

MANOEUVRE DES NAVIRES

J M AUZON E.N.M.M. MARSEILLE 1999

GENERALITES

Le navire se déplace à la frontière de deux éléments qui constituent son environnement: l'atmosphère et la mer. Il faut souvent y ajouter un troisième élément, notamment en ce qui concerne les manoeuvres d'approche des ports: la terre.

Pour prévoir le mouvement du navire, il est nécessaire d'avoir une connaissance des règles élémentaires de la manoeuvre ainsi que la connaissance des forces que cet environnement exerce sur le navire, et des moyens dont on dispose pour y faire face.

Ces forces peuvent être classées en deux catégories:

- Les forces que le manoeuvrier subit du fait de la mer, des vents, des courants.
- Les forces que le manoeuvrier met en action, c'est à dire les moyens de manoeuvre du navire et les efforts que ceux-ci peuvent développer pour permettre au manoeuvrier de garder le contrôle des mouvements du navire.

Les moyens dont on dispose pour contrôler les mouvements du navire sont parfois insuffisants, en particulier en ce qui concerne les manoeuvres de port. Dans ce cas, la vitesse est réduite et les forces extérieures prennent une importance considérable. On fait alors appel à des moyens extérieurs au navire: les remorqueurs.

La connaissance du navire et de son environnement va nous permettre de dégager un certain nombre de règles simples pour expliquer le comportement du navire, prévoir ses réactions et pour rester maître de celles-ci.

Mais en fait, la manoeuvre du navire est une affaire complexe basée essentiellement sur l'observation, la pratique et l'expérience.

CONNAISSANCE DU NAVIRE

LES FORMES

Les qualités manoeuvrières du navire sont diverses. Mais on admet qu'un navire a de bonnes qualités manoeuvrières quand ses réactions sont normales et aisées quand on met en action la barre et la machine.

D'une manière générale:

- les formes arrondies et pleines favorisent les évolutions; par contre, elles créent des remous, même avec très peu d'erre, et nuisent à l'action du gouvernail quand la machine n'est pas en route. Dans ce cas, il n'est guère possible de tenir un cap fixe.
- les formes effilées à l'avant et à l'arrière améliorent la tenue de route, mais offrent de grandes résistances à tout mouvement giratoire. Toutefois, elles permettent au navire de rester manoeuvrant, sensible à la barre, lorsque, machine stoppée, le navire conserve un peu d'erre en avant.

LE TIRANT D'EAU

Pour une longueur donnée, le tirant d'eau influe sur la surface de carène immergée et donc sur la surface verticale s'opposant à la dérive.

- Un navire léger est très mobile, rapide à la barre et casse son erre très rapidement. Par contre, il est difficile à manoeuvrer avec du vent et il perd de la puissance si l'hélice est à demi-immersée.
- Un navire chargé est lent à obéir à la barre et possède une forte inertie à l'évolution et à la propulsion. Par contre il est moins sensible au vent.

En fait, les navires à mi-charge sont dans les meilleures conditions pour manoeuvrer: ils gouvernent bien, ils possèdent de la puissance en arrière et sont assez enfoncés pour manoeuvrer correctement malgré le vent.

Enfin, lorsque le rapport entre la profondeur et le tirant d'eau devient inférieur à 1,5, le navire évolue en "eau peu profonde" et la faible hauteur d'eau sous la quille affecte ses qualités manoeuvrières.

ASSIETTE

La position d'équilibre va changer avec l'assiette du navire.

Plus un navire est sur le cul plus la courbe de dérive est reportée vers l'arrière et la courbe de giration sera plus grande. Par contre, il développe sa puissance maximum, gouverne bien et abat plus facilement au vent.

Un navire sur le nez a un diamètre de giration plus faible. Par contre le navire n'obéit à la barre qu'avec lenteur, mais dès qu'une abattée est amorcée, il est difficile de l'enrayer. La puissance de la machine est réduite.

LA GITE

Un navire qui a de la gîte ne répond pas aussi bien à la barre que lorsqu'il est droit, car la poussée du gouvernail a alors une composante verticale qui est sans action.

INERTIE

On remarque que, entre le moment où l'on effectue une manoeuvre de barre, de machine, de voile, et le moment où cette manoeuvre produit son effet, il s'écoule un certain temps. Ce retard, qui est dû à l'inertie, varie suivant le déplacement du navire et la répartition des poids à bord.

Cette inertie se manifeste de deux manières:

- Inertie d'évolution: le navire met un certain temps à obéir au gouvernail et continue sa route pendant un certain temps. De même, il continue à évoluer pendant un certain temps après remise à zéro de la barre. D'où la nécessité de "rencontrer" pour casser l'évolution plus rapidement.
- Inertie de propulsion: le navire ne prend de la vitesse qu'un temps après la mise en route et conserve longtemps une vitesse non nulle après arrêt de la machine. Il faut alors battre en arrière pour casser l'erre.

Enfin tout manoeuvrier doit avoir à l'esprit les principales caractéristiques de son navire:

- vitesse en fonction du nombre de tours machine;
- les allures de manoeuvres;
- les caractéristiques de giration;
- la distance d'arrêt (en route libre ou en manoeuvre);
- le temps nécessaire pour passer de la route libre à l'allure de manoeuvre;
- la longueur de chaîne disponible sur chaque ancre;
- la distance de la passerelle à l'avant et à l'arrière.

VOCABULAIRE DU MANOEUVRIER

Le cap du navire peut être suivi au compas ou mis sur le "paysage" mais le manoeuvrier se réfère aussi à la direction du vent.

Bien que cette façon de faire soit moins impérative qu'à la voile, elle est très commode à bord des navires à propulsion mécanique et simplifie le langage.

Par exemple, il est plus simple de dire "le navire abat sur tribord" plutôt que d'énoncer "l'axe longitudinal (orienté vers l'avant) du navire s'éloigne de la direction d'où vient le vent, dans une rotation sur la droite (ou dans le sens des aiguilles d'une montre)".

Les expressions les plus usuelles sont les suivantes:

Arrivée ou abattée: action du navire qui s'éloigne du lit du vent.

Ex: faire arriver le navire: le faire évoluer pour recevoir le vent plus sur l'arrière.

Le vent arrive: le vent frappe le navire de plus en plus sur l'arrière (pendant l'évolution du navire).

Aulofée: action du navire qui se rapproche du lit du vent (faire loffer le navire).

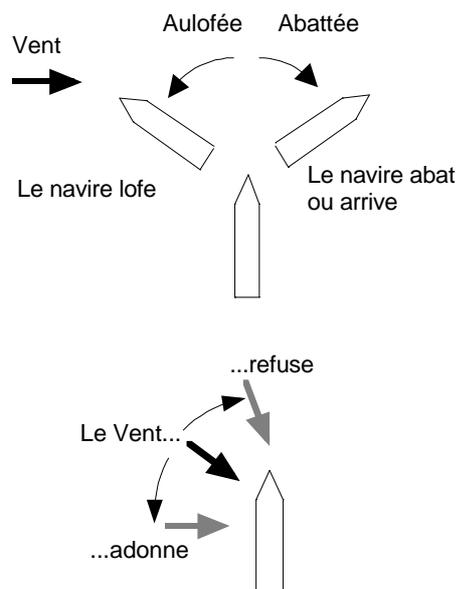
Par contre lorsque le navire garde un cap constant et que la direction du vent change, on dit que

- le vent adonne lorsqu'il tourne dans une direction favorable à la marche,
- le vent refuse ... dans le cas contraire.

Un navire ardent est un navire qui tend de lui-même à loffer, il est mou dans le cas contraire.

Les allures "au près", "grand large" ... sont beaucoup moins usitées. On se contente de "vent debout", "vent arrière", "vent de travers", "sur l'arrière" ou "sur l'avant du travers".

Pour évaluer un gisement de façon approximative, on utilise le "quart" qui équivaut $11,25^\circ$ ($90^\circ = 8$ quarts).



CONNAISSANCE DES QUALITES MANOEUVRIERES DU NAVIRE

Le manoeuvrier se réfère à deux séries de facteurs agissant sur le navire;

- les facteurs extérieurs: l'effet du vent sur les superstructures, l'effet de l'eau sur la carène (résistance de la coque immergée, courant, houle...)
- les facteurs intérieurs: essentiellement le gouvernail et le propulseur mais aussi les ancres, chaînes et amarres dont nous ne tiendrons pas compte dans cette première partie.

Il est sans doute artificiel de séparer l'action du vent et l'action de l'eau alors que ces deux éléments agissent simultanément; cependant l'analyse de chaque phénomène en est facilitée. Ensuite il sera possible de combiner force du vent et résistance de carène pour justifier le comportement du navire pendant la manoeuvre.

EFFET DU VENT

Le vent observé est le vent apparent: sa direction est fournie immédiatement par l'orientation des fumées à la sortie de la cheminée, des pavillons ou de la girouette si le navire en possède une. La vitesse est indiquée par l'anémomètre.

La vitesse s'exprime soit en mètre par seconde, soit en noeuds.

Conversion des m/s en noeuds: $V(m/s) \times 3600/1852 = V(\text{noeuds})$; en pratique: $V(m/s) \times 2 = V(\text{noeuds})$

La force du vent, suivant l'usage, s'exprime selon l'échelle de BEAUFORT établie en fonction de l'effet du vent sur la surface de l'eau.

Le navire soumis à un vent vrai V_v , de direction quelconque, dérive.

La vitesse V_n du navire sur la route fait ressentir à l'observateur se déplaçant dans l'air immobile un vent appelé vent de la course $-V_n$.

Le vent apparent est la somme de ces deux vecteurs vitesse:

$$\vec{V}_a = -\vec{V}_n + \vec{V}_v$$

LE VENT APPARENT

Plusieurs tracés du triangle de composition des vitesses sont possibles.

Pour éviter toute erreur procéder comme suit:

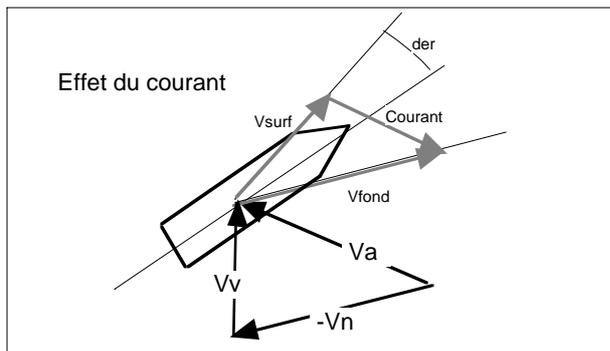
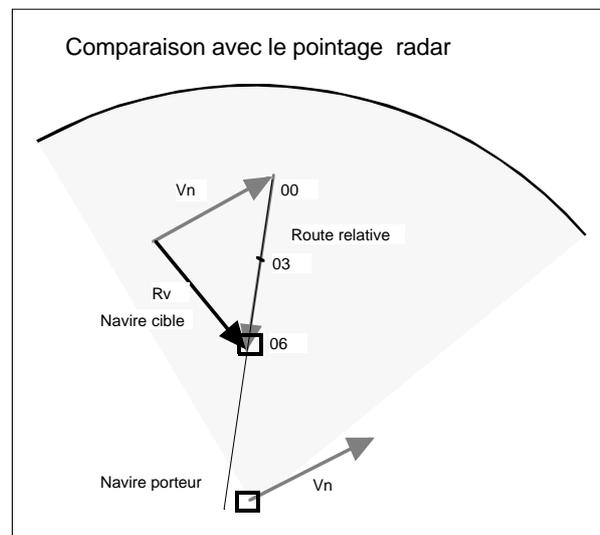
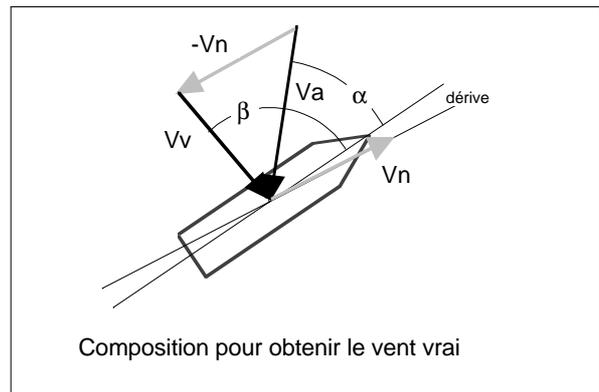
- se placer face au vent apparent (V_a);
- porter le vent de la course à partir de l'origine de (V_a);
- joindre l'extrémité de ($-V_n$) à l'extrémité de (V_a).

On obtient le vent vrai (V_v) et l'on remarque que l'angle formé par (V_a) à partir de l'avant du navire est toujours (en marche avant) plus petit que l'angle formé par (V_v) à partir de l'avant:

$$\alpha < \beta$$

Remarque: la construction proposée est identique à celle qui est faite sur l'écran radar pour trouver la route vraie de la cible à partir du pointage en relatif stabilisé: il y a correspondance entre route relative et vent apparent et entre route vraie et vent vraie.

Autre exemple de composition des vecteurs vitesse: le cas des courants. Si un courant très fort porte le navire au vent, il faut considérer la vitesse fond pour caractériser le vent de la course. Il peut en résulter une erreur sensible sur la direction et l'importance de la dérive si l'on n'en tient pas compte.



EFFET DU VENT SUR UNE SURFACE ELEMENTAIRE

Il y a équivalence entre le déplacement d'un plan dans l'air immobile et le déplacement de l'air (vent) sur un plan immobile

THEORIE DU PLAN MINCE

Cette théorie est générale, elle s'applique quel que soit le fluide (nous la reprendrons à propos de la résistance de l'eau dans la marche oblique, de l'effet du gouvernail...).

Dans le cas particulier de l'air, le vent exerce une pression sur un plan mince. S'il y a écoulement laminaire, c'est à dire sans turbulence, la résistance éprouvée par le plan est la somme des pressions par unité de surface.

Les notations en usage sont les suivantes:

- i : incidence;
- A : bord d'attaque;
- B : bord de fuite;
- C : point d'application de la résistance R (résultante des pressions).

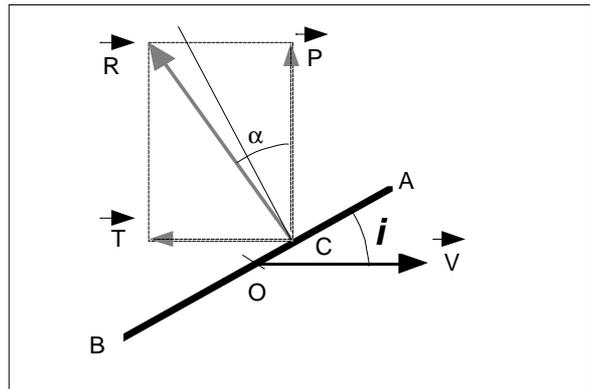
Si $AB = l$ et $AC = d$ on trouve $d < l/2$ (ceci est dû à l'écoulement des filets d'air près du bord de fuite parallèlement au plan).

R se décompose en une force P, la portance (perpendiculaire à V) et une force T, la traînée (parallèle au vent mais opposée au mouvement).

