

STABILITE d'un navire

Histoire

L'un des naufrages les plus spectaculaires du 17^{ième} siècle fut celui du navire de guerre suédois, le VASA, construit par le roi Gustave II Adolphe de Suède, entre 1626 et 1628. Le VASA était un trois-mâts de 62 mètres de long, 52 mètres de haut et 11.7 mètres de large. Il déplaçait 1200 Tonnes et embarquait 64 canons. Le 10 août 1628, lorsque le navire quitta le port pour la première fois, il chavira brusquement, se renversant sur le côté, et coula en l'espace de quelques minutes. Ce naufrage donna lieu à un procès pour en éclaircir la cause. En réalité, c'est une combinaison de différentes circonstances qui avait conduit au naufrage, modification de la taille et des proportions, ajout de canons dans les hauts etc etc.... de sorte que le centre de gravité s'était déplacé progressivement vers le haut, mais beaucoup plus haut que prévu. Pourtant, dans les jours précédents, les "essais de stabilité" de l'époque avaient inquiétés. Ces essais consistaient à faire déplacer rapidement l'équipage d'un bord à l'autre, le navire étant à quai....

La notion de stabilité d'un navire en général est très complexe à appréhender. Est-ce sa capacité à gîter le moins possible sous l'effet du vent, de la houle, des vagues, est-ce sa résistance au chavirement, pour évoquer ce paramètre très usuel et très perceptible dès que l'on pose les pieds sur un bateau.

La stabilité représente l'élément principal des qualités marines d'un navire. En d'autres mots, disons que la stabilité est associée à la sécurité mais n'est pas pour autant opposée aux performances du navire.

1. Les Bases & les Références

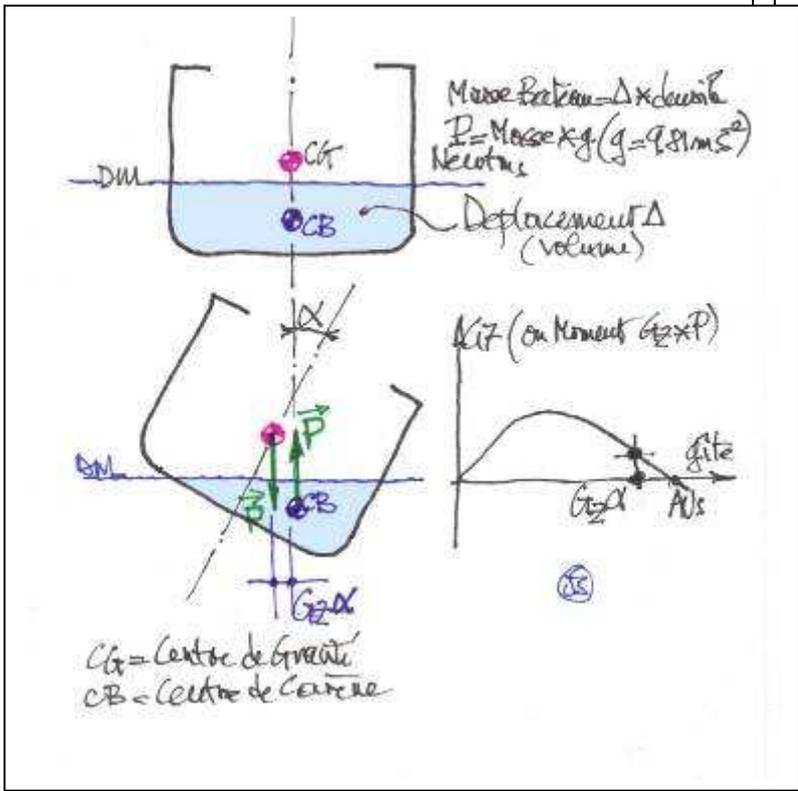
Avant de développer les démonstrations scientifiques, énonçons quelques définitions et références : Prenons l'exemple d'un voilier, car c'est le bateau où la stabilité est la plus grande et aussi visible mais aussi la plus "palpable".

Tout ce qui est applicable au voilier ne l'est pas pour un cargo, un chalutier, un navire de charge, un ferry. Ces bateaux (exception faite de canot de sauvetage) ne doivent jamais gîter jusqu'à s'approcher de l'angle fatidique de chavirage. Les bureaux d'étude calculent donc ces navires pour que cette situation (chavirage) n'arrive jamais....

