



École d'Été 2010 du GRGS



GRAVIMÉTRIE MARINE

*Marie-Françoise Lalancette/ Didier
Rouxel*

SHOM

marie-francoise.lalancette@shom.fr

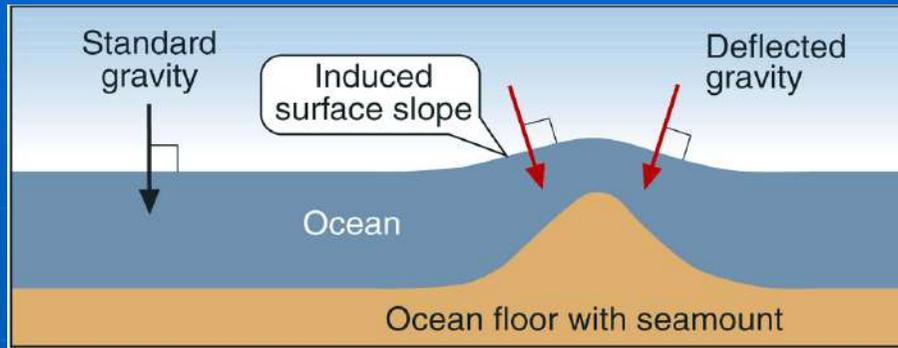
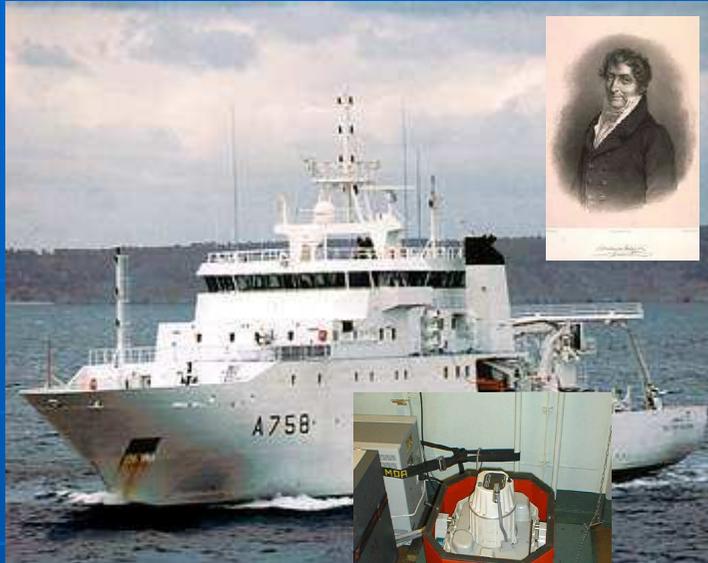


Figure : effects of a gravimetric anomaly

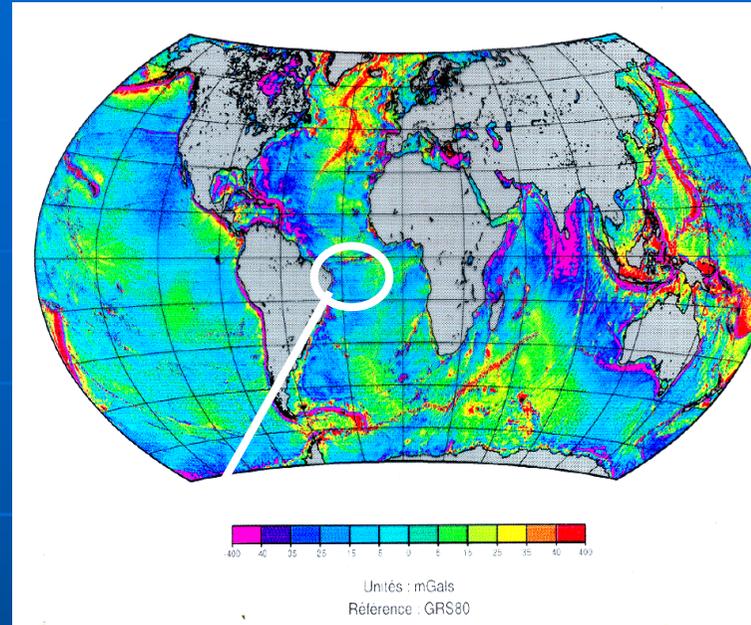
problématique

Comment mesurer la pesanteur sur les océans?

- Satellites gravimétriques → modèles Basse Résolution
- Satellites altimétriques → modèles Moyenne Résolution
- Mesures marines ou sous-marines → modèles Haute Résolution



En France:
Beautemps-Beaupré
Pourquoi-Pas?
L'Atalante
Le Marion Dufresne



???

Etude topographique, géodynamique, géologique, hydrographique



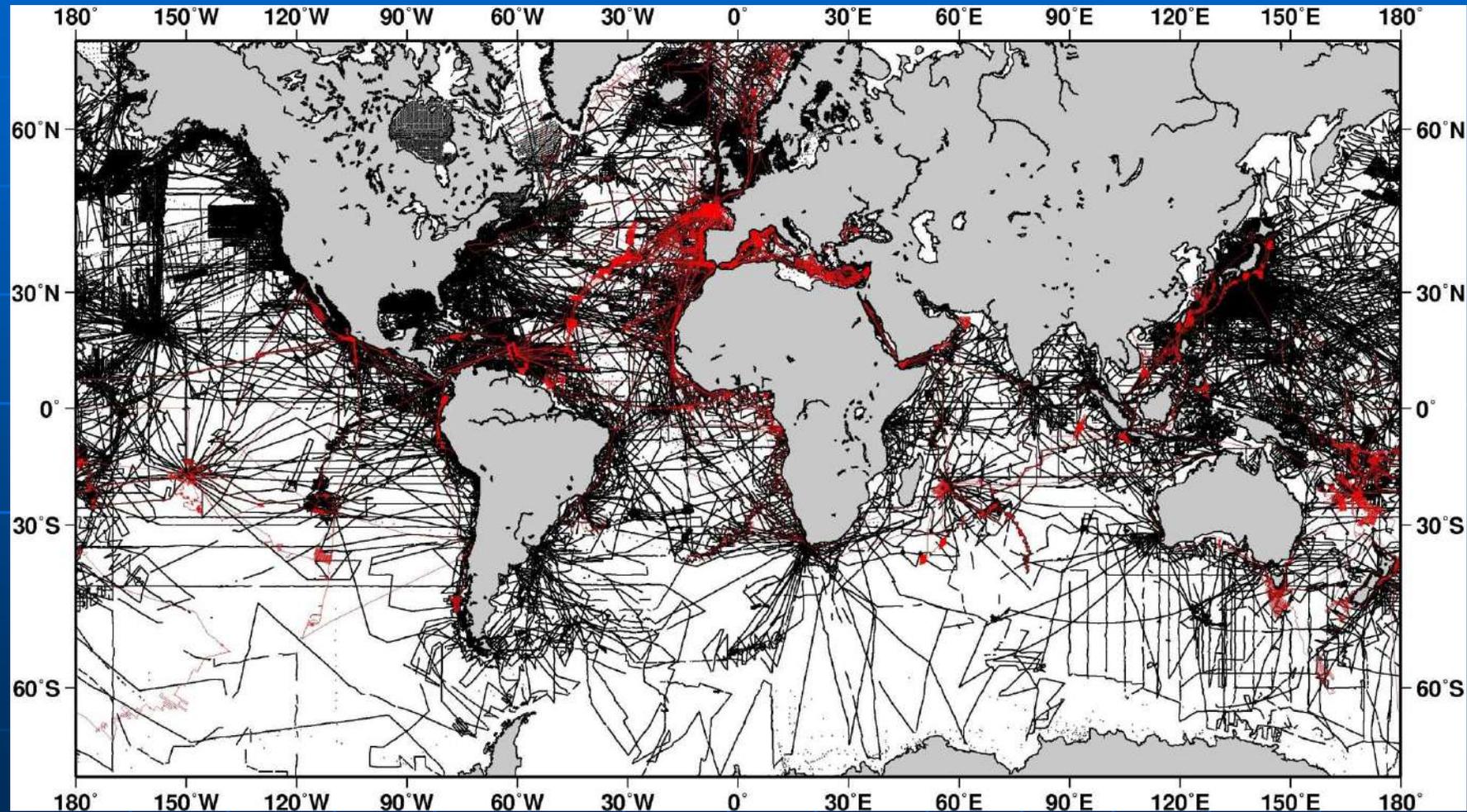
Coût d'un N/O → 50 k€



Campagne multi-capteur → contraintes ++

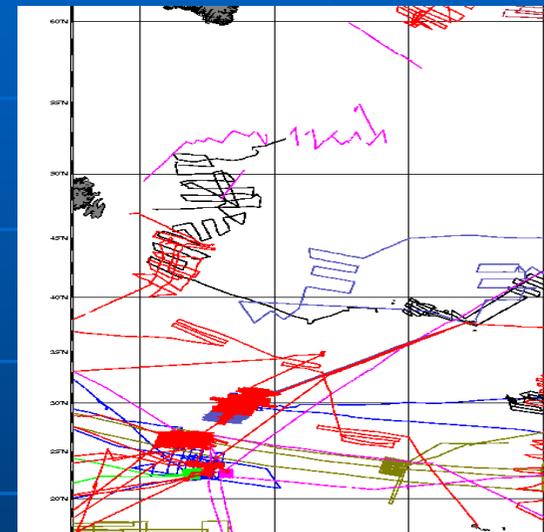
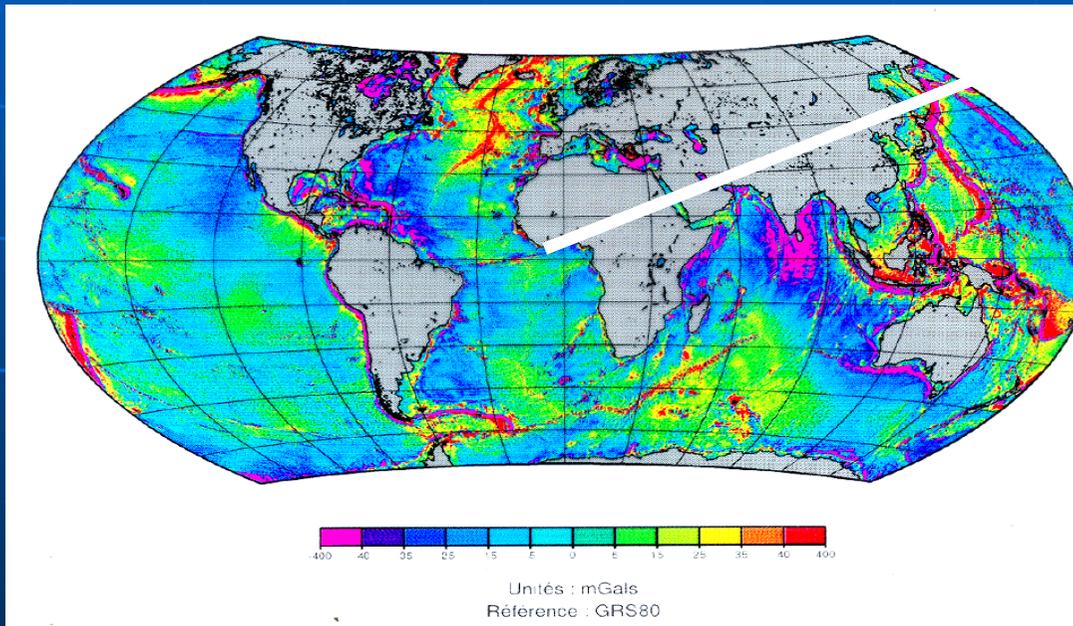
Bureau Gravimétrique International

☐ Mesures gravimétriques (relatives) marines



Mesures gravimétriques marines
(10,5 millions de points)

Stratégie « économe » et pragmatique
Les mesures gravimétriques en mer: → améliorer le modèle global
Issu des mesures satellitaires



Les mesures gravimétriques en mer

Le Beautemps-Beaupré



KSS3
1



Acquisition
en mer

L'Atalante (Ifremer, BGM5)
Le Marion-Dufresne, (IPEV, Lacoste)

Le Pourquoi-pas?

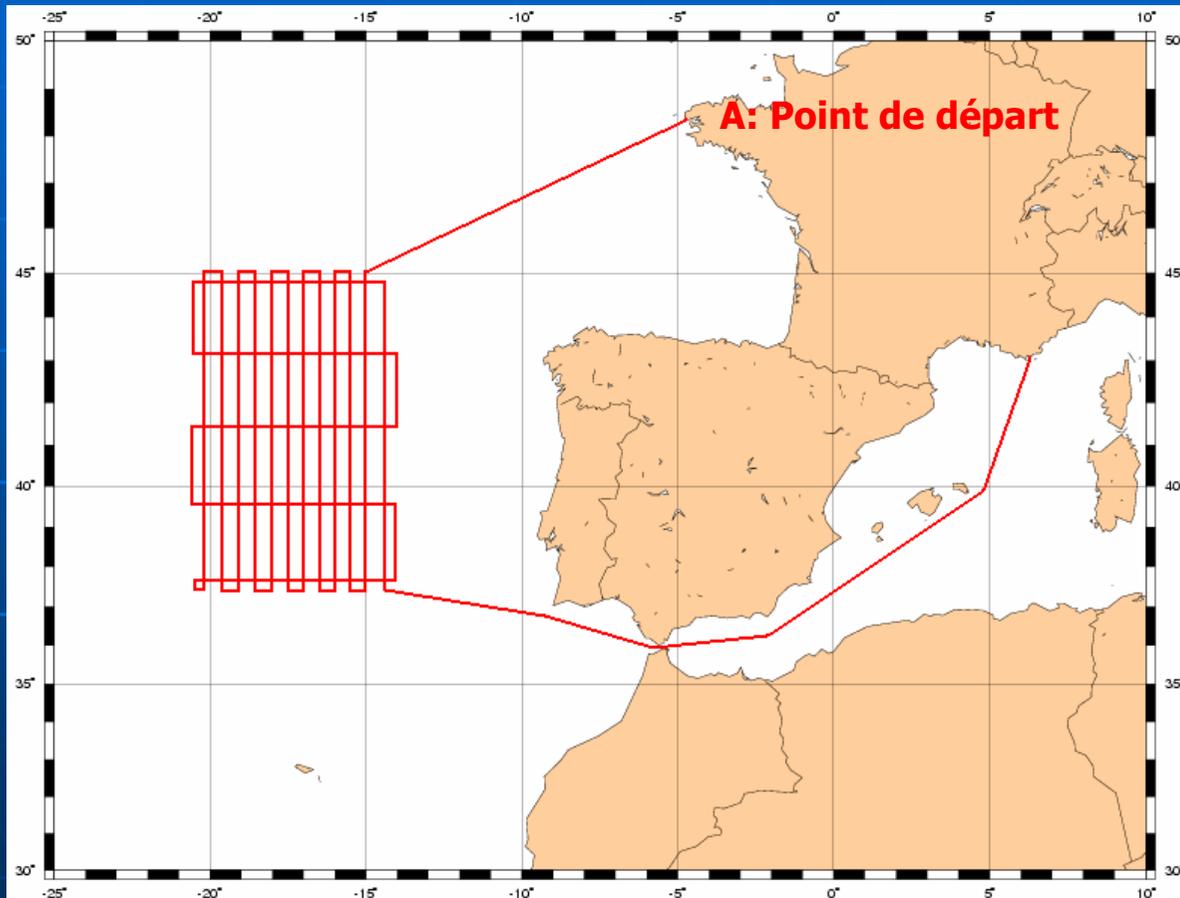


KSS3



A terre: gravimètre
Scintrex

Déroulement d'un levé gravimétrique



- Les capteurs
- La méthodologie
- Les traitements

Les capteurs: gravimètres relatifs → 1 marin + 1 terrestre

Un exemple: KSS31 (Bodenseewerk)
Scintrex



Problématique

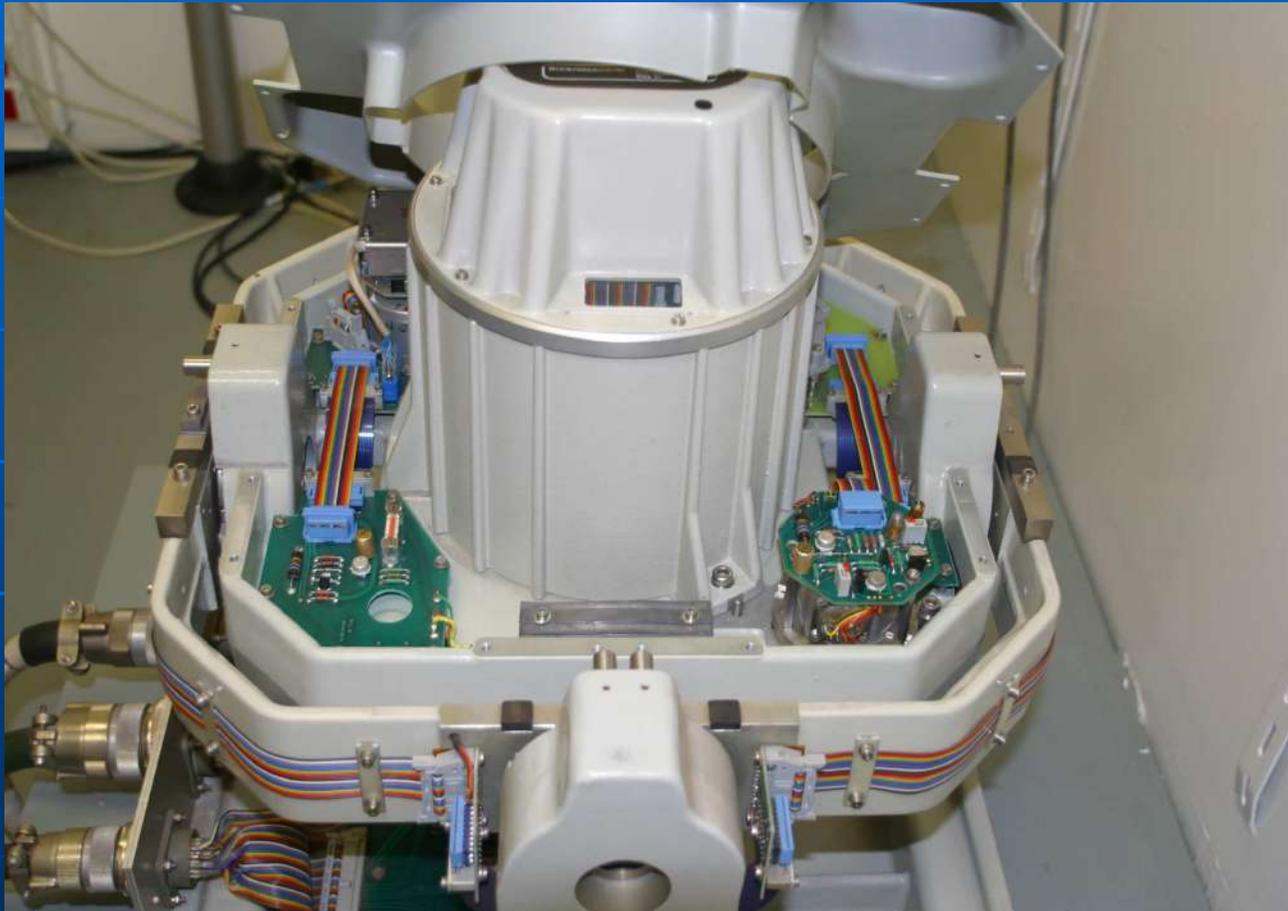
Mesures réalisées en continue sur un bâtiment en mouvement

Accélérations parasites liées au mouvement du navire (roulis, tangage et pilonnement) et à son mouvement relative par rapport de la terre

Systeme constitué de 3 parties distinctes :

- Capteur de pesanteur GSS30
- Plate forme gyro-stabilisée KT30
(compensation des effets parasites
- asservissement à la verticale)
- Électronique de contrôle ZE30

Le gravimètre marin KSS31



Ce gravimètre est constitué d'un capteur de pesanteur à ressort GSS30, placé sur une plate forme gyro-stabilisée KT30.

Le gravimètre est installé au point tranquille du bâtiment (point d'intersection entre les axes de roulis et tangage).

