

AVERTISSEMENT

Ces deux communications à l'Association Technique Maritime et Aéronautique établissent les bases de la méthode de mesure de la stabilité à l'aide de la mesure de la période propre de roulis et donnent les premiers résultats en exploitation du GM-METER sur des navires ferries à passagers.

Si le concept de base reste toujours valable, les améliorations apportées aux méthodes de filtrage et d'analyse ainsi que le retour d'expérience sur plus de vingt ans d'exploitation, ont permis de faire évoluer les modalités de mise en œuvre vers une utilisation plus pratique et plus universelle, avec des résultats plus précis, obtenus plus rapidement.

Ces communications doivent donc être considérées pour leur valeur historique et comme l'état de l'art à leur époque. Elles restent importantes car c'est sur elles que s'est appuyé l'OMI pour accepter le GM-METER comme moyen de détermination de la stabilité conforme aux recommandations de la SOLAS.

GM-METER

APPAREIL AUTOMATIQUE DE MESURE EN CONTINU DU MODULE DE STABILITE DES NAVIRES

A. COTA

Ingénieur Civil du Génie Maritime

SOMMAIRE

Après avoir passé en revue les études antérieures, le mémoire décrit le principe de la mesure : Détermination du GM par la mesure de la période propre de roulis à l'aide d'une analyse spectrale du mouvement et calcul du rayon de gyration en fonction du tirant d'eau.

La mise en oeuvre pratique de ce principe est ensuite plus particulièrement développée pour arriver à la réalisation d'un appareil automatique à microprocesseur, avec en particulier les filtrages et corrections nécessités par les fluctuations du phénomène et les influences parasites lorsque le navire est à quai ou sur mer très forte.

La philosophie d'utilisation à bord vis-à-vis des critères réglementaires de stabilité est enfin examinée.

GM - M E T E R

AUTOMATIC INSTRUMENT FOR CONTINUOUS MEASUREMENT OF SHIP'S STABILITY

After having reviewed previous studies, this paper describes the measurement principle : Determination of GM through measurement of ship's natural roll-period by means of a spectral analysis of motion and calculation of virtual radius of gyration in relation with draft.

Then, the practical application of this principle is developed to realise a microprocessor automatic instrument, particularly filtering and adjustments necessitated by fluctuations of motion and perturbations when ship is moored at quay or sailing in very rough seas.

The philosophy of utilisation on board in regard with stability rules is finally studied.

I - INTRODUCTION

La détermination de la stabilité des navires en exploitation est actuellement basée sur la tenue à jour des mouvements de charges et de ballasts à bord.

Cette méthode du "book-keeping" nécessite des calculs longs et fastidieux et demande une connaissance parfaite des poids embarqués à bord du navire.

Si l'emploi de calculateurs électroniques facilite maintenant les calculs, il n'en reste pas moins qu'il faut compiler tous les mouvements de poids, ce qui peut être très long pour un grand navire moderne. Les temps d'escale diminuant avec l'accélération des moyens de manutention les résultats ne sont souvent connus que lorsque le navire est déjà en haute mer.

De plus, les valeurs des poids manipulés ne sont que des valeurs théoriques souvent très éloignées de la réalité.

Cette situation commune à presque tous les types de navire se trouve exacerbée sur les grands porte-conteneurs modernes. Sur ces navires en effet, le poids et la hauteur du centre de gravité de chaque conteneur ne sont pas connus mais sont évalués forfaitairement pour le calcul.

Comme ces charges sont gerbées sur de grandes hauteurs, la position du centre de gravité de l'ensemble peut être notablement différente de celle estimée.

D'un autre côté, pour des raisons de construction, les ballasts présentent généralement une grande hauteur avec des sections horizontales très variables, ce qui ne permet pas de juger facilement des quantités d'eau embarquées par la lecture des sondes et ajoute une nouvelle imprécision.

Enfin, les dimensions des surfaces libres des ballasts étant très variables suivant les degrés de remplissage, ceci entraîne une méconnaissance presque totale des carènes liquides.

D'autres engins flottants comme les plateformes de forage, les navires de travaux ou les caboteurs côtiers et les chalutiers peuvent avoir des problèmes analogues pour apprécier avec précision la stabilité en cours d'exploitation, à cause des situations très différentes dans lesquelles ils peuvent se trouver.

Les conséquences sont souvent tragiques pour les chalutiers victimes de leur méconnaissance complète du chargement.

Ajoutons à cela les cas fortuits de variation de la charge comme l'accumulation de glace sur les superstructures pour la navigation arctique ; l'absorption d'eau par une cargaison hydrophile en pontée, ou l'accumulation de l'eau utilisée lors d'une lutte contre l'incendie.

Dans tous ces cas l'appréciation de la stabilité est très difficile, pour ne pas dire impossible, et une mesure directe serait extrêmement précieuse.

II - HISTORIQUE ET PRINCIPE D'UNE MESURE

La théorie du mouvement de roulis permet d'écrire :

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{I}{g \cdot \Delta \cdot GM}} \quad \text{qui peut s'écrire} \quad 2 \cdot \pi \cdot \frac{k}{\sqrt{g \cdot GM}} \quad (1)$$

T = Période propre de roulis.
Δ = Déplacement
I = Inertie de rotation = k² . Δ

Cette formule, valable en eau calme, a été établie et vérifiée depuis très longtemps par FROUDE <1>, BERTIN <2>, RANKINE <3> ...

Sur houle, l'ensemble des observations comme celles de POMMELET <4>, LEGENDRE <5>, KATO <6> laissent penser que le navire roule à sa période propre par l'amortissement très rapide des oscillations forcées.

Plusieurs tentatives d'application de cette formule pour la mesure du GM ont eu lieu. On peut citer la marine allemande pendant la seconde guerre mondiale sur des travaux de WEISS <7> ou le GM-Meter mécanique de KATO <8> au Japon après la guerre.

Dans les deux cas on mesure à l'aide d'un chronomètre la durée de quelques oscillations de roulis.

Sur un navire de guerre la mise en oscillation jusqu'à une dizaine de degrés d'amplitude peut se faire aisément en faisant déplacer l'équipage sur le pont. Pour les navires de commerce l'appareil de KATO est un amplificateur mécanique de mouvement permettant d'apprécier des mouvements de faible amplitude (de l'ordre d'un degré).

Les inconvénients sont cependant multiples :

- La mesure est ponctuelle.
- La méthode est relativement imprécise puisque les top de départ et d'arrêt sont aux extrémités de l'élongation (passage à vitesse nulle) et non pas au passage à la position moyenne inconnue (vitesse maximum).
- Il n'est pas possible d'opérer avec de très faibles amplitudes (moins de 1/10 de degré) alors que c'est au port lorsqu'on a ces faibles amplitudes qu'elle est intéressante.

Enfin, toujours aux faibles amplitudes, l'expérience montre que la période est instable (<2>, <13>). Une moyenne sur quelques mouvements peut donc entraîner une erreur grossière.

Malgré cela NORRBY en 1962 <9> puis NADEINSKI et JENS en 1968 <10>, dans une étude patronnée par l'IMCO, recommandent la mesure du GM par une mesure de période de roulis.

Dans le même esprit et avec les mêmes limitations on a pu voir commercialisé depuis peu un appareil de mesure de GM basé sur une mesure de période entre élongations maxima avec moyenne sur un certain nombre de cycles.