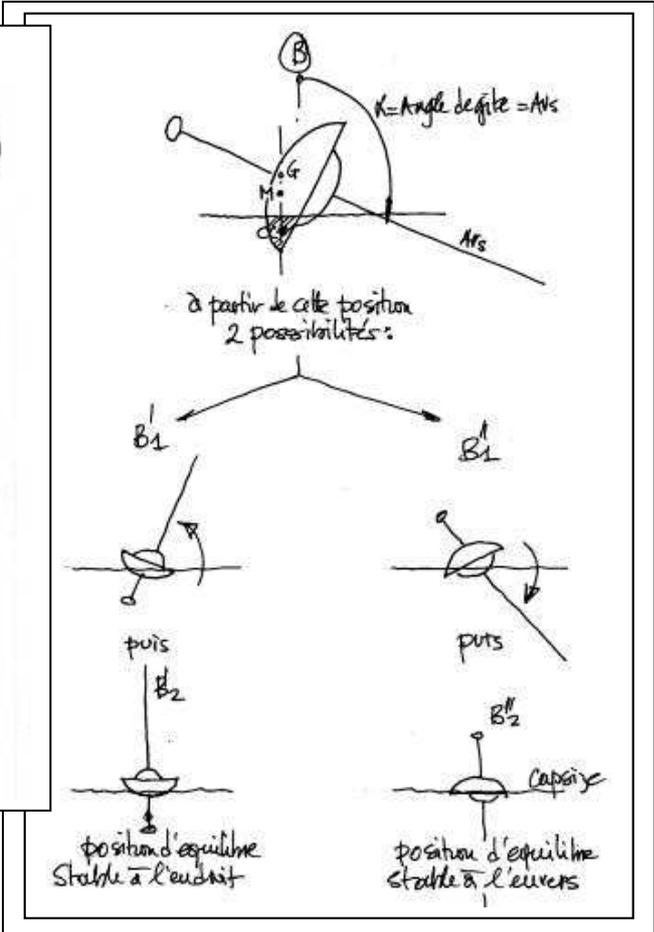
Cas du Voilier de plaisance.

- Un voilier possède une position d'équilibre stable¹ au voisinage de 0° "upright" (c'est celle que l'on voit dans les ports, lorsque le navire s'il sont à l'arrêt).
- Tous les voiliers chavirent obligatoirement à un certain angle de gîte, c'est-à-dire qu'il passe de la position « à l'endroit » à la position « à l'envers ».
- Dans le cas d'un voilier, si il est étanche, ce qui est rare, c'est-à-dire si il n'y a aucune voie d'eau lorsqu'il chavire, ou suffisamment de volume de flottabilité, il trouve une autre position d'équilibre stable à 180°, c'est-à-dire à l'opposée de la position d'équilibre normale (0°).
- Ces deux positions (0° dit « upright ») et (180° dit « capsize ») sont les deux seules positions stables. Entre ces deux positions, toutes les positions angulaires (gîte) sont instables, c'est-à-dire que lorsque l'on abandonne le bateau d'une position angulaire quelconque il revient automatiquement vers la position 0° ou 180° suivant qu'il avait dépassé ou non l'angle où il chavire (appelé angle Avs).

