

Le GM-METER TEST

Les techniques numériques pour l'amélioration des expériences de stabilité

Par

Alain COTA
Société SEPAC

SOMMAIRE

L'utilisation des techniques numériques permet de construire un appareil destiné à effectuer les expériences de stabilité. L'analyse des différentes sources d'imprécision désigne les mesures des inclinaisons et du déplacement comme objectifs à améliorer. Ces améliorations passent par l'utilisation de matériel performant, mais aussi par l'amélioration des procédures. Ceci est l'occasion de justifier des procédures quelques fois déjà utilisées ou des procédures nouvelles.

Les caractéristiques principales de cet appareil sont :

Enregistrement continu complet de toute l'expérience, possibilité de construire des points de mesure après coup, adaptation aux différentes procédures, évaluation de la précision des mesures, mesure du déplacement, mesure de la période de roulis.

Ce dernier point ouvre la possibilité de vérifier le déplacement lorsque les caractéristiques géométriques de la carène sont mal connues.

SUMMARY

Digital techniques have allowed us to build an apparatus which measures the height of the centre of gravity of a ship. Error analysis showed that measurement of list and displacement needed to improved. These improvements were made by using more sensitive and accurate equipment and by refining procedures. This gave us the opportunity to review previous and new procedures.

The principal characteristics of this device are :

Complete and continuous recording of the whole experiment, the possibility of calculating further measurements after the test, evaluation of the precision of measurement, the measurement of the ship's displacement and rolling period.

This last point allows us to check displacement when the geometrical characteristics of the hull are poorly known.

1. Les méthodes traditionnelles

Les moyens traditionnels de mesure d'inclinaison des expériences de stabilité : pendule, tube en U, niveau à bulle ont l'avantage d'un cout d'acquisition pratiquement nul et d'une mise en œuvre apparemment simple et directement accessible.

Par contre, ils présentent des inconvénients qui les rendent obsolètes au regard des besoins de la technique et des contraintes de gestion actuels :

- Précision sur la mesure des angles, au mieux 2 %, au prix d'un grand soin opérationnel exigeant des opérateurs confirmés.

- Inclinaisons de plus de 2° nécessaires pour obtenir cette précision, donc des poids inclinants importants à manipuler.
- Mesure impossible avec un mouvement résiduel même modéré engendré par un plan d'eau agité.
- Multiplication des opérateurs afin de fiabiliser les résultats surtout dans un contexte de mesures officielles.
- Non traçabilité des mesures si ce n'est par les témoignages des opérateurs.
- Vulnérabilité aux incidents et aléas : déplacement accidentel de la règle du pendule, déformation de la structure supportant le point d'accrochage, surtout si elle est occasionnelle, déplacement de lest liquide sous l'effet de l'inclinaison...
- Non mise en évidence de ces incidents et aléas, et impossibilité de correction après coup.

Le développement des techniques numériques permet d'envisager un appareillage simple résolvant ces problèmes. Cela donne aussi l'occasion de justifier et d'améliorer les procédures et les méthodes utilisées afin d'accroître la fiabilité générale de l'expérience.

2. Le GM-METER TEST

Sans cesse amélioré depuis sa mise sur le marché en 1988, le GM-METER TEST dans sa version 3 (fig.5) met les possibilités des techniques numériques au service de l'expérience de stabilité :

Un inclinomètre électrique couplé à un convertisseur analogique digital pour la saisie des inclinaisons.

Une sonde de pression avec le même convertisseur pour la mesure des tirants d'eau.

Une acquisition à 240 Hz pour éliminer les vibrations perturbatrices

Un enregistrement continu des inclinaisons permettant un traçage complet des opérations avec la possibilité de vérifier, de corriger et de compléter les mesures après coup.

Des techniques de filtrage élaborées pour extraire l'inclinaison statique du mouvement résiduel enregistré.

La visualisation à tout instant des mesures et des résultats et leur édition en fin de traitement.

Une procédure d'étalonnage facile à mettre en œuvre

Un système de contrôle de bon fonctionnement pour une vérification avant chaque utilisation.

En mesure annexe, le système mesure la période naturelle de roulis par analyse spectrale du mouvement.

3. Rappel du principe de l'expérience de stabilité

L'expérience de stabilité a pour but de déterminer la hauteur du centre de gravité du navire léger, à partir de laquelle, en considérant les poids chargés, on pourra déterminer la hauteur du centre de gravité général du navire. La mesure passe par la mesure fine du GM du navire et la détermination de la position de M par les formes de carène :

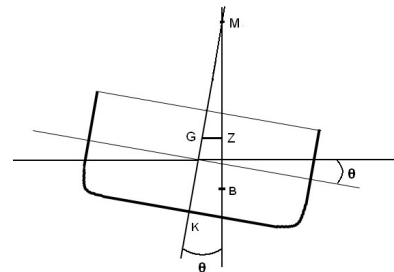
$$KG = KM - GM \quad (1)$$

Les formes du navire étant connues, KM est connu pour chaque flottaison.

L'expérience de stabilité est donc composée de :

- Mesure des tirants d'eau
- Mesure du GM

La mesure du GM passe par un test d'inclinaison.



4. Test d'inclinaison

Le navire est incliné par déplacement d'un poids p d'une distance transversale l.

Si l'inclinaison θ est suffisamment petite (inférieure 3°) le point métacentrique M1 reste confondu avec le point métacentrique initial M.

Avec Δ le déplacement du navire :

$$\Delta GZ = p l \cos \theta$$

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

$$\Delta GM \sin \theta = p l \cos \theta$$

$$GM = p l / \Delta \operatorname{tg} \theta \quad (2)$$

L'utilisation de la formule (2) suppose que le seul moment inclinant provient du déplacement de poids. La mesure sera faussée si un moment parasite M_p vient s'ajouter ou se retrancher au moment inclinant du au poids.

