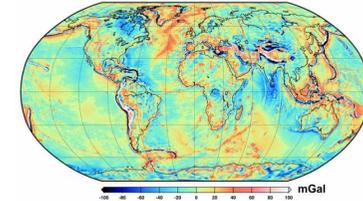


Application de la gravimétrie (et de l'accélérométrie)

• Navigation :

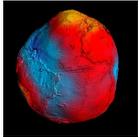


- Inertial Measurement Unit (Autonomous positioning)
- Navigation by field correlation (Gravity Map)
- Drag-free satellite



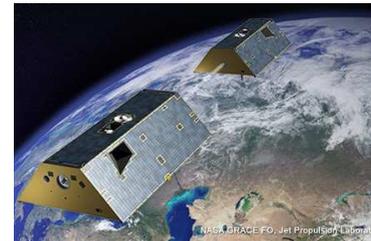
Gravity anomaly
(GRACE + LAGEOS)

• Geophysics/Geodesy :

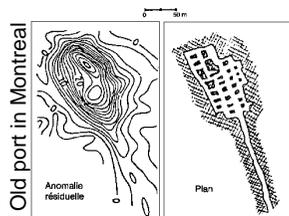


Geoid (GOCE)

- Internal Earth structure
- Seismology
- Geoid determination



• Sub-surface Detection:



- Oil prospection
- Archeology
- Bunkers detection

• Fundamental Physics:



- General Relativity Tests :
 - Equivalence Principle (Microscope, STE-QUEST)
 - Geodetic effect ($\sim 10^{-4} \Omega_T$), Lense-Thirring effect ($\sim 10^{-6} \Omega_T$),
- Watt balance (kg definition), deviation from gravitational laws



Les gravimètres usuels

Mesure statique

- Gravimètre à ressort (CG6) : relatif, std. dev. < 5 μGal , dérive < 0,2 mGal/jour
- Gravimètre supraconducteur (iGrav) : relatif, sensibilité record (0,05 μGal), très faible dérive < 0,5 μGal /mois
- Gravimètre à coin cube (FG5, A10) : absolu, exactitude $\sim 2\mu\text{Gal}$
- Gravimètre à atomes froids : absolu, exactitude = qqs μGal
grande fiabilité, faible maintenance



CG6



i Grav



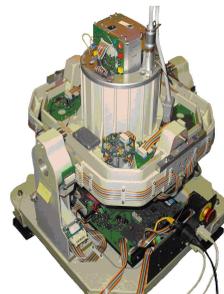
FG5

Mesure dynamique (avion, bateau)

- Gravimètre à ressort + plateforme gyrostabilisée : **relatif**, dérive < 3 mGal/mois, précision: 0,2 à 1 mGal



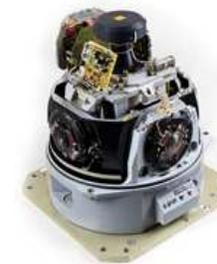
Micro-g
Lacoste
(MGS-6)



Bodensee
(KSS32)



Canadian
microgravity
(GT2-M)



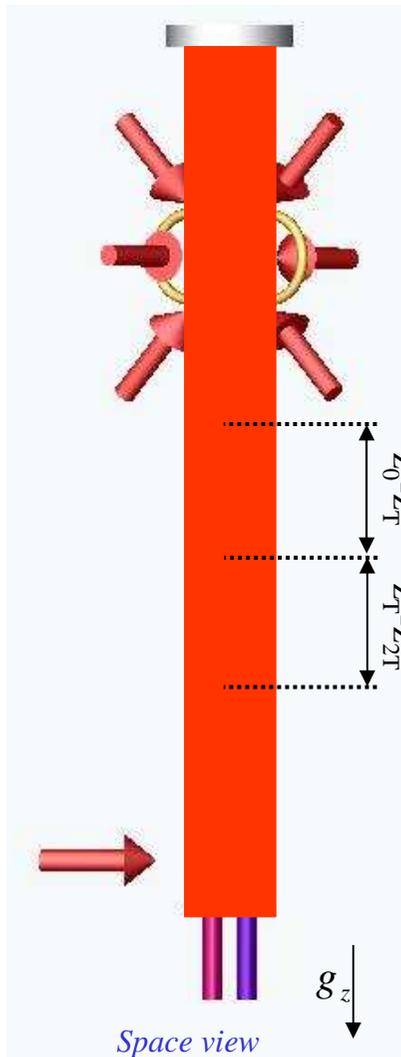
Elektropribor
(Checkan-AM)

- Pas de gravimètre absolu pour des mesures de pesanteur en dynamique

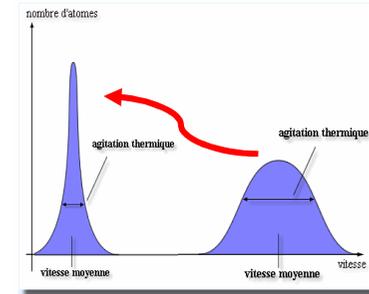
Et la gravimétrie atomique ... embarquable !

- Fort potentiel de la technologie à atomes froids pour obtenir un gravimètre absolu embarquable
=> cadence de mesure élevée, pas de partie mécanique mobile, ...

Cold Atom Accelerometer : Basic Principles (1/2)



- Atom trapping and cooling ($\mu\text{K} \sim \text{cm/s}$)
 $\sim 10^7$ atoms
- Start of the free fall
- Interferometer sequence using 3 Raman Interaction
 (here a vertical laser) \Leftrightarrow 3 positions measurements



- Final Detection of state population : $\propto \frac{1 + \cos(\Phi)}{2}$

$$\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} (z_0 - 2z_T + z_{2T}) \approx g_z T^2$$

fringes

The huge **scale factor** and **zero bias** are very well known/determined with an high accuracy:

- **Absolute** determination of the acceleration
- **No long term drift**

Gyro : initial Velocity => Coriolis Effect

Etat de l'art des gravimètres atomiques

- Développement de nombreux gravimètres (ou gradiomètres) à atomes froids :

France (LNE-Syrte, Onera, Thales, LP2N, LCAR), USA (Kasevich, Ye, Biedermann, Müller),
Allemagne (A. Peter, E. Rasel), Italie (M. Tino), Chine (Ming-Sheng, Zhan, Luo),
Australie (Close), UK (Bongs), ...