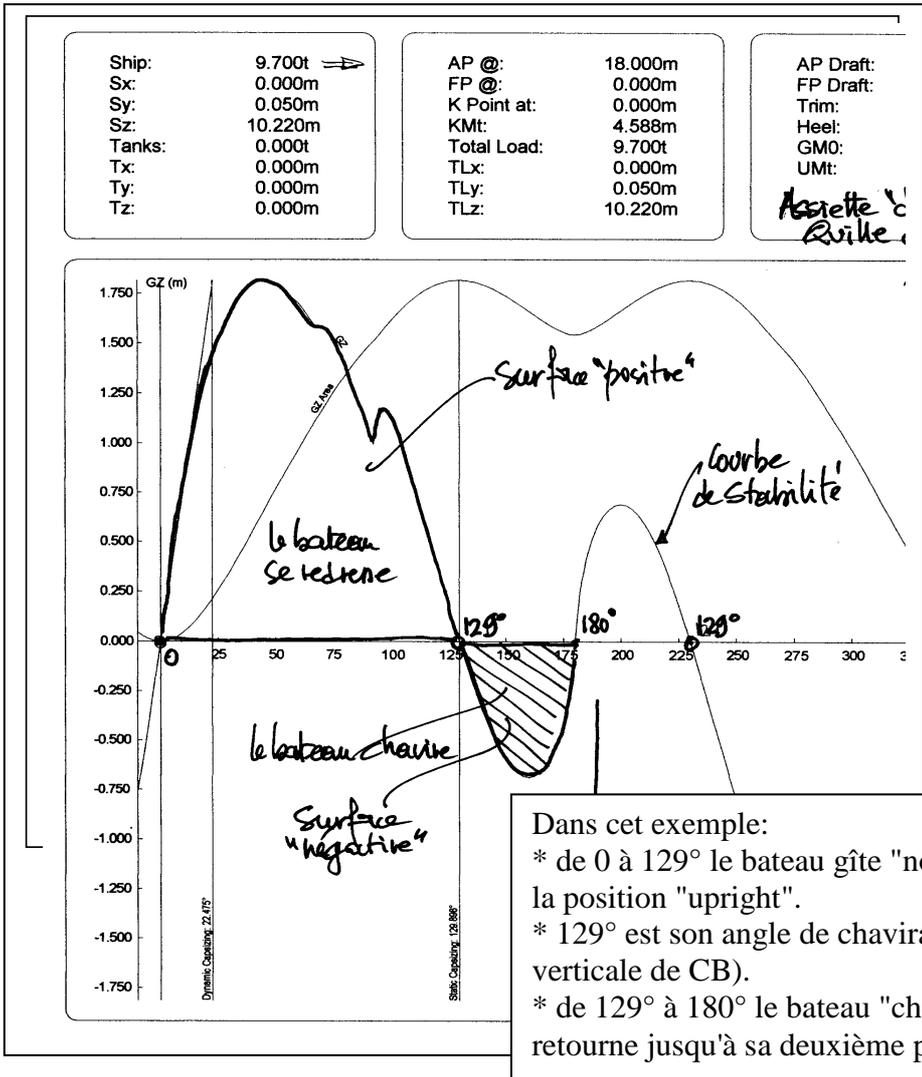
¹ Stable signifiant que si vous écarter de 2°, 10°, 50°, de (Avs-e) le voilier de sa position de 0° il revient automatiquement à la position 0°. Le raisonnement est identique pour la position stable de 180°.



