

# La stabilité des Navires

**La stabilité est une préoccupation constante des équipages des navires en service. Un chargement inadéquat, une avarie ou un état de mer particulier, peuvent dégrader la stabilité et mettre le navire en danger, car les incidents de stabilité ne sont jamais anodins et engagent toujours la survie même du navire.**

**Qu'est-ce que la stabilité  
Comment agit la stabilité  
Comment évalue-t-on la stabilité  
Qu'est-ce qui peut modifier la stabilité  
Les cas critiques de stabilité  
Comment se prémunir des dangers liés à la stabilité  
Gestion pratique de la stabilité  
Contrôle de la stabilité instantanée sur houle  
Conclusion**

## **Qu'est-ce que la stabilité :**

La stabilité est la capacité d'un navire à revenir à une position droite après que les éléments extérieurs : vent, houle ; ou les manœuvres : giration, prise de chargement... l'en ont écarté.

La stabilité est jugée suffisante si le navire garde cette capacité dans toutes les situations rencontrées dans des conditions normales de navigation.

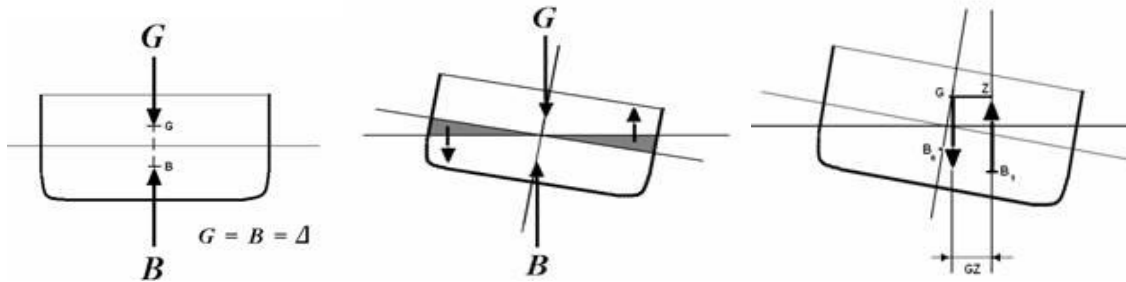
Trois facteurs peuvent affecter la stabilité :

- Le chargement du navire,
- La présence de couples extérieurs perturbateurs
- Des conditions inadaptées de navigation.

Les deux premiers facteurs sont pris en compte dans l'étude de la stabilité statique.

Le troisième facteur est considéré dans l'étude de la stabilité instantanée.

**Comment agit la stabilité:**



Le navire subit l'action de deux forces égales et opposées formant un couple : son poids et les forces de flottaison. Ce couple est à priori déstabilisant car généralement le centre de gravité est au dessus du centre de flottaison qui est le point d'application des forces de flottaison.

En fait lorsque le navire s'incline, une partie du volume immergé sort de l'eau sur un bord tandis que sur l'autre bord un volume équivalent s'immerge. L'action de ces deux volumes crée un couple stabilisant qui sera suffisant si **G** n'est pas trop élevé au dessus de **B**.

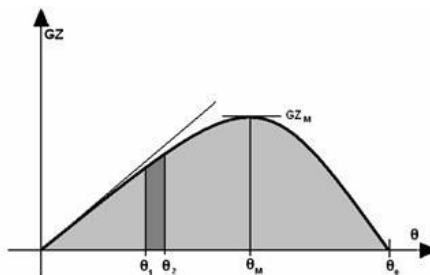
Ce phénomène revient à prendre en compte le déplacement du centre de flottaison qui en venant en abord crée un couple de redressement avec le poids.

Remarque importante : Le couple de redressement n'existe que si la carène traverse la surface libre, il est nul pour un sous marin en plongé pour lequel **G** doit être impérativement au dessous de **B**. Pour un navire, il peut diminuer notablement et devenir insuffisant si une partie du pont est sous l'eau et donc une partie de la carène est immergée.

