

# GRAVIMÉTRIE ABSOLUE SUR PLATEFORME MOBILE

## 1<sup>ERS</sup> RÉSULTATS DE LA CAMPAGNE AÉROPORTÉE SAFIRE / AIRGRAVI (2019)

### RESULTATS PRELIMINAIRES

S. Bonvalot, A. Bresson, Y. Bidel, N. Zhazam, C. Blanchard, MF. Le Quentrec - Lalancette,  
D. Rouxel, C. Salaun, L. Seoane, G. Gabalda, R. Forsberg, T. Jensen, O. Carraz

**SAFIRE** - SERVICE DES AVIONS FRANÇAIS INSTRUMENTÉS POUR LA RECHERCHE EN ENVIRONNEMENT

**ONERA** - CENTRE FRANÇAIS DE RECHERCHE AÉROSPATIALE

**GET** - GÉOSCIENCES ENVIRONNEMENT TOULOUSE

**SHOM** - SERVICE HYDROGRAPHIQUE ET OCÉANOGRAPHIQUE DE LA MARINE

**CNES** - CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES

**DTU SPACE** - DANISH TECHNICAL UNIVERSITY

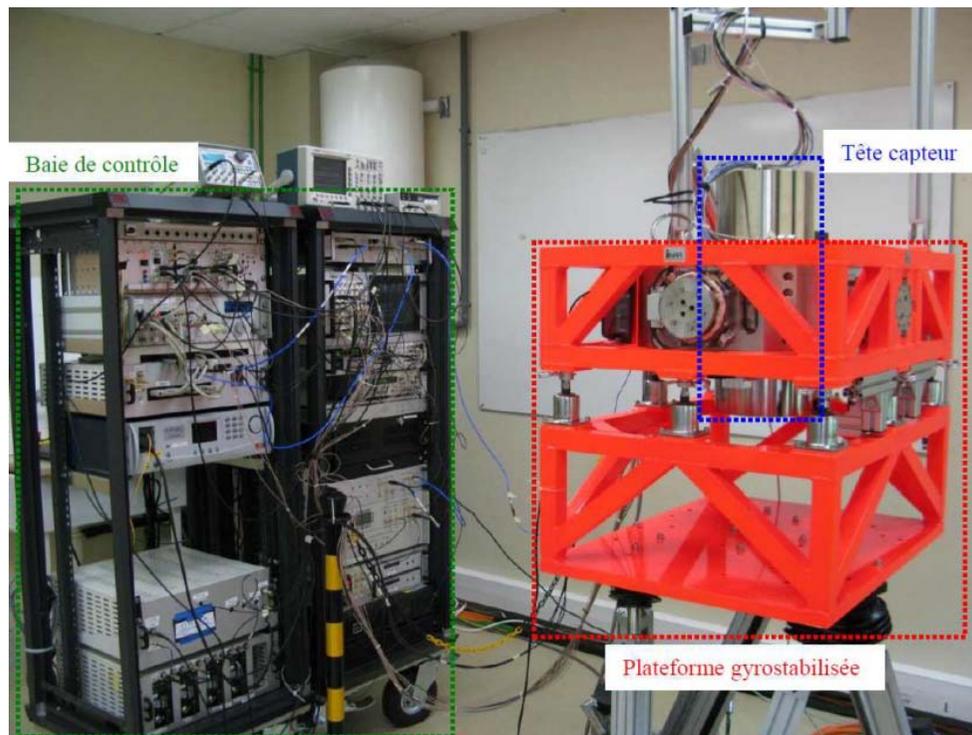
**ESA** - EUROPEAN SPACE AGENCY

**BGI** – INTERNATIONAL GRAVIMETRIC BUREAU



# CONTEXTE

- ✓ Développements instrumentaux ONERA en **gravimétrie atomique**
- ✓ Réalisation d'un **prototype opérationnel** d'instrument embarquable (GIRAFE)
- ✓ Instrument développé pour un **nouveau gravimètre marin** (Collab. ONERA, SHOM, DGA)
  - **Résultats inédits** à partir de **campagnes en mer**
  - **Fort potentiel** pour **des mesures aéroportées**



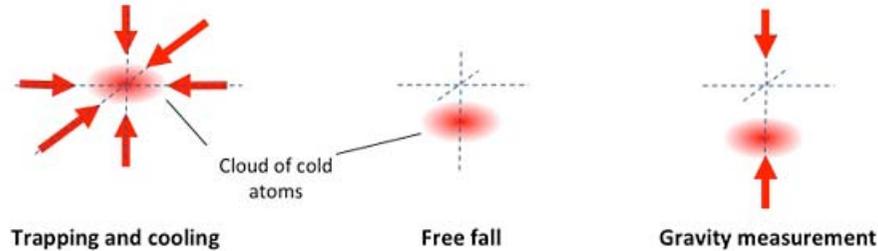
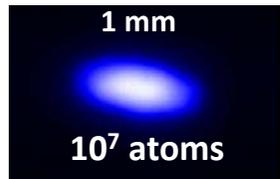
ONERA  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

SHOM

DGA

GIRAFE-2 en environnement laboratoire (ONERA)

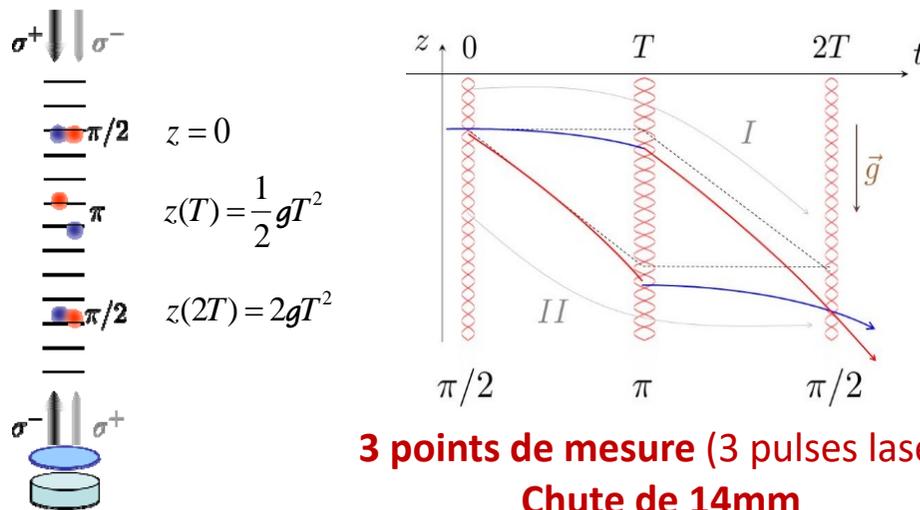
# PRINCIPE DE MESURE



## ☐ Chute dans le vide d'un nuage d'atomes soumis à l'action de la gravité

- ✓ Nuage d'atomes (87Rb) refroidi à 2 μK, divisé puis recombéné pendant la chute (piégeage, refroidissement et détection des atomes par laser)
- ✓ Propriété des ondes de matière (interféromètre atomique) pour mesurer le déplacement des atomes pendant la chute
  - Mesure d'un déphasage  $\Phi$  (proportion d'atomes dans les 2 états)

➤  $\Phi$  proportionnel à l'accélération des atomes dans la direction de propagation du laser ( $g$ )