Stabilité Cargo et Voilier

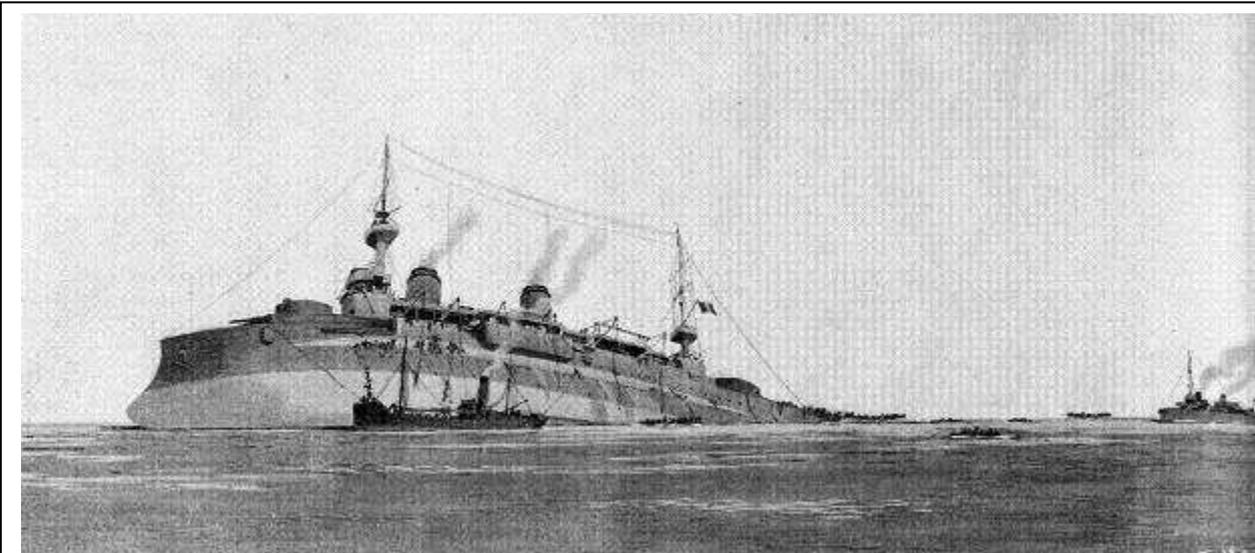
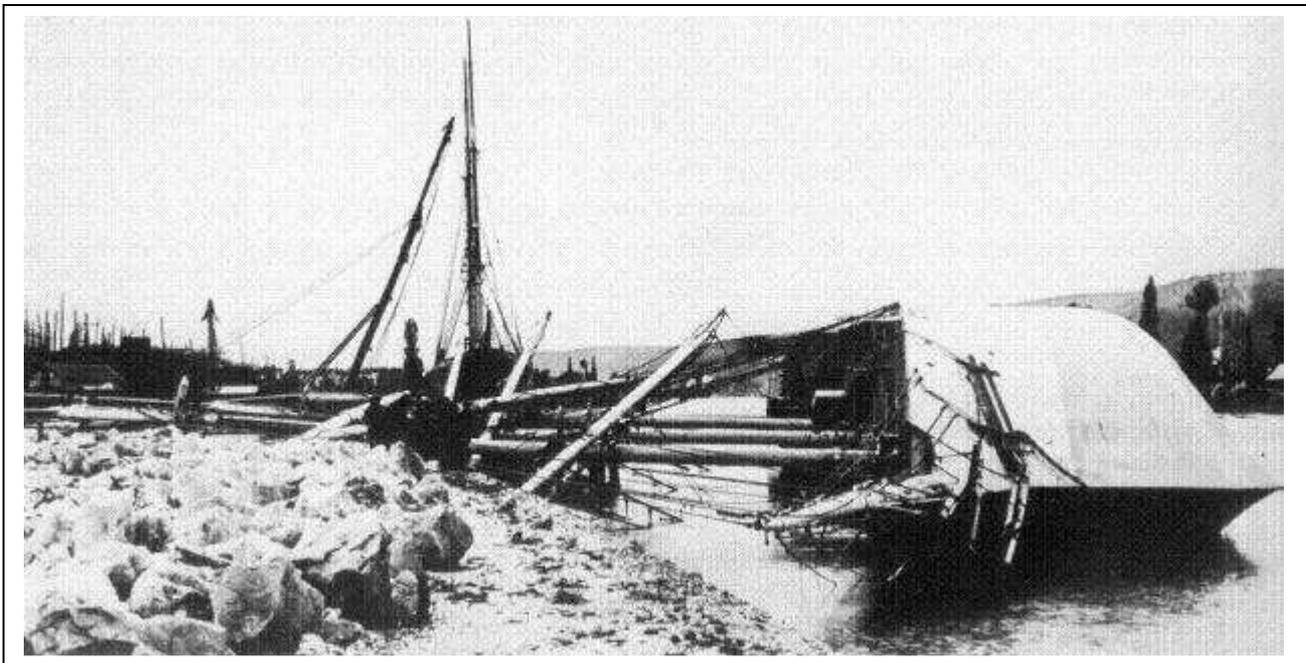


Courbe de stabilité Voilier



Quelques chiffres sur le chavirage transversal (ordre de grandeur)

- Un dériveur chavire sensiblement à 80° de gîte
- Un Cargo chavire à 40° de gîte
- Un chalutier chavire à 60° de gîte
- Un trois mats chavirait à 50° de gîte
- Un sandbagger (voilier de la côte est des USA) des années 1865 chavirait à 80° et même moins pour certains dessins.
- Un canot de sauvetage chavire à 160°
- Un voilier des années 70 chavire à 150°
- Un voilier moderne chavire à 120°
- Un multicoque océanique (type Route du Rhum) chavire à 80°
- Un monocoque océanique type IMOCA (Vendée Globe) ne chavire pas avant $127^\circ 5'$.



Ces chiffres correspondent à des valeurs calculées lorsque l'on fait gîter le bateau en « appuyant » sur le mat comme le ferait le vent dans les voiles ou le vent sur la muraille du navire ou les mouvements de la mer ou encore d'autres forces extérieures (chalut, drague etc).

Dans la réalité cette mécanique statique n'existe pas car seule la mécanique dynamique nous environne, c'est-à-dire que l'on doit prendre en compte les forces d'inertie qui dépendent des masses du navire et des accélérations qui leurs sont appliquées.

Cela n'est pas sans effet sur l'angle Avs. Au final l'angle réel de chavirage est toujours plus faible de 5°, voir 10° ou plus par rapport à l'Avs statique.