$P \sin \alpha = T$; α s'appelle aussi la finesse.

Si O, milieu de AB, est placé sur un axe de rotation, le plan tend à se mettre normal au vent ($i = 90^\circ$) mais l'équilibre est instable.

Si l'axe de rotation est très près de A, à une distance d' telle que $d' < l/5$, i tend vers zéro (girouette).



Notons que sur une surface plane, R est sur l'arrière de la normale à cette surface (frottement dû à l'écoulement de l'air). Si la surface est concave (voile), R sera sur l'avant de la normale à cette surface .

$$R = \frac{K \cdot S V^2 \sin i}{(0,2 + 0,3 \sin i)}$$

RESISTANCE A LA MARCHE DIRECTE

Elle est fonction des dimensions du solide; elle varie proportionnellement à la surface du maître couple et de la forme du solide.

A maître couple égal, la variation de R est importante.

Elle est fonction de la masse volumique du fluide.

Dans le cas particulier d'un navire, la résistance est pratiquement fonction du carré de la vitesse:

$$R = k S V^2$$

Vue de face

Vues de profil



R

R/3

R/4

R/30

ACTION DU VENT SUR LA CARENE

Soit F la force résultante de la somme des forces élémentaires. Nous savons que sa direction est différente de la direction du vent apparent, mais nous ignorons le plus souvent son point d'application et son intensité. La connaissance de ces éléments peut être obtenue en soufflerie sur modèle réduit puis transposée sur navire réel à l'aide des équations de similitude. Les résultats de ces mesures ne sont jamais communiqués aux navigateurs... si toutefois de tels essais ont été entrepris, ce qui est exceptionnel.

Cependant les effets de cette force sont observables; il est donc possible de déduire par le raisonnement le "point d'application" et la "direction" présumés de la force F.

Soit C ce point d'application. Nous pouvons affirmer qu'il n'est ni sur la muraille qui présente sa concavité au vent, ni sur l'axe longitudinal; si le vent vient franchement sur l'avant du travers, C est sur l'avant du centre de gravité G; si le vent vient franchement sur l'arrière du travers, C est sur l'arrière de G.

Nous pouvons décomposer F en portance P (normale à V_a) et traînée T (opposée à V_n) selon la théorie du plan mince. Mais l'usage est de considérer les composantes sur des axes liés au navire: G_x orienté vers l'avant, G_y orienté sur bâbord et G_z orienté vers le haut.

Considérons d'abord que F est contenu dans le plan horizontal G_{xy} , et réduisons F au centre de gravité G . En ajoutant deux forces F' et F'' égales et opposées, de même module et parallèles à F , le système (F, F', F'') est équivalent à la force F . En effet, nous pouvons ajouter au système existant deux forces égales et opposées, F' et F'' , parallèles à F et ayant G comme point d'application: leur somme est nulle; leur couple est nul.

Ce système se résume en une force F' en G se décomposant en $F'p$ et $F'd$ et en un couple FF'' .

RESULTAT:

Quand un navire en marche avant reçoit le vent sur l'avant du travers:

- $F'p$ freine le navire;
- $F'd$ le fait dériver;
- le couple FF'' est un couple d'abattée.

Quand un navire en marche avant reçoit le vent sur l'arrière du travers:

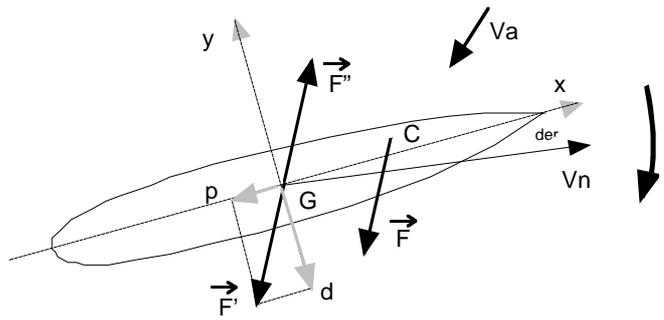
- $F'p$ pousse le navire;
- $F'd$ le fait dériver;
- le couple FF'' est un couple d'aulofée.

Nous avons supposé que F était horizontal, or il n'y a aucune raison pour qu'il en soit ainsi. De plus C et G ne sont pas dans un même plan horizontal. Pour être précis le raisonnement qui précède s'applique pour les projection de C et de F sur un plan horizontal passant par G .

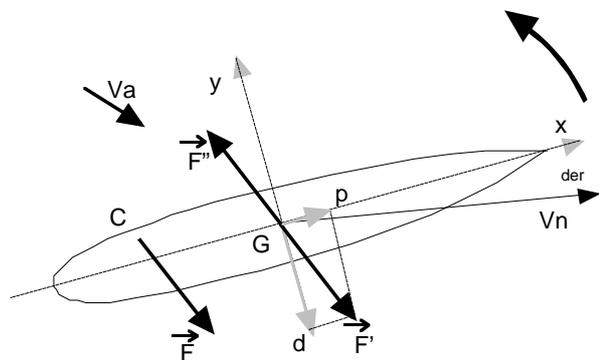
Examinons l'effet de F dans le plan vertical longitudinal et dans le plan vertical transversal du navire.

Dans le plan G_{xz} : l'effet sur les tirant d'eau est négligeable et étant donné l'importance du $P(R-a)$, la variation d'assiette passe inaperçue, la variation de tirant d'eau est insignifiante.

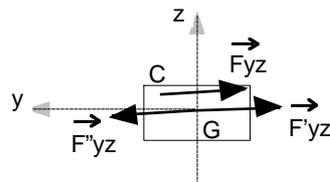
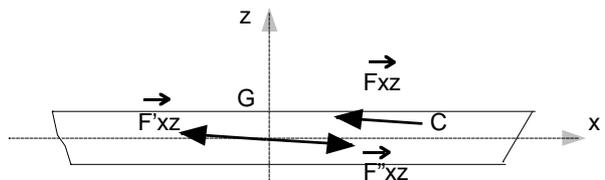
Dans le plan G_{yz} : ici l'effet de la gîte peut être important. Le couple inclinant FF'' dans le plan transversal peut être grand comparé au module de stabilité initiale et le navire va gîter sous le vent.



Navire en marche avant et vent sur l'avant du travers: Le vent freine, fait dériver et abatte le navire.



Navire en marche avant et vent sur l'arrière du travers: Le vent pousse, fait dériver et lofer le navire.



ACTION DE L'EAU SUR LA CARENE

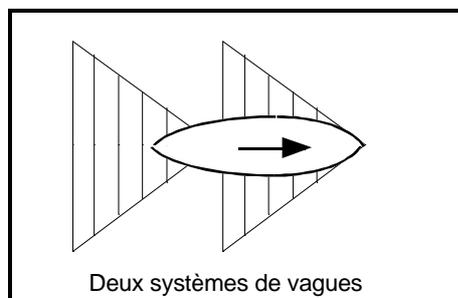
Un navire en mouvement subit, sur sa coque immergée, des forces de frottement de la part de l'eau, dont la résistance s'appelle la résistance de carène.

Rappelons que l'action du vent sur les oeuvres morte est une force motrice, qui agit indépendamment de la vitesse du navire alors que la résistance de carène ne se manifeste que si le navire est en mouvement.

RESISTANCE DE CARENE A LA MARCHÉ DIRECTE

Lorsqu'un navire se déplace suivant son axe, l'action résistante de l'eau à son avancement se décompose en:

- la résistance des vagues.
- la résistance de pression.
- la résistance de viscosité.
- La résistance de remous.
- La résistance de rencontre.



LA RESISTANCE DES VAGUES

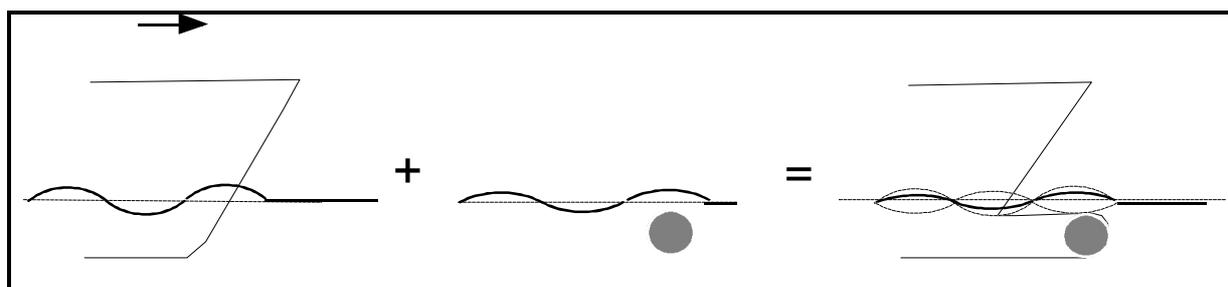
le navire en se déplaçant dans l'eau engendre deux systèmes de vagues: l'un partant de l'avant, l'autre partant de l'arrière et comportant chacun des vagues transversales et des vagues divergentes.

La formation de ces vagues d'accompagnement suppose la mise en jeu d'énergie: cette énergie dépensée pour fabriquer ces vagues correspond à la résistance de vague.

La résistance de vague dépend des forces d'inertie et de gravité, et elle est fonction de la géométrie du navire.

On peut réduire la résistance des vagues en superposant au système de vagues existant un système artificiel: c'est la fonction d'un bulbe d'étrave.

La superposition au système d'ondes créé par l'avancée du navire d'un système créé par un bulbe judicieusement calculé aboutit à un système d'onde moindre et par conséquent moins gourmand en énergie. Le bulbe n'est cependant efficace que pour un tirant d'eau, une assiette et une vitesse donnés.



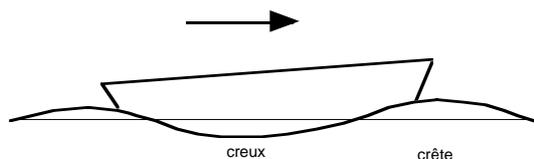
La vitesse limite: pour une forme de carène donnée, chaque navire a une vitesse limite qui ne peut être dépassée sans une dépense d'énergie considérable.

En effet, quand la vitesse augmente, les vagues augmentent en hauteur et en longueur et à une certaine vitesse, une seule lame transversale subsiste: le navire a tendance à déjauger pour la dépasser. Le déjaugage commence

$$\text{à } V > 1,25 \sqrt{L} \text{ m/s}$$

$$\text{et est effectif pour } V = 1,4 \sqrt{L}$$

Pour les navires à déplacement, cette vitesse est une vitesse limite.



LA RESISTANCE DES PRESSIONS

Un navire en déplacement perturbe la masse d'eau de façon sensible sur une zone égale à 1,5 fois sa largeur, et à 1,5 fois son tirant d'eau (la couche limite).

Un navire qui se déplace subit des forces de pression qui s'exercent perpendiculairement à la carène sur l'avant et sur l'arrière et des forces de dépression qui s'exercent au milieu.

Ces pressions sont les pressions hydrostatiques, hydrodynamiques et de pompage (due à l'hélice).

La répartition de ces pressions sur la carène fait apparaître:

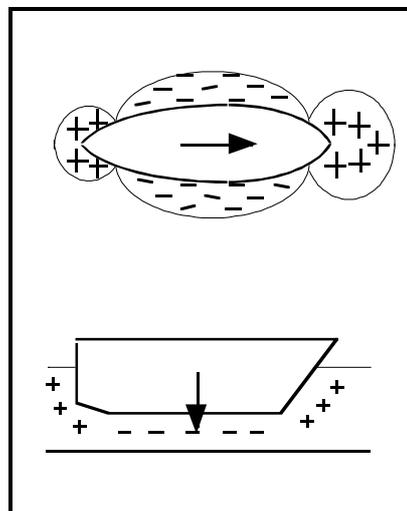
- une zone de surpression à l'avant et à l'arrière;
- une zone de dépression au niveau de la partie centrale du navire.

Un navire en route quelque soit la hauteur d'eau sous la quille, s'enfonce.

La composante des forces de pressions qui s'opposent au mouvement sur l'avant du navire est toujours supérieure aux forces de pression qui favorisent le mouvement.

Si la zone perturbée est réduite de fait, la vitesse des filets d'eau augmente ainsi que la dépression:

- quand un navire navigue par fond réduit à grande vitesse, il y a risque de talonnage phénomène d'accroupissement).
- s'il croise ou double un autre navire de trop près, il y a risque d'aspiration vers l'autre navire (abordage).



LA RESISTANCE DE FROTTEMENT

L'écoulement de l'eau le long de la carène à l'avant du navire est laminaire (filets d'eau parallèles) puis il devient, brutalement et sans continuité, turbulent (filets d'eau moins rapides) puis tourbillonnaires. L'apparition de ces fluctuations est due à un certain nombre de causes: viscosité, inertie, rugosité de la carène. La formation de ces tourbillons dépense beaucoup d'énergie et se traduit par une force contraire au déplacement.

$$R_f = k S V^2 \text{ (v surface de carène)}$$

Cette résistance de frottement dépend de la surface mouillée du navire et de la qualité de surface de la coque. Elle croît en fonction du carré de la vitesse du navire.

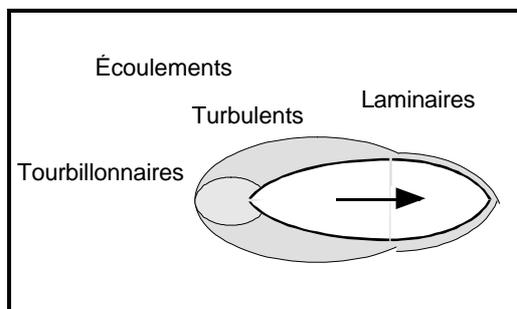
La résistance de frottement (viscosité) augmente d'environ 15% par an si l'on ne fait pas de carénage.

LA RESISTANCE DE REMOUS

Les filets d'eau dans certaines circonstances décollent de la carène sur l'arrière de celle-ci en créant un vide entre les filets d'eau et la coque. Ce vide est comblé par une masse d'eau venue de l'arrière.

Le décollement des filets d'eau autour de la carène, en particulier vers l'arrière, provoque des tourbillons et une dépression qui entraîne une traînée appelée résistance de remous.

Plus la vitesse est grande, plus le décollement se déplace sur l'avant et plus grande est la résistance de remous;



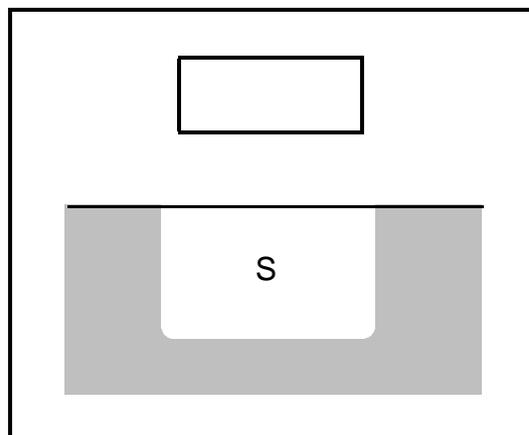
LA RESISTANCE DE RENCONTRE

Elle dépend de la surface du maître couple immergé et de l'importance de la masse d'eau déplacé.

$$R_r = k S V^2$$

Pour les navires "à déplacement", la résistance de carène à la marche directe est la somme de toutes ces résistances.