- Performance des gravimètres à atomes froids équivalentes ou meilleures que les gravimètres classiques (FG5)

SYRTE : exactitude ~ 5 μGal , sensibilité ~ 10 $\mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$



- Début de la commercialisation de gravimètres statiques à atomes froids par des spin-off

Muquans, AOSense, Atom Sensors

- Accéléromètres à atomes froids dans un porteur mobile

- Kasevich (Stanford) : mesure du gradient de pesanteur dans un camion se déplaçant à une vitesse de 1 cm/s

- ICE (Institut d'optique, SYRTE, ONERA)

mesure qualitative d'accélération dans un avion (expérience de démonstration)

- GIRAFE



Kasevich



ICE

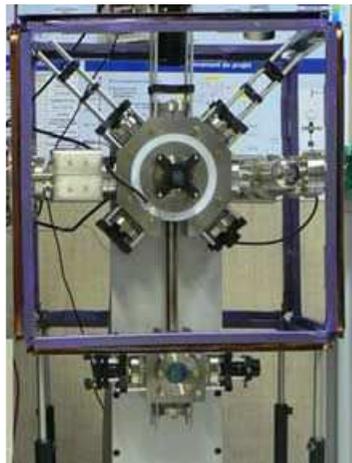
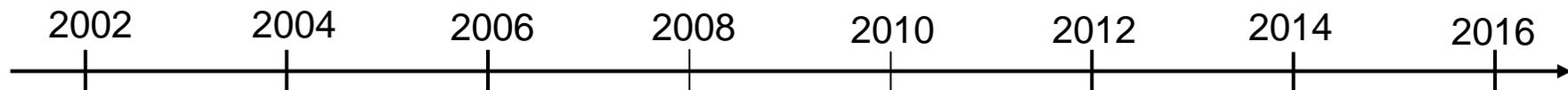


Girafe 1

Mesures statiques

En dynamique

Girafon, Girafe 1 et 2 : gravimétrie absolue atomique embarquée



Gravimètre statique
Laser embarquable

Girafe 1 



Gravimètre compact et
transportable

Test dans un ascenseur

Girafe 2 

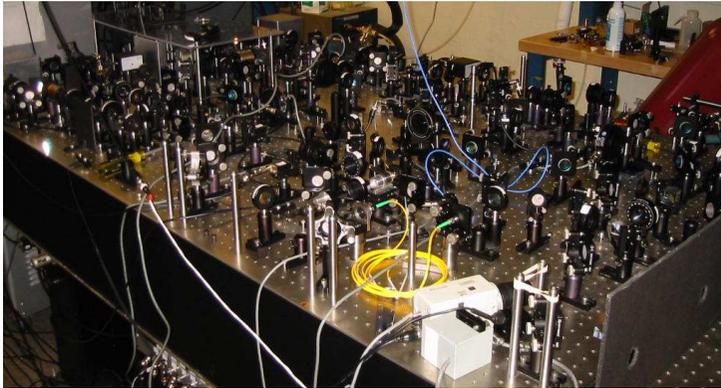


Gravimètre embarquable

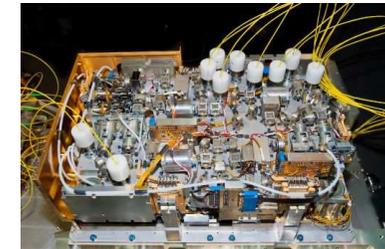
Test dans un bateau

1) Système laser pour l'interférométrie atomique

- **Système laser classique** : banc optique espace libre, cavité laser



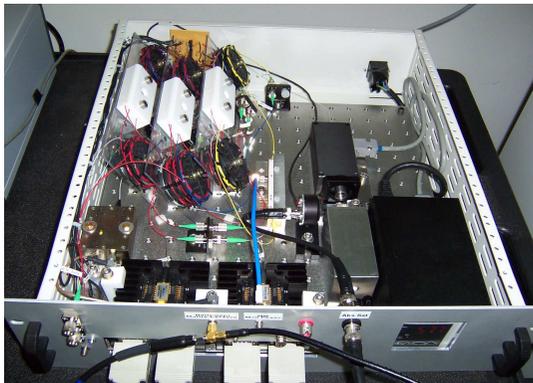
- Désalignement, sensibilité au vibration
- Difficilement embarquable



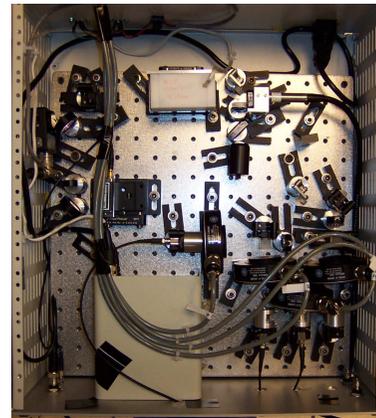
Pharao

- **Système laser développé à l'ONERA** : banc laser fibré à 1560 nm doublé en fréquence

Banc fibré télécom



Doublage de fréquence



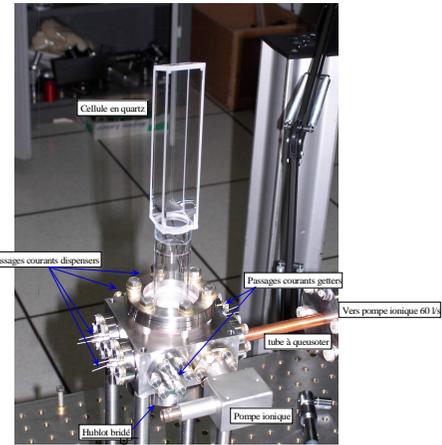
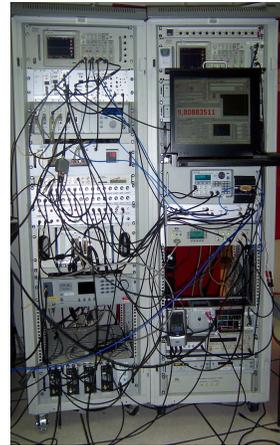
- Robustesse démontrée dans l'airbus 0 g
- Technologie diffusée dans la communauté scientifique et industrielle

(FR3019691)

2) Gravimètre Girafe 1 (version 2009)

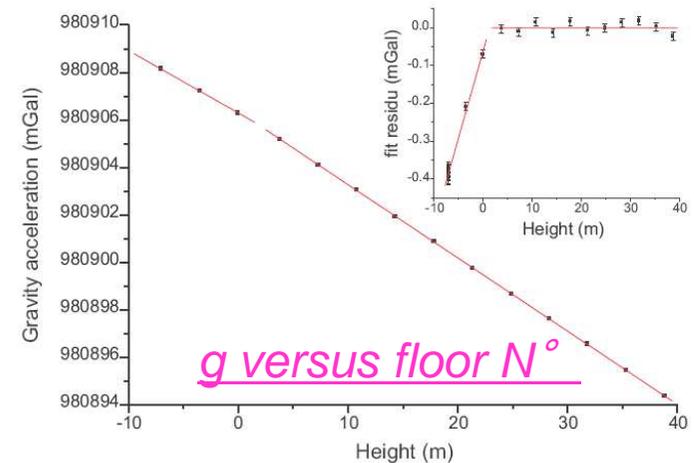
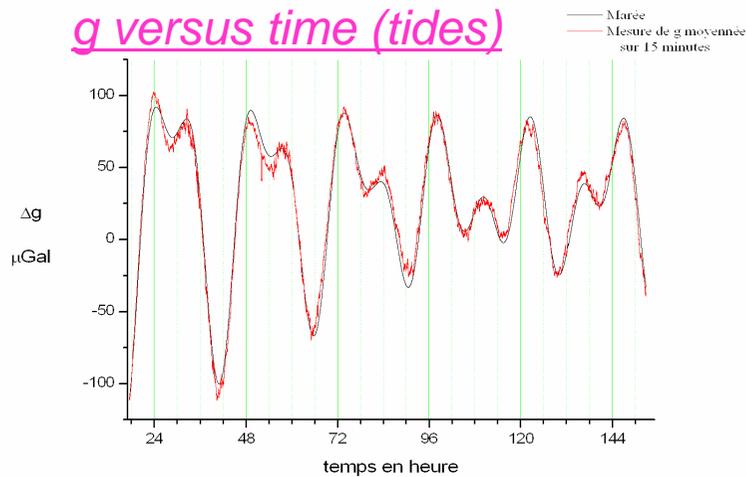