D'un autre côté, d'abord KIERNAN en 1948 <11>, puis WILLIAMS (1953) <12> et CARTWRIGHT (1957) <13> développent l'étude spectrale du roulis mais ces études sont faites sur modèle ou à partir d'enregistrements.

Les moyens employés manquent de précision : roulis minimum étudié de l'ordre du degré et établissement des spectres à l'aide d'analyseurs analogiques.

Ces études aboutissent aux travaux de NAESS en 1982 <14> qui préconise l'analyse spectrale, par des méthodes numériques, du roulis à bord des plate-formes de forage pour accéder à la stabilité, mais sans préciser de moyens spécifiques de mesures et de calcul.

Citons enfin VOSSERS <15> qui après avoir étudié avec sa manière exhaustive la bibliographie surtout allemande (ce que je n'ai pas pu faire ne connaissant pas la langue) conclut à la faisabilité de la mesure avec une précision de +/- 10 % pourvu que l'on opère en houle non régulière et que l'on moyenne les résultats sur un temps suffisant.



FIGURE 1 : L'appareil dans sa version définitive.

A partir de 1978 <16> je me suis fixé la mise au point d'un appareil dont le programme serait le suivant :

- Mesurer et afficher automatiquement le module de stabilité.
- Effectuer la mesure et donc l'affichage en continu.
- Etre suffisamment sensible pour fonctionner au port avec des roulis inférieurs à 1/10 de degré.

L'automaticité m'a paru indispensable pour que l'appareil soit effectivement utilisé ; le fonctionnement en continu est une nouvelle caractéristique qui permet de suivre l'évolution de la stabilité et de constater immédiatement les conséquences d'une modification du chargement au lieu d'avoir la photographie laborieusement développée actuelle.

Le principe de l'appareil peut se résumer de la façon suivante :

L'appareil analyse le mouvement du navire sur un certain intervalle de temps ; de ce mouvement il établit le spectre de fréquence, et un pic de ce spectre de fréquence doit correspondre au mouvement de roulis.

Afin de reconnaître automatiquement le pic correspondant au roulis, certaines précautions doivent être prises.

En effet, le spectre peut présenter des pics à très basses fréquences correspondant à des mouvements de prise de gîte lors du chargement ou du ballastage, ainsi que des pics parasites provenant des vibrations des machines ou même de la houle lorsqu'on est en mer et ceci d'autant plus que le mouvement propre est de faible amplitude.

Divers filtrages sont donc nécessaires.

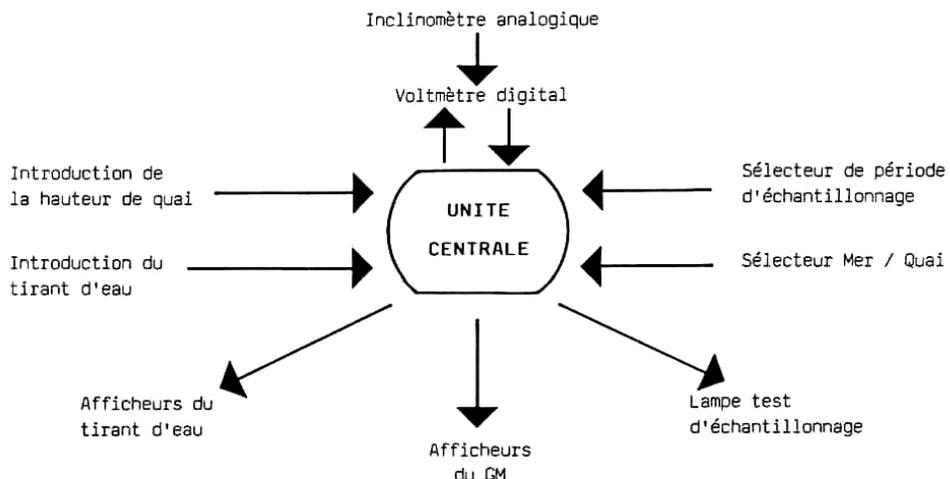
Enfin, pour obtenir une mesure en continu l'appareil doit, à chaque cycle, recalculer un nouveau spectre à partir du mouvement mémorisé actualisé par les enregistrements nouvellement acquis depuis le dernier calcul.

Avec un cycle de quelques secondes la mesure peut être considérée comme continue vis-à-vis de la vitesse des perturbations affectant un navire.

L'avènement des microprocesseurs a permis la réalisation de cet appareil en apportant les trois caractéristiques de base nécessaires :

- Fonctionnement automatique par l'autogestion du système.
- Traitement numérique nécessaire à la précision.
- Rapidité de calcul permettant d'obtenir un cycle de mesure et traitement de quelques secondes.

L'architecture du système est :



III - PARAMETRES DE LA MESURE

L'inclinomètre et le voltmètre fournissent une table échantillonnée du mouvement angulaire. Plus cette table compte de points (N), plus la finesse d'analyse est grande puisque le spectre discret compte lui N/2 points.

Le signal étant échantillonné, le spectre se répète périodiquement. Pour éviter que les différentes périodes ne se superposent dans la zone intéressante, la période d'échantillonnage doit satisfaire au théorème de NYQUIST-CHANNON .

$$T_e < T_{min}/2$$

T_e : Période d'échantillonnage

T_{min} : Plus petite période du mouvement intéressant.

$$\text{Si } T_{min} = 10 \text{ s alors } T_e < 5 \text{ s.}$$

L'échantillonnage doit d'autre part être suffisamment resserré pour permettre de reconstituer le signal par interpolation simple . Pour une précision \mathcal{E} on obtient :

$$T_e < \frac{T_{min}\sqrt{\mathcal{E}}}{2,2}$$

$$\text{Soit pour } \mathcal{E} = 5/100$$

$$T_e < 0,1 T_{min} = 1 \text{ s}$$

Ceci fixe la limite de l'échantillonnage admissible.

La durée de l'enregistrement analysé ne peut être infinie pour donner le spectre théorique mais doit être la plus longue possible afin de limiter les effets de fenêtre qui empâtent les spectres. 10 périodes du mouvement le plus long semblent un minimum, ce qui donne pour une période maximum de 30 s une durée d'enregistrement de 5 minutes.

Voilà pour les considérations théoriques. Pratiquement la capacité mémoire du calculateur est limitée et le nombre d'échantillons doit, pour simplifier les calculs, être une puissance de 2 avec un algorithme de calcul de transformée de Fourier rapide FFT .

L'ensemble de ces considérations m'a amené à choisir une longueur d'enregistrement de 512 points ce qui donne pour un navire de charge avec une plage de mesures de 10 s à 30 s de la période de roulis une période d'échantillonnage de 0,7 s, soit environ 6 minutes d'enregistrement.

Pour des cas de chargements extrêmes, donnant des périodes très proches ou dépassant les limites, la période d'échantillonnage peut être légèrement modifiée à l'aide d'un rotacteur, ce qui permet d'approcher 8 s ($T_e = 0,6 \text{ s}$) d'un coté et 40 s ($T_e = 0,9 \text{ s}$) de l'autre coté.

Bien entendu la période d'échantillonnage de base est réglable suivant le type de navire ; et pour un chalutier on aura une période d'échantillonnage de 0.4 s pour une plage de mesure de 5 à 20 s.

Le passage de la période de roulis au GM nécessite la connaissance du rayon de giration k .

La littérature abonde de formules pour déterminer k (Voir annexe). Après application de ces différentes formules, c'est celle de KATO <27> et <17> qui a donné les résultats les plus proches de l'expérience et que j'ai choisie de façon définitive.