**3 points de mesure (3 pulses laser)  
Chute de 14mm**

$$\varphi = k_{eff} g T^2$$

$$k_{eff} \approx \frac{4\pi}{\lambda}$$

$k_{eff}$  : effective wave vector associated to the Raman transition  
 $\lambda$  : laser wavelength  
 $T$  : time between the Raman laser pulses

# SYSTÈME DE MESURE

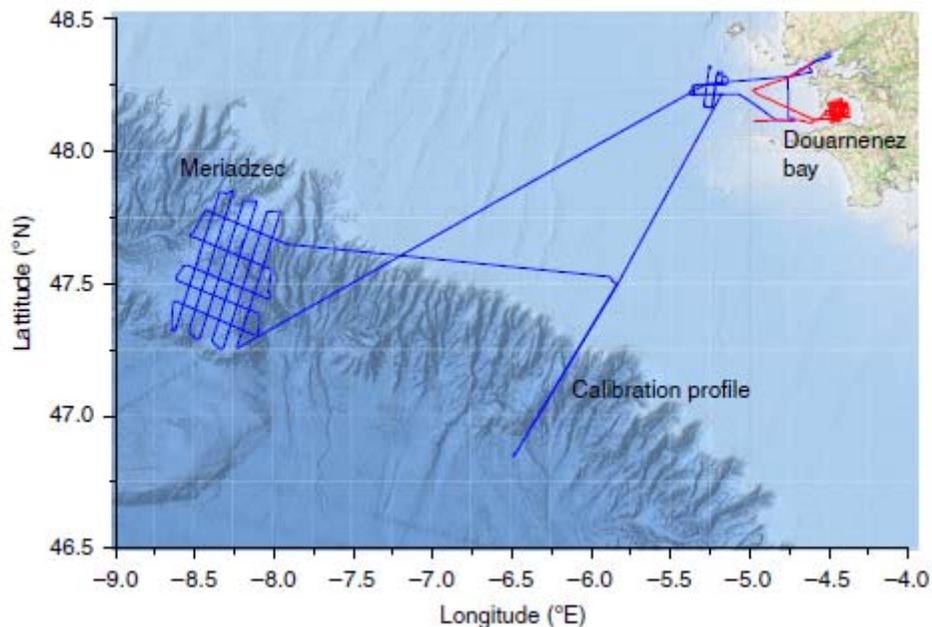
## □ Principales caractéristiques

- **Mesure absolue** : Pas d'étalonnage nécessaire, pas de dérive instrumentale
- **Mesure en continu** : Répétition de la séquence de mesure **10 Hz**
- **Capteur hybride** : Combine un accéléromètre classique (temps morts de mesure pour la préparation, refroidissement et détection des atomes)
- **Plateforme gyro-stabilisée** : Perte de signaux (alignement, rotation...)
- **Complexité instrumentale** : Laser, électronique, vide...

# PREMIERS TESTS EN MER

## □ Campagnes réalisées au large de Brest (Oct. 2015 et Jan. 2016)

- ✓ Collaboration ONERA / SHOM / DGA
- ✓ Intégration à bord du Navire Océanographique « Beutemps-Beaupré » (SHOM)



## □ Instrumentation embarquée

- ✓ GIRAFE (atomes froids)
- ✓ KSS32 (conventionnel à ressort)

## □ 3 objectifs

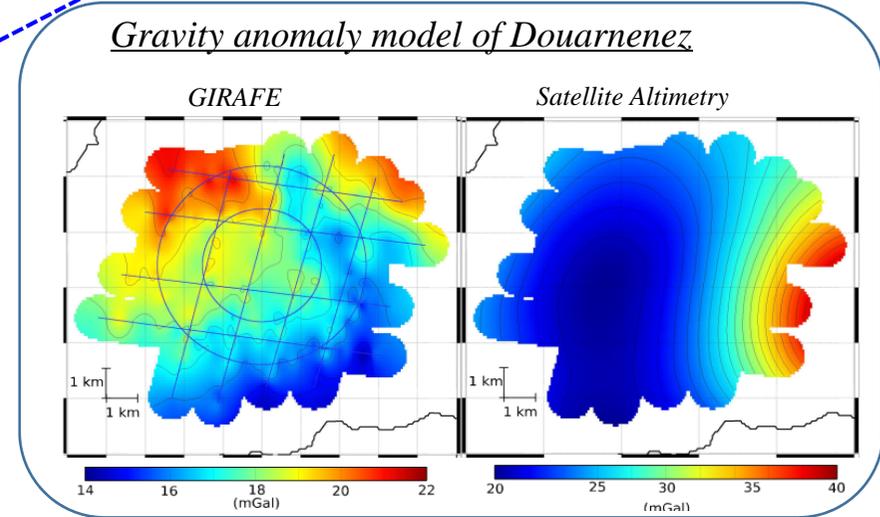
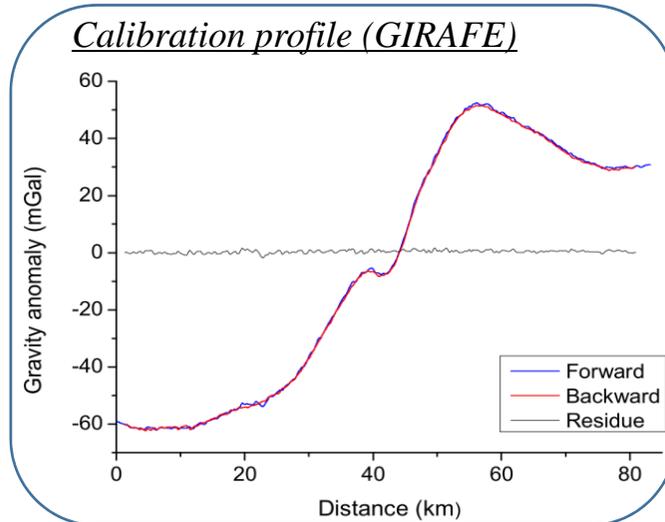
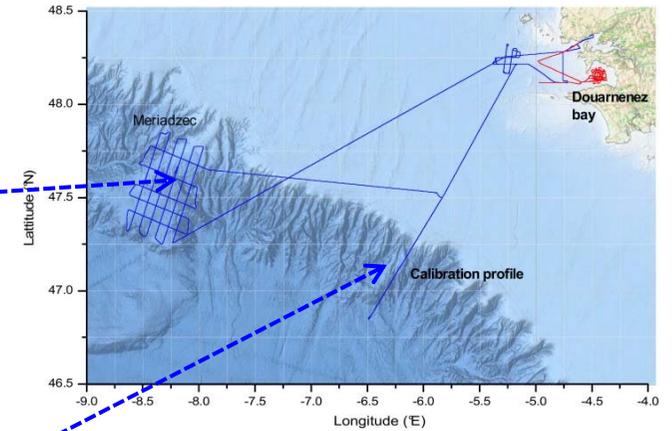
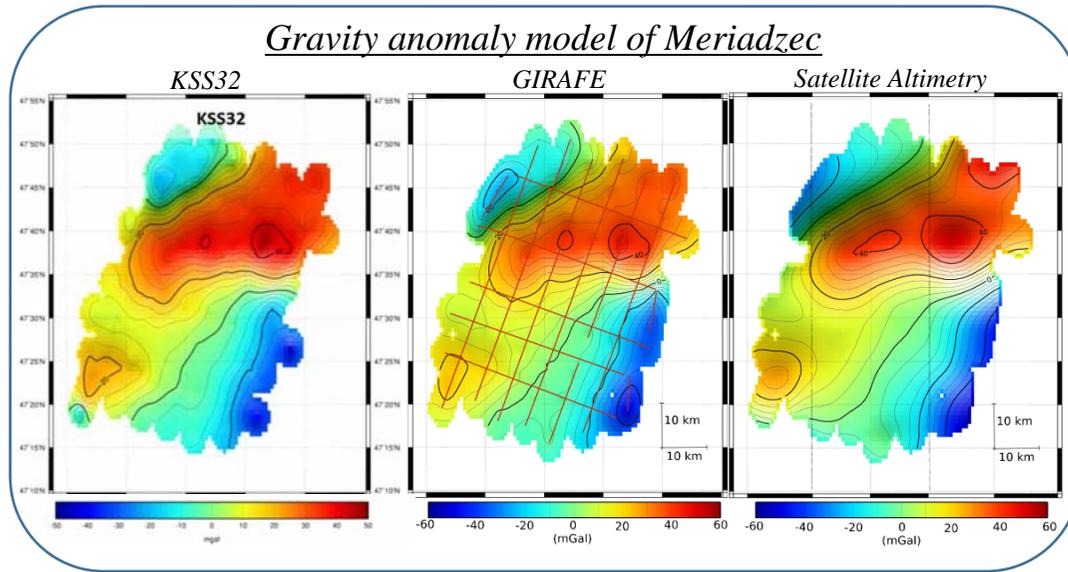
- ✓ Talus océanique (Meriadzec)
- ✓ Baie peu profonde (Douarnenez)
- ✓ Profil étalon de référence bateau