Reduced size sensor with performances close to the best gravimeters



Falling distance = 6 cm
 Repetition rate = 4 Hz
 Sensitivity = 42 $\mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$
 Accuracy = 25 μGal

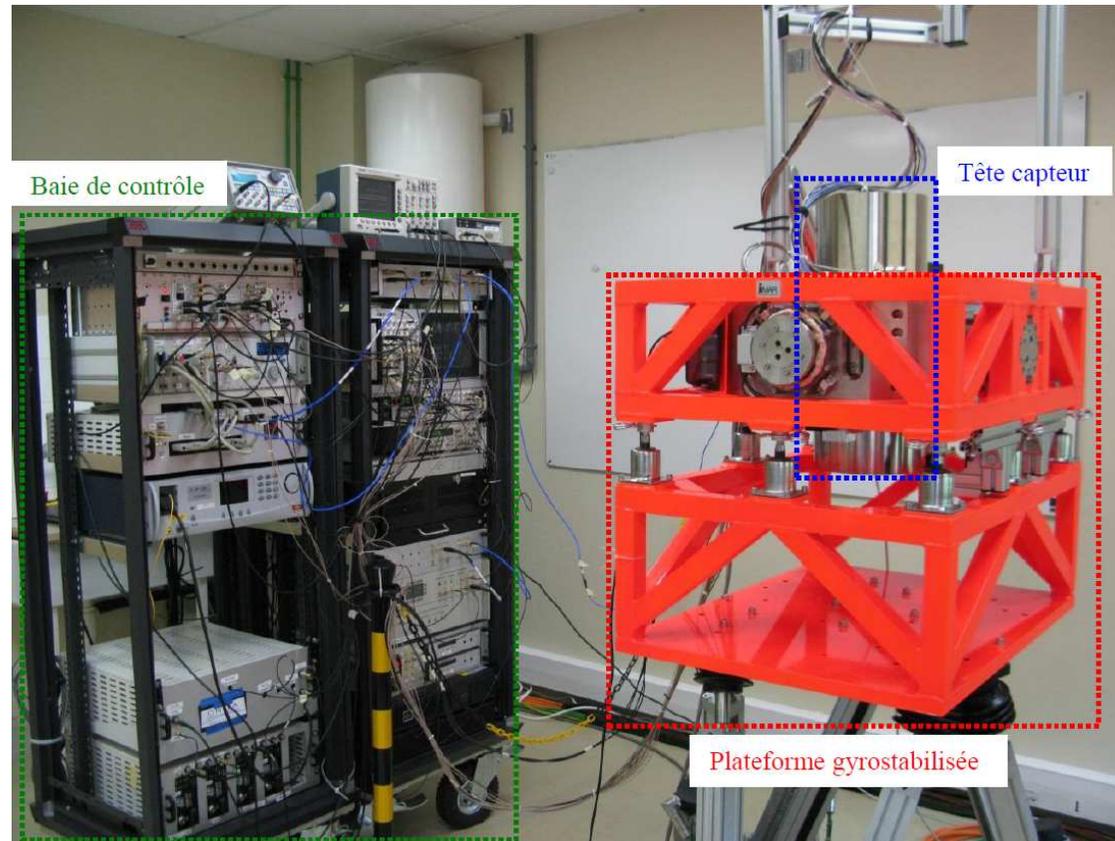
Compact sensor for static measurement: gravity measurement in the lab and in an elevator



3) Projet Girafe 2 (2013 – 2016)

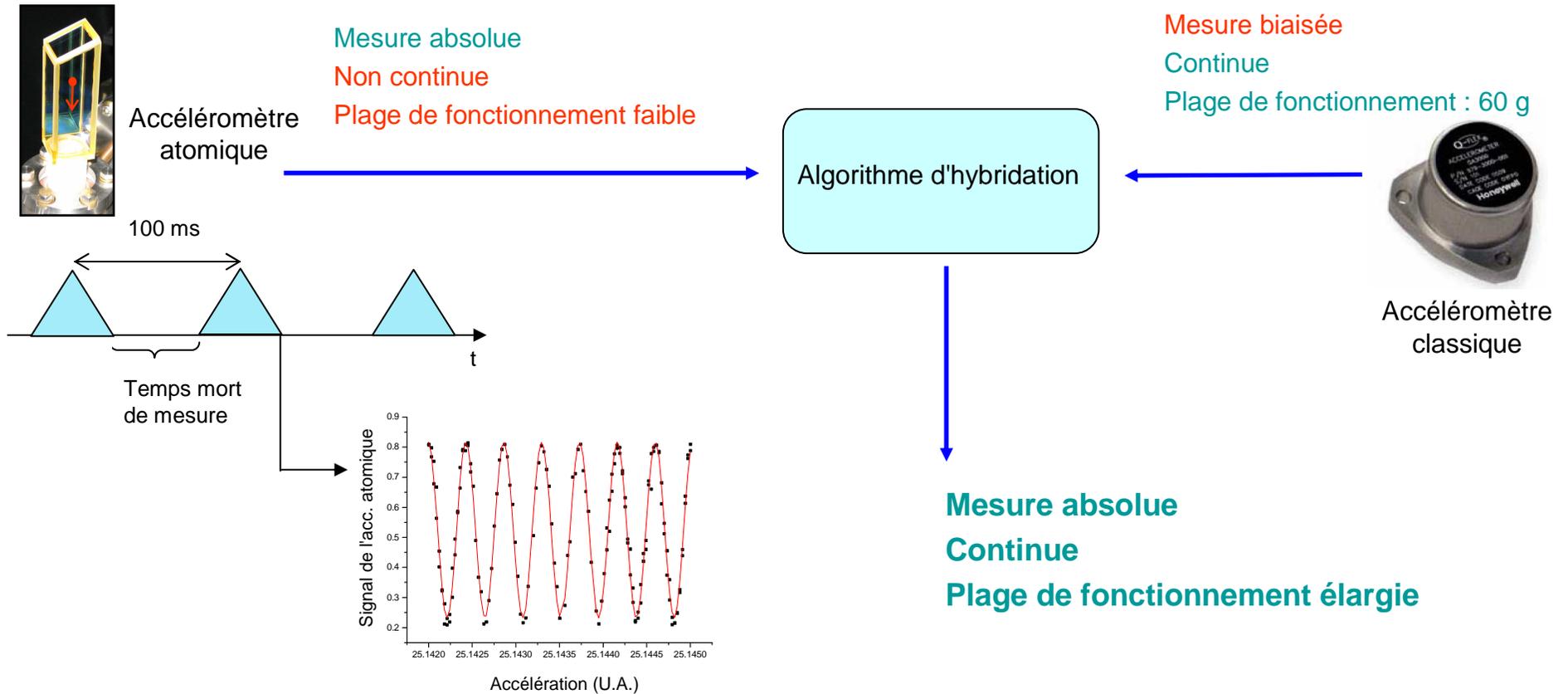
But : Concevoir, réaliser et tester un démonstrateur de gravimètre à atomes froids permettant de mesurer la pesanteur en dynamique sur porteur naval