Ceci peut être le cas avec un vent constant agissant sur le navire. On a alors :

$$GM = (p l + M_p) / \Delta \operatorname{tg} \theta$$

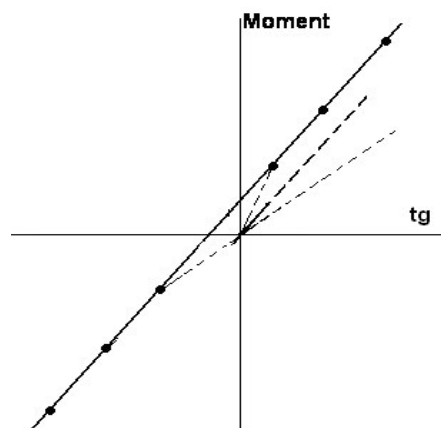
$$M_t = p l = \Delta GM \operatorname{tg} \theta - M_p \quad (3)$$

Ce qui veut dire que la courbe de stabilité

$$\text{Moment inclinant} = f(\operatorname{tg} \theta)$$

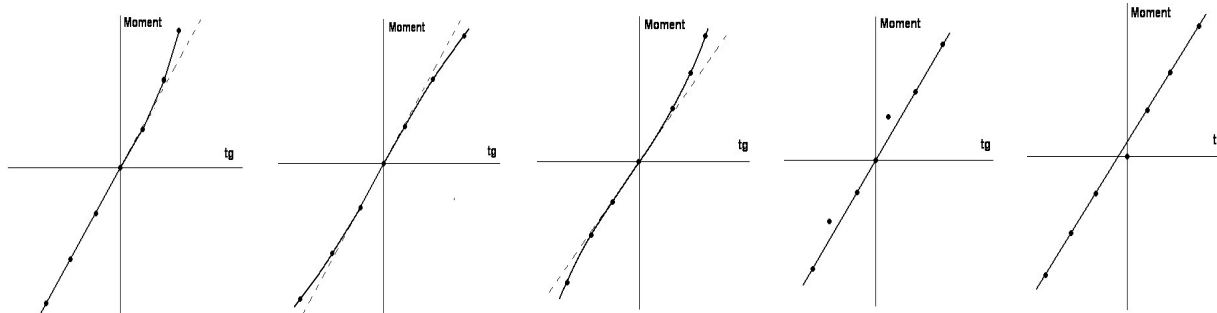
ne passe pas par l'origine.

On voit que l'application de la formule (2) qui suppose implicitement ce passage par l'origine donnera un résultat biaisé si les points de mesure ne sont pas absolument symétriques d'un bord à l'autre.



C'est la raison pour laquelle, la plupart des opérateurs préconisent la détermination de GM comme la pente de la droite qui passe au plus près des différents points mesurés, cette droite étant déterminée par une régression linéaire optimisée par un critère de moindre carrés des écarts.

Un avantage corollaire de cette méthode est de mettre en évidence de façon imagée les biais éventuels dus à des conditions de mesure inadéquates.



Navire bridé :
Amarres ou défenses
ou partiellement échoué

Carène liquide
excessive

Effet de fond ou
de plafond
Capacités presque
pleines ou vides

Rafales de vent
mesures à reprendre
ou à écarter

Vent constant
mesures
exploitables

5. Critère des moindres carrés

Le critère des moindres carrés minimise les écarts des points de mesure à la droite suivant une variable. On dira que l'on a une minimisation des écarts horizontaux si on optimise les écarts sur les inclinaisons, et verticaux, si on optimise les écarts sur les moments.

Cette dissymétrie du rôle des deux variables ne pose qu'un problème apparent. En effet les deux droites calculées suivant une optimisation verticale et une optimisation horizontale, ne sont sensiblement différentes que si le nuage de point étudié est diffus.

Dans notre cas où la corrélation des mesures est très forte (les écarts moyens étant généralement inférieurs à 1%), ces deux

droites sont pratiquement confondues, et on peut ne s'intéresser qu'à une des deux.

On choisira une optimisation verticale, la formule (3) ayant une forme facile à utiliser, mais répétons le, cela n'a pas une grande importance. L'important étant de toujours travailler sur le même type d'écart afin que les comparaisons aient un sens.

6. 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 est tout à fait arbitraire (niveau à bulle ou inclinomètre électrique).

Il en résulte que les mesures d'inclinaison seront toujours relatives. Autrement dit, on n'appliquera pas la relation

$$\text{Moment inclinant} = f(\text{tg } \theta)$$

mais l'équation aux différences :

$$\delta(\text{Moment inclinant}) = \delta(f(\text{tg } \theta))$$

Toutefois, si la situation de départ correspond à la position du navire sans moment appliqué, et est commune à toutes les mesures (zéro des mesures), la procédure sera par abus de langage une *procédure absolue*.

La formule (2) étant valable dans toute l'étendue d'inclinaison proche du navire droit (+/- 3°), l'angle θ peut être l'angle entre deux inclinaisons quelconques de cette étendue d'inclinaison. La mesure peut donc être effectuée entre l'inclinaison appliquée au navire et l'inclinaison de la mesure précédente à condition que (p l) désigne le déplacement de poids entre ces deux positions. On a alors une *procédure relative*.

On verra plus loin que les procédures relatives présentent des avantages intéressants, mais encore faut-il les manipuler avec précautions.

En particulier, on reporte sur le graphe $\delta(\text{Moment inclinant})$ et non Moment inclinant, ce qui veut dire que les signes ne correspondent plus aux inclinaisons bâbord et tribord, mais aux variations vers bâbord ou vers tribord. La droite de régression calculée n'est pas une portion de la courbe de stabilité, mais est constituées de segments de cette courbe raboutés ou superposés les uns aux

autres dans un ordre dépendant de la procédure de mesure suivie.