*Source : ONERA/SHOM*

# PREMIERS TESTS EN MER

Source : ONERA/SHOM, Bidel et al. (Nature Communications, 2018)

## Principaux résultats



# PREMIERS TESTS EN MER

Source : ONERA/SHOM, Bidel et al. (Nature Communications, 2018)

## □ Principaux résultats

			Atom gravimeter	Spring gravimeter
Calibration profile (9kn)	Forward - Backward	Mean	0.4	1.8
		Std	0.5	0.9
	Forward - Reference	Mean	-0.2	1.2
		Std	0.5	1.1
	Backward - Reference	Mean	-0.6	-0.5
		Std	0.3	0.6
Meriadzec (9 kn)	Crossing points difference	Error	0.9	1.0
Douarnenez Straight Profiles (9 kn)	Forward - Backward	Mean	0.1	0.1
		Std	0.2	0.8
	Crossing points difference	Error	0.4	1.0
Douarnenez Circular profiles (8 kn)	Crossing point difference with regular profile	Mean	-0.2	1.0
		Std	0.5	1.0
Douarnenez Circular profiles (11 kn)	Crossing point difference with regular profile	Mean	0.3	2.8
		Std	0.6	2.9

Systematically better precision for cold atom gravimeter

- Calibration errors and drift suppressed
- Higher precision of cold atom sensor
- Better gyro-stabilized platform

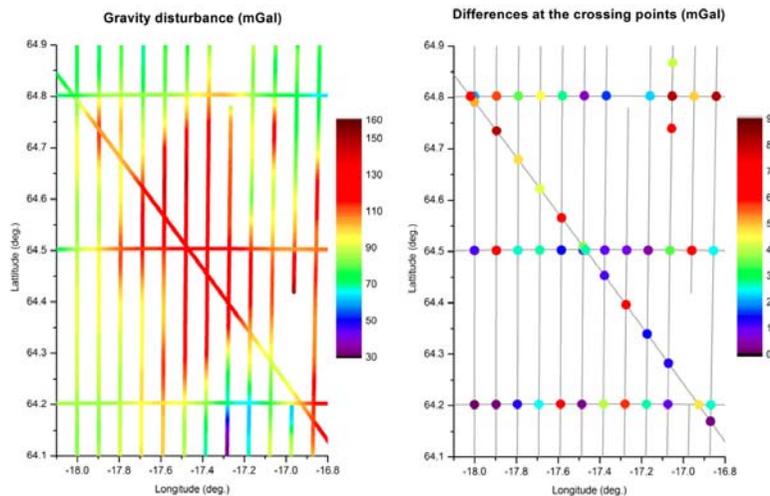
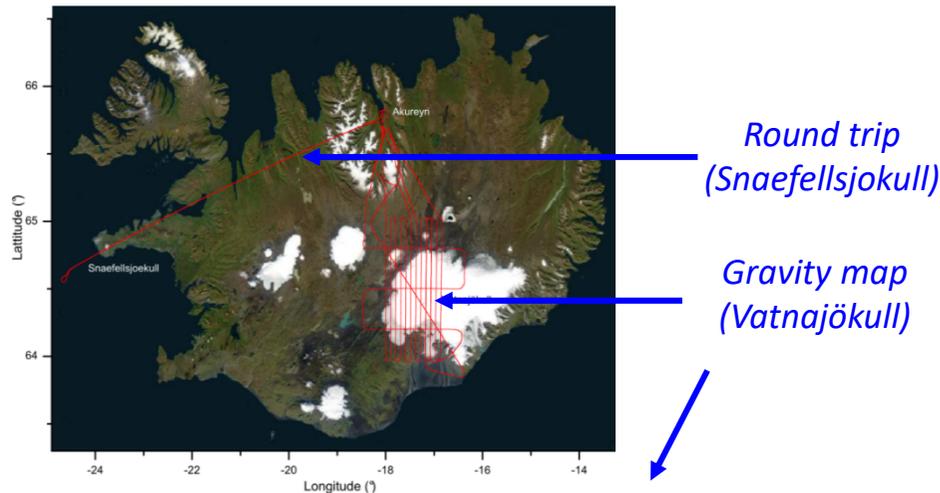
Atom gravimeter precision : 0.2 – 0.9 mGal

Spring gravimeter precision : 0.6 – 2.9 mGal

# PREMIERS TESTS EN VOL

## □ Campagne test en Islande (Avril 2017)

- ✓ Collaboration ONERA / ESA / DTU Denmark
- ✓ Opportunité d'un 1er test aéroporté - Intégration réussie à bord d'un Twin Otter DHC-6



- Cartographie d'une région volcanique et glacier
- Estimation erreur (cross-over error) : **2,8 mGal**

*Source : ONERA/DTU, Bidet et al. (Physics.App., 2019)*

# PROJET AIRGRAVI / SAFIRE (AVRIL-MAI 2019)

## ❑ Objectifs

- ✓ **Evaluer les capacités de l'instrument** (zones côtières et zones montagneuses)
  - **2 zones retenues (Golfe de Gascogne, Pyrénées)**
- ✓ **Comparer les performances avec des instruments de référence** en gravimétrie aéroportée (2 instruments mis à disposition par le DTU)
  - **1 gravimètre dynamique TAGS (LaCoste & Romberg)**
  - **1 gravimètre inertiel IMU (IMAR)**
- ✓ **Quantifier la précision et la répétabilité sur un profil de référence mesuré en mer**
  - **Réitération du profil de référence « SHOM » mesuré au large de Brest**

❑ **Financement** : CNES, ESA, labos impliqués (~30h de vol)