- **Définition et réalisation du gravimètre**
 - Capteur optimisé pour un fonctionnement en dynamique sur bateau de surface
- **Optimisations et tests du gravimètre en laboratoire**
 - test statique
 - test dynamique (hexapode)
- **Évaluation du gravimètre à bord d'un porteur naval**



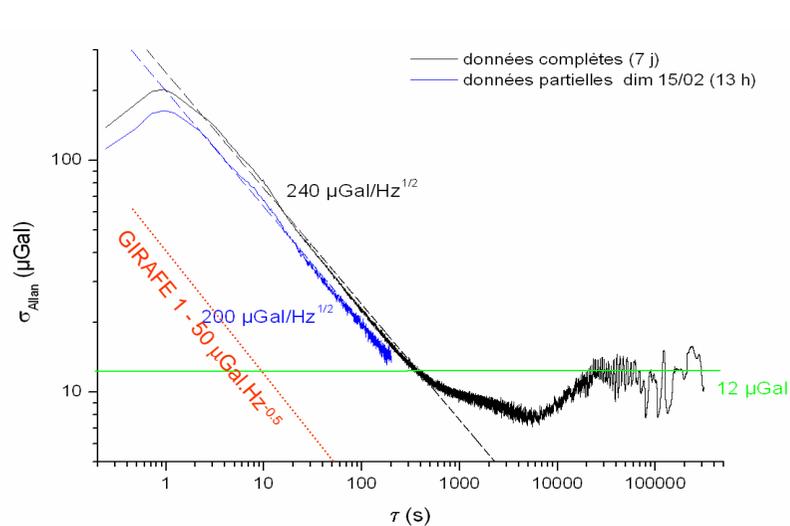
Hybridation avec un accéléromètre conventionnel

But : Lever l'indétermination de frange et estimer l'accélération pendant les temps morts de mesure

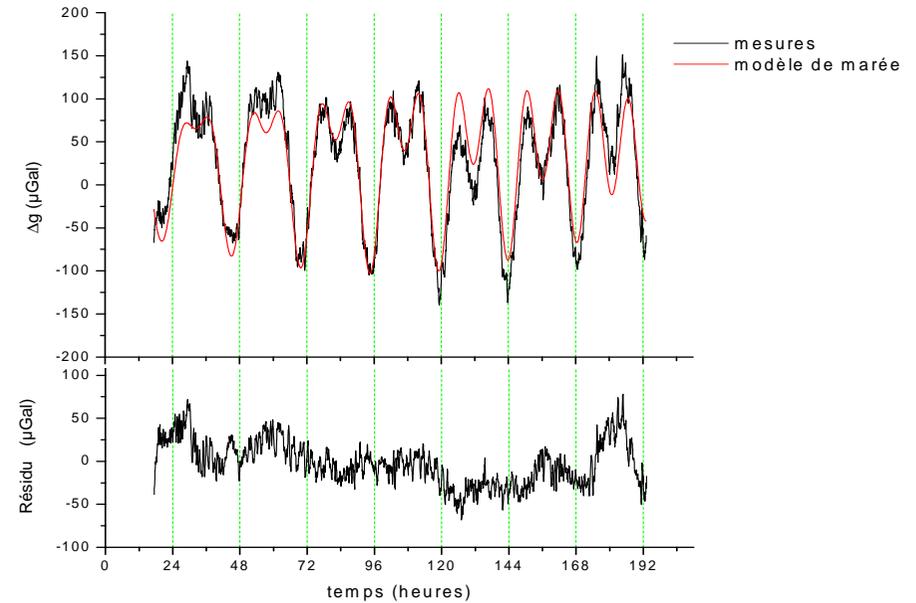


Tests en statique de GIRAFE 2

Mesure long terme pendant 7 jours en condition statique (cadence 4 Hz)



Sensibilité : $200 \mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$



Stabilité long terme : $\sigma = 25 \mu\text{Gal}$

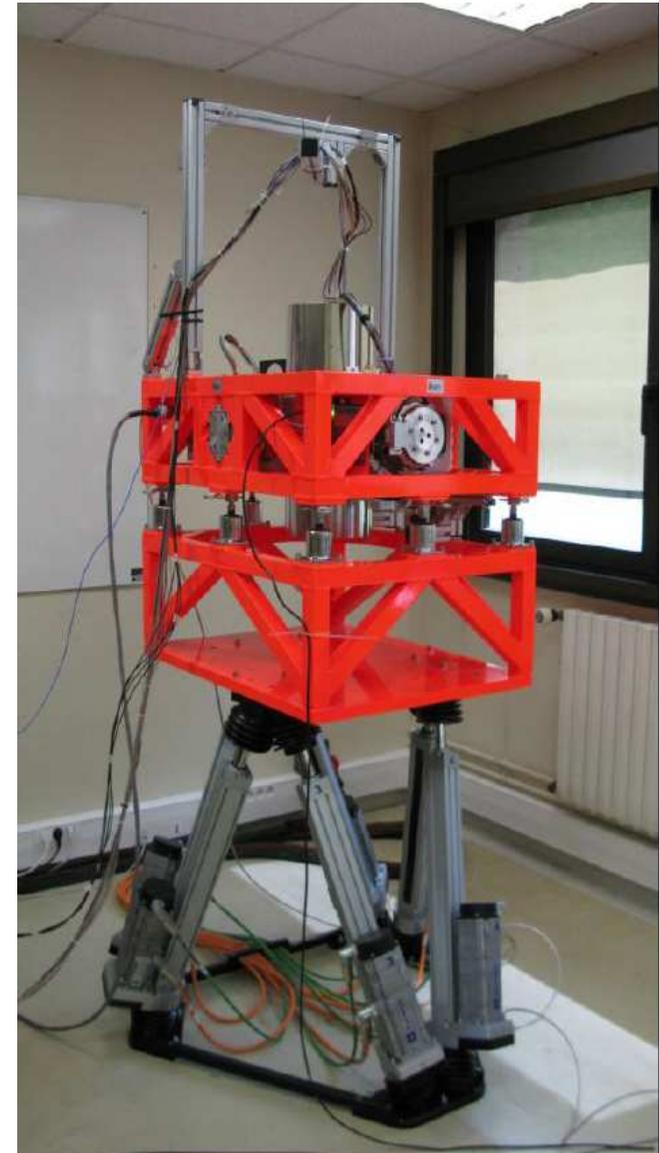
Étude de l'exactitude du gravimètre

Comparaison avec un gravimètre absolu A10 (SHOM) : $\Delta g = -14 \pm 65 \mu\text{Gal}$