Cela n'a pas d'influence sur le résultat final puisque l'on a affaire à une droite, mais à condition que la procédure suivie permette de bien explorer toute la droite, d'un bord à l'autre, sans manque.

Une bonne précaution pour se prémunir contre une erreur est d'appliquer une procédure mixte, c'est-à-dire une procédure relative à laquelle on aura ajouté la mesure d'un (ou plusieurs) zéro, et de mesurer les moments à la fois en relatif et en absolu (avec comme origine la situation correspondant à celle du zéro mesuré).

On pourra de cette façon exploiter les mesures suivant l'une ou l'autre des procédures et comparer les résultats.

7. Précision des mesures

La formule (2) permet d'établir les sources d'imprécisions.

Pour les poids inclinant et la mesure de leur déplacement, une précision de 1/1000 peut être atteinte assez facilement avec un peu de soin, de plus, ces mesures étant multiples, les erreurs se compensent partiellement au final.

La précision totale sera en fait donnée par la précision sur la mesure des inclinaisons et celle du déplacement, moins bonnes que cela avec les moyens traditionnels.

Le GM-METER TEST se propose d'améliorer la précision de ces deux mesures

7.1. Précision sur les inclinaisons

Actuellement les inclinomètres permettent d'atteindre des précisions bien supérieures à celles raisonnablement utilisables pour les expériences de stabilité puisqu'ils atteignent $2 \cdot 10^{-5}$ degrés.

Nous avons sélectionné deux modèles à 10^{-3} et 10^{-4} degrés, couplés à un convertisseur analogique / digital à 16 bits donc une définition de $1,5 \cdot 10^{-4}$.

Ceci pour garantir en fin de traitement (en particulier après filtrage), une précision minimum respectivement de 10^{-2} ou 10^{-3} degrés.

Notons que ces précisions sont meilleures ou bien meilleures que ce que l'on peut espérer avec un pendule puisqu'elles correspondent à 1 mm ou 1/10 de mm sur l'évaluation de la déviation d'un pendule de 6m.

7.2. Précision sur le déplacement

Obtenir une précision proche de 1/1000 sur le déplacement est loin d'être évident si on considère que pour un navire de 10 000 t de 150 m de long le volume de carène croît de l'ordre de 25 m³ par centimètre d'enfoncement, donc 2,5/1000. La précision nécessaire sur la lecture des tirants d'eau serait donc de ± 0,5 cm, ce qui est déjà souvent meilleur que la précision de traçage des échelles de tirant d'eau.

La mesure de la densité, même avec un densimètre donnant une précision de lecture au 1/1000, introduit une imprécision importante due à l'hétérogénéité de la densité (estuaire, pluie abondante, gradient important de température).

Toutes ces sources d'imprécision font que le déplacement sera connu généralement avec une précision plus proche du 1/100 que du 1/1000, et donc tous les efforts que l'on fera pour améliorer cette précision influenceront directement la précision du résultat final.

Le GM-METER TEST propose l'amélioration de la précision sur le déplacement par la mesure directe des tirants d'eau.

Les tirants d'eau h sont évalués par la mesure de la pression hydrostatique à une profondeur connue par rapport à la ligne de quille OH.

Un capteur de pression est immergé à une profondeur proche du tirant d'eau à mesurer à l'aide d'un système potence/touret (fig. 6), et sa position est repérée par rapport au pont d'où s'effectue la mise en œuvre, par la mesure de la longueur de câble filé.

La position immergée du capteur produit un important affaiblissement des perturbations de la surface libre et le mouvement résiduel est en final filtré avec le filtre utilisé pour la saisie des inclinaisons.

Si le capteur est positionné à la hauteur de la quille du navire, la pression hydrostatique mesurée P intègre les variations de densité jusqu'à la surface.

Si d est le tirant d'eau moyen, on peut exprimer le déplacement sous la forme d'un polynôme : $A d + B d^2 + \dots$

les termes au carré sont déjà très faibles, la relation étant quasiment linéaire.

Si ω est la densité moyenne de la tranche d'eau,

$\Delta = \omega A d + \omega B d^2 + \dots$ et avec $P = d \omega$ on a :

$$\Delta = A P + B P^2 / \omega + \dots \quad (4)$$

En première approximation, le déplacement s'exprime indépendamment de la densité. Donc si celle-ci est mesurée approximativement, cette approximation aura une influence négligeable sur le déplacement déduit de la mesure des pressions.

De cette façon, avec le capteur de pression utilisé, le déplacement sera connu avec une précision équivalente à une précision de ± 0,5 cm sur les tirants d'eau donc proche du 1/1000.

8. Le traitement et l'enregistrement des mesures

Les inclinaisons statiques sont déterminées à l'aide d'un filtre numérique itératif passe-bas qui ne laisse passer que le continu.

L'utilisation de ce filtre élimine l'influence du mouvement résiduel du navire. Son efficacité est évidemment fonction de la longueur de l'échantillon traité. Une durée minimum de saisie est imposée afin que le filtre divise au moins par 100 les fluctuations de la mesure (avec un roulis de 1° la mesure fluctue de 0,01°).

La durée minimum de saisie est grossièrement adaptée à la période de roulis du navire en évaluant celle-ci à l'aide de la largeur du navire.

Si cela est nécessaire, on peut adapter finement le filtre à la période du mouvement, en mesurant celle-ci auparavant.

On peut de cette façon en profitant du premier puits de la fonction de transfert diviser par un facteur 100 supplémentaire les fluctuations sur la mesure (fig. 1)

De cette façon les précisions nominales sont conservées même avec un mouvement résiduel

important et en opérant avec la durée minimum de saisie autorisée. De cette façon on peut généralement réaliser l'expérience au poste à quai habituel du navire.