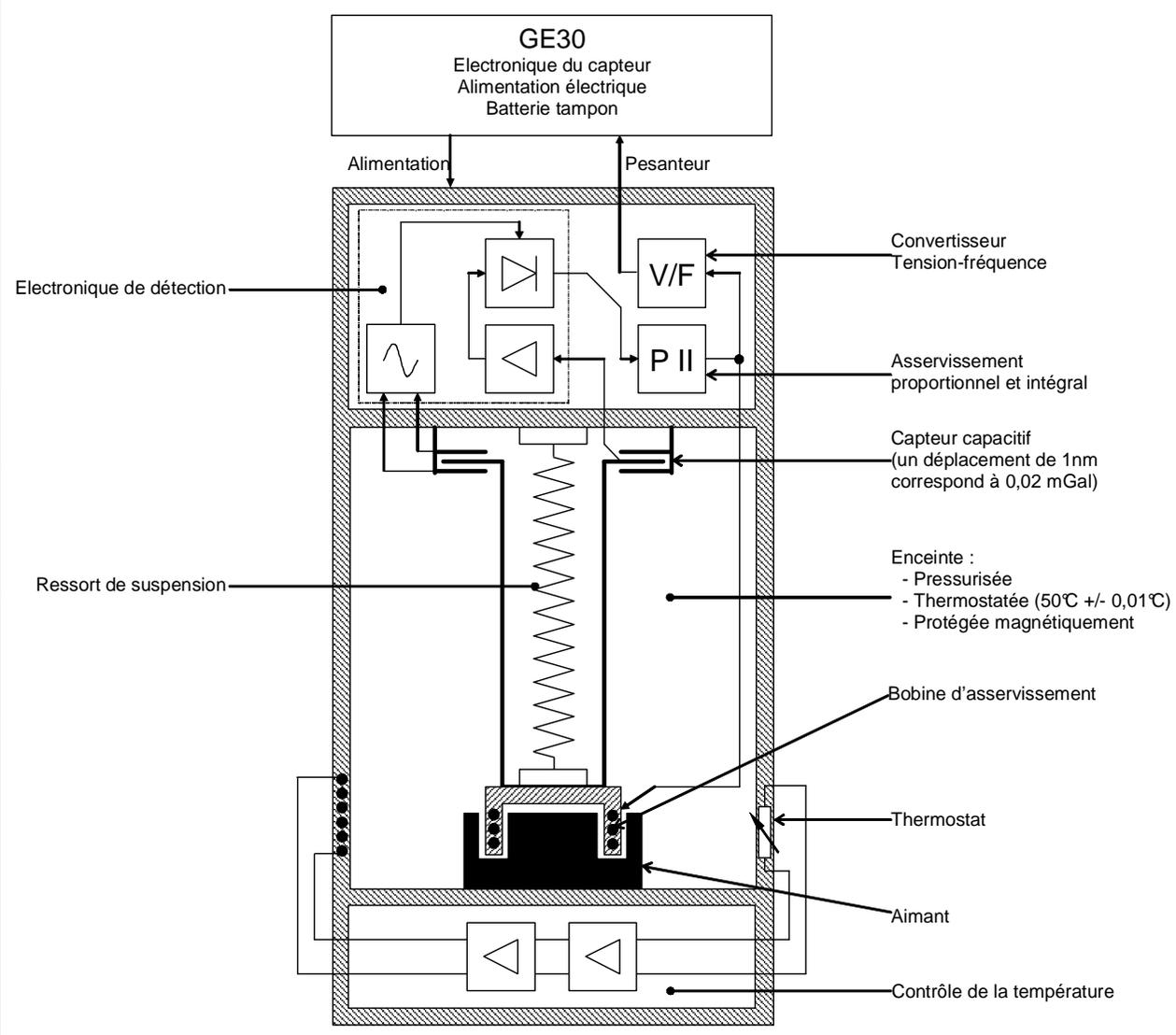
La plate-forme gyro-stabilisée est asservie de manière à maintenir le ressort en permanence à la verticale.

Un filtrage des données mesurées par le gravimètre permet de réduire l'effet des accélérations du bâtiment.

Systeme capteur + plateforme



Le capteur gravimétrique GSS30



Plateforme gyro-stabilisée KT30

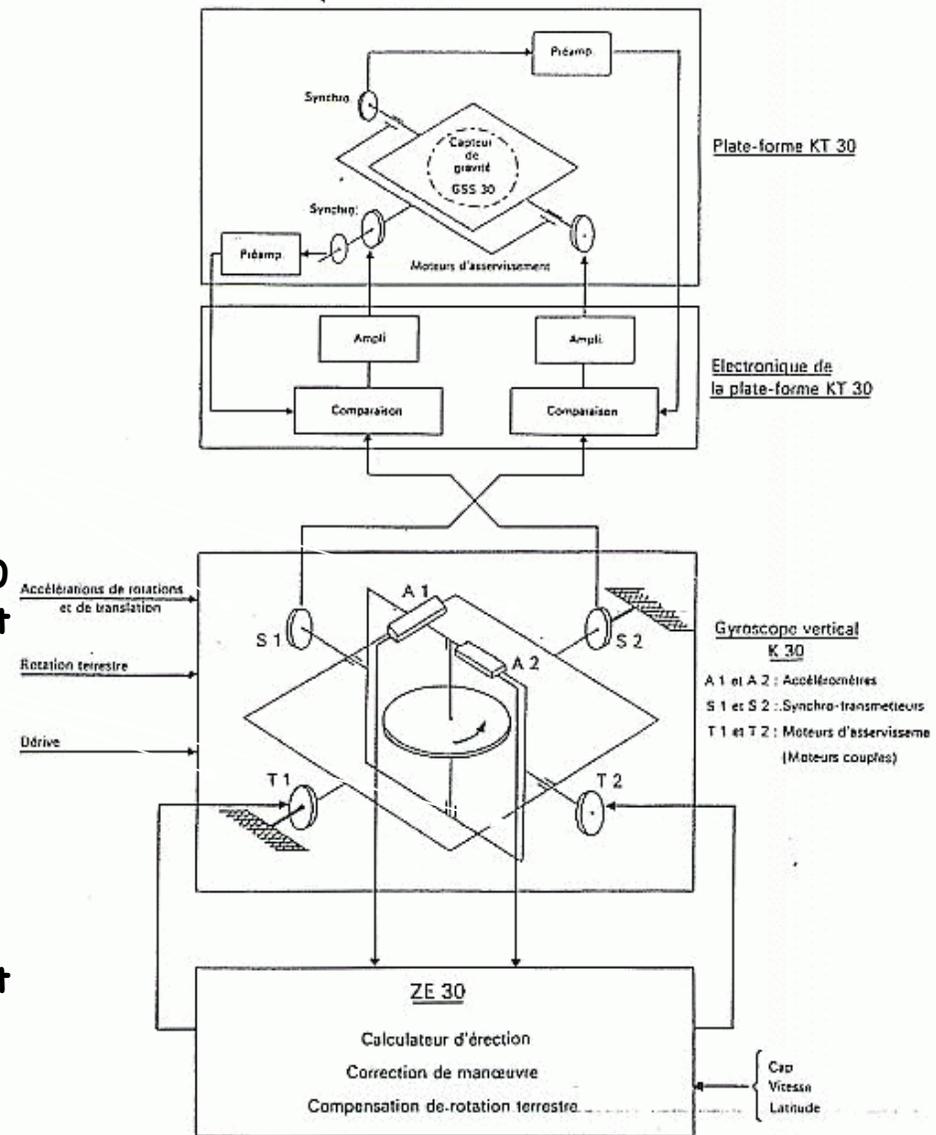
- Asservissement du capteur à la verticale par un gyroscope
- Compensation des effets de roulis, tangages et des évolutions du navires

Mouvements horizontaux (angle) mesurer par 2 synchro-transmetteurs (roulis et tangage)
 Signaux correspondants envoyés vers la ZE30
 ZE30 commande les moteurs d'asservissement de la plateforme

Accélérations parasites (rotation de la terre et évolution du navire) calculées en fonction du cap, vitesse et latitude par la ZE30

ZE30 commande les moteurs d'asservissement de la plateforme

FONCTIONNEMENT DE LA STABILISATION EN VERTICALE



Le Gravimètre KSS31

- Caractéristiques du système capteur + plateforme

⋮

Dimension : 52x52x69 (cm³)

Poids : 72 kg

Précision : de 0.5 à 2.5 mGal (suivant l'état de la mer)

Dérive inférieure à 3 mGal/mois

Range de mesure : 10000 mGal

Enceinte thermostatée : $15^{\circ}\text{C} < T^{\circ} < 30^{\circ}\text{C}$

Liberté de la plateforme : +/- 40°

Le Gravimètre KSS31

- ⇒ Tests instrumentaux : (nivellement de la plateforme - bulle parabole, test de la bille : contrôle de la bonne marche du capteur par la mesure de la variation de pesanteur associée à l'ajout d'une masse additionnelle sur le capteur).
- ⇒ **Estimation et contrôle du facteur de calibration ($Dg=kGV$)**
Facteur de calibration permet d'exprimer les mesures faites par le gravimètre en valeurs exprimées en mGal. Le facteur de calibration est estimé en labo par le constructeur et doit être vérifié régulièrement.
- ⇒ Estimation de la dérive
- ⇒ **Rattachement**

Estimation du facteur de Calibration: k

(SHOM)

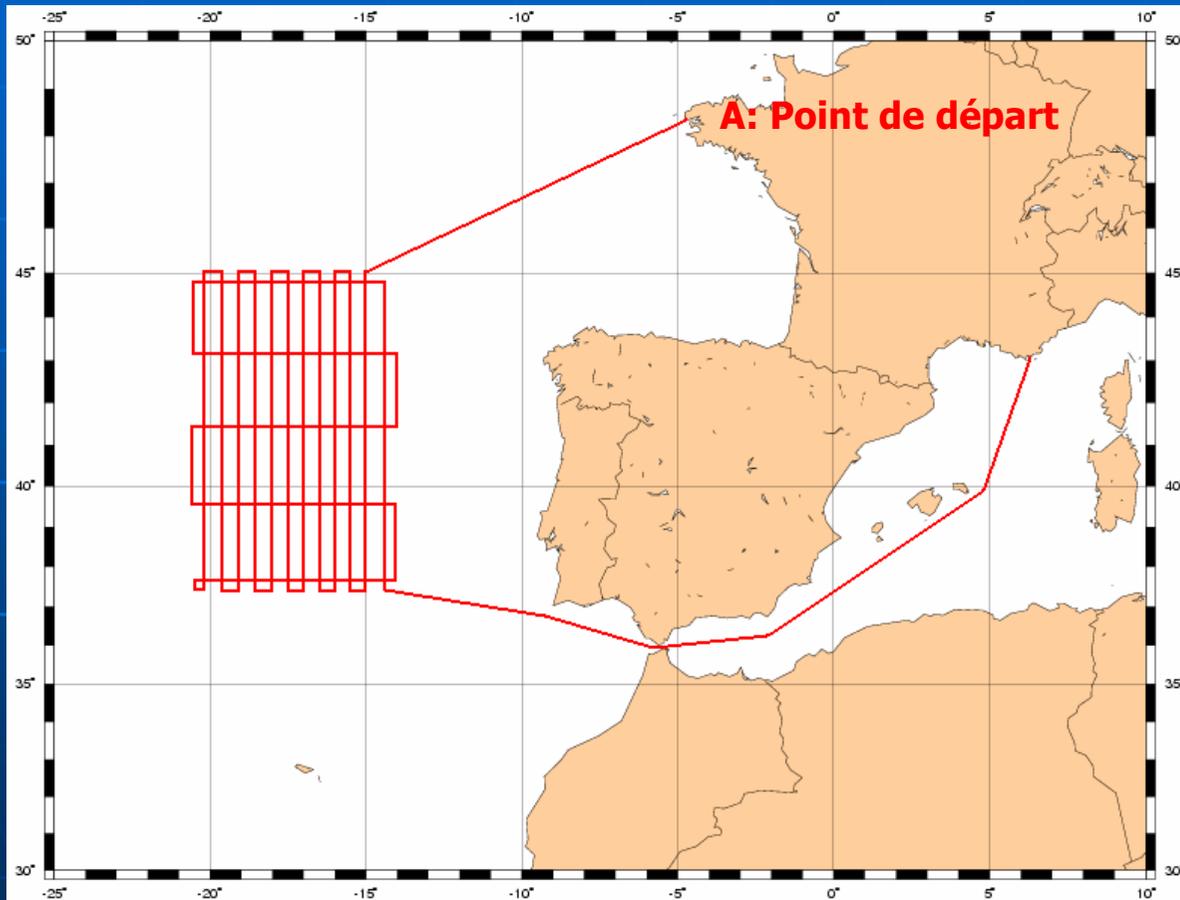
Évaluer entre deux points présentant des Δg et ΔL suffisamment important
Exemple: entre La Réunion et Brest

(IFREMER)

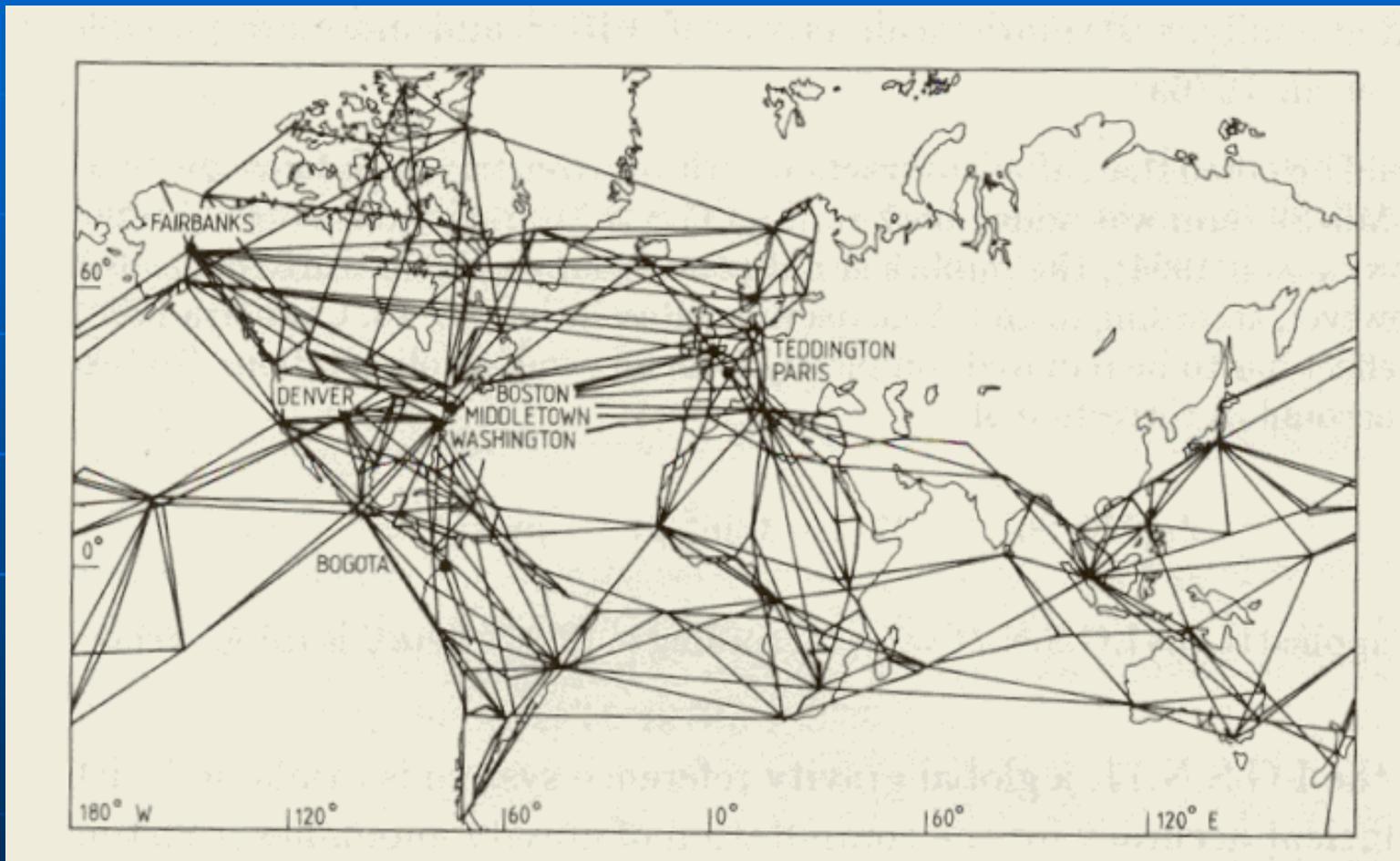
Ajuster une droite au sens des moindres carrées sur (g-GV) et stations

(voir diapos sur g-GV)

Déroulement d'un levé gravimétrique



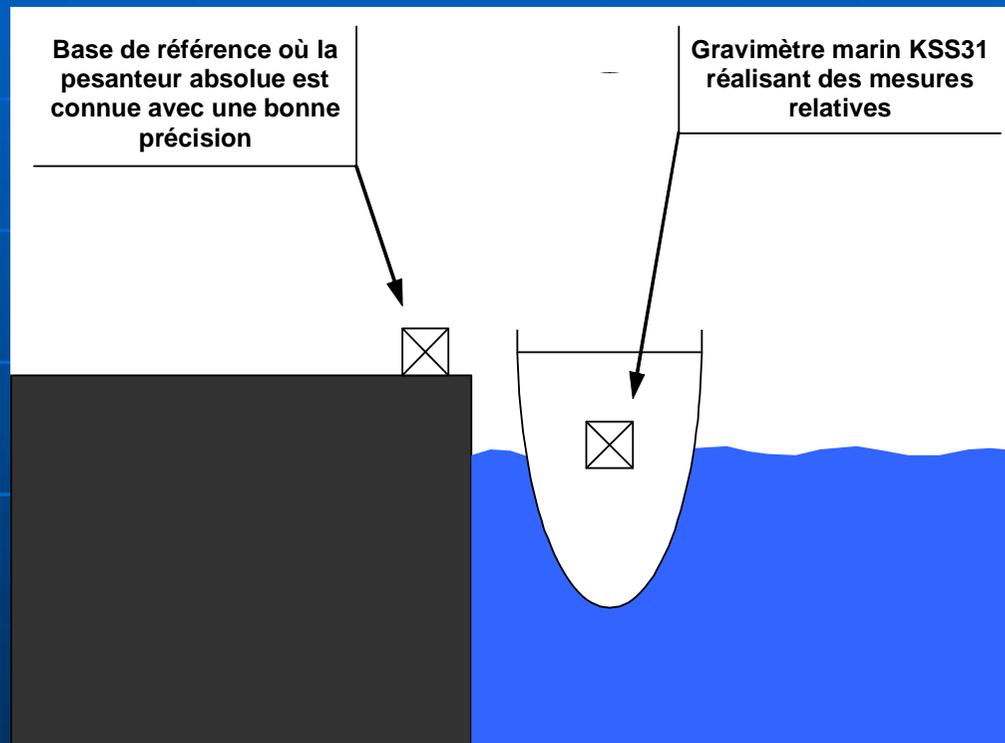
RESEAU IGSN71 International Gravity Standardization Net 1971



Bases absolues et liaisons (Morelli et al. 1974)

Les rattachements gravimétriques

Les rattachements du gravimètre marin sont réalisés en début et fin de campagne, au port.



Objectifs du rattachement:

Caler les mesures marines à une pesanteur absolue connue avec précision en un point fixe: La pesanteur du quai est rapportée au niveau du gravimètre marin.

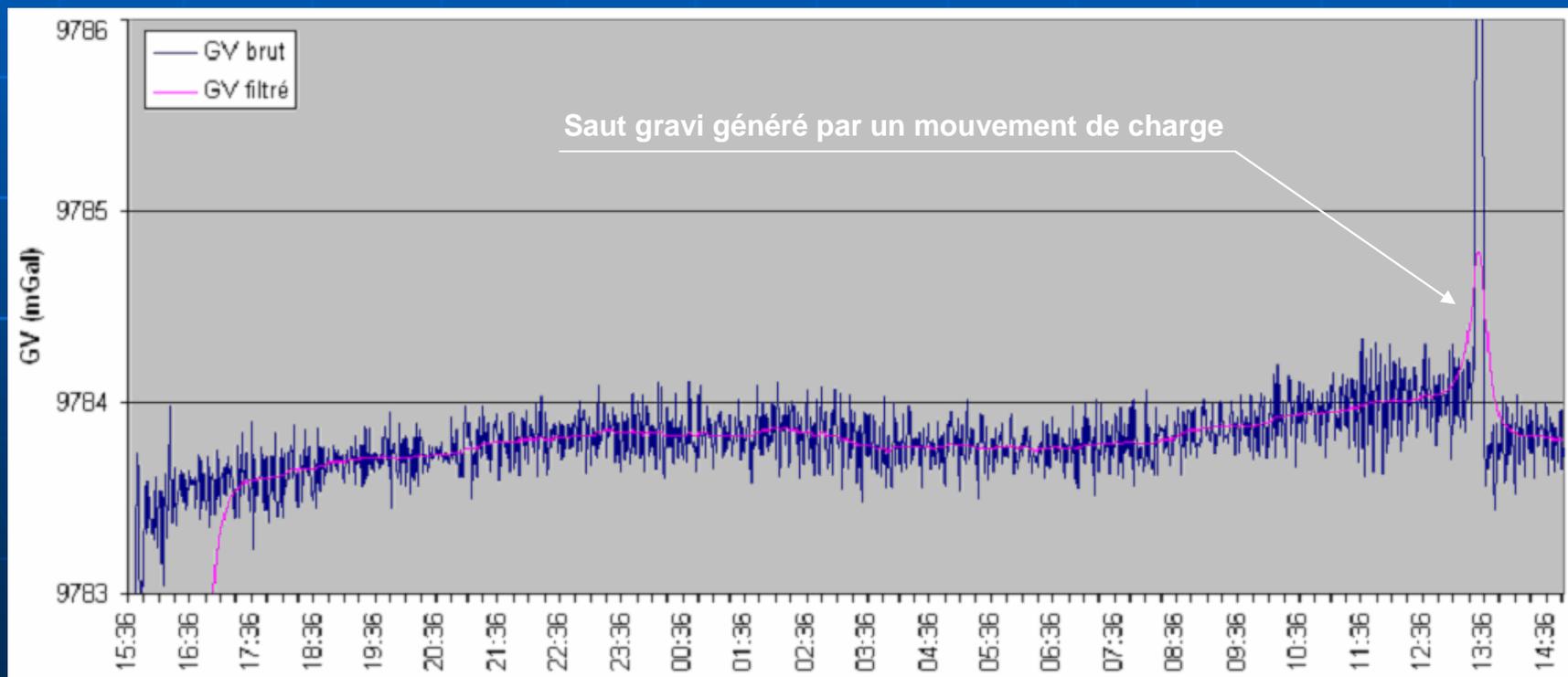
Estimer la dérive du gravimètre marin en répétant ce calage en début et fin de campagne.

