



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf

Faculté de Génie Mécanique      Département de Génie Maritime

# THÈSE

En vue de l'obtention du  
Diplôme de Doctorat en Sciences

---

Présentée et Soutenue par :  
*DJEBLI Mohamed Abdelkader*

Intitulé  
*Application des Technologies Nouvelles à  
l'Architecture Navale*

---

**Spécialité** : Génie Maritime  
**Option** : Énergétique

Le jury est composé de :

<i>Pr. Mokhtari Abdellah</i>	<i>Président</i>	<i>USTO-MB</i>
<i>Pr. Imine Omar</i>	<i>Rapporteur</i>	<i>USTO-MB</i>
<i>Pr. Belkadi Mustapha</i>	<i>Examineur</i>	<i>USTO-MB</i>
<i>Pr. Mansouri Abdellah</i>	<i>Examineur</i>	<i>ENP Oran</i>
<i>Pr. Meziani Salim</i>	<i>Examineur</i>	<i>UFM Constantine</i>
<i>Dr. Chioukh Nadji</i>	<i>Examineur</i>	<i>UDL Sidi Bel Abbes</i>

Année Universitaire 2015 / 2016

Mon père me disait pour sortir en mer  
« Il faut s'équiper d'une corde et d'une torche »

Moi je dirais à mes enfants pour sortir en mer  
« Il faut avoir en plus un smartphone »

# Remerciements

Je tiens à remercier toutes personnes qui m'ont aidé durant la réalisation de cette thèse. En particulier mon encadreur Pr Imine Omar, Pr Adjlout Lahouari, Pr Hamoudi Benameur, et notre dévoué Chef de Département Docteur Miloud Abdelkrim.

Je tiens aussi à remercier l'administration et le staff du Département de Génie Maritime pour la disponibilité et l'utilisation du laboratoire de stabilité des navires.

En hommage à Steve Jobs (1955-2011)  
L'inventeur, entre autre, du smartphone.

# Table des matières

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	I
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	I
<b>NOMENCLATURE</b> .....	IV
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	V
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	VII
<b>ABREVIATIONS</b> .....	VIII
<b>RESUME</b> .....	IX
<b>ABSTRACT</b> .....	X
<b>ملخص</b> .....	XI
<b>CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
<b>CHAPITRE 2 : L'EXPERIENCE DE STABILITE</b> .....	5
2.1 But de l'expérience.....	6
2.2 Principe.....	6
2.3 Réalisation de l'expérience.....	7
2.4 Procédures de mesure.....	9
2.5 Procédure absolue.....	10
2.6 Procédure relative.....	10
2.7 Expérience du roulis.....	11
<b>CHAPITRE 3 : TECHNOLOGIE DES SMARTPHONES ET DES TABLETTES</b> .....	13

3.1 Les capteurs intégrés dans les smartphones .....	14
3.1.1 Accéléromètre .....	15
3.1.2 Gyroscope .....	16
3.1.3 Magnétomètre (Boussole).....	17
3.2 Types de système d'exploitation .....	18
3.3 Les applications à l'architecture navale .....	18
3.3.1 Le positionnement terrestre Gps .....	18
3.3.2 l'inclinomètre.....	21
3.3.3 Sonomètre .....	21
3.3.4 Magnétomètre .....	23
<b>CHAPITRE 4 : REGLEMENTATION NATIONALE ET INTERNATIONALE</b> .....	<b>24</b>
4.1 Historique des naufrages durant le siècle présent .....	24
4.2 Critère des essais de stabilité.....	28
4.2.1 Modèle de navire.....	28
4.2.2 Détails du modèle.....	29
4.2.3 Les articles MSC 96/26. de l'OMI.....	30
4.2.4 Données de l'expérience.....	32
4.2.5 Calculs effectués .....	32
4.2.6 Résultats définitifs.....	33
4.3 La réglementation relative à la stabilité des navires en Algérie.....	33
<b>CHAPITRE 5 : APPLICATION A L'EXPERIENCE DE STABILITE</b> .....	<b>34</b>
5.1 Banc d'essai.....	34
5.2 Modèle du navire utilisé .....	36
5.3 Caractéristiques des capteurs utilisés .....	40
5.4 Acquisition de données du Smartphone .....	41
5.5 Applications utilisées dans l'expérience .....	42
<b>CHAPITRE 6 : RESULTATS ET DISCUSSION</b> .....	<b>47</b>
6.1 Mesure du module de stabilité.....	47
6.2 Calcul du coefficient $C_r$ .....	50

<b>CHAPITRE 7 : CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS</b> .....	53
<b>REFERENCES</b> .....	54
<b>ANNEXE I. THEORIE DE LA STABILITE DU NAVIRE</b> .....	56
<b>ANNEXE II. CIRCULAIRE DU MINISTERE DES TRANSPORTS</b> .....	60
<b>ANNEXE III. PV DE L'EXPERIENCE DE STABILITE</b> .....	63
<b>ANNEXE IV. EXTRAIT DE LA REGLEMENTATION SUR LA STABILITE A L'ETAT INTACT [IMO 2009]</b> .....	65

# Nomenclature

<i>Latine</i>		Unité
<i>B</i>	Largeur entre membrure	m
<i>BMt</i>	Rayon métacentrique transversal	m
<i>C</i>	Creux au pont	m
<i>Cb</i>	Bloc coefficient	
<i>Cr</i>	Coefficient d'inertie de roulis	
<i>DWT</i>	Port en lourd total	t ou Kg
<i>GM</i>	Module de stabilité	m
<i>KB</i>	La hauteur du centre de poussée	m
<i>KG</i>	La hauteur du centre de gravité	m
<i>LCB</i>	Abscisse longitudinale du centre de poussée	m
<i>LCF</i>	Abscisse longitudinale de la flottaison	m
<i>LCG</i>	Abscisse longitudinale du centre gravité	m
<i>LHT</i>	Longueur hors tout	m
<i>LPP</i>	Longueur entre perpendiculaire	m
<i>T</i>	Tirant d'eau	m
<i>TCG</i>	Ordonnée transversale du centre de gravité	m
<i>TPC</i>	Poids ajouté pour avoir un enfoncement de 1cm	t/cm
<i>VCG</i>	Hauteur verticale du centre gravité	m
<i>Xg</i>	Centre de gravité par rapport au PPAR	m
<i>Grecque</i>		
$\Delta$	Déplacement	t, kg
$\gamma$	Accélération linéaire	m/s <sup>2</sup>
$\theta$	Gîte	rd
$\lambda$	Hauteur du pendule	m
$\rho$	Masse volumique	t/m <sup>3</sup>
$\omega$	Accélération angulaire	s <sup>-2</sup>

# Liste des figures

Figure 1.1 Les 6 mouvements du navire .....	3
Figure 1.2 Les 6 mouvements du smartphone.....	3
Figure 2.1 Stabilographe .....	5
Figure 2.2 Procédure de l'expérience.....	6
Figure 2.3 Pendule de mesure de l'angle.....	7
Figure 2.4 Erreurs rencontrées lors des essais d'inclinaison.....	9
Figure 3.1 Nombre d'utilisateurs de smartphone dans le monde .....	13
Figure 3.2 Architecture d'un smartphone moderne.....	14
Figure 3.3 Capteurs intégrés dans un smartphone.....	15
Figure 3.4 Principe de fonctionnement du capteur.....	15
Figure 3.5 L'accéléromètre en technologie MEMS .....	16
Figure 3.6 Les trois axes du gyroscope avec les angles inertiels .....	16
Figure 3.7 Principe de la mesure de la vitesse angulaire utilisé dans la technologie MEMS .....	17
Figure 3.8 Constellation de satellites en orbite .....	19
Figure 3.9 Principe de fonctionnement du GPS .....	19
Figure 3.10 Navigation Marine avec l'application hors ligne OSMAND <sup>®</sup> .....	20
Figure 3.11 Application de mesure de l'inclinaison.....	21
Figure 3.12 Application de mesure du niveau de bruit .....	22
Figure 3.13 Application de l'analyseur spectral du bruit environnant.....	22
Figure 3.14 Une des applications de boussole .....	23
Figure 5.1 Vue générale du banc d'essai avec le dynamomètre .....	35
Figure 5.2 Vue générale du banc d'essai avec le smartphone.....	35
Figure 5.3 Modèle de chalutier NA8-14 d'Armfield <sup>®</sup> .....	36
Figure 5.4 Courbes hydrostatiques .....	38
Figure 5.5 Vue transversale.....	39
Figure 5.6 Navire de pêche en 3 dimensions.....	39

Figure 5.7 Interface de l'application <i>Clinometer</i> <sup>®</sup> .....	43
Figure 5.8 Interface de l'acquisition des données des 6 degrés de liberté.....	44
Figure 5.9 Position verticale du smartphone sur le modèle du navire .....	45
Figure 5.10 Acquisition du roulis naturel.....	45
Figure 5.11 Analyse spectrale du roulis pour $GM = 27.47\text{mm}$ .....	46
Figure 6.1 $w d / \Delta$ (mm) en fonction de $\tan(\theta)$ .....	48
Figure 6.2 Poids coulissant le long du mât simulant différent $GM$ .....	49
Figure 6.3 Acquisition de données du roulis naturel pour différent $GM$ .....	50
Figure 6.4 Comparaison de la période naturelle de roulis.....	51
Figure 6.5 Loi de Weiss linéarisée .....	51
Figure A. 1. Équilibre d'un navire.....	56
Figure A. 2. Moment de redressement pour les petits angles de gîtes .....	58
Figure A. 3 Courbe de bras de levier $GZ$ .....	65

## Liste des tableaux

Tableau 1 Chavirements majeurs survenus durant le siècle courant.....	24
Tableau 2 Tableau des demis ouvertures en mm du modèle NA8-14.....	37
Tableau 3 Caractéristiques du chalutier BSRA .....	37
Tableau 4 Paramètres de l'expérience .....	40
Tableau 5 Caractéristiques du capteur MPU6050 .....	41
Tableau 6 Angle de gîte du pendule et du Smartphone.....	47
Tableau 7 Comparaison du <i>GM</i> déterminé par les deux méthodes de mesure .....	48
Tableau 8 <i>Cr</i> déterminé par les deux méthodes de mesure.....	52

# Abréviations

BSRA	British Ship Research Association
CSV	Comma separated values
FAO	Food and Agriculture Organisation
FFT	Fast Fourier Transform
GPS	Global Positioning System
GRP	Glass Reinforced Plastic
IMO	International Maritime Organization
ITTC	International Towing Tank Conference
LSB	Least-significant bit
MARPOL	MARitime POLLution
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
MSC	Maritime Safety Comity
PPAR	Perpendiculaire Arrière
PPAV	Perpendiculaire Avant
SOLAS	Safety Of Life At Sea

# Résumé

Durant la présente décennie, l'avènement des technologies nouvelles a un grand impact dans la vie quotidienne. En même temps, on assiste à un apport extraordinaire dans le domaine de l'engineering, du médical et de la recherche scientifique. Dans cette thèse, une énumération des possibilités d'application de ces technologies dans l'ingénierie navale et l'architecture navale en particulier, est présentée. En effet, ces technologies sont intéressantes grâce à la présence dans les smartphones et tablettes actuels de capteurs embarqués, de calculateur intégré puissant, et d'affichage interactif. Les capteurs les plus courants sont : l'accéléromètre, le gyroscope, le magnétomètre, le thermomètre, le baromètre, le GPS et tant d'autre. Les logiciels, appelés application, pour gérer les ressources sont disponibles via le web. Outre ces avantages, ces technologies, ubiquistes et à la portée de tout le monde, en font des outils incontournables pour la recherche, l'industrie. Concurrençant ainsi, certains équipements scientifiques onéreux, lourds et compliqués.

Dans ce contexte, une application du smartphone est appliquée à l'évaluation de la stabilité d'un modèle de navire. Cette étude effectuée au bassin d'essai de stabilité est basée sur la mesure de l'angle de gîte et l'étude spectrale du mouvement de roulis. Le smartphone est monté sur le modèle de navire dans une position précise. Les résultats obtenus démontrent la précision, le confort d'utilisation ainsi que la simplicité de mesure, comparativement avec les méthodes traditionnelles.

**Mots-clés** : stabilité des navires ; GM-Meter; expérience de stabilité; test de la période roulis; smartphone; accéléromètre; gyroscope

# Abstract

The advent of the new technologies during the current decade has a great impact on our daily life. Moreover, the intrusion in the engineering and medical and scientific fields becomes a reality. In This work, a list of possibilities of use such new devices in naval engineering and naval architecture are presented. Indeed, these technologies are interesting thanks to the use of sensors built-in, embedded powerful processor unit, and an interactive display human-machine interface. The current smartphones are equipped with sensors such as: accelerometer gyroscope, magnetometer, barometer, thermometer, GPS, and so on. The software, also called applications, manage the resources, and are available throughout the net. Moreover, these new devices can be an economic tool to perform scientific research and industrial tests.

In this regard, a smartphone application is carried out to assess the ship model stability. This study is carried out in ship stability test; it is based on heel angle measurement and spectral analysis of the model roll motion. In order to measure, the smartphone is mounted in the model in appropriate location. The results obtained show accuracy, easy to use, comparatively to the traditional method.

**Keywords:** ship stability; GM-Meter; inclining experiment; rolling-period test; smartphone; accelerometer; gyroscopic sensor

## ملخص

خلال العقد الحالي، ظهرت تقنيات جديدة لها تأثير كبير في الحياة يوميا. في نفس الوقت، هناك مساهمة استثنائية في مجال الهندسة والأبحاث الطبية والعلمية. في هذه الأطروحة، قد قدمت لائحة إمكانية تطبيق هذه التقنيات في الهندسة و الهندسة البحرية على وجه الخصوص. والواقع أن هذه التقنيات مثيرة للاهتمام بسبب توفرها في الهواتف الذكية والأجهزة اللوحية ذات الأجهزة الحساسة المدمجة، الآلة الحاسبة المتكاملة القوية و العرض التفاعلي. من الأجهزة الحساسة الأكثر شيوعا هي: مقياس التسارع، الجيروسكوب، جهاز قياس المغناطيسية، الترمومتر، البارومتر الجهاز العالمي لتحديد المواقع وغيرها الكثير. البرمجيات التي تدعى التطبيقات من أجل إدارة الموارد متوفرة عبر الإنترنت. بالإضافة إلى هذه المزايا، تعد هذه التقنيات في كل مكان وفي متناول الجميع مما جعلها وسائل بحث قوية في قطاع البحوث منافسة بذلك بعض المعدات العلمية باهظة الثمن والمعقدة.

في هذا السياق، يتم تطبيق الهواتف الذكية لتقييم استقرار نموذج السفينة، من أجل ذلك أجريت الدراسة في حوض اختبار استقرار السفن التي تعتمد في ذلك على قياس زاوية الكعب والدراسة الطيفية لحركة الدلفنة، الهاتف الذكي قد ثبت على متن نموذج السفينة في وضع دقيق فأظهرت النتائج دقة وسهولة الاستخدام وبساطة القياس مقارنة مع الطرق التقليدية.

**الكلمات المفتاحية :** استقرار السفن، GM-متر، تجربة الاستقرار، اختبار الفترة الدلفنة، الهاتف الذكي، مقياس التسارع، جيروسكوب

## **Chapitre 1 : Introduction générale**

Dans le quotidien, il est nécessaire de faire des mesures. En tous temps on interagit avec l'environnement autour, on fait des mesures des grandeurs physiques. Pour cette raison, il est important que les moyens de mesure soient disponibles pour les spécialistes comme pour les personnes non spécialisées. Une mesure est disponible si le système de mesure est accessible et facile à utiliser. Dans une expérience scientifique un système de mesure doit présenter les caractéristiques suivantes : non invasive sensibilité, fiable, lecture facile, archivage et portable. Actuellement, les smartphones permettent de remplir les caractéristiques citées ci-dessous. Les smartphones modernes, sont de plus en plus populaire et leur marché est en expansion continue. Ils permettent la mesure de différentes grandeurs physiques directement à partir de ses capteurs embarqués (Daponte *et al*, 2015), par exemple accéléromètre trois axes, gyroscope trois axes, magnétomètre trois axes, baromètre, capteur de d'intensité de la lumière, etc... En outre, la caractéristique la plus importante est que le smartphone permet le traitement numérique des données provenant de ses capteurs. La capacité de communiquer avec d'autres appareils via des interfaces sans fil, tels que Bluetooth, Wi-Fi et Near Field Communication (NFC). Mais l'interface-homme machine des smartphones (écran tactile) en fait l'un de ses avantages les plus attrayants. Grâce à ces technologies, le smartphone est considéré comme un système de mesure économique, ubiquiste, et prometteur. En outre, l'un des avantages, pour les pays en voie de développement, à l'instar de l'Algérie, est la diffusion des moyens de mesures dans l'industrie et la recherche. Sachant que, le secteur de la recherche, est impotent, notamment, par le manque des équipements de laboratoire. A titre d'exemple, le prix d'un inclinomètre digital de précision coûte deux fois plus que celui d'un smartphone de gamme moyenne. Alors que ce dernière remplit les mêmes fonctions, et intègre d'autres fonctions aussi importantes.