- Performances en statique suffisantes pour des mesures de pesanteur sur bateau (objectif de perfo. $< 500 \mu\text{Gal}$)
- Possibilité d'améliorer les performances par une modification des lasers et en augmentant le temps de chute

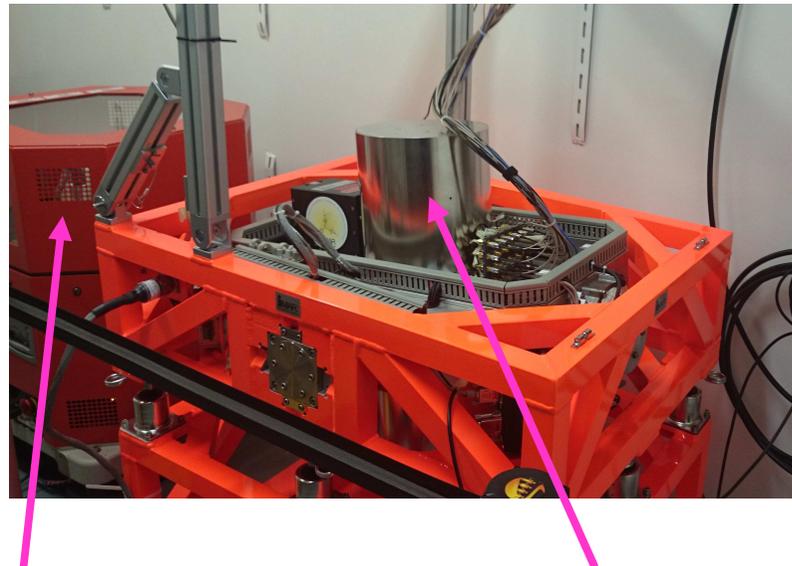
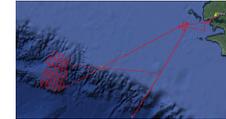
Tests environnementaux de GIRAFE 2

- **Champ magnétique** : $\Delta g < 14 \mu\text{Gal}/\text{Gauss}$ (exp.)
- **Température** : $\Delta g < 1 \mu\text{Gal}/\text{deg}$ (exp.)
- **Vibrations** : **Excitation avec une table sur cales piézo-électriques**
Fréquence 1Hz à 100 Hz
Amplitude $2 \text{ mg}_{\text{rms}}$ à $10 \text{ mg}_{\text{rms}}$
→ $\sigma < 0,7 \text{ mGal}$ après filtrage ($\tau=75\text{s}$)
- **Accélérations et en rotations** : **test avec un hexapode**
Mouvements sinusoïdaux représentatifs de la houle:
~ 0,1 Hz ; ~ 0,2 m , ~ 7 à 30 deg
→ $\sigma < 0,5 \text{ mGal}$ après filtrage ($\tau = 75 \text{ s}$)



Marine Survey : *BHO Beautemps-Beaupré*

2 marine-ship gravity survey (~ 10 days) in Oct. 2015 and Jan. 2016
on BHO Beautemps-Beaupré French ship (SHOM)



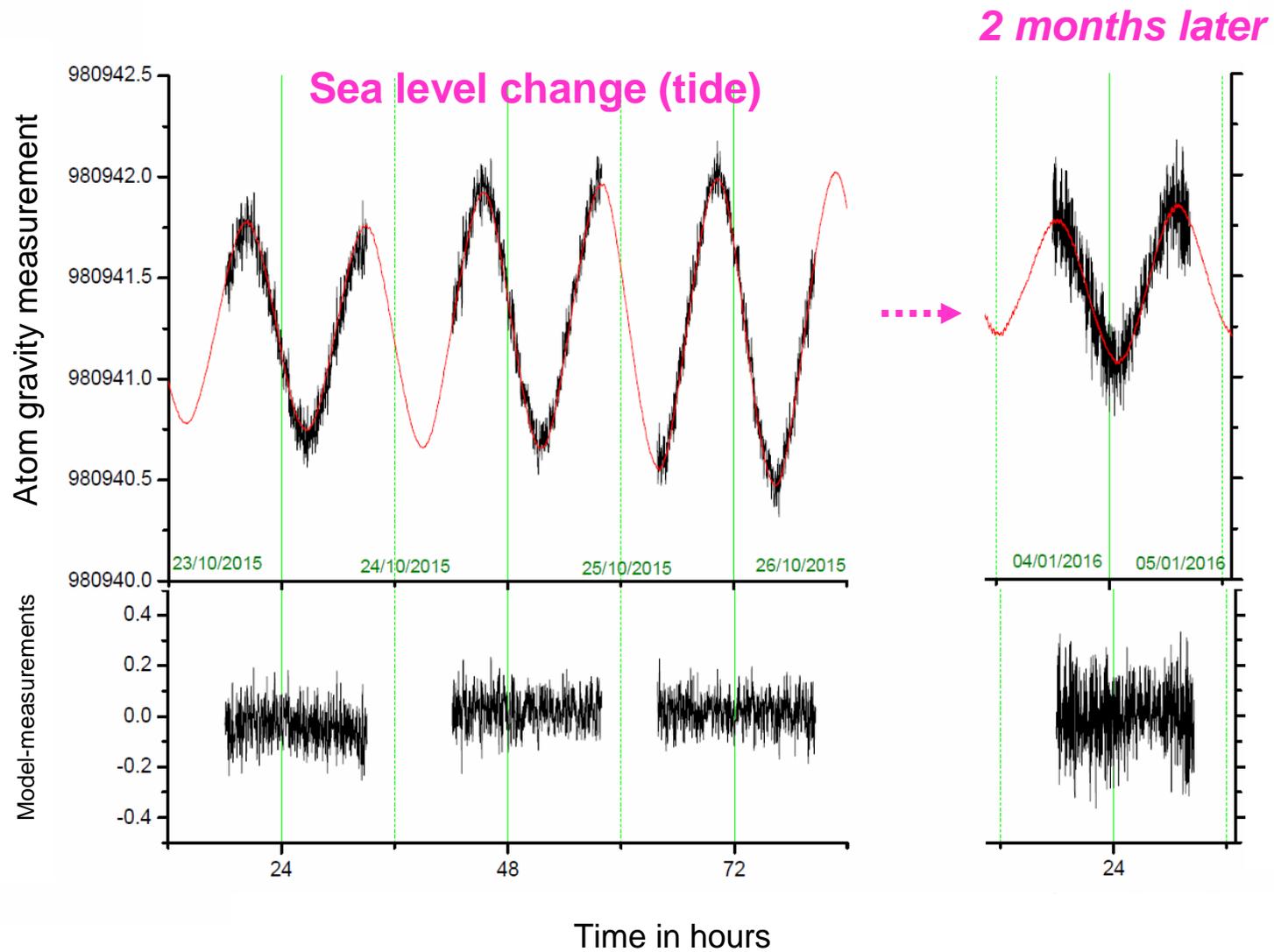
KSS32 relative Marine Gravimeter
(Bodenseewerk)

Cold Atom Gravimeter
(Onera)

Measurements : GIRAFE and KSS32 side by side !