**Comment évalue-t-on la stabilité :**

Le couple de redressement est constitué par le poids appliqué en **G** et la somme des forces de flottaison appliquées en **B** centre de flottaison qui se déplace en abord lorsque le navire s'incline. La projection sur un plan transversal de la distance horizontale entre **B** et **G** est le bras de levier de redressement **GZ** qui caractérise ce couple.

A chaque inclinaison correspond un nouveau centre de flottaison et donc un bras de levier **GZ**. L'évaluation de la stabilité résulte de l'analyse de la courbe des bras de levier de redressement **GZ (θ)** ou des moments de redressement **GZ.Δ**, en fonction de l'angle d'inclinaison **θ**.



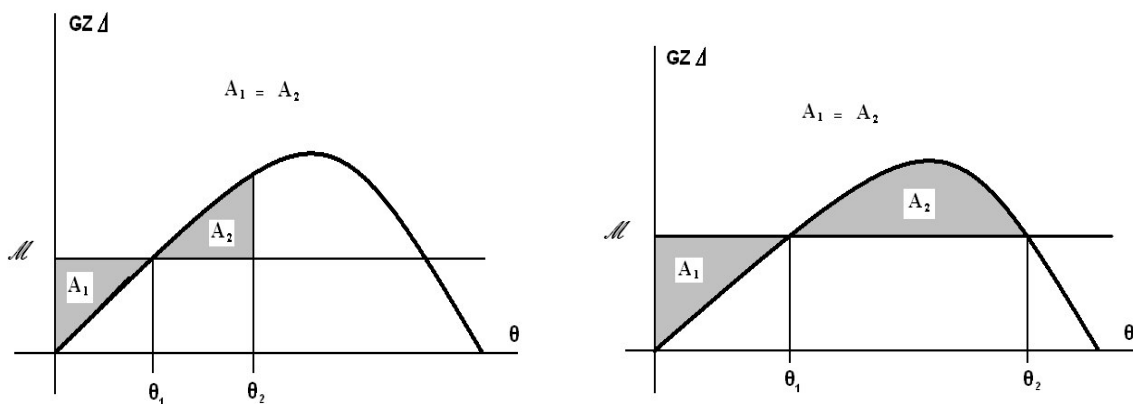
En particulier, l'aire sous la courbe, entre un angle  $\theta_1$  et un angle  $\theta_2$  est proportionnelle au travail nécessaire pour incliner le navire de  $\theta_1$  à  $\theta_2$ . Il en résulte que l'étude de la répartition de cette aire permet d'évaluer la capacité de redressement du navire.

L'aire totale sous la courbe de stabilité est la réserve de stabilité. L'angle correspondant au sommet de la courbe est l'angle critique de chavirement statique car au delà le moment de redressement qui s'oppose au moment inclinant diminue lorsque l'inclinaison augmente, donc l'équilibre ne peut pas être stable : si le moment inclinant persiste il y a chavirement.

Ce sommet correspond à une inclinaison où la flottaison atteint une partie plus rétrécie de la carène : le livet du pont par exemple. La valeur  $GZ$  maximum et l'angle correspondant sont des indications de la capacité de redressement sous les fortes sollicitations. Cet angle  $\theta_M$  est l'angle limite de stabilité statique.

L'angle  $\theta_t$  correspondant à l'annulation de la courbe de stabilité, donc à l'annulation du moment de redressement, est l'angle de chavirement statique, au-delà, le moment de redressement devient négatif : il y a chavirement spontané, sans nécessité de l'action d'un moment inclinant.

Si le moment inclinant est appliqué brutalement, puis maintenu constant, le navire dépasse sa position d'équilibre statique  $\theta_1$  et s'incline jusqu'à  $\theta_2$  qui est l'angle pour lequel le travail du moment de redressement est égal au travail du moment inclinant (les aires grisées sont égales). La valeur maximum de  $\theta_1$  est l'angle limite de stabilité dynamique : au-delà le travail de redressement n'est pas suffisant et l'angle d'inclinaison augmente jusqu'au chavirement.