On assiste à un nombre exponentiel d'application de smartphone et tablette, dans plusieurs domaines. On cite, comme exemples, les domaines de l'ingénierie. En

mécanique, les applications sont divers et intéressantes, on cite, les sonomètres, l'analyseur de vibration, la mesure de la distance, le détecteur de métaux, l'inclinomètre, l'application d'aide à la navigation, la mesure de la vitesse d'engin, la mesure des paramètres moteur. En génie civil, on note les sismographes basés sur l'analyse spectrale des accélérations dues aux séismes (Kong, 2015). L'application de ces technologies dans l'architecture navale est pratiquement débutante, hormis les applications de navigation ou de calcul inhérent à l'architecture navale. Cette thèse a pour objectif d'introduire l'application de ces technologies dans le domaine de l'engineering naval. En particulier, l'un de ses sous domaines qu'est la stabilité des navires et de la sécurité des vies en mer. Dans le but de valider l'application des smartphones et tablettes à la stabilité des navires, des expériences sont effectuées au bassin d'essais de stabilité. L'expérience est effectuée sur une maquette de chalutier type NA-18 d'ARMPFIELD™.

Dans ce travail, le but est de mesurer les 6 degrés de liberté, du centre de gravité du navire, avec un smartphone solidaire au navire. L'expérience utilise une application disponible sur Google Store™ Android™.

En effet, lors de l'étude de la tenue en mer des navires, les 6 composants du mouvement (Figure 1.1) doivent être mesurés et enregistrés. Les accélérations linéaires, cavalement, embardée et le pilonnement du navire peuvent être mesurés par un accéléromètre, alors que, les accélérations angulaires roulis, tangage et lacet peuvent être mesurés par un gyroscope. La conversion analogique numérique ainsi que le traitement numérique et la sauvegarde de ces mesures sont disponibles dans les smartphones actuels. La Figure 1.2 montre les mouvements du smartphone obtenus par les capteurs intégrés. Pour mesurer fidèlement les mouvements du navire le smartphone doit en être solidaire.

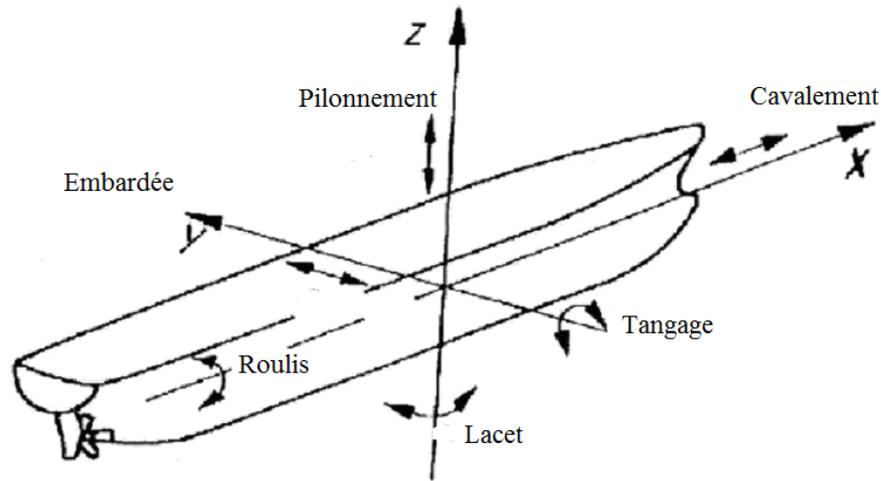


Figure 1.1 Les 6 mouvements du navire

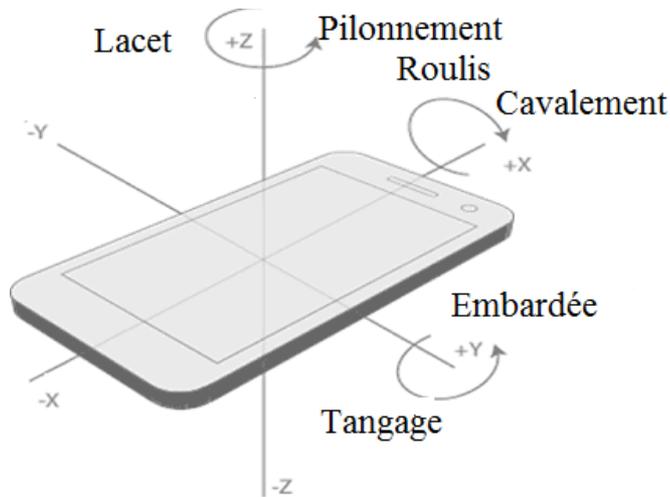


Figure 1.2 Les 6 mouvements du smartphone

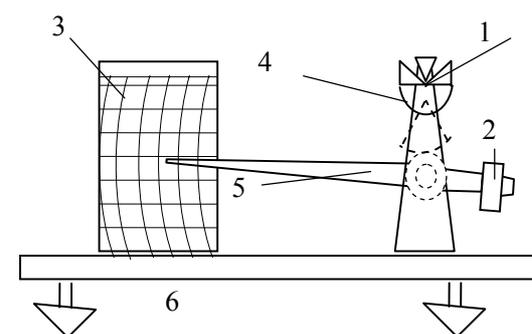
### Organisation du document (Thèse)

Le manuscrit s'articule autour de sept chapitres. Dans un premier temps, la procédure de l'expérience de stabilité est présentée dans le chapitre 2. Le chapitre 3 détaille la technologie des smartphones et tablettes, les utilisations les plus importantes dans l'ingénierie. Le chapitre 4 traite du domaine de la stabilité des navires, de l'état de l'art, de la théorie, des expériences effectuées et de la réglementation internationale et algérienne en la matière. L'application du smartphone à l'expérience de stabilité et au

comportement des navires en mer est exposée dans le chapitre 5. Les résultats et la discussion lors des essais en laboratoire sont présentés dans le chapitre 6. La thèse est conclue est des recommandations sont présentées dans le chapitre 7.

## Chapitre 2 : L'expérience de stabilité

Bien que les 6 mouvements aient un impact direct sur le comportement du navire en mer, le mouvement du roulis reste le plus important pour l'évaluation de la stabilité. Les théories traitant de la tenue en mer ont atteint un développement appréciable. L'ITTC en donne un éventail complet de l'état de l'art. Cependant, les essais en bassin des carènes reste le moyen le plus fiable pour évaluer les performances des navires. L'une des expériences exigée entre autre par le code ITTC 2008 7.5-02-07-04.1 est l'expérience d'inclinaison et le test de roulis, le stabilographe décrit dans la Figure 2.1 (Lewis, 1988) est utilisé. Cet instrument consiste en un pendule massif posé sur une arête, un tambour en rotation enregistre le mouvement du roulis.



1. arête; 2. contrepoids; 3. tambour enregistreur; 4. pendule;  
5. stylet; 6. table ajustable

**Figure 2.1 Stabilographe**

Actuellement, l'instrument cité ci-dessus est remplacé par des GM-meter électroniques (Cota, 1985 ; Griffin, 1985). Le paramètre de sortie de ces instruments affiche directement le module de stabilité ou s'intègre avec un calculateur de bord, pour l'évaluation automatisée de la stabilité du navire. Néanmoins, ces instruments sont assez chers, particulièrement pour les petites unités de navires, et ils doivent être conformes à la réglementation.

Le principe de ces instruments est basé sur la mesure du roulis grâce à un accéléromètre. Plusieurs travaux ont été effectués dans ce domaine. En 1985 Cota et

Griffin ont développé et breveté un instrument basé sur l'analyse spectrale du mouvement du roulis. Bien que, ces instruments ne soient exigés que pour les navires à passagers (ferry, croisière), comme la résolution IMO A749 et MSC 96/26. de l'OMI) le stipule.

## 2.1 But de l'expérience

Les formes de la carène et le déplacement étant donnés, la stabilité initiale du navire ne dépend que de la valeur du  $GM$  qui doit être supérieur à une valeur prescrite par la réglementation. L'annexe I détaille la théorie sur la stabilité initiale. Le but est de trouver expérimentalement la valeur de  $GM$ , de la manière suivante :

- mesure des tirants d'eau et détermination du déplacement d'après les courbes hydrostatiques des carènes droites.
- rechercher expérimentalement le module de stabilité transversale  $\overline{GM}$ .
- déterminer à partir des courbes hydrostatiques la hauteur du métacentre transversale  $\overline{KM}$ . Par différence on obtient donc la hauteur du centre de gravité.

$$\overline{KG} = \overline{KM} - \overline{GM} \quad \text{eq. 1}$$

## 2.2 Principe

On déplace à bord un poids connu  $p$  d'une distance  $d$  perpendiculairement à l'axe de symétrie longitudinal comme expliquée dans la Figure 2.2. Suite à ce déplacement de poids, la structure s'incline d'un angle  $\theta$ .

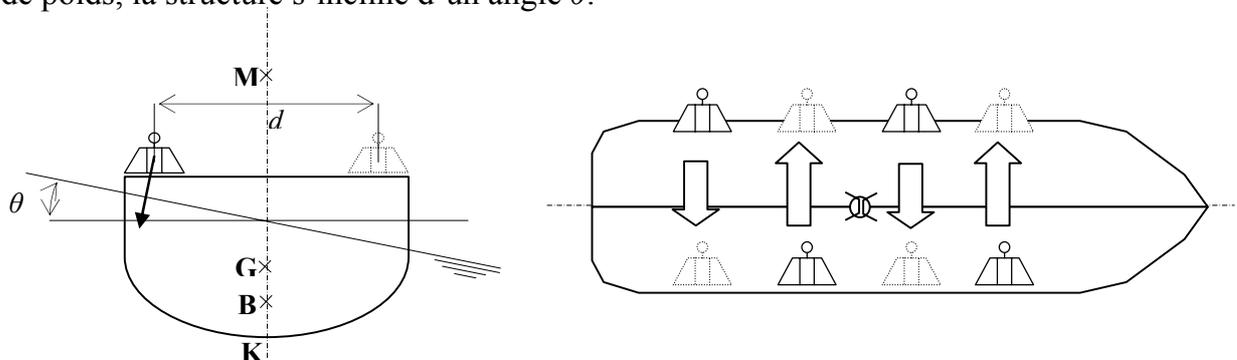


Figure 2.2 Procédure de l'expérience

A l'équilibre, le moment inclinant est égal au moment redressant.

$$pd \cos \theta = \Delta \overline{GM} \sin \theta \quad \text{eq. 2}$$

Soit

$$\overline{GM} = \frac{pd}{\Delta \operatorname{tg} \theta} \quad \text{eq. 3}$$

### 2.3 Réalisation de l'expérience

Les poids sont répartis en 2 tas égaux symétriques par rapport à l'axe du navire et au voisinage de la perpendiculaire milieu. Chaque tas pourra être composé de 2 poids. La distance entre les poids de tribords et de bâbord est  $d \approx B$ - *encombrement du poids* (à mesurer). Une réduction de l'erreur de lecture est possible en augmentant le nombre de poids déplacés et par conséquent les mesures. Lorsque le poids passe de sa position d'origine 1 à la position 1' le centre de gravité du poids se déplace de la distance transversale  $d$  et provoque une inclinaison transversale de la maquette. On relève l'angle de gîte  $\theta$  par la lecture sur un inclinomètre solidaire à la maquette, ou en utilisant un pendule et une règle graduée (Figure 2.3).

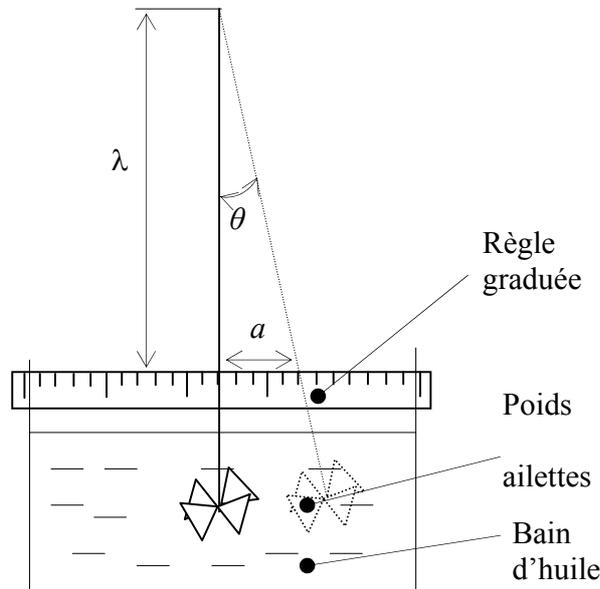
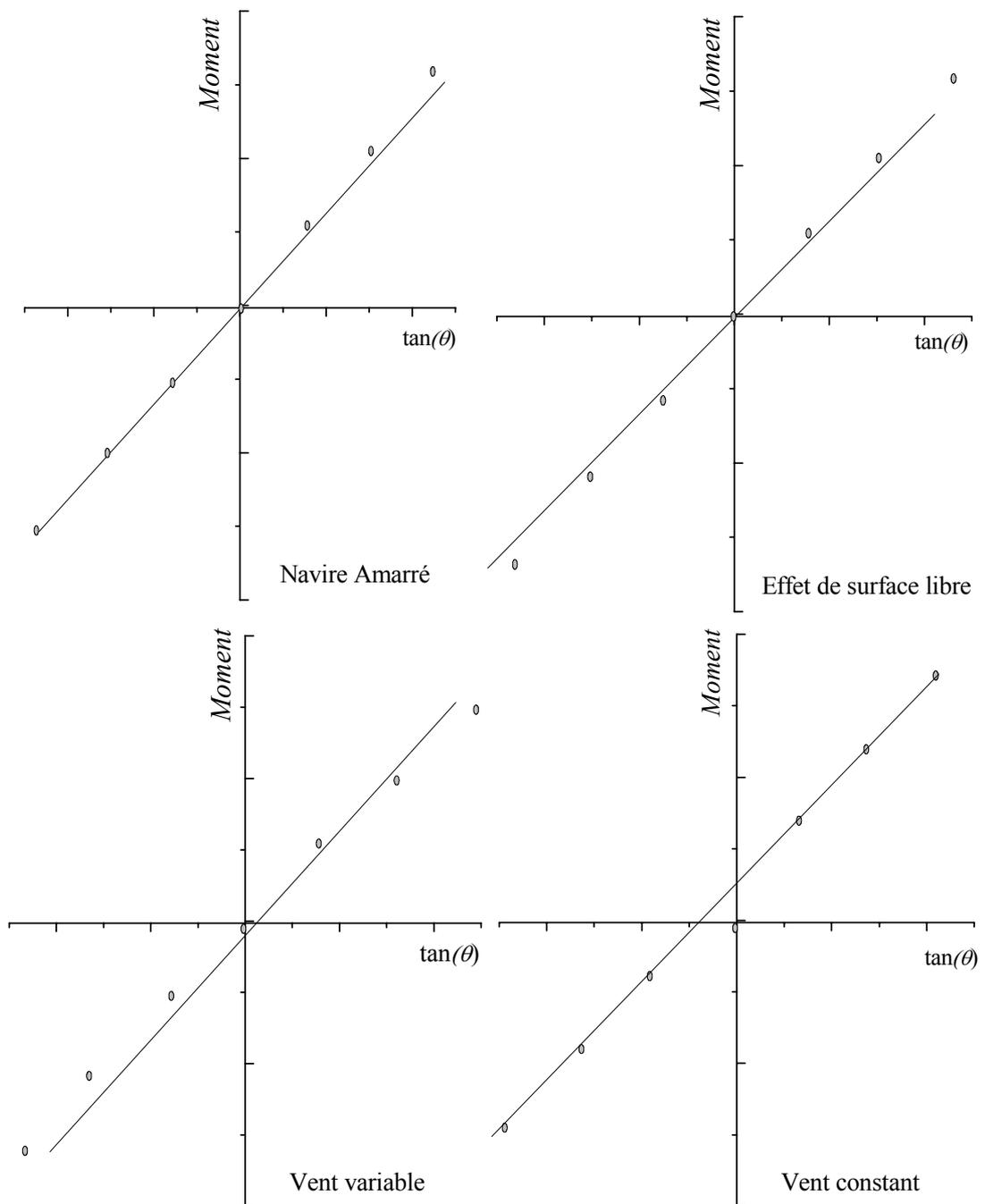


Figure 2.3 Pendule de mesure de l'angle

De cette manière chaque poids peut être déplacé de tribord à bâbord et inversement puis on procède au retour dans sa position initiale de chaque poids. On obtient donc 8 déplacements de poids provoquant 12 gîtes. Un calcul de la moyenne fourni le module de stabilité.

L'expérience de stabilité à bord des navires doit être effectuée à la fin de la construction ou toute modification significative de l'aménagement. Elle s'effectue de la même manière que celle faite en laboratoire, mais il est bien entendu que les poids (gueuses) et la distance  $d$  du moment inclinant seront adaptés aux dimensions du navire. La mesure de l'angle se fait en utilisant un pendule. Le déplacement  $\Delta$  et les coordonnées du centre de gravité, sont alors substitués aux devis de poids s'il y a lieu. La Convention Internationale sur la Sécurité de la Vie Humaine en Mer (SOLAS) impose l'exécution de cette expérience sur tout navire. Si les points ne sont pas disposés sur une droite, mais suivant deux segments correspondant aux inclinaisons sur un bord et l'autre, cela désigne l'action d'une amarre ou la présence de carènes liquides importantes (Figure 2.4). Si les points sont alignés sur une droite ne passant pas par l'origine, cela désigne l'action d'un vent traversier constant. Si enfin certains points sont manifestement en dehors de tout alignement possible, cela désigne un incident sur ces mesures (saute de vent, erreur de lecture, contact intermittent avec le quai...), et ces mesures sont à écarter. L'étude de la droite de mesure permet de s'assurer qu'il n'y a pas de biais systématique, et d'éliminer les mesures suspectes. Les biais subsistants peuvent être éliminés en traçant la droite de mesure avec une régression par la méthode des moindres carrés.



