



EPSHOM
Centre d'Hydrographie
Section Géodésie-Géophysique

GRAVIMETRIE

LES SOURCES D'ERREUR EN GRAVIMETRIE MARINE

MARIE-FRANÇOISE LEQUENTREC-LALANCETTE

Email : lalancette@shom.fr

SOMMAIRE

1. ÉLÉMENTS DE VOCABULAIRE	4
2. UNITÉ	4
3. INTRODUCTION	5
4. ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNÉES MARINES	5
4.1. PRINCIPE DE LA MESURE GRAVIMÉTRIQUE	6
4.1.a. <i>Principe des systèmes à ressorts</i>	6
4.1.b. <i>La calibration</i>	9
4.1.c. <i>Estimation de la dérive</i>	10
4.1.d. <i>La stabilisation des systèmes marins</i>	10
4.2. MISE EN OEUVRE ET TRAITEMENT DES MESURES	11
4.2.a. <i>Les mesures au port</i>	12
4.2.b. <i>Les mesures en route</i>	13
5. LES SOURCES D'ERREURS	16
5.1. SOURCES D'ERREURS POUR DES DONNÉES HOMOGENES	16
5.1.1. <i>Les facteurs d'erreurs pour le gravimètre terrestre</i>	17
5.1.2. <i>Les stations de référence</i>	17
5.1.3. <i>Dérive instrumentale (mesures terrestres et marines)</i>	17
5.1.4. <i>Effet des accélérations parasites (mesures marines)</i>	17
5.1.5. <i>Effet de la localisation</i>	19
5.2. COMPILATION DE DONNÉES D'ORIGINE DIFFÉRENTE	20
5.3. CONCLUSIONS	20
6. CONCLUSIONS	20
7. RÉFÉRENCES	22

ABSTRACT :

Marine gravity measurements are of various accuracies depending on many causes as for example navigation, terrestrial adjustments or drift correction..

Using such data needs a robust method of validation and qualification.

This paper focuses on the vertical measurement systems as the gravity sensor (GSS30) from Bodenseewerk. It analyses the assessment of accuracy due to special marine data processing and explains the precision and spatial resolution ambiguity.

1. ELEMENTS DE VOCABULAIRE

- Station gravimétrique : Une station gravimétrique est un point où la valeur du champ a été mesurée ou bien qui a été rattaché à un réseau gravimétrique.
Les stations sont le plus souvent situées à des points remarquables dans les villes et ports d'escale (aéroports, gares,...).
Synonymes : base, station de base, station de référence, référence.
- Réseau gravimétrique : Il est défini par un ensemble de stations gravimétriques. Le réseau international utilisé le plus souvent par le SHOM est l'I.G.S.N.71 (International Standardization Net 1971). Il comprend plusieurs centaines de stations de précision variable.
Dans le cas d'une station rattachée à un autre réseau (ORSTOM, POSTDAM..) des formules de passage peuvent être appliquées.
- Levé : Ensemble de mesure réalisée consécutivement. En général un levé est séparé par deux escales au port.
Synonymes : campagne de mesure, mission.
- Donnée : Une valeur d'anomalie à l'air libre ou de champ de pesanteur résultant du traitement d'une mesure.

2. UNITE

Par souci de normalisation, les unités utilisées seront exprimés dans le Système International d'Unités SI.

L'unité gravimétrique est alors le μms^{-2} .tel que: $1 \mu\text{ms}^{-2} = 10^{-6} \text{ms}^{-2}$

Pour mémoire le mGal ($1\text{mGal} = 10 \mu\text{ms}^{-2}$) encore utilisé, tend en pratique à disparaître.

3. INTRODUCTION

La compilation de données gravimétriques en vue de la réalisation de cartes et leur intégration à une base de données nécessitent la détermination d'une méthode de qualification normalisée.

Quelle que soit la méthode de réalisation de la carte (modèle maillé régulier, krigeage, splines, triangulation...), la difficulté d'intégration et de traitement de ces données réside essentiellement dans leur qualité, leur répartition spatiale souvent peu homogène et leur validation. Deux paramètres sont donc essentiels à la qualification d'une carte, la résolution et la précision.

La précision peut être évaluée à partir d'un bilan d'erreur globale et par l'analyse des écarts aux points de croisement des profils ou aux points très proches.

La résolution peut être déduite de la répartition spatiale des données dans la zone géographique étudiée.

Ce rapport décrit les étapes de l'acquisition et du traitement en gravimétrie marine et les sources d'erreurs potentielles nécessaire à la réalisation du bilan d'erreur.

4. ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNEES MARINES

Les données de gravimétrie océanique utilisées pour la réalisation des cartes proviennent d'origines différentes (SHOM ou autres organismes. Elles peuvent être extraites soit des bases de données mondiales gérées par les U.S.A. (National Geophysical Data Center) ou par la France (Bureau Gravimétrique International) soit par les bases de données des organismes eux-mêmes (IFREMER , British Geological Survey..).

L'acquisition et le traitement des mesures marines se déroulent en plusieurs étapes :

1. Rattachement du gravimètre marin à une station terrestre
2. Mesures à la mer
3. Estimation de la dérive
4. Applications des corrections
5. Calcul du champ de pesanteur
6. Calcul de l'anomalie à l'air libre

A chaque étape des erreurs peuvent apparaître selon le type de capteur, la mise en oeuvre des mesures, les références adoptées ou les corrections non ou mal appliquées.

Le principe de l'acquisition des mesures sera détaillé pour les systèmes à ressort ceux-ci étant les plus utilisés en milieu marin

4.1. Principe de la mesure gravimétrique

Les mesures sont réalisées à l'aide de gravimètres relatifs (mesure d'une des grandeurs de l'accélération, temps ou distance) et basées soit sur une méthode dynamique (mesure du temps d'oscillation d'un capteur en mouvement) soit sur une méthode statique (mesure de la variation d'équilibre d'un capteur maintenu par des forces élastiques).

Ces appareils ne mesurent pas la valeur absolue du champ de pesanteur mais la différence de pesanteur entre deux points (Δg). Si en un point la valeur absolue du champ de pesanteur est connue (on l'appelle station de référence ou base), on peut alors calculer la valeur en l'autre point.

Les gravimètres les plus couramment utilisés sont principalement les gravimètres à ressort et pour une moindre part les gravimètres à cordes vibrantes (MIT, VSA, réf. 4) et à accéléromètres (Bell, BGM5, [5]).

Par la suite nous traiterons des systèmes à ressort comme le gravimètre terrestre Worden et les gravimètres marins de la série des KSS et de leur mise en oeuvre avec des systèmes anciens à fléau (KSS5) soit avec des systèmes de mesures verticaux (KSS30-31).