La résistance à la marche directe n'agit que sur la vitesse du navire en fonction de la puissance de l'appareil propulseur.



RESISTANCE A LA MARCHE OBLIQUE

Un navire recevant le vent d'un bord est soumis à une dérive plus ou moins grande. La route réelle suivie par le navire est inclinée par rapport à son axe de symétrie d'un angle "d" appelé angle de dérive.

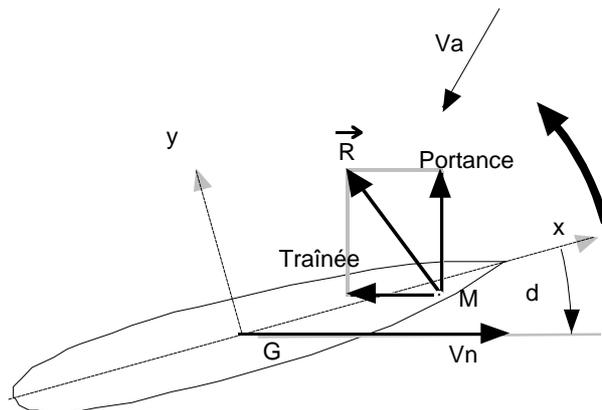
Dans cette marche, le bord opposé au vent heurte directement le liquide et est soumis aux pressions les plus fortes.

Selon la théorie du plan mince, la résistance de carène R admet deux composantes:

- une composante "P" ou portance, perpendiculaire à V_n ;
- une composante "T" ou traînée, opposée à V_n .

Un navire qui a de l'erre en avant, dérivant sous l'effet du vent donne naissance à une force résistante "R" ou résistance de carène, appliquée en un point M centre de dérive situé sur l'avant du centre de gravité, qui a tendance à faire lofer le navire.

Un navire qui a de l'erre en avant et qui dérive sous l'effet du vent est ardent.

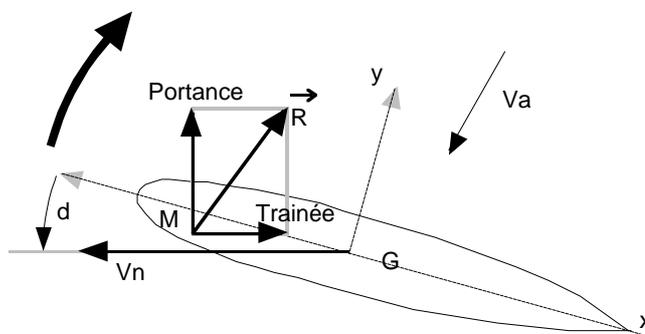


Erre en avant : le navire loffe

Un navire qui a de l'erre en arrière, dérivant sous l'effet du vent donne naissance à une force "R" dont le point d'application est situé sur l'arrière du centre de gravité, qui a tendance à faire abattre le navire.

Cette résistance est plus importante qu'avec de l'erre en avant; ceci à cause des formes plus angulaires sur l'arrière et de la présence de l'hélice.

De plus cette résistance varie en fonction de la gîte, de la vitesse, de l'action des lames et de la houle sur le navire.



Erre en arrière : le navire abat

MARCHE OBLIQUE DUE AU REMORQUAGE

Le deuxième cas de résistance à la marche oblique se manifeste lorsque le navire est soumis à l'action d'une remorque dont le point d'application n'est pas en un point particulier.

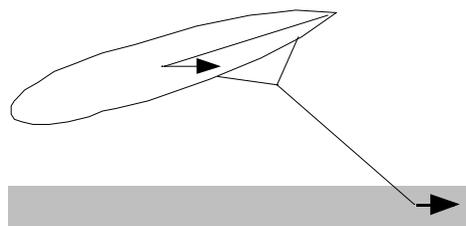
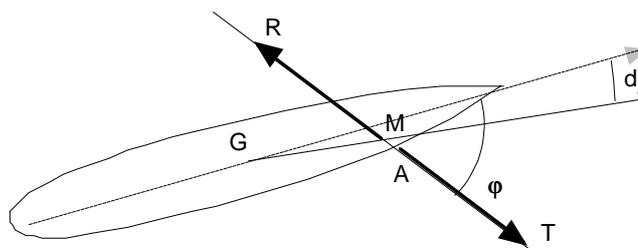
On constate que, lorsque le navire a stabilisé sa marche, il va dériver et l'angle φ (entre la remorque et l'axe longitudinal) est plus grand que l'angle de dérive.

Le remorquage permet l'étude expérimentale de la résistance à la marche oblique: en effet, la force motrice agissant sur le navire est connue (c'est la tension exercée sur la remorque qui peut être mesurée au dynamomètre). Son point d'application et son orientation sont aussi matérialisés.

Lorsque le navire est en mouvement uniforme, il y a équilibre entre la force motrice T et la résistance de carène R dont la grandeur et la direction sont aussi connues.

Application: Halage "à la cordelle".

Ce procédé permettait de faire suivre à un bateau une route parallèle au chemin de halage sans faire intervenir le gouvernail.



DEVELOPPEE DE DERIVE

C'est une courbe qui est obtenue en faisant varier le point d'attache d'une remorque. L'enveloppe des directions des tractions (T) s'appelle courbe de dérive ou développée de dérive.

Elle présente quatre points de rebroussement.

On distingue:

- M0: centre de dérive initial avant;
- M1: centre de dérive transversal;
- M2: centre de dérive initial arrière.

Par analogie avec la développée métacentrique en théorie du navire, on appelle métacentre de dérive, le point m , contact de la résistance de carène R avec la développée de dérive.

Il existe une incertitude sur la position de M , point d'application de R , pour une orientation de R quelconque. Ce que l'on peut affirmer, c'est que M n'est pas sur la muraille (le navire n'est pas un plan mince d'épaisseur négligeable). M n'est pas non plus sur l'axe longitudinal; il se trouve du côté de la muraille recevant l'effet maximum des filets d'eau (coté qui a même nom que la dérive).

Position de la développée de dérive dans le sens vertical.

En supposant que la force R soit horizontale, la développée de dérive est contenue dans un plan horizontal. Ce plan est voisin du centre de carène, il se situe à peu près au niveau du tirant d'eau moyen.

Le centre de dérive transversal $M1$ n'est pas sur la verticale de G (passant par C); on peut admettre que si l'assiette est sur le cul, $M1$ est sur l'arrière de G .

Effet de la traction de remorque sur l'assiette: il est négligeable.

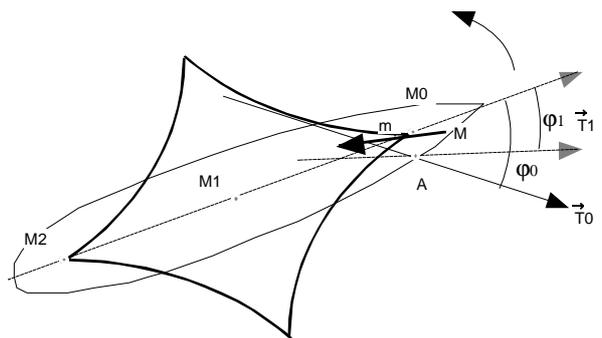
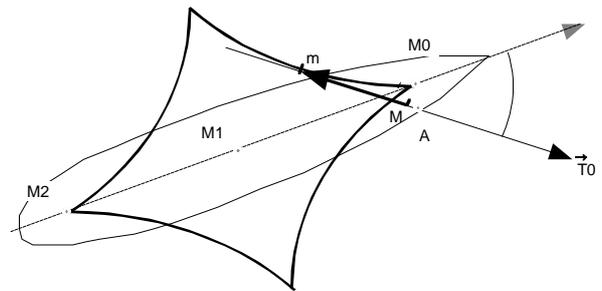
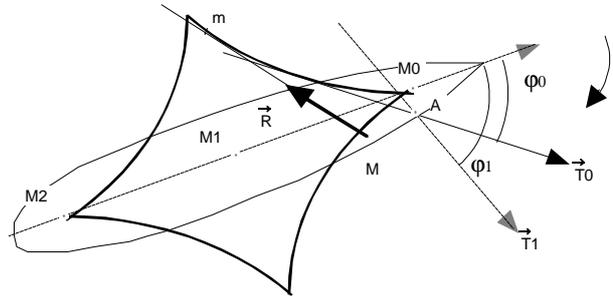
Effet de la traction de remorque sur la gîte: il est appréciable: les points A et M n'étant pas au même niveau, le navire gîte du côté de la remorque.

Stabilité du remorquage

Au démarrage, la résistance de carène est négligeable. Seule la tension $T1$ va agir. Même si l'angle $\varphi1$ est supérieur à $\varphi0$, angle d'équilibre, le navire tend à venir en direction de la remorque.

Il n'en est plus de même lorsque le remorqué a pris de la vitesse. Il peut se produire que le moment de $R1$ soit supérieur au moment de $T1$ (si le remorqué diminue son effort); dans ce cas le navire va embarder.

Or la résistance à la marche oblique reste tangente à la développée de dérive: le moment de $T1$ va redevenir prépondérant et le navire va évoluer du côté de la remorque. Par inertie, le navire va dépasser la position d'équilibre jusqu'à ce qu'un couple antagoniste se manifeste. Après une série d'oscillations, le navire se stabilise de façon que la remorque forme un angle $\varphi0$ à partir de l'avant.



POSITION D'EQUILIBRE D'UN NAVIRE

C'est la position que prend un navire par rapport au vent de telle sorte que les actions de l'eau, du vent et éventuellement des hélices et du gouvernail s'annulent (sauf la dérive); cette position est stable (position d'équilibre) et le navire aura tendance à y revenir chaque fois que le cap prévu s'en écarte.

Pour un navire donné, il y a trois positions d'équilibre:

- navire stoppé;
- navire en marche avant;
- navire en marche arrière.

POSITION D'EQUILIBRE D'UN NAVIRE STOPPE

Elle est fonction de la répartition du fardage (surface offerte au vent: coque et superstructure).

Navire de croisière, ferry, porte conteneur chargé: vent de travers.

Pétrolier sur ballast: vent à 1 quart ou 2 quarts sur l'avant du travers.

Pétrolier chargé: vent à 1 ou 3 quarts de l'avant du travers.

Remorqueur: vent arrière.

POSITION D'EQUILIBRE D'UN NAVIRE EN MARCHÉ AVANT (barre à zéro)

En partant de la position d'équilibre navire stoppé, on met en marche avant, barre à zéro. Le navire est soumis aux actions suivantes:

- l'action dû au vent est moins forte (incidence du vent apparent plus faible): réduction de l'abattée;
- apparition de la résistance de carène: l'action d'auloffée.

Le navire a tendance à se rapprocher du lit du vent d'un ou 2 quarts jusqu'à ce que les forces s'équilibrent de nouveau. Cette position est fonction du type de navire, de la vitesse, de la force du vent et de l'état de la mer.

Navire de croisière, ferry, porte conteneur chargé: 5 à 6 quart du vent.

Pétrolier sur ballast: 4 à 5 quarts du vent.

Pétrolier chargé: 2 à 3 quarts du vent.

Remorqueur: vent de 3 à 4 quarts de l'arrière.

POSITION D'EQUILIBRE EN MARCHÉ ARRIERE

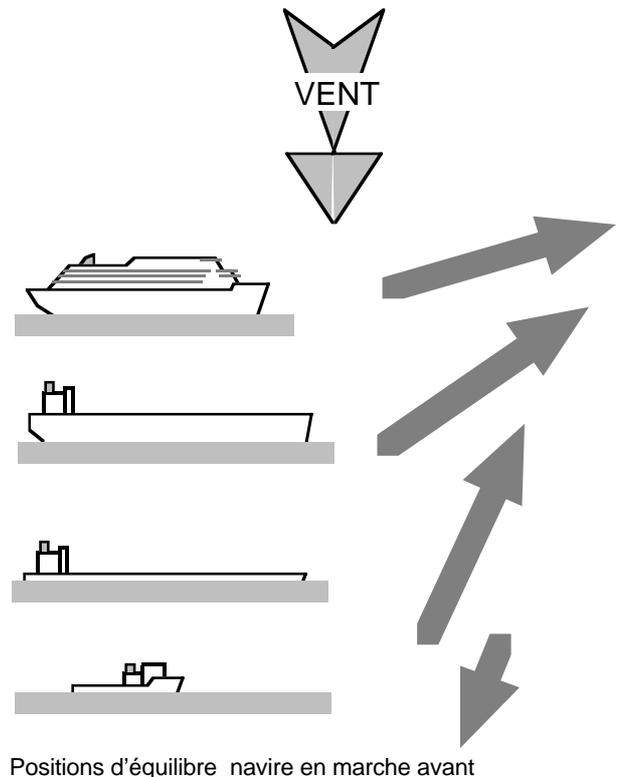
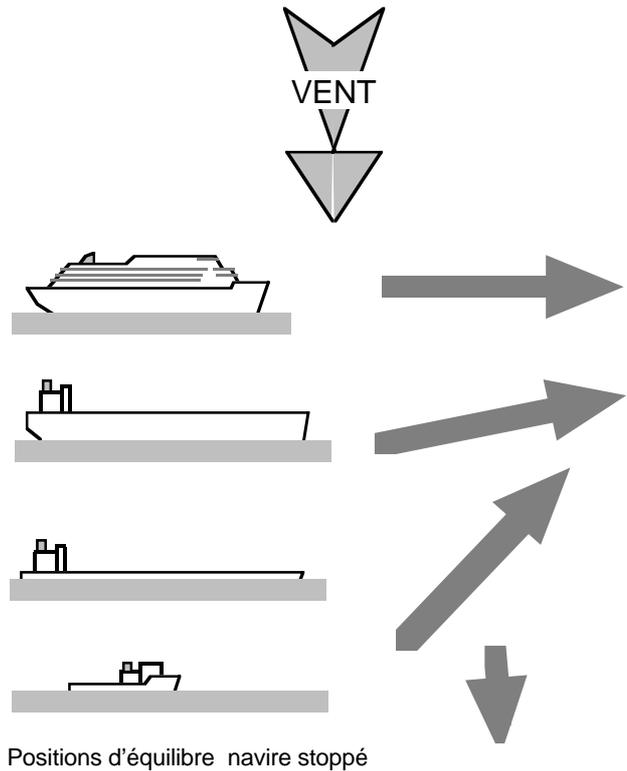
Si le navire a de l'erre en marche arrière, la résistance de carène devient très forte en raison des formes arrières. Le navire abat très fortement.

La position d'équilibre en marche arrière de presque tous les navires est vent arrière.

Mais certains navires, qui ont un fardage important à l'arrière (pétrolier chargé), ont une position d'équilibre en marche arrière qui est avec le vent aux environs de 4 quarts sur l'arrière du travers.