Le traitement pour accéder à l'inclinaison du navire peut être réalisé in-situ ou après coup car l'ensemble de l'opération est enregistrée. De cette manière, non seulement les points de mesures peuvent être vérifiés, mais d'autres points peuvent être calculés à des moments jugés plus propices pour remplacer ou pour compléter ceux déjà réalisés.

Le filtre utilisé est adaptatif. Il permet en particulier d'allonger autant que l'on veut la durée d'analyse d'une inclinaison. De cette façon on peut obtenir des résultats de très bonne précision avec des mouvements résiduels très importants (fig..2 et fig..2 bis)

L'enregistrement continu de toute l'opération, même des temps morts permet de vérifier, et apporte la preuve qu'aucun incident n'a perturbé les mesures. En cas d'incident, une procédure de reprises permet de récupérer les mesures et de poursuivre l'expérience.

L'examen fin de l'enregistrement à chaque prise d'inclinaison permet de mettre en évidence une éventuelle dérive des mesures due à un écoulement de lest liquide dans les fonds. Il convient alors d'effectuer la mesure lorsque la stabilité de l'inclinaison a été atteinte ou créer après coup des points de mesures à des temps égaux après les mouvements de poids (fig.3).

L'enregistrement constitue enfin un traçage complet des mesures qui peut être repris à tout moment pour vérification, ce qui est indispensable dans un esprit d'assurance qualité.

La facilité de mise en œuvre, et la sécurité apportée par l'enregistrement complet, permettent d'effectuer les mesures avec un seul opérateur, même pour deux appareils éventuellement. Cet opérateur n'a pas besoin de se trouver constamment auprès du système de mesure, et donc peut en même temps diriger les opérations de mouvements de poids. On obtient ainsi une économie de moyen non négligeable.

9. Les mesures complémentaires

9.1. Période de roulis

Le GM-METER TEST mesure la période naturelle de roulis du navire. Cette période est mesurée avec une grande précision par analyse spectrale du mouvement résiduel (fig.4).

L'amplitude des mouvements étant très faible, la mesure n'est pas faussée par les effets non linéaires des grandes amplitudes.

L'utilisation d'une méthode spectrale pour la mesure permet d'éviter l'influence d'oscillations parasites en particulier les sèches (oscillations de plans d'eau quasi fermés) qui modifient la période apparente.

La mesure de la période de roulis T au moment où l'on mesure aussi le GM du navire permet d'accéder au coefficient de roulis f de la relation :

$$GM = (f B / T)^2 \quad (5)$$

B largeur du navire

Telle qu'elle est donnée dans la résolution A/ES.IV/168 de l'OMI.

Cette résolution recommande pour les navires de moins de 70 m, la mesure du GM par la mesure de la période de roulis et fournit pour cela des valeurs standards de f.

En déterminant f de façon expérimentale on améliore la précision de cette méthode.

9.2. Inclinaisons en manœuvres

Une autre mesure complémentaire est la mesure de l'inclinaison sous l'action de manœuvres.

En effet comme le GM-METER TEST enregistre en continu l'inclinaison du navire et filtre le mouvement de roulis, il est possible de mesurer l'inclinaison prise lors d'une giration ou sous l'action du déplacement d'un espar : bras de grue, mise en place de rampe etc. Ce qui sera utile pour calculer la stabilité résiduelle au cours de telles manœuvres.

10. L'optimisation des mesures par la notion de zéro afférent ou la procédure

Le GM-METER TEST permet de réaliser les mesures suivant les trois types définis plus haut : Absolu, Relatif ou Mixte.

Comme on l'a dit, les mesures d'inclinaison sont en fait relatives. Ces mesures seront d'autant plus précises que les conditions générales de la mesure auront peu varié entre la mesure de l'inclinaison et celle de la position origine, or ces conditions : température, vent, courant, ensoleillement, densité de l'eau etc., peuvent notablement varier au cours d'une expérience qui peut durer plusieurs heures. Pour s'affranchir de cela, on peut utiliser deux méthodes :

Utiliser une procédure absolue, mais en remplaçant le zéro unique de référence par plusieurs zéros répartis au cours de l'expérience, et rattacher les mesures d'inclinaison au zéro le plus proche dans le temps. On obtient ainsi des groupes de mesures référencés chacun à un zéro particulier ou zéro afférent.

L'autre méthode, plus radicale, est d'utiliser une procédure relative, c'est-à-dire, pour chaque inclinaison, considérer comme origine de la mesure, l'inclinaison précédente. Cette méthode permet de minimiser au maximum le temps séparant la mesure et son origine.

Bien entendu, dans les deux cas, les moments inclinants à utiliser ont aussi pour origine le moment appliqué à la position zéro.

En agençant judicieusement la procédure relative, on peut de plus obtenir des points de mesure mieux répartis avec plus de points utilisables, et par là une droite de régression plus précise (fig. 2 bis).

11. Evaluation de la précision d'une expérience

D'une façon générale, la précision d'une expérience peut être caractérisée par l'écart quadratique moyen relatif de N mesures partielles :

$$\frac{\sigma}{GM} = \frac{1}{GM} \sqrt{\frac{1}{N} \sum (GM_i - \overline{GM})^2} \quad (10)$$

On peut évaluer rapidement cette valeur une fois les inclinaisons saisies et le déplacement évalué.