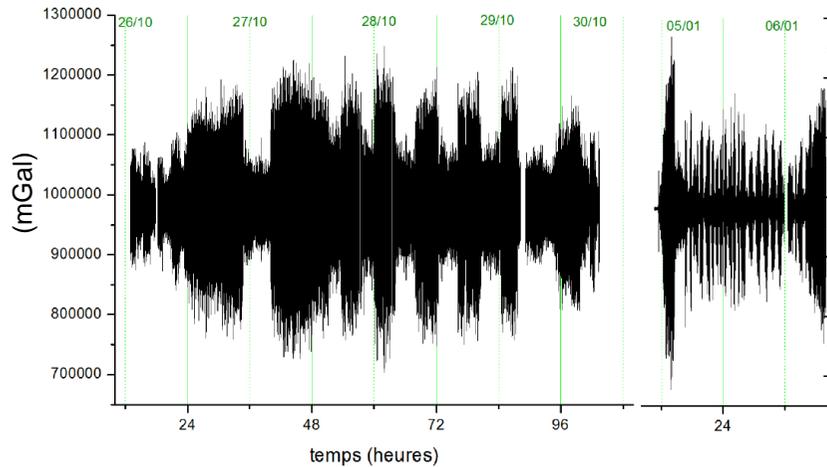
Harsh Environment : **Sea State 5-6**, Atlantic Ocean (off the Brittany coast)
(angles +/- 20 ° and acceleration ~ +/- 0.5 g)

Mesure à quai : biais et dérive très faible ...



Traitement de donnée

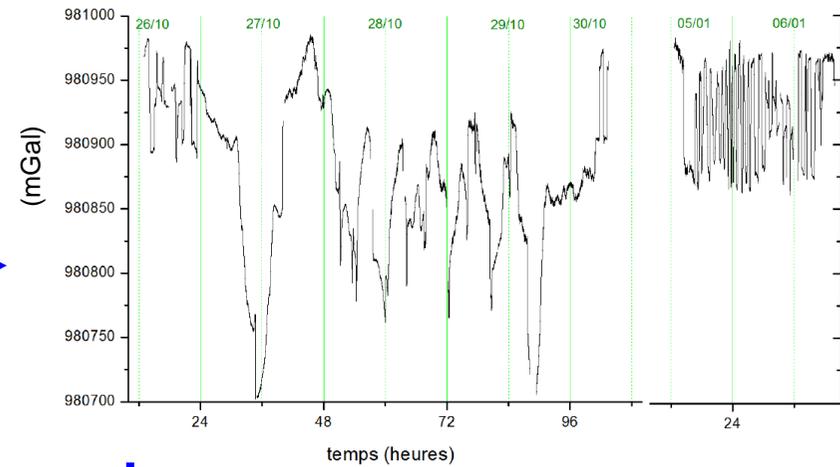
Mesures brutes: $g + a_{\text{porteur}} + \text{Eötvös}$



Filtre
passe
bas
(130 s)



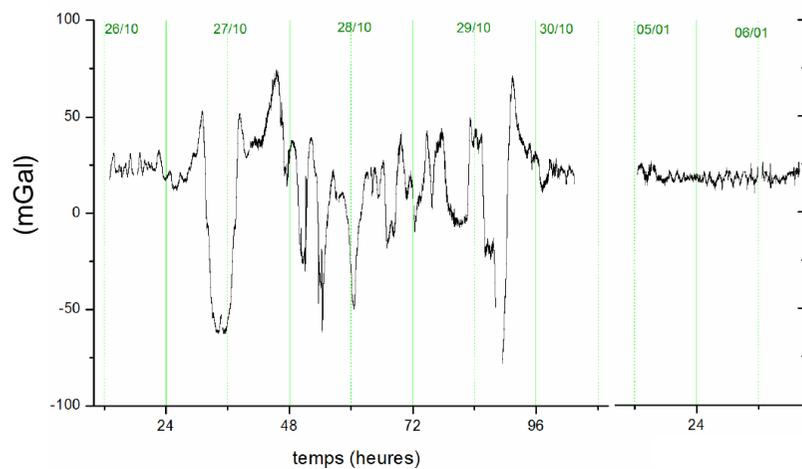
$g + \text{Eötvös}$



Correction de
l'effet Eötvös



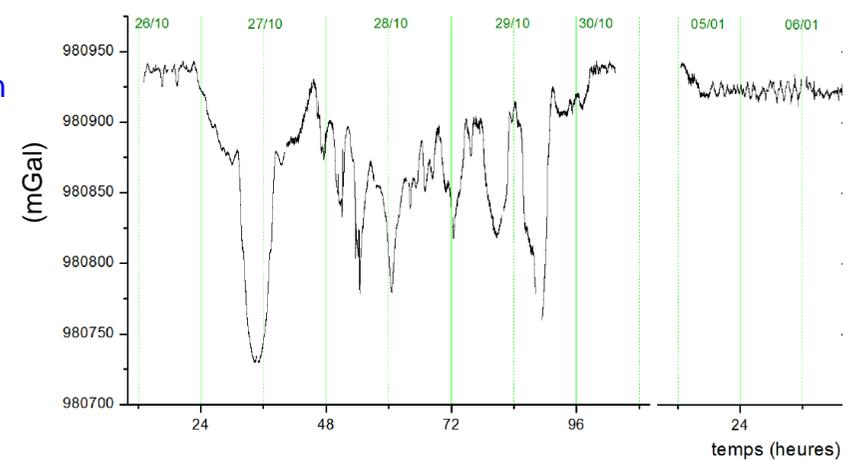
Anomalie de pesanteur $g - g_{\text{normal}}$