En d'autres mots, il faut savoir, à titre d'exemple, que sur un multicoque océanique de course, lorsque le mouvement de gîte transversal est enclenché² et que le bateau est à 15 ou 20° de l'angle théorique de chavirage, même en choquant les voiles, le chavirage se produira.

2. A quoi sert la stabilité ?

Il y a plusieurs réponses ou plutôt plusieurs manières de comprendre le terme « stabilité ». Pour certains, la stabilité se traduit par la raideur à la toile (ancienne expression de la marine à voile), c'est-à-dire la capacité du bateau à ne pas trop gîter sous l'effet du vent. En maritime cela se nomme couple de redressement, il est égal au produit du déplacement du bateau par la distance horizontale entre les verticales passant par le CG et le CC. Pour un voilier la stabilité représente sa capacité à résister au chavirage et pour certains à revenir de la position Capsize.

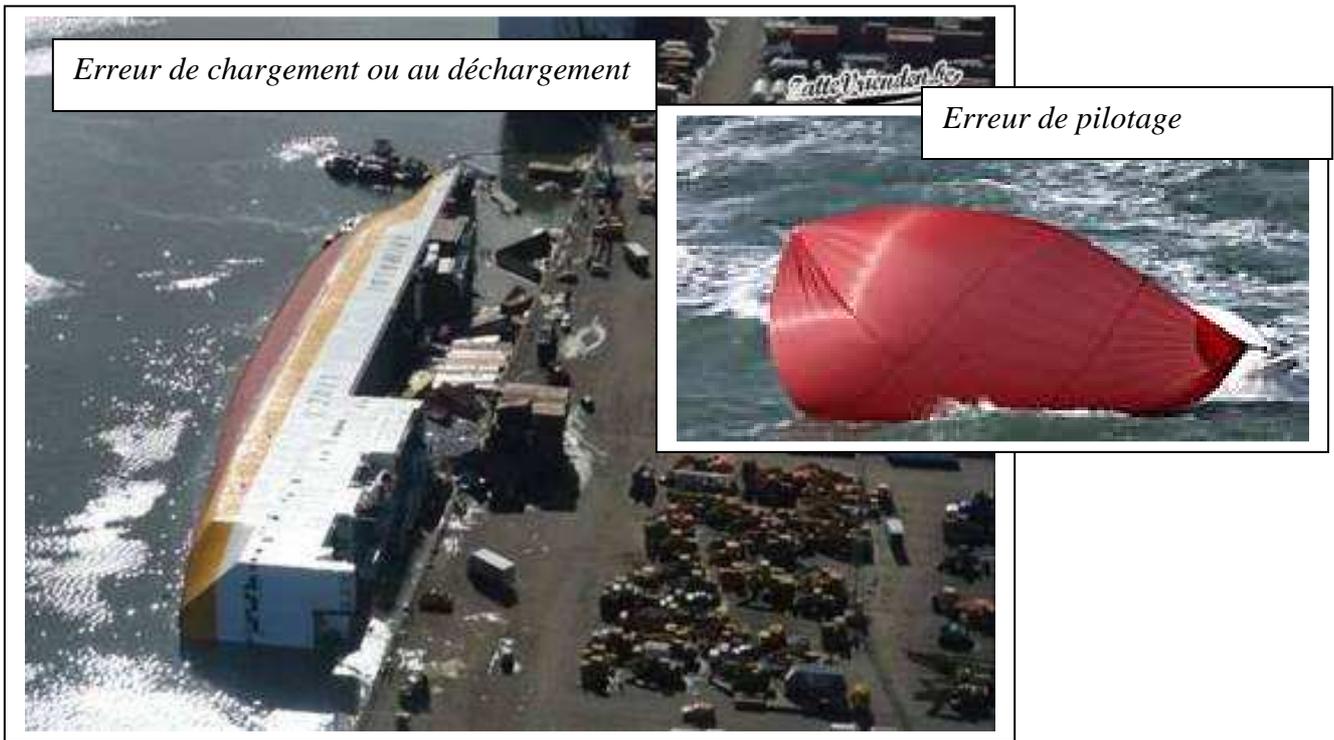


Pour un chalutier la stabilité, c'est plus, la capacité du bateau à résister à l'état de la mer, aux couples inclinants créés par les forces extérieures dues aux arts de pêche et aussi de faire face aux conditions de chargement qui sont toujours fluctuantes et très extrêmes sur ce type de bateaux. Pour un cargo, un porte container, la stabilité dépend du chargement, ce qui n'est pas toujours simple à évaluer.