**Figure 2.4 Erreurs rencontrées lors des essais d'inclinaison**

## 2.4 Procédures de mesure

Aucun moyen de mesure des inclinaisons ne permet de mesurer l'angle d'inclinaison de façon absolue. En effet, le zéro des systèmes de mesure est

généralement la verticale (Pour le pendule ou l'horizontale pour un tube en U), ou il est tout à fait arbitraire (niveau à bulle ou inclinomètre électrique). Il est donc nécessaire de déterminer l'origine des mesures. Si cette origine correspond à la position du navire sans moment appliqué, et elle est commune à toutes les mesures (zéro des mesures), la procédure sera par abus de langage une procédure absolue. La formule (1) étant valable dans toute l'étendue d'inclinaison proche du navire droit ( $\pm 3^\circ$ ),

## **2.5 Procédure absolue**

Dans cette procédure, le zéro ou mesure de la position d'origine doit être effectué avec le plus grand soin puisque son résultat va influencer sur toutes les autres mesures : une erreur de lecture sur le zéro introduit un biais sur toutes les autres mesures. Même si la mesure du zéro est effectuée avec soin, une erreur peut être introduite par variation physique de la position d'origine. L'établissement d'un vent constant en cours de mesure, l'ensoleillement qui déforme le navire, la variation d'assiette due à l'inclinaison transversale, la déformation du support du système de mesure, sont des phénomènes qui vont modifier le zéro. Si l'expérience est longue, on peut minimiser ces effets en effectuant plusieurs zéros avec en particulier un zéro en début et un autre en fin d'expérience. On pourra alors soit prendre comme origine la moyenne de ces zéros, soit affecter un zéro particulier à un groupe de mesures. Les moments inclinant considérés sont ceux qui font passer de la position d'origine à l'angle d'inclinaison mesuré.

## **2.6 Procédure relative**

Dans la procédure relative, le zéro de chaque mesure est constitué par la mesure précédente. L'intérêt est évident : il n'y a plus de biais général introduit par une imprécision sur le zéro, et d'autre part, la mesure d'inclinaison étant, dans le temps, au plus proche du zéro, on minimise les dérives éventuelles du zéro. D'autre part, une

perte éventuelle du zéro générale (par déplacement accidentel du système de mesure par exemple) n'est plus ici une cause de reprise complète des mesures.

Enfin les mesures peuvent être effectuées d'un bord sur l'autre ce qui augmente l'amplitude et réduit l'erreur relative résultante ; le moment correspondant est celui qui fait passer d'une inclinaison à l'autre.

Ces avantages sont obtenus au prix d'une plus grande complexité de procédure. Il faut bien établir à l'avance cette procédure si on veut pouvoir tracer une droite de mesure avec des points régulièrement répartis, en évitant les doublons ou les manques sur un bord ou l'autre.

## 2.7 Expérience du roulis

Le modèle physique du roulis, à faible amplitude, des navires se comporte comme un phénomène oscillatoire linéaire du 1er degré, par analogie avec un pendule. Dont la période naturelle est donnée par la formule de Weiss (Biran, 2003) :

$$Tr = \frac{2CrB}{\sqrt{GM}} \quad \text{eq. 4}$$

Où :

$B$  est la largeur du navire en mètre,  $GM$  en mètre et  $Cr$ , coefficient du moment d'inertie du roulis,  $Cr$  est dans l'intervalle de  $0.75 < Cr < 0.80$  pour les carène arrondie. Donc d'après la formule on remarque que si on mesure  $Tr$  on peut obtenir  $GM$ . Cette mesure de la période est effectuée grâce au test de roulis.

Ce test est appliqué que pour les navires sans quille de roulis et de forme arrondie. En résumé, le test consiste à incliner le navire d'un angle de gîte de  $\theta \approx 5^\circ$  ou même  $\theta \approx 10^\circ$ , et le laisser osciller à sa période de roulis naturel. Le résultat est une oscillation amortie dont on mesure la période. D'ordinaire on mesure le temps, avec un chronomètre, d'au moins 5 oscillations. Bien que le test du roulis est recommandé il n'est pas obligatoire par les règlements il donne une évaluation rapide de la stabilité (Gudmundsson, 2009).

Il y'a différentes méthodes d'obtention du coefficient  $Cr$ , il peut être fourni par la documentation du chantier naval. Pour les navires de longueur hors tout  $> 24$  m l'IMO recommande d'utiliser la formule suivante :

:

$$Cr = 0.373 + 0.023\left(\frac{B}{d}\right) - 0.043\left(\frac{L_{pp}}{100}\right) \quad \text{eq. 5}$$

Pour les navires de pêche (longueur hors tout  $< 24$  m) la stabilité est considérée satisfaisante lorsque la valeur de la période  $Tr$  en seconde est inférieure à la valeur de la largeur  $B$  en mètre. Indépendamment aux unités, cette comparaison est préconisée par la FAO pour les pêcheurs (Gudmundsson 2009).

### Chapitre 3 : Technologie des smartphones et des Tablettes

Les smartphones sont de plus en plus populaires et leur marché est en expansion continue. Ce marché touche toutes les catégories de la société. L'impact sur la société est inégalé durant toute l'histoire de l'humanité à l'instar de l'invention de l'écriture. Les données statistiques disponibles dans Thomson Reuters, 2015, la Figure 3.1 présente le nombre d'utilisateurs de smartphones et la pénétration sur le marché mondial. En 2010, les utilisateurs de smartphones étaient 300 millions. L'année 2013, le nombre d'utilisateurs de smartphones dépasse le cap du milliard, on prévoit des ventes mondiales de smartphones à 1.8 milliard d'unités en 2017. En Algérie, selon l'ATP (Africa Telecom People), les smartphones sont de plus en plus populaire et leur marché est en expansion continue, le nombre d'utilisateurs est estimé à 8,6 millions en 2014.

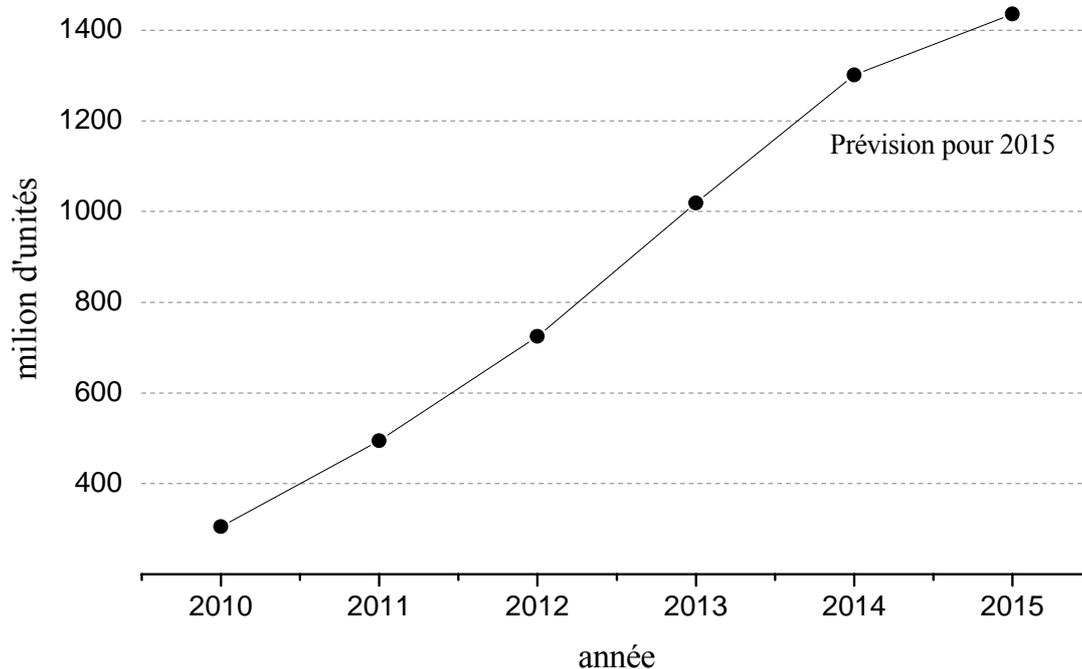


Figure 3.1 Nombre d'utilisateurs de smartphone dans le monde

Dans cette thèse, les applications, où le smartphone est décrit du point de vue des mesures, sont présentées. En outre, une classification des applications smartphones comme moyen de mesure portable ou de poche est présenté. La Figure 3.2 décrit l'architecture interne d'un smartphone moderne qui est composé d'une unité de traitement, d'interface réseau, d'unité de transfert de données, des capteurs, d'unité de stockage mémoire interne et externe, d'haut parleur, d'unité d'identification de l'abonné SIM, d'unité de gestion de la charge.

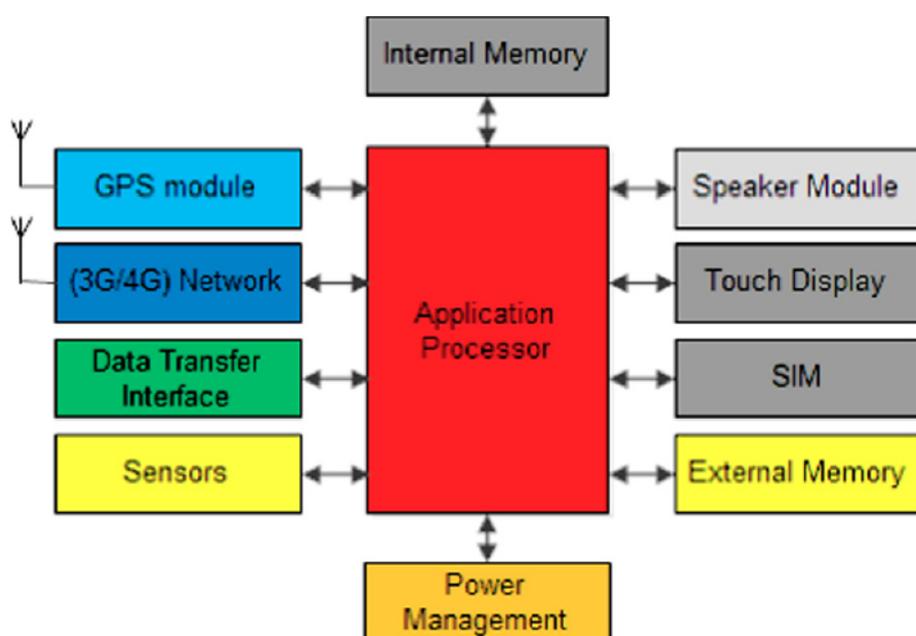


Figure 3.2 Architecture d'un smartphone moderne

### 3.1 Les capteurs intégrés dans les smartphones

Ces dernières années, un nombre important d'applications d'instrumentation et de détection ont été développées. Des applications d'utilité personnelle ou publique. On cite, en sport nautique de l'aviron ; (Kastner M *et al*, 2011); (Seung Han Shin *et al*, 2012). La Figure 3.3 montre les capteurs intégrés dans les smartphones actuels.

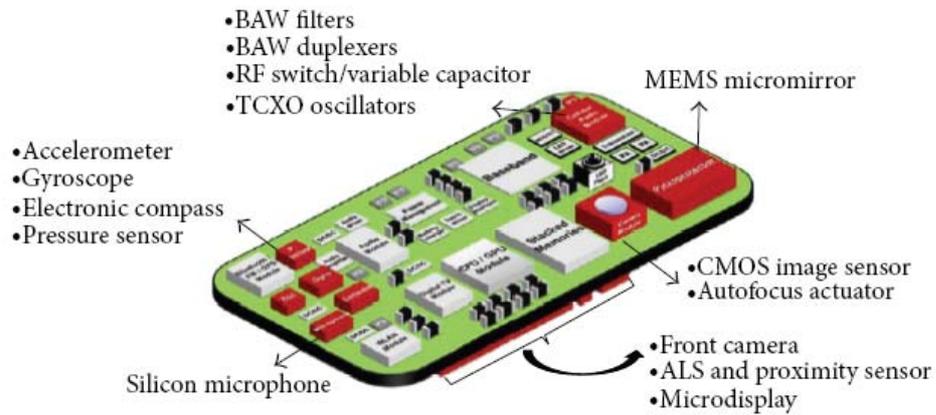


Figure 3.3 Capteurs intégrés dans un smartphone

### 3.1.1 Accéléromètre

Un accéléromètre mesure les accélérations sur l'un des trois axes x, y, z. Les changements de vitesse et les changements de position (mouvements de translation) sont obtenus par intégration de ces accélérations. La

Figure 3.4 et la

Figure 3.5 montrent le principe de fonctionnement du capteur qui repose sur la mesure de la capacité électrique en deux lames.

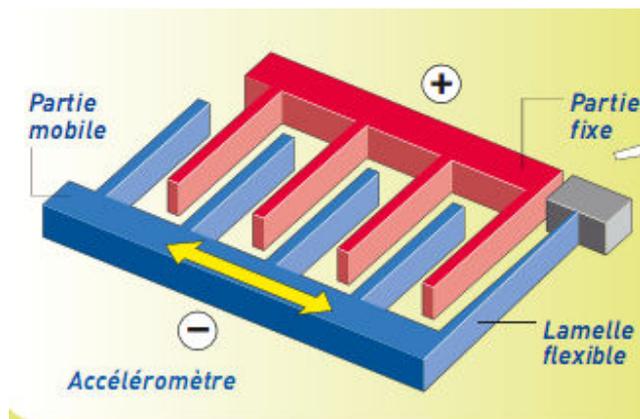


Figure 3.4 Principe de fonctionnement du capteur

L'accéléromètre intégré dans les smartphones permet aussi de détecter la force de gravité générée par la Terre. C'est donc l'accéléromètre qui détermine l'orientation de l'écran et contrôle le basculement portrait/paysage.

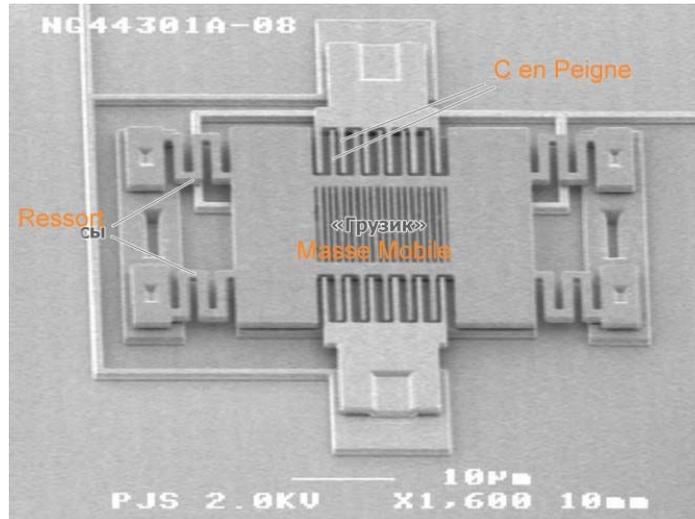


Figure 3.5 L'accéléromètre en technologie MEMS

### 3.1.2 Gyroscope

Afin de détecter une rotation ou une vitesse angulaire, le smartphone fait appel au gyroscope, ce dernier donne la position angulaire de son référentiel (Figure 3.6) par rapport à un référentiel Galiléen (ou inertiel).

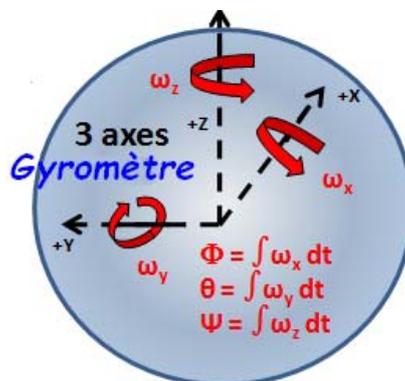
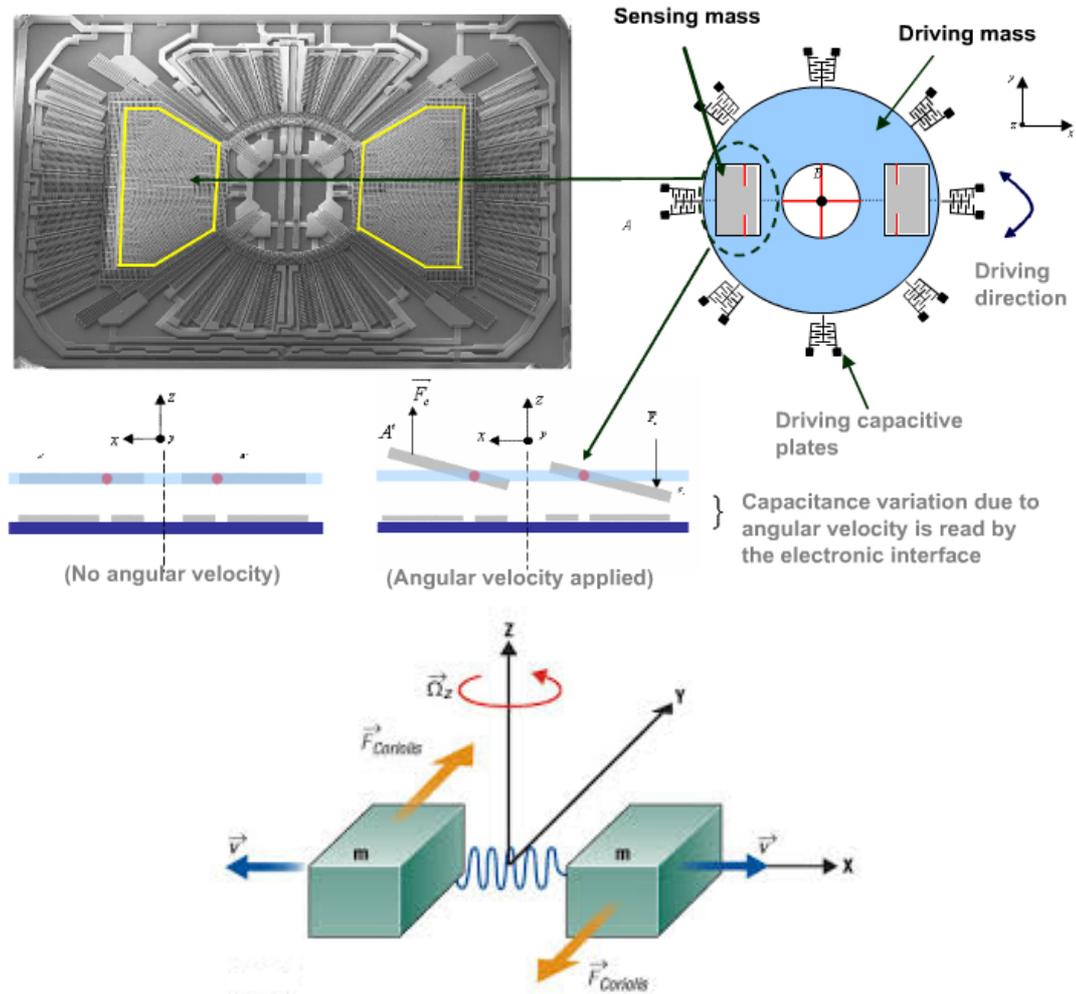


Figure 3.6 Les trois axes du gyroscope avec les angles inertiels

Le principe utilisé dans la technologie MEMS pour la mesure de la vitesse angulaire est montré dans la Figure 3.7.