Ce calcul effectué sur les mesures d'une expérience menée en parallèle avec le GM-METER TEST et un pendule donne :

Ecart sur GM partiels du pendule, procédure absolue : 2,3 %

Ecart sur GM partiels du GM-METER TEST, procédure absolue : 1%

Ecart sur GM partiels du GM-METER TEST, procédure relative : 1,4%

Ecart par rapport à la droite de régression, procédure absolue : 0,7%

Ecart par rapport à la droite de régression, procédure relative : 0,4%

Ces mesures ont été réalisées dans de très bonnes conditions (Expérience de stabilité du DIEPPE le 23-09-2006 supervisée par le Bureau Veritas). Dans des expériences d'archives, acceptées par les Commissions de Sécurité nous avons noté des dispersions de mesures effectuées avec le pendule dépassant 8%.

On notera que la liaison entre l'écart des GM partiels et celui résultant de la droite de régression, n'est pas évidente, car dépendant du nombre de points de mesure effectifs et de leur répartition.

L'expérience de la figure 2 montre une expérience réalisée sur une embarcation de 6 m, en rade de Singapour. Alors que l'on peut constater des amplitudes de roulis de la valeur des inclinaisons statiques, il est tout à fait remarquable que la dispersion des GM partiels est de 1,7% avec un résultat final à l'aide de la droite de régression à 0,9% en absolu et 0,5% en relatif.

La machine présente l'écart par rapport à la droite de régression comme la précision de l'expérience.

En toute rigueur, l'erreur probable (ou erreur médiane) sur le test d'inclinaison serait plutôt 0,675 cet écart, mais encore faut-il ajouter au final l'erreur sur le déplacement qui on l'a vu peut être proche de 0.1% s'il est mesuré avec le GM-METER TEST.

12. Méthode simplifiée de calcul de la régression

La droite recherchée est :

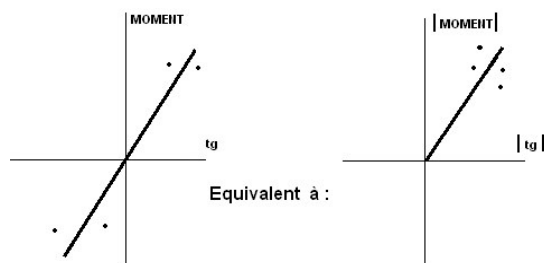
$$M_t = A_1 \text{ tg (incli) } + A_0 \quad \text{avec } A_1 = \Delta GM$$

En notant $tg(\text{incli}) = tg$
 et pour N points d'inclinaison
 En rendant minimum la somme des écarts
 quadratiques, on obtient le système :

$$\begin{aligned} A1 \sum tg^2 + A0 \sum tg &= \sum Mt tg \\ A1 \sum tg + (N+1) A0 &= \sum Mt \end{aligned}$$

(N + 1) tient compte du point (0,0) qui doit être considéré comme un point de mesure comme les autres.

Si on fait l'hypothèse que la droite passe par l'origine, on a $A0 = 0$ et les valeurs des moments et des inclinaisons peuvent être notées en valeur absolues.



Le système se réduit alors à :

$$A1 = \frac{\sum |Mt|}{\sum |tg|}$$

Ce que les opérateurs par une fausse interprétation notent :

$$\Delta GM = \text{Moyenne des } Mt / \text{moyenne des } tg$$

Cette méthode, bien qu'impliquant un passage par l'origine, est meilleure que l'utilisation de la simple moyenne des GM partiels, et est d'une utilisation extrêmement simple si on ne dispose pas d'un calculateur (ou du GM-METER TEST)

13. Utilisation de la mesure de la période de roulis pour la vérification du déplacement

13.1. Cas d'un chalutier

Comme on l'a dit en préambule, la connaissance du déplacement est aussi importante que la mesure des inclinaisons pour déterminer le GM.

Sur un chalutier dépourvu d'échelles de tirant d'eau, s'il n'est pas possible de raccorder le plan des formes à des éléments caractéristiques

des œuvres mortes, les tirants d'eau et le déplacement seront connus avec imprécision.

Pour lever cette imprécision, la période de roulis fournit une relation supplémentaire.

La formule (5) n'est pas assez précise, l'influence du déplacement n'intervenant que de façon très grossière en modulant le coefficient f.

On lui a préféré :

$$GM = (4 \pi^2 / g) K^2 / T^2 \quad (6)$$

K étant le rayon d'inertie en roulis, masse d'eau ajoutée comprise.

K étant exprimé par la formule de KATO [1]

$$K = B \sqrt{f \cdot X} \quad (7)$$

X étant exprimé par (8) :

$$X = Cb Cd + 1,1 Cd (1 - Cb) \left(\frac{H}{d} - 2,2 \right) + \frac{H^2}{B^2}$$

A quoi on peut ajouter

$$\Delta = Cb \cdot Lpp \cdot B \cdot d \cdot \rho \quad (9)$$

Avec

f : Coefficient dépendant du type de navire

B : Largeur hors membres

Cb : Block coefficient

Cd : Coefficient de remplissage du pont supérieur

H : Creux effectif = D + A / Lpp

D : Creux

A : Surface des superstructures projetées sur un plan longitudinal.

Lpp : longueur entre Perpendiculaires

d : Tirant d'eau milieu au dessus de la quille

ρ : Masse spécifique de l'eau

Comme la complexité de ce système ne laisse pas espérer une solution analytique, on a effectué une résolution par approximation de la façon suivante :

On fixe un déplacement, et on explore toutes les valeurs de d possibles.

A chacune de ces valeurs correspond par (9) une valeur de Cb ; par (7) et (8) une valeur de K ; et par (6), avec la valeur de T mesurée, une valeur de GM.

On vérifie ensuite si le déplacement ainsi fixé permet de retrouver la même valeur du

produit ΔGM obtenu à partir des mesures d'inclinaison.

Si ce n'est pas le cas, on change la valeur du déplacement, et ainsi de suite par approximations successives pour trouver le déplacement et le tirant d'eau d qui permettent d'obtenir la même valeur du produit ΔGM par la mesure des inclinaisons et par la mesure de la période de roulis.