Le seul paramètre à introduire par l'utilisateur est le tirant d'eau moyen du navire.

J'ai légèrement modifié la formule originale pour prendre en compte la pontée habituelle sur les porte-conteneurs en incluant dans la surface latérale (A) des superstructures la surface latérale de la pontée moyenne (conteneurs pleins).

$$K = B\sqrt{f \cdot X}$$

$$X = C_b C_d + 1,1 C_d (1 - C_b) (H/d - 2,2) + H^2/B^2$$

f : coefficient dépendant du type de navire (cargo 0.125, tanker 0.133, thonier 0.2)

f peut être vérifié expérimentalement lors de l'expérience de stabilité du navire.

- B : largeur
- C_b : block coefficient
- C_d : coefficient de surface du pont supérieur
- H : creux effectif = $D + A/L_{pp}$
- D : creux
- A : surface latérale des superstructures et de la pontée moyenne
- L_{pp} : longueur entre perpendiculaires
- d : tirant d'eau

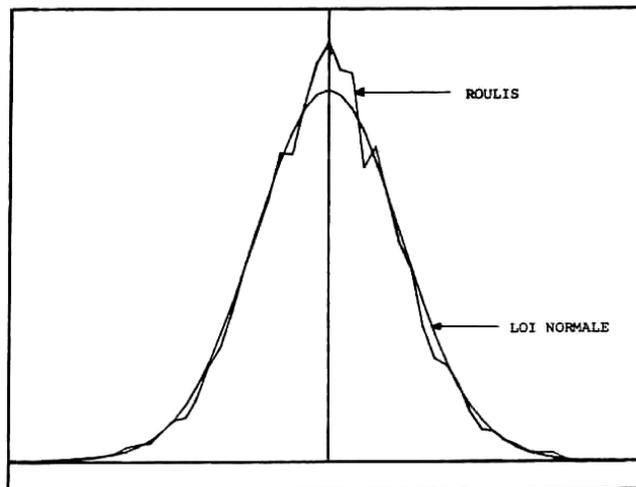


FIGURE 2 : "VILLE DE BORDEAUX", amarré à quai, sans activité à bord.
Distribution des amplitudes de roulis, comparaison avec la loi normale. Enregistrement de 2 heures.

IV - FILTRAGES ET CORRECTIONS

La recherche du pic d'énergie correspondant au roulis nécessite, on l'a dit, un certain nombre de précautions.

D'abord à la notion de pic d'énergie relativement imprécise, surtout pour un spectre discret, j'ai substitué celle de la période moyenne apparente, conforme aux résultats de RICE <18>. Pour un phénomène aléatoire suivant une loi normale de GAUSS (voir fig.2) celui-ci a établi que le nombre de passages au zéro par seconde est :

$$N = 2 \cdot \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} f^2 W(f) df}{\int_0^{\infty} W(f) df}}$$

f : Fréquence

W(f) : Energie dans la bande de fréquence f.

On en déduit immédiatement une période moyenne apparente $T = 2/N$

En limitant les intégrales à une bande passante étroite on s'affranchira des phénomènes parasites non liés au roulis.

La position de cette fenêtre a été asservie à la valeur de la période de roulis afin de cumuler les avantages de l'analyse d'une bande étroite d'une part et d'un grand domaine de mesure de l'appareil d'autre part.

De brusques changements d'amplitude de mouvement comme on en rencontre lors des opérations de chargement (voir fig. 3) ou lors des manoeuvres portuaires peuvent perturber très fortement l'allure du spectre. Ces perturbations donneraient un résultat instantané erroné.

L'expérience m'a montré que ces perturbations sont heureusement très fugitives car elles n'apparaissent que lorsque le changement de mouvement est tout à fait aux extrémités de l'enregistrement, et leurs effets sont aléatoires.

Pour pallier à cet inconvénient, les résultats doivent être lissés par passage dans un filtre numérique.

Ceci nous permet de revenir sur l'hypothèse de départ d'oscillation à la période propre. L'étude de la littérature, confirmée par les mesures que j'ai faites, nous montre qu'il faut être plus nuancé.

Le phénomène est moins tranché, et on peut le résumer par la formule de Cai BOIE (Comments on <9>): "Larger amplitudes of rolling are usually measured if the vessel is rolling near her natural period".

Autrement dit, dans un certain laps de temps le maximum d'énergie d'oscillation sera accumulé sur la période propre de roulis.

Le filtrage n'est donc pas effectué sur le résultat final mais sur les composantes du spectre d'énergie : l'énergie de chaque raie du spectre est lissée par un filtre numérique ce qui donnera un plus grand poids aux forts roulis donc ceux proches de la période propre.

La période de roulis étant définie le passage au GM se fait par la formule (1) avec deux corrections.

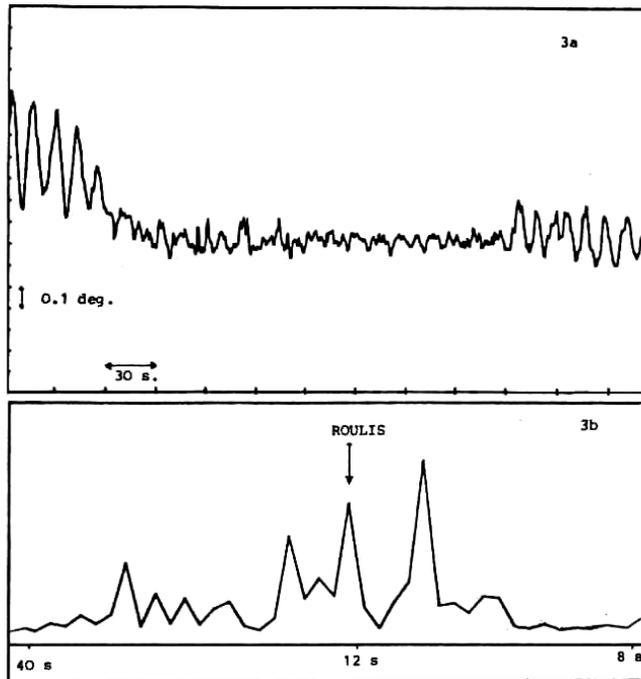


FIGURE 3 : a,b : Mouvement au chargement à quai et spectre correspondant

- Correction pour les grands angles de roulis :

Pour les grands angles de roulis la formule (1) est remplacée par la formule de WANDEL <19> et BARILLON (cité par BRARD <20>). Cette formule tient compte de la non linéarité du bras de levier de la force de rappel en considérant les murailles du navire verticales.

De plus, le moment étant proportionnel au sinus de l'angle, on introduit un terme correctif venant du second terme du développement <2>

$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot k}{\sqrt{g \cdot GM}} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{3}{8} \cdot \frac{BM}{GM} \cdot \theta^2}} \cdot \left(1 + \frac{\theta^2}{16}\right)$$

BM = distance centre de carène/métacentre est exprimée en fonction du tirant d'eau.

θ^2 = Carré de l'angle de roulis maximum de l'enregistrement analysé.

Cet angle maximum est déduit directement de l'aire du spectre considéré, suivant les résultats de LONGUET-HIGGINS <21>, le spectre étant étroit par définition.

Cette formulation permet de plus d'obtenir un résultat valable pour les petites valeurs de GM. En effet (1) donne une période infinie pour GM=0 alors que l'expérience montre que cette période est finie. La formule de WANDEL n'est d'ailleurs qu'une mise en forme de celle de SCRIBANTI <22> établie pour valider (1) au voisinage de GM=0 (Voir figure 4).