**Figure 3.7 Principe de la mesure de la vitesse angulaire utilisé dans la technologie MEMS**

### 3.1.3 Magnétomètre (Boussole)

Le magnétomètre est un capteur qui mesure l'intensité et la direction du champ magnétique [Ash, 1999]. L'accéléromètre et le gyroscope permettent de mesurer les mouvements ; cependant, la direction obtenue est relative aux coordonnées du

smartphone utilisé. Le magnétomètre permet d'obtenir les coordonnées absolues de la terre, on obtient les références. Si le smartphone est placé, par exemple horizontalement, l'angle cardinal est obtenu par :

$$\text{angle} = \arctan (M_y/M_x) \qquad \text{eq. 6}$$

### **3.2 Types de système d'exploitation**

Les plus importants types de plates-formes de système d'exploitation pour smartphones et tablettes sont, par ordre de part de marché :

- Android
- IOS
- Windows Phone
- Symbian
- Blackberry OS
- Firefox OS
- Bada
- MeeGo
- webOS
- Windows CE
- Ubuntu Touch

### **3.3 Les applications à l'architecture navale**

#### **3.3.1 Le positionnement terrestre Gps**

##### **3.3.1.1 Historique**

Le premier système (1960) portait le nom de "TRANSIT". Il était destiné aux militaires bien qu'accessible au grand public. Il a été remplacé par le système

"NAVSTAR" que nous appelons aujourd'hui GPS. Le GPS est un système de navigation radio qui permet de définir une position par triangulation.

### 3.3.1.2 Principe de fonctionnement

La navigation par satellites fonctionne sur le même principe que la navigation astronomique. Il s'agit simplement de localiser un objet céleste dont on connaît la position, ensuite de déterminer sa direction et sa distance. La seule différence entre les deux méthodes est que le récepteur GPS fait tous les calculs grâce au microprocesseur incorporé.

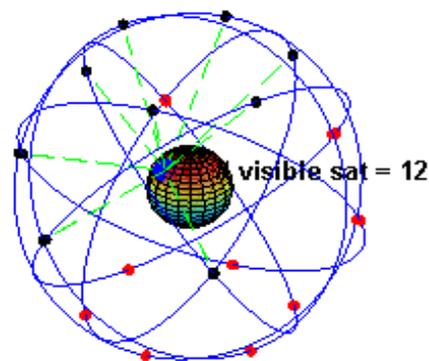


Figure 3.8 Constellation de satellites en orbite

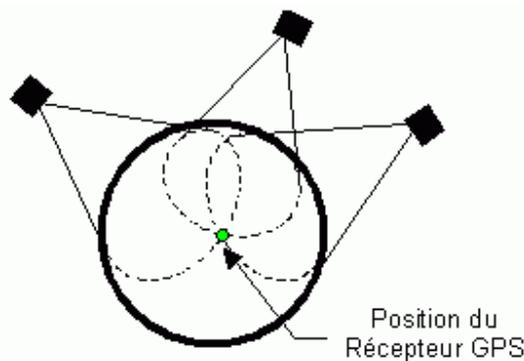


Figure 3.9 Principe de fonctionnement du GPS

Le système GPS utilise une constellation de satellites en orbite (Figure 3.8.) La position de chacun des satellites est précisément connue à tout moment (Figure 3.9). Les satellites émettent des signaux sur une base continue (24 heures sur 24) sur les fréquences 1575,42 MHz et 1227,6MHz qui sont captés par le récepteur qui produit

alors une séquence d'information en langage machine. Il compare alors les codes pour chronométrer le temps que le signal met pour atteindre le récepteur. Le temps obtenu est multiplié par la vitesse de la lumière (299 792,5 km/s, 186 000 m/s) pour connaître l'éloignement du satellite. En utilisant les informations venant d'un minimum de trois satellites différents, on obtient un triangle de position.

Si l'horloge du récepteur est en parfait synchronisme avec l'horloge atomique du satellite, la position obtenue est très précise. Pour s'en assurer, le récepteur utilise le signal d'un quatrième satellite.

En plus de la position, la plupart des récepteurs donneront le cap suivi et la vitesse sur le fond et la mémoire de l'appareil peut emmagasiner de multiples points d'interceptions (*waypoints*).

Outre son utilisation pour la navigation maritime ( Figure 3.10), il est utilisé pour le calcul de la vitesse instantanée du navire, dont la précision est meilleure que le loch.

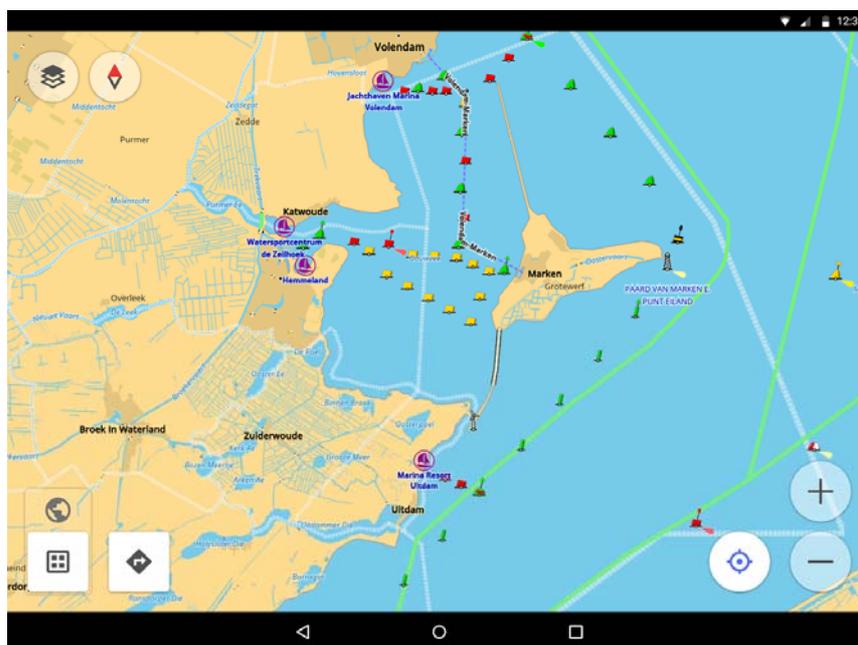


Figure 3.10 Navigation Maritime avec l'application hors ligne OSMAND®

### 3.3.2 L'inclinomètre

Les applications inclinomètres ou tiltmètres dans les smartphones sont basées les accéléromètres. Le principe est détaillé dans le chapitre 5, vu que le présent travail repose sur cette application. La Figure 3.14 donne l'une des ces applications qui peut être utilisée comme moyen de mesure lors de la construction navale.



Figure 3.11 Application de mesure de l'inclinaison

### 3.3.3 Sonomètre

Cette application de mesure du niveau du son est basée sur le capteur microphone, elle permet de donner le niveau en dB (décibel). Pratique dans la salle des machines des navires (Figure 3.12). L'application donne aussi le spectre de fréquence du bruit enregistré, ce qui est pratique pour la maintenance des équipements par les vibrations

sonores induites par les machines (Figure 3.13).

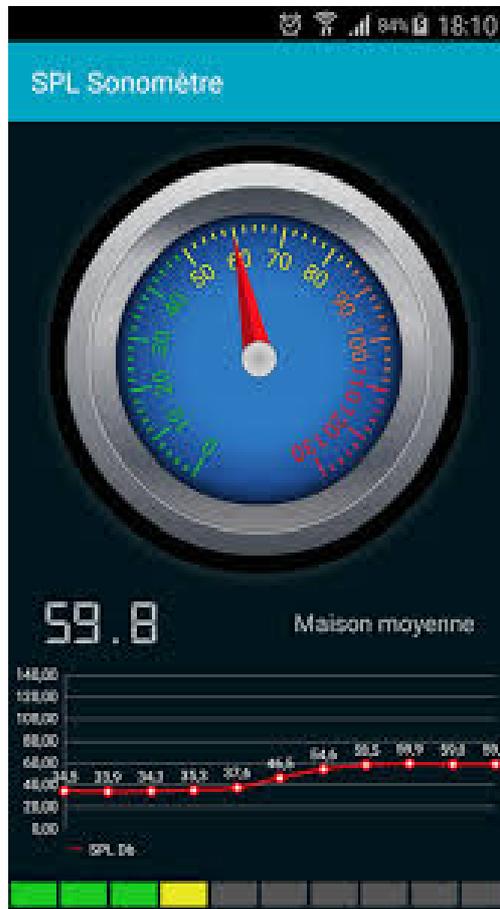


Figure 3.12 Application de mesure du niveau de bruit

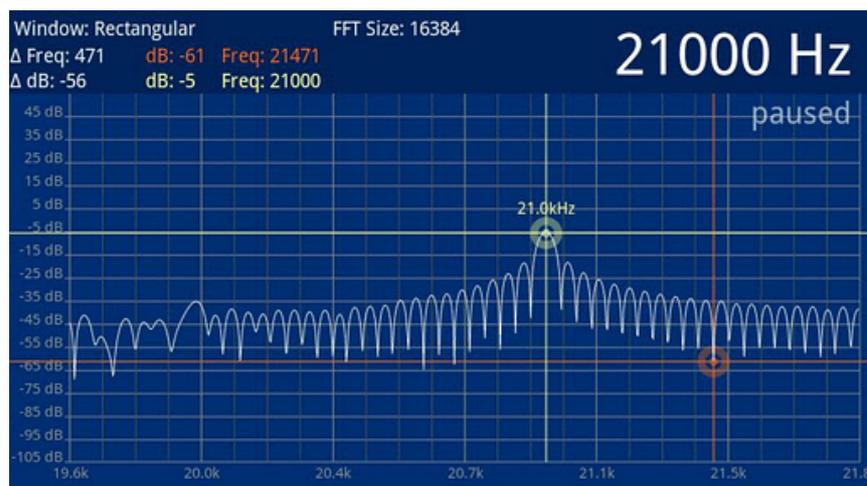


Figure 3.13 Application de l'analyseur spectral du bruit environnant

### 3.3.4 Magnétomètre

Le capteur magnétique ou boussole électronique repose sur le principe des matériaux dit magnéto résistif . Ce détecteur est composé de fines couches de permalloy (alliage de fer et de nickel) dont la résistance électrique varie avec une variation du champ magnétique appliqué. Ce capteur qui n'est sensible que suivant un axe peut être placé dans un circuit intégré. Les derniers progrès sur ces détecteurs ont permis d'obtenir des sensibilités inférieures à 0,1 milliTesla avec un temps de réponse inférieur à la microseconde, le tout dans un circuit intégré donc de taille très réduite. Ces composants peuvent ainsi déterminer la direction du vecteur Moment magnétique en un point donné. La Figure 3.14 donne l'une des applications.



**Figure 3.14 Une des applications de boussole avec mesure de l'intensité du champ magnétique en  $\mu\text{T}$**

## Chapitre 4 : Réglementation nationale et internationale

### 4.1 Historique des naufrages durant le siècle présent

L'équilibre du navire dépend des positions respectives du centre de gravité et du centre de carène. Cet équilibre peut être perturbé par suite de problème de ripage de cargaison, voie d'eau, etc. En perdant sa stabilité, le navire risque de chavirer.

Cet équilibre peut être aussi compromis par la présence d'eau ou de liquide dans les fonds ou dans des cales mal compartimentées, induisant un effet de carène liquide. Dans le Tableau 1 on dénombre par pertes humaines des chavirements majeurs survenus durant le siècle actuel.

**Tableau 1 Chavirements majeurs survenus durant le siècle courant**

Année	Pays	Description	Pertes humaines	Image
2002	 Sénégal	Le Joola – le 26 Septembre 2002, ferry chavire dans une mer agitée	1864	
2006	 Egypte	Le ferry RORO Al Salam Boccaccio 98 coule en mer rouge.	1020	
2015	 Libye	Navire de 25m transportant des migrants. Chavirement dû à un tassement des passagers.	800	
2008	 Philippines	Le ferry Princess of the Stars chavire et coule.	690	
2003	 Bangladesh	Le ferry Nazreen-1	530	

2015		Chine	Eastern Star -	452	
2002		Bangladesh	Le ferry Salahuddin-2	450	
2006		Indonésie	Le ferry Senopati Nusantara .	400–500	
2015		Libye	Navire transportant des migrants. Chavirement dû à un tassement des passagers.	400	
2013		Libye	Navire transportant des migrants. Chavirement brèche volontaire.	359	
2001		Indonésie	SIEV X – Navire de transportant de migrant..	353	
2012		Papouasie nouvelle Guinée	Rabaul Queen	321	
2014		Corée du sud	Le ferry Sewol –	304	
2014		Uganda	Navire de transportant des migrants.	251	
2009		Indonésie	ferry Teratai Prima	250	
2009		Libye	Navire de pêche transportant des migrants.	200–225	
2005		Bangladesh	Ferry Prince of Patuakhali	200+	
2004		Bangladesh	Ferry Lighting Sun	200	
2011		Tanzanie	Ferry Spice Islander I.	200	
2009		Sierra Léone	Ferry Sierra Leone	190	
2003		République	Ferry Dieu Merci	163	

Démocratique du Congo			
2011	 Libye	Navire de pêche transportant des migrants	150–270
2012	 Tanzanie	Ferry Skagit	150
2006	 Cameron	Navire non enregistré	127
2013	 Philippines	Ferry St. Thomas Aquinas	120
2012	 Bangladesh	Ferry	116
2006	 Djibouti	Ferry Al-Baraqua II	116
2004	 Philippines	Ferry Super14	116
2011	 Russie	Ferry Bulgaria	112
			
2004	 Madagascar	Ferry Samson	111
2009	 Tonga	Ferry Princess Ashika	74
			
2009	 Bangladesh	Ferry Coco-4	72
2011	 Libye	Navire transportant des migrants	63
2015	 Philippines	Ferry Kim Nirvana-B	61
2014	 Bangladesh	Ferry Miraj-4	56
2012	 Somalie	Navire transportant des migrants	55
2001	 Georgie	Ferry Pati	54
2007	 Malte	Navire transportant des migrants	53
			

2008		Philippines	Ferry Don Dexter Cathly	52	
2007		Indonésie	Ferry Levina 1	51	
2009		Myanmar	Ferry Naywintun	50	
2009		Bangladesh	Ferry	47	
2009		Inde	Navire de transport de passager Jalakanyaka	45	
2002		Philippines	Maria Carmela	44	
2009		Vietnam	Navire fluvial Gianh	43	
2002		Azerbaïdjan	Cargo Mercury II	43	
2008		Brazil	Ferry Comandante Sales	41	
2008		Bangladesh	Ferry Nazimuddin	41	
2004		Bangladesh	Navire fluvial Diganta	40	
2012		Hong Kong	Ferry Lamma IV	39	
2009		Kiribati	Ferry Kiribati accident	33	
2012		Italie	Ferry de croisière Costa Concordia	32	
2008		Bangladesh	Ferry Shourav	31	
2009		Dubaï	Navire de servitude Demas Victory	30	

2014	 Italie	Ro-PAX ferry Norman Atlantic	30	
------	--	------------------------------	----	---

---

D'après cette étude on remarque que les naufrages dus à la stabilité touche et les pays industrialisés et les pays en voix de développement. Mais les pays africains restent les plus touchés, dus principalement à la vétusté des embarcations et le manque de maîtrise. En Algérie, c'est surtout le secteur de la pêche qui est touchée.

## 4.2 Critère des essais de stabilité

### 4.2.1 Modèle de navire

Le matériau dans lequel le modèle est construit n'a pas d'importance en soi, pour autant que la rigidité du modèle à l'état intact et après avarie soit suffisante pour que ses caractéristiques hydrostatiques soient identiques à celles du navire réel et pour que la flexion de la coque dans la houle soit négligeable.