Cette analyse est codifiée par l'application de critères réglementaires que doit vérifier la courbe de stabilité.

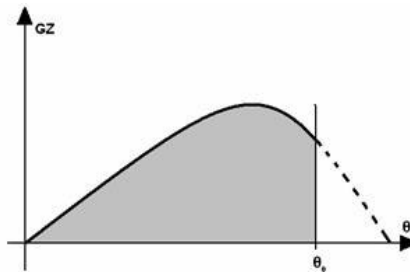
D'une façon générale, plus la réserve de stabilité est importante d'une part, et plus l'angle critique de chavirement statique est grand d'autre part, meilleure sera la stabilité ; sans oublier toutefois que l'aire utile sous la courbe est limitée à l'angle d'inclinaison qui produit l'envahissement par une quelconque ouverture. Pratiquement, ces deux paramètres caractéristiques seront d'autant plus grands que le franc-bord du navire sera important.

**Qu'est-ce qui peut modifier la stabilité :**

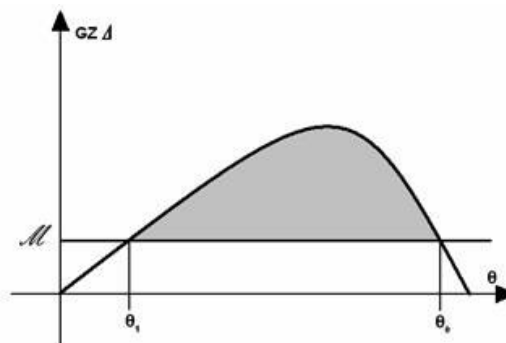
La stabilité étant caractérisée par la courbe des bras de levier de redressement, tout ce qui peut modifier cette courbe, modifie la stabilité.

- Ouverture dans les œuvres mortes : Une nouvelle ouverture dans les œuvres mortes peut limiter la courbe de stabilité à un angle plus petit, réduire la réserve de stabilité et donc modifier les paramètres de stabilité.

Attention donc aux portes prévues pour être fermées à la mer et qui en restant ouverte réduisent la réserve de stabilité.



- Application d'un moment inclinant : L'action du vent, d'une prise de remorque, d'une manœuvre de giration ; le ripage de la cargaison, la composante transversale de la tension dans les funes de pêche, appliquent un moment inclinant au navire. Cette application est équivalente à la soustraction d'un bras de levier correspondant au couple appliqué ; il en résulte que la courbe de stabilité résiduelle peut se trouver fortement diminuée.



Les autres modifications sont mises en évidence par la formulation de la courbe de stabilité :

$$GZ(\theta) = GM \sin(\theta)$$

$$GZ(\theta) = (GM + MM1) \sin(\theta)$$

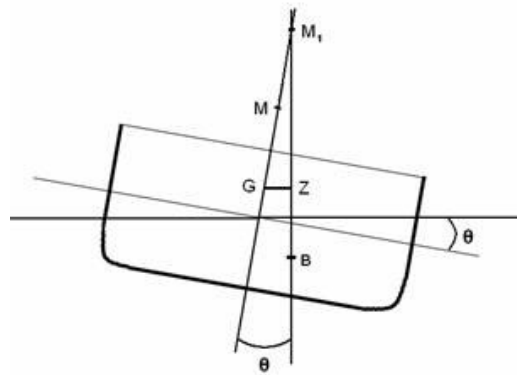
$$GZ(\theta) = GM \sin(\theta) + MM1 \sin(\theta)$$

## SEPA C

**M1** est le point métacentrique pour l'inclinaison  $\theta$   
**M** est le point métacentrique initial  
**M** étant la position limite de **M1** à la position droite.