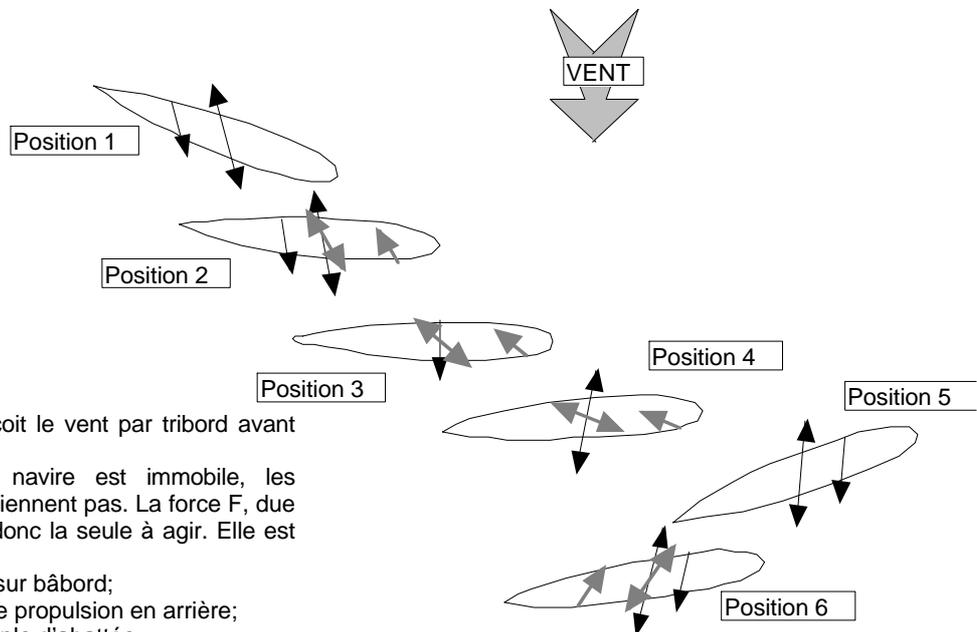
Il est nécessaire de tenir compte de ce principe pour toute manoeuvre en rade étroite ou dans un port.

Le gouvernail, même utilisé avec un angle de barre important, compense difficilement cet effet si le vent est fort.



EFFETS COMBINES DU VENT ET DES RESISTANCES DE CARENES

Considérons un navire dont les superstructures sont également réparties, et dans un premier temps, prenons uniquement en compte les facteurs externes du navire (vent + eau), c'est à dire que la machine est stoppée et que la barre est à zéro.



Position 1:

Le navire est immobile et reçoit le vent par tribord avant (cap à 2 ou 3 quarts du vent).

Sa vitesse étant nulle, les résistances de carène n'interviennent pas. La force F , due au vent, appliquée en C est donc la seule à agir. Elle est équivalente au système:

- une composante F_d : dérive sur bâbord;
- une composante F_p : force de propulsion en arrière;
- un couple FF'' qui est un couple d'abattée.

Le navire cule, dérive sur bâbord et abat.

Position 2: Le navire ayant pris de l'erre en arrière, la résistance (R) de carène se manifeste.

L'action de F (due au vent) se maintient comme en position 1.

L'action de R est équivalente au système:

- une composante R_d : résistance à la dérive;
- une composante R_p : résistance de freinage;
- un couple RR'' qui est un couple d'abattée.

Le navire est ralenti dans sa marche arrière, et dans sa dérive, mais l'effet d'abattée est renforcé.

Position 3: Le navire passe vent de travers. La composante F_p s'annule, mais le navire poursuit son mouvement par inertie.

Position 4:

Le vent est passé sur l'arrière du travers tribord.

La composante F_p est maintenant dirigée sur l'avant et contrarie le mouvement en arrière.

F_d est toujours dirigée sur bâbord.

Le couple FF'' est un couple d'aulofée qui s'oppose à l'abattée due à la résistance de carène.

L'abattée et l'erre en arrière diminuent et le navire s'immobilise.

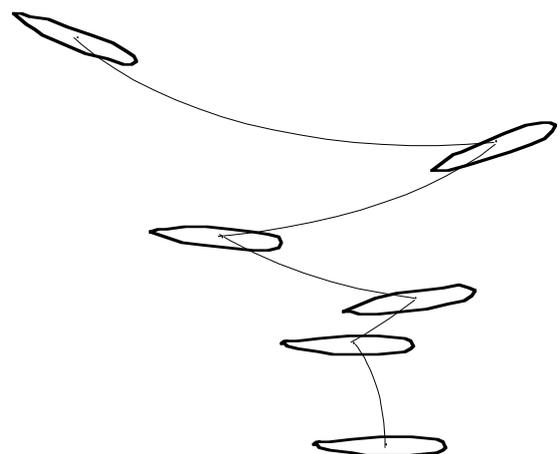
Position 5:

Le navire est stoppé, les résistances de carène disparaissent mais le vent agit toujours comme en (4): le navire repart en avant, dérive et lofe.

Noter que dans la position 5, le navire est plus près de sa position d'équilibre que dans la position 1.

Position 6:

La résistance de carène réapparaît. Elle va freiner le navire, s'opposer à la dérive et accentuer l'aulofée.



Conclusion: Un navire qui n'est pas, au moment où il est stoppé sans erre, en position d'équilibre, n'atteindra celle-ci qu'après plusieurs oscillations tout en dérivant sous le vent. Cette position ne sera vraiment stable que si aucune modification n'intervient dans la force du vent et dans l'action de la houle.

LE GOUVERNAIL

Le gouvernail est destiné à faire évoluer le navire dans les manoeuvres, à le maintenir sur une route rectiligne en route libre et à changer de cap, à la mer.

Il subit des efforts intenses et doit être rigide, profilé et adapté au bâtiment.

Pour étudier les actions qui s'exercent sur lui, on peut l'assimiler à un plan mince.

ACTION DES FILETS D'EAU SUR LE GOUVERNAIL

Soit W la vitesse des filets d'eau, égale et opposée à celle du navire, V , et S la surface du gouvernail.

Si le safran s'incline d'un angle i , les lois déjà énoncées permettent d'écrire que la poussée N exercée sur le plan est la suivante:

$$N = \frac{K \cdot S V^2 \sin i}{(0,2 + 0,3 \sin i)}$$

avec :

- k (<1) coefficient dépendant de la viscosité du fluide, de la qualité de la surface du safran et de sa forme;
- S la surface du safran en m^2 ;
- la vitesse du fluide en m/s ;
- i l'incidence du safran.

La poussée N est appliquée en un point C , situé en avant du centre de gravité de S , à une distance d de l'arrête (le bord d'attaque) telle que:

$$d = (0,2 + 0,3 \sin i) l$$

l étant la largeur du plan.

La poussée N se décompose en 2 composantes: N_t (traînée) et N_p (portance).

Cette poussée N agit de deux façons:

- elle crée un couple de moment Nxd qui tend à redresser le plan mince (et que l'appareil à gouverner doit vaincre): c'est le **MOMENT DE REDRESSEMENT**.
- elle crée un couple par rapport au centre de gravité du navire: le **MOMENT D'EVOLUTION**

LE MOMENT DE REDRESSEMENT $m = Nxd = KSV^2 l \sin i$

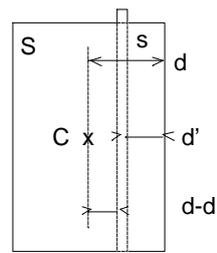
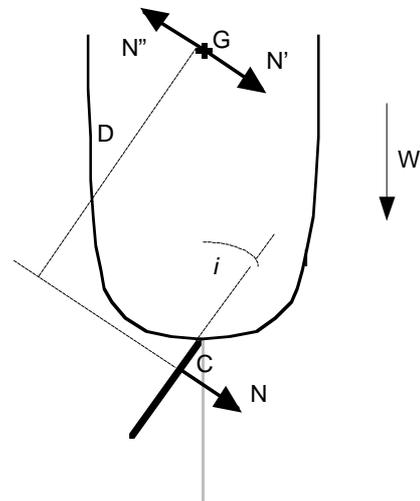
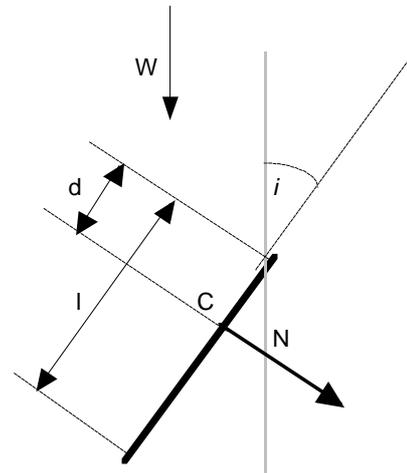
Ce couple s'exerce sur le mèche du gouvernail. L'expression de Nxd montre que le moment de redressement est d'autant plus important que V et i sont grands.

Pour ne pas dépasser certains efforts sur l'appareil à gouverner, la mèche etc..., on adopte les dispositions suivantes:

- limitation de l'angle i à 35° environ, ce qui correspond au maximum du couple d'évolution.
- calcul des organes de manoeuvre et de la structure du gouvernail en fonction de la surface du safran et de la vitesse maximale du navire.
- compensation du gouvernail en reculant l'axe de la mèche du gouvernail par rapport au bord d'attaque, ce qui a pour conséquence de diminuer le bras de levier d et donc le moment de redressement.

$$M_r = N \times (d-d')$$

s/S étant le rapport de compensation (environ $1/4$).



MOMENT DE REDRESSEMENT AVEC DE L'ERRE EN

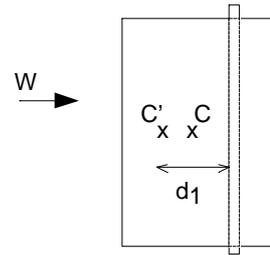
ARRIERE

Le point d'application du centre de poussée ne se trouve plus en C mais en C' situé à une distance d1 de la mèche.

Pour une même vitesse et un angle i , le moment de redressement en marche arrière est plus du double du moment de redressement en marche avant. D'où les consignes suivantes :

- limiter la vitesse en marche arrière;
- limiter l'angle de barre.

La valeur du moment de redressement conditionne le calibre de la mèche.



MOMENT D'EVOLUTION

Si nous reportons en G, centre de gravité du navire, deux forces opposées égales et parallèles à N, nous constatons que le bâtiment sera soumis aux actions:

- de la force N'
- du couple NN'', de bras de levier D (le moment d'évolution) sensiblement égal à $N \times L/2 \cos i$, d'où:

$$Me = \frac{K \cdot L/2 \cdot SV^2 \sin i \cos i}{(0,2 + 0,3 \sin i)}$$

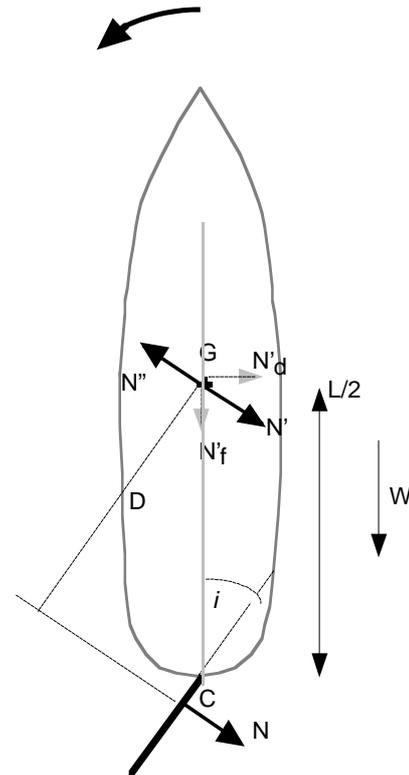
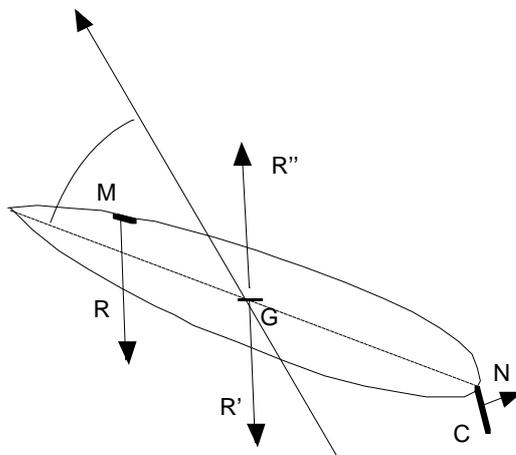
La force N' reportée en G peut se décomposer selon deux directions perpendiculaires:

- la force de dérive N'd, perpendiculaire à l'axe du navire;
- la force de résistance N'f dirigée selon l'axe du navire.

Le navire aura tendance à sortir de sa courbe de giration vers l'extérieur et à ralentir.

L'action la plus importante sur le navire est due au couple Nd qui crée le moment de giration Nx D, qui fait pivoter le navire autour de son centre de gravité alors qu'il se dirige toujours dans la même direction: il se déplace alors en MARCHÉ OBLIQUE. C'est parce que le navire se déplace en marche oblique que sa trajectoire s'incurve du côté où l'on a mis la barre.

Le moment de giration, si le safran était mince, parfaitement lisse et rectangulaire varierait comme $\sin i \cos i$, c'est à dire qu'il aurait un maximum pour $i = 36^\circ$.



LA GIRATION

Le navire a une vitesse uniforme et un cap stable.

La giration est le mouvement effectué par le navire et résultant de la mise en action du gouvernail.

Cette giration se décompose en trois phases:

- La phase de manoeuvre: augmentation de l'angle de barre ;
- la phase d'évolution: mouvement de rotation accélérée;
- la phase de giration: mouvement de rotation uniforme.

LA PHASE DE MANOEUVRE (mise en angle du gouvernail)

La force N va s'exercer sur le gouvernail. L'action de N se décompose en N' au centre de gravité: $N' = N'd + N'f$.

Si l'on oriente le gouvernail sur la gauche, le centre de gravité va sous l'action de $N'd$ s'écarter d'abord de sa trajectoire vers le coté opposé, c'est à dire sur la droite.

Le couple NN'' va faire pivoter le navire sur la gauche.

La composante $N'f$ va ralentir le navire.

Sous l'effet du couple NN'' , dans le plan transversal, le navire s'incline du bord où l'on a mis la barre: il salue.

PHASE D'EVOLUTION

Le navire avance en tournant: Il avance en marche oblique, donc la résistance de carène, R , à la marche oblique va s'exercer en augmentant l'effet du couple d'évolution et en augmentant le ralentissement (le couple RR'' est appelé couple de giration). Il y a donc accélération de la rotation et ralentissement du navire.

La composante $R'd$ dirigée dans la direction de la rotation va s'accroître et l'emporter sur la composante de dérive $N'd$: le navire va dériver sur la droite.

Dans le plan transversal, la résistance à la marche oblique crée un couple qui incline le navire du bord opposé à la rotation, car il est rapidement supérieur à l'effet de $N'd$ provoquant le salut.

Remarque: si le navire s'incline dangereusement vers l'extérieur du virage, la seule solution consiste à réduire a vitesse; la remise à zéro de la barre ne peut qu'augmenter l'angle de gîte.