Il convient également de veiller à ce que les compartiments endommagés soient reproduits le plus fidèlement possible, de manière que le volume d'eau représenté soit correct.

Des mesures devront être prises pour empêcher l'eau de pénétrer (même en faibles quantités) dans les parties intactes du modèle, ce qui aurait des incidences sur son comportement.

Dans les essais sur modèle portant sur les cas d'avaries les plus défavorables prévus par la convention SOLAS près des extrémités du navire, il a été observé qu'un envahissement progressif n'était pas possible en raison de la tendance de l'eau se trouvant sur le pont à s'accumuler près de la brèche de l'avarie, et donc à s'écouler vers l'extérieur. De tels modèles se sont avérés capables de survivre dans des états de grosse mer, alors qu'ils ont chaviré dans des états de mer moins forte après avoir subi des

avaries moins importantes que celles qui sont prévues par la convention SOLAS, loin des extrémités.

Des recherches approfondies visant à élaborer des critères appropriés pour les navires neufs ont clairement montré que si la hauteur métacentrique et le franc-bord constituaient des paramètres importants pour la capacité de survie des navires à passagers, l'aire sous-tendue par la courbe de stabilité résiduelle était aussi un facteur primordial. En conséquence, le cas d'avarie le plus défavorable prévu par la convention SOLAS à retenir pour satisfaire aux prescriptions doit être celui pour lequel l'aire sous-tendue par la courbe de stabilité résiduelle est la plus petite.

#### **4.2.2 Détails du modèle**

Il convient de réduire autant que possible les effets d'échelle, qui risqueraient d'influencer fortement le comportement du modèle pendant les essais. Le modèle doit être aussi grand que possible. Les détails des compartiments endommagés sont plus faciles à reproduire sur de grands modèles et les effets d'échelle sont moins importants. Il est donc conseillé de reproduire le modèle à une échelle qui ne soit pas inférieure à 1 :40, ou à une échelle qui soit telle que la longueur ne soit pas inférieure à 3 m si cette longueur est supérieure.

Des essais ont montré que la dimension verticale du modèle peut influencer les résultats lors des essais dynamiques. La hauteur du navire au-dessus du pont de cloisonnement (ou pont de franc-bord) doit donc correspondre à au moins trois hauteurs standard d'une superstructure pour que les grosses vagues du train d'ondes ne déferlent pas sur le modèle.

Le modèle doit être aussi mince que possible au niveau de l'avarie hypothétique afin que la quantité d'eau entrante et son centre de gravité soient correctement représentés. L'épaisseur de la coque ne devrait pas dépasser 4 mm. Étant donné qu'il pourrait s'avérer impossible de construire avec suffisamment de détail la coque du modèle et les éléments des compartimentages primaires et secondaires au droit de l'avarie, il sera peut-être impossible de calculer avec précision la perméabilité de l'espace.

Il convient de ne pas vérifier uniquement les tirants d'eau à l'état intact mais aussi de mesurer correctement les tirants d'eau après avarie afin de les mettre en corrélation avec ceux résultant du calcul de stabilité après avarie. Pour des raisons pratiques, une tolérance de +2 mm est acceptée pour tout tirant d'eau.

Après avoir mesuré les tirants d'eau après avarie, il peut être nécessaire de corriger la perméabilité du compartiment endommagé en introduisant des volumes intacts ou en ajoutant du poids. Il faut également veiller à représenter correctement le centre de gravité de l'eau qui pénètre dans le modèle. Toutes les corrections doivent être effectuées avec des marges de sécurité suffisantes.

Si le pont du modèle doit être équipé de barrières et que la hauteur de ces barrières est inférieure à celle prescrite ci-dessous, le modèle doit être doté d'un système de télévision en circuit fermé (CCTV), de manière à observer les projections et l'accumulation d'eau dans la partie non endommagée du pont. Un enregistrement vidéo doit dans ce cas être joint au rapport d'essais.

#### **4.2.3 Les articles MSC 96/26. de l'OMI**

La réglementation relative à l'expérience de stabilité en vigueur en Algérie est MSC 96/26.

1. Sauf dispense expresse de l'autorité compétente (marine nationale, ministère du transport), tous les navires visés par le présent règlement doivent subir après leur achèvement et dans toute la mesure du possible avant embarquement des poids mobiles, une expérience de stabilité destinée à déterminer le déplacement réel du navire à l'état léger et les coordonnées de son centre de gravité.
2. L'expérience de stabilité doit être exécutée avec toutes les précautions d'usage permettant d'obtenir des résultats aussi exacts que possible : ces précautions portent notamment sur les conditions météo au moment de l'expérience, la position du navire, son amarrage, l'installation et l'utilisation du dispositif de mesure, la situation et la répartition des poids. En particulier, on évitera la présence de carènes liquides ; si cela est impossible, les résultats devront être corrigés en conséquence.

3. Il convient d'effectuer 4 inclinaisons au moins, 2 de chaque bord, chacune de ces inclinaisons devant conduire à un angle de gîte au moins égal à  $2^\circ$  et n'excédant pas une valeur de  $3^\circ$ . Cet angle de gîte ne doit pas être obtenu par un transfert de liquide.

4. Dans le cas où le déplacement du navire lège est déterminé par lecture de tirants d'eau, toutes garanties devront être apportées à l'autorité compétente en ce qui concerne l'exactitude du marquage de ces tirants d'eau sur la coque, ainsi que toutes précisions en ce qui concerne le plan de référence utilisé.

5. Dans le cas où l'assiette du navire au moment de l'expérience diffère de l'assiette de projet d'une valeur de plus de 2%, le déplacement (sauf cas de pesée directe) et les coordonnées du centre de gravité devront être déterminés à l'aide des courbes de Bonjean ou par ordinateur.

6. L'expérience proprement dite permet de déterminer le déplacement et les coordonnées du centre de gravité du navire dans l'état où il se trouve au moment de cette expérience.

Le déplacement et le centre de gravité du navire à l'état lège sont déterminés à partir des résultats trouvés lors de l'expérience en apportant les corrections correspondant aux poids étrangers à déduire et aux poids manquants à ajouter. Ces poids doivent être déterminés en valeur et en position de la manière la plus précise possible.

7. Les résultats obtenus doivent concorder d'une manière jugée acceptable par l'autorité compétente avec les valeurs estimées du déplacement et de la position du centre de gravité qui ont été retenues pour le tracé des courbes de moment de redressement. Un nouveau tracé de ces courbes peut être exigé si l'écart entre les estimations et la réalité est jugé trop important. La connaissance de l'assiette du navire au moment de la pesée sera mise à profit pour calculer la position du centre de gravité par rapport à la perpendiculaire arrière.

8. Si un navire subit des modifications ayant pour effet de modifier les éléments de sa stabilité, une nouvelle expérience de stabilité peut être exigée.

9. L'expérience de stabilité doit être effectuée en présence d'un représentant du centre de sécurité des navires concerné qui doit en contrôler la bonne exécution.

L'expérience doit être conduite et ses résultats doivent être dépouillés par un responsable qualifié, nommément désigné.

10. Le procès-verbal de l'expérience de stabilité, signé par le responsable, et visé par le représentant du centre de sécurité, doit au minimum faire apparaître les éléments suivants.

#### **4.2.4 Données de l'expérience**

Lors de l'expérience de stabilité les conditions suivantes doivent être respectées :

- emplacement des échelles de tirant d'eau par rapport aux couples de tracé ; les échelles devront être vérifiées avant la mise à l'eau du navire ;
- valeur des tirants d'eau sous quille, lus sur les échelles précitées (sous le prolongement rectiligne, et non pas horizontal, du dessous de quille) ;
- valeur des tirants d'eau rapportés à la ligne de base et aux perpendiculaires avant et arrière ;
- densité de l'eau au moment de l'expérience ; poids utilisés pour l'expérience ;
- déplacement latéral des poids ;
- longueur des pendules ;
- valeur des 4 élongations des pendules, ou de l'appareil utilisé pour la mesure des inclinaisons à la suite des 4 moments inclinants ;
- angles de gîte obtenus ;
- situation du navire au moment de l'expérience (poids supplémentaires par rapport au navire lège).

#### **4.2.5 Calculs effectués**

Les paramètres calculés lors des essais sont :

- valeur du  $GM$  (déduite de la moyenne des moments et de la moyenne des élongations obtenues) ;
- position du centre de carène (donner la référence des documents utilisés, plan de formes, courbes hydrostatiques, courbes Bonjean, programme ordinateur) ;
- position du centre de gravité par rapport à la OH et à la perpendiculaire arrière ;

- déplacement au moment de l'expérience ;
- quantité de lest se trouvant à bord ou à installer, position exacte de ce lest ;
- poids à retrancher et à ajouter pour obtenir le navire lège achevé.

#### **4.2.6 Résultats définitifs**

A partir des résultats ci-dessus, et les caractéristiques du navire lège un PV est établi en présence de l'armateur et de l'autorité.

### **4.3 La réglementation relative à la stabilité des navires en Algérie**

La réglementation concernant les navires battant pavillon algérien se conforment à la réglementation internationale, à savoir MSC 96/26/. Pour les navires de moins de 12 mètres de longueur hors tout ; le ministère de transport met une circulaire dont une copie est dans l'annexe II. Un PV de l'expérience de stabilité est donné dans l'annexe III à titre d'exemple.

## **Chapitre 5 : Application à l'expérience de stabilité**

### **5.1 Banc d'essai**

Le banc d'essai de stabilité est situé dans le laboratoire de stabilité des navires du département de Génie Maritime, USTO Mohamed Boudiaf. Cet équipement a été acquis en 1984 dans le cadre de l'enseignement pédagogique et de la recherche. Il comporte :

- un bassin pour la flottaison de dimension 2,5 m × 0,80m × 0,50m
- des modèles de navire de haute précision
- des accessoires poids, lests, inclinomètre

Selon le fabricant les essais pouvant être effectués sont :

- expérience de stabilité
- influence de la surface libre
- influence des masses suspendues
- effet de l'envahissement de différent compartiment
- expérience du roulis



**Figure 5.1** Vue générale du banc d'essai avec le dynamomètre



**Figure 5.2** Vue générale du banc d'essai avec le smartphone

## 5.2 Modèle du navire utilisé

Le modèle, voir sur la Figure 5.3, référencé NA8-14 selon le fabricant ARMFIELD®, est choisi pour sa documentation disponible et sa grande précision de fabrication. Ce modèle est celui d'un navire parent de la série de chalutier de la *British Ship Research Association (BSRA) trawler series* (Pattulo et al., 1965).



**Figure 5.3 Modèle de chalutier NA8-14 d'Armfield®**

En plus, cette série de chalutier fait l'objet d'intense recherche et publication. Ses principales caractéristiques sont décrites dans le Tableau 3. La Figure 5.5 montre le plan des formes en 3 dimensions modélisé avec MaxsurfModeler®, alors que la Figure 5.6 montre la vue transversale. Les courbes hydrostatiques (Figure 5.4) sont obtenues avec le logiciel MaxsurfStability®. Le modèle est menu de cloisons transversales étanches, fournie avec les ballasts nécessaires et des poids. Il est construit en fibre de verre renforcée (GRP). Des valves d'inondation sont montées dans chaque compartiment.

**Tableau 2 Tableau des demis ouvertures en mm du modèle NA8-14**

Ligne d'eau (mm)	16	32	49	65	98	130	162	195	228	260
Couple	-1/2								28,7	55,1
	-1/4							41,9	77,5	99,3
PPAR	0						17,3	65,6	100,3	120,1
	1/4						37,4	84,9	116,0	132,6
	1/2	3,9	5,3	6,3	6,9	9,5	19,7	57,8	100,8	127,3
	3/4	6,4	9,8	12,4	14,9	21,7	38,7	76,6	113,8	135,8
	1	9,5	15,6	20,1	24,6	36,1	57,1	93,1	124,2	141,9
	1 1/2	17,7	28,7	37,6	46,2	65,5	90,5	119,3	139,8	149,7
	2	28,7	45,1	57,5	69,0	92,1	116,5	137,2	149,7	155,0
	2 1/2	41,9	63,2	78,0	91,0	114,4	134,2	148,3	155,5	158,4
	3	55,2	80,9	97,3	110,1	131,1	145,9	154,7	158,7	159,9
	4	81,2	112,0	128,2	138,8	151,5	157,9	160,2	160,5	160,5
	5	100,8	131,6	145,4	153,0	159,9	160,5	160,5	160,5	160,5
maître couple*		105,6	137,1	149,9	156,0	160,3	160,5	160,5	160,5	160,5
	6	105,6	135,8	148,3	154,1	158,1	159,5	159,7	159,9	159,9
	7	82,3	107,9	121,3	13,0	141,1	147,3	151,7	155,0	157,6
	7 1/2	61,9	84,7	98,9	108,8	123,1	132,9	140,8	147,7	154,1
	8	42,4	61,2	74,3	84,4	100,2	113,0	124,4	135,5	146,2
	8 1/2	26,6	40,8	51,2	59,7	74,3	88,0	101,9	116,7	13,6
	9	13,6	23,0	30,3	36,3	47,8	60,0	72,2	89,6	106,6
	9 1/4	7,9	14,6	20,2	25,2	34,7	45,6	58,3	73,2	90,8
	9 1/2	1,6	6,9	11,1	14,8	22,3	31,1	41,6	55,4	72,5
	9 3/4			2,7	5,3	10,4	16,7	24,9	36,0	50,9
PPAV	10						2,4	7,5	15,1	26,6
										40,0

\* Le maître couple est situé à 104mm à l'avant du milieu du modèle

**Tableau 3 Caractéristiques du chalutier BSRA**

	navire	modèle
Echelle	1:1	1:25
Longueur $L_{pp}$ (m)	45.72	1.82
Largeur $B$ (m)	8.03	0.32
Creux $C$ (m)	6.40	0.256
Tirant d'eau DWL $T$ (m)	4.06	0.16
Déplacement volumétrique (m <sup>3</sup> ) à DWL	839.5	0.05
Block coefficient $C_b$		0.564