❑ **Programmation** : 15 – 30 Avril 2019

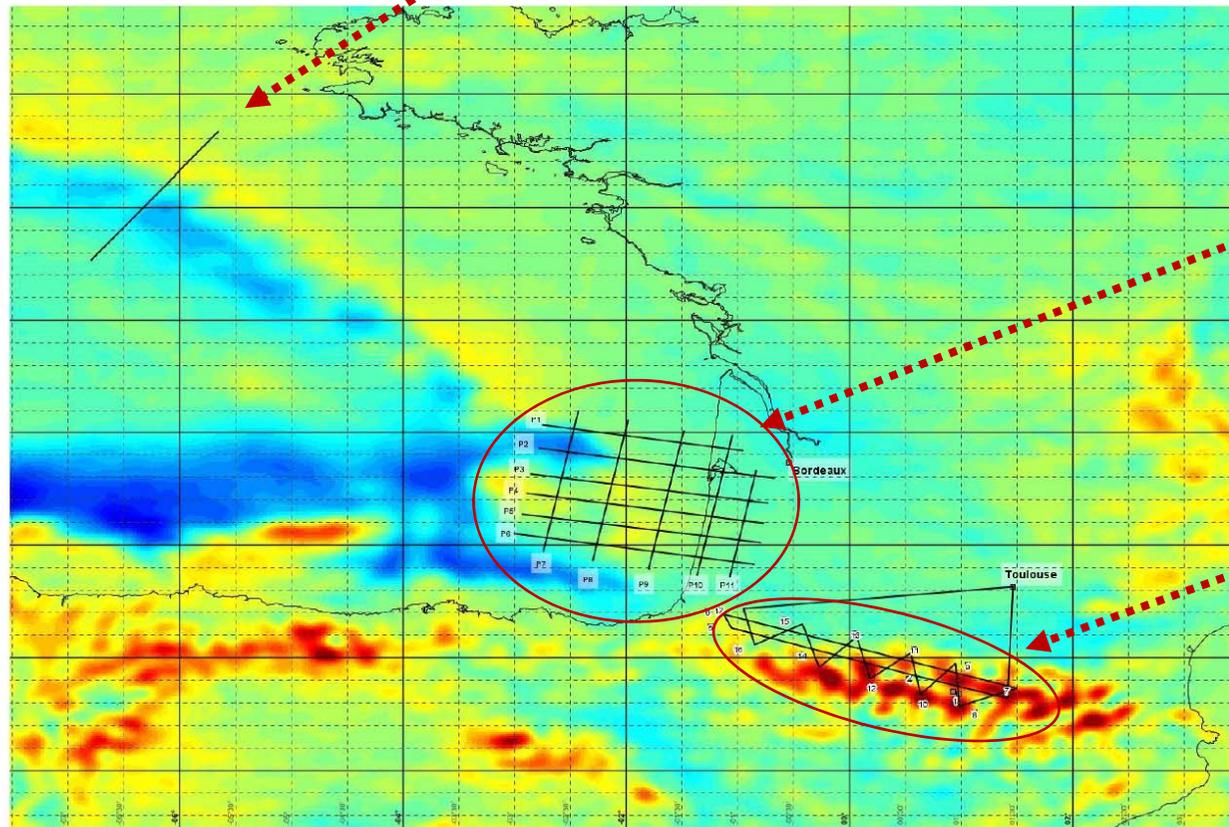
- ✓ Flotte SAFIRE (1<sup>ère</sup> campagne pour la Terre solide)
- ✓ Appareil ATR-42 (vitesse de vol, encombrement)



# CAMPAGNE SAFIRE (AVRIL-MAI 2019)

## □ Plan de vol préliminaire

Réitération du profil de référence  
(profil étalon mesuré en mer)



**Levé 1**

Transition terre-mer  
(Gascogne-Aquitaine)

**Levé 2**

Zone montagneuse  
(Pyrénées)

Free-air anomaly (global model)

# CAMPAGNE SAFIRE (AVRIL-MAI 2019)

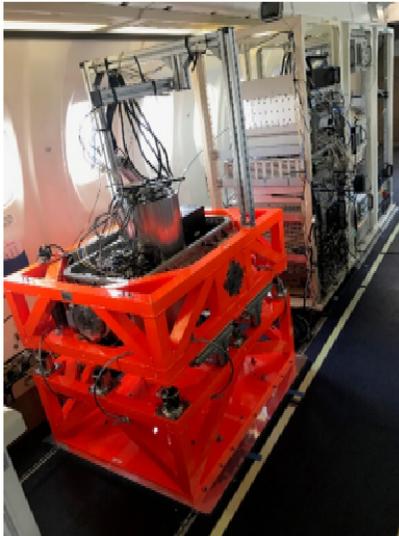
ATR42 (SAFIRE)



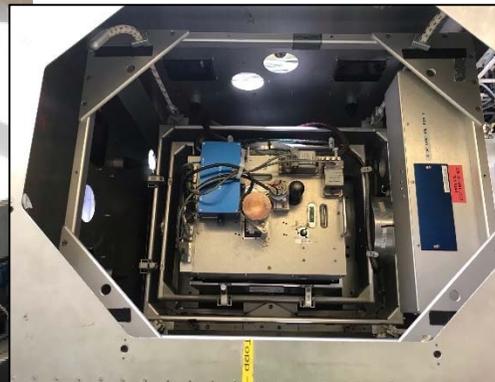
A10 (MGL)



GIRAFE (ONERA)



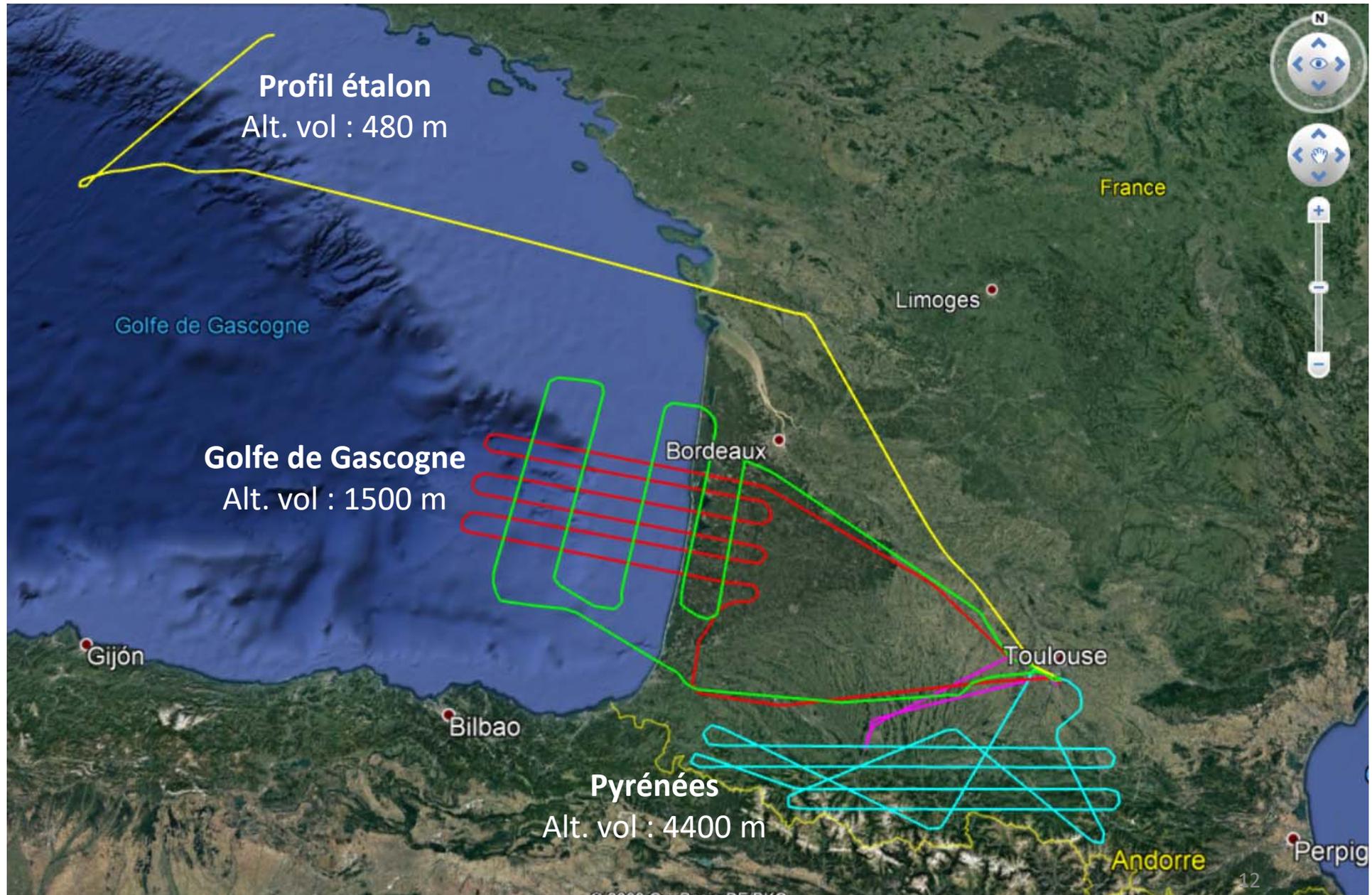
TAGS/LCR (MGL)