Plus l'angle de dérive augmente, plus le point d'application de la résistance à la marche oblique va se déplacer sur l'arrière, réduisant ainsi l'effet du couple RR'' jusqu'à ce qu'un équilibre s'établisse entre les forces en présence et que la vitesse de rotation se stabilise.

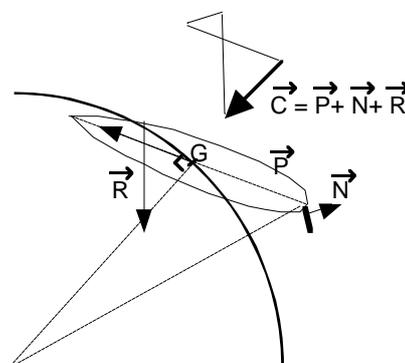
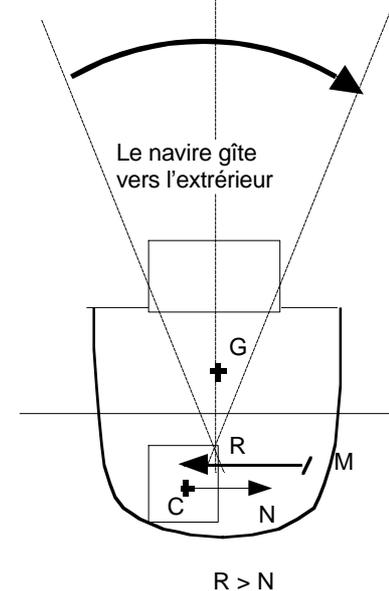
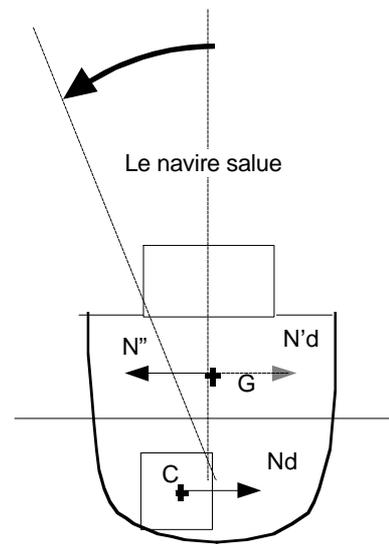
PHASE DE GIRATION

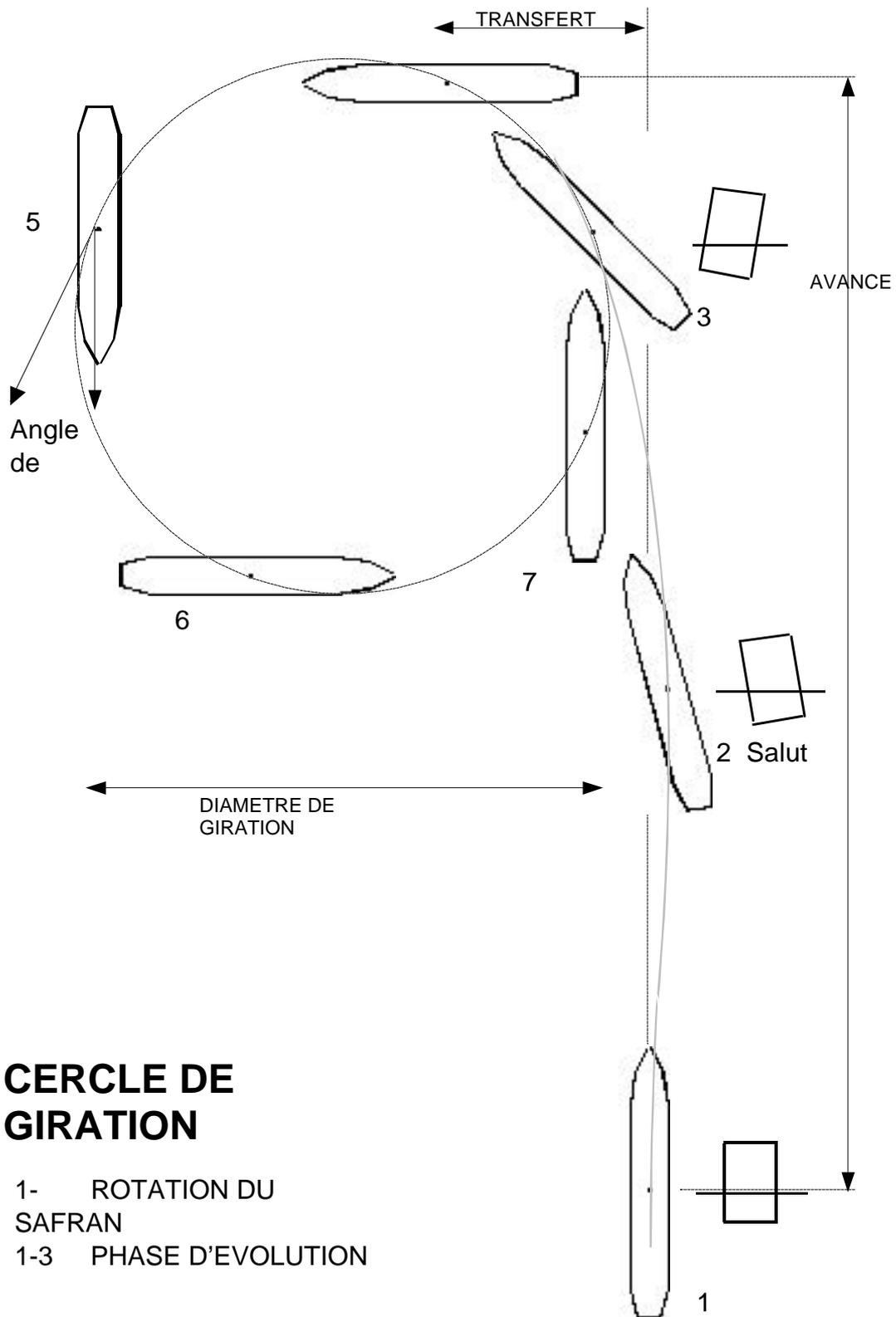
Lorsque la résultante des moments des forces passant par G devient constante et la résultante des forces appliquées est constante et est dirigée vers le centre de giration, le système est en équilibre et la vitesse devient constante: le mouvement de rotation est circulaire et uniforme et le navire est incliné d'un angle α à l'intérieur de sa trajectoire.

Les forces qui s'exerce sur le navire sont alors:

- P la propulsion;
- N la résistance du gouvernail;
- R la résistance à la marche oblique
- C la force centrifuge (somme des force précédente).

Pendant la période de giration, le centre de gravité du navire se déplace sur un cercle. La vitesse s'est stabilisée.





CERCLE DE GIRATION

- 1- ROTATION DU SAFRAN
- 1-3 PHASE D'EVOLUTION

CARACTERISTIQUES EVOLUTIVES

L'AVANCE : c'est la distance parcourue selon l'axe initial du navire pour que celui-ci évolue de 90°.

LE TRANSFERT : c'est la distance entre l'axe initial du navire et sa position après une évolution de 90°.

DIAMETRE TACTIQUE : c'est la distance nécessaire pour que le navire évolue de 180°.

DIAMETRE DE GIRATION: diamètre du cercle que parcourt le centre de gravité du navire pendant sa giration.

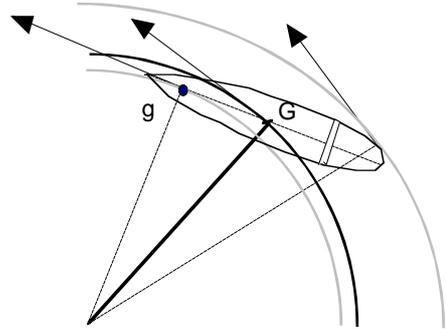
REMARQUE

Le diamètre de giration est en général à peu près égal à 3 fois la longueur du navire (pour 35° de barre).

Pour un navire à une hélice, pas d'hélice à droite, le rayon de giration sur la gauche est plus court que sur la droite.

En giration le navire se déplace avec un angle de dérive par rapport à la trajectoire du centre de gravité: l'avant du navire est à l'intérieur du cercle alors que l'arrière est à l'extérieur.

Le pied de la perpendiculaire abaissée du centre du cercle de giration O sur l'axe du navire est le Point GIRATOIRE g: c'est le seul point de l'axe longitudinal du navire dont la trajectoire est tangente à cet axe. Il est situé à environ 1/3 de la longueur sur l'avant.



INFLUENCE DE L' INERTIE

Le rayon de giration varie avec le moment d'inertie du navire (la répartition des poids à bord dans le sens longitudinal).

INFLUENCE DE L'ASSIETTE

Plus le navire est sur le cul, plus la giration sera courte.

INFLUENCE DE LA HAUTEUR D'EAU

Hauteur d'eau sous la quille: le navire effectue sa courbe en "dérapant sur l'eau". Une partie de l'eau passe sous la coque: si la hauteur d'eau est réduite, l'eau aura du mal à s'écouler et le rayon de giration sera plus important.

INFLUENCE DES FORMES

Plus le navire aura des formes arrondies, plus il tournera court.

INFLUENCE DU VENT SUR LA GIRATION

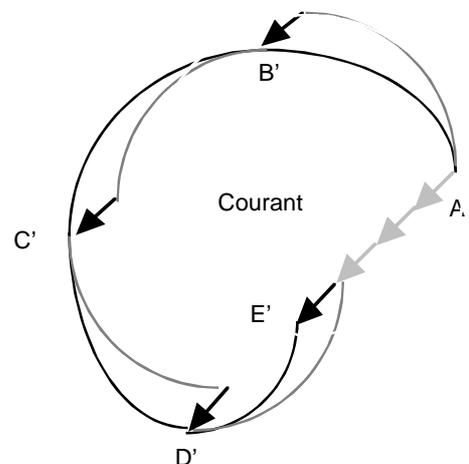
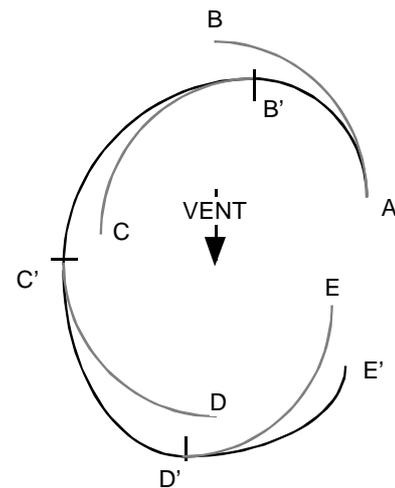
Le navire dérive pendant toute la giration;

Vent debout en début de giration:

- de a à b': l'abattée est plus rapide;
- de b' à c': l'abattée est plus lente;
- de c' à d': l'auloffée est plus rapide;
- de d' à e': l'auloffée est plus lente.

INFLUENCE DU COURANT SUR LA COURBE DE GIRATION

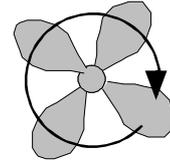
Les point b',c',d' et e' sont déportés en fonction du temps dans la même direction: celle du courant.



L'HELICE

Considérons une hélice à deux pales, pas à droite, tournant à la vitesse angulaire ω , O le centre du moyeu, Ox, Oy et Oz trois axes liés au navire.

Une hélice pas à droite tourne, en marche avant, pour un observateur placé derrière, dans le sens des aiguilles d'une montre.



Hélice pas à droite, tournant en marche avant, vue de l'arrière

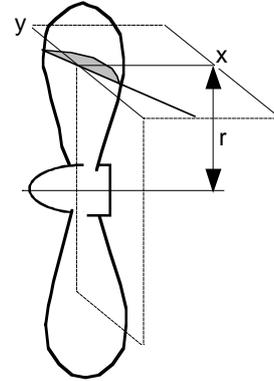
Force motrice

Assimilons une surface élémentaire d'une pale à un plan mince; il se trouve à la distance r du moyeu.

Soit v la vitesse relative de cet élément ($v = r\omega$);

V la vitesse d'entraînement ou la vitesse du navire;

et w la vitesse absolue faisant un angle α avec le plan transversal Oyz.

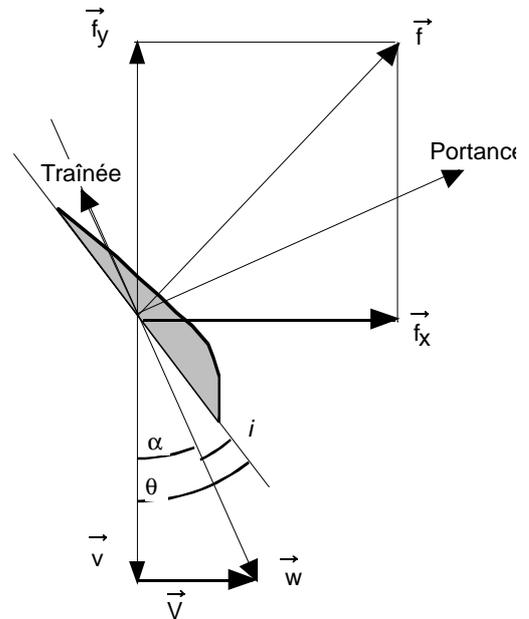


Pour que ce plan mince reçoive une poussée de l'eau dirigée vers l'avant, il faut que son incidence i par rapport à w soit orientée vers l'avant. Son orientation avec le plan transversal est le calage: $\theta = \alpha + i$.

Remarque: v diminue avec r ($v = \omega r$). Comme V est uniforme, α augmente lorsque l'élément de surface se rapproche de O. Pour maintenir une incidence i orientée vers l'avant tout le long de la pale, il faut augmenter le calage θ en se rapprochant du moyeu: la surface de la pale est un plan gauche.

Soit f la force motrice élémentaire exercée par l'eau: elle a une composante de traînée opposée à w et une composante de portance normale à w ou encore une composante f_x vers l'avant et une composante f_{yz} dans le plan transversal.

La force motrice F développée par l'hélice est la résultante de toutes les forces f_x (parallèles à Ox).



COUPLE RESISTANT

La composante f_{yz} est toujours dirigée en arrière du mouvement de rotation: c'est une force résistante qui a pour moment: $m = f_{yz} r$.

PAS D'UNE HELICE

Le pas théorique d'une hélice, c'est la distance H que parcourt un profil théorique situé à une distance moyenne r du moyeu après un tour complet de l'hélice.

$$H = 2\pi r \tan \alpha$$

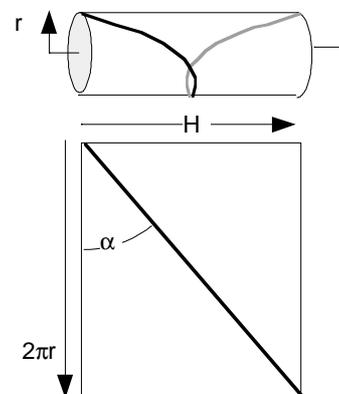
AVANCE GEOMETRIQUE PAR TOUR

Si V est la vitesse du navire en mètre par seconde et n le nombre de tours par seconde de l'hélice, l'avance géométrique est:

$$a = V/n$$

RECU DE L'HELICE

C'est la différence entre le pas et l'avance par tour: $R = H - a$



EFFET EVOLUTIF DE L'HELICE

Si l'hélice tournait dans un milieu uniforme, le couple résistant s'appliquerait au centre du moyeu.