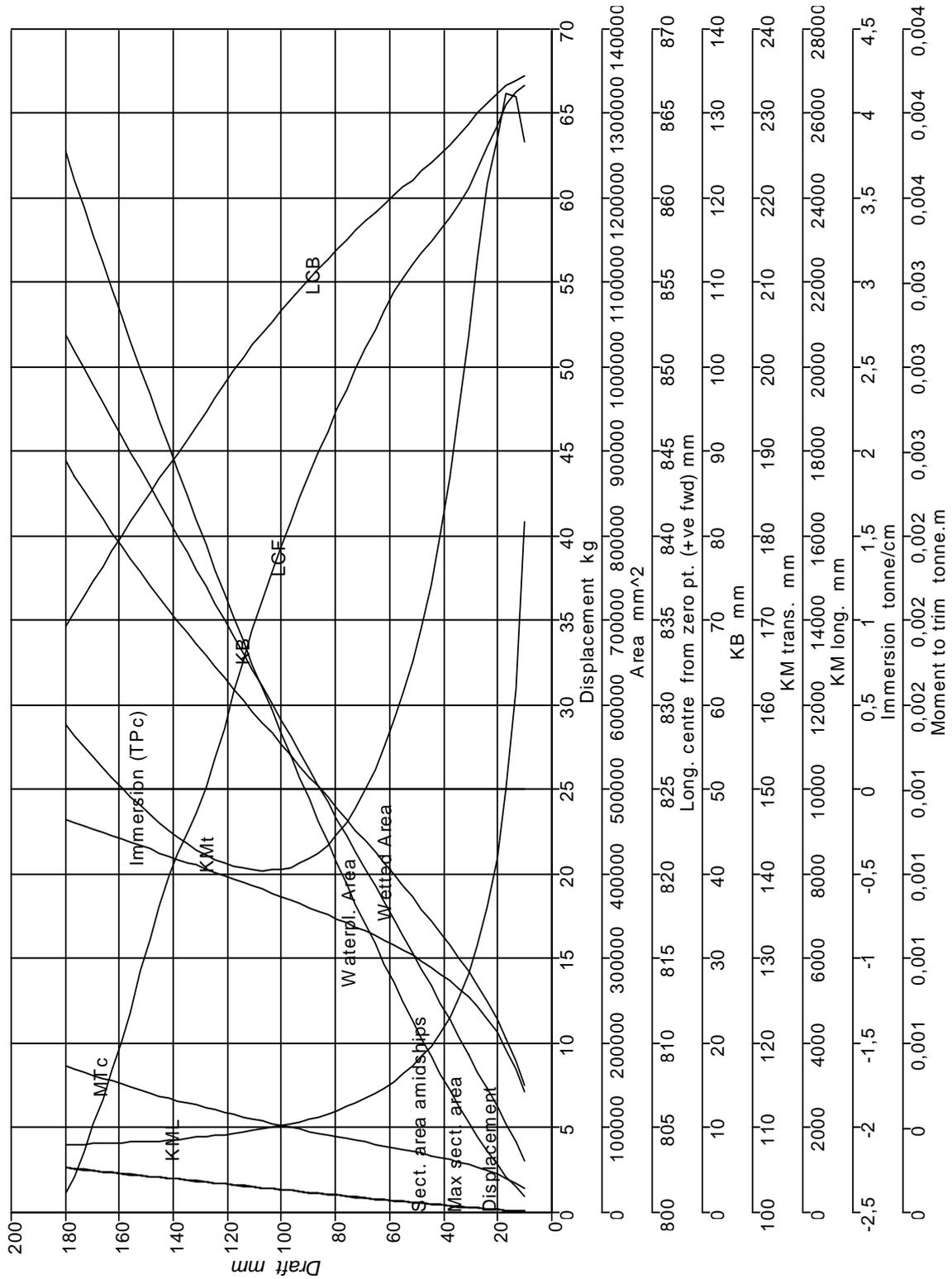
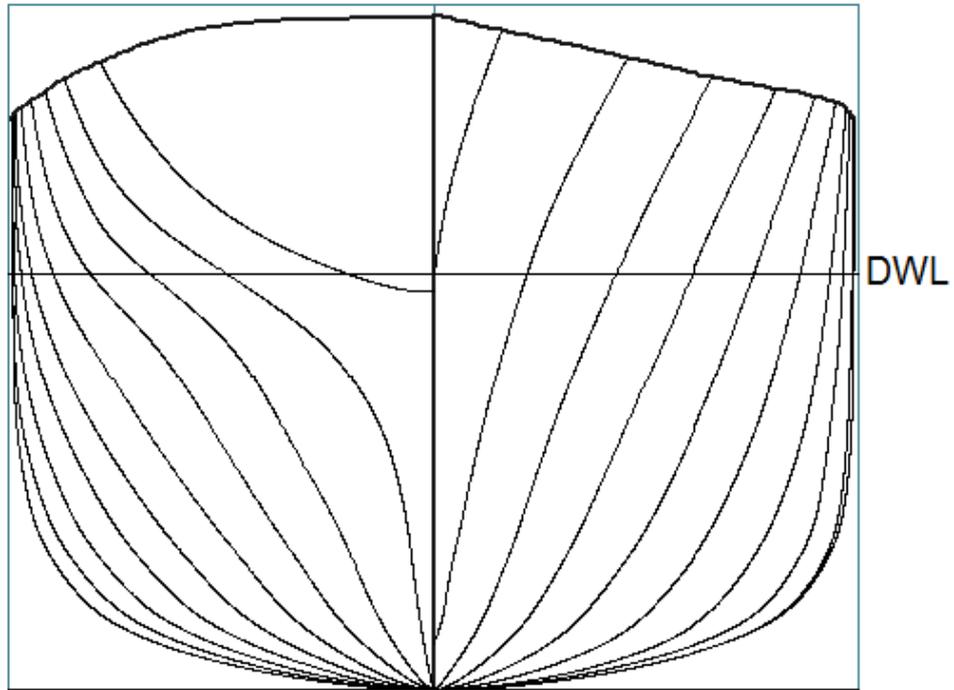
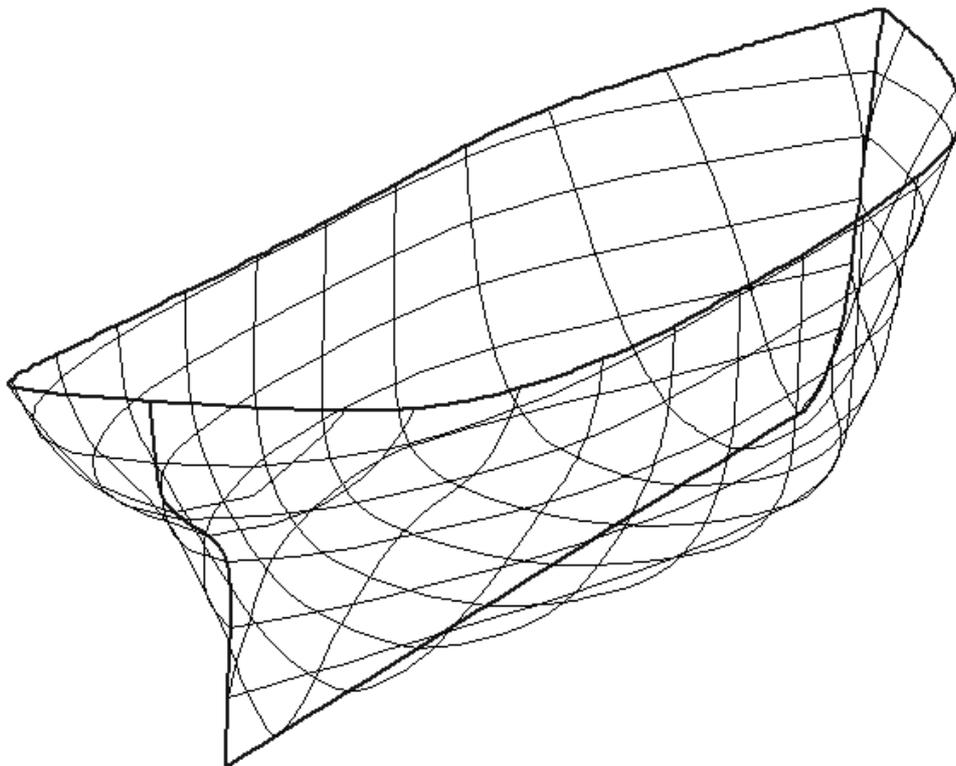


Figure 5.4 Courbes hydrostatiques



**Figure 5.5** Vue transversale



**Figure 5.6** Navire de pêche en 3 dimensions

Pour réaliser ces expériences quelques conditions doivent être respectées : le cas de chargement au tirant de charge soit  $T=160\text{mm}$ , la position du centre de gravité. Les conditions de l'expérience sont résumées dans le Tableau 4.

**Tableau 4 Paramètres de l'expérience**

Nombre de guesse (poids)	6
Poids d'une guesse $w$	0.200 kg
Distance déplacée $d$	278 mm
Hauteur du pendule $\lambda$	795 mm
Déplacement $\Delta$	51.787 kg
Tirant d'eau $T$	160 mm
$LCB$ (par rapport au milieu)	17.3 mm
$LCF$ (par rapport au milieu)	-25.6 mm
Poids coulissant	3.026 kg
Masse volumique $\rho$	1.04 kg/m <sup>3</sup>

Il est à noter que le poids du smartphone 144.58g est inclus dans le déplacement du modèle. Le smartphone est placé sur le plan de symétrie, dans le but d'atténuer les accélérations verticales lors du roulis. Le positionnement du smartphone est assuré par un dispositif. Le  $GM$  est réglé grâce au positionnement en hauteur du poids coulissant le long du mât.

### 5.3 Caractéristiques des capteurs utilisés

Le capteur accéléromètre 3 axes et le capteur gyroscope 3 axes utilisés dans l'expérience sont intégrés le smartphone dans le même circuit MPU-6050, fabriqué par InvenSense™. Ce circuit est fabriqué avec la technologie MEMS (Micro-electro-

mechanical systems) de dimensions  $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 2,6\text{mm}$  ce qui lui confère une robustesse et une grande précision. D'après la fiche technique du fabricant (MPU-6000/MPU-6050 Datasheet 2013), ces caractéristiques sont données dans le Tableau 5. Le protocole du signal de sortie est la norme I<sup>2</sup>C, avec une résolution de la conversion analogique numérique de 16 bits. La pleine échelle de la conversion est programmable en fonction de l'ordre de grandeur des accélérations.

**Tableau 5 Caractéristiques du capteur MPU6050**

	Gyro plein échelle	Gyro Sensitivité	Accel plein échelle	Accel Sensitivité
Unités	(°/sec)	(LSB/°/sec)	(g)	(LSB/g)
	±250	131	±2	16384
	±500	65.5	±4	8192
	±1000	32.8	±8	4096
	±2000	16.4	±16	2048

#### 5.4 Acquisition de données du Smartphone

La fréquence d'échantillonnage peut atteindre jusqu'à 100Hz dans les essais effectués. La condition selon le théorème de Shannon (Webster, 1999), où la fréquence d'échantillonnage doit être 10 fois plus grande que celle de la fréquence du signal à mesurer, est respectée. La fréquence du roulis des navires ne dépassent pas le 1 Hz (Lewis, 1989), la fréquence des vagues, qui est l'excitation principale dans l'étude des mouvements des navires, ne dépasse pas les 2Hz.

Dans le but d'augmenter cette fréquence d'échantillonnage, il est conseillé de désactiver les options non nécessaires à l'expérience ; comme par exemple, WIFI, GPS, Boussole, Bluetooth etc...

Une autre caractéristique importante conversion analogique numérique est la résolution en amplitude en bit. Malgré la grande résolution en amplitude de 16 bits des smartphones actuels, l'unité de traitement doit s'adapter à la résolution des capteurs

activés et du protocole de communication, voir la fiche technique du MPU-6000/MPU-6050 Product Specification Datasheet (2013).

## 5.5 Applications utilisées dans l'expérience

Les applications ou Apps utilisées sont téléchargeables sur google store <sup>TM</sup>, elles fonctionnent sous la plateforme android<sup>©</sup>. Il existe plusieurs apps traitant le data logging, gratuites comme payantes. Les Apps choisies dans la présente étude sont « *clinometer* » et « *sensors suite* ». Le choix est dicté par la gratuité et les performances.

### *Apps clinometer*

C'est une application qui remplit les mêmes fonctions qu'un inclinomètre de haute précision. La Figure 5.7 montre l'écran d'interface, on note la présence d'une option de calibrage ou de remise à zéro pratique pour s'adapter à la position droite du navire. La précision de mesure est de 1/10 de degré d'angle, en plus le choix de l'unité de mesure de l'angle est donnée en degré, grade, % pente ou la tangente de l'angle. L'inclinaison  $\theta$  obtenue par cette apps repose sur la formule (Łuczak *et al*):

$$\theta = \text{Arcos} (\gamma_z / g) \quad \text{eq. 7}$$

Si le smartphone est posé horizontalement.

Ou bien :

$$\theta = \text{Arcos} (\gamma_y / g) \quad \text{eq. 8}$$

Si le smartphone est posé verticalement.

Où  $\gamma_y$  et  $\gamma_z$  sont les accélérations intrinsèques au smartphone, ou au navire, suivant les axes  $y$  et  $z$  respectivement.

L'un des inconvénients de ce principe de mesure est que le calcul de l'inclinaison est fortement perturbé par les accélérations, en conséquent, cette méthode est approprié pour les mesures de la gîte ou de l'assiette en statique.



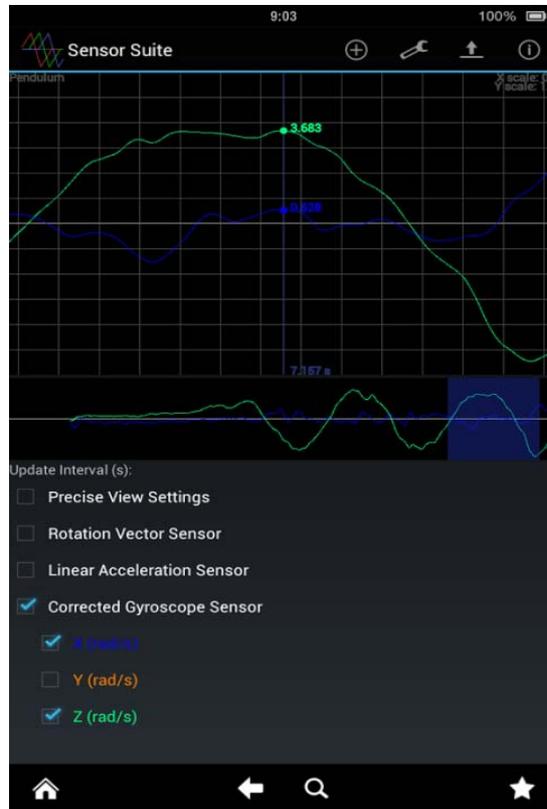
**Figure 5.7** Interface de l'application *Clinometer*®

#### *Apps sensors suite*

C'est une app de data logging qui permet l'acquisition des données de tout les capteurs présents dans le smartphone (Figure 5.8). Elle remplit les mêmes fonctions qu'un data logger professionnel :

- réglage de la fréquence d'échantillonnage
- activation et désactivation des capteurs
- enregistrement du fichier de mesure en format CSV, texte
- calibrage des capteurs
- affichage graphique temporel de l'acquisition
- mode auto ou manuel de l'échelle du graphe

- ajustement de la fenêtre du temps du graphe
- filtre numérique (filtre de Kalman)



**Figure 5.8 Interface de l'acquisition des données des 6 degrés de liberté de l'application *Sensor suite*®**

Cette app est utilisée pour le calcul du roulis c'est-à-dire l'angle de gîte en dynamique. On utilise la formule suivante (Łuczak *et al*) :

$$\theta = \text{Arctan} (\gamma_y / \gamma_z) \quad \text{eq. 9}$$

Dans le cas où le smartphone est posé verticalement sur le modèle de navire Figure 5.9.



Figure 5.9 Position verticale du smartphone sur le modèle du navire

Les angles de gîte et d'assiette peuvent être aussi obtenus en intégrant les mesures des vitesses angulaires  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$ . En effet, le gyroscope mesure les 3 vitesses angulaires. Après intégration numérique de ces composantes on obtient les 3 angles instantanés (Bennett et al., 2014). Cependant, lorsque le temps d'intégration est long, l'erreur de mesure avec le gyroscope est importante (accumulation d'erreur) (Webster, 1999).

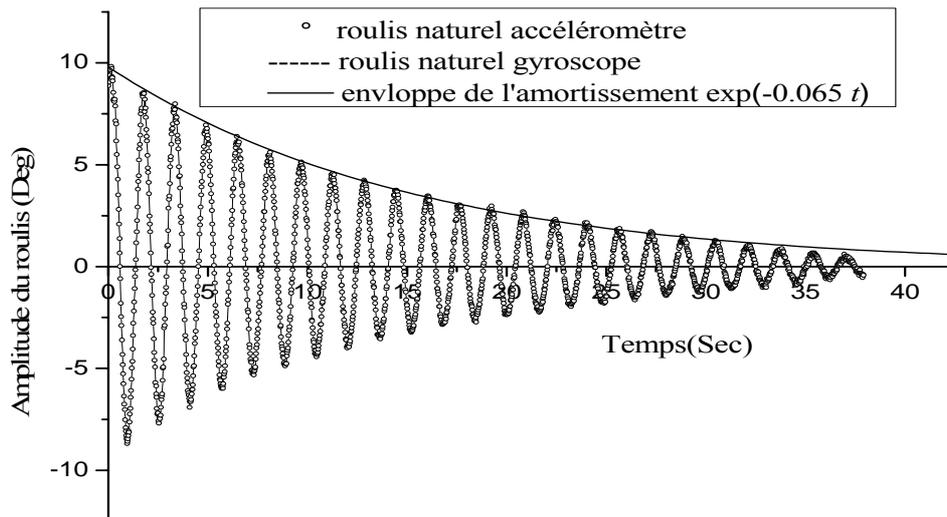
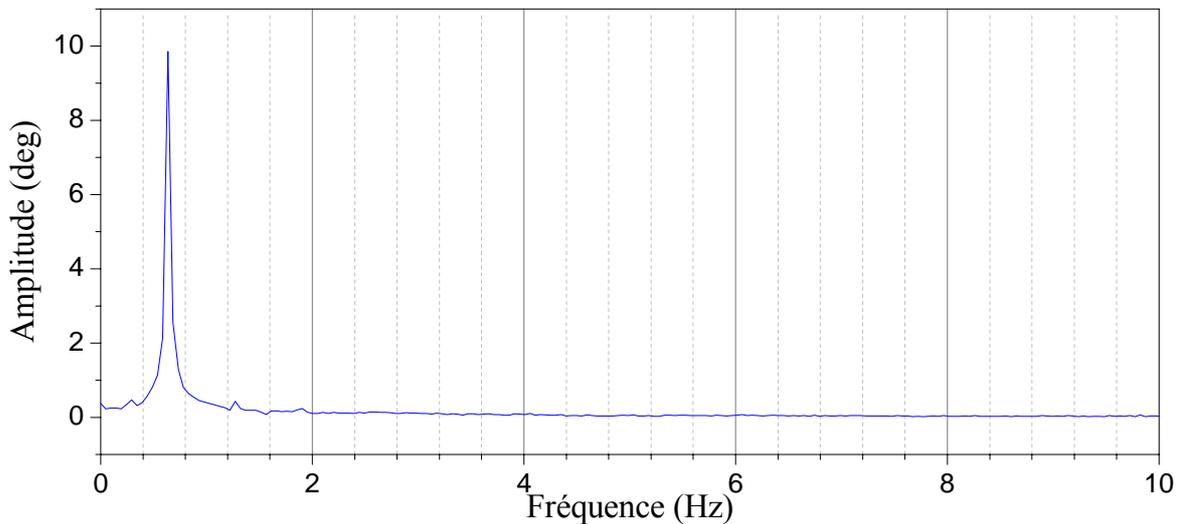


Figure 5.10 Acquisition du roulis naturel

La Figure 5.10 illustre un exemple de mesure du roulis en utilisant l'accéléromètre et le gyroscope simultanément. L'erreur entre les deux méthodes n'est pas perceptible que lorsque le temps est grand. La fréquence d'échantillonnage est de 20 Hz, la durée de l'acquisition est de 40 sec. L'oscillation est obtenue en donnant un angle de gîte initial de  $10^\circ$ . L'amortissement est déduit des courbes et est égale à  $-0,065 \text{ sec}^{-1}$ . La Figure 5.11 donne le spectre de fréquence du roulis naturel pour un  $GM = 27.47\text{mm}$ . On remarque que l'énergie de l'oscillation est bien concentrée dans la bande de la fréquence naturelle de roulis du navire. Ce qui confirme qu'on est bien dans le domaine linéaire.



**Figure 5.11 Analyse spectrale du roulis pour  $GM = 27.47\text{mm}$**

## Chapitre 6 : Résultats et discussion

Les mesures effectuées lors des expériences sur le modèle de navire de chalutier, sont réalisées avec le pendule et avec le smartphone simultanément. Les résultats sont comparés en étudiant l'erreur de mesure et de la déviation standard.