- Correction pour un navire amarré à quai :

Cette correction prend en compte la présence du quai, du fond et des amarres, elle est mise en oeuvre par un contacteur mer/quai.

La présence du quai et du fond majore la valeur de k.

Théoriquement la majoration due à la faible profondeur est négligeable (inférieure à 1 %) suivant les travaux théoriques de CHEUNG H. KIM <23>. Néanmoins des essais en bassin ont montré (NORRBY) <9> que la présence combinée du fond et du quai pouvait porter cette majoration à 4 à 8 %.

Lors des mesures sur navire, navire éloigné du quai et navire à quai amarré en pointe pour expérience de stabilité, j'ai enregistré une majoration de 6 %, valeur que j'ai adoptée comme moyenne.

Enfin, il faut tenir compte de l'influence des amarres, qui accroissent le moment de rappel de $M \cdot \theta$

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{I}{g \cdot GM \cdot \Delta + M}} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{k}{\sqrt{g \cdot GM + \frac{M}{\Delta}}}$$

Pour une amarre de longueur l avec une hauteur du chaumard de h au-dessus des bollard on a une force de rappel : F (Voir les notations à la figure 6)

$$F = K_0 \cdot \frac{\delta l}{l} \cdot \frac{h}{l}$$

K_0 , raideur de l'amarre considérée comme constante.

Le moment de rappel est R.F

R distance du centre de gravité au chaumard du navire.

D'autre part, en première approximation

$$\delta h = R \cdot \delta \theta \quad h \cdot \delta h = l \cdot \delta l$$

Si on considère qu'en moyenne l est pratiquement constant pour l'ensemble des amarres :

$$M = K_1 \cdot h^2 \cdot R^2 \cdot \delta \theta$$

Si C' est la hauteur des chaumards au-dessus de la quille

$$h = C' - d - Hq$$

Hq = la hauteur du quai.

d = le tirant d'eau.

Si B' est la largeur moyenne du navire au niveau des chaumards :

$$R^2 = (B'/2)^2 + (C' - KG)^2$$

$$R^2 = (B'/2)^2 + (C' - KM + GM)^2$$

KM est déduit du tirant d'eau.

$$GM = GM(\text{mesuré brut}) - K_2 \cdot h^2 \cdot R^2 / \Delta$$

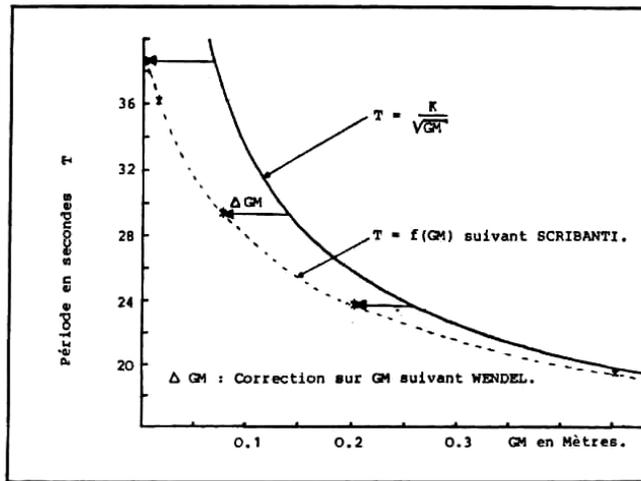


FIGURE 4 : Correction du GM aux faibles valeurs et pour les fortes amplitudes.

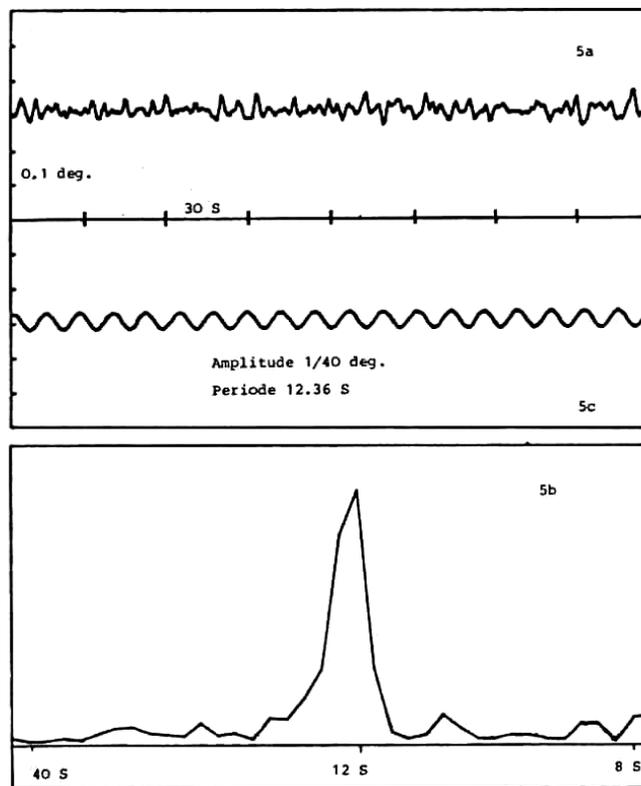


FIGURE 5 : "VILLE DE BORDEAUX" - (a) Mouvement à quai sans activité à bord. - (b) Son spectre. - (c) Mouvement synchrone correspondant au pic de roulis.

K_2 est déterminé par comparaison d'une mesure de période le navire amarré et non amarré.

V - EXPLOITATION DES RESULTATS

L'appareil va afficher en permanence la valeur du GM mesuré. L'utilisateur doit garder à l'esprit que cette valeur est le résultat de l'analyse du mouvement sur plusieurs minutes. Cette considération joue lors des très rapides changements d'état, par exemple lors du chargement d'un colis lourd, en particulier par les moyens du bord ou lors de l'accostage à quai ou l'appareillage.

Dans les configurations habituelles d'exploitation, les vitesses de variation d'état de chargement sont suffisamment faibles pour que la mesure suive de très près la réalité.

Dans certains cas la valeur mesurée du GM peut s'écarter notablement de la valeur calculée. Ceci peut venir d'un certain nombre de phénomènes non pris ou mal pris en compte par le calcul comme l'influence de l'assiette, de la gîte permanente, des carènes liquides dans des ballasts mal tassés ou mal asséchés.

Le principe de la mesure suppose que le navire roule. La très grande sensibilité de l'appareil permet d'effectuer des mesures exploitables avec des mouvements de très faible amplitude, jusqu'à 1/100 de degré de roulis de chaque bord.

Il convient d'insister sur la puissance de la méthode de la transformée de FOURIER. On voit Fig. 5a un enregistrement de mouvement effectué sur le porte-conteneur "VILLE DE BORDEAUX" amarré à quai, sans activité à bord, par temps calme sans vent ni houle dans le port de SETE.

En 5b le spectre de cet enregistrement et en 5c, la représentation du mouvement ayant la période indiquée par le pic d'énergie correspondant au roulis.

On voit que malgré son aspect tourmenté et sa faible amplitude, le signal est exploitable par la FFI, ce qui ne serait pas le cas pour une mesure directe de période, qui est ici impossible.

Néanmoins dans certain cas : navire extrêmement bridé ou fortement appuyé contre le quai par le vent ou même partiellement échoué, la mesure peut se révéler inexploitable.

Ce peut être le cas aussi quelquefois, lors d'une mise en mouvement forcé : train de houle important dans un port, oscillation de l'eau d'un bassin etc... Ces phénomènes sont fugitifs, mais pendant leur durée la mesure est impossible, ou erronée et doit être écartée.