Lorsque  $\theta$  tend vers 0, **MM1** tend vers 0 et **GZ** tend vers **GM** ; **GM** est la hauteur métacentrique et est donc la pente de la courbe de stabilité **GZ** ( $\theta$ ) à l'origine.

La présence de carènes liquides diminue **GM**. Toute diminution imprévue de la valeur du **GM** à la mer est l'indication de l'apparition d'une carène liquide qui peut révéler un envahissement dangereux.



**M1** est le point d'intersection de la verticale passant par **B** lorsque le navire est droit et de la verticale passant par **B** lorsque le navire est incliné. Les positions de **M1** et **M** sont donc uniquement liées à la forme de la carène (en particulier sa hauteur, c'est-à-dire l'enfoncement du navire).

La position de **G** dépend de la répartition des poids à bord.

Tout ce qui modifie les positions de **G**, **M** et **M1** modifie la courbe **GZ** ( $\theta$ ) donc la stabilité :

- Modification de la position de **G** : une élévation de **G** va diminuer **GM** donc altérer la stabilité.

La modification de la position de **G** peut résulter de l'application d'une force verticale extérieure : force dans les funes d'un chalutier par exemple, surtout s'il y a croche. Dans ce cas, la hauteur du point d'application de la force est essentielle, et si ce point est haut placé, le centre de gravité résultant peut se placer au dessus de **M** et induire une stabilité transversale négative.

- Modification de la forme de la carène provenant de la modification de son enfoncement, c'est en fait la diminution du franc-bord qui a une forte influence négative sur la stabilité : toute surcharge du navire est un danger vis-à-vis de la stabilité.

- Modification de la forme de carène provenant de la variation de forme due à son inclinaison transversale (action sur **M1**). Dans ce cas, chaque carène est un

cas d'espèce, d'une façon générale, tout rétrécissement de la carène dans les hauts (frégatage) dégrade la stabilité.

- Modification de la forme de la carène provenant d'une inclinaison longitudinale ou variation d'assiette : Les formes arrière étant plus évasées que les formes avant, une assiette positive (arrière enfoncé), relève la position de **M** et **M1** ce qui augmente la stabilité, alors qu'une assiette négative a un effet inverse.

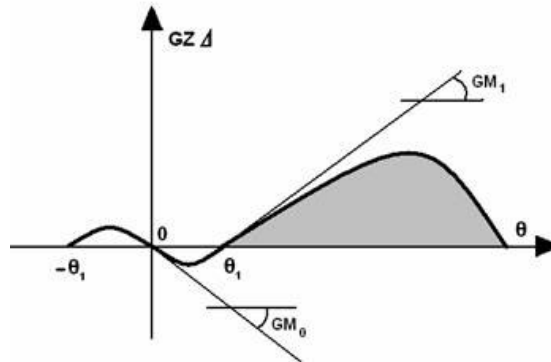
- Modification de la forme de carène due au passage de la houle : Lorsque le navire est sur une crête de houle, **M** et **M1** sont abaissés, et il y a perte de stabilité. Néanmoins, habituellement le temps pendant lequel le navire se trouve dans cette position est trop court vis-à-vis d'une période de roulis, pour que cette perte de stabilité ait une influence sur son attitude. Si par contre, ce temps dépasse ou même devient égal à la durée d'une période de roulis, la perte de stabilité doit être prise en considération.

La surveillance de ce phénomène fait partie du contrôle de la stabilité instantanée.

**Les cas critiques de stabilité :**

- **Stabilité initiale négative :**

Lorsque **GM** devient négatif, par élévation du centre de gravité par exemple, la position droite n'est plus une position d'équilibre pour le navire. Une position inclinée sur un bord ou sur l'autre sont les positions d'équilibre possibles, avec passage de l'une à l'autre sous l'effet des éléments extérieurs.