3.1.a. Principe des systèmes à ressorts

Un capteur très sensible à la variation de du champ de pesanteur, une masse équilibrée par ressort vertical par exemple, peut servir de gravimètre. La force de pesanteur exercée par la masse m varie avec le champ et celui-ci peut être déduit de la loi d'allongement du ressort qui, à l'intérieur d'une plage assez faible, est linéaire :

$$g = pl + q \quad (g : \text{champ de pesanteur})$$

où l'allongement l est lu sur une mire graduée. Les coefficients p et q sont déterminés par étalonnage sur des bornes gravimétriques A et B où le champ de pesanteur est connu (figure 1) :

$$g = g_A + \frac{g_A - g_B}{l_A - l_B} (l - l_A)$$

$$d'où \quad \frac{g - g_A}{g_A - g_B} = \frac{l - l_A}{l_A - l_B} = \frac{\Delta g}{\Delta g_0}$$

Deux de ces bornes sont suffisantes pour étalonner le ressort. Mais les ressorts sont peu fidèles et, si le facteur d'étalonnage p est constant, q varie avec le temps et la droite d'étalonnage est translatée : le gravimètre dérive. La dérive Δq est déterminée périodiquement en " fermant " les mesures sur le point de départ (figure 2).

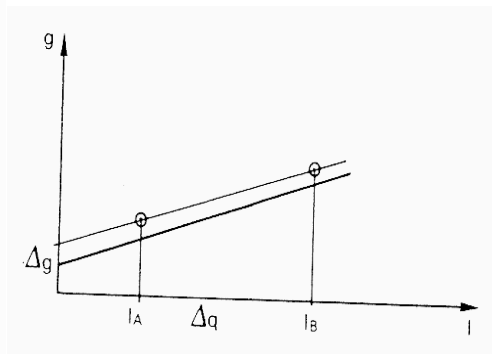
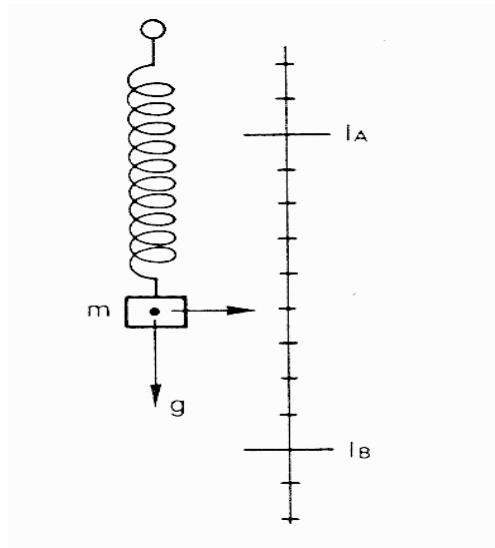


Figure 1 : principe du gravimètre à ressort (réf. 3) Figure 2 : Dérive de la droite d'étalonnage (réf. 3)

Compte tenu de la précision recherchée, la gamme de l'appareil est généralement limitée à quelques centaines de μms^{-2} ; il importe de pouvoir le centrer sur la valeur moyenne de g dans la zone du levé. Le ressort est centré à l'aide d'un ressort de "changement de zone" qui n'a pas la sensibilité du ressort de mesure et ne peut pas être étalonné pendant une campagne, entre le départ et la fermeture.

Le schéma ci-dessus est très simplifié et, dans la pratique, le capteur est enfermé dans une enceinte thermostatée, amagnétique et sous vide partiel. Les signaux délivrés sont traités à travers une chaîne de mesure et enregistrés sous forme numérique et analogique.

4.1.a.1. Système de mesure terrestre (gravimètre à quartz Worden)

Cet appareil dispose d'un capteur en quartz très sensible et très fidèle à la valeur de g (figure 3).

L'élément sensible est un fléau constitué d'une masse portée par un bras de levier fixé à un arc. Le déplacement du fléau par la variation de pesanteur est compensé par un système de ressorts.

L'état zéro est défini par la tension initiale du ressort. Cette tension varie avec le champ de pesanteur. Le fléau est contenu dans une enceinte sous vide partiel et maintenu à température constante.

La précision est de l'ordre de $0,001 \mu\text{ms}^{-2}$ et la gamme de mesure d'environ $2\,000 \mu\text{ms}^{-2}$.

Cette gamme peut être choisie à volonté par l'opérateur à l'intérieur de la plage de fonctionnement (entre $9\,780\,000$ à $9\,830\,000 \mu\text{ms}^{-2}$ environ). Toutefois, à moins de disposer d'un équipement spécial, le changement de gamme se fait par un réglage grossier. Les mesures précises ne sont alors possibles qu'à l'intérieur d'une même gamme, à moins d'assurer un recouvrement entre les gammes. Il ne faut donc pas changer de gamme en cours de mesures.

Son faible encombrement (hauteur de 36 cm, diamètre de 18 cm) et son poids (4,4 kg net ; 8,2 kg avec la caisse de portage) permettent de le déplacer facilement.

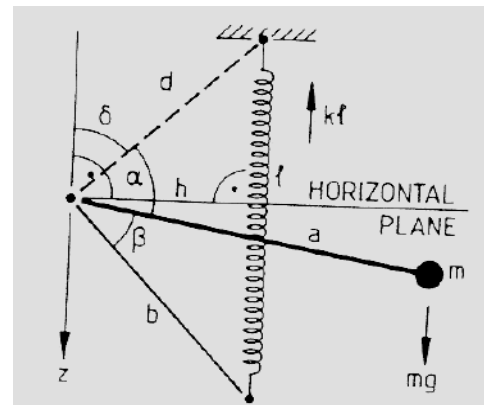
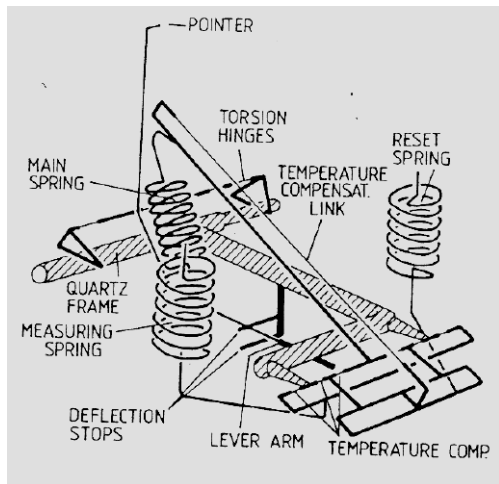


Figure 3 : a) Coupe du gravimètre Worden (réf. 3)

b) Principe de mesure du Worden (réf. 3)

4.1.a.2. Système marin de mesure à fléau

Dans le cas du gravimètre KSS5 (figure 4), l'élément sensible est un fléau suspendu au voisinage des extrémités par une paire de ressorts hélicoïdaux horizontaux dits ressorts principaux, dont la torsion initiale l'équilibre approximativement. Des fils tendus empêchent ses déplacements latéraux et définissent son axe de rotation.