Strap-down IMU (IMAR)



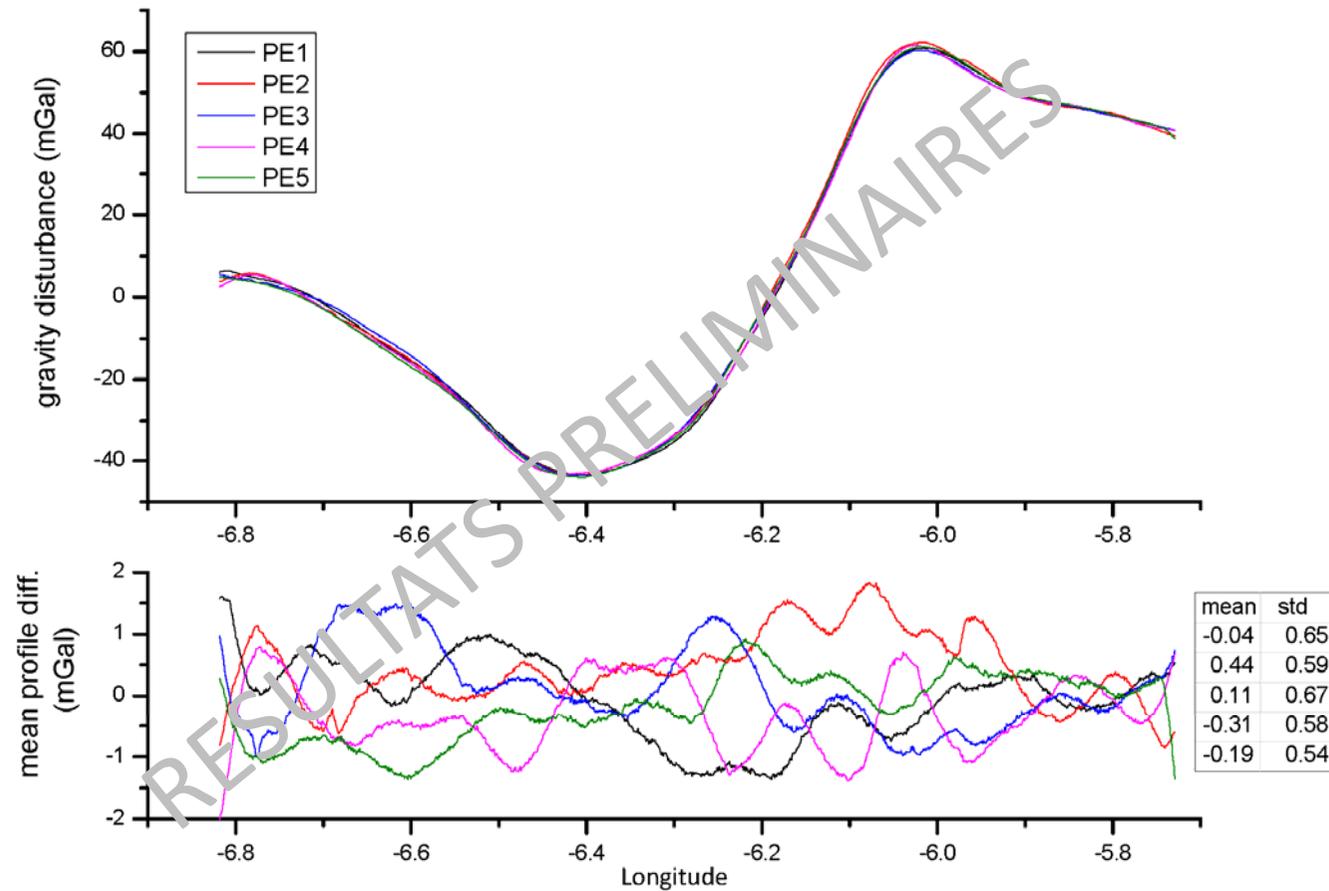
# CAMPAGNE SAFIRE (AVRIL-MAI 2019)



# 1. RÉITÉRATION PROFIL ÉTALON

Profil étalon (alt. vol 450m)