Si les deux équilibres ne sont pas trop éloignés l'un de l'autre, cette situation, quoique inconfortable, n'est pas forcément dangereuse si la réserve de stabilité reste importante. Néanmoins il n'est pas conseillé de rester dans cette situation (non réglementaire) car la diminution du **GM** peut s'amplifier, et la réserve de stabilité devenir insuffisante.

Il est impératif de ne rétablir un équilibre droit qu'en remédiant à la cause de l'inclinaison, donc à la perte de stabilité.

Toute tentative de redressement par déplacement de poids en abord amène de façon quasi certaine au chavirement par basculement à la position d'équilibre sur l'autre bord avec

une perte de stabilité supplémentaire créée par le moment inclinant du au déplacement de poids.

## SEPA C

### - Eau sur le pont :

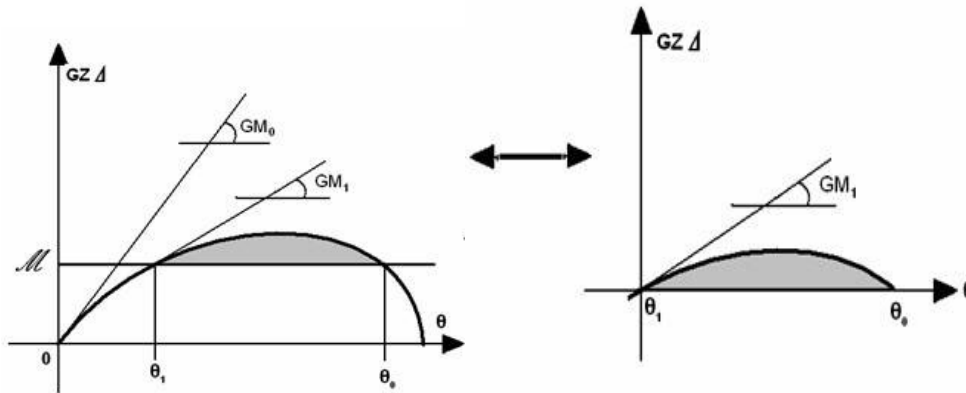
Si la mer envahit le pont, la situation du navire peut devenir très critique :

L'accroissement de poids dans les hauts diminue la valeur de **GM** et avec la carène liquide peut le rendre négatif. L'alourdissement du navire augmente son enfoncement donc diminue son franc-bord ce qui dégrade aussi la stabilité, enfin l'eau peut s'accumuler sur un bord (d'autant plus facilement si le **GM** est faible ou négatif), provoquant une gîte permanente qui correspond à un couple inclinant diminuant encore la réserve de stabilité.

Le **GM** apparent est la pente de la courbe de stabilité au point d'équilibre. Ce point étant proche du sommet de la courbe, cette pente devient très faible, donc la réponse du navire à la houle devient molle ce qui augmente la tendance à l'envahissement du pont et amène rapidement au chavirement.

### - Moment appliqué :

On a vu qu'un moment d'inclinaison appliqué au navire diminuait sa réserve de stabilité. Si ce moment est le résultat d'une action ordinaire sur le navire comme le vent ou la giration, son influence est déjà prise en compte par la vérification des critères.



Si l'inclinaison provient d'un moment inclinant d'origine exceptionnelle : Remorque, chargement en abord, ripage de cargaison, eau sur le pont... Il est nécessaire de corriger la courbe de stabilité en conséquence, avant d'appliquer les critères de stabilité.

Le calcul pourra être effectué par avance ce qui permettra de déterminer le moment inclinant qui peut être supporté ou l'angle d'inclinaison sous ce moment, à ne pas dépasser. Si la situation n'a pas été prévue, le calcul pourra être effectué

à partir de la mesure de l'inclinaison sous l'action du moment inclinant, afin d'évaluer le degré de criticité de la situation existante.

### **Comment se prémunir des dangers liés à la stabilité :**

Le meilleur moyen de se prémunir des dangers liés à la stabilité, est de connaître à tout instant la courbe de stabilité pour pouvoir y appliquer les critères de stabilité.