Les rattachements gravimétriques

Les rattachements du gravimètre marin sont réalisés en début et fin de campagne, au port.

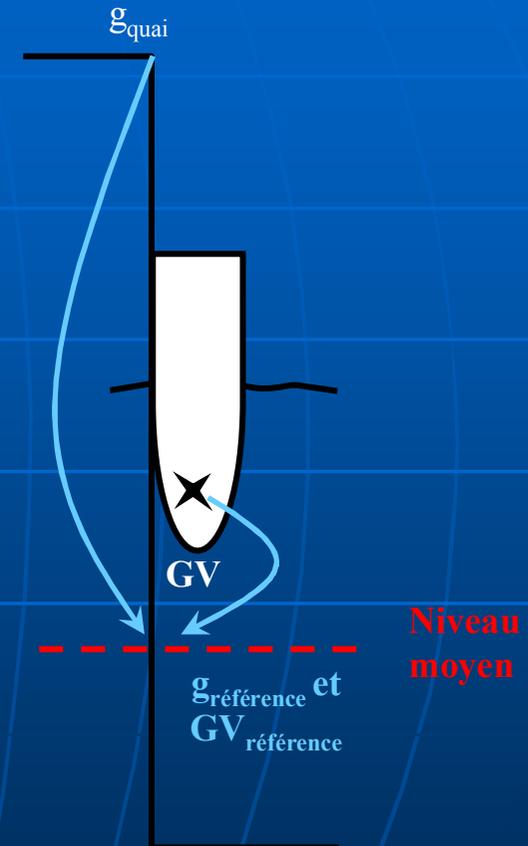
Contrainte:

Stabilité du bâtiment pendant la durée du calage (au moins 48h).

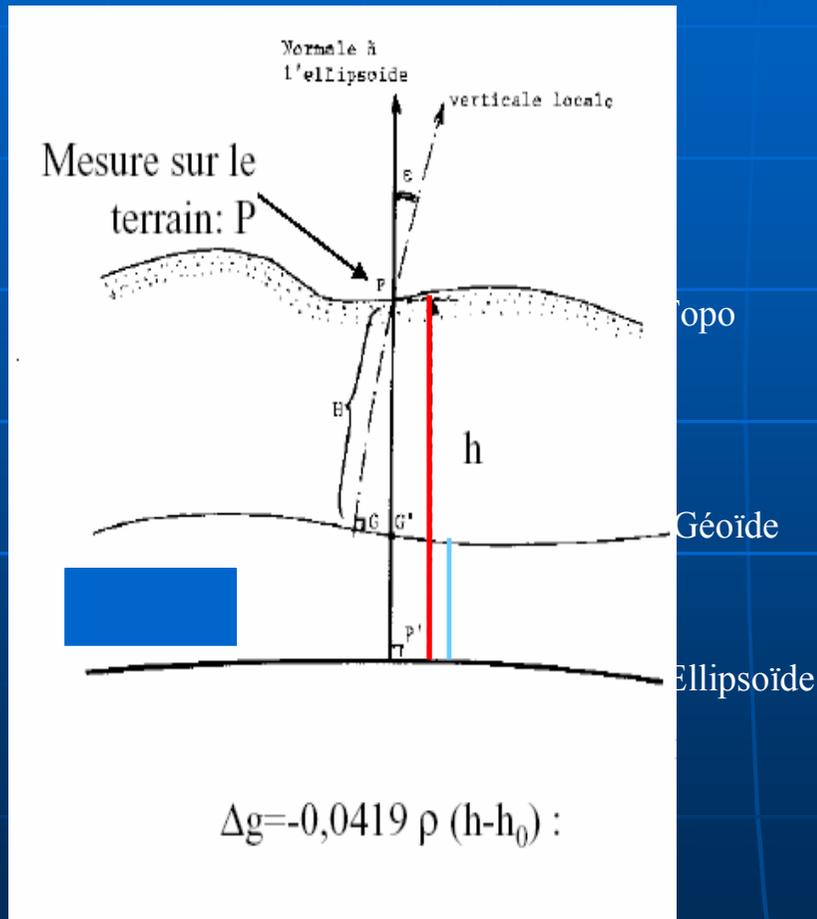


Rattachements aux ports de référence

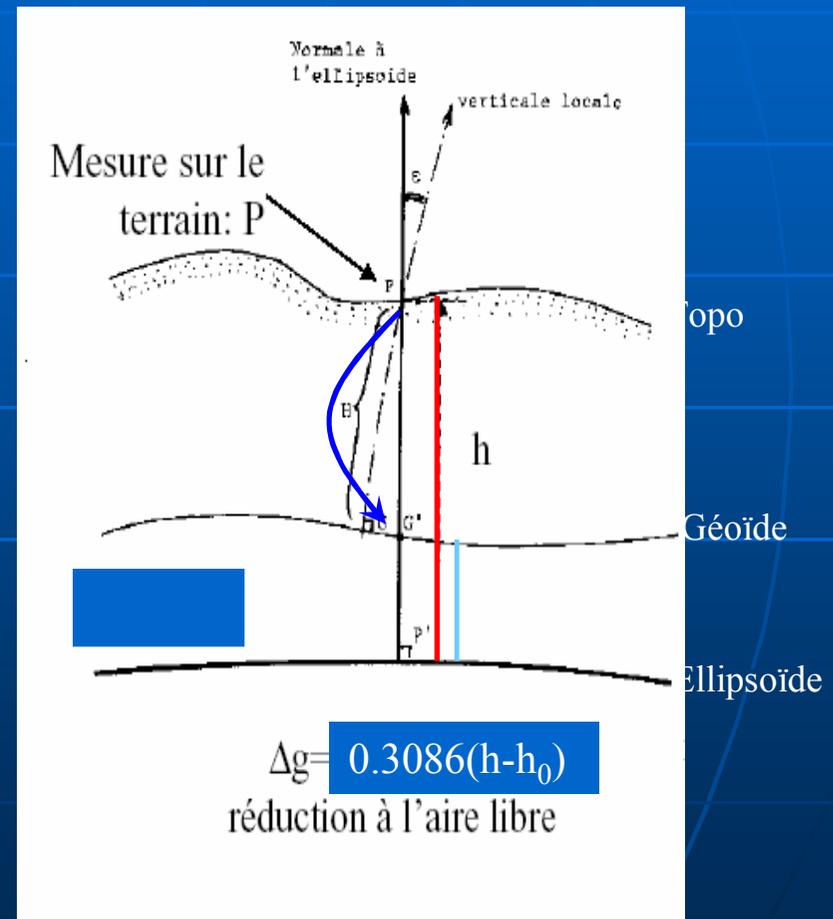
- *Le rattachement du gravimètre marin à une station de référence est effectué au port d'attache en début et en fin de campagne. Il comporte deux séquences de mesures : marines et terrestres. Ce rattachement permet de :*
 - *caler les mesures marines au réseau gravimétrique IGSN71*
 - *calculer avec précision la dérive temporelle du gravimètre.*
- *Les étapes de ce rattachement sont les suivantes :*
 - *rattachement de la station de référence gravimétriques du réseau IGSN71 vers la position d'ancrage du bâtiment (scintrex) =>*
 g_{quai}
 - *réduction de g_{quai} et du GV au niveau moyen*



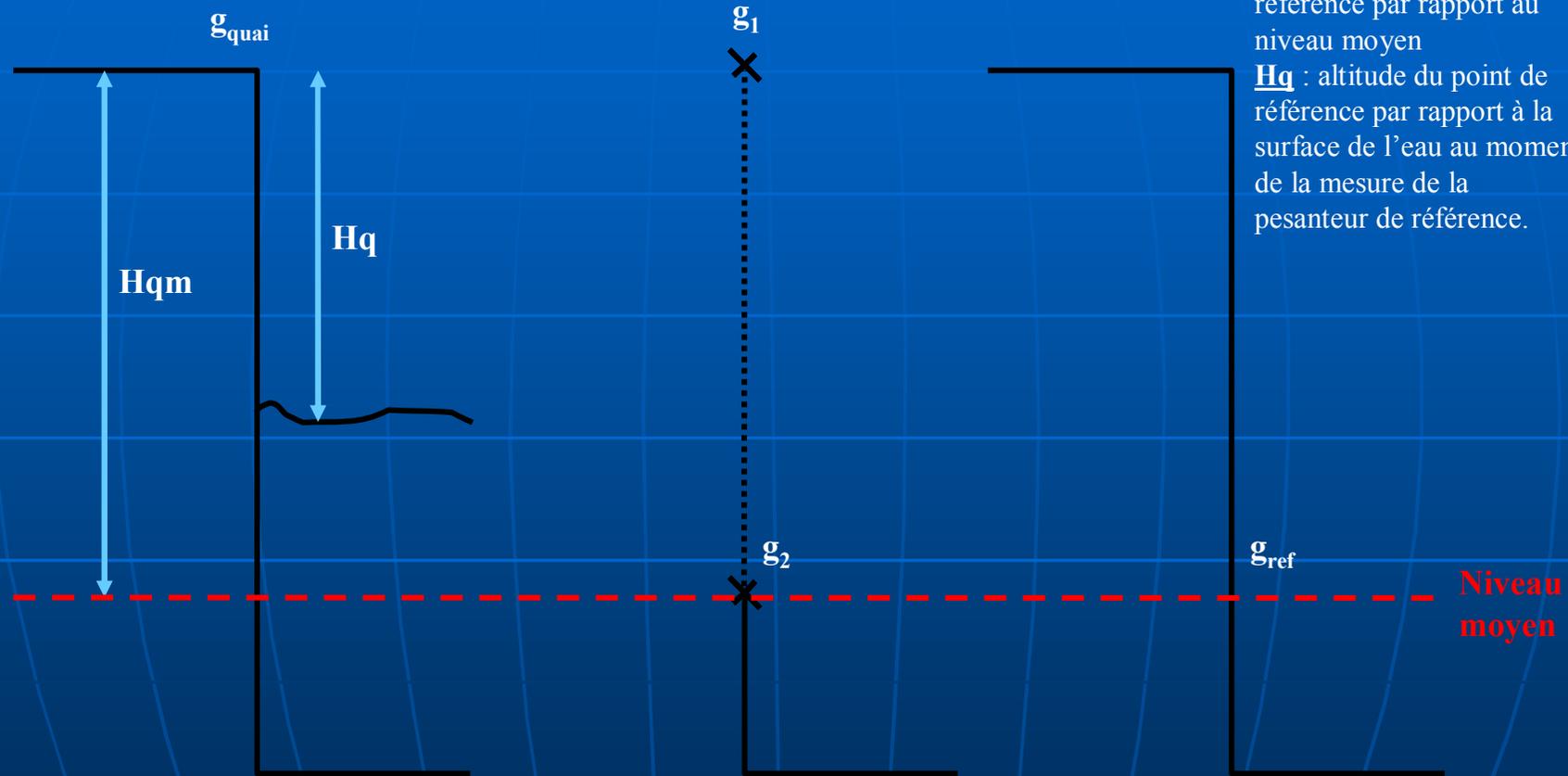
Correction de plateau :
corriger des effets de la
présence ou de l'absence de
matière entre P et G



Correction à l'air libre :
Ramener la mesure à une
surface de référence



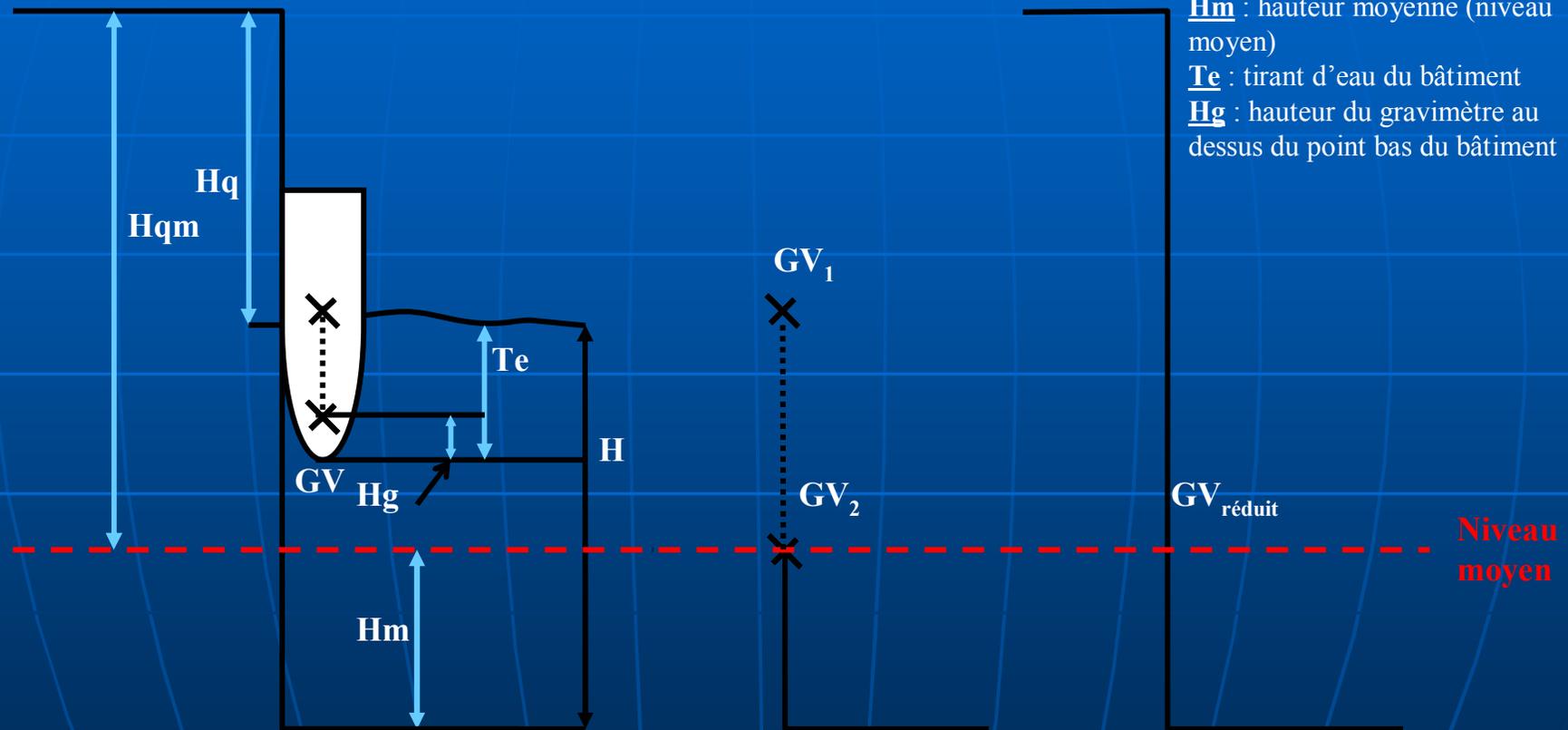
Réduction de la pesanteur absolue de référence



H_{qm} : altitude du point de référence par rapport au niveau moyen

H_q : altitude du point de référence par rapport à la surface de l'eau au moment de la mesure de la pesanteur de référence.

Réduction de la mesure GV de référence



H : hauteur d'eau sous la surface
 H_q : altitude du point de référence par rapport à la surface de l'eau au moment de la mesure de GV

H_m : hauteur moyenne (niveau moyen)

T_e : tirant d'eau du bâtiment

H_g : hauteur du gravimètre au dessus du point bas du bâtiment

Estimation de la Dérive

Elle est déterminée en considérant les mesures du gravimètre marin GV_{ref1} à un temps $t1$ (début de campagne) et GV_{ref2} à un temps $t2$ (fin de campagne) en deux points de référence où les valeurs absolues de pesanteur g_{ref1} et g_{ref2} sont bien connues. On peut alors estimer la dérive journalière du gravimètre en reliant les deux couples ($g_{ref} - GV_{ref}$) à chaque instant par l'égalité suivante

$$g_{ref2} - GV_{ref2} = g_{ref1} - [GV_{ref1} + dérive \times \Delta jours]$$

$$dérive = \frac{(g_{ref1} - GV_{ref1}) - (g_{ref2} - GV_{ref2})}{\Delta jours}$$

Calage du gravimètre Bodenseewerk KSS31 NO POURQUOI PAS

Descriptif du calage		N° de Fiche
Date	18-avr.-07	43
Mission	SEDIMANE	SN10
Pays	France	SN 32
Lieu d'escale	Brest quai des reparationsI (boillard Est)	G _{quai}
Nom de l'observateur	MT BOURSIER	980939,32 mGal
		Lat
		48 23:166 N
		Long.
		004 27.420 W

Paramètres navire	
NO POURQUOI PAS	
Nom du bâtiment	5,48 m
Tirant d'eau milieu	6,15 m
Distance quille/référence	6,87 m
Dist. base sondeur/référence	65,44 m
Dist. gravimètre / avant	42,07 m
Dist. gravimètre / arrière	10,00 m
Dist. gravimètre / coque bâbord	10,00 m
Dist. gravimètre / coque tribord	10,00 m
Accostage	Tribord à quai

K réel =	8,289
K inst =	8,336

Coefficient de correction
K réel / K inst

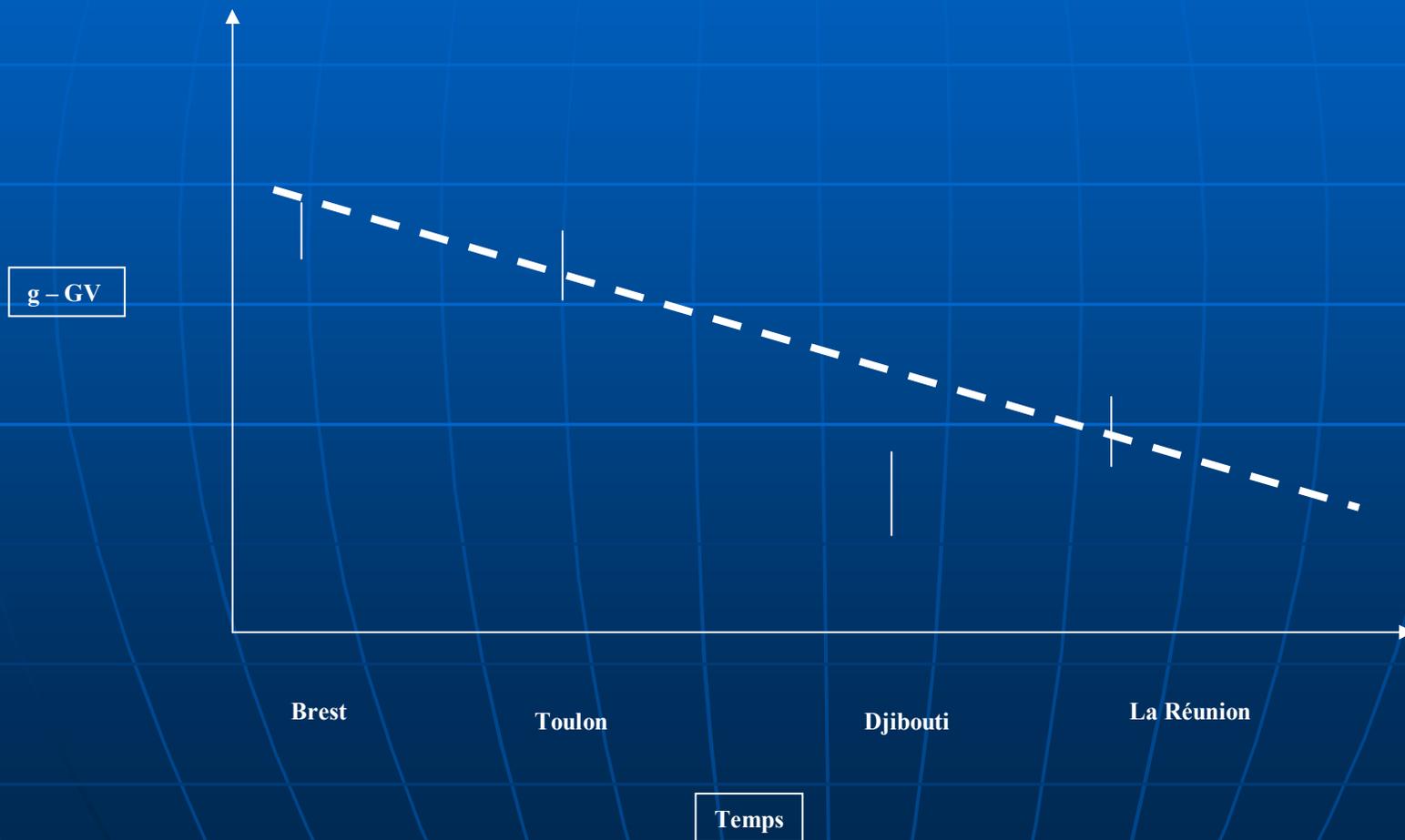
K = **0,99436 1804**

Séries de mesures	
Dist. Quai / coque du navire	1,20 m
Largeur du quai	10000,00 m
Type de quai	Plein