Sa position d'équilibre est réglée en agissant sur la tension de l'un ou l'autre des petits ressorts à l'aide de commandes dont les graduations constituent un repère du couple appliqué au fléau et peuvent être étalonnées en μms^{-2} . Le fléau est asservi à rester horizontal et les variations de g sont détectées de façon indirecte en comptant le nombre de tours de moteur d'asservissement pour ramener le fléau en position de référence.

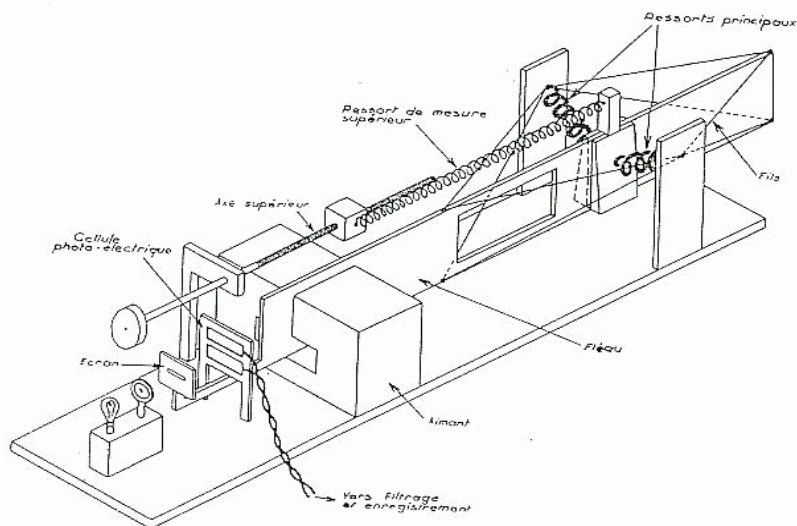


Figure 4 : Élément sensible du gravimètre KSS5 Askania (ref. 6)

4.1.a.3. Système marin de mesure vertical

Le capteur (figure 5) est une masse fixée à un tube qu'un jeu de fils et de ressorts astreint à ne se déplacer que parallèlement à lui-même. Le tube est suspendu par un ressort qui fournit la force antagoniste principale. Une variation de pesanteur entraîne un déplacement du tube qui est mesuré par un capteur capacitif placé à la partie supérieure. Une tension commandée par un asservissement proportionnel, un asservissement intégral et une compensation de température alimente alors une bobine solidaire de la masse qui se déplace dans l'entrefer d'un aimant permanent. La force ainsi produite ramène la masse à la position de référence. La tension est transformée en fréquence. Le signal est alors numérisé et traité par l'unité ZE 30. Le capteur est placé dans une enceinte thermostatée, pressurisée et protégée contre les champs magnétiques.

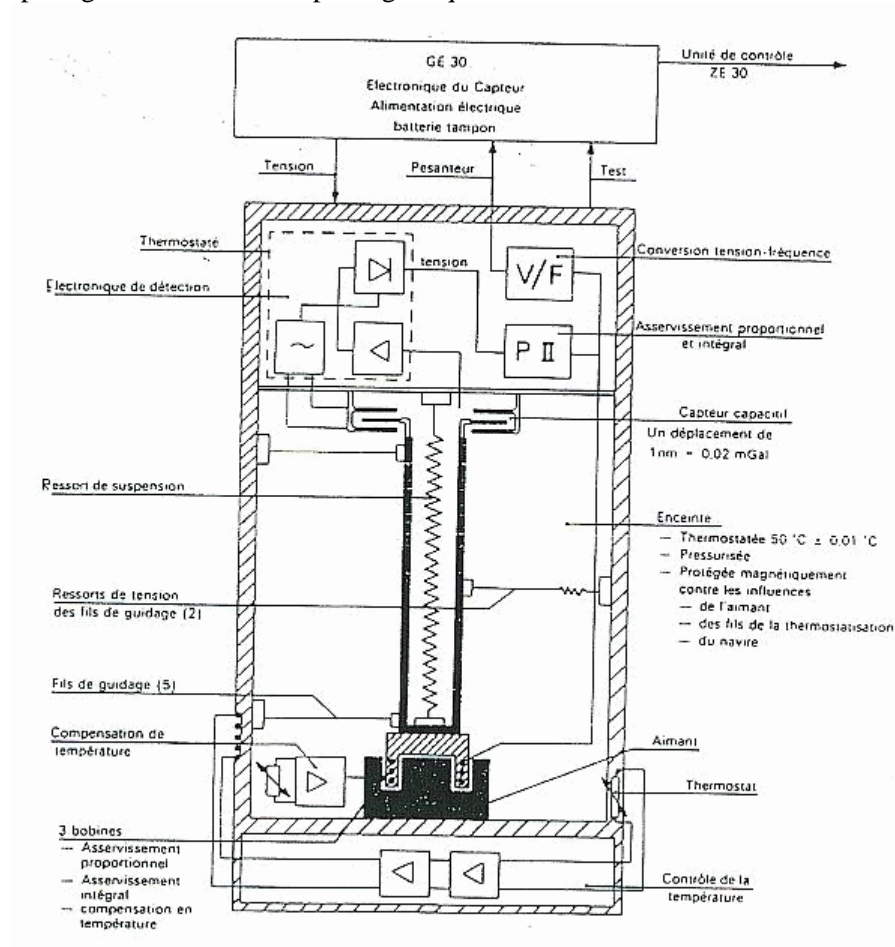


Figure 5 : Capteur GSS30 du KSS30 et 31 (réf. 6)

4.1.b. La calibration

La calibration sert à déterminer et/ou à contrôler les constantes mécaniques et électroniques du gravimètre du capteur, du mode de stabilisation (gravimètre marin) et de l'électronique associée.

Il est nécessaire de connaître la fonction de calibration d'un gravimètre pour convertir la mesure en unité gravimétrique. Cette fonction est modélisée par une somme de termes polynomiaux (de bas degré) et de termes temporels périodiques. Les paramètres du modèle sont calculés par comparaison avec des variations du champ de pesanteur connues.

Le constructeur fournit une fonction de calibration approchée à partir de mesures faites en laboratoire et sur le terrain.