Cela suppose que l'on connaisse à tout instant :

- La hauteur du centre de gravité **G**
- La forme de la carène, incluant les œuvres mortes susceptibles d'être immergées aux grandes inclinaisons.

La formule explicitant **GZ** d'une part, la considération d'autre part que le plan des formes du navire est connu et invariable, permettent de remplacer les conditions précédentes par la connaissance de :

- La valeur **GM**
- Le tirant d'eau moyen et l'assiette du navire.

A un ensemble de ces trois valeurs correspond une courbe **GZ ( $\theta$ )** des bras de levier de redressement, parfaitement définie sur laquelle on pourra appliquer les critères de stabilité.

Tout couple inclinant constant appliqué au navire modifiant la courbe de stabilité, il faut en tenir compte en connaissant l'angle d'inclinaison statique initial.

### **Gestion pratique de la stabilité :**

La connaissance du **GM**, du tirant d'eau moyen et de l'assiette permet de définir, dans le cas général, la courbe de stabilité, et donc de vérifier les critères de stabilité.

Pour rendre pratique et rapide cette opération si on ne dispose pas de calculateur effectuant les calculs en temps réel, le calcul de la courbe de stabilité, avec la détermination des différentes aires et la vérification des critères peuvent être effectuée par avance, c'est-à-dire que l'on peut établir à priori des tableaux ou des courbes donnant les combinaisons de ces trois paramètres qui satisfont aux critères de stabilité, et celles qui n'y satisfont pas.

Ces tableaux ou ces courbes peuvent être établis pour le navire à l'état intact ou en condition après avarie, en y appliquant alors les critères correspondants.

Cette façon de procéder fait partie des recommandations du règlement national Article 221-II-1/08 §7.2

Pour tenir compte d'inclinaisons statiques accidentelles, les mêmes tableaux peuvent être pré calculés pour différentes inclinaisons initiales.



### **Contrôle de la stabilité instantanée sur houle :**

La connaissance de la valeur du **GM**, du tirant d'eau moyen et de l'assiette ; et leur exploitation, permettent de se prémunir des dangers courants.

On ne peut pas calculer les pertes de stabilité instantanées, mais on peut s'en prémunir en évitant les situations dangereuses. La solution est une surveillance continue du comportement du navire et sa relation avec la houle.

#### **- Roulis paramétrique :**

Lorsqu'un navire s'incline, le centre de carène ne reste généralement pas dans un plan transversal, mais se déplace longitudinalement, induisant un mouvement de tangage. Inversement, par le même phénomène, le tangage peut exciter le roulis.

On doit veiller à ce que ces deux mouvements ne soient pas synchrones (à l'unisson diraient les musiciens) ou hémichrones (à l'octave) car alors les amplitudes de roulis peuvent croître de façon importante et arriver à dépasser la capacité de redressement du navire créant un risque de chavirement ou au moins de dégâts dans le chargement.

La parade consiste à surveiller l'amplitude du roulis et le rapport des fréquences de roulis et de tangage.

#### **- Perte de stabilité par houle de l'arrière :**

Par houle de l'arrière ou trois quart arrière, on peut retrouver le phénomène précédemment décrit, du navire placé trop longtemps au sommet d'une vague, dont la stabilité est devenue trop faible pendant suffisamment de temps pour être dangereuse.

Là aussi une surveillance continue du rapport de la période de roulis à la période de rencontre de la houle qui est aussi celle du tangage à ce moment, est nécessaire.

### **Conclusion :**

**La stabilité peut être immédiatement évaluée par la connaissance du GM et des tirants d'eau avant et arrière du navire.**

**Si le navire présente une gîte permanente, la connaissance de cette inclinaison permet d'évaluer son influence sur la stabilité.**

**La surveillance des périodes relatives de roulis et de tangage complétée par la surveillance de l'amplitude de roulis permet de prévenir l'approche de situations instantanées critiques.**