Au niveau du spectre ces phénomènes se traduisent par un élargissement de la largeur de bande (spectres plats ou spectres à plusieurs bosses).

Des tests sur cette largeur de bande permettent d'écarter ces mesures avant de les introduire dans le calcul. L'afficheur conserve alors la valeur du GM qu'il avait lors de la dernière mesure acceptable. Afin d'attirer l'attention de l'utilisateur sur le caractère suspect de la valeur affichée à ce moment, l'afficheur est mis en clignotement.

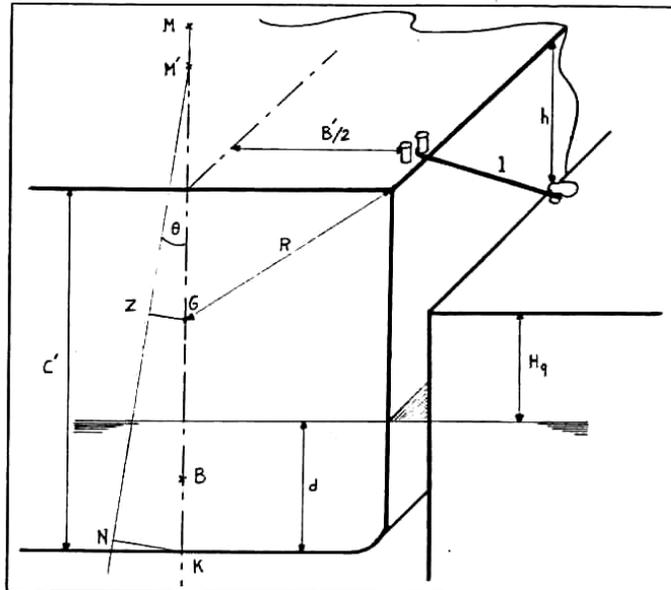
Des campagnes d'essais ont été effectuées sur les navires "CHEVALIER PAUL" et "CHEVALIER ROSE" des CHARGEURS REUNIS, puis le "VILLE D'ANVERS" et le "VILLE DE BORDEAUX" de la NCHP, qui sont tous des porte-conteneurs jumboisés, enfin sur le "THALIA" de l'IFREMER, navire océanographique proche d'un chalutier.

L'ensemble des mesures représentent près de mille heures d'enregistrement dans des situations très diverses, à quai, au mouillage, en navigation, par mer calme ou par tempête, en chalutage ou lors d'expériences de stabilité.

L'analyse de ces enregistrements donne une dispersion de +/- 15 % sur la valeur du GM mesurée, avec un taux de mesures non fiables (clignotement) entrant dans cette dispersion inférieure à 10 %.

En écartant les mesures signalées suspectes par le clignotement, la dispersion est ramenée à 8 %.

FIGURE 6 :
Notations



Si l'appareil ne mesure que le GM, il n'en donne pas moins une information complète sur la stabilité, en particulier vis-à-vis des critères réglementaires, en effet le couple de valeurs GM/tirant d'eau définit entièrement la stabilité :

Avec les notations classiques:

$$\begin{aligned} GM &= BM - BG = \rho \cdot a \\ GM &= BM - (KG - KB) \end{aligned}$$

La carène du navire étant connue, le tirant d'eau définit $BM = \rho$ rayon métacentrique et KB hauteur du centre de carène. KG hauteur du centre de gravité, incluant l'influence des carènes liquides, est donc déterminée si on connaît GM .

Avec la carène inclinée :

$$\begin{aligned}KN &= (KM') \sin \theta \\GZ &= (KM' - KG) \sin \theta\end{aligned}$$

KM' est parfaitement déterminé par la géométrie de la carène, le tirant d'eau (d) et l'inclinaison (si on admet comme approximation que KG incliné = KG droit, donc que les carènes liquides ne sont pas diminuées par l'inclinaison), la courbe $GZ = f(\theta)$ est alors aussi déterminée et les calculs correspondants aux critères de stabilité peuvent être menés pour chaque point du plan (GM, d).

On peut déterminer ainsi la courbe limite vis-à-vis de ces critères séparant le plan en zones acceptable et interdite (Voir fig.7).

Connaissant cette courbe, une simple lecture des deux afficheurs de l'appareil permet de vérifier la position vis-à-vis des critères de stabilité.

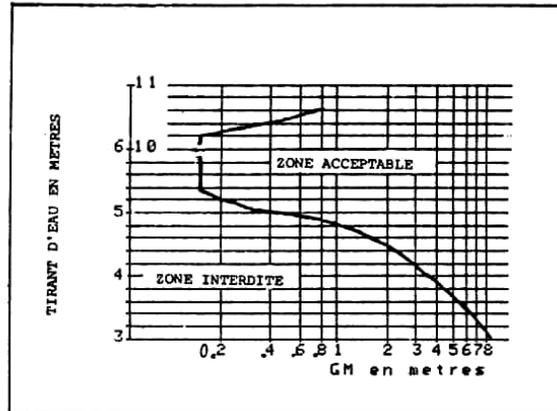


FIGURE 7 : "VILLE DE BORDEAUX" - Limite en fonction du tirant d'eau des valeurs admissibles du GM suivant les critères de stabilité réglementaires.

VI - CONCLUSION

La technologie moderne a permis la réalisation de cet appareil dont le principe de fonctionnement ne met en oeuvre que des théories et des résultats connus depuis fort longtemps.

- La mesure du GM est ramenée à la mesure de la période propre de roulis.
- Cette mesure est effectuée par une analyse spectrale du mouvement de roulis à l'aide d'une transformée de Fourier rapide discrète.
- La période propre est déduite du spectre par le calcul de la période moyenne apparente suivant la méthode de Rice.
- L'influence des mouvements parasites est supprimée par l'élimination des spectres à grande largeur de bande et celle des mouvements transitoires par le passage dans un filtre numérique.

- Le passage de la période propre au GM s'effectue à l'aide de la détermination du rayon de gyration par la formule de Kato en fonction du tirant d'eau.
- Les résultats sont corrigés pour tenir compte en mer de la non linéarité de la force de rappel et à quai du rappel dû aux amarres et de la modification de la masse d'eau ajoutée.
- Pour l'utilisateur, le couple de valeurs GM-tirant d'eau détermine sans ambiguïté la conformité aux critères réglementaires de stabilité.

Mes recherches bibliographiques m'ont donné l'impression que depuis une trentaine d'années, les chercheurs s'étaient désintéressés de ce problème de la mesure du GM à partir de la mesure de la période propre.

J'espère que cette communication permettra de relancer l'intérêt et que des études approfondies permettront de donner une base théorique ou au moins une assise expérimentale plus importante aux différents choix que j'ai été amené à faire au cours de la mise au point de cet appareil.

Ainsi, en obtenant un fonctionnement de plus en plus fiable, la sécurité des navires et des équipages se trouvera renforcée.