Le facteur d'étalonnage correspondant à cette fonction peut avoir des erreurs relatives de 10^{-3} à 10^{-4} . Ainsi l'utilisateur doit calculer le coefficient correctif de la fonction, à la réception mais aussi à chaque modification du système (panne, réparation mécanique..).

En laboratoire, les variations de pesanteur sont simulées et comparées avec la lecture du gravimètre (calibration par masse additionnelle pour les KSS30 et 31 par exemple). Ceci ne permet pas d'approcher avec suffisamment de précision le facteur linéaire de calibration. C'est pourquoi il faut utiliser des mesures à des points de référence où la pesanteur est connue. Les points sont choisis de telle sorte que la variation observée de la pesanteur soit assez grande (plusieurs centaines de μms^{-2}).

Plusieurs tâches sont réalisées au cours d'une phase de calibration :

Durant une campagne de mesures avec des stations de rattachement suffisamment éloignées les unes des autres :

- Détermination du coefficient d'étalonnage (se réalise en pratiquant les mesures en des stations de référence par exemple).

En laboratoire (cas idéal) ou à défaut au port :

- Test de calibration (masse additionnelle pour le KSS30 et 31) ;
- Test de verticalité (test de paraboles sur les gravimètres marins de la série de Bodenseewerk) nécessaire pour contrôler que la mesure se fait le long de la verticale).

4.1.c. Estimation de la dérive

La dérive du gravimètre est due à la fatigue des composants du gravimètre et à l'influence de causes externes (variation de pression, température.. mal compensées ou corrigées).

L'enregistrement de la dérive d'un gravimètre peut présenter des sauts de $1\mu\text{ms}^{-2}$ ou plus, une partie stationnaire due au ressort et aux variations de pression et de température à longue période et une partie "opérationnelle" due aux effets du transport (chocs, variations de température sur des courtes périodes ..).

La valeur de la dérive est généralement estimée en comparant les mesures aux stations de référence où le champ de pesanteur est connu (le plus souvent dans les ports au moment des escales ou en fin et début de mission).

Si l'intervalle de temps est suffisamment court entre deux mesures de référence (2 à 3 semaines) et si la dérive observée est compatible avec les normes du constructeur, on suppose que la dérive est linéaire par rapport au temps et on peut ainsi interpoler la valeur aux points de mesure. La dérive est généralement de l'ordre de $1\mu\text{ms}^{-2}/\text{jour}$ pour les KSS30 et 31.

4.1.d. La stabilisation des systèmes marins

Le capteur doit être placé sur une plate-forme stabilisée pour compenser les effets du mouvement du bateau.

De plus l'ensemble de mesure est normalement installé au point tranquille du bateau (point d'intersection entre les axes de roulis et de tangage).

La stabilisation se fait à l'aide d'une plateforme gyrostabilisée dans la plupart des systèmes récents.

Dans le cas du gravimètre KSS30 (figure 6) de chez Bodenseewerk, le capteur est fixé à la plate-forme stabilisée KT 30 asservie à la direction de la verticale fournie par le gyroscope K 30. Le gyroscope est solidaire du navire. Son érection est contrôlée par un dispositif comprenant deux accéléromètres horizontaux. Les effets sur l'asservissement des accélérations parasites dues à la rotation de la Terre et aux évolutions éventuelles du navire sont calculées en fonction du cap, de la vitesse et de la latitude par l'unité ZE 30 qui corrige les signaux des accéléromètres et commande les asservissements du gyroscope. Les mouvements en roulis et tangage du navire sont mesurés sur les deux axes horizontaux

de la suspension du gyroscope. Les signaux correspondants alimentent les asservissements de la plateforme (figure 6). En cas de perturbation le capteur peut être bloqué manuellement ou automatiquement.

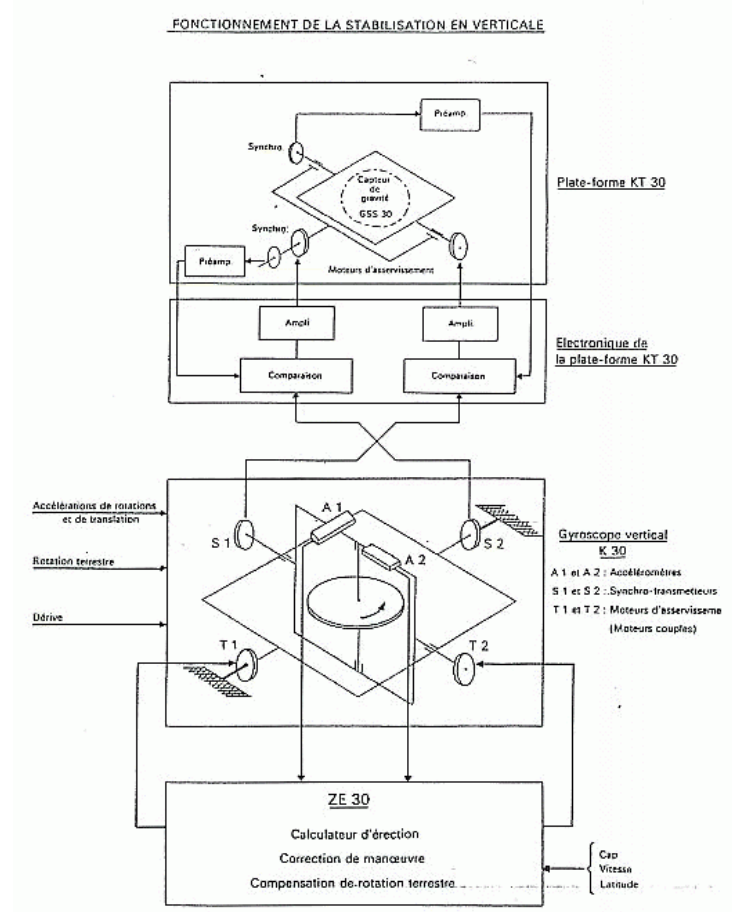


Figure 6 : Fonctionnement de la stabilisation en verticale (réf. 6)

4.2. Mise en oeuvre et traitement des mesures

L'exploitation des mesures gravimétriques suppose un rattachement à un réseau de stations de base. On a alors si g est le module du champ de pesanteur :

$$g_{\text{mesuré}} = \Delta g_{\text{mesuré}} + g_{\text{référence}}$$

Une campagne gravimétrique de mesures en mer comprend deux aspects :

- Combinaison de mesures terrestres et marines pour le rattachement
- les mesures marines en opération

4.2.a. Les mesures au port

Le rattachement comporte deux séquences de mesures terrestres et marines (figure 7). Ceci permet de réaliser d'une part le rattachement du gravimètre marin à une station de base où le champ de pesanteur est connu et les corrections de dérive temporelle et d'autre part la réduction des mesures marines au niveau moyen de la mer.