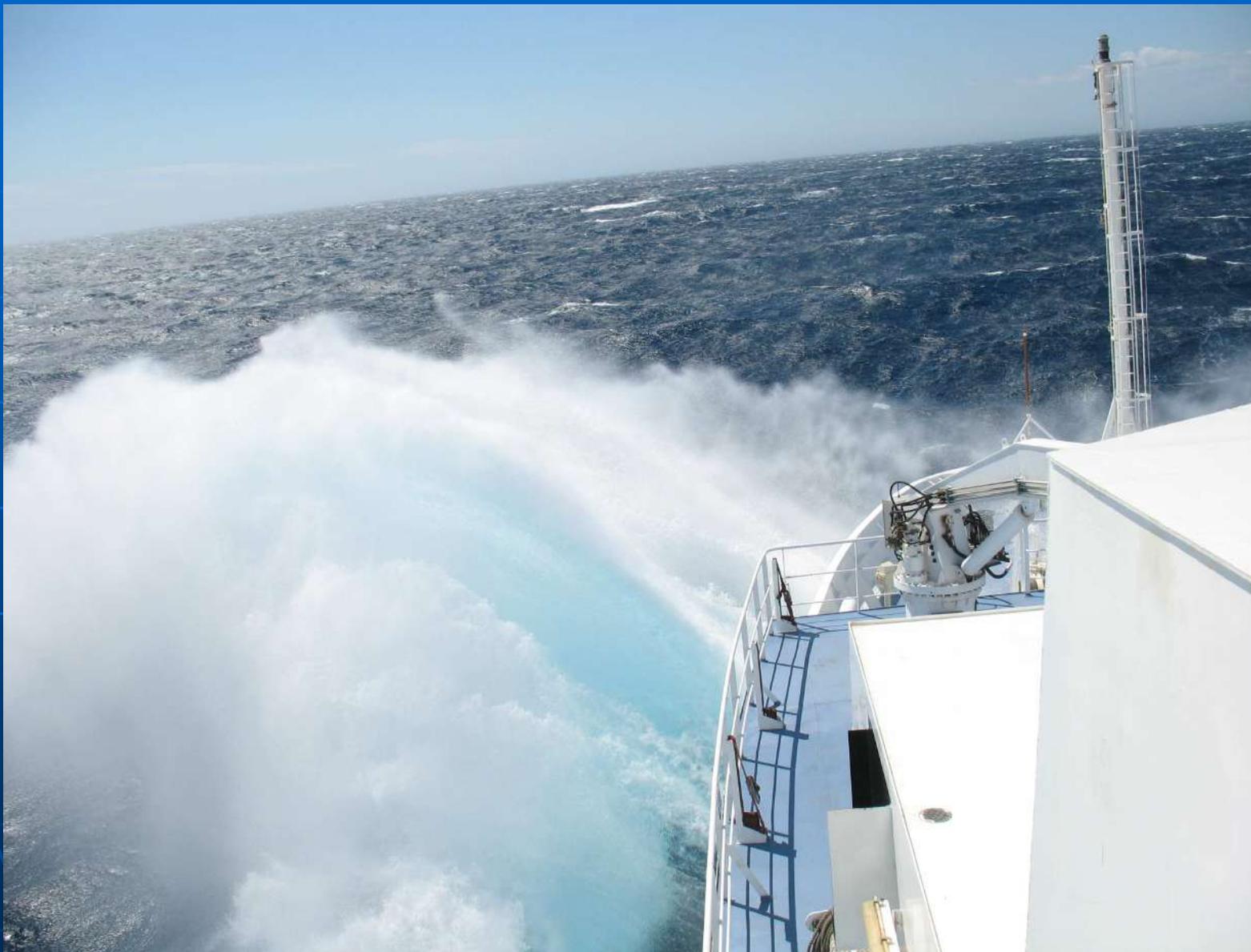
Importation des données			Moyenne retenue	
TECHSAS à quai				
Date et heure	Début	Fin		
17/04/2007 13:40	17/04/2007 15:26	19/04/2007 04:58	7,45 m	
18/04/2007 07:30	17/04/2007 15:26	19/04/2007 04:58	409,75 mGal	
18/04/2007 11:20	Attention multiplier le GV brut par le coefficient K dans la case moyenne retenue du KSS31			
18/04/2007 13:20	Tirant d'air du quai	GV lu sur le KSS31	Sonde lue sur l'EA600	
19/04/2007 05:13	4,05 m	411,60 mGal	8,98 m	
	5,47 m	412,06 mGal	7,54 m	
	8,23 m	412,76 mGal	4,76 m	
	5,75 m	411,58 mGal	7,16 m	
	1,88 m	411,30 mGal	11,04 m	

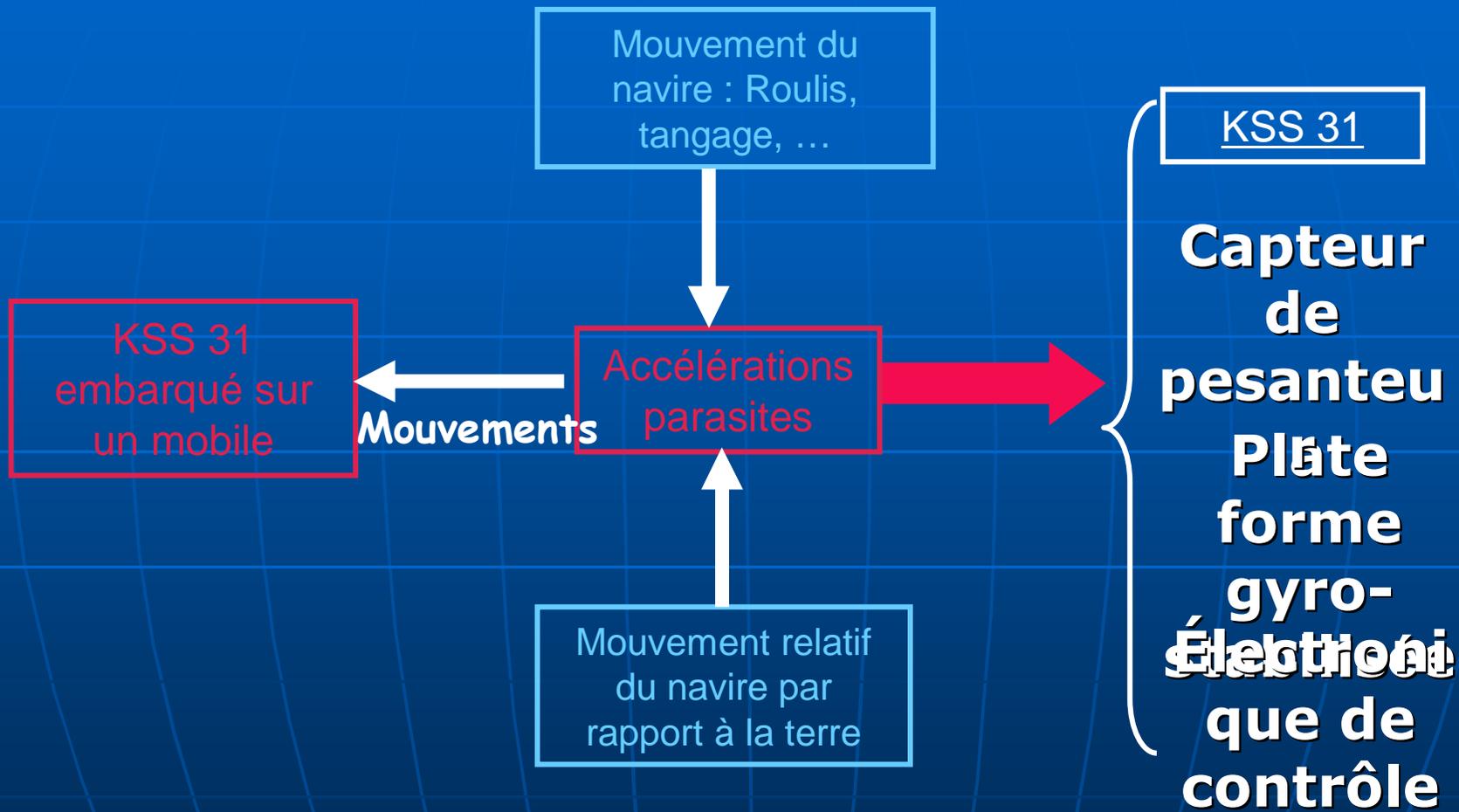
Résultats	
Heure moyenne du calage	18.04/2007 10:12
Référence G _{quai}	980939,32 mGal
Tirant d'air retenu	5,52 m
Distance gravimètre / quai	11,20 m
Largeur du quai	10000,00 m
Epaisseur du quai	19,17 m
GV au niveau du gravimètre	409,75 mGal
Pesanteur de référence au niveau mer (Donnée par Timica)	980940,08 mGal

Estimation de la Dérive ,pour un ensemble de campagne
Estimation du coefficient de calibration (ifremer)



Les mesures en mer





Accélérations inertielles : l'effet d'Eötvös

On peut décomposer cet effet en deux contributions : l'effet de Coriolis et l'effet centrifuge

Effet de Coriolis

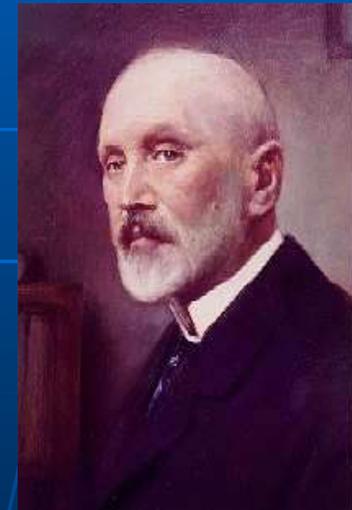
L'effet de Coriolis correspond à la variation de l'accélération centrifuge due au mouvement du bateau à la surface de la terre. Il tient compte du mouvement de rotation de la terre et dépend de la position en latitude (φ) du mobile, de sa vitesse (V en nœuds) et de son cap vrai (C).

$$\gamma_{Coriolis} = -7,503 \times \cos \varphi \times V_{est} = -7.503 \times \cos \varphi \times V \times \sin(\text{cap})$$

Effet de l'accélération centripète

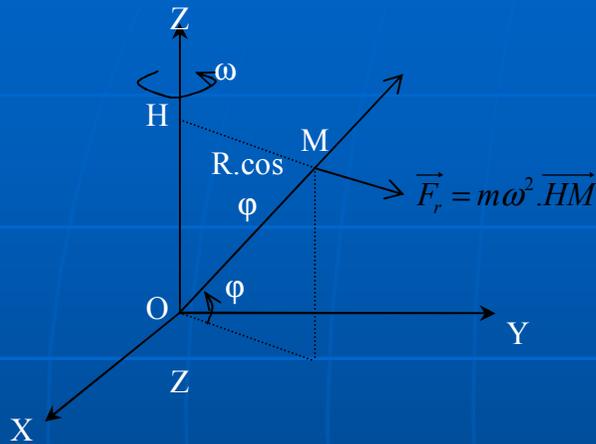
A l'accélération centrifuge due au mouvement de rotation de la Terre s'ajoute une accélération due au déplacement du navire le long de sa trajectoire. L'effet de l'accélération centripète est dû à la vitesse du mobile en mouvement à surface de la terre

$$\gamma_{centrifuge} = -0.004 \times V^2$$



Loránd Eötvös
(Hongrie, 1848-1919)

L'effet de Coriolis (démonstration)



La terre tourne d'un mvt uniforme autour de son axe OZ à la vitesse angulaire ω . Un point matériel M, de masse m, lié à la terre et tournant à la même vitesse est soumis à la force centrifuge.

Accélération centrifuge associée est donnée par : $\vec{a} = \omega^2 \cdot \overline{HM}$

et son module vaut $a = R \cdot \omega^2 \cdot \cos \varphi$

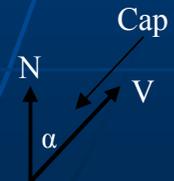
Seule la composante verticale va perturber la mesure de g soit $a_v = R \cdot \omega^2 \cdot \cos^2 \varphi$

Le mouvement du mobile avec une vitesse V à la surface de la terre va entraîner une variation de l'accélération centrifuge

$$\frac{da_v}{d\omega} = 2 \cdot R \cdot \omega \cdot \cos^2 \varphi$$

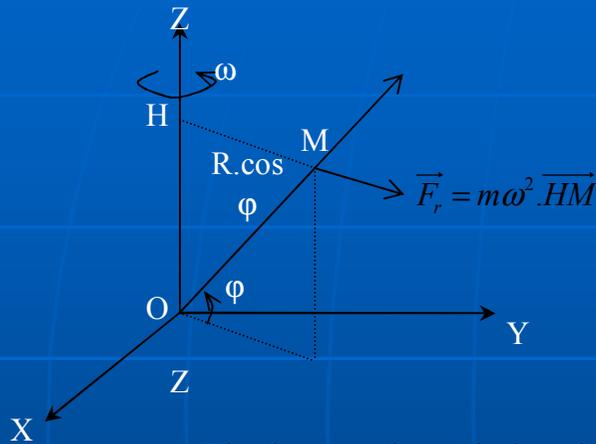
Seule la composante Est de la vitesse du mobile va modifier la vitesse angulaire apparente de la terre (effet de Coriolis) :

$$V_{est} = V \cdot \sin \alpha$$



L'effet de Coriolis (démonstration)

$$\frac{da_v}{d\omega} = 2.R.\omega.\cos^2 \varphi$$



La variation de vitesse angulaire due à ce mouvement s'exprime par :

$$d\omega = \frac{V.\sin \alpha}{R.\cos \varphi}$$

Finalement, la variation d'accélération due au mouvement du mobile est obtenue par l'expression suivante :

$$da_v = \frac{2.R.\omega.\cos^2 \varphi.V.\sin \alpha}{R.\cos \varphi} = 2.\omega.\cos \varphi.V.\sin \alpha$$

Application numérique : pour γ_{Coriolis} en mGal et V_{est} en nœuds

1 nœud = $1852 \text{ m.h}^{-1} = 0,51444 \text{ m.s}^{-1}$ et $1 \text{ m.s}^{-2} = 10^5 \text{ mGal}$

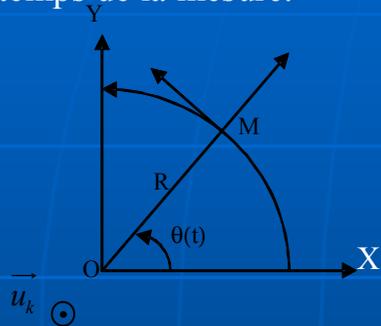
$\omega = 2\pi / 86164 = 7,2921.10^{-5} \text{ rad/s}$ (1 jour = 86164 sec)

d'où $2\omega = 2 \times 7,2921.10^{-5} \times 0,51444 \times 10^5 = 7,503$

$$\gamma_{\text{Coriolis}} = -7,503 \times \cos \varphi \times V_{\text{est}} = -7,503 \times \cos \varphi \times V \times \sin(\text{cap})$$

L'effet de l'accélération centripète (démonstration)

A l'accélération centrifuge due au mouvement de rotation de la Terre s'ajoute une accélération due au déplacement du navire le long de sa trajectoire. Cette trajectoire est assimilable à un arc de cercle parcouru uniformément pendant le temps de la mesure.



Si on pose la distance angulaire $\theta(t) = \omega_m \cdot t$ avec ω_m vitesse angulaire du mobile

Alors la vitesse V du mobile est définie comme suit : $\vec{V} = R \cdot \frac{d\theta}{dt} \cdot \vec{u}_\theta = R \cdot \omega_m \cdot \vec{u}_\theta$

On définit le vecteur rotation du mobile $\vec{\omega}_m = \omega_m \cdot \vec{u}_k$

avec \vec{u}_k vecteur unitaire perpendiculaire au plan contenant la trajectoire

L'accélération est ensuite obtenue comme suit : $\vec{\gamma} = \frac{dV}{dt} = \frac{d|\vec{V}|}{dt} \vec{u}_\theta + |\vec{V}| \cdot \frac{d\vec{u}_\theta}{dt} = R \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} \cdot \vec{u}_\theta + R \left(\frac{d\theta}{dt} \right) \cdot \frac{d\vec{u}_\theta}{dt}$

\forall vecteur A de norme constante on a la propriété suivante $\frac{d\vec{A}}{dt} = \vec{\omega} \wedge \vec{A}$

D'où $\vec{\gamma} = R \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} \cdot \vec{u}_\theta + R \left(\frac{d\theta}{dt} \right) (\vec{\omega}_m \wedge \vec{u}_\theta) \Rightarrow \vec{\gamma} = R \cdot \left[\frac{d^2\theta}{dt^2} \cdot \vec{u}_\theta - \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \cdot \vec{u}_r \right]$ avec $\vec{\omega}_m \wedge \vec{u}_\theta = -\omega_m \vec{u}_r$

Dans le cas d'un mouvement ou le mouvement circulaire est uniforme, la vitesse angulaire est constante et il ne reste plus que le terme d'accélération centripète dirigée vers le centre de la terre :

$$\vec{\gamma}_{centripète} = -R \cdot \omega^2 \cdot \vec{u}_r = -\frac{V^2}{R} \cdot \vec{u}_r = -0.04 V^2$$

Application numérique : pour g en mGal et V en noeuds :
 $R = 6371.103 \times 7,2921 \cdot 10^{-5} \times 0.514 = 238.8$

Accélérations dues à l'état de la mer ou à, la navigation du porteur

Caractéristiques des filtres Sea-State

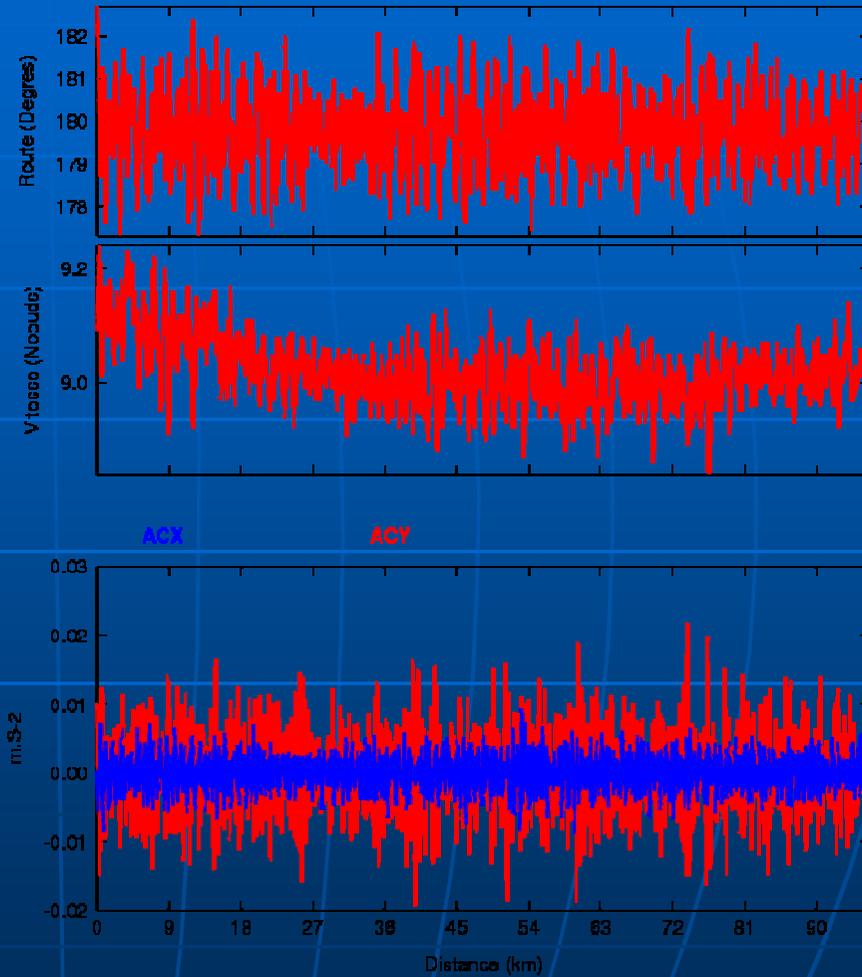
	<i>Fréquence de coupure en Hz</i>	<i>Longueur d'onde pour V = 5 nds</i>	<i>Longueur d'onde pour V = 10 nds</i>	<i>Retard en seconde (KSS31 – BB (SN28))</i>
<i>Sea-State 2 (mer calme)</i>	1/175	437.5 m	875.0 m	107.0 sec
<i>Sea-State 3 (mer forte)</i>	1/245	612.5 m	1 225.0 m	130.5 sec
<i>Sea-State 4 (mer très forte)</i>	1/471	1177.5 m	2 355.0 m	179.5 sec