* *
*

A N N E X E

Les formules les plus courantes pour déterminer le rayon de gyration en roulis k sont les suivantes (avec les notations du texte):

$$\text{NIEDERMAIR <24> } k = \frac{0,44 \cdot B \cdot \sqrt{g}}{2 \cdot \pi} = 0,4 \cdot B \quad (g \text{ en } \text{pieds} / \text{s}^2)$$

$$\text{WEISS <7> } k = \frac{C \cdot B \cdot \sqrt{g}}{2 \cdot \pi}$$

C : coefficient dépendant du type de navire et variant de 0,71 à 0,83 donc k varie de $0,354 \cdot B$ à $0,414 \cdot B$

$$\text{DOYERE <25> } k = \sqrt{\frac{B^2 + (2 \cdot KG)^2}{12}} = 0,29 \cdot \sqrt{B^2 + (2 \cdot KG)^2}$$

LAURENSEN / HORN <26> : En supposant le chargement homogène, on peut remplacer dans la formule précédente KG par une fraction du creux D .

$$k = C \cdot \sqrt{\frac{B^2 + D^2}{2}}$$

C variant avec le type de navire de 0,33 à 0,39

KATO <27> : Voir le texte.

B I B L I O G R A P H I E

- 1 - FROUDE : "Isochronism of oscillation in ship" Trans. INA, 1863.
- 2 - BERTIN : "Données théoriques et expérimentales sur les vagues et le roulis". Mémoire de la Société des Sciences Naturelles de Cherbourg, 1869-1880.
- 3 - RANKINE : "Rolling of ship". Trans. INA 1872.
- 4 - POMMELET : "Considérations sur le roulis". ATMA, 1932.
- 5 - LEGENDRE : "Calcul approximatif du roulis sur houle irrégulière, mise en parallèle d'essais sur modèles et d'essais à la mer". ATMA, 1933.
- 6 - KATO : "Results of some rolling experiments". Journal of Zosen Kiokai, 1942.
- 7 - WEISS : "Erfahrungen mit der stabilitätsprüfung durch rollversuche". Hansa, 1953.
- 8 - TAMIYA, MOTORA : "Problems of statical stability". SNA of Japan, 60th Anniversary Serie, vol. 6.
- 9 - NORRBY : "The stability of coastal vessels". Trans. RINA, 1962.
- 10 - NADINSKI, JENS : "The stability of fishing vessels". Trans. RINA, 1968.
- 11 - KIERMAN : "A methode for determination of ship's stability at sea". Trans. SNAME, 1948.
- 12 - WILLIAMS : "An investigation into the motions of ship at sea". Trans. RINA, 1953.
- 13 - CARTWRIGHT : "The rolling and pitching of a ship at sea". Trans. RINA, 1957.
- 14 - NAESS : "On a method for continuous control of platform stability under operating conditions". Intermaritec'82 - Hambourg - Conference report 1982.
- 15 - VOSSERS : "Resistance, propulsion and steering of ships". vol. C, chap. V. The Technical Publishing Company H. STAM N.V. Haarlem, 1962.
- 16 - SCHLEMMER, TANG TAYE, COTA : "Conception d'un appareil automatique de mesure en continu de la stabilité des navires". ENSTA, Projet n° 18, 1979.
- 17 - TAMIYA, MOTORA : "Rolling characteristics of ships". SNA of Japan, 60th. Anniversary Series, vol. 6 .
- 18 - RICE : "Mathematical analysis of random noise". Part III, Bell Syst. Technical Journal, vol. 24, 1945.

- 19 - WENDEL : "Rollschwingungen und hebelarm kurve". Schiffbau, 1940.
- 20 - BRARD : "Des effets de l'eau entraînée sur le mouvement de roulis en eau calme". ATMA, 1939.
- 21 - LONGUET-HIGGINS : "On the statistical distribution of the heights of sea waves". Journal of Marine Research, vol. XI, 1952 ,number 3.
- 22 - SCRIBANTI : "On the heeling and rolling of ships of small initial stability". Trans. INA, 1904.
- 23 - CHEUNG H. KIM : "Hydrodynamic forces and moment for heaving, swaging and rolling cylinders on water of finite depth". Journal of Ship Research, June 1969.
- 24 - NIEDERMAIR : "Further developoements in the stability and rolling of ships". Trans. SNAME, 1936.
- 25 - DOYERE : "Théorie du navire". Libraire J.B. Bailliere et Fils, Paris 1927.
- 26 - LAURENSEN : "Ship rolling constants". Marine Engineering Shipping Review, May 1949.
- 27 - KATO : "Approximate method of calculating the period of roll of ships". Journ. SNA of Japan, vol. 89, April 1956.

* *
*

© 1985 ATMA

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays, sans autorisation de l'ATMA et de l'auteur

UTILISATION DU GM-METER SUR LES TRANSBORDEURS A PASSAGERS

A. COTA ingénieur civil du Génie Maritime

ATMA 1991

Sommaire

Le GM-METER (voir ATMA 1985) a été adapté à une utilisation sur les transbordeurs à passagers.

Cette utilisation entre dans le cadre des amendements SOLAS relatifs à la surveillance de la stabilité de ces navires.

Six transbordeurs transManche ont été équipés, et un premier bilan d'utilisation de l'appareil est effectué.

Comparaison est faite entre l'emploi de l'appareil et le calcul analytique du GM.

Les améliorations pour conforter les avantages du système ainsi que pour satisfaire aux règles particulières de la réglementation Britannique sont évoquées.

RESULTS OF GM-METER USING ON FERRIES PASSENGERS SHIPS

The GM-METER (see ATMA 1985) has been adapted to be used on ferries in accordance with SOLAS amendment regulation 1990 for the supervision of ship stability.

Six ferries on Channel have been equiped and a first review of results is operated. Comparison is showed between GM-METER and book-keeping method.

The improvements to reinforce the advantages of the device and to satisfy UK regulations are noted.

Historique

En 1985 j'ai présenté ici-même le GM-METER [1], cet appareil était le résultat de dix ans d'études et de développement qui m'avaient permis d'une part d'établir les caractéristiques du phénomène physique, et d'autre part de définir les modalités de mesure et la technologie adaptée à cette mesure. Je rappelle en quelques mots les points les plus caractéristiques:

-Les oscillations de roulis d'un navire donnent sur un certain laps de temps une accumulation d'énergie autour de la période propre de roulis.

-Cette distribution d'énergie s'effectue dans une bande étroite de fréquence suivant une loi de RAYLEIGH.

-Les oscillations de roulis peuvent être caractérisées à l'aide d'un inclinomètre fournissant en fait la composante horizontale (liée au navire) de l'accélération, et donc incluant l'accélération d'embarquée, l'influence de celle-ci étant négligeable.

-Le passage de la période propre au GM nécessite l'évaluation du moment d'inertie de rotation du navire dans l'eau. Cette évaluation peut être effectuée à l'aide de la formule statistique de KATO [2] avec le tirant d'eau moyen du navire comme paramètre.

-Des corrections sont à apporter:

. En fonction de l'amplitude des mouvements pour la détermination de la période propre aux grandes amplitudes.

. Pour tenir compte de la proximité du quai et du fond dans la détermination du moment d'inertie de rotation.

. Pour tenir compte du moment de rappel des amarres lorsque le navire est à quai.

-Un système de mesure automatique peut être construit assurant une acquisition échantillonnée permanente du roulis et effectuant le traitement sur une collection des dernières valeurs acquises. Le traitement étant un calcul de densité spectrale par transformée de Fourier rapide et un filtrage par filtre numérique sur l'énergie.

Le système mis alors en place sur des navires de charge ou des navires d'assistance fonctionnait ainsi en continu, avec une constante de temps d'intégration des résultats, c'est-à-dire un temps de réponse à une modification du GM d'environ 15 minutes.