² Ce n'est pas pour un multicoque un chavirage transversal, mais diagonal, toutefois la théorie de l'énergie reste applicable.

Ces deux notions de raideur (au petits angles) et de capacité à résister au chavirage sont antinomiques, dans le sens où plus on augmente la raideur, plus on diminue l'angle de chavirage (Avs). Cela se voit immédiatement sur un multicoque qui à sa raideur maximale lorsqu'il navigue sur un flotteur, les autres flotteurs étant à fleur d'eau, soit 10° environ de gîte, par contre son angle de chavirage statique est voisin de 80° . A l'opposé un canot de sauvetage à sa raideur maximale vers 80° et son angle de chavirage vers 160° .

Les événements de mer tragiques relatifs à des chavirages frappent le plus souvent des voiliers, des navires de pêche, quelquefois des ferry. Les cargos, porte-containers sont plus frappés par des ripages de cargaisons qui provoquent une gîte importante ($10, 20^\circ$), ce qui revient à flirter dangereusement avec le seuil de chavirage.



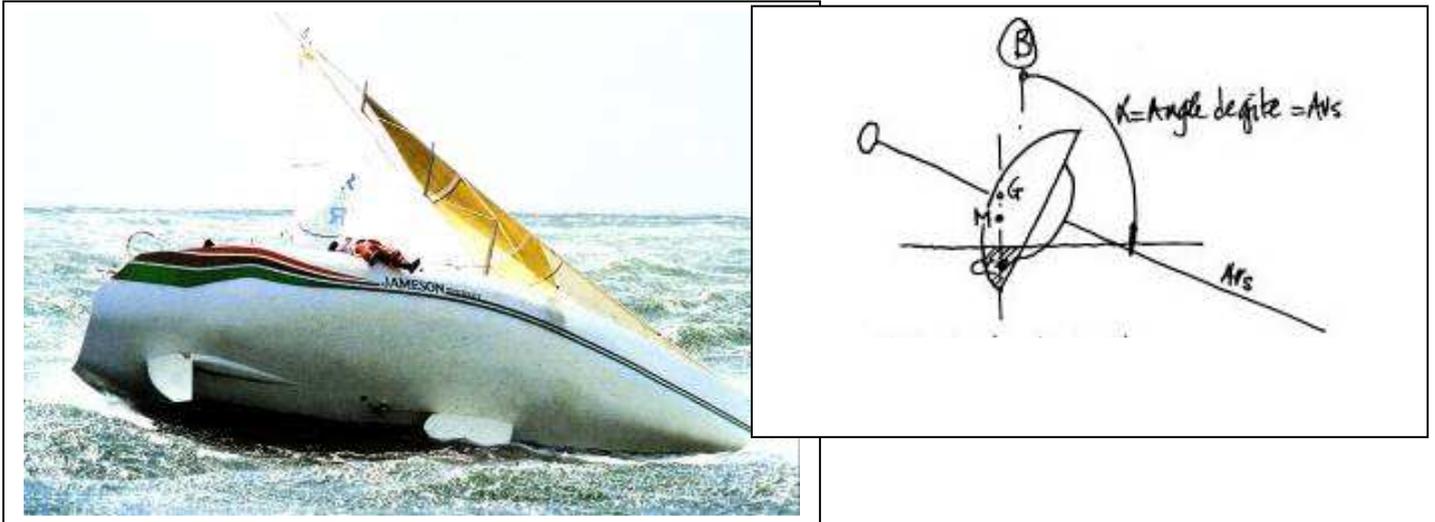
3. Pourquoi un voilier (ou un navire) chavire ?

Excellente question ! La réponse est à la fois simple et complexe.

Simple : Le voilier (ou le navire) chavire lorsque le Centre de Gravité du voilier (CG) dépasse la verticale du Centre de Carène (CB).

Complexe : parce que la position relative de ces deux points caractéristiques varie dans l'espace sous l'effet des angles de gîte successifs entre 0° et 180° et des assiette transversale et longitudinale que cette inclinaison génère.

Durant toute la giration du bateau (différents angles de gîte), le bateau s'appuie sur son Centre de Carène (CC, principe d'Archimède), ce dernier évoluant au gré du volume de carène immergé.



En fait la position de chavirage (angle de gîte Av_s) est une position d'équilibre instable. Lorsque le bateau se trouve dans cette position, il suffit en théorie, pour un voilier, qu'un papillon se pose sur la quille et le bateau revienne à 0° ou sur le mat et il plonge vers 180° .