4.2.a.1. Les mesures terrestres

Le calage aux stations permet de faire coïncider la mesure du gravimètre marin avec une valeur du champ de pesanteur.

De plus, les mesures périodiques aux stations permettent le calcul de la dérive temporelle du capteur principalement due à la fatigue des composants électroniques.

4.2.a.2. Les mesures marines

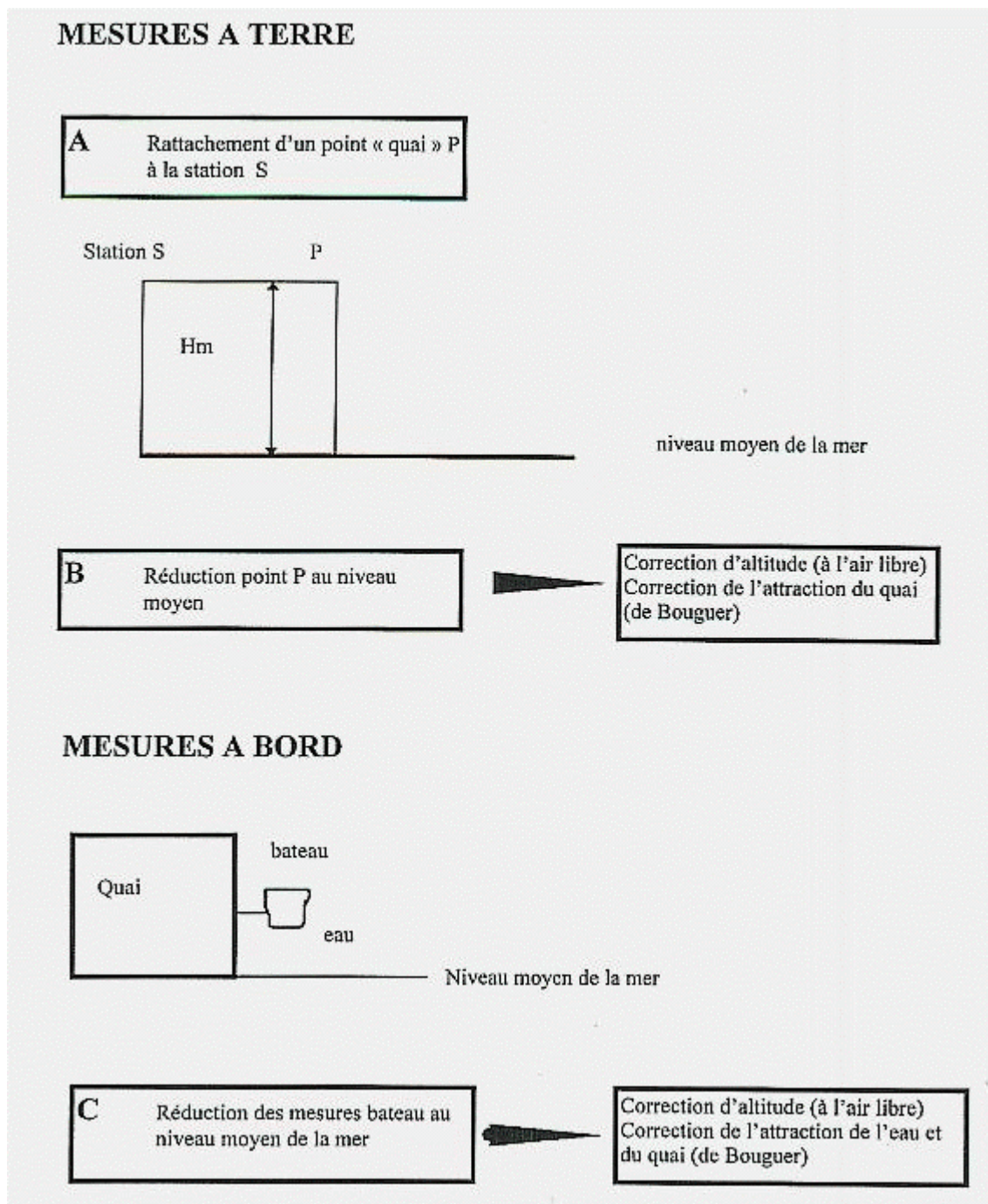
Les mesures marines sont acquises conjointement à des mesures bathymétriques et des tirants d'air, pendant la durée de l'escale.

- La marée est utilisée pour ramener les mesures instantanée à un niveau de référence (d'habitude le niveau moyen ou à défaut le niveau de mi-marée.
- Les tirants d'air servent à corriger l'effet perturbateur du quai.

Une durée minimum de 48 heures est recommandée lorsque cela est possible.

On détermine ainsi la pesanteur moyenne ramenée au niveau moyen des marées observées pendant le temps de la mesure. La figure 7 résume les différentes étapes du rattachement.

Figure 7 : Principe du rattachement des mesures gravimétriques marines (A, B, C, d'après réf. 10)



4.2.b. Les mesures en route

L'acquisition se faisant sur un mobile, il est nécessaire de prendre en compte et de corriger les accélérations parasites générées par le mouvement du support.

Quelque soit la technologie employée, les mesures sont effectuées le long de la route d'un bateau à une cadence donnée. On peut écrire que la mesure g est telle que :

$$g = g(v,t), v \text{ étant la vitesse du bateau et } t \text{ le temps d'acquisition.}$$

De la même manière les accélérations perturbatrices pouvant être enregistrées s'écriront : $a = a(t)$. Celles-ci dépendront principalement des conditions de mesures (état de la mer ...), du contrôle de la plate-forme (navigation) et du principe de stabilisation (agencement du capteur et de la plate-forme).

Les accélérations verticales se rajoutent directement à la mesure alors que les accélérations horizontales perturbent le système d'une manière plus ou moins importantes.

4.2.b.1. Effet des accélérations parasites (mesures marines)

Les accélérations autres que celle de la pesanteur pouvant affecter la mesure en mer, atteignent parfois des valeurs importantes ($10^6, 10^5 \mu\text{ms}^{-2}$). Ces accélérations sont de plusieurs types : accélérations horizontales et verticales (houle, cross-coupling) et accélérations d'ordre inertielle dues aux mouvement du mobile et de la terre (effet d'Eötvöss).