Deux écueils sont à éviter :

Tout d'abord le coefficient f doit être connu. Dans le cas que nous avons eu à résoudre, il s'agissait d'un chalutier de forme ancienne et la valeur 0,20 donnée par KATO a fourni un résultat réaliste, dans la plage de l'incertitude du tirant d'eau et donc du déplacement issu des mesures. Une détermination de f par la mesure sur un navire approchant doit être préférée dans le cas général.

En second lieu, la détermination de la période de roulis doit être effectuée avec soin. Le GM-METER TEST possède la fonction nécessaire pour cela, encore faut-il se méfier des oscillations de l'eau du bassin lorsque la mesure est effectuée dans un bassin fermé (fig. 4). De plus il convient de corriger la valeur de la période mesurée de l'influence du quai et du fond, si le navire est à quai, comme il a été dit dans une communication précédente [2].

13.2. Cas d'un sous-marin

La mesure de la stabilité en plongée d'un sous-marin est elle aussi tributaire de la bonne connaissance du déplacement.

Si le réglage de la pesée n'est pas conforme à la masse théorique du navire, cela peut provenir soit d'une mauvaise évaluation de la densité de l'eau, soit d'une variation de poids inconnue à bord. Pour lever l'indétermination, on peut opérer de la façon suivante :

Notons d'abord que la valeur du GM est réduite à « a » distance du centre de gravité au centre de carène, et donc que l'on peut opérer aussi bien longitudinalement que transversalement.

Le rayon d'inertie K (transversal ou longitudinal) peut être considéré comme constant et doit avoir été mesuré auparavant ou sur un navire semblable.

Le déplacement est immédiatement calculé par les formules (2) et (6) qui deviennent :

$$\Delta a = Mt / \text{tg}(\text{incli.})$$
$$a = (4 \pi^2 / g) K^2 / T^2$$

Si on retrouve le déplacement théorique, le défaut apparent de réglage provient d'une mauvaise évaluation de la densité, dans le cas contraire, une modification des poids embarqués est à rechercher.

Nous ne nous étendrons pas plus sur ce cas, n'ayant pas eu l'occasion d'utiliser cette méthode de façon opérationnelle.

14. Conclusion

Les techniques numériques et les capteurs existants permettent de construire un appareil fournissant ce qui manque aux moyens traditionnels : la traçabilité, une faible sensibilité aux conditions extérieures et la précision.

La traçabilité est une exigence incontournable de l'assurance qualité. Les résultats de l'expérience de stabilité étant utilisés pendant des années, il est indispensable en cas d'incident de pouvoir vérifier la qualité de la source de ces valeurs.

La faible sensibilité aux conditions extérieures permet d'opérer dans des conditions jugées défavorables ou même rédhibitoires avec d'autres moyens, la précision restant alors encore acceptable.

La précision enfin, résultant du matériel, mais aussi des procédures est non seulement améliorée, mais peut être aussi quantifiée. On peut ainsi annoncer une précision globale meilleure que 1% et étayer cette évaluation. Cette précision peut encore être améliorée avec l'inclinomètre plus précis proposé, mais le gain ne sera effectif que si les conditions de mesure sont alors tout à fait optimales.

On peut se demander pourquoi faire tant d'efforts pour gagner en précision :

Une précision de 1% pour un GM à l'expérience de 3m, correspond à une erreur absolue de 3 cm qui se retrouve dans la position du centre de gravité du navire léger et donc dans le calcul du GM d'un navire, comme un navire à passager ou un navire militaire, à faible variation de déplacement. Ces 3 cm ne sont pas du tout négligeables vis-à-vis des 15 cm de GM à l'état intact ou des 5 cm résiduels après avarie exigés par la réglementation internationale.

15. Références

[1] Kato – Approximate method of calculating the period of roll of ships – Jour. SNA of Japan vol.89 – April 1956

[2] A. Cota – GM-METER, Appareil automatique de mesure en continu du module de stabilité des navires – ATMA 1985