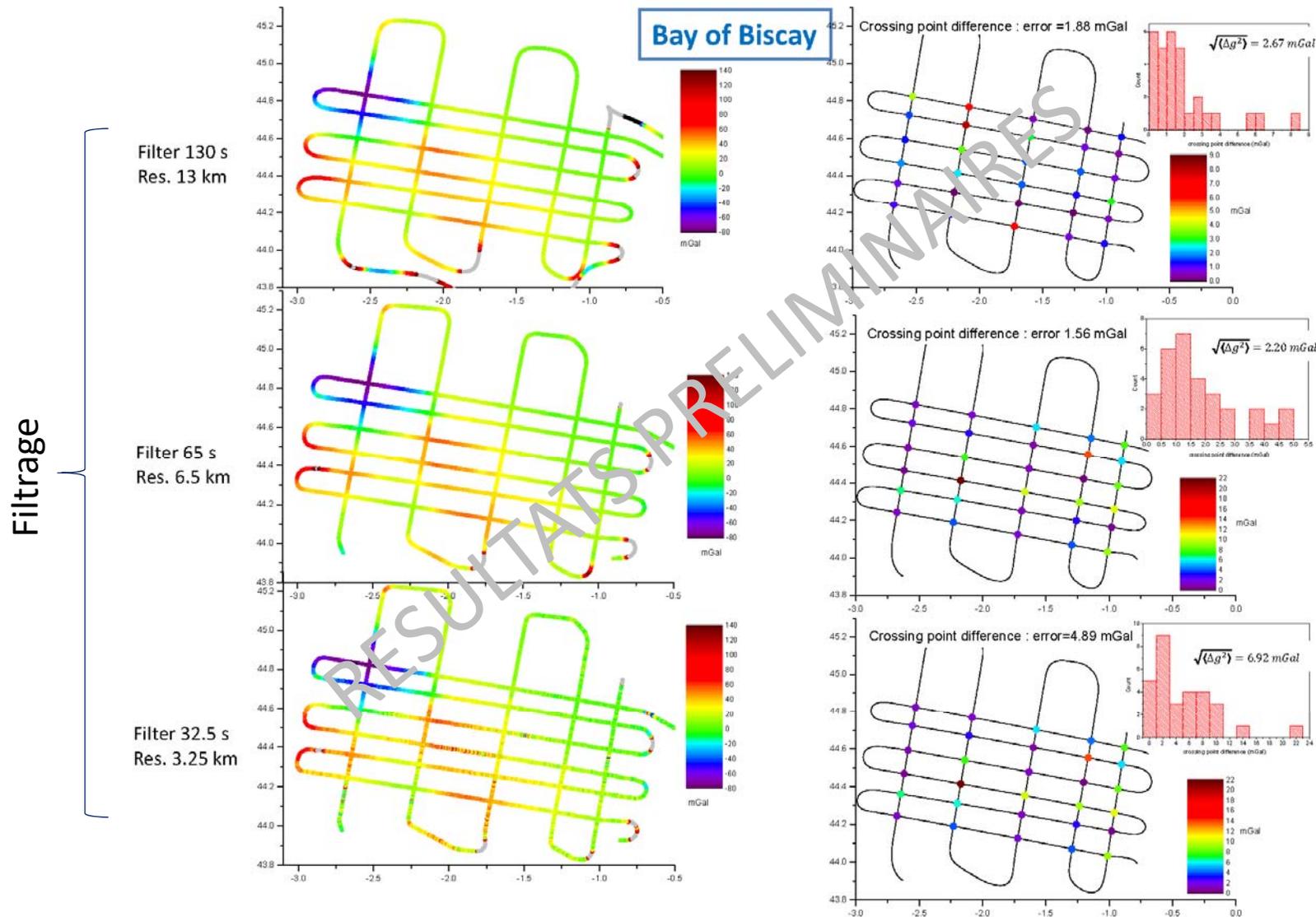
Profile etalon (filter 130 s, res.13 km)



- ✓ **5 trajets (A/R)** sur le profil étalon
- ✓ Filtrages 32.5 à 130 sec ( $\lambda$  : 3.5 ; 6.5 ; 13 km)
- **Résidus de 4.9 mGal à 0.6 mGal**

## 2. CROSS-OVER ERROR

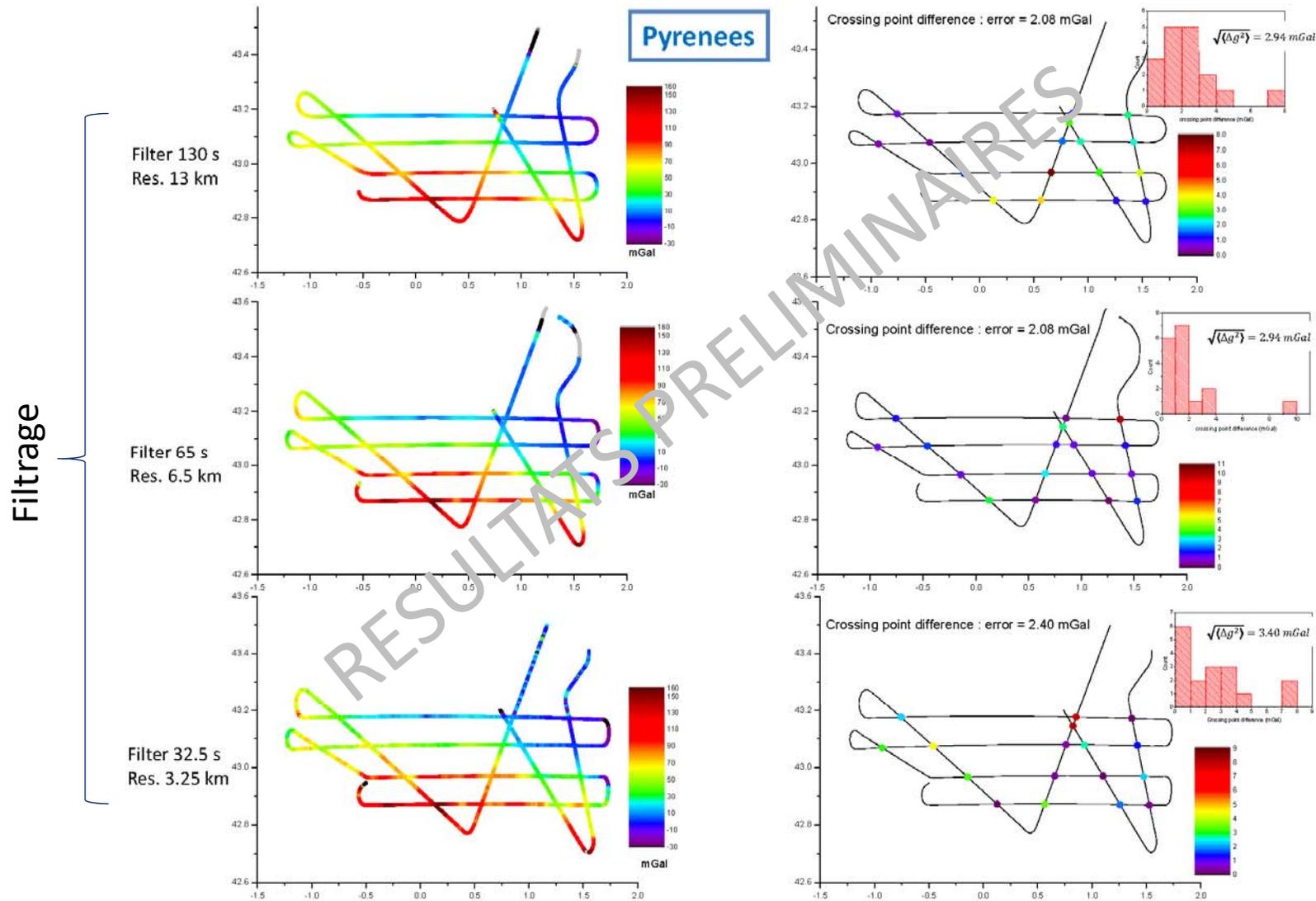
Golfe de Gascogne (alt. Vol 1500m)



✓ Filtrages 32,5 à 130 sec → **COE de 4.9 à 1,9 mGal**

## 2. CROSS-OVER ERROR

Pyénées (alt. vol 4400m)



✓ Filtrages 32,5 à 130 sec → **COE de 2.4 à 2.1 mGal**

## 2. CROSS-OVER ERROR

Summary :

Estimated precision of GIRAFE airborne gravimetry measurements

Resolution	Bay of Biscay	Profile etalon	Pyrenees
3.25 km (32.5s)	4.9	4.0	2.4
6.5 km (65s)	1.6	1.0	2.1
13 km (130s)	1.9	0.6	2.1

Units : mGal

The spatial resolution is given by the low pass filter time constant used in the data processing and the plane velocity