4.2.b.1.a. Accélérations inertielles

Selon le cap, la vitesse et la position en latitude du bateau, la lecture du gravimètre est affectée d'une erreur. Si le cap est vers l'Est, alors la vitesse du bateau s'ajoute à la vitesse de rotation de la terre générant une augmentation de la force centrifuge et donc une diminution de la lecture de la valeur gravimétrique. Cet effet s'exprime de la manière suivante (figure 8) :

$$E = 75.03 V \cos \phi \sin \alpha + 0.04154 V^2 \text{ (en } \mu\text{ms}^{-2}\text{)}$$

où V est la vitesse fond du bateau exprimée en noeuds

ϕ est la latitude

α le cap

La correction de l'effet d'Eötvöss se calcule à partir des données de navigation.

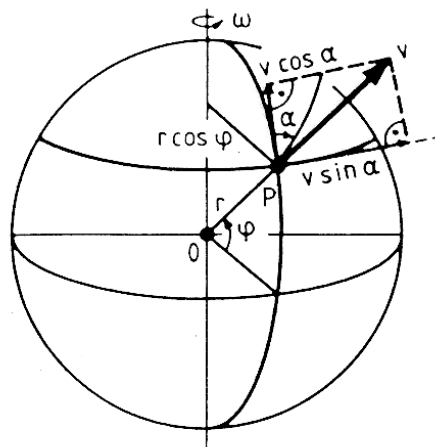


Figure 8 : Effet Eötvöss sur les mesures de pesanteur due au mouvement du bateau

4.2.b.1.b. Accélérations verticales

Notons que ces accélérations ne pourront être filtrées que si elles se situent dans une gamme de fréquence différente de celle que l'on veut mesurer.

Les accélérations verticales de grande amplitude dues à la houle (roulis, tangage, pilonnement) sont d'une part minimisées si le gravimètre est situé au point tranquille du bateau et d'autre part filtrées électroniquement (filtres sea-state du KSS30-31).

le tableau 1 montre les fréquences de coupures des filtres de Bessel des gravimètres Bodenseewerk ainsi que les longueurs d'ondes spatiales filtrées en prenant deux vitesses caractéristiques 5 et 10 noeuds.

Ceci illustre le fait que par mer forte et emploi du sea-state 3 à 10 nds, on ne peut mesurer des variations de longueur d'onde inférieures à environ 1.2 km.

tableau 1

	Fréquence de coupure en Hz	Longueur d'onde en mètre pour $v = 5$ nds	Longueur d'onde en mètre pour $v = 10$ nds	Retard en seconde
sea-state 2 (mer calme)	1/175	437.5	875 m	105
sea-state 3 (mer forte)	1/245	612.5	1 225 m	130
sea-state 4 (mer très forte)	1/471	1177.5	2 355 m	180

La valeur moyenne est correcte si le phénomène est bien linéaire en fonction des variations du champ.

4.2.b.1.c. Accélérations horizontales

Les composantes horizontales des accélérations parasites peuvent induire des phénomènes de dénivèlement de la plate-forme stabilisée, ou de couplage entre oscillations verticales du capteur et accélérations horizontales (cross-coupling, effet Harisson, figure 9).

En particulier, les effets de cross-coupling sont importants sur les gravimètres à fléau. Ils agissent sur le fléau et l'écartent de sa position de mesure.

De plus ces perturbations augmentent suivant l'état de la mer (voir § 4.1.4.b).

Ces effets ont été éliminés avec l'évolution des capteurs gravimétriques privilégiant les systèmes de mesure verticaux (KSS30-31) ou atténués en amortissant les oscillations (KSS5).

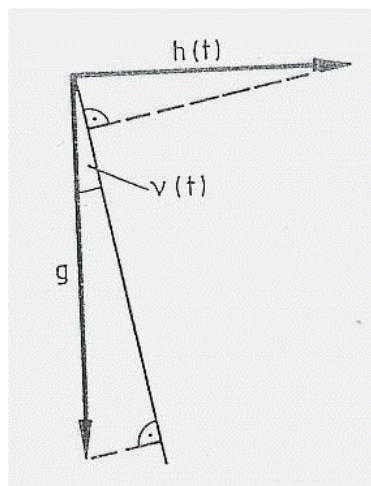


Figure 9 : Défaut de nivellement sur la mesure de pesanteur créé par l'inclinaison résiduelle de la plate-forme $v(t)$ et par l'accélération horizontale $h(t)$ (réf. 3)

4.2.b.2. L'anomalie à l'air libre

Elle est calculée en mer comme étant la différence entre la pesanteur d'un modèle de référence choisi arbitrairement (ellipsoïde de 1930, GRS80, ...) et la pesanteur mesurée.

Une fois la mesure traitée et la valeur du champ de pesanteur obtenue. L'anomalie à l'air libre est calculée.

Les modèles d'ellipsoïdes utilisés ont varié au cours des dernières décennies, selon le modèle choisi les valeurs d'anomalie peuvent donc varier.

On citera la formule utilisée au SHOM référencé à l'ellipsoïde de référence GRS80 (formule de Somigliana) :

$$\gamma_{\text{calculé}} = 9780327. (1 + 0.0053024 * \sin^2 L - 0.0000058 * \sin^2 2L)$$

$\gamma_{\text{calculé}}$ est en μms^{-2} , L est la latitude

5. LES SOURCES D'ERREURS

Deux cas apparaissent lors de la qualification a posteriori, les données peuvent être issues d'une origine commune (même campagne de mesures, même levé) ou diverse (plusieurs campagnes d'organismes différents). Il y a donc une phase d'estimation des erreurs et de validation interne à une campagne et une phase autre de combinaison de plusieurs campagnes et donc des erreurs supplémentaires de calages relatifs par exemple.

5.1. Sources d'erreurs pour des données homogènes

Des données sont considérées comme homogènes, lorsqu'elles appartiennent à une même campagne de mesures.

Les erreurs sur la donnée gravimétrique sont liées soit au capteur soit au mode d'acquisition (mesures marines ou terrestres) ou aux traitements. On peut en distinguer cinq types principaux :

- Les erreurs de référence liées à un mauvais rattachement et dont la cause peut être le capteur terrestre ou la qualité de la station gravimétrique ;
- Les erreurs dues au capteur marin (dérive..) ;
- Les erreurs dues au fait que les mesures soient réalisées sur un bateau en mouvement (accélérations parasites, stabilisation...) ;
- Les erreurs dues à de mauvaises estimations des corrections (dérive, correction d'Eötvöss..) ;
- Les erreurs liées à une mauvaise localisation.

Pour obtenir une valeur de champ cohérente aux points de mesures, plusieurs types de filtrage et de corrections sont appliqués pour éliminer la plupart des erreurs d'appareillage et des erreurs liées aux mauvaises conditions d'utilisation des appareils (dérive instrumentale, dénivèlement) ou simplement des effets parasites comme effet d'eötvöss.