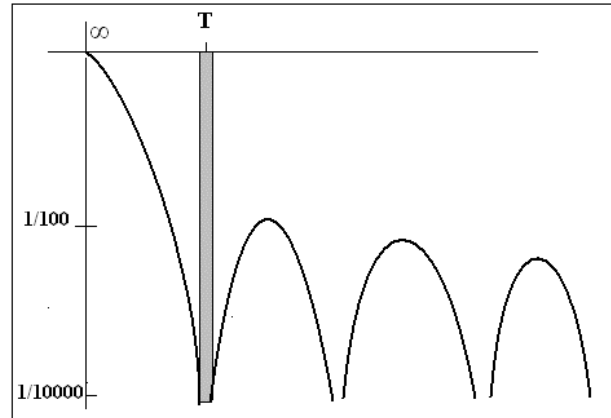


Figure 1 : Fonction de transfert du filtre et adaptation à la période de roulis

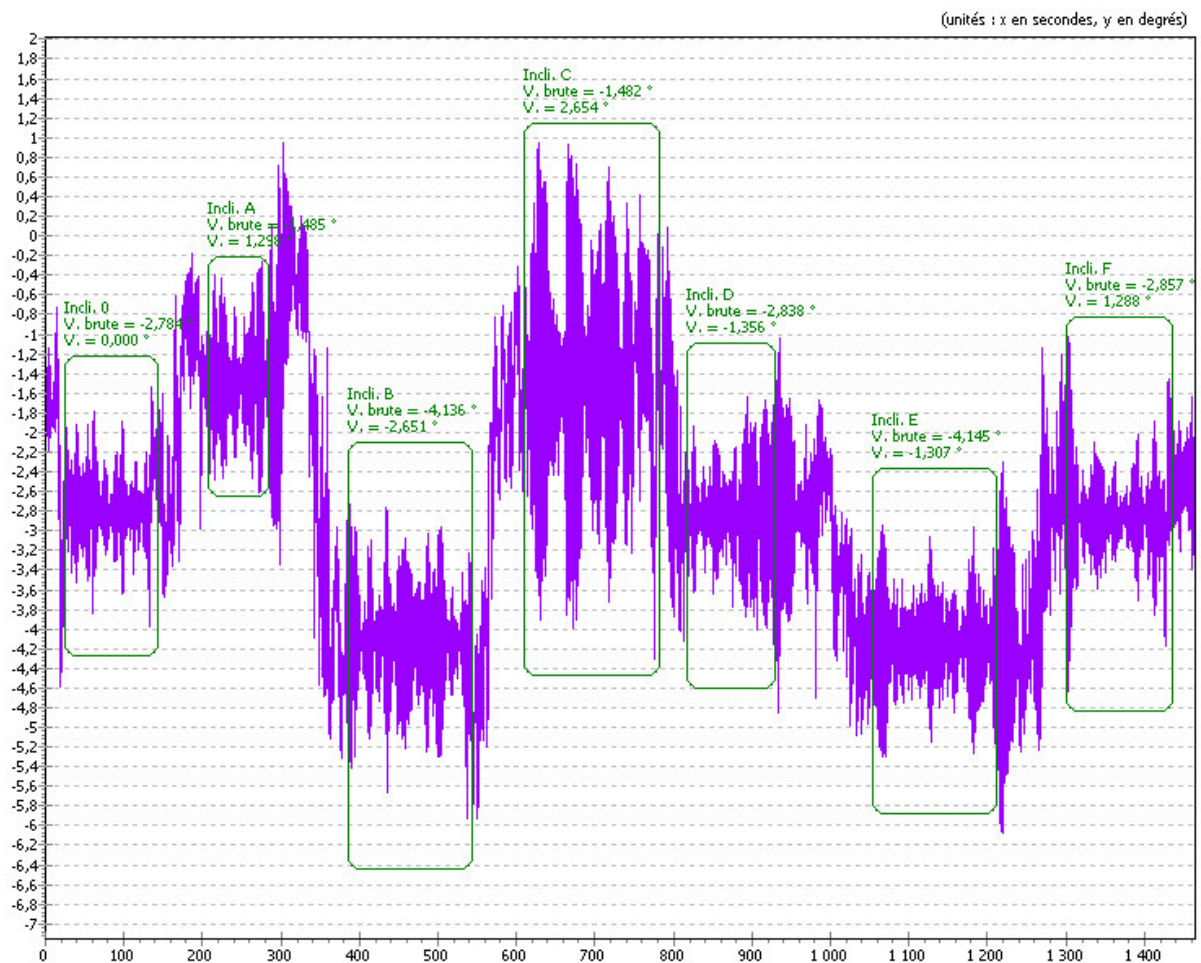


Figure 2 : Enregistrement de l'expérience de stabilité d'une embarcation de 6 m sur rade.
Les rectangles figurent les séquences de mesure des inclinaisons statiques par filtrage.