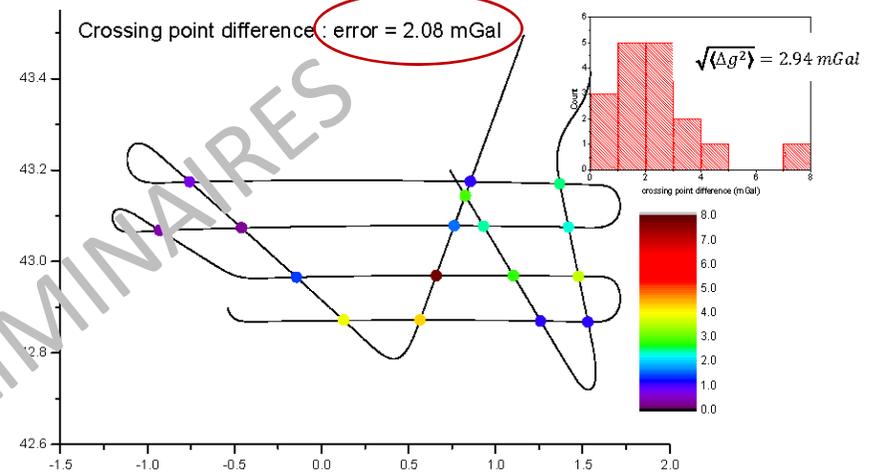
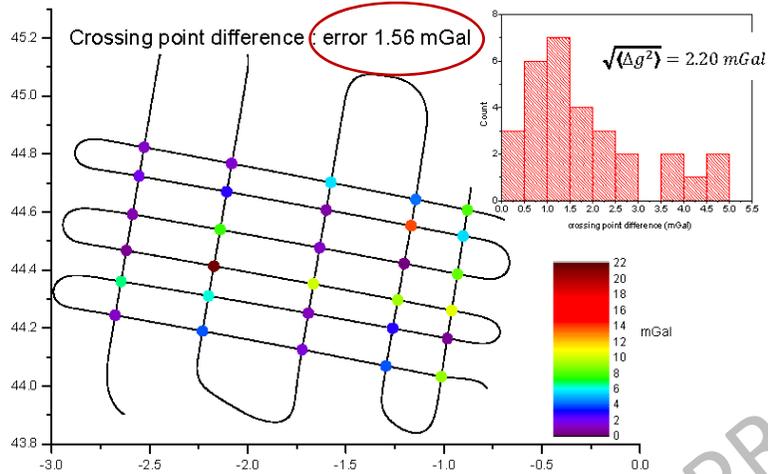
During 2017 Iceland airborne campaign, we obtained measurement precisions ranging from 1.7 to 3.9 mGal for 130 s filter constant (resolution = 11 km)

# 3. COMPARAISON IMU

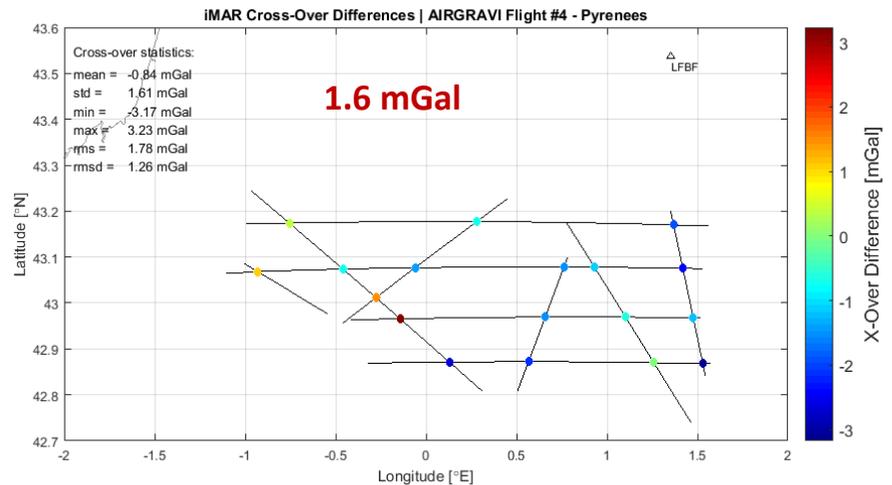
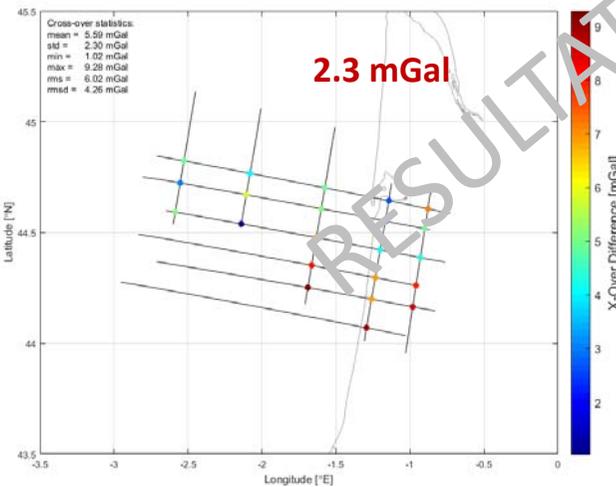
## Golfe de Gascogne