### 6.1 Mesure du module de stabilité

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 6 et reportés dans la Figure 6.1. À noter que quand l'angle de gîte  $\theta$  est en radian alors la pente de la droite de lissage des points est le module de stabilité  $\overline{GM}$ .

**Tableau 6 Angle de gîte du pendule et du Smartphone**

Test No.	Angle pendule $\tan \theta = a / \lambda$	Angle Smartphone apps
0	0.00	0.00
1	2.23	1.90
2	4.49	4.10
3	6.63	6.25
4	-6.77	-6.70
5	-4.52	-4.40
6	-2.27	-2.10
7	0.00	0.00

Les courbes sont linéaires, comme attendues, avec un facteur de corrélation 0.99961 et 0.99997 pour le pendule et le smartphone respectivement. Cependant, les points de mesure obtenus avec le smartphone sont plus linéaires. D'autre part, sur le coté tribord les points sont plus proches que sur le coté bâbord.

L'analyse de régression linéaire (méthode des moindres carrées), représenté sur la courbe en continu et en tiret, est utilisé pour lisser les points mesurés. Le Tableau 7 montre la comparaison du  $GM$  déterminé par les deux méthodes de mesure.

La déviation standard des mesures avec le smartphone est de 0.085 mm qui est significativement plus faible que celle obtenue avec le pendule ; 0.32 mm pour un  $GM$  de 28.75 mm. Donc, les mesures avec le smartphone est plus précises. L'erreur relative entre les deux  $GM$  obtenus est d'environ 5%.

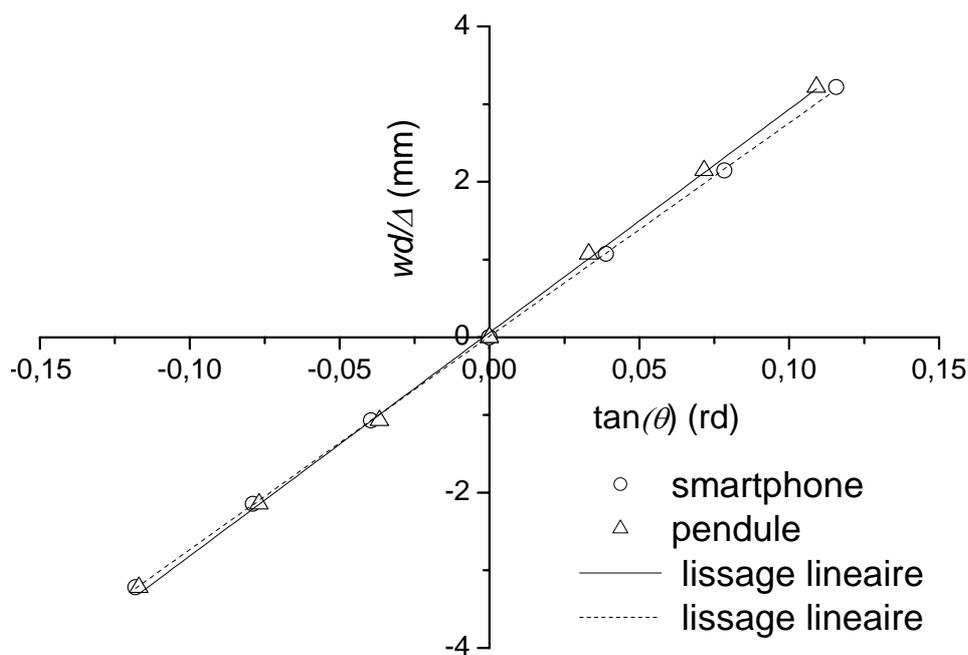


Figure 6.1  $w d / \Delta$  (mm) en fonction de  $\tan (\theta)$

Tableau 7 Comparaison du  $GM$  déterminé par les deux méthodes de mesure

	Mesure Pendule	Mesure Smartphone apps	Erreur (%)
$GM$ (mm)	28.75	27.46	4.50
déviati on Standard (mm)	0.32861	0.08535	–
Facteur de Corrélation	0.99961	0.99997	–

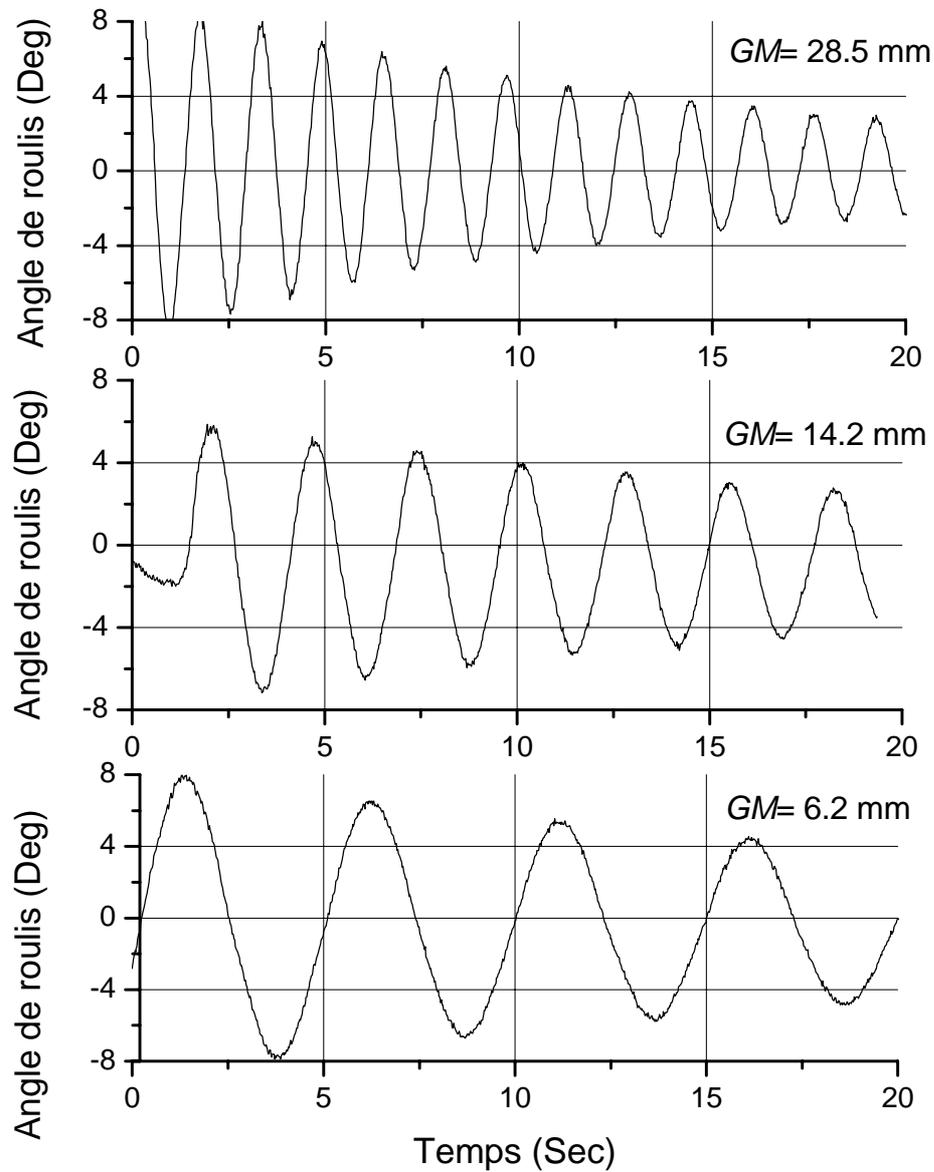


**Figure 6.2 Poids couissant le long du mât simulant différent  $GM$**

La Figure 6.2 montre le poids couissant le long du mât pour simuler différentes valeurs  $GM$ . Différentes valeurs de  $GM$  sont obtenues en positionnant le poids couissant le long du mât. Pour chaque  $GM$  la période de roulis est mesurée par le smartphone. Ces périodes, obtenues par l'oscillation naturelle du roulis, sont provoquées par un angle de gîte d'environ de  $10^\circ$ .

La Figure 6.3 montre les signaux temporels de la gîte de ces oscillations amorties, obtenues par l'acquisition des données du smartphone et exportés en format CSV.

On remarque que les signaux présentent un bruit très faible, en conséquence le filtrage numérique (présent dans l'application) n'est pas nécessaire. Il est à noter que l'obtention de la période de roulis est plus simple des courbes obtenues par l'acquisition des données que de la méthode du chronomètre.



**Figure 6.3 Acquisition de données du roulis naturel pour différent  $GM$**

## 6.2 Calcul du coefficient $Cr$

Les mesures de la relation entre la période de roulis et du  $GM$  (loi de Weiss) obtenue par les deux méthodes sont données dans la Figure 6.4. On remarque que l'allure  $1/x^2$  est respectée.

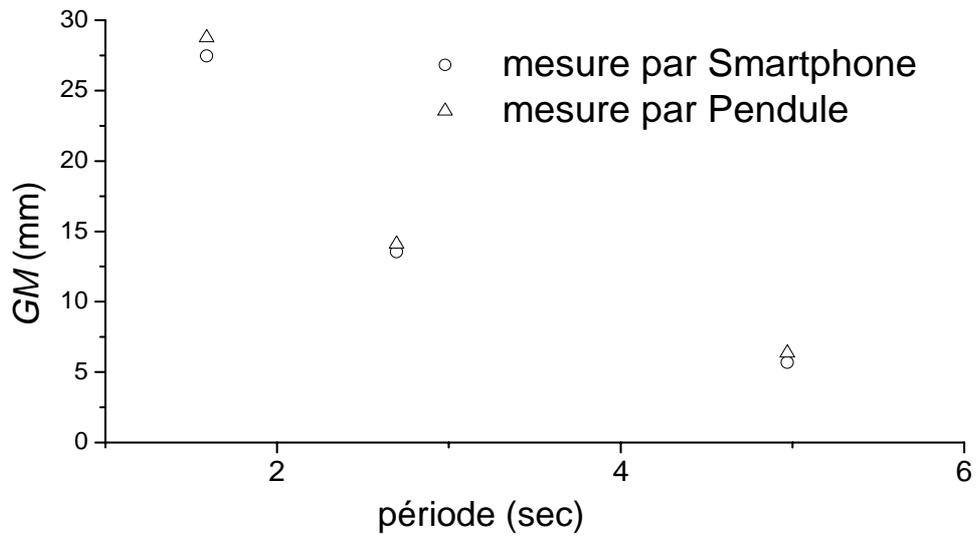


Figure 6.4 Comparaison de la période naturelle de roulis

En linéarisant la loi de Weiss on obtient :

$$\sqrt{GM} = Cr \frac{2B}{Tr} \quad \text{eq. 10}$$

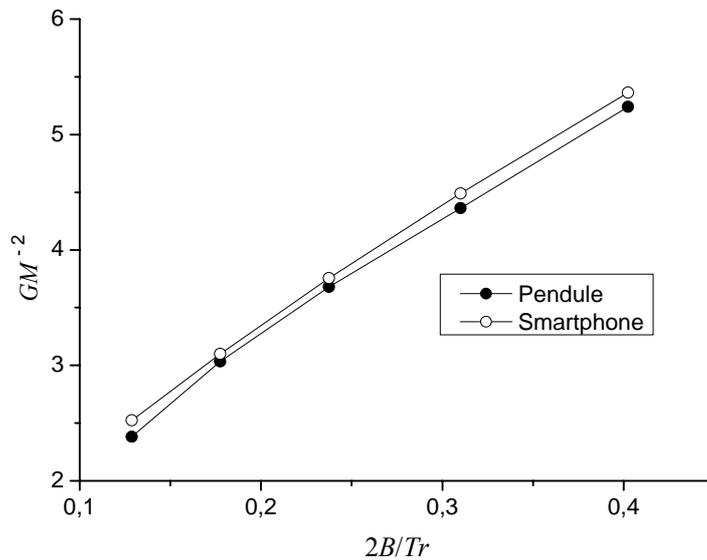


Figure 6.5 Loi de Weiss linéarisée

De cette linéarisation on obtient le coefficient d'inertie du mouvement de roulis du modèle  $Cr$  : qui est la pente des courbes sur la Figure 6.5. Le Tableau 8 montre que le coefficient obtenu par la mesure avec le smartphone présente une déviation plus faible que celle avec le pendule. L'erreur de 0,5 % sur la valeur du  $Cr$  n'est pas significative.

**Tableau 8  $Cr$  déterminé par les deux méthodes de mesure**

	Mesure Pendule	Mesure Smartphone apps	Erreur (%)
$Cr$	10,31	10,36	0.50
déviatiion Standard (mm)	0,68041	0,43088	–
Facteur de Corrélaitiion	0,99913	0,99785	–

## **Chapitre 7 : Conclusion et Recommandations**

L'application de smartphone visualisant les paramètres des mouvements des modèles de navires est étudiée, c'est à dire les mesures du mouvement du centre de gravité du navire. L'application du smartphone, comme instrument de mesure de la gîte, est investie lors de l'expérience de stabilité. Quelques recommandations sont nécessaires sur l'emplacement du smartphone à bord. En particulier, pour le test de roulis, des connaissances du phénomène sont requises par l'utilisateur ; Ceux-ci pour en tirer des informations de l'acquisition des données. En plus, les enregistrements du roulis, peuvent être archivés, dans le but de les comparer avec des mesures ultérieures.

Les résultats obtenus montrent la fiabilité des mesures comparativement avec la méthode traditionnelle utilisant le pendule et le chronomètre. La déviation standard pour cette méthode est plus faible. En plus, les mesures en grandeur nature, c'est-à-dire, à l'échelle d'un navire avec un smartphone est moins encombrante, et de lecture plus facile que sur le modèle ; puisque la période de roulis d'un navire est plus grande que celle des modèles.

Les résultats, obtenus dans ce travail, rendent cette méthode de mesure largement pratique, notamment, pour les petits navires tels que les navires de pêche et de plaisance. D'autant quelle soit recommandée par l'IMO, la FAO et autres autorités pour l'exécution de l'expérience de stabilité et de roulis. Avec la nouvelle génération de smartphone étanche cette méthode d'évaluation de la stabilité peut être pratique pour les capitaines de navires, skippers et les pêcheurs.

En fin, on assiste qu'au début d'une nouvelle ère de l'application des technologies nouvelles dans les domaines de l'ingénierie, mais avec le recul, c'est une révolution pour la recherche scientifique. Il n'y a pas de doute que ces technologies vont vulgariser l'étude expérimentale et l'acquisition des données dans la recherche et l'industrie.

## Références

- Asch G (1999). *Les capteurs en instrumentation industrielle*, 5ème édition Dunod
- Bennett SS, Brooks CJ, Winden B, Taunton DJ, Forrester AIJ, Turnock SR, Hudson DA (2014). Measurement of ship hydroelastic response using multiple wireless sensor nodes. *Ocean Engineering*, **79**, 67-80.  
DOI: 10.1016/j.oceaneng.2013.12.011
- Biran A (2003). *Ship hydrostatics and stability*. Butterworth-Heinemann, Oxford, Great Britain, 166-171. Cota A (1985). *GM-Meter automatic instrument for continuous measurement of ships stability*. ATMA, 97-113.
- Daponte P, De Vito L, Picariello F, Riccio M (2013). State of the art and future developments of measurement applications on smartphones. *Measurement*, **46**(9), 3291-3307.  
DOI: 10.1016/j.measurement.2013.05.006
- Griffin MJ, Lawther A, Lewis C (1985). Stability meter for floating objects. World Patent WO1987003855 A1.
- Gudmundsson A (2009). *Safety practices related to small fishing vessel stability*. FAO Food and Agriculture Organisation, Rome, Italy, FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 517
- IMO (2009). *SOLAS, consolidated edition, 2009*. 5th edition, International Maritime Organization, London, UK.
- ITTC (2008). International towing tank conference. Recommended Procedures 7.5-02-07-04.1.
- Kastnera M, Severa A, Hagera C, Sommera T, Schmidt S. (2010). Smart phone application for real-time optimization of rower movements. *Procedia Engineering* 2 3023–3028  
DOI: 10.1016/j.proeng.2010.04.105
- Kong Q, Kwon Y, Schreierz L, Allen S, Allen R, Strauss J. (2015). Smartphone-based networks for earthquake detection. in *Innovations for Community Services (I4CS), 2015 15th International Conference on* , pp.1-8,  
DOI: 10.1109/I4CS.2015.7294490.

- Kuhn J, Vogt P (2013). Applications and examples of experiments with mobile phones and smartphones in physics lessons. *Frontiers in Sensors (FS)*, **1**(4), 67-73.
- Hervieu H (1985). *Statique du navire*. Elsevier-Masson, Paris.
- Lewis EV (1988). Principles of naval architecture, Volume I: *Stability and strength*. SNAME, New York, USA.
- Lewis EV (1989). Principles of naval architecture, Volume III: *Motion in waves and controllability*. SNAME, New York, USA.
- Łuczak Sergiusz, Waldemar Oleksiuk, and Maciej Bodnicki. (2006). Sensing Tilt With MEMS Accelerometers. *IEEE SENSORS JOURNAL*, (6).  
DOI: 10.1109/JSEN.2006.881433
- MPU-6000/MPU-6050 Product Specification Datasheet, PS-MPU-6000A-00, InvenSense™, Sunnyvale, USA. (2013).
- Pattulo RNM, Thomson GR (1965). The B.S.R.A. trawler series. *Transactions of Royal Institution of Naval Architects*, (**107**), 216-236.
- Ripka P, Tipek A (2007). *Modern sensors handbook*. ISTE Ltd., London UK, 200-242.  
DOI: 10.1002/9780470612231
- Thomson Reuter Inc, (2015), smartphone statistics sales data, New York.
- Tomaz C, Roman Kamnik, Marko Munih. (2011). The measurement setup for real-time biomechanical analysis of rowing on an ergometer. *Measurement journal* 44 1819–1827  
DOI: 10.1016/j.measurement.2011.09.006
- Webster JG (1999). *Measurement, instrumentation, and sensors handbook*. CRC Press LLC, New York, USA.