Malheureusement pour de nombreux levés un minimum de corrections est effectué et peu d'informations sont transmises pour l'archivage dans les bases de données ([9]). Nous allons détailler les principales causes d'erreurs liées aux corrections ou simplement aux conditions d'acquisition.

5.1.1. Les facteurs d'erreurs pour le gravimètre terrestre

Le gravimètre portable est un appareil de mesure très sensible. Lorsqu'il subit les vibrations du sol, ces perturbations sont nettement visibles par la vibration même de l'élément sensible. Ces vibrations peuvent être d'origine microsismique (cas sur les îles d'origine volcanique) ou dues à l'état de la mer et du vent qui font vibrer le quai, ou plus simplement un camion qui passe à proximité du point de mesure. Notons que dans ce cas, il suffit d'attendre si-possible l'arrêt des vibrations et de positionner au mieux l'élément sensible pour qu'il vibre autour d'une position d'équilibre.

La présence de perturbations électromagnétiques est susceptible de modifier les mesures. Il faudra donc éviter de réaliser les mesures dans un environnement trop perturbé. Ceci sera visible par la difficulté à stabiliser la lecture.

Afin de déterminer les erreurs majeures de mesures et de corriger d'une dérive éventuelle, il est recommandé de réaliser au moins deux cheminements complets (soit au moins deux aller-retour). On place le point de mesure à quai sur une borne facilement identifiable et durable (bittes d'amarrage, croisée de ligne de chemin de fer,...).

5.1.2. Les stations de référence

La qualité des mesures de référence peut varier de quelques dizaines de kms^{-2} . De plus la maintenance de la qualité des stations dépend des pays où elles sont implantées. Dans certains pays, les stations ont disparu ou des constructions ont certainement changé la distribution des masses environnantes, sans qu'aucune remise à jour des mesures ait été effectuée. La valeur de référence est donc changée et on peut alors la sous ou sur-estimer au moment du rattachement.

La station de base située à Brest présente une précision assez mauvaise puisqu'elle est estimée à $20 \mu\text{ms}^{-2}$.

Tant que les levés sont effectués par rapport à une même référence, la qualité des stations n'affecte que la valeur absolue du champ. L'ensemble du levé sera cohérent.

5.1.3. Dérive instrumentale (mesures terrestres et marines)

L'estimation de la dérive peut être biaisée par une mauvaise qualité des stations de base (voir § 3.1.2.).

Si les mesures aux stations de référence ne se font pas sur des périodes de temps suffisamment courtes alors il se peut que l'hypothèse de la linéarité de la dérive ne soit plus valable. Il faut alors adopter une modélisation différente.

5.1.4. Effet des accélérations parasites (mesures marines)

5.1.4.a. Accélérations inertielles

Des estimations réalisées sur un très grand nombre de données mondiales montrent l'effet de l'amélioration des systèmes de navigation sur la qualité des données traitées (analyse des écarts aux points de croisement; voir figure 10). On note l'apparition du système de navigation transit vers 1967 et l'amélioration continue notamment avec l'utilisation du GPS, de la précision des levés (référence 1).

Ecart type calculés sur les points de croisement et cumulés en mgal

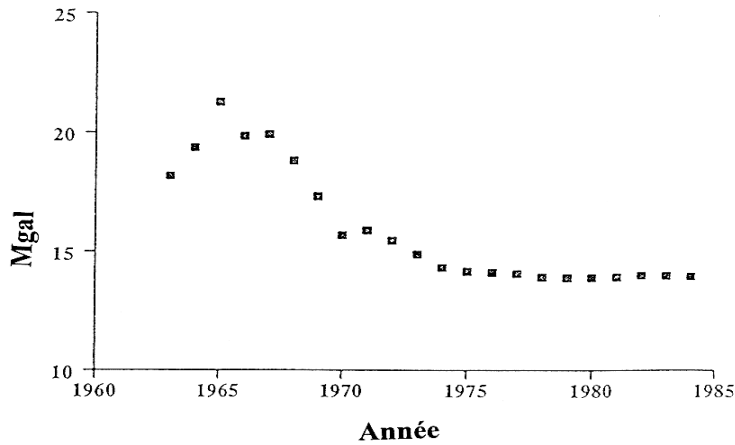


Figure 10 : Représentation en courbe cumulée de l'écart type des différences aux points de croisement De profils issus de campagnes d'organismes divers de 1960 à 1985 (d'après réf 1).

La figure 11 montre l'effet des erreurs sur la vitesse et le cap du bateau sur la correction d'Eötvöss. Dans le cas le plus défavorable c'est à dire lors d'un profil Est-Ouest, une erreur de 1 noeud sur la vitesse et de 1 degré sur la détermination du cap induisent une erreur d'environ $50 \mu\text{ms}^{-2}$ sur l'estimation de l'effet d'eötvöss soit 8 %.

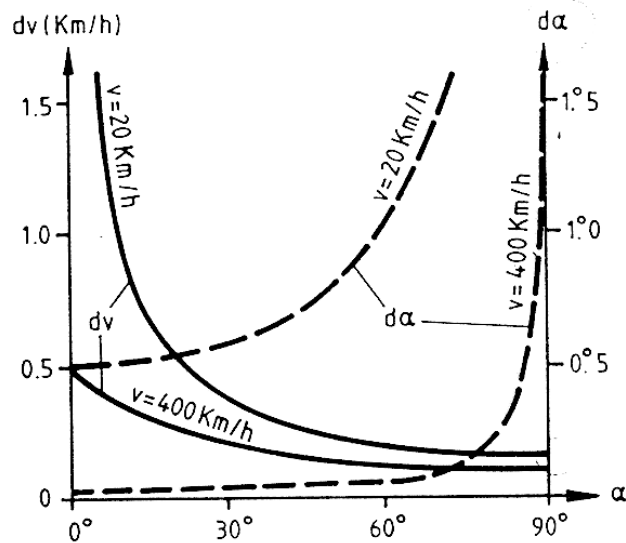


Figure 11 : Précision sur la vitesse et le cap du bateau pour obtenir une erreur sur la correction d'Eötvöss de 0.5 mgal (Rèf 3)

V : vitesse en km/h dv : incertitude
 α : cap en degré $d\alpha$: incertitude

5.1.4.b. Accélération horizontales

Le tableau 2 montre la dégradation de la précision en fonction du type de capteur (effet de cross-coupling notamment voir § 4.2.b.1.c) et de l'état de la mer.