Mais les pressions hydrostatiques augmentent linéairement avec la profondeur. Les forces élémentaires f augmentent donc proportionnellement avec leur enfoncement.

Soit f_1 et f_2 les composantes résistantes de chacune des pales dans le plan Oyz d'une hélice pas à droite tournant en marche avant.

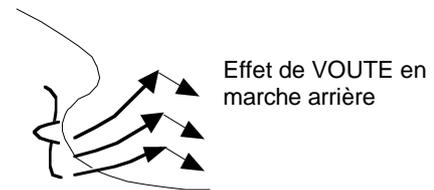
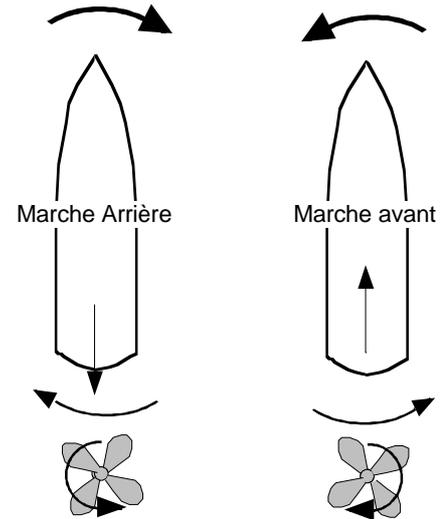
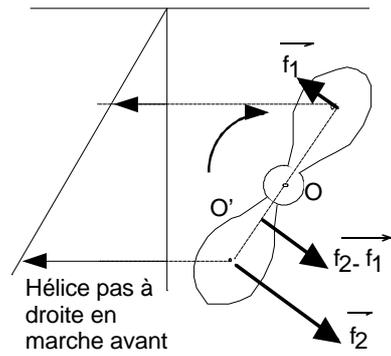
La résultante de ces 2 forces F est non nulle, appliquée en O' toujours situé sous O et toujours dirigée vers la droite.

Comme cette force est sur l'arrière du centre de gravité, il en résulte un effet évolutif du navire sur la gauche pendant la marche avant (pour une hélice pas à droite).

Un raisonnement analogue pour la marche arrière conduit à un effet évolutif sur la droite.

L'expérience montre que l'effet évolutif en marche arrière est bien plus puissant que l'effet évolutif en marche avant.

Cela est dû au fait que l'eau projetée vers l'avant par l'hélice en marche arrière vient frapper la hanche tribord du navire (effet de voûte). Cela ne se produit pas en marche avant où les filets d'eau s'éloignent de la coque.



NAVIRE A UNE HELICE A PAS FIXE

Dans ce cas, une hélice "pas à droite" est toujours adoptée. En marche arrière, un navire à une hélice évolue sur la droite.

NAVIRE A UNE HELICE A PAS REVERSIBLE

A noter que dans le cas particulier d'une hélice à pas réversible (qui tourne toujours dans le même sens), le navire évolue toujours sur la droite si l'hélice tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. C'est le montage préféré pour que le navire évolue, en marche arrière, comme un navire muni d'une hélice pas à droite.

NAVIRE A DEUX HELICES

Les deux hélice sont de pas contraire. De sorte qu'en marche avant ou en arrière à la même vitesse, leurs effets évolutifs s'annulent.

Deux montages sont possibles: des hélices supra-divergentes ou supra-convergentes en marche avant.

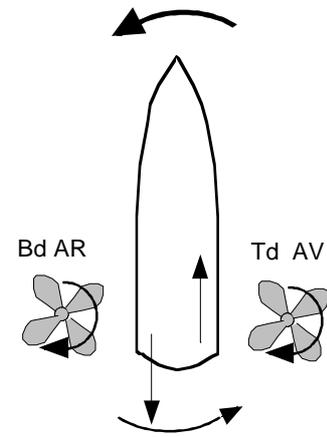
En cas de différenciation L'effet évolutif (une hélice en avant, l'autre en arrière), l'effet évolutif est contraire ou favorable à l'effet de propulsion.

Pour éviter sur bâbord, on met tribord en avant et bâbord en arrière d'où un couple sur bâbord.

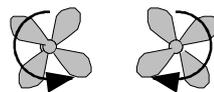
- Hélice supra-convergentes: l'effet évolutif de l'hélice tribord est à droite ainsi que l'effet évolutif de l'hélice bâbord. L'effet évolutif est contraire au couple de différenciation.

- Hélice supra-divergentes: l'effet évolutif de l'hélice tribord est à gauche ainsi que l'effet évolutif de l'hélice bâbord. L'effet évolutif s'ajoute au couple de différenciation.

C'est le montage à préférer.



Evitage sur la gauche d'un navire à deux hélices supra divergentes



Hélices supra divergentes

NAVIRE A TROIS HELICES

Dans ce cas, l'hélice centrale a un pas à droite et les latérales sont supra-divergentes.

APTITUDE DU NAVIRE A S'ARRETER

ARRET PAR INERTIE

Lorsqu'un navire fait route à un cap donné et à vitesse constante, la force de propulsion équilibre la force de résistance de carène. Si on stoppe la machine, la seule force extérieure qui agit est la résistance de carène (kSV^2). Elle diminue en même temps que la vitesse, équilibre la force d'inertie $M\dot{v}$ et absorbe l'énergie cinétique du navire $1/2MV^2$.

On admet que la distance de stoppage (x) et le temps de stoppage (t) ont pour formule:

$$x = -k \log \frac{V_0}{V} \quad t = k' \frac{1}{V} - \frac{1}{V_0}$$

avec V_0 étant la vitesse initiale.
 k et k' sont fonction du déplacement.

On remarque que pour que le navire soit sans erre ($V=0$), le temps de stoppage et la distance de stoppage sont infinis.

Or dans la pratique, le temps et la distance de stoppage tendent vers une limite finie.

Ces formules ne sont en fait valables que lorsque la vitesse a une certaine valeur. En effet il semble que la résistance de carène obéissent à des lois différentes aux faibles vitesses.

En fait le navire s'arrête après une distance plus ou moins longue suivant le déplacement du navire et la vitesse initiale.

Un 500000 tonnes à mi-charge, avec une vitesse initiale de 18 noeuds, a une distance d'arrêt de 15' en une heure.

Un 50 000 tonnes à pleine charge, avec une vitesse initiale de 8 noeuds a une distance d'arrêt de 4' en 1/2 heure.

ARRET EN BATTANT EN ARRIERE

Lorsque l'on met la machine en arrière, la force motrice en arrière s'ajoute à la résistance de carène: cela ralentit fortement la vitesse du navire.

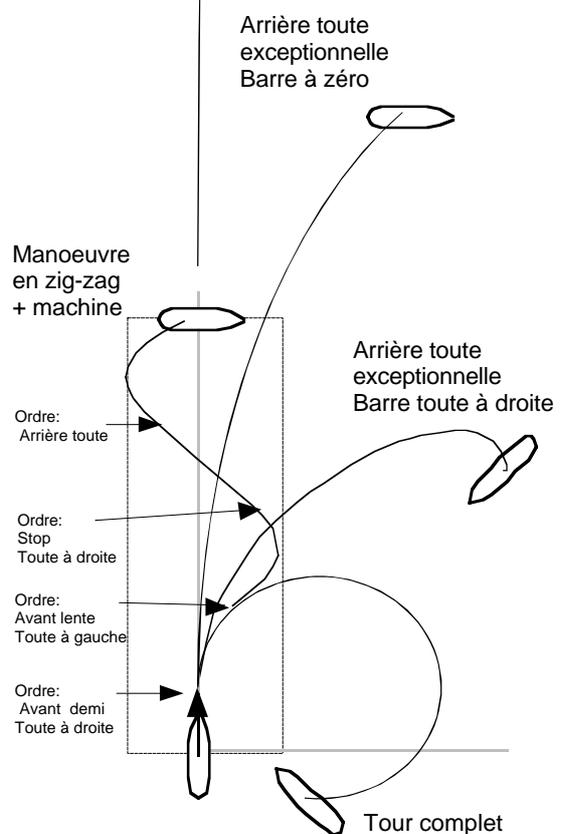
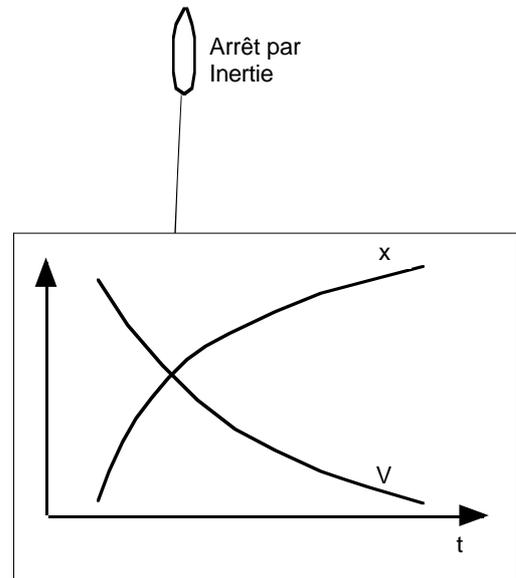
D'autre part l'effet de l'hélice en marche arrière est aussi à prendre en considération: un navire à une seule hélice pas à droite évolue sur la droite: il avance en marche oblique et sa résistance de carène augmente (plus grande surface résistante).

Cependant, sur les navires classiques (non automatisés), une telle manoeuvre demande un certain délai: passage de "route libre" à "attention machine".

Sur les navires automatisés, il y a une programmation de descente en allure et de mise en arrière. La manoeuvre "d'arrêt d'urgence" supprime cette programmation et permet de gagner du temps et de s'arrêter "plus court".

A noter que ce type de manoeuvre peut provoquer un certain nombre d'avaries machine plus ou moins importantes.

Le ralentissement est accentué si on met la barre toute à droite au début de la manoeuvre pour mettre le navire en travers.



MANOEUVRE EN ZIG ZAG

La manoeuvre en ZIG ZAG a pour but de connaître le temps de réponse du navire à la barre, la vitesse angulaire du gouvernail (δ) et la vitesse angulaire du navire (φ) en fonction de l'angle de barre.

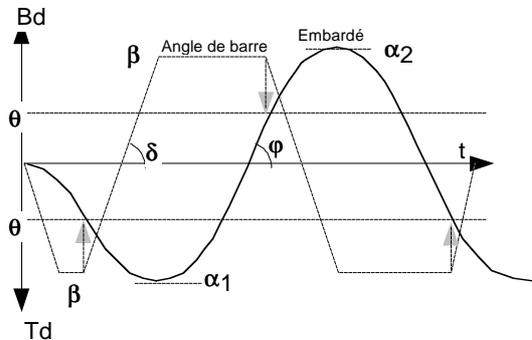
La barre est mise sur tribord par exemple à un angle β° . Après un temps de réponse, le navire commence son évolution, puis sa vitesse angulaire s'accélère. Lorsque le cap a varié de θ° , la barre est renversée jusqu'à β° sur bâbord. Le navire va atteindre par inertie un angle α_1 (l'embarquée maximum sur tribord) par rapport au cap initial, puis va évoluer sur bâbord.

Lorsque l'embarquée sur bâbord est de θ° , la barre est de nouveau inversée. Le navire va atteindre par inertie un angle α_2 (l'embarquée maximum sur bâbord) par rapport au cap initial, puis va évoluer sur tribord et ainsi de suite...

La courbe en trait continu indique la valeur de α en fonction du temps. φ est la vitesse angulaire du navire.

Il est aussi intéressant de noter la vitesse angulaire δ du safran et donc le temps nécessaire pour atteindre un angle de barre donné. δ varie en fonction du nombre de moteurs de barre en service.

La vitesse chute notablement à chaque renversement de barre

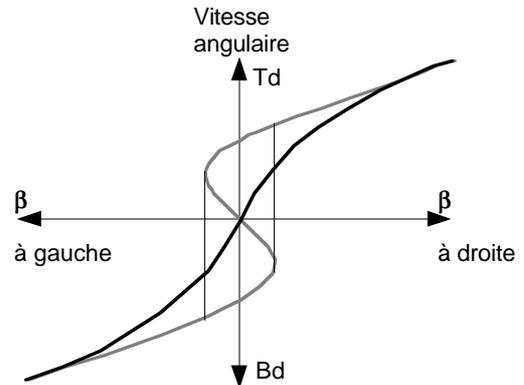


ESSAI SPIRALE

Il permet de tester la stabilité du navire.

On dit qu'un navire (courbe en trait plein) est stable lorsqu'à tout angle de barre, aussi petit soit-il, correspond une vitesse angulaire de même sens pour le navire.

Un navire est instable (courbe en pointillés) lorsqu'un angle de barre provoque une vitesse angulaire aléatoire: entre deux valeurs β° bâbord et β° tribord, la réponse du navire est incertaine. Il faut que l'angle de barre ait dépassé cette plage d'incertitude pour que le navire évolue dans le sens désiré.



CONCLUSION

Lorsque des circonstances exceptionnelles amènent à stopper le navire, la mise en arrière de la machine à toute puissance n'est pas la manoeuvre la meilleure: le chemin parcouru est encore important ainsi que le transfert pour un navire à une hélice.

L'orientation du gouvernail d'un bord ou de l'autre provoque une chute de vitesse notable. Il est donc avantageux de combiner l'action du gouvernail et de l'hélice pour obtenir un freinage plus efficace.

Si bien souvent il est préférable de se dérober en effectuant une giration (l'avance étant bien plus faible que la distance de stoppage), cela n'est pas toujours possible à cause de la présence d'autres navires ou de dangers.

La meilleure méthode consiste à combiner une manoeuvre en zigzag avec la manoeuvre de la machine: la zone balayée de part et d'autre de la route initiale a des dimensions minimales (avance et transfert).

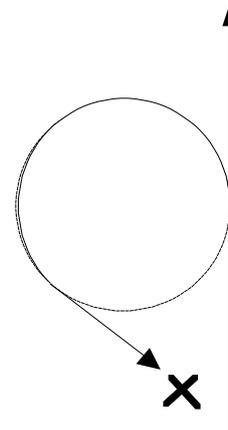
MANOEUVRE "UN HOMME A LA MER"

Il n'y a pas de manoeuvre plus urgente dont l'exécution exige la prévision de toutes les variantes en fonction des circonstances.