Exemple de profil

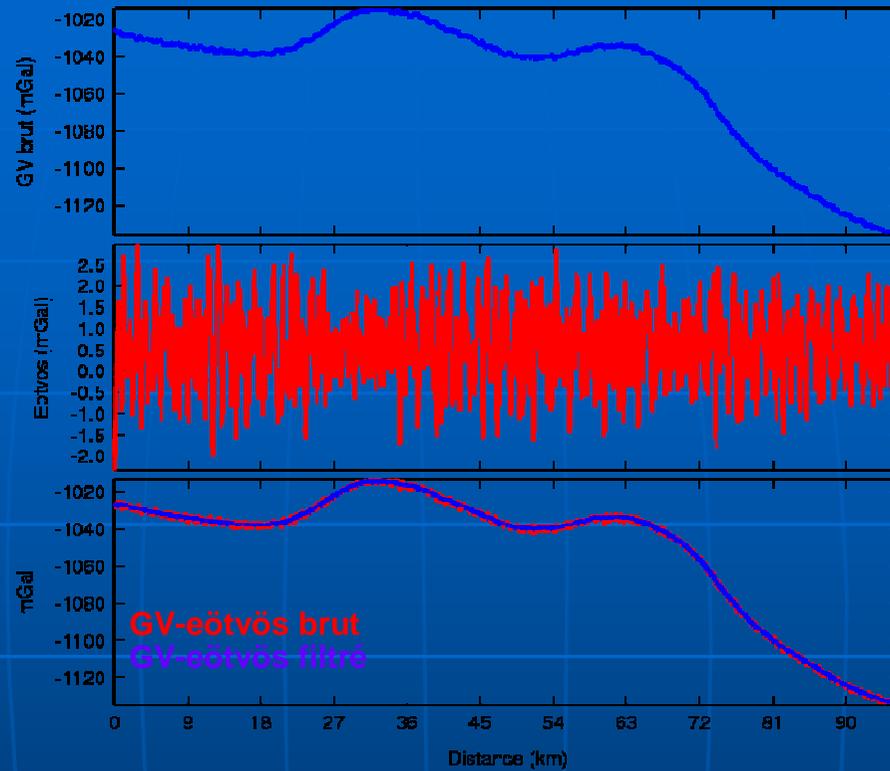
Profil aller : mer peu agité (< 1m)

$$\sigma_{\text{route}} = 0.8^\circ$$

$$\sigma_{\text{vitesse}} = 0.06 \text{ nds}$$



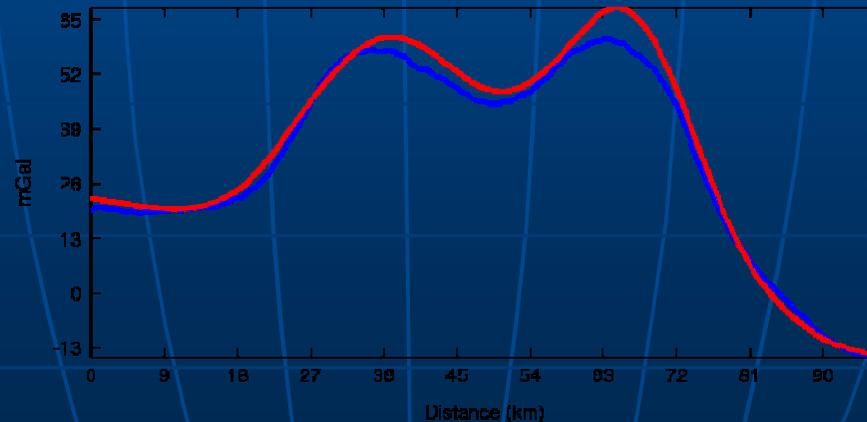
Exemple de profil



Anomalie à l'air libre

Mesures marines

Modèle dérivé de
l'altimétrie
(Sandwell V18.1)



Statistiques

Moy : -2.1 +/- 2.5 mGal

Min : -9.1 mGal

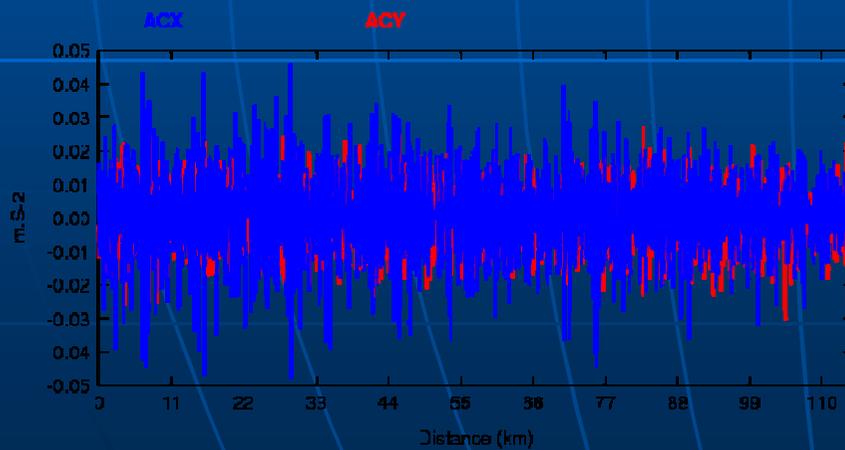
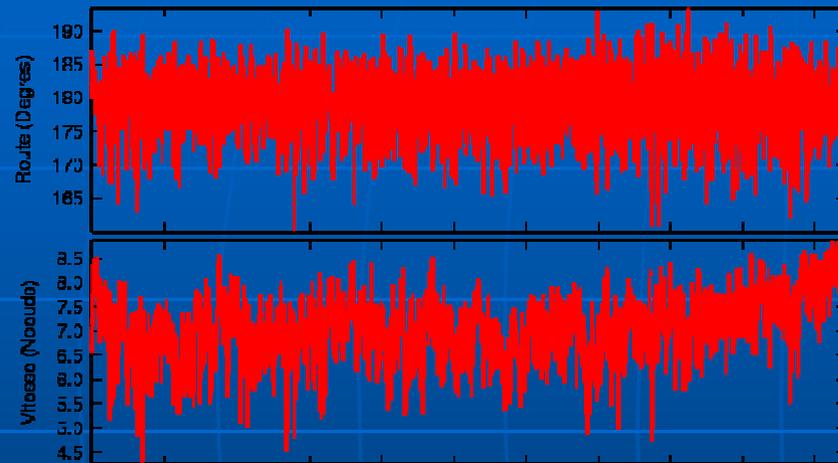
Max : 2.8 mGal

Exemple de profils bruités

Profil aller : mer forte de face

$$\sigma_{\text{route}} = 4.2^\circ$$

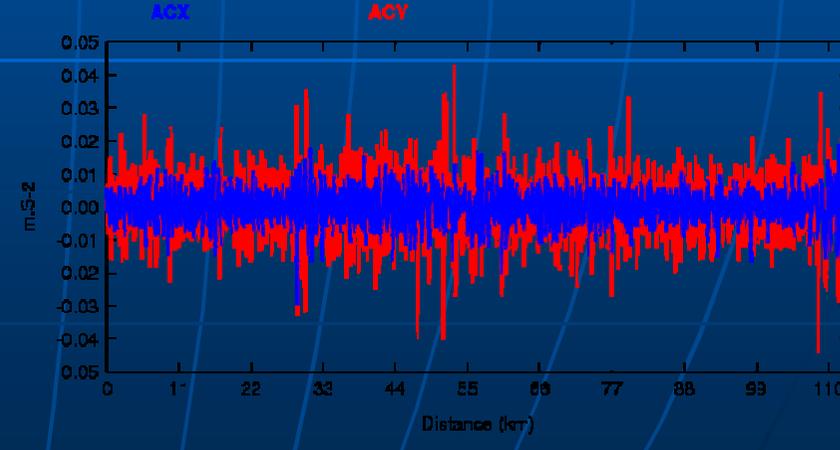
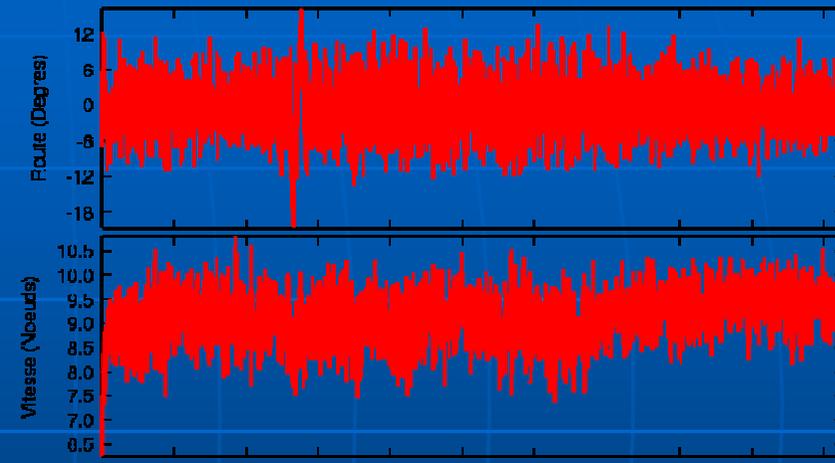
$$\sigma_{\text{vitesse}} = 0.66 \text{ nds}$$



Profil retour : mer forte de l'arrière

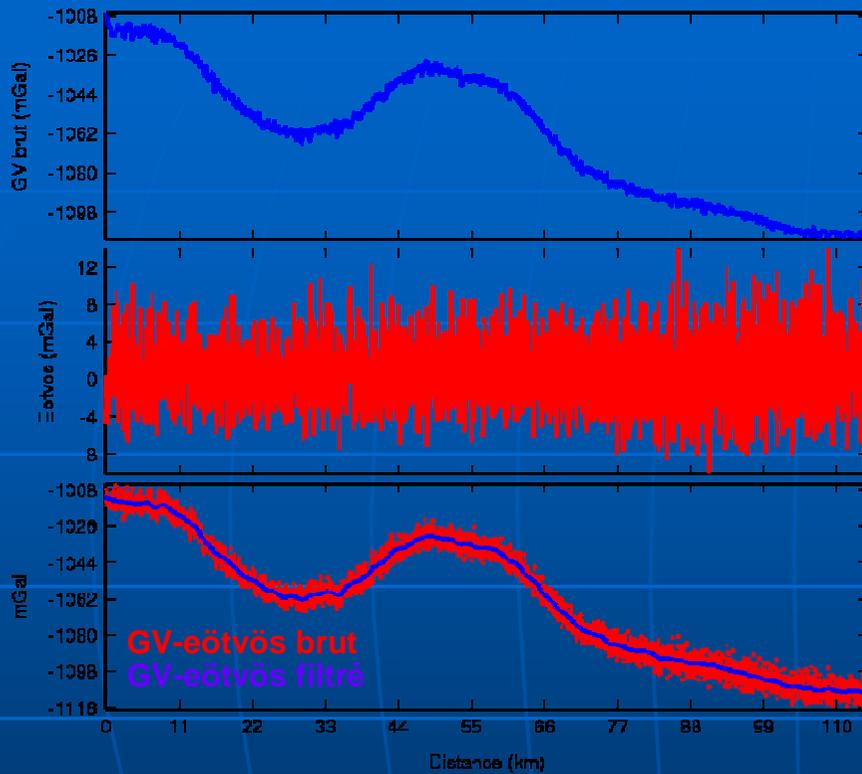
$$\sigma_{\text{route}} = 7.0^\circ$$

$$\sigma_{\text{vitesse}} = 0.52 \text{ nds}$$

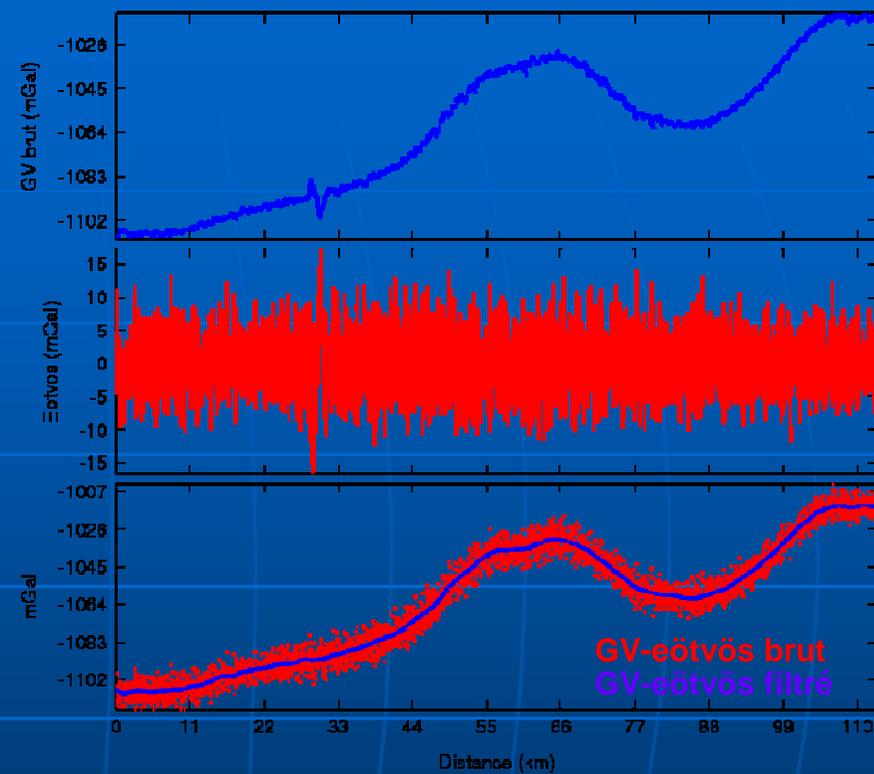


Exemple de profils bruités

Profil aller : mer forte de face

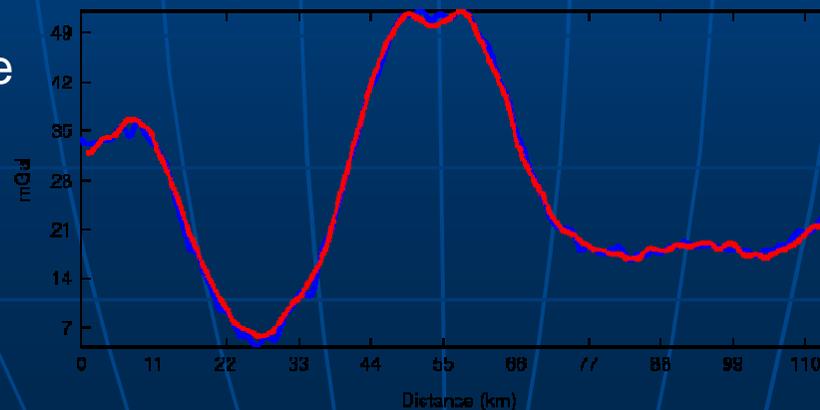


Profil retour : mer forte de l'arrière



Anomalie à l'air libre

Profil aller
Profil retour



Ecarts entre aller et retour

Moy : -0.1 ± 0.8 mGal

Min : -2.4 mGal

Max : 1.8 mGal

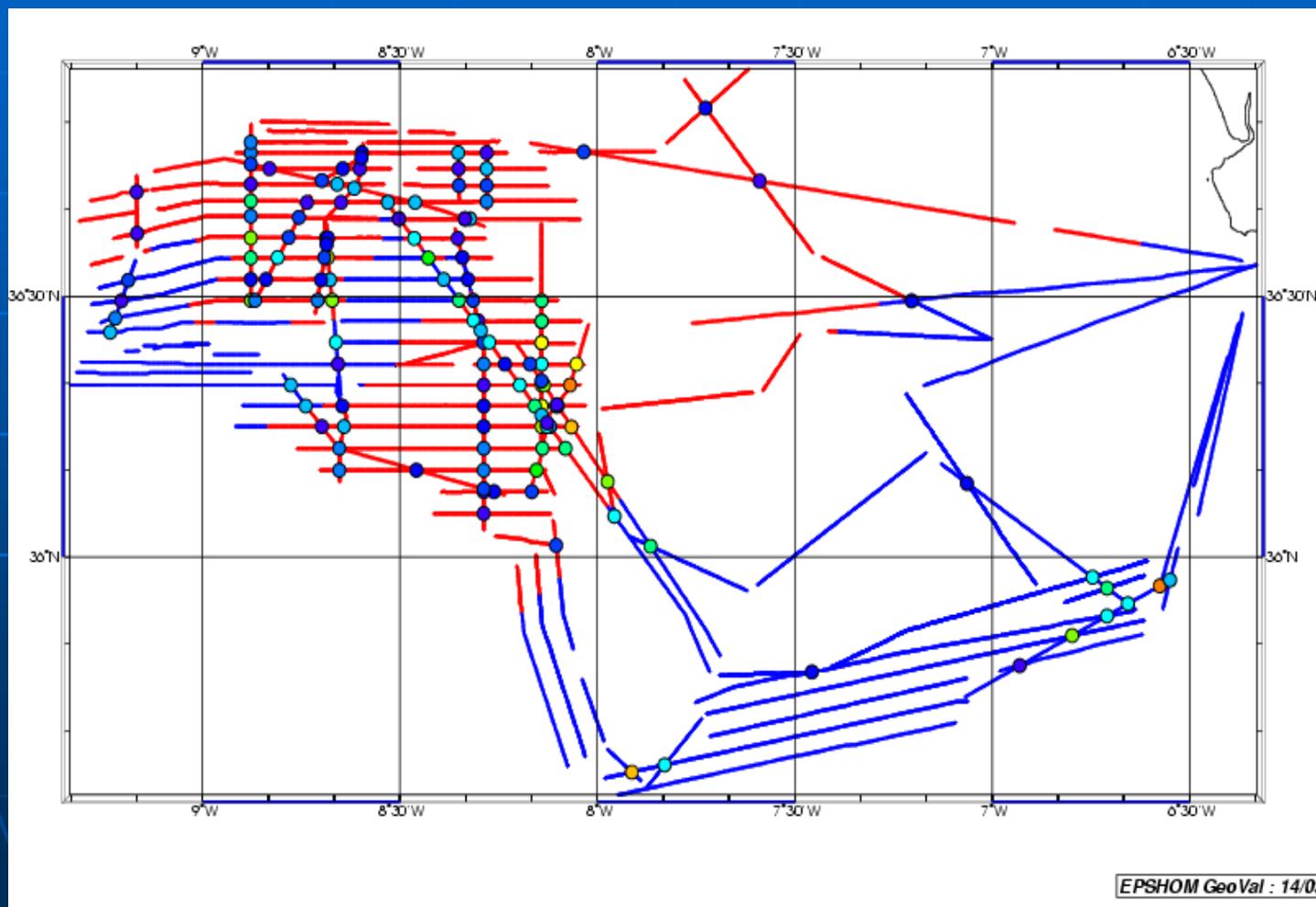
Estimation de l'erreur des mesures

	Etat de la mer
0	Mer calme (mer d'huile)
1	Mer ridée (0 à 0,10m)
2	Mer belle (0,10 à 0,50m)
3	Mer peu agitée (0,50 à 1,25m)
4	Mer agitée (1,25 à 2,50m)
5	Mer forte (2,50 à 4m)