Cette constante de temps permettait d'effectuer un filtrage très efficace vis-à-vis des perturbations de mouvement provoquées par une mer désordonnée et ne

semblait pas être pénalisante au regard des vitesses de modification de chargement d'un navire en route.

Une observation m'a amené à réviser depuis mon jugement sur ce point :

Si le filtrage est d'autant plus nécessaire que les sollicitations dues à la houle sont importantes (mer très forte ou navires de petite taille), c'est aussi dans ces circonstances que le GM voit sa valeur se modifier rapidement, non pas par modification du chargement, mais par action des éléments extérieurs :

L'exemple le plus courant est le navire rattrapé par la houle de l'arrière qui voit sa surface de flottaison et donc la valeur de son rayon métacentrique sensiblement modifié pendant quelques instants.

Notons que dans certaines circonstances, on peut observer le même phénomène sans houle, lors de prise importante d'assiette négative en navigation dans un chenal.

Ces fluctuations du GM étant relativement fugitives, elles sont d'autant plus gommées que la constante de temps de la mesure est grande, ce qui est une incitation à raccourcir celle-ci.

C'est dans cet esprit que j'ai travaillé à un modèle de GM-METER destiné aux chalutiers.

Cette modification a l'avantage non seulement de déceler des pertes de stabilité dues aux conditions de navigation, mais en limitant la mesure à un temps très court de permettre d'effectuer celle-ci à la demande, donc en dehors des opérations de manipulation de chalut qui sont très perturbantes et affolent le système de mesure en continu.

La nouvelle réglementation

Un événement est venu précipiter les choses:

La catastrophe du *Herald of free enterprise*, et la volonté des pouvoirs publics de renforcer la sécurité des navires à passagers qui en a résulté.

Je ne reviendrai pas sur les causes immédiates de la catastrophe qui ont été longuement démontrées, mais au-delà de celles-ci, la Cour qui a jugé l'affaire, et les autorités qui ont été invitées à prendre les mesures nécessaires pour éviter que cela ne se reproduise, ont été unanimes pour dénoncer que ce type d'accident était dû avant tout à une méconnaissance habituelle de la stabilité du navire.

Il en est résulté une réglementation Britannique d'abord puis un amendement IMO aux règles SOLAS qui a été repris par la réglementation française.

Tous ces textes, en plus de la réglementation d'un certain nombre d'accessoires de sécurité, insistent sur l'obtention d'une meilleure connaissance de la stabilité par les bords.

La réglementation Britannique qui ne s'applique qu'aux navires de pavillon national est extrêmement restrictive quant aux moyens à mettre en oeuvre pour obtenir une connaissance suffisante de la stabilité.

Le rédacteur ne connaissant pas le GM-METER, celui-ci se trouve pratiquement exclu par la lettre du règlement.

Les amendements SOLAS repris par la réglementation française, en revanche, laissent la porte ouverte à une utilisation du GM-METER.

Evidemment ce résultat n'est pas fortuit, mais résulte d'un gros effort des autorités françaises représentant la France à l'IMO qui, convaincues de l'intérêt du GM-METER ont réussi à imposer une rédaction ouverte de la réglementation:

On completion of loading of the ship and prior to its departure, the master shall determine the ship's trim and stability and also ascertain and record that the ship is in compliance with stability criteria in relevant regulations. The Administration may accept the use of an electronic loading and stability computer or equivalent means for this purpose.

Bien sûr la réglementation française est encore plus explicite:

VERIFICATION DE L'ASSIETTE ET DE LA STABILITE AVANT LE DEPART:

Le but de ces vérifications est de permettre au Capitaine de comparer la valeur estimée de KG ou de GM avant le départ du navire aux valeurs maximales admissibles dans les conditions d'exploitation ...

Si la méthode choisie est d'effectuer une mesure globale du GM au moyen d'un appareil spécialisé, celui-ci doit être jugé satisfaisant par l'autorité compétente.

Poursuivant dans la voie que j'avais commencé d'explorer pour les navires de pêche, la constante de temps d'analyse a été réduite le plus possible.

Parallèlement les filtrages ont été allégés, la procédure d'utilisation de l'appareil excluant son usage en mer; le but étant d'obtenir une mesure en quatre minutes, à quai ou immédiatement après le départ du quai.

L'idéal, évidemment était d'obtenir une mesure le navire encore à quai, en situation de modifier son chargement.

Pour les ferries, cette possibilité n'est pas envisageable, la présence de la rampe à quai bride trop le navire et dénature trop son mouvement de roulis naturel.

La mesure n'est donc possible que le navire encore à quai mais en configuration de navigation, ou le navire venant juste de quitter le quai.

La première solution a l'inconvénient d'allonger le temps de traversée de quelques minutes, ce qui semble sur les courtes traversées transManche réhhibitoire commercialement.

De plus à quai, la mesure est moins précise qu'en manoeuvres, bien que cette dégradation des résultats n'ait pas encore pu être quantifiée.

Sans entrer dans une analyse casuistique du terme *prior to its departure*, de la réglementation, la mesure après le départ du quai ne pose pas les problèmes auxquels on pense à priori :

L'analyse des différents éléments de chargement d'un ferry, et leur influence sur la stabilité montre qu'il sera bien rare qu'un problème de stabilité puisse être résolu par le déchargement de quelques éléments de la cargaison.

Si la cargaison est en cause, il faudra revoir entièrement le plan de chargement, et le retour à quai ajoutera un temps relativement peu important vis-à-vis de l'ensemble de l'opération.

Mais cette hypothèse est de toute façon hautement improbable, un défaut de stabilité résultera quasiment tout le temps d'une fausse manoeuvre ou d'un accident sur les capacités :

Ordre de ballastage non exécuté, panne de téléjaugeage, envahissement accidentel etc. On pourra donc remédier à la cause s'il n'y a pas d'avarie sans avoir à revenir à quai.

De toute façon la sécurité n'a pas été mise en cause (sauf concours de circonstances extraordinaire comme pour le *Herald of free enterprise*, et que les autres mesures de sécurité doivent éviter).

En effet les conditions de stabilité à vérifier sont celles permettant de conserver une stabilité après avarie suffisante, tous ces navires possédant par construction une stabilité telle qu'aucune configuration de chargement ne puisse à elle seule amener à une valeur dangereuse à l'état intact.

Un des avantages du GM-METER sur les méthodes classiques de calcul de stabilité apparaît ainsi :

La mise en évidence très rapide, en tout cas avant que cela ne devienne dangereux des erreurs ou des accidents dans la gestion des capacités.

Il remplit ainsi deux des conditions de base de la sécurité mis en évidence dans les centrales nucléaires :

Rendre l'installation "pardonnante" et renseigner rapidement et complètement l'équipe de surveillance.

Les autorités françaises ont été sensibles à cet aspect du problème, et la doctrine adoptée s'argumente en trois points :

-Le GM-METER permet un suivi permanent de la stabilité grâce à sa facilité de mise en oeuvre, il va donc dans le sens d'une meilleure connaissance habituelle de cette stabilité par les bords.

-Le GM-METER permet de détecter des anomalies de chargement et donc permet d'obtenir la connaissance de la stabilité alors qu'un calcul aurait donné un résultat erroné, les hypothèses étant fausses.

-Avec le GM-METER, on est certain de connaître la stabilité au plus tard quatre minutes après le départ du quai, ce qui n'est pas le cas avec un calcul soumis aux contraintes des impératifs commerciaux et des perturbations d'exploitation.