Tableau 2 : Précision de la mesure gravimétrique en fonction du type de capteur et de l'état de la mer ([7] et [8]) en μms^{-2}

	Mer Calme	Mer Agitée	Mer très Agitée
KSS5 (ressort à compensation horizontale)	10	30	inopérant
KSS30 (ressort vertical)	5	10	30

5.1.4.c. Conclusions

Le contrôle de l'ensemble de ces accélérations parasites dépend fortement de trois facteurs, les conditions météorologiques (mer, houle, cross-coupling..), de l'orientation de la route (effet Eötvöss par exemple) et enfin de la localisation (effet Eötvöss...).

Les tableaux 3 et 4 résument les erreurs observées selon le type de gravimètre, l'état de la mer et le système de positionnement ([7],[8],[9]).

Tableau 3 : Précision de la mesure en fonction de la précision ([7] et [8])

Système de navigation	Précision (μms^{-2})
Transit - Omega	20 à 50
Loran C	5 à 10
Toran - Trident - GPS diff	1 à 5

Tableau 4 : Précision de la mesure en fonction du système de navigation et de l'état de la mer([7] et [8]) en μms^{-2}

Système de navigation	Mer calme (0-2)	Mer agitée (3-5)	Mer très Agitée (6-7)
Transit-Omega	30 à 60	35 à 65	45 à 75
Loran-C	15 - 20	20 - 25	30 à 35
Toran-Trident	10 à 15	15 à 20	25 à 30
GPSdiff	10 à 15	15 à 20	25 à 30

5.1.5. Effet de la localisation

Une mauvaise localisation implique outre les mauvaises corrections d'eötvöss, une erreur de positionnement de la donnée et donc une erreur sur la carte résultante.

Une mauvaise navigation peut dégrader un levé gravimétrique, notamment dans les zones à fort gradient comme les monts-sous-marins, les fosses (fosse Nord Gascogne..), les dorsales, le talus. L'erreur sur la donnée sera d'autant plus grande que les variations du champ de pesanteur seront fortes. Désormais avec les systèmes de localisation précis (incertitudes inférieures à 50 m), ces effets sont devenus négligeables par rapport aux effets de filtrage.

5.2. Compilations de données d'origine différente

Lors de la compilation de données d'origine diverse il y a superposition des erreurs internes aux campagnes et des erreurs dues à des références différentes (réseau gravimétrique, modèle de référence de l'anomalie à l'air libre...). On observe des différences entre campagnes que l'on peut plus ou moins bien modéliser ([9]). Une campagne peut ne pas être corrigée de l'effet Eötvöss, ou de la dérive.

Pour ce type de données les erreurs de références (station peu précise) pourront générer des biais importants entre les différents levés.

Dans la phase de validation, certaines campagnes peuvent être utilisées comme référence à cause de leur qualité et du contenu des informations sur les traitements appliqués aux mesures.

5.3. Conclusions

Les sources potentielles d'erreurs sont donc diverses suivant les conditions de mesure (voir tableau 5). Si les corrections évoquées ci-dessus étaient calculées précisément la plupart des erreurs de mesures pourraient être corrigées au moment du levé.

Tableau 5 : Sources d'erreur dans les levés gravimétriques (d'après [1])

SOURCE	ERREURS
Instruments	Sensibilité du capteur Cross-coupling (gravimètres à ressort) Défaut de nivellement Dérive mal corrigée
Navigation	Correction d'Eötvöss incorrecte Défaut de positionnement
Référence	Mauvais rattachement à une station de base Mauvaise utilisation du modèle de référence

6. CONCLUSIONS

L'ensemble des sources potentielles d'erreur sur l'enregistrement du champ de pesanteur en mer décrite ci-dessus peut être contrôlé en partie. En effet, si l'on connaît l'ensemble des informations décrivant l'acquisition (cinématique, réseaux, mode du levé ; ...), il est possible de contrôler si les traitements adaptés ont été réalisés ([9]) ou d'effectuer les corrections appropriées à l'homogénéisation de plusieurs levés (correction de réseau par exemple).

Le tableau 7 montre le type des informations utiles à une validation a posteriori. Ces informations sont le plus souvent demandées lors de la transmission de données vers les organismes d'archivage (BGI, NGDC) les formats de fichiers mgd77 pour le NGDC et EOS pour le BGI en sont un exemple.

Par contre comme c'est bien souvent le cas, les organismes faisant l'acquisition de mesures ne renseigne pas la totalité des champs prévus (voir annexe 1 pour une description complète de ces formats).

La compilation de données gravimétriques nécessite donc l'identification des erreurs en vue de leurs traitements. Malheureusement dans la plupart des cas un bilan global des erreurs sera réalisé à l'aide de traitements statistiques.

Tableau 6 : Exemple d'informations nécessaire à un post-traitement ou à une validation des données a posteriori. Suivant le traitement appliqué sur les mesures et les appellation en vigueur dans chaque organisme, ces informations seront indiquées par profil ou par levé.

Date heure	Type de capteur	Correction de dérive	Correction d'Eötvöss	Corrections diverses Filtrage	Station(s) de rattachement Valeur de g au début et à la fin du levé Description succincte de la ou des stations (numéro de la fiche de référence par exemple pour les levés).	Réseau de référence	Précision de la mesure gravimétrique	Type de localisation et incertitude	Ellipsoïde de référence pour le calcul de l'anomalie à l'air libre
---------------	--------------------	-------------------------	-------------------------	---	--	------------------------	--	--	---

7. REFERENCES

- 1 : Wessel et Watts : 1988, J. Geophys. Res., VO93,B1,pp 393-413
- 2 : Bull du BGI, Decembre 1992, 80 pp
- 3 : Torge W. : 1989, Gravimetry,de Gruyter edts, 465 pp
- 4 : Wing C.G. : 1969, J. Geophys. Res., VO74, pp 5882-5894
- 5 : Bell R.E. et Watts A.B. : 1986, Geophysics VO51, pp 1480-1493
- 6 : Habert : 1984, manuel de l'hydrographe, tome 2, EPSHOM
- 7 : Comolet-Tirman A, 1976 : Mission Hydrographique de l'Atlantique (04/71 à 10/72), Annales hydrographiques, 5ème série, v4, F1, N 743, pp 85-180
- 8 : Boulard M.M., 1991 : Mission Océanographique de l'Atlantique, Annales hydrographiques, 5ème série, v17, N764, pp 57-114
- 9 : Adjaout A., Sarrailh M., 1992, N71, Bulletin du Bureau Gravimétrique International, pp 85-106
- 10 : Le-Quentrec-Lalancette M.F., 1992, N71, Bulletin du Bureau Gravimétrique International, pp 43-54