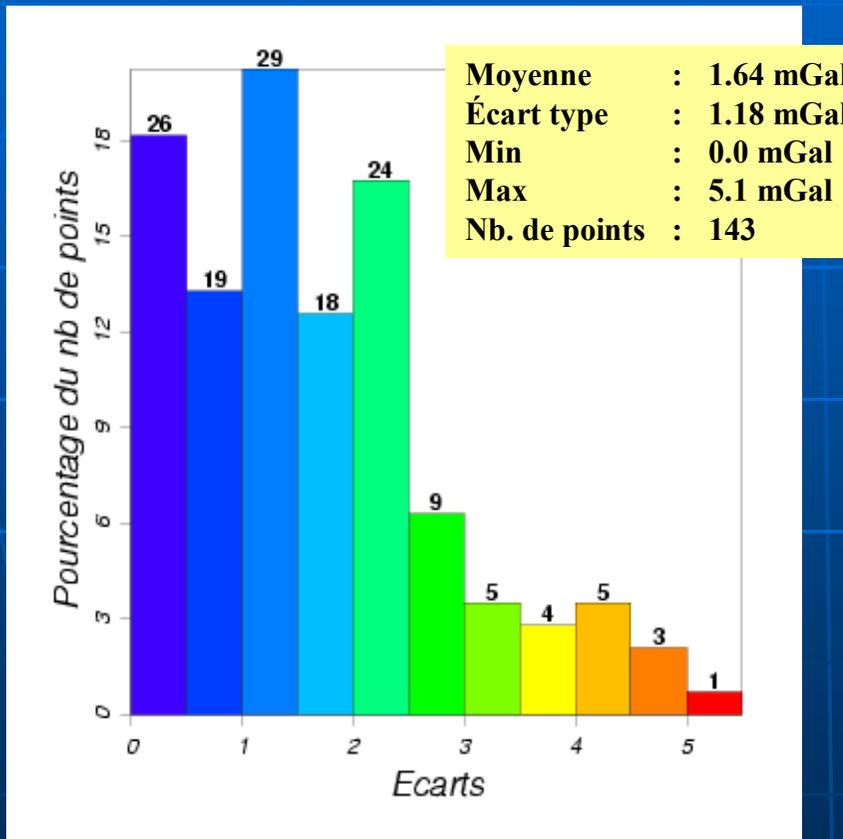
Précision de la mesure gravimétrique en fonction du type de capteur et de l'état de la mer en mGal

	Mer Calme	Mer Agitée Forte	Mer très agitée
KSS31	0,5 mGal	1 mGal	2,5 mGal

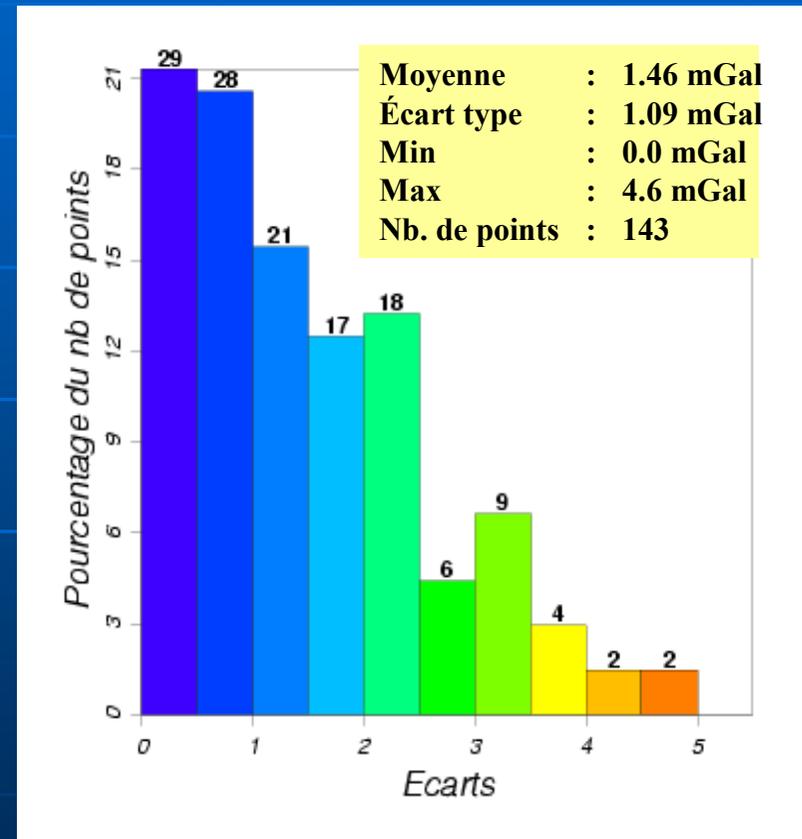
localisation des points de croisement



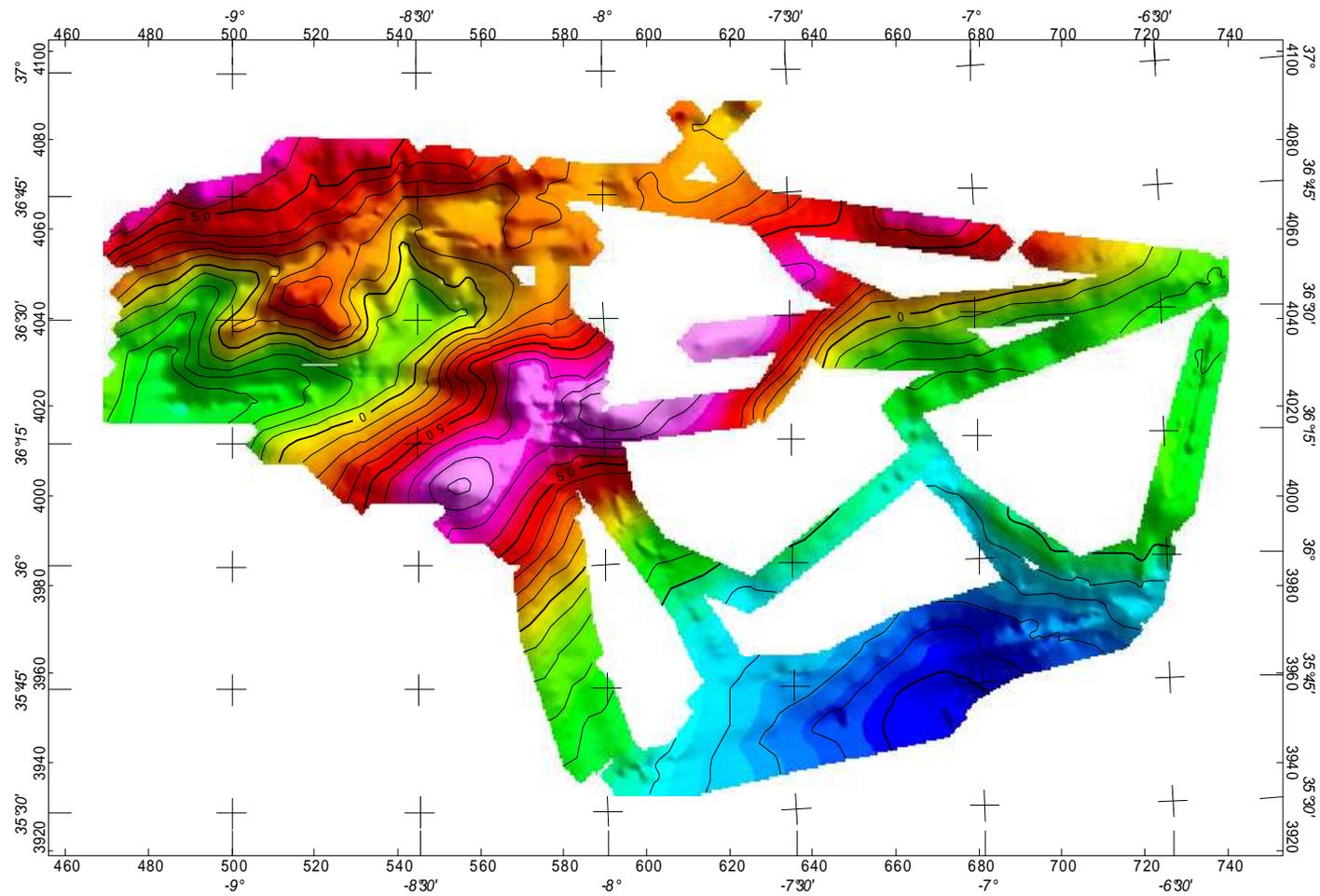
Histogramme des écarts aux points de croisement



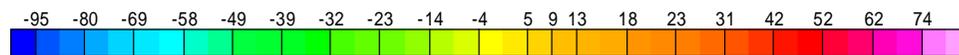
Avant filtrage des données



Après filtrage des données



Anomalie à l'air libre



Erreurs Geophysiques :

Accélérations inertielles (Eötvös)

Accélérations dues à l'effet luni-solaires (négligeables)

Accélérations parasites :

Erreur dépendant du système de mesures (non pas du capteur, mais de l'ensemble capteur/bâtiment) et conditions d'acquisition

Erreurs instrumentales et sur les références

Dérive instrumentale : erreur due à la méconnaissance de la dérive due à une mauvaise qualité des stations de référence qui permettent d'estimer cette dérive

Incertitude sur la mesure du capteur (facteur de calibration)

Erreur de rattachement → biais entre les levés gravimétriques

Positionnement → 90 (100 à 2 km) depuis GPS (5m, 30m à 100m)
utilisation du positionnement dynamique satisfaisant
(bien réglé avec un retour sur profil brutal)

Mesure de variation de la pesanteur → Anomalie à l'air libre Δg

Modele d'anomalie ex: AAL $\Delta g = g_{\text{mesuré}} - g_{\text{GRS80}}$

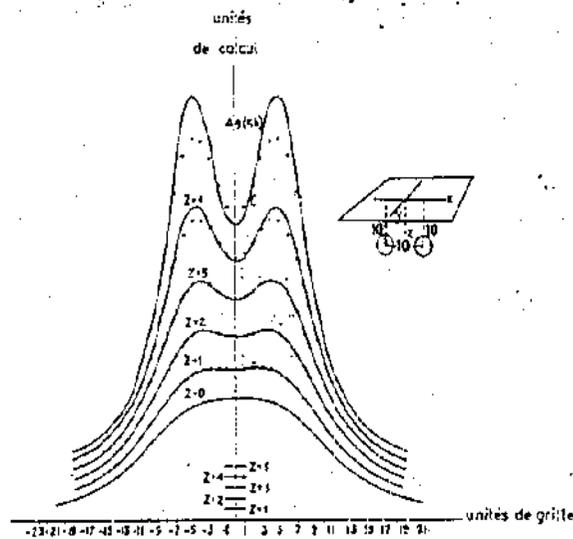
Modélisation du sous-sol
Ou du relief

Calcul du géoïde

- Stokes
- Collocation

Les sources du champ de pesanteur

Les signaux caractéristiques

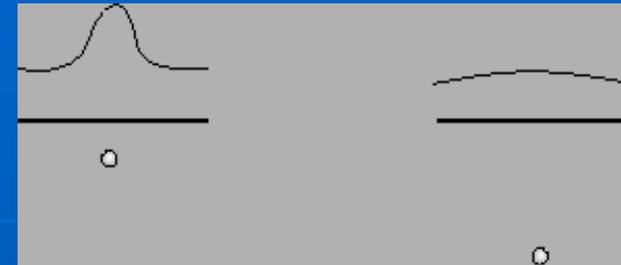


: Effet de la profondeur sur la résolution

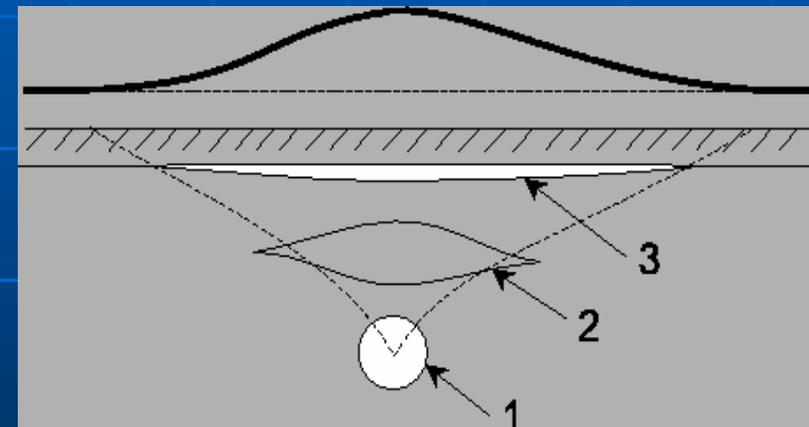
Signature gravimétrique de deux sphères. L'axe Oz est positif vers le bas.

A $z = 0$, il n'est pas du tout évident qu'il s'agit de deux sphères.

A $z = 3$ ou 4 , l'effet anormal des 2 sphères est parfaitement divisé en ses 2 composants.



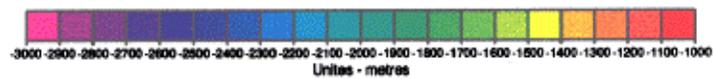
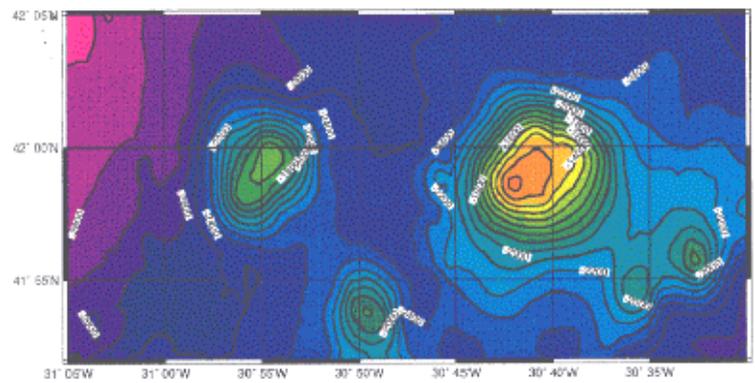
Une source superficielle donne une forte amplitude et une faible longueur d'onde



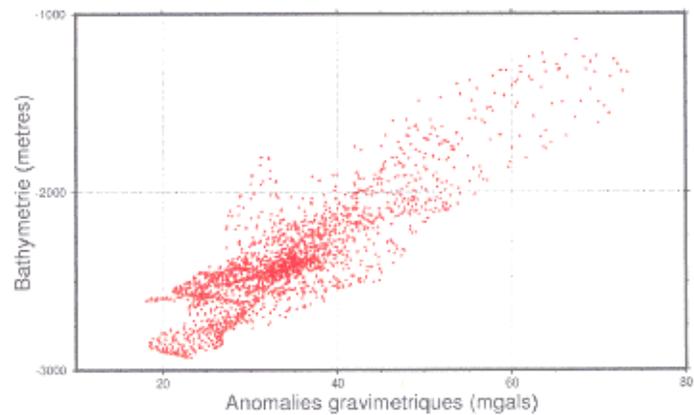
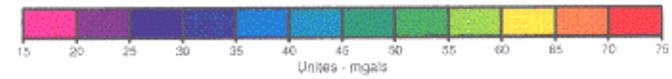
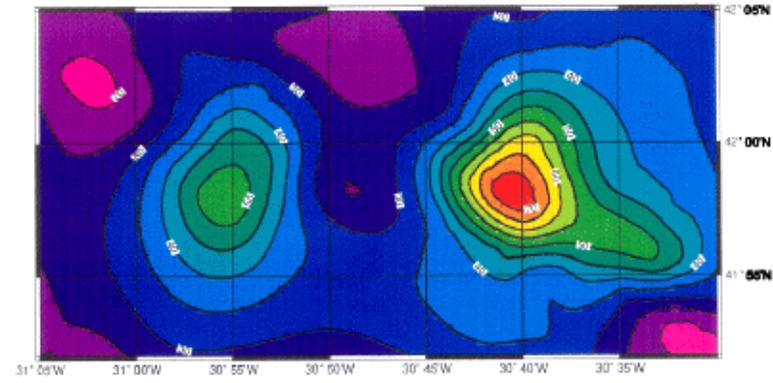
Plusieurs sources de forme et de profondeur différentes peuvent produire le même effet

Corrélation bathymétrie / anomalies gravimétriques

Bathymetrie



Anomalies a l'air libre

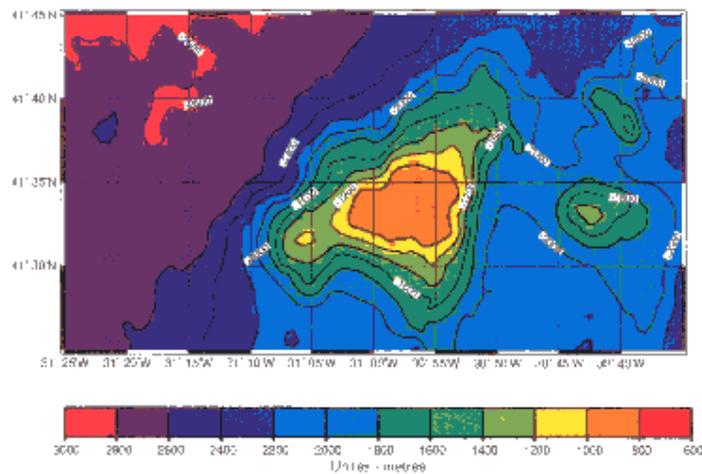


Coefficient de corrélation : 0.857

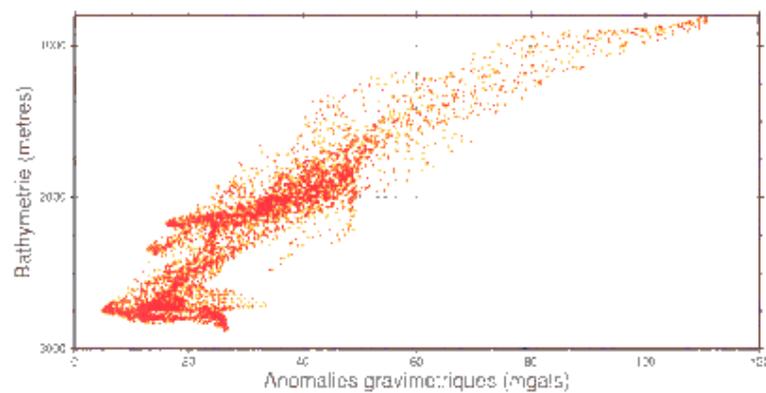
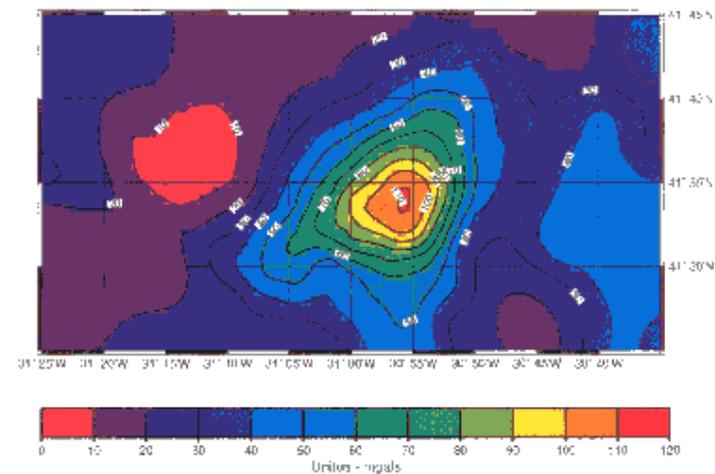
Projection de Mercator.
Echelle : 1cm = 3 min. Longitude.

Corrélation gravimétrie/bathymétrie

Bathymetrie



Anomalies a l'air libre



Grilles 0.5 x 0.5 minute.

Echelle : 1cm = 4.8 min. Longitude.

les source du champ de pesanteur sont:

Le contraste de densité entre l'eau (1000kg/m^3) et la roche (2500 à 3200 kg/m^3) ou le sédiment (1500 à 2400 kg/m^3) = relief

Avec une compensation plus ou moins importante en profondeur

Les variations de densité à l'intérieur de la terre

La densité varie en fonction de la nature des milieux géologiques

La densité= masse volumique du corps/masse volumique de l'eau

Densité moyenne de la Terre: 5.5

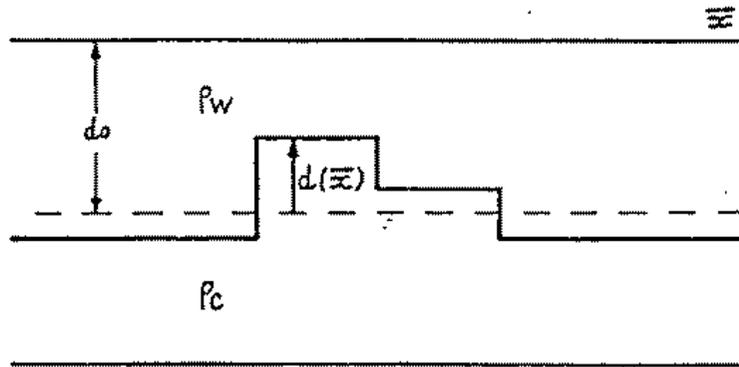
Densité moyenne de la croûte: 2.67

Sables	1.4 à 2.5
Sel	2.1 à 2.4
Grès	2 à 2.5
Basaltes	2.7 à 3.1
Pétrole	0.6 à 0.9
Charbon	1.2 à 1.8
Fer	7.3 à 7.8
Or	15.6 à 19.4

Les variations de la pesanteur, de la surface moyenne océanique ou géoïde

-La corrélation avec le relief n'est pas parfaite à cause du phénomène de compensation des masses en profondeur.