4. Les paramètres de la stabilité transversale

On distingue 3 paramètres de base, que l'on utilisera pour la suite des calculs :

- Le Centre de Gravité du bateau (CG)
- Le Centre de Carène (CB)
- La distance horizontale entre les deux verticales passant par le CG et le CC

Centre de Gravité (CG)

Toute pièce volumique possède une masse (exprimée en kg) et un point d'équilibre tel que si on suspendait, ou si on posait la pièce sur ce point, elle serait en équilibre quelque soit sa position spatiale. Différentes méthodes, calcul ou expérience, permettent de déterminer ce point d'équilibre.

La méthode mathématique (calcul du Barycentre) associe la masse de chaque éléments constituant la pièce volumique et la position spatiale des CG de chacun de ces éléments.

Pour un voilier la méthode la plus simple consisterait à « peser » à terre le voilier couché à 90° avec 3 pesons accrochés à l'étrave, au bas de la quille et au tableau arrière. Connaissant les distances (d_1 , d_2 , d_3) entre les 3 points d'accrochage et les masses respectives mesurées au peson (m_1 , m_2 , m_3) on déduit immédiatement la position du CG et la masse totale du bateau ($m_1+m_2+m_3$). La méthode est « simple » au sens où il n'y a que 6 mesures faciles à prendre, mais par contre il faut coucher le bateau à 90° et mettre en œuvre 3

grues, ce qui rend, au final, la méthode beaucoup moins attractive et très peu utilisée. Pour cette raison, on choisira deux autres méthodes qui s'appliquent au navire à flot. La première dite « mesure aux petits angles », la deuxième appelée « méthode à 90° », plus précise mais demande plus de moyen et d'espace et n'est applicable qu'aux voiliers.

L'idéal est de déterminer le CG à vide car il représente la référence de base et dont on est toujours certain de retrouver la configuration. En effet en navigation, le chargement du bateau est différent, les voiles, le GO, l'eau, l'équipage sur le pont, la nourriture, les mouillages, le port en lourd vont contribuer à « monter » le CG... donc à diminuer la stabilité. Cela est vrai quelque soit le navire.

La situation se complique pour les bateaux possédant des ballasts et/ou des quilles pendulaires. Dans ces configurations on se retrouve avec un chargement asymétrique, le CG n'est plus dans la plan de symétrie du bateau. Le but des ballasts et des quille pendulaire sur les voiliers est d'augmenter la raideur (donc son couple de redressement et sa capacité à porter plus de surface de voile) ... Remarquons que c'est ce qui se passe en dériveur lorsque l'équipier ou même les équipiers sont au trapèze. La course au large n'a fait que transposer cette notion de trapèze en basculement de la quille au vent ou en ballastage en eau, mais dans les deux cas, si le moment de redressement maximal est augmenté, l'angle de chavirage à quelque peu diminué.

A partir de la détermination par l'expérience du CG (bateau vide), l'architecte ou celui qui est chargé du contrôle calculera l'évolution du CG en conditions de navigation et établira les critères de stabilité correspondants. Les cargos, pétroliers etc ne navigue pas toujours avec une charge commerciale. Il faut bien décharger les marchandises dans un port et il est rare que le cargo trouve du chargement équivalent dans le même port. Dans ce cas, le cargo remplit des ballasts en eau de mer et navigue sur ballast. C'est un chargement minima qui doit assurer suffisamment de stabilité pour naviguer sans danger.

Le Centre de Carène (CB)

C'est le centre de gravité du volume d'eau correspondant à la carène immergée. Ce volume d'eau (origine du mot déplacement) est égal à la masse du bateau, corrigé par la densité de l'eau. Un cas de chargement (masse en kg du bateau et CG du bateau invariants) appliqué à une carène, donnera un équilibre du bateau donc une assiette longitudinale (on considère que le chargement est symétrique). Cet équilibre se traduira pas un CG et un CB sur la même verticale pour la position 0° et 180°. Pour les autres angles de gîte, le CG et le CB seront dans le même plan vertical, perpendiculaire au plan de symétrie du bateau, mais distant de la valeur nommée Gz (bras de levier).

Le CG et la masse associée sont invariants pour chaque volume, c'est le cas pour le navire. Par contre la forme du volume d'un navire n'admet qu'un plan de symétrie. Cela signifie que lorsque l'on met le « flotteur » (le navire) dans l'eau et que l'on fait gîter le flotteur, à chaque angle de gîte correspond un centre de gravité du volume immergé (Centre de carène CB). On parle d'Isocarènes. Ce centre de carène est obligatoirement dans le même plan vertical que le CG).