## Annexe I. Théorie de la Stabilité du Navire

### Équilibre et Stabilité d'un Corps Flottant (Hervieu, 1985).

#### Équilibre d'un corps flottant

"Un corps plongé dans un liquide au repos, subit de la part de celui-ci une poussée verticale, dirigée vers le haut, égale au poids du volume du liquide déplacé" (principe d'Archimède). Cette force passe par le centre de gravité du liquide déplacé, lequel est appelé, dans le cas d'un navire, le centre de carène B (Figure A. 1). W L est la ligne de flottaison ou la surface de la mer

Un corps flottant au repos est soumis à deux forces :

- son poids  $P$  passant par son centre de gravité  $G$ ;
- la résultante des poussées hydrostatiques  $\Delta$  passant par son centre de carène B.

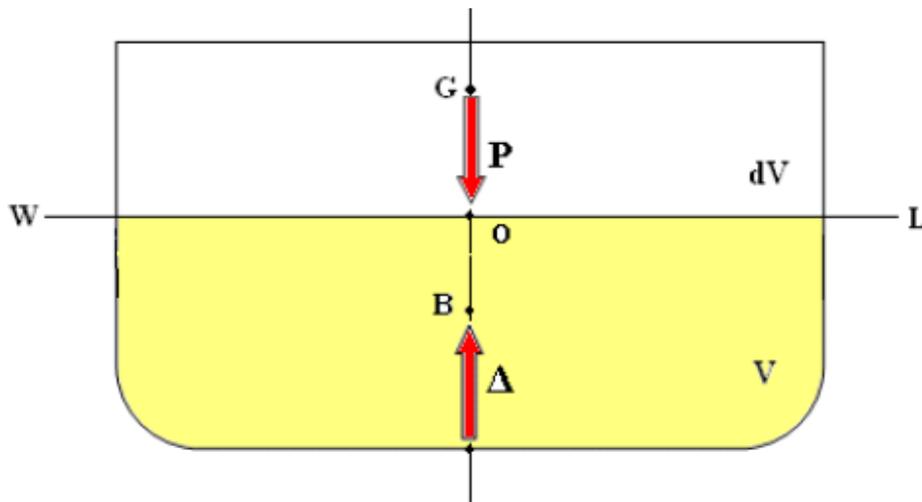


Figure A. 1. Équilibre d'un navire

Les conditions d'équilibre nécessitent que :

- le centre de carène B et celui de gravité G soient sur une même verticale;
- le poids  $P$  du corps soit égal à la résultante des poussées hydrostatiques  $\Delta$ .

Pour un navire elle se traduit par la relation :

$$P = \rho g \nabla$$

où  $P$  est le poids en tonne du navire,  $\nabla$  est le volume de la carène en  $m^3$ ,  $\rho$  (1,026 t/m<sup>3</sup>) le poids volumique de l'eau de mer à 10°C.  $g$  est la gravité (9,81 m/sec<sup>2</sup>)

### Stabilité de l'équilibre d'un corps flottant

Le mouvement d'un corps flottant peut se décomposer en deux mouvements :

- Un déplacement vertical (translation) sans variation angulaire (*déplacement isocline*);
- Une inclinaison sans variation de déplacement (*déplacement isocarène*).

### Inclinaison isocarène

Un corps flottant, en absence de toutes autres forces précitées, soumis à une faible inclinaison isocarène, revient à sa position initiale grâce au couple de rappel. Il est en équilibre stable.

Par contre, un corps flottant de révolution s'il a son centre de gravité qui coïncide avec son axe de révolution, quelque soit l'inclinaison qu'on lui donne, aucun couple n'existant, il reste dans la même position d'inclinaison. Il est alors en équilibre indifférent (neutre).

Dans le cas d'un corps entièrement immergé, la position du centre de gravité  $G$  par rapport le centre de carène  $B$ , détermine la stabilité du corps. Ainsi : L'équilibre est dit:

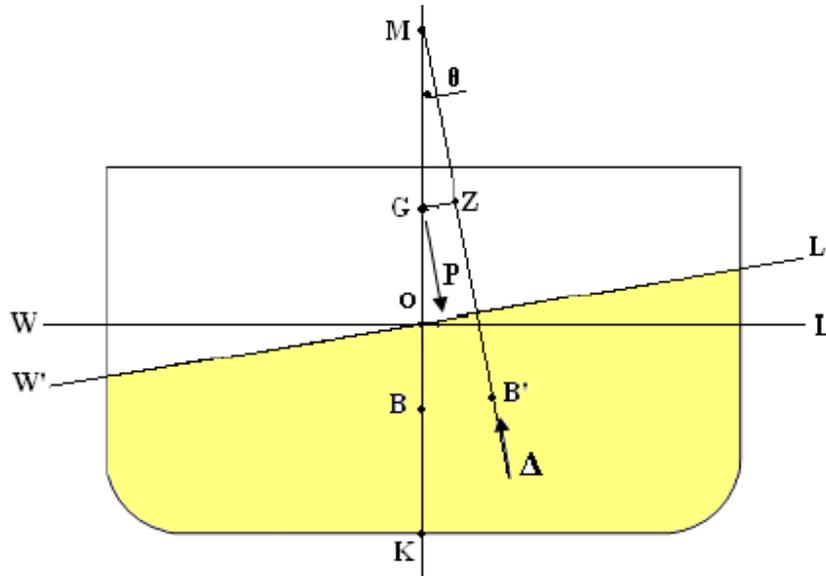
- **stable** si  $G$  est situé au-dessus de  $B$
- **neutre** si  $G$  coïncide avec  $B$
- **instable** si  $G$  est situé en dessous de  $B$

### Stabilité transversale

#### Petites inclinaisons ( $\sin \theta \approx \theta$ ) (*déplacements isocarènes*)

Une faible inclinaison isocarène (*volume immergé = volume émergé*) du navire autour des ses axes de symétrie horizontal et transversal perturbent l'équilibre du navire. On étudie des lors les stabilités transversale (inclinaisons autour de l'axe longitudinal) et

longitudinale (inclinaisons autour de l'axe transversal) (Figure A. 1). Cette dernière étant toujours bonne on ne considère que la stabilité transversale.



**Figure A. 2. Moment de redressement pour les petits angles de gîtes**

On parlera dès lors d'équilibre :

- stable si  $GM > 0$  donc  $KM > KG$  (G situé en dessous de M);
- neutre si  $GM = 0$  donc  $KM = KG$  (G et M sont confondus);
- instable si  $GM < 0$  donc  $KM < KG$  (G situé au-dessus de M).

Où M est le métacentre correspondant à l'inertie  $I_{XX}$  de la surface de flottaison par rapport à l'axe de symétrie longitudinal du navire,  $GM$  la hauteur métacentrique et  $KM$  sa distance à la ligne de base ; G le centre de gravité du navire et  $KG$  sa distance à la ligne de base. La ligne de base étant la ligne de quille du navire le point K est son intersection avec l'axe vertical.

Les angles d'inclinaisons considérés sont faibles tels que  $\sin \theta \approx \theta$  ( $\theta$  en radian).

### **Rayon métacentrique $BM$**

Pour un petit angle d'inclinaison le rayon métacentrique  $BM$  est calculé en fonction du volume de carène  $\nabla$  du navire et l'inertie  $I_{XX}$  de la surface de flottaison. Il est donné par l'expression :

$$BM = I_{XX} / \nabla$$

### **Module de stabilité $GM$**

En fonction des variables connues  $KB$ ,  $KG$ ,  $KM$  et  $BM$  on détermine la hauteur métacentrique  $GM$  qui est donnée par l'expression :

$$GM = KM - KG$$

### **Moment de stabilité statique**

Le moment de stabilité statique (couple de redressement), en fonction de l'angle d'inclinaison

( $\theta$ ), est donné par l'expression :

$$MR = \Delta \times GZ = \Delta \times GM \times \sin \theta$$

Où

$GZ = GM \times \sin \theta$  est le bras de levier de redressement.

Dès lors, l'expression du moment de stabilité statique  $MR$  pour  $\theta \ll \ll s$ 'écrit :

En résumé, pour que l'équilibre transversal du navire soit stable il faut que  $GM > 0$ .

Dans la pratique, les valeurs minimums recommandées sont de  $GM > 0.150$  m pour les navires de plus de 24 m de longueur et des valeurs minimums de  $GM > 0.350$  m pour les navires de moins de 24 m de longueur.

## Annexe II. Circulaire du ministère des transports

25-JAN-2002 07:42 DE:

A: 041392445

P:3

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DES TRANSPORTS  
CIRCULAIRE N° 14/0110 DU 15 JAN 2014 PORTANT SUR LA  
COMPOSITION DU DOSSIER D'APPROBATION DES PLANS DE  
CONSTRUCTION DE PROTOTYPES DE NAVIRES DE PECHE ET DE  
PLAISANCE DE LONGUEUR INFERIEURE A 12 METRES

La présente circulaire a pour objet d'alléger aux constructeurs locaux, la composition du dossier d'approbation des plans de construction de prototypes de navires de pêche et de plaisance de longueur inférieure à douze (12) mètres.

Le dossier d'approbation des plans de construction de prototypes de navires de pêche et de plaisance de longueur inférieure à 12 mètres, est composé de deux (02) parties :

**1. Dossier administratif composé des documents suivants :**

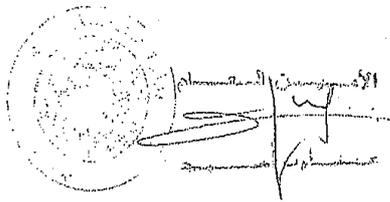
- o Une copie légalisée du registre de commerce ; et
- o Une copie légalisée de la carte fiscale.

**2. Dossier technique composé des documents suivants :**

- Une fiche technique relative au prototype du navire ;
- Méthode de calcul de l'échantillonnage de structure et des bordés ;
- Méthode de Calcul de la jauge brute ;
- Méthode de calcul de la puissance maximum du moteur
- Les plans de construction conformément à l'annexe I; et
- L'étude de stabilité conformément à annexe II.

L'examen et le traitement des dossiers des navires de longueur inférieure à 12 mètres, sont pris en charge par les services compétents de l'Administration Maritime Locale, au préalable de leur approbation par la Commission Centrale de Sécurité de la navigation maritime (CCS).

La présente circulaire sera applicable à partir de la date de sa signature.



**Destinataires:**

- Le chef de Département des Affaires Maritimes /SNGC (Pour attribution)
- Ministère de la Pêche et des Ressources Halieutiques (Pour information)

21-JAN-2014 MAR 09:13 TEL:043390132

NOM : CTR/MOP

ANNEXE I

LISTE DES PLANS DE CONSTRUCTION POUR LES NAVIRES  
PONTES ET NON PONTES

1. POUR LES NAVIRES PONTES

- Plan de vue générale du navire (section longitudinale verticale, vue en plan sur pont, vue en plan sous pont) ;
- Plan de la section au maître couple (indiquant les dimensions principales et l'échantillonnage de structure et des bordés) ;
- Plan de formes (tracé complet des trois vues)
- Plan de cloisons transversales et vues en section transversale de la charpente avant et arrière ;
- Plan de l'étambot, de l'appareil à gouverner et du gouvernail ;
- Plan de l'installation et circuits électriques ;
- Plans des circuits (carburant, assèchement des cales et anti incendie) ;

2. POUR LES NAVIRES NON PONTES

- Plan de vue générale du navire (section longitudinale, verticale et horizontale) ;
- Plan de la section au maître couple (indiquant les dimensions principales et l'échantillonnage de la structure et des bordés) ;
- Plan de formes (tracé complet des trois vues) ;

N.B : - Les plans de construction doivent respecter les données suivantes :

- Uniformiser le format des plans de construction en A3 ou A2 ;
- Etablir les plans en langue française ou anglaise.

ANNEXE II

ETUDE DE STABILITE POUR LES NAVIRES PONTÉ ET NON PONTÉ

L'étude de stabilité doit inclure les informations suivantes:

1. POUR LES NAVIRES PONTÉ

- Le devis des poids du navire lège ;
- Le tableau et les courbes hydrostatiques;
- La courbe de bras de levier de redressement GZ pour chaque cas de chargement :

a. Cas d'un navire de pêche :

1. Navire au départ pour les pêcheries avec un approvisionnement complet en combustible, en matières consommables, en glace et avec la totalité des appareils de pêche, etc.;
2. Navire au départ des pêcheries avec un plein chargement de poisson;
3. Navire à l'arrivée au port d'origine avec un plein chargement de poisson et avec 10 % d'approvisionnement en matières consommables, en combustible, etc.;
4. Navire à l'arrivée au port d'origine avec 10 % d'approvisionnement en matières consommables, en combustible, etc., et un chargement minimal de poisson égal à 20 %.

b. Cas d'un navire de plaisance :

1. Navire à pleine charge, avec le plein effectif des passagers, avec les approvisionnements complets ;
2. Navire avec le plein effectif des passagers, avec seulement 10% d'approvisionnements.

2. POUR LES NAVIRES NON PONTÉ

- Le devis des poids du navire lège;
- Le tableau et les courbes hydrostatiques;
- Le calcul de chargement maximum ; et
- Le calcul de la distance métacentrique minimale ( $GM_{min}$ ).

### Annexe III. PV de l'expérience de stabilité

\_\_\_\_\_ Stability Test Rough Data \_\_\_\_\_

---

*Description of Vessel:*  
Name \_\_\_\_\_  
Type \_\_\_\_\_  
Builder \_\_\_\_\_  
Hull Number \_\_\_\_\_

Vessel inclined at \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_ Time \_\_\_\_\_

Test conducted by \_\_\_\_\_  
Test witnessed by \_\_\_\_\_  
Description of weather conditions \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Specific gravity of water \_\_\_\_\_  
Temperature of water \_\_\_\_\_

Weights certified by:

Weigh master (certificate attached)

Reviewing authority

**FIG. X2.1 Stability Test Rough Data**



## Annexe IV. Extrait de la réglementation sur la stabilité à l'état intact [IMO 2009]

1. L'angle de début d'envahissement  $\theta_f$  doit être supérieur ou égal à  $30^\circ$  et l'aire limitée par la courbe des bras de levier de redressement  $GZ$  ne sera pas inférieure à 0,055 mètre-radian dans l'intervalle  $(0, 30^\circ)$ , ni à 0,090 mètre-radian dans l'intervalle  $(0, 40^\circ)$  ou  $(0, \theta_f)$ , si cet angle de début d'envahissement  $\theta_f$  est inférieur à  $40^\circ$ . De plus, l'aire limitée par la courbe ne sera pas non plus inférieure à 0,030 mètre-radian dans l'intervalle  $(30^\circ, 40^\circ)$  ou  $(30^\circ, \theta_f)$ .
2. Le bras de levier de redressement sera au moins de 0,20 m à un angle de gîte supérieur ou égal à  $30^\circ$ .
3. Le bras de levier de redressement maximal sera atteint à un angle de gîte supérieur ou égal à  $25^\circ$ .
4. La hauteur métacentrique initiale ne sera pas inférieure à 0,15 m. Toutefois, pour les navires transportant du bois en pontée, pour lesquels les critères figurant en 8.1.1 ont été satisfaits compte tenu du volume de cette cargaison, la hauteur métacentrique initiale ne sera pas inférieure à 0,05 m.

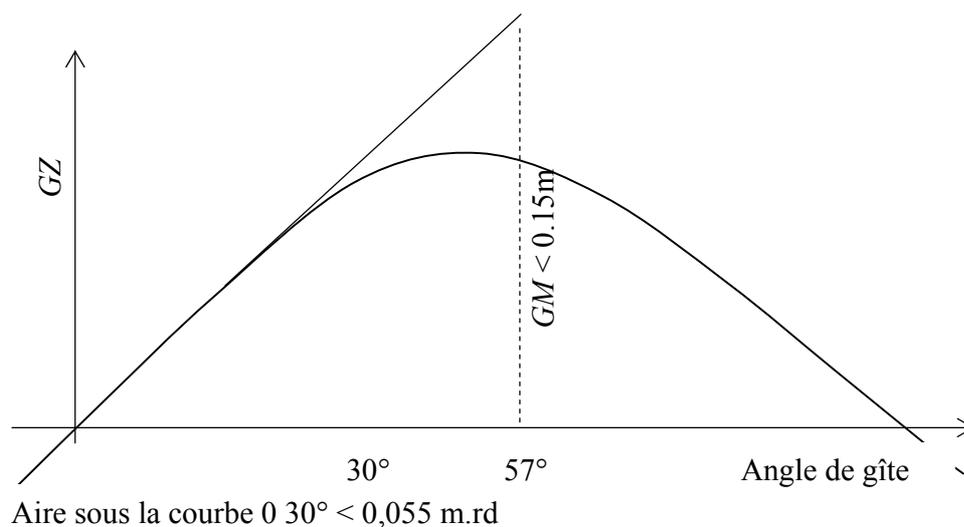


Figure A. 3 Courbe de bras de levier  $GZ$