Compensation isostatique: redistribution des masses En profondeur en fonction du relief

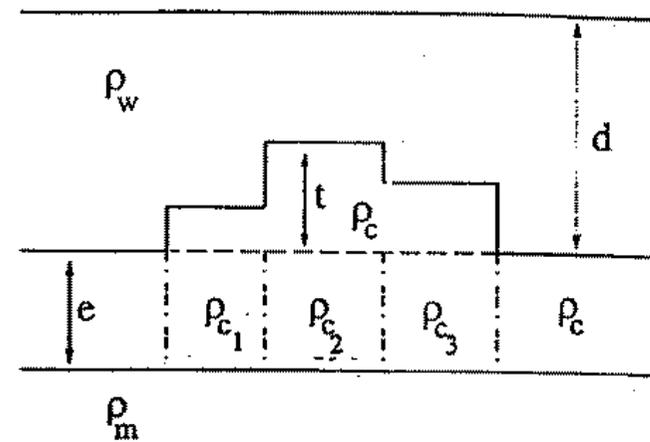


Modèle non-compensé

Les anomalies gravimétriques sont uniquement dues à la topographie

Rigidité flexurale \Rightarrow infini

Exemple: topographie faible
longueur d'onde



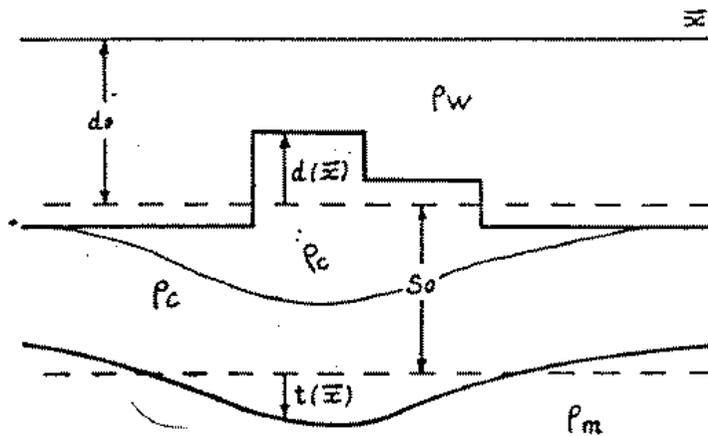
Modèle de Pratt

Variation latérale de densité

Couches non déformées

Exemple: Variations grande
longueur d'onde, effet thermique
associé à l'expansion océanique

Compensation isostatique: redistribution des masses

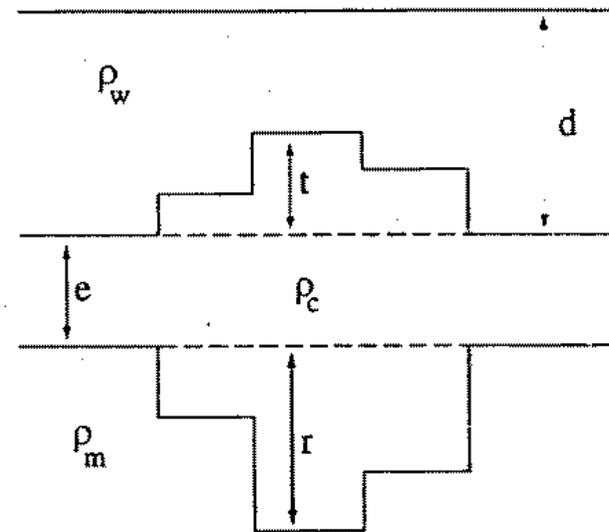


Plaque mince (flexure élastique)

Lithosphère = plaque mince élastique qui se déforme en réponse à la charge

Compensation isostatique régionale

Exemple: régions de monts sous-marins



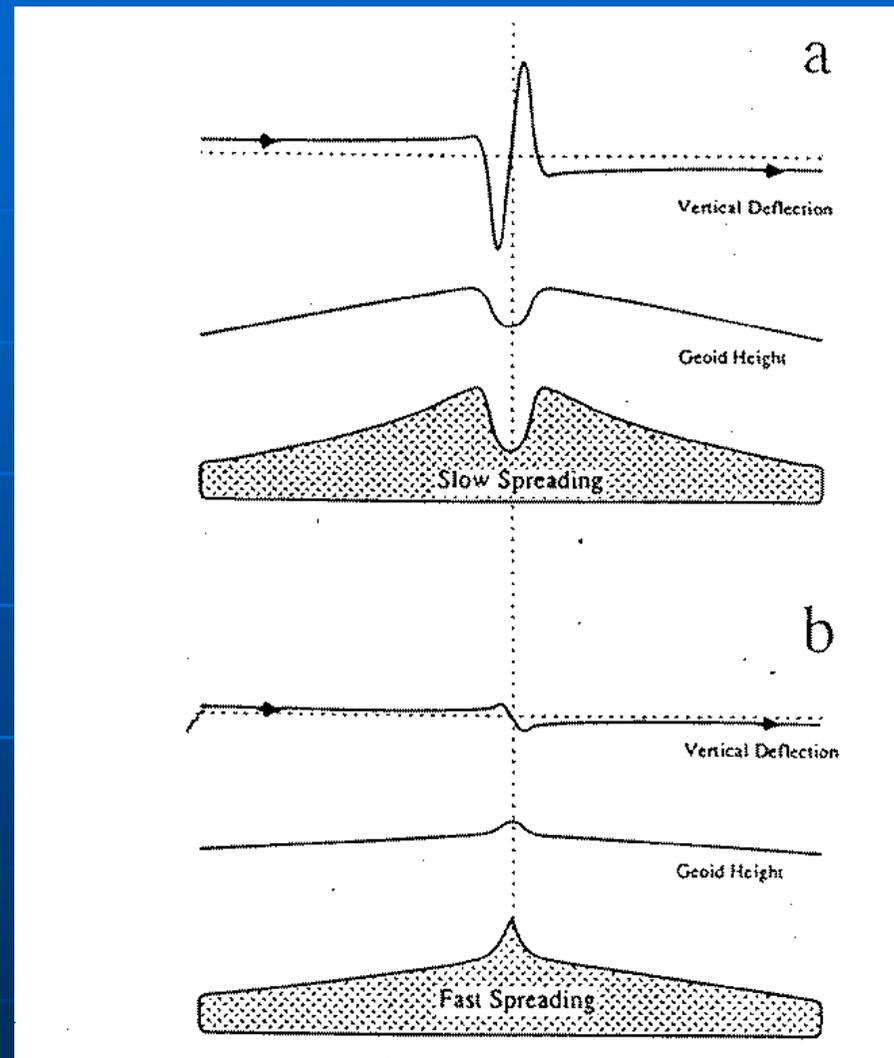
Modèle d'Airy

Compensation isostatique locale

Rigidité flexurale $\Rightarrow 0$

Exemple: Rides asismiques, monts sous-marins proches de la dorsale médio-océanique

Déviations de la verticale et hauteur du géoïde sur une dorsale et suivant le relief attendu (ouverture rapide ou lente)



L'altimétrie satellitaire:

Un complément aux mesures marines

Un élément de validation, de référence à certaines longueurs d'ondes

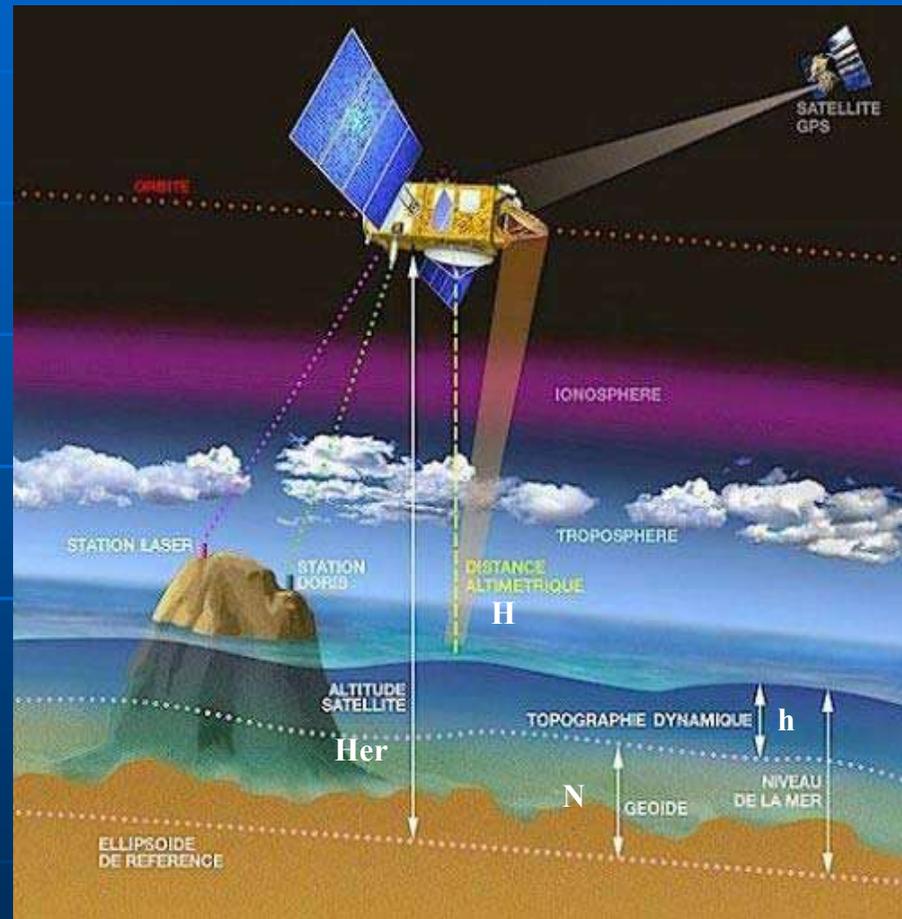
MODÈLES GRAVIMETRIQUES ISSUS DE L'ALTIMETRIE

- Principe de l'altimétrie satellitaire :
 - Mesure de la distance entre le satellite et la surface de la mer (temps aller-retour d'une onde radar réfléchiée à la surface de la mer)
 - Orbite satellitaire connue
 - Géoïde obtenu après diverses corrections (Topographie dynamique)

Hauteur du géoïde (par rapport à l'ellipsoïde de réf):

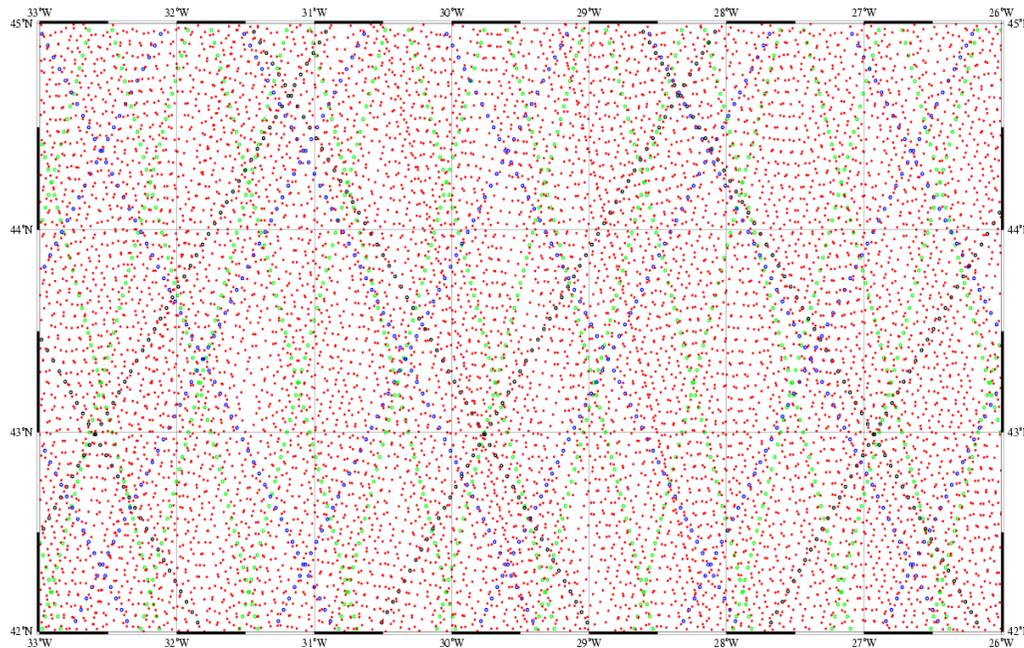
$$N = H_{er} - h$$

- **L'anomalie à l'air libre est déduite mathématiquement de la hauteur du géoïde N (Andersen et Knudsen, 2008) ou de la déviation de la verticale (Sandwell et Smith, 2008)**



⇒ **Exemple**

Profils moyens altimétriques



Espacement moyen des traces : 6 Km

Espacement des mesures le long d'une trace : 7 Km

Précision de 5 mGal pour des longueurs d'ondes minimales de 25 Km

Données altimétriques

• Topex/Poséidon

• GEOSAT

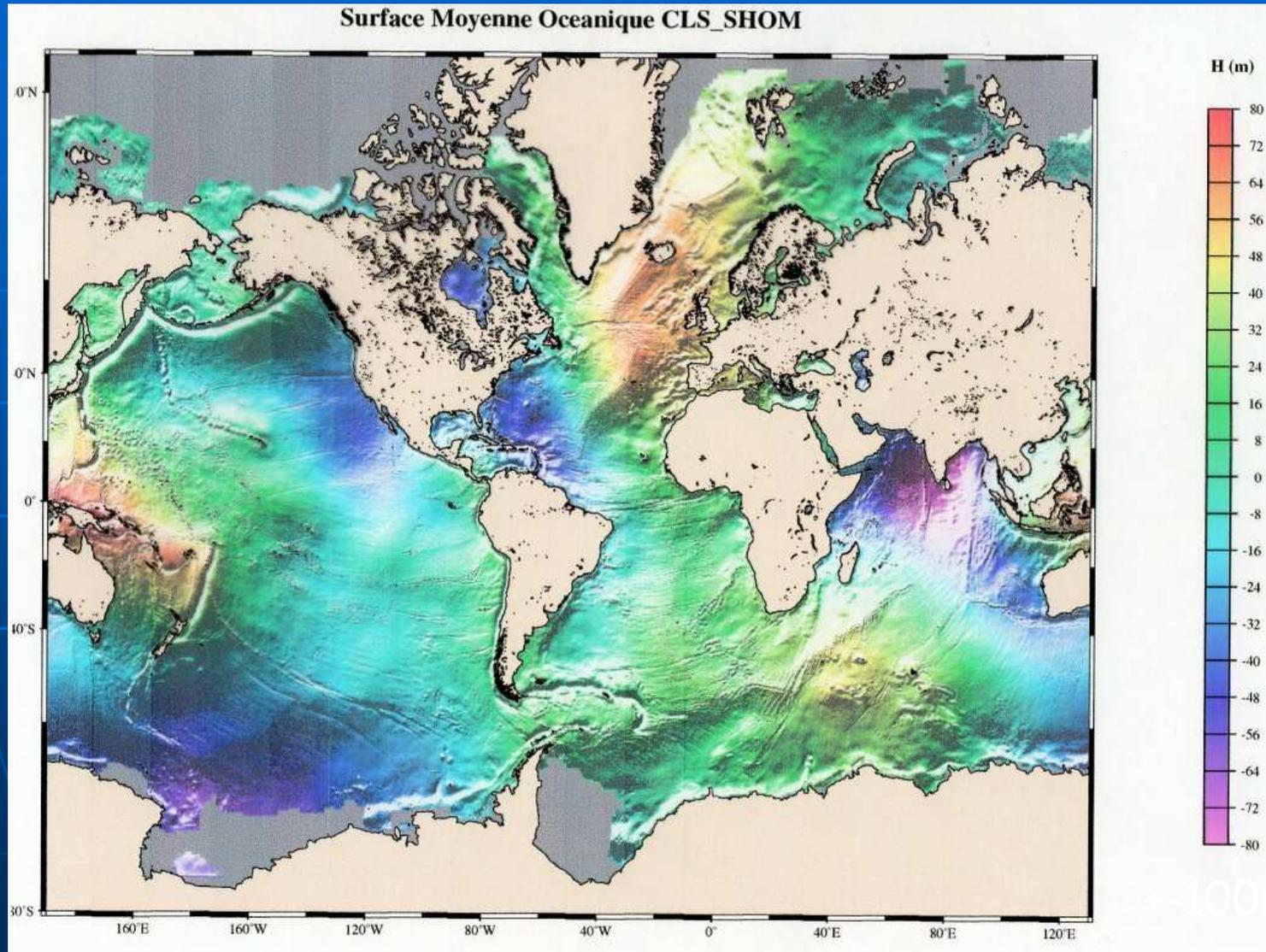
• ERS 1 et 2

• ERS Mission
Géodésique

Surface moyenne océanique - modèle de circulation



Géοide



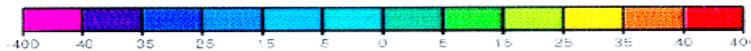
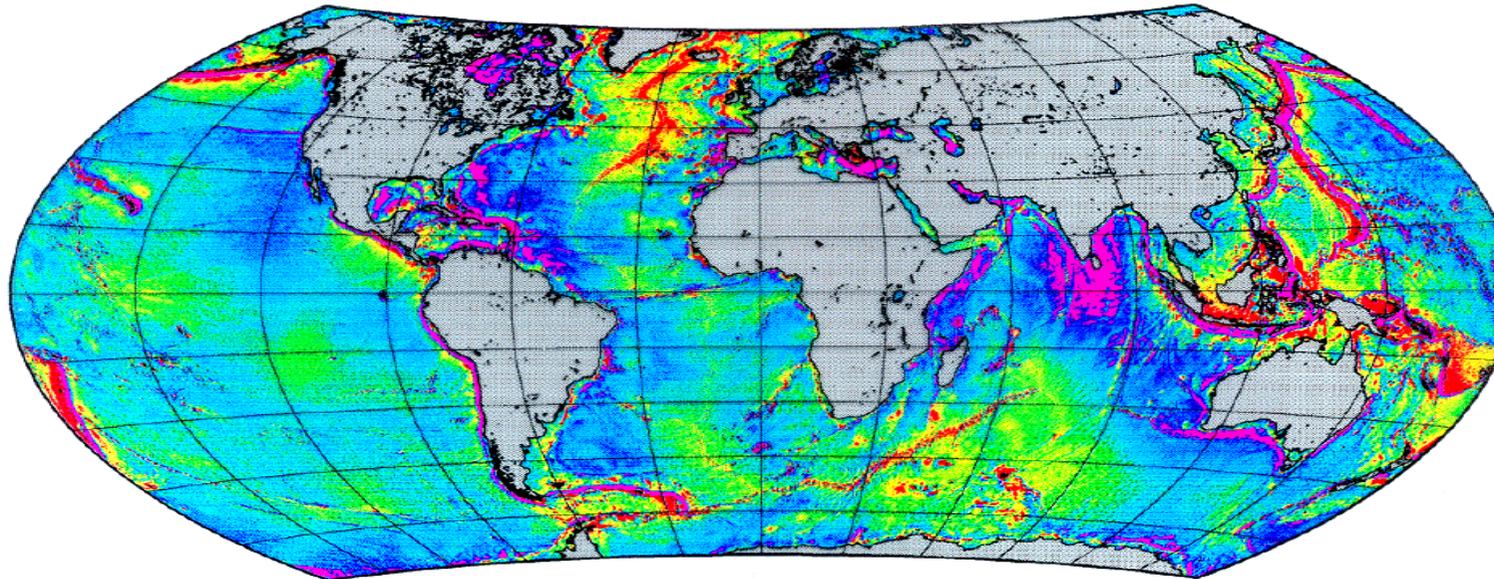
Anomalie: +/- 400 mgal

Figure 3

ANOMALIE A L'AIR LIBRE

Satellites: ERS1-GEOSAT

(Sandwell D.T. et Smith, rapport N°09, NGDC, 1995)