A l'époque, pas si lointaine, ou il n'y avait pas d'ordinateur et de programme commercialisé, l'architecte ou le bureau de contrôle réalisait ces calculs à la main (tout au plus avec une règle à calcul ou une « mini » calculatrice électrique). A l'impossible nul n'est tenu et au lieu de travailler sur des flottaisons isocarènes, l'architecte travaillait sur des

flottaisons iso aires sur le maître couple. On considérait que le bateau tournait autour d'un axe perpendiculaire à ce maître couple. Cette approximation simplifiait les calculs et donnait des résultats que l'on considérait comme suffisamment précis. Toujours est-il que pour faire une « stab » complète il fallait une bonne journée de travail.

Aujourd'hui la CAO, travaille en isocarène, puissance de calcul oblige, et réalise un calcul de stabilité complet en 30 secondes !!!

Moment de résistance au chavirage (appelé aussi moment de redressement)

Pour un angle de gîte **a** quelconque, on identifie rapidement :

- Le centre de gravité CG du bateau pour la configuration étudiée
- Le centre de carène CB correspondant à la gîte **a**
- La distance horizontale (appelée aussi bras de levier) entre les deux verticales passant par CG et CB.
- En CG s'applique la force verticale (dirigée vers le bas) égale au poids du bateau (daN)
- En CB s'applique la force verticale (dirigée vers le haut) égale au poids du bateau (daN), correspondante à la fameuse poussée d'Archimède « Euréka j'ai trouvé ... »
- L'ensemble de ces deux forces associées au bras de levier forme un couple qui tend à ramener le bateau vers la position 0° Ou vers la position 180° Si on a dépassé le point de chavirement (gîte Avs). Ce couple est par exemple équilibré en navigation par celui créé par la portance des voiles. Choquons les voiles et le couple de redressement ramène le bateau en gîte 0°.

La Courbe de stabilité

Elle représente la traduction degré par degré (au diable l'avarice du temps de calcul) des produits (Poids X Bras de levier) en ordonnée (axe vertical) pour chaque angle de gîte **a** (axe horizontal).

Elle met en évidence :

- Le point de chavirage lorsque la courbe coupe l'axe horizontal
- Une forme de « cloche » au dessus de cet axe et une forme de « cloche » normalement plus petite (pour un voilier) en dessous de cet axe.
- Le point maximal de la courbe situé au dessus de l'axe des abscisses correspond au moment de redressement maximal pour l'angle de gîte correspondant (comme le poids du bateau est invariant, cela signifie que pour cet angle de gîte le CG et le CB sont horizontalement le plus éloignés).
- Plus la pente de la courbe est « raide » à 0° de gîte, plus le bateau est dur à éloigner de la position d'équilibre 0°, donc plus il est raide à la voile. En réciproque, plus la pente de la « cloche » est raide au point Capsize (180°), plus il sera difficile de s'éloigner de cette position pour espérer revenir à l'endroit. En fait lorsque le bateau est Capsize, c'est-à-dire qu'il est en l'air, le problème est identique à la position Upright (0°) qu'il a normalement, à savoir : il faut le faire « chavirer » pour revenir à la gîte 0°.
- On remarquera que plus la courbe « monte » haut avec une pente ascendante raide... plus la chute est rapide et l'angle de chavirage (Avs) faible ... voir les multicoques... ce que l'on gagne d'un côté est perdu de l'autre.
- La surface comprise entre la courbe de stabilité et l'axe des abscisses, positive entre 0° et l'angle de chavirage Avs) et négative entre Avs et 180°, représente l'énergie nécessaire (vagues, vent) pour arriver au chavirage mais aussi

l'énergie qu'il faudra trouver dans les vagues pour sortir de la position Capsize et franchir le point Avs. Plus cette surface située sous l'axe des abscisses est importante, plus la situation du bateau à 180° sera préoccupante et irréversible.

En conclusion

La stabilité est un difficile équilibre entre le centre de gravité, le centre de carène et le déplacement, paramètre qui sont constamment perturbés par le vent, les mouvements de la mer et la dynamique du navire.

La pratique du dériveur de compétition montre que l'on peut pousser très loin cet équilibre.... qui se termine quelque fois cul par dessus tête, mais c'est sans danger pour ce type de pratique.



J. SANS
26-11-2010