Les résultats en exploitation

L'armement SEALINK SNAT ex Armement Naval de la SNCF étant très intéressé par l'utilisation du GM-METER sur ses navires transManche, j'ai entrepris avec eux d'établir le dossier d'agrément auprès des Autorités, puis l'équipement de l'ensemble des navires de l'armement, c'est-à-dire les car-ferries:

Cote d'Azur, Chartres, Versailles, Champs-Élysées, Fiesta.

Le train-ferry *Nord-Pas de Calais*, bien que ne transportant pas de passagers a bénéficié du même équipement.

Sur chaque navire, un appareil a été mis en place avec pour détermination du moment d'inertie, la formule de KATO calculée avec les dimensions principales du navire.

Pendant un mois et demi en moyenne, le bord de chaque navire a effectué au moins une fois par jour, concurremment à la mesure automatique du GM-METER, un calcul analytique, manuellement ou à l'aide d'un calculateur équipé d'un programme adéquat.

De l'analyse des résultats, il ressort :

La formule de KATO amène à des résultats trop faibles du GM de 5 à 10 % .

Sur certains navires équipés de sponsoons, cet écart était dans un premier temps plus important, de l'ordre de 25 %, cela était dû à la présence des sponsoons qui n'avaient pas été pris en compte dans les dimensions principales intervenant dans la formule.

Un nouveau calcul utilisant la largeur totale sponsoons compris a ramené le résultat dans la fourchette générale.

On peut en déduire que la formule de KATO est relativement fiable, et que ajustée à l'aide d'un coefficient d'adaptation pour ce type de navire, elle permet d'approcher le GM à 2.5 %.

Bien sûr, le coefficient d'adaptation de chaque navire a été à la suite de cet essai ajusté au mieux, et cette procédure d'adaptation est maintenue pour chaque nouveau navire équipé.

Le second résultat concerne la dispersion des mesures :

L'influence de la durée de la mesure a été mise en évidence en effectuant sur le *C/F Cote d'Azur*, dans les mêmes conditions, deux campagnes de mesures avec deux constantes de temps : 8 et 4 minutes.

Les écarts observés sont les écarts mesure/calcul, le calcul étant mené manuellement avec les valeurs forfaitaires préconisées par la réglementation, l'état des capacités étant estimé à partir de sondages périodiques .

	mesures 8 mn	mesures 4mn
-Plus mauvaise valeur observée	13.3 %	13.4 %
-Ecart maximum pour 90 % des mesures	10 %	11 %
-Ecart quadratique moyen (pour un GM moyen de 1.8 m)	11.3 cm	11.6 cm

On constate que les résultats ne se dégradent que très peu en ramenant la constante de temps à 4 minutes

On ne peut néanmoins pas en déduire plus qu'un ordre de grandeur de l'imprécision de la mesure puisque les valeurs calculées qui servent de référence sont elles aussi sujettes à erreur.

On a comme valeur quadratique moyenne :

$$\sqrt{\frac{\Sigma \text{ecart}^2}{n}} = 6.9\%$$

Une seconde observation permet de mieux cerner la dispersion des résultats :

Sur le trafic Dieppe/Newhaven, la mesure a été effectuée de façon systématique au départ et à l'arrivée du voyage.

La variation de stabilité due à l'influence de la consommation étant négligeable, on a une mesure directe de la dispersion de la mesure :

$$\sqrt{\frac{\Sigma \text{ecart}^2/2}{n}} = 4.3\%$$

qui provient donc de la détermination de la période propre du roulis.

On constate à cette occasion que la moyenne algébrique des demi-écarts:

$$\frac{\text{Ecart}/2}{n} = 0.5\%$$

est quasiment nulle, ce qui signifie que les conditions extérieures pourtant différentes (chenal à murs verticaux à Dieppe; bordé de plages à Newhaven) ne biaisent pas la mesure.

Il paraît difficile en exploitation de se faire une idée plus précise de la dispersion de la mesure.

Des écarts quadratiques moyens, on peut estimer que 62 % de l'écart provient de la dispersion des résultats sur la mesure de la période, les 32 % restant sont à attribuer à l'erreur d'évaluation du moment d'inertie et à l'erreur sur le résultat de l'évaluation de la stabilité par le calcul.

Si on attribue de façon arbitraire la moitié de cet écart à chacune de ces sources d'erreurs, on arrive à 81 % de l'écart de mesure à attribuer à l'imprécision du GM-METER.

Ce pourcentage appliqué à l'écart maximum relevé ramène celui-ci à 10.8 %.

C'est le chiffre que l'on peut raisonnablement retenir et admettre que la plage maximale d'incertitude des résultats du GM-METER est d'environ +/- 10%

Les perspectives

A la vue des premiers résultats systématiques en exploitation, on peut envisager plusieurs développements.

Nous travaillons actuellement sur une amélioration du filtrage sans allongement de la constante de temps. Les premiers résultats sont encourageants et nous laissent espérer une réduction de la dispersion dans la mesure de période.

Nous avons d'ores et déjà réintroduit dans la version ferry un troisième mode de fonctionnement à côté de "QUAI" et "MANOEUVRES" : le mode "PLEINE MER", qui avec un filtrage adapté et une constante de temps de 6 minutes permet la vérification de la stabilité à la suite d'une avarie en mer, sans être perturbé par la houle.

Ainsi en cas d'envahissement avec formation de carène liquide importante, le GM-METER permet de tenir le bord immédiatement informé de l'évolution de la stabilité.

Un récent incident sur le *C/F Chartres* au cours duquel un paquet de mer a démoli des baies vitrées et envahi le garage, nous a confirmé dans l'utilité de cette fonction.

Ce type de fonctionnement trouve une application immédiate sur les navires de pêche (la constante de temps est ramenée à 4 minutes dans ce cas).

La stabilité pourrait être ainsi suivie par quelques mesures par jour effectuées en condition optimales : Pas de mouvements de chalut, système anti-roulis désactivé pendant la mesure.

Une dernière application peut encore être imaginée:

La surveillance de la stabilité d'un navire de combat, endommagé à la suite d'un engagement.

Il s'agit là d'informer le bord très rapidement car bien que le navire flotte encore, il peut voir sa stabilité diminuer à très grande vitesse par envahissement progressif, et c'est un véritable navire à passagers, eut égard au nombre de personnel à bord, qui peut chavirer alors brutalement.

Dans un autre ordre d'idée, nous avons étudié l'adaptation à la réglementation Britannique. Un compromis a été trouvé avec le DEPARTMENT OF TRANSPORT pour accepter le GM-METER dans la mesure où il assure en plus de la détermination du GM, les fonctions annexes réalisées par un classique calculateur de chargement:

- Comparaisons du GM avec le GM admissible en fonction du déplacement et de l'assiette.
- Simulation de modifications de chargement.

Ces fonctions sont facilement exécutées par un micro-ordinateur connecté sur le GM-METER, si on garde à l'esprit que les données hydrostatiques du navire étant en mémoire, la connaissance du GM donne la connaissance de toute la courbe de stabilité.

Ainsi, le GM-METER peut trouver de multiples applications, le navire à passagers étant néanmoins celle où il se révèle le plus utile.

La stabilité ne paraissant pas un problème critique sur ces navires, le danger n'en est que plus sournois, alors que l'enjeu, la sécurité des passagers, est capital.

* * *

*

[1] A. COTA : GM-METER appareil automatique de mesure en continu du module de stabilité des navires , atma 1985

[2] KATO : Approximate method of calculating the period of roll of ships .
journ. SNA of Japan, vol. 89 April 1956.