Unités : mGals
Référence : GRS80

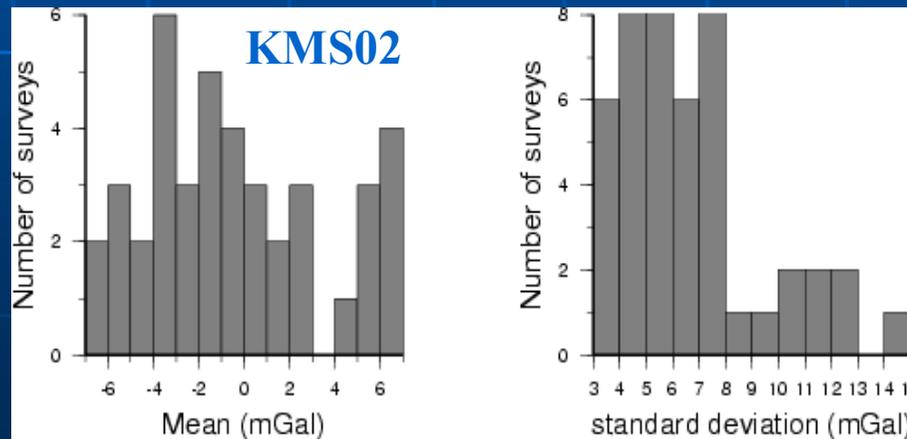
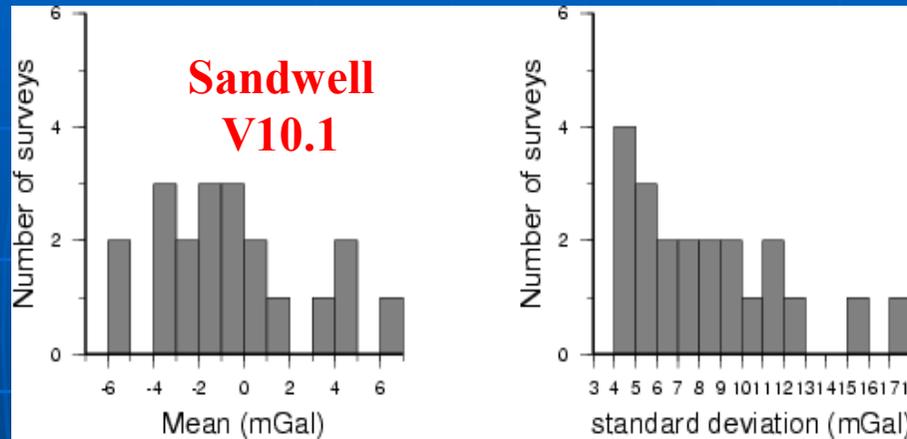
Modélisation du champ de pesanteur

- *Deux sources de données :*
- *Mesures gravimétriques marines : Mesure directe du module du champ de pesanteur*
- *Altimétrie satellitale : Mesure de la hauteur instantanée de l'océan
⇒ SMO approxime le Géoïde*

	Mesures marines	Altimétrie satellitale
Précision	1 mGal	~ 5 mGal
Résolution	Kilométrique ou moins	~ 20 km
Couverture	Éparse	Globale sur les océans

L'amélioration de la résolution nécessite une diminution de l'espacement inter profil donc une augmentation du coût bateau

Comparaison mesures marines et anomalie dérivée de l'altimétrie (1/2)



Moyenne (entre -7 et 7 mGal)
⇒ Les biais entre campagnes

Écart type ($\langle \sigma \rangle = 9$ mGal)
⇒ Erreur en partie liée au modèle dérivé de l'altimétrie dans les courtes longueurs d'onde ($\lambda < 25$ km)

Comparaison mesures marines et anomalie dérivée de l'altimétrie (2/2)

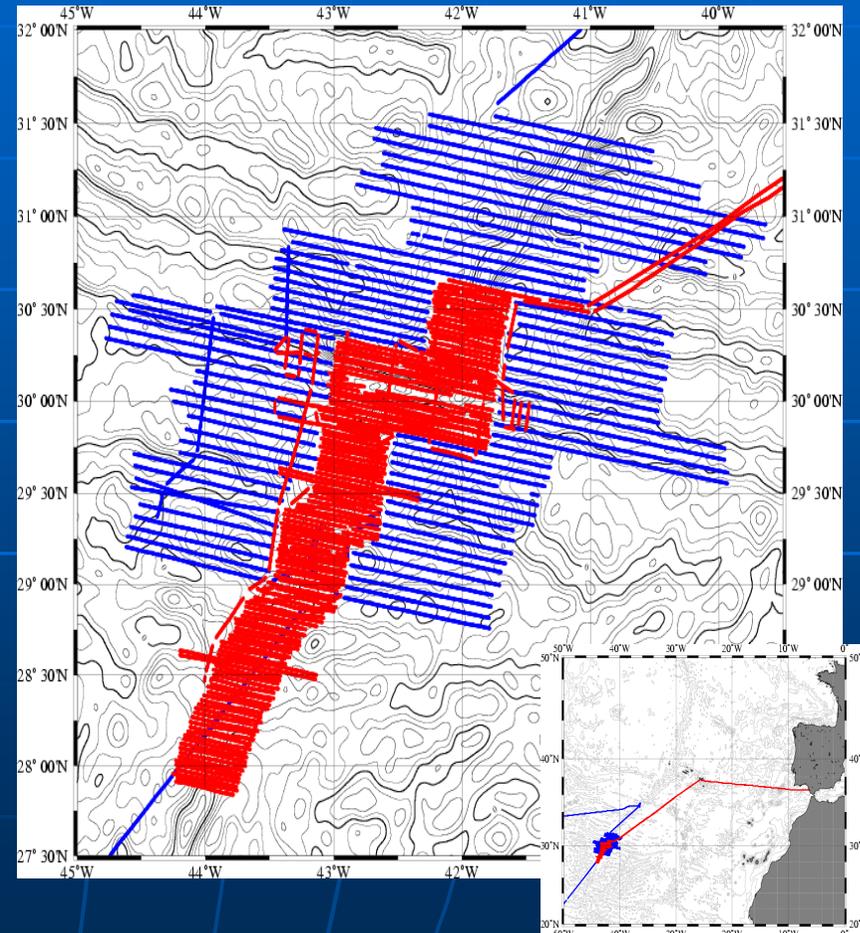
C2912

■ Modèle dérivé de l'altimétrie	■ Moy (mGal)	■ σ (mGal)
■ Sandwell V10.1	■ -13.0	■ 7.9
■ KMS 2002	■ -13.1	■ 7.3

EW9210

■ Modèle dérivé de l'altimétrie	■ Moy (mGal)	■ σ (mGal)
■ Sandwell V10.1	■ 20.6	■ 5.9
■ KMS 2002	■ 20.8	■ 5.2

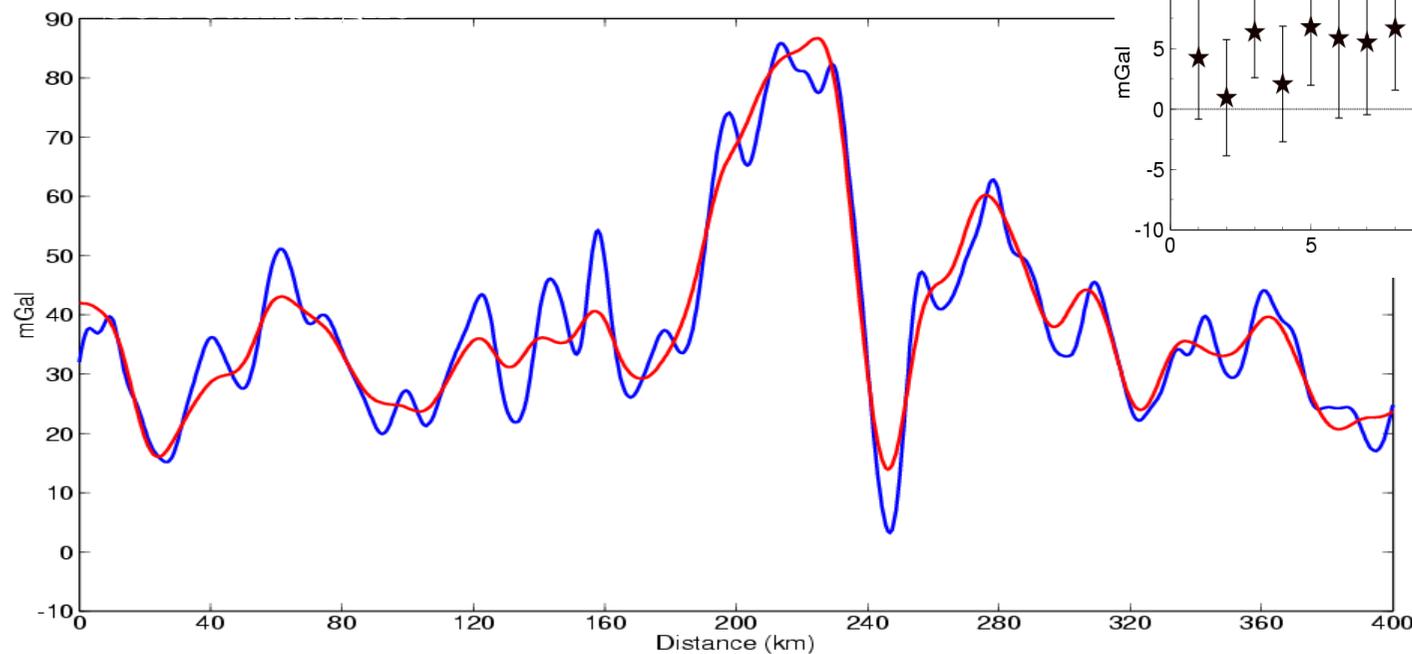
Correction des biais par recalage des campagnes sur un modèle altimétrique



Recalage sur un modèle altimétrique

Deux possibilités :

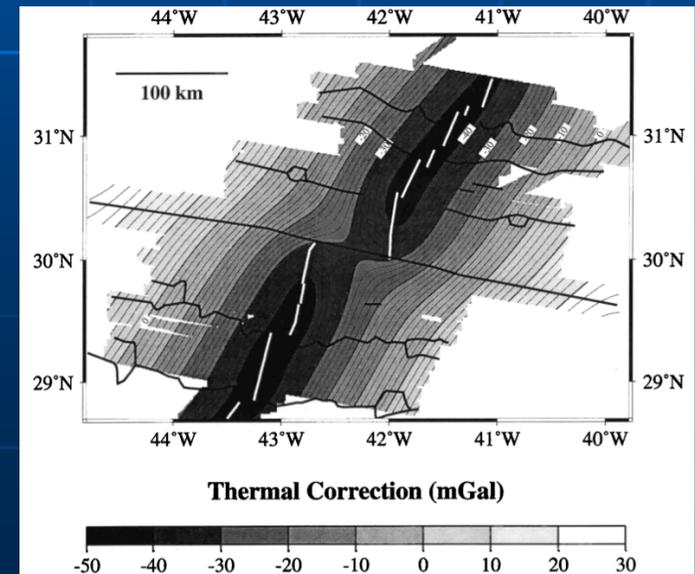
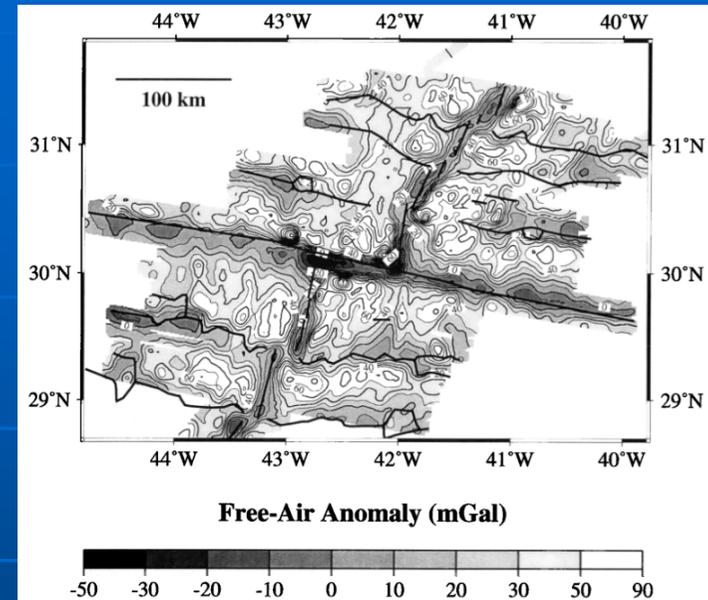
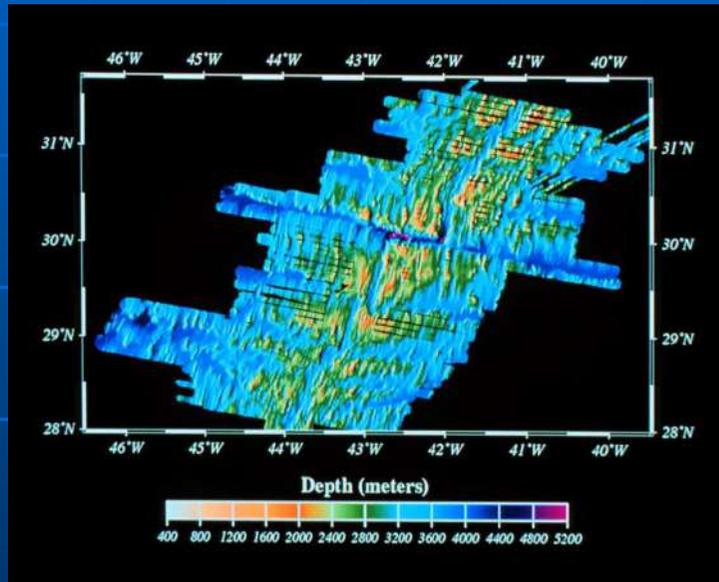
- Soit profil par profil (biais interne, profils > 100km) \Rightarrow suppression des effets de profils

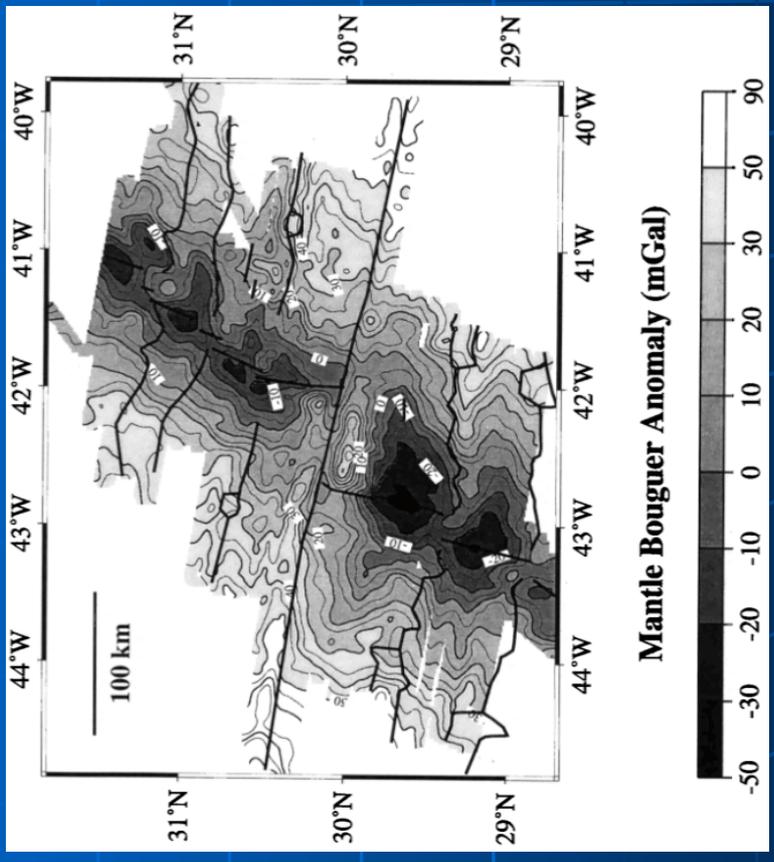
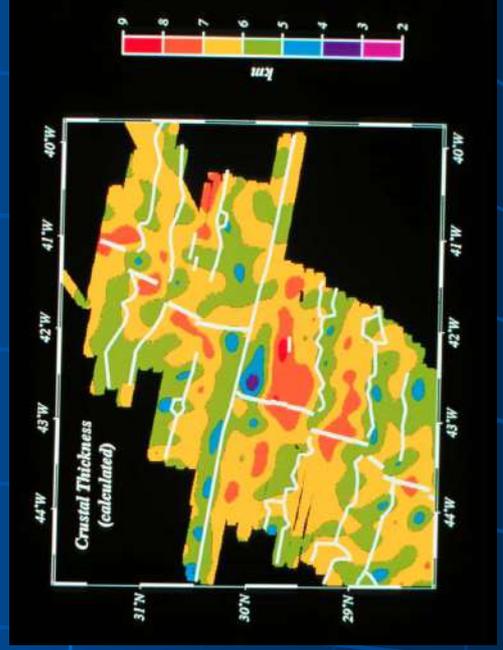
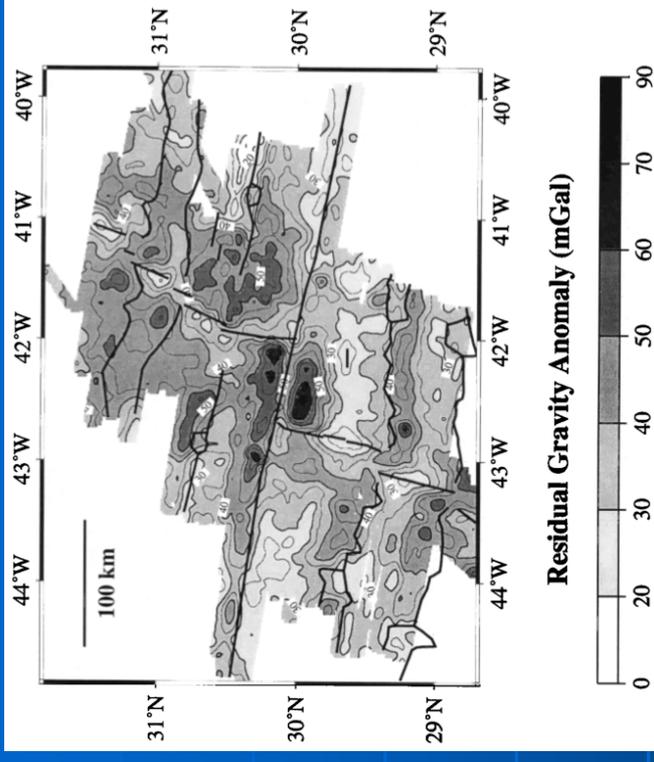


Moy : -7.0 mGal
 σ : 4.4 mGal
Min : -11.0 mGal
Max : 13.8 mGal

\Rightarrow Homogénéisation des campagnes pour intégration dans les modèles globaux

Applications: calcul de l'épaisseur de croûte (Fabrisot et al, 1994)





FUSION DE DONNEES MARINES AVEC UN MODELE ISSU DE L'ALTIMETRIE

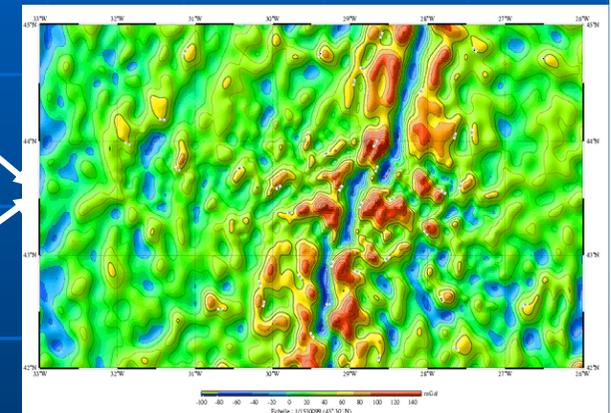
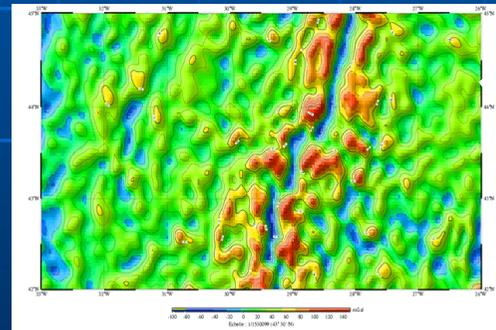
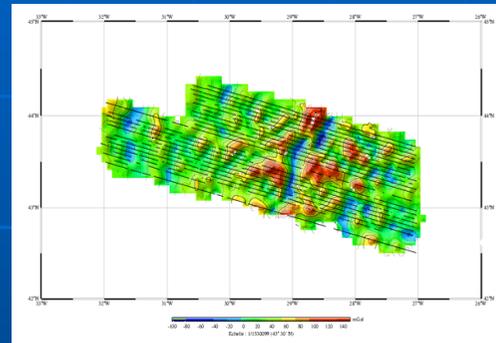
Un exemple:

■ Méthodologie actuelle de fusion de données

Enrichissement du modèle dérivé de l'altimétrie par des mesures

marines
Données marines

- Méthode d'estimation par collocation
- Prise en compte de la répartition spatiale de chaque type d'observations et des erreurs associées
- Compromis entre les 2 sources de données



Modèle altimétrique

CONCLUSION

- Mesures marines essentielles pour les courtes λ
- Compléter par l'altimétrie
- Pose des problèmes de référentiels →
 - Rattachements, minimisation COE
- Apport de GOCE (Un champ homogène jusqu'à 100km en résolution)
- Gravimètres absolus (Atomes froids) embarquables