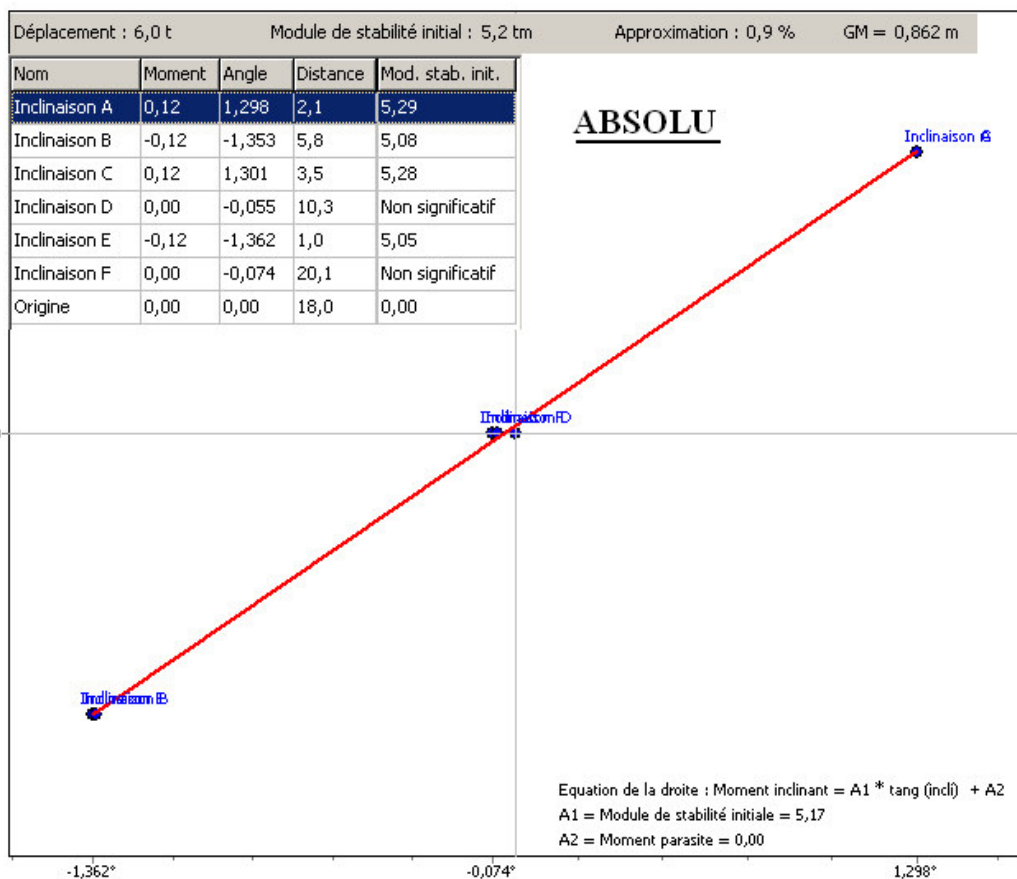
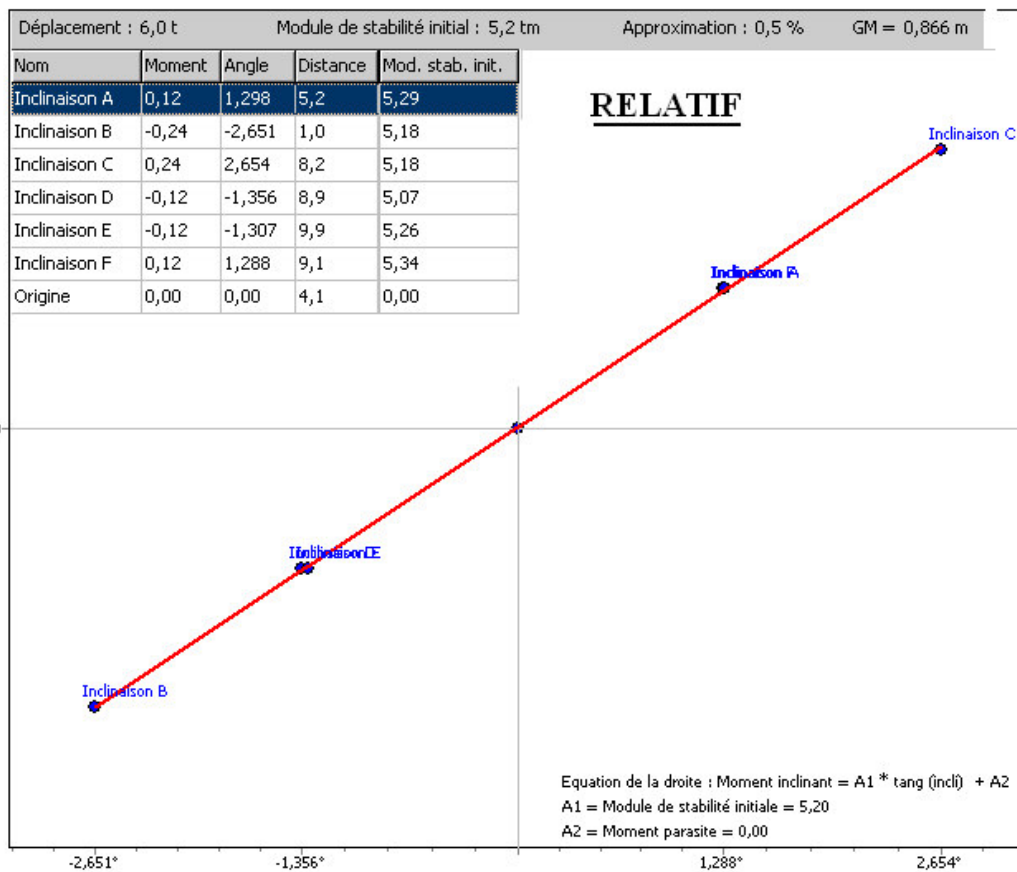


Figure 2 bis : Droites de régression calculées à partir de l'enregistrement précédent.

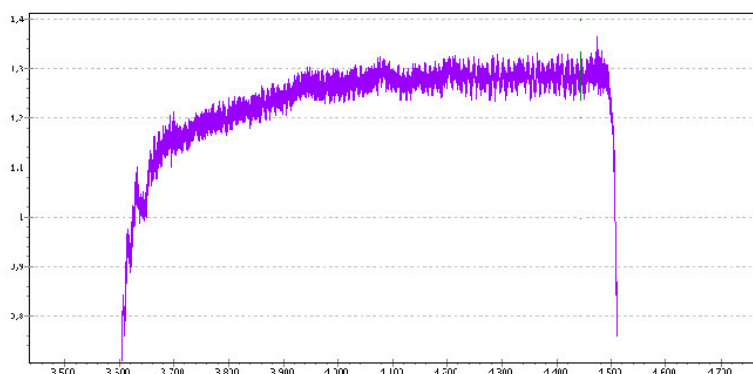


Figure 3 : Etablissement de la position inclinée par écoulement dans les fonds.

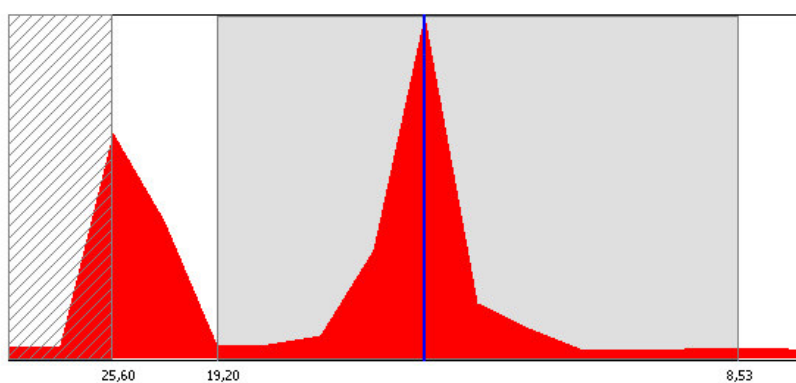


Figure 4 : Analyse spectrale, période de roulis 12,92 s. Période d'oscillation du bassin 25 s



Figure 5 : Le capteur et son conteneur de transport



Figure 6 : Le système potence / touret et la sonde de pression