OPERATIONS INITIALES

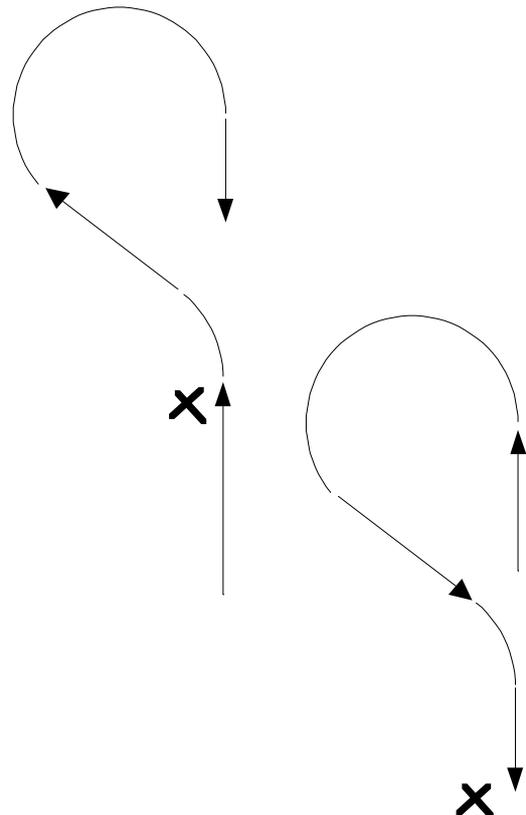
Dès que l'incident est observé ou annoncé:

- Mettre la barre tout du bord où l'homme est tombé à la mer. Cette manoeuvre a pour but de faire chasser l'arrière et d'éviter que l'homme soit aspiré par l'hélice ou passe dans les remous. Elle est illusoire si le navire est rapide, si le point de chute est près de l'arrière, si le temps de réponse de l'appareil à gouverner est long.
- Larguer une bouée couronne lumineuse (ou équipée d'un fumigène); elle sera le point de ralliement pour le naufragé et pour le navire; elle est plus repérable que la tête d'un nageur.
- Actionner le signal phonique prévu pour appeler l'équipe d'armement de l'embarcation chargée de la récupération (rôle de sécurité).
- Disposer une veille visuelle .
- Mettre la machine parée à manoeuvrer et commencer la descente en allure.
- Informer en phonie les navires du voisinage (URGENCE).
- choisir la manoeuvre de stoppage appropriée.



TOUR COMPLET

Amorcer un tour complet et prendre la direction de la bouée couronne après avoir effectué 3/4 de tour. Le stoppage final se fait en battant en arrière. Cette manoeuvre est effectuée si l'on est sûr de ne pas perdre la bouée couronne de vue.



BOUTAKOFF

Après avoir mis la barre du bord où l'homme est tombé, remettre la barre à zéro jusqu'à ce que le cap du navire évolue d'environ 70°, renverser la barre et venir au même angle de barre de l'autre bord (pas nécessairement barre toute). Avant que le cap inverse ne soit atteint, rencontrer puis mettre la barre à zéro pour suivre le cap inverse jusqu'à ce que la bouée soit en vue. Réduire alors la vitesse et casser l'erre. Cette manoeuvre permet de revenir sur sa route. Elle est toujours utilisée si la bouée a été perdue de vue.

SCHARNOW

Mettre la barre toute d'un bord puis renverser la barre lorsque le navire a dévié d'environ 240° par rapport à son cap initial puis suivre le cap inverse.

La descente en allure se fait se fait progressivement au cours de la manoeuvre.

Une fois le navire stoppé, une embarcation est mise à l'eau pour récupérer le naufragé.

MOUILLAGE

TENUE DE L'ANCRE SUR LE FOND

La tenue de l'ancre sur le fond dépend de la nature du sol et du pouvoir de pénétration de l'ancre qui est fonction de son poids, de sa forme, de la traction exercée, etc...

Nature du sol

Les sols sont caractérisés par leur angle de frottement interne φ qui est mesuré à partir de la verticale, leur granulométrie, leur indice de vide (eau absorbée), par la présence de végétation, etc...

Le sol n'est pas inerte et réagit à la pression: il se comporte comme un liquide plus ou moins compressible.

Bonne tenue: argile, vase dure, sable et vase;
 Tenue moyenne: sable, gravier, coquille brisée;
 Mauvaise tenue: roche, corail, vase liquide.

Equilibre d'une ancre

La pénétration de l'ancre dépend de son poids, des formes de la patte et de l'orientation et de l'importance de la traction exercée par la chaîne.

Il y a équilibre (et donc tenue) tant que la résistance du sol équilibre la traction.

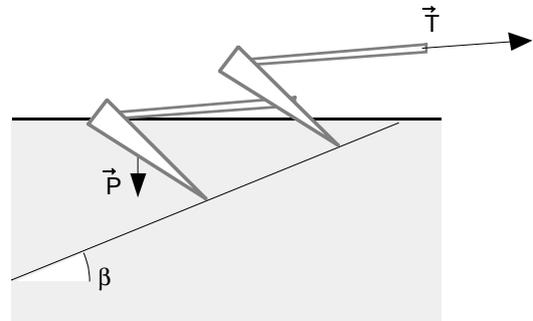
Dans le cas contraire, l'ancre va remonter le long du plan de cisaillement (refoulement) et se déchausser: l'ancre va draguer.

L'orientation β du plan de cisaillement, comptée à partir de l'horizontale, s'établit à partir de l'angle de frottement:

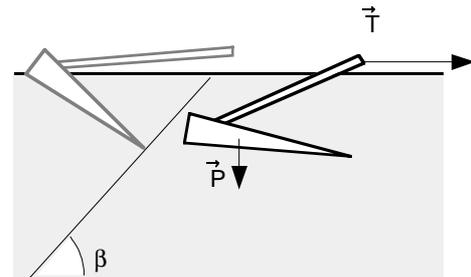
$$\beta = \pi/4 - \varphi/2$$

On dit que l'ancre chasse quand elle se déplace sans remonter. Une ancre bien conçue va crever le plan de cisaillement et s'enfouir (pénétration totale ou partielle de la verge): dans ce cas, la résistance à la traction devient très élevée (jusqu'à 150 fois son poids).

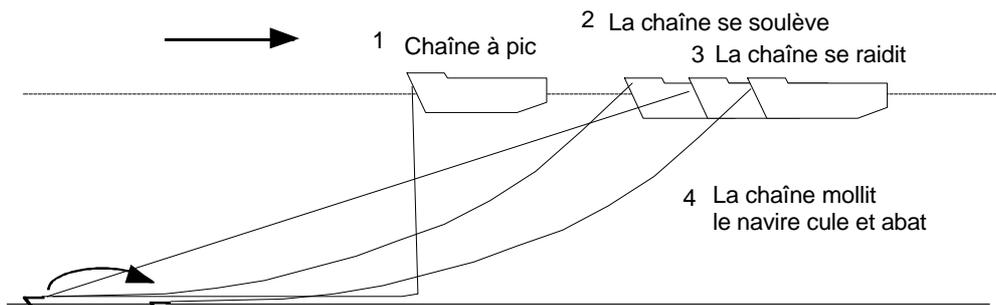
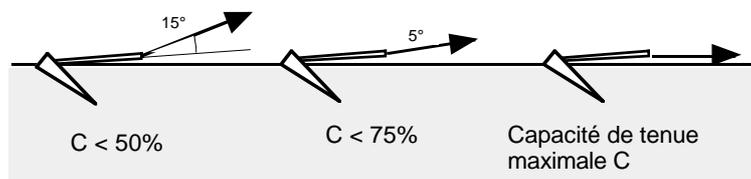
Lorsque la chaîne fait un angle non nul avec la verge, la résistance à la traction diminue fortement (50% avec un angle de 15° pour une ancre classique).



Refoulement



Enfouissement

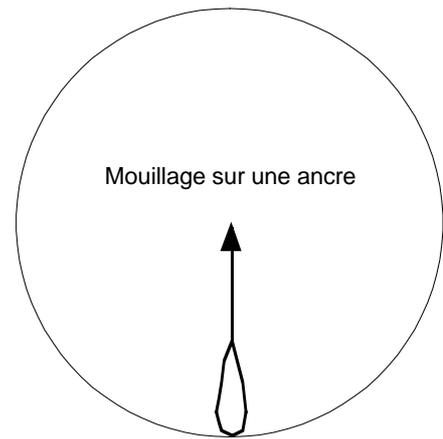


LES DIFFERENTS TYPES DE MOUILLAGE

MOUILLAGE SUR UNE ANCRE

Le mouillage sur une ancre est rapide; il est sûr car en cas de mauvais temps il suffit d'allonger la chaîne pour améliorer la tenue. Il permet d'éviter un abordage avec un navire qui chasse en filant la chaîne.

Cependant, le rayon d'évitage (longueur de chaîne plus longueur du navire) est important. Le champs d'évitage (l'espace balayé par le rayon d'évitage lorsque le navire évite) est toujours considérable pour un navire mouillé sur une ancre.



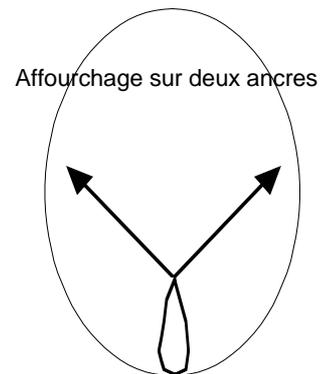
AFFOURCHAGE

Le but de l'affourchage et de réduire le champs d'évitage, ce qui peut être nécessaire sur une rade étroite ou encombrée.

L'opération consiste à mouiller deux ancres dont la distance est supérieure à chacune des longueurs de chaînes filées; ces longueurs étant généralement égales. L'angle qu'elles forment est compris entre 60 et 120°.

Dans la pratique, l'affourchage est très peu utilisé sur les navires de commerce, car il est nécessaire de prévoir un émerillon d'affourche pour éviter que les chaînes se croisent lors de l'évitage en rivière ou par vent variable.

A noter que l'affourchage n'est pas un mouillage de mauvais temps.



MOUILLAGE EN BARBE

La distance entre les deux ancres est faible par rapport aux longueurs de chaînes; les longueurs de chaînes sont généralement différentes et l'angle qu'elles forment est inférieur à 60°.

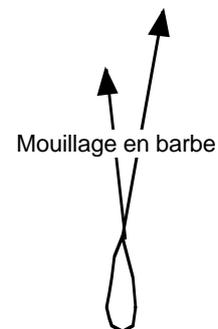
Chaque chaîne supporte la moitié de l'effort appliqué au navire. C'est uniquement un mouillage de mauvais temps.

Mais cette méthode a aussi ses inconvénients.

Si le navire embarde, chaque chaîne supporte alternativement la totalité de l'effort.

En cas d'évitage, on peut avoir des tours de chaînes.

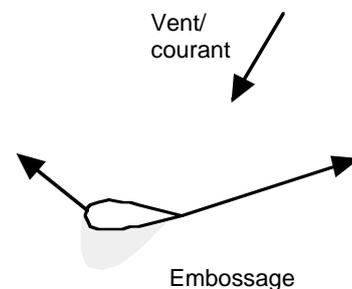
De plus la manoeuvre de mouillage est beaucoup plus longue.



EMBOSSAGE

Un navire est embossé lorsqu'il est évité dans une direction différente de celle qu'il prendrait sous le seul effet des forces extérieures. Cette méthode permet de travailler sur rade avec des chalands accostés à l'abri sous le vent.

Actuellement on embosse un navire en utilisant l'ancre de croupiat (quand il y en a une).



PRATIQUE DU MOUILLAGE

Choix du mouillage

Il doit offrir un bon abri contre la houle, le vent régnant et un fond de bonne tenue.

Choisir un fond avec peu de pente offrant une hauteur d'eau suffisante à toute heure de la marée.

Retenir un endroit qui présente de bons alignements et prévoir un deuxième point de mouillage pour le cas où le premier est déjà occupé.

Vitesse de mouillage

Pour faire crocher les pattes et éviter que la chaîne ne s'entasse sur l'ancre il est nécessaire d'avoir une certaine vitesse sur le fond (de quelques dixièmes de noeuds à 1 ou 2 noeuds selon les navires).

Une erre résiduelle en avant favorise la bonne prise de l'ancre mais sur les navires à bulbe il est préférable de mouiller avec de l'erre en arrière pour ne pas risquer d'étraver le bulbe.

Quantité de chaîne à filer

La règle pratique est de filer 3 fois la hauteur d'eau.

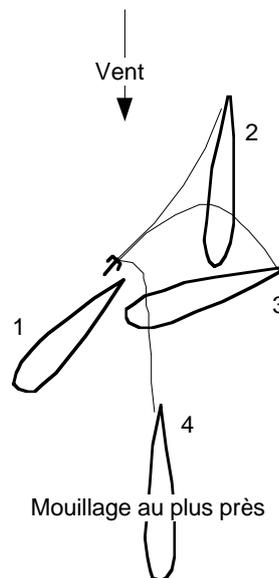
Par petits fonds, l'importance relative de la houle peut amener à filer 5 fois le fond.

De cette façon, il y aura toujours une certaine longueur de chaîne sur le fond et la traction exercée sera parallèle au fond. La longueur de chaîne s'appelle la "touée".

Lorsque le fond est faible (inférieur à 20 m), on mouille en desserrant sur le frein du guindeau, ce dernier étant débrayé.

Pour des fonds supérieurs, il convient de mouiller en dévirant le guindeau embrayé jusqu'à ce que l'ancre se trouve à quelques mètres du fond et de laisser filer (faire penaud).

On évite ainsi de faire supporter au guindeau des efforts excessifs. Par grand fond (plus de 60 mètres), la manoeuvre se fait totalement guindeau embrayé. Cela évite à l'ancre et à la chaîne de prendre une vitesse considérable qu'il sera impossible de retenir au frein.



MANOEUVRE DE MOUILLAGE

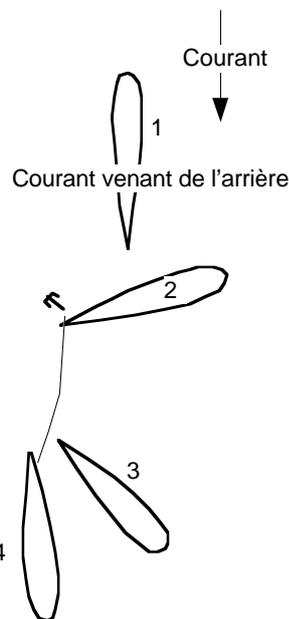
Sans vent ni courant

Approche avec une vitesse faible.

A proximité du point de mouillage, la machine est mise en arrière.

Le navire est pratiquement stoppé lorsque les remous de l'hélice arrivent au premier tiers arrière de la longueur du navire.

Donner alors l'ordre de mouiller.



Avec du vent

Se présenter au plus près.

Mouiller l'ancre au vent.

Laisser lofer le navire sans franchir le lit du vent.

Casser l'erre du navire en raidissant la chaîne et en battant en arrière.

Lorsque l'erre est cassée, stopper la machine: le navire cule et abat; la chaîne mollit, pend verticalement puis commence à raidir en raguant sur le fond.

Lorsque que la chaîne est complètement élongée, le navire fait tête sur la chaîne et évite debout au vent.

Avec du courant, la meilleure solution consiste à se présenter courant debout: on mouille avec de l'erre en arrière.