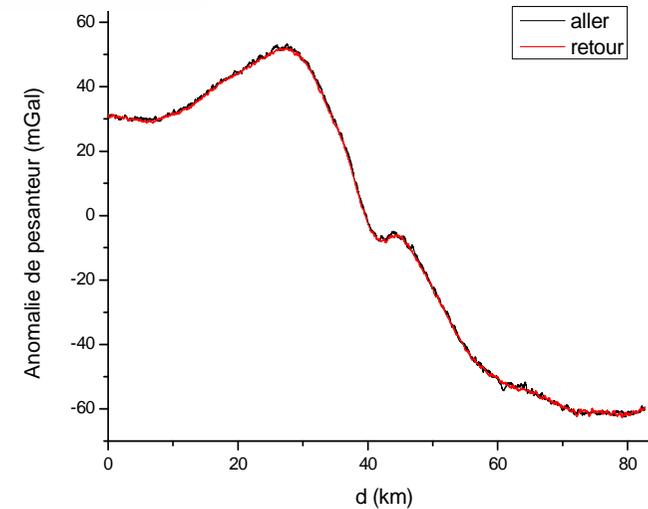
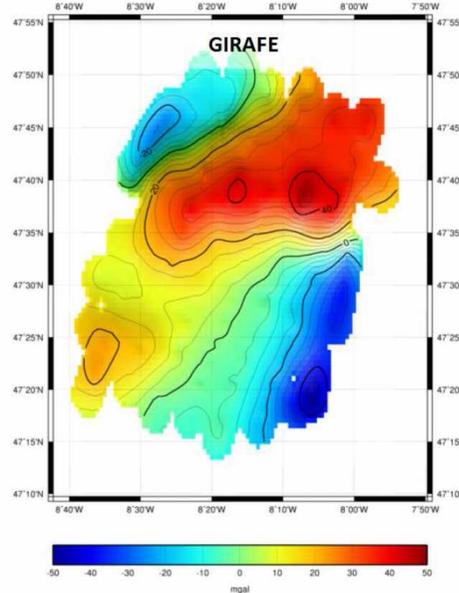
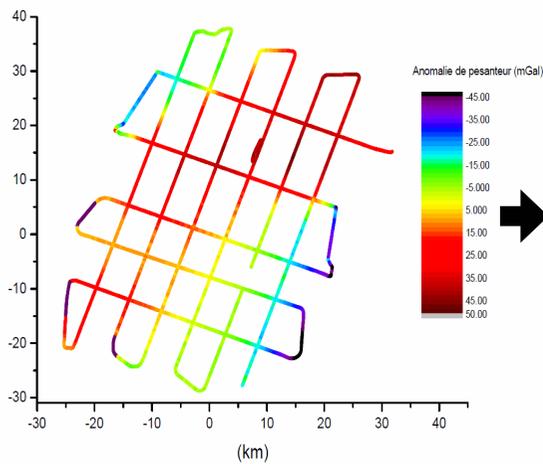
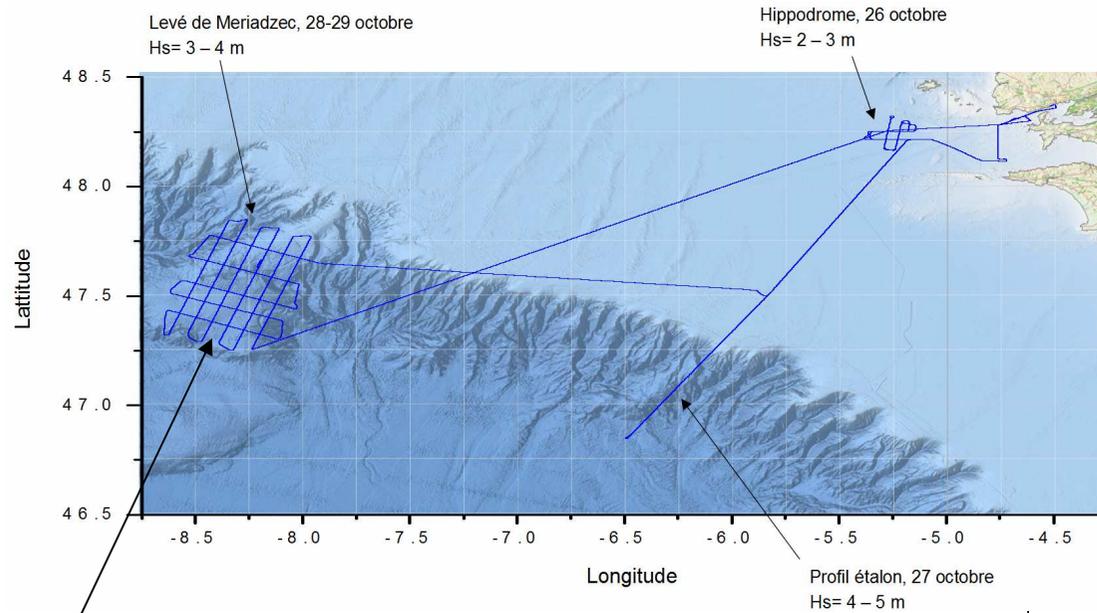
Soustraction
de la
pesanteur
normale