## Pyrénées

Girafe-2

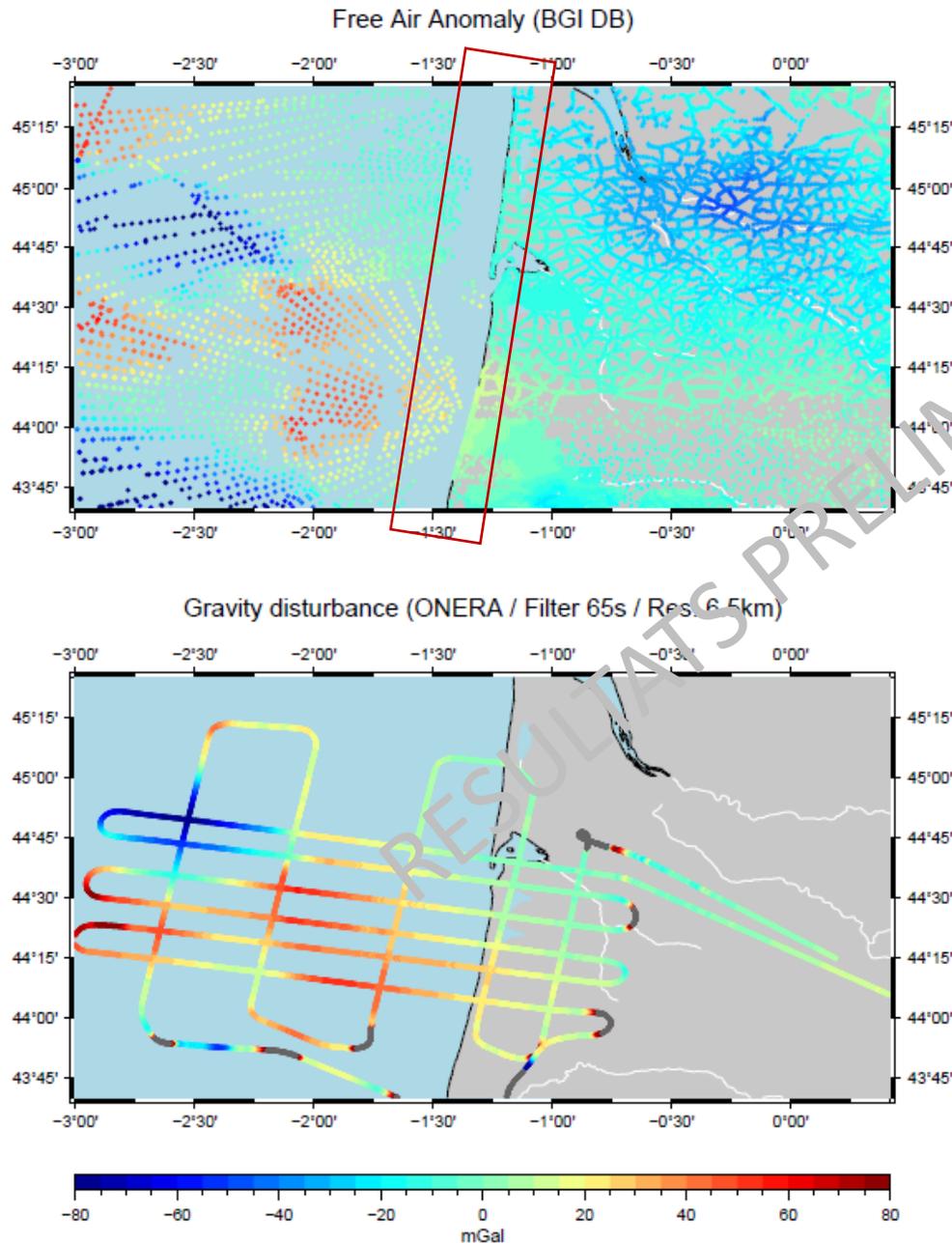


IMU



- Précisions comparables [1.5 – 2.5] mGal
- Girafe-2 : Sensibilité moins forte aux girations

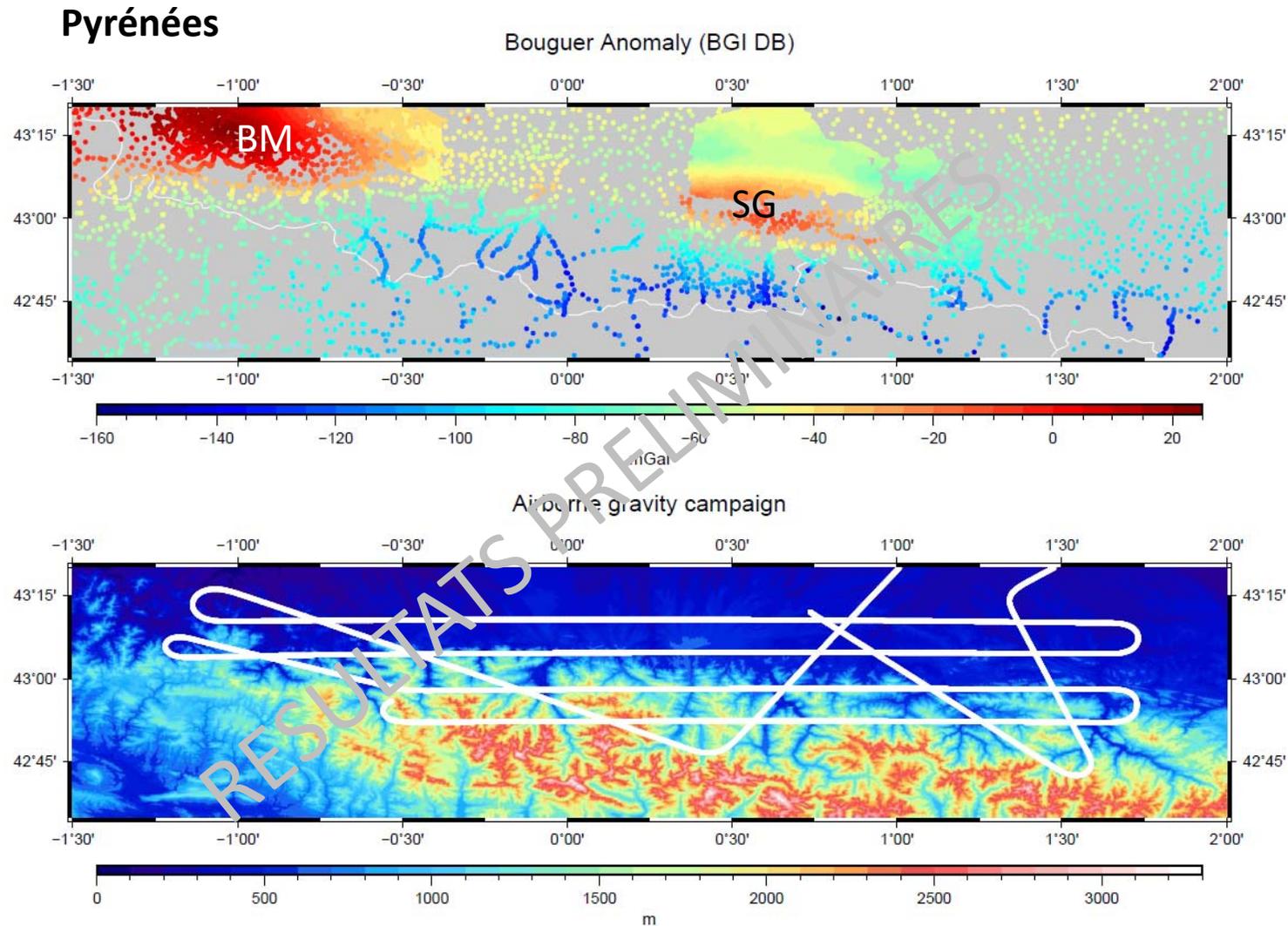
## 4. COMPARAISON DONNÉES SOL



### Golfe de Gascogne

- ✓ Synthèse mesures terrestres et marines (BGI database)
- Dynamique des signaux [-80 ; 80] mGal
- ✓ Principales structures : Plateau des Landes ; Canyons ; Bassins
- Cartographie **Transition Terre – Mer**
- **Recalage** campagnes relatives terrestres et marines

## 4. COMPARAISON DONNÉES SOL



- ✓ Transition plaine-montagne
- ✓ Dynamique des signaux [-150 ; 20] mGal
- ✓ Anomalies gravimétriques BM et SG

# CONCLUSIONS / PERSPECTIVES

## □ Bilan des campagnes de mesures

- ✓ **1ères expériences de mesures dynamiques de gravimétrie absolue (leadership)**
- ✓ **Précision au moins égale voire supérieure** aux instruments conventionnels
- ✓ Potentiel pour la cartographie des **zones marines peu profondes** (non accessibles aux satellites altimétriques) ou des **zones montagneuses**
- ✓ Forte complémentarité avec mesures de surface et satellites

## □ Perspectives pour la communauté scientifique (dont RESIF/EPOS)

- ✓ **Enjeu majeur pour l'étude littorale** (imagerie géophysique des zones côtières ; continuité Terre-Mer) et **régions peu accessibles**
- ✓ **Enjeu pour études crustales** (couverture des longueurs d'onde moyennes vers 20 à 200 km et **le référencement absolu de données relatives** à l'échelle régionale)
- ✓ Technologies à l'étude pour de  **futures missions spatiales** (intérêt CNES, ESA..)
- ✓ **GIRAFE** : optimization nécessaire (malgré un niveau TRL déjà élevé) pour une instrumentation opérationnelle (projet H2020 déposé en 2019 – non financé)