Avec du courant venant de l'arrière, casser l'erre en battant en arrière et mouiller l'ancre tribord (hélice pas à droite) avec de l'erre en avant. Si la chaîne force, battre en avant barre toute à droite pour faire éviter le navire.

ROLE DE L'OFFICIER

Il faut arriver au mouillage avec une vitesse réduite et les deux ancres parées à mouiller. Pour cela, prévenir en temps voulu la machine (selon degré d'automatisation du navire) et la bordée de mouillage avant.

Les essais des appareils sont faits (machine, sondeur, barre manuelle, liaisons avec la plage avant).

Repérez les alignements nécessaires et mouiller l'ancre au point choisi.

Régler la longueur de chaîne en fonction de la hauteur d'eau et des conditions météorologiques.

Attendre que la chaîne ait fait tête et que le navire ait évité pour faire dégager la bordée de mouillage et mettre la machine sur "terminé".

Eteindre les feux de route, disposer les feux de mouillage et de pont ou la marque de jour.

Prévenir la machine de l'heure d'appareillage.

Vérifier la tenue au mouillage.

SURVEILLANCE DU MOUILLAGE

Il faut pouvoir déterminer rapidement et à chaque instant si le navire se trouve toujours à son point de mouillage.

Choisir des amers appropriés et faire des points fréquents pour déceler tout changement de position (Trois relèvement/ deux alignement, distances radar, alarme sondeur).

Il faut surveiller le plan d'eau (trafic à proximité ou autres navires au mouillage), veiller les signaux éventuels (VHF, signaux optiques). Prévoir les renverses de courant et surveiller les conditions météorologiques (évitage).

Un navire qui chasse:

- la chaîne va se tendre et mollir brusquement par a-coups;
- le navire embarde;
- la position va changer.

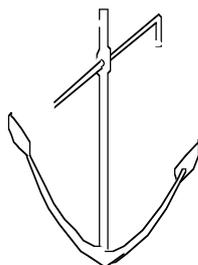
APPAREILLAGE D'UN NAVIRE MOUILLE SUR UNE ANCRE

La passerelle donne l'ordre à la manoeuvre avant de virer ou de virer à déraper.

Dans le premier cas, la chaîne est virée à long pic, c'est à dire qu'il en reste juste ce qu'il faut pour tenir le navire. L'équipe de manoeuvre marque alors un temps d'arrêt en attendant l'ordre de déraper.

Dans le deuxième cas, le guindeau continue de virer. La chaîne est à pic lorsqu'elle est verticale, les pattes de l'ancre encore crochées sur le fond: le guindeau subissant une forte résistance ralentit. Le dérapé se signale par une accélération du guindeau et un balancement de la chaîne.

En cas de difficulté à déraper, s'aider de la machine (guindeau sur frein).



MANOEUVRE AVANT : MOUILLAGE

- La nuit se munir d'une lampe torche puissante.
 - Vérifier les communications avec la passerelle
 - Faire mettre la pression ou le courant sur les guindeaux.
 - Vérifier que les freins sont serrés.
 - Débrayer les barbotins et balancer le guindeau.
 - Ouvrir les tapes d'écubier et le puits aux chaînes.
 - Préparer la marque de mouillage.
 - Embrayer les barbotins et desserrer les freins.
 - Dessaisir les ancres et dégager les stoppeurs.
 - Décoller les ancres des écubiers, mettre celle du bord prévu au raz-de-l'eau.
 - Serrez les freins et débrayer les barbotins.
 - Faire dégager la bordée de manoeuvre sur l'arrière du guindeau.
 - Faire capeler des lunettes de protection par l'homme qui est au frein.
 - Mouiller selon les ordres en desserrant le frein en grand.
 - Envoyer la marque de mouillage.
 - Indiquer à la passerelle la tension et la direction de la chaîne ainsi que le nombre de maillons qui a été filé.
 - Régler la touée selon les ordres (serrage du frein).
- Annoncer quand le navire a fait tête et vérifier le serrage du frein.

MANOEUVRE AVANT : APPAREILLAGE

- La nuit se munir d'une lampe torche puissante.
- Vérifier les communications avec la passerelle.
- Faire mettre la pression sur le collecteur de lavage des chaînes (cheval de lavage) et ouvrir la vanne.
- Embrayer le barbotin et desserrer le frein.
- Prévenir la passerelle que vous êtes paré à virer.
- virer sur ordre.
- Renseigner la passerelle sur la direction d'où vient la chaîne, sa tension et sa position (à long pic, à pic, dérapée, haute et claire, engagée).
- Amener la marque de mouillage quand l'ancre est dérapée.
- mettre l'ancre à poste sur ordre de la passerelle, engager les stoppeurs et saisir la chaîne.
- Prévenir la passerelle.
- Serrer le frein, débrayer le barbotin et isoler le guindeau.
- Isoler le collecteur de lavage.
- Mettre les tapes d'écubier et de puits aux chaînes.

L'AMARRAGE

Le rôle de l'amarrage est principalement de maintenir le navire à quai.

Selon le poste à quai, le navire est soumis aux effets du marnage, du courant, du vent et à ceux provoqués par le passage des autres navires.

Il est également utilisé pour l'accostage et l'appareillage.

DIFFERENTS TYPES D'AMARRES

Les amarres utilisées aujourd'hui sont des aussières en fibres synthétiques et des fils d'acier.

Leurs caractéristiques sont:

- la charge de rupture;
- l'allongement (selon longueur et diamètre);
- le poids (flottabilité);
- la maniabilité;
- la température de fusion (frottement);
- la résistance aux différents agents chimiques.

Les fils d'acier. Leurs caractéristiques de charge de rupture et d'allongement dépendent du nombre de torons, et de la nature de l'âme (acier / synthétique).

Ils sont d'une grande résistance mais d'une faible élasticité (0,5 à 1%); ils ne flottent pas, sont sujets à la corrosion et sont d'une manipulation difficile.

Les aussières en polypropylène sont les plus légères et les plus élastiques (Allongement jusqu'à 40% L). Elle fondent à 165°C.

Les aussières en térylène sont également très légères et maniables, elles fondent à 135°C et résistent très bien aux agents chimiques.

Les aussières en nylon sont très résistantes mais ne résistent pas aux produits chimiques.

A bord, les fils d'acier sont montés en permanence sur les tourets des treuils (tension constante) alors que les synthétiques du bord sont le plus souvent rangées en magasin et mises en place avant les manoeuvres.

DISPOSITION DE L'AMARRAGE

Les amarres de pointe et les gardes montantes stabilisent le navire le long du quai.

Les traversiers empêchent le navire de s'écarter.

Les amarres de pointe doivent rappeler franchement de l'avant ou de l'arrière. Il doit y en avoir au moins une, devant et derrière, passant par un chaumard coté large.

Une amarre de pointe est dite "embelle" quand elle est renvoyée sur un chaumard central à cause de bollards insuffisant sur le quai.

Les gardes montantes sont disposées le plus parallèlement possible au quai pour résister aux tensions longitudinales.

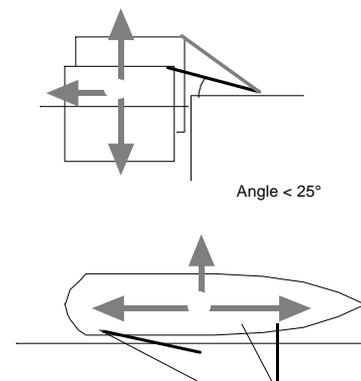
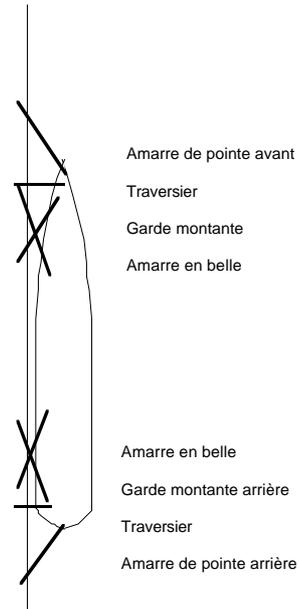
Les traversiers sont perpendiculaires à l'axe du navire pour résister aux tensions transversales.

L'efficacité d'une aussière dépend de sa longueur (résistance à l'allongement), de son angle par rapport aux axes (longitudinal et transversal) du navire et de l'angle par rapport à l'horizontale.

Trop raides, les amarres risquent de rompre, trop molles, elles assurent un mauvais maintien.

Charge de Rupture (48 mm)

Polypropylène	23 t
Térylène	32 t
Nylon	40 t
Acier (6X12)	70 t



LES DIFFERENTS TYPES D'AMARRAGES

ACCOSTAGE LE LONG D'UN QUAÏ

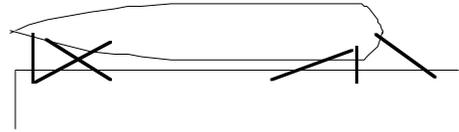
Le navire s'appuie sur le quai par l'intermédiaire de défenses.
L'amarrage est réalisée par des aussières capelées à terre sur des bollards.
L'ancre du large est quelquefois utilisée pour faciliter l'appareillage.



ACCOSTAGE A UN APPONTEMENT

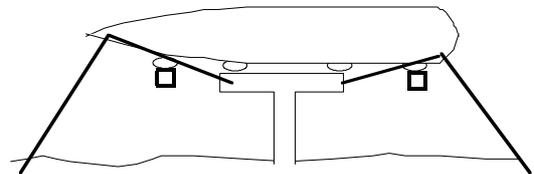
Les gardes montantes sont capelées sur les bollards de l'appontement. Les autres aussières sont capelées à terre ou sur des coffres. Le système est complétée par des amarres de poste (acier 60 mm + chaîne).
Sur l'appontement, les bollards peuvent être remplacés par des crocs largables.
Les extrémités du navire reposent sur des "ducs d'Albe" (faisceau de pieux enfoncés dans le fond du bassin).

Le navire subit les courants qui passent sous l'appontement.



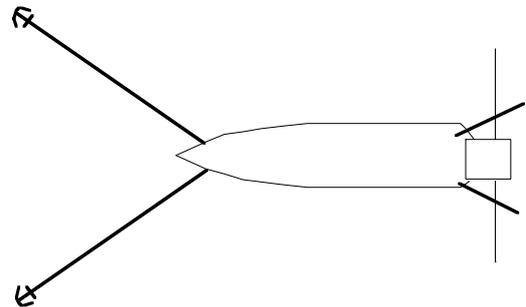
AMARRAGE EN POINTE

Le navire est amarré perpendiculairement à quai avec les deux ancres affourchées (Roulier avec rampes arrières).
La place occupée est réduite mais il peut y avoir des problème en cas de fort vent traversier.



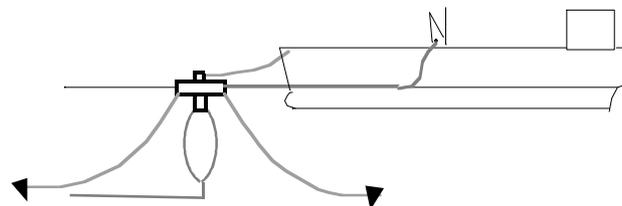
AMARRAGE A COUPLE

Ce type d'amarrage peut être réalisé entre deux pétroliers pour allègement.
Le navire accosté peut être à quai, au mouillage ou en route à faible vitesse. Certains navires sont équipés de défenses particulières grées sur bossoirs.



AMARRAGE EN UN POINT UNIQUE (SPM)

Il s'agit d'un amarrage par l'avant sur un coffre ou sur une tour destinée aux postes de chargement de pétrolier sur rade.



SPM système

ROLE DE L'OFFICIER DE MANOEUVRE

L'officier de manoeuvre doit se considérer comme le prolongement de la passerelle, il doit:

- exécuter les ordres reçus et rendre compte;
- informer la passerelle de ce qu'elle ne peut voir;
- assurer la sécurité du personnel sous ses ordres.

La bordée doit toujours être correctement équipée (tenue adéquate, gants).

Les moyens de communication doivent être testés avant l'appel aux postes.

Le rôle de chacun doit être précisé.

ACCOSTAGE

Mise en place de l'échelle de pilote (échelle, tireveilles, éclairage, bouée couronne).

Si le franc-bord est de plus de 9 m, l'échelle de coupée est gréée en association avec l'échelle de pilote.

Mise en place du matériel:

- aussières;
- toulines;
- bosses;
- défenses;
- gardes rats.

Mise sous tension de treuils et essais. Les ancrs sont déssaisies

Remorqueurs:

Le plus souvent, c'est la remorque du remorqueur qui est utilisée. Prévenir quand la remorque du remorqueur est tournée. Donner le nom du remorqueur.

Amarrage:

Envoyer les aussières aux lamaneurs sur ordre de la passerelle.

Prévenir la passerelle de la distance du quai ou des autres navires.

Prévenir la passerelle quand une aussière ou l'embarcation du lamanage est à proximité de l'hélice ou des propulseurs transversaux.

Raidir les aussières à la demande sans brider le navire.

Une fois le navire "à poste", bosser les aussières et tourner les aussières sur les bittes.

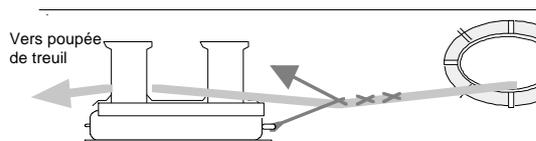
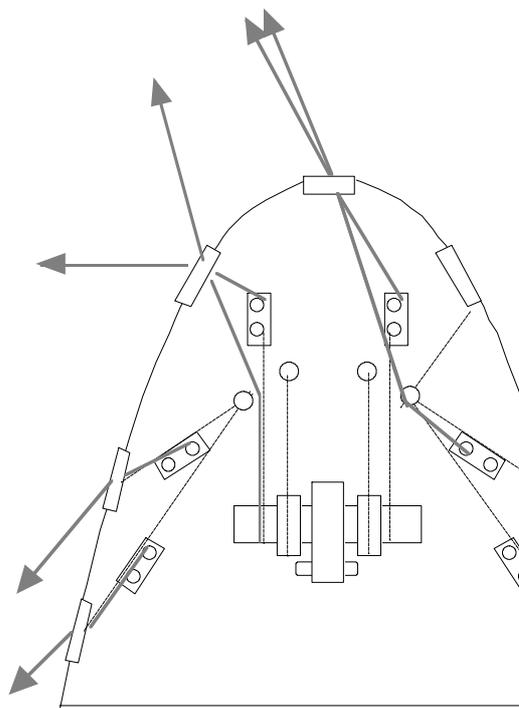
Le remorqueur est libéré.

Doubler les aussières si nécessaire.

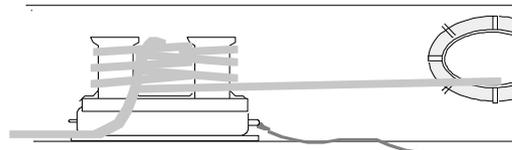
Selon le cas, les treuils sont mis sur "tension constante".

Mise en place des garde rats.

Mise en place de la coupée (filet de protection, éclairage).



Utilisation d'une bosse



Veiller à