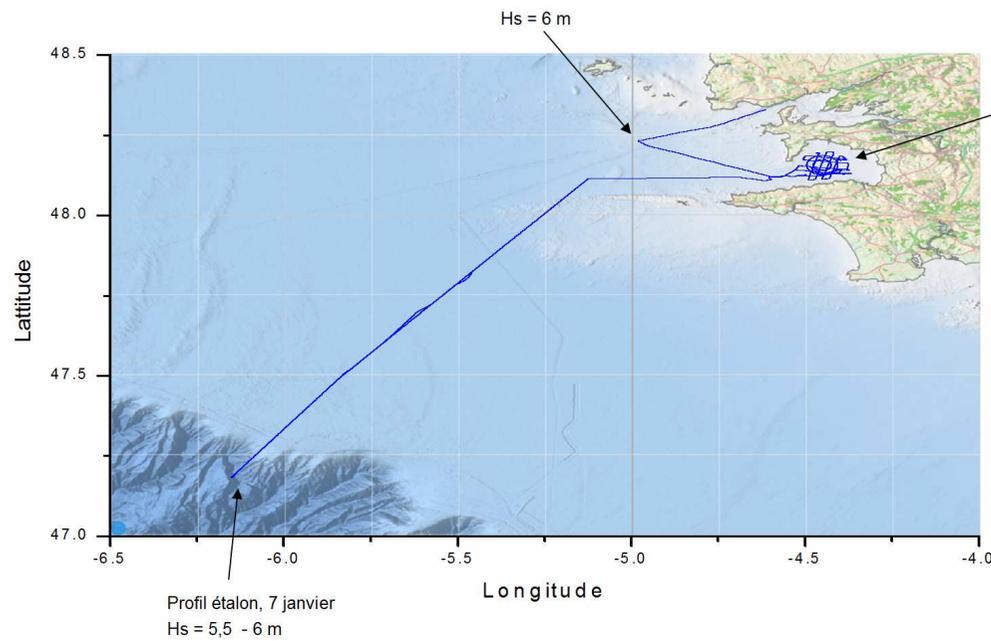
g



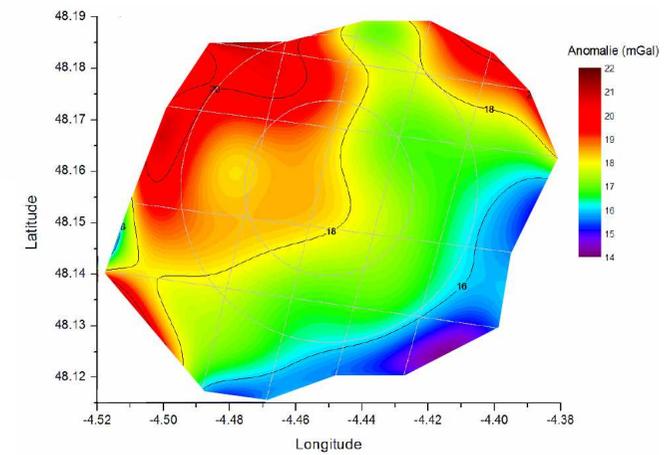
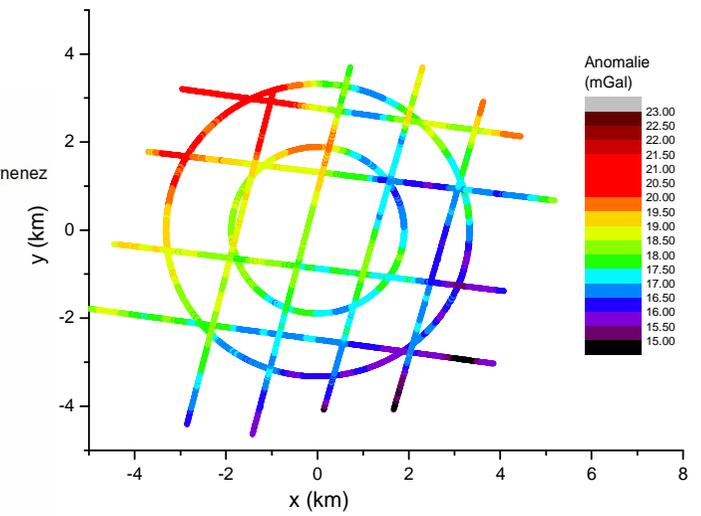
Essai en mer d'octobre 2015



Essai en mer de janvier 2016

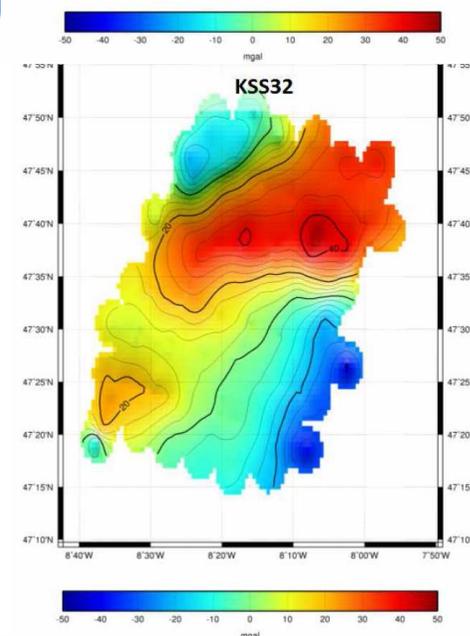
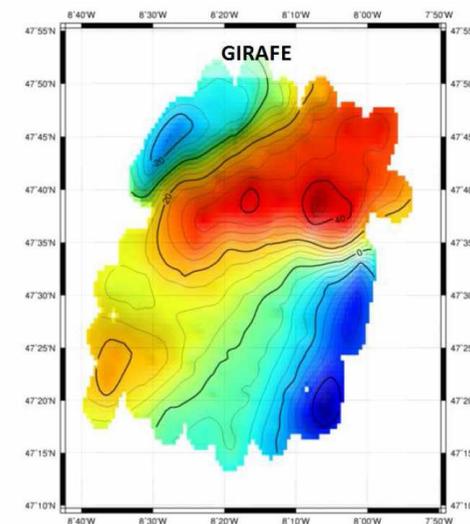


Levé en baie de Douarnenez
5 - 6 janvier
Hs = 2 - 3 m



Comparaison avec gravimètre KSS32

		Girafe 2	KSS32	
Profil étalon $H_s = 4 - 5$ m	aller	0,5 mGal	1,1 mGal	Comparaison données de référence
	retour	0,3 mGal	0,6 mGal	
Meriadzec $H_s = 3 - 4$ m		0,9 mGal	1,0 mGal	Analyse Écarts aux points de croisement
Douarnenez $H_s = 2 - 3$ m	Profil régulier	0,35 mGal	1,0 mGal	
	Profil circulaire 8nd	0,5 mGal	1,0 mGal	
	Profil circulaire 11nd	0,6 mGal	2,9 mGal	



→ Meilleure performance pour le gravimètre absolu Girafe 2

- Suppression des erreurs de calibration et de dérive du gravimètre relatif
- Meilleure plateforme gyrostabilisée

Bilan et Conclusion sur le gravimètre marin Girafe 2

- Conception, réalisation et tests d'un gravimètre à atomes froids embarquable

- Hybridation avec des accéléromètres conventionnels
- Intégration à une plateforme gyrostabilisée
- Miniaturisation de la tête capteur
- Mesures à une cadence de 10 Hz



- 1er Test en mer sur le BHO Beautemps Beaupré

- Première démonstration expérimentale de mesure absolue de pesanteur en mer
- Précision < 1 mGal par conditions de mer forte
 - $< 0,6$ mGal en giration
 - $< 0,4$ mGal dans des conditions normales

- Comparaison favorable par rapport au gravimètre à ressort KSS32



Conclusions sur la gravimétrie atomique

- Girafe 2 → Saut technologique pour la gravimétrie embarquée (bateau, sous marin, avion)

- pas de dérive
- pas de calibration nécessaire
- meilleure précision, résolution

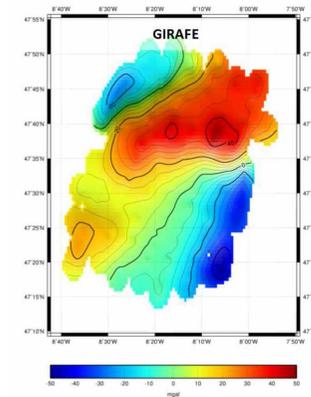
Amélioration des cartes

Gain de temps et diminution des coûts pour la réalisation des cartes

Amélioration de la navigation sous marine

→ Verrous technologiques levés

→ Vers une filière de gravimètres absolus marins



- Premières mesures quantitatives sur un porteur mobile avec un capteur inertiel atomique

Confirme les potentialités de la technologie à atomes froids pour des applications embarquées

→ Vers la conception et la réalisation d'autres architectures de capteurs inertiels atomiques hybrides : centrale inertielle, spatial, gradiomètre, ...

→ Vers la validation sur d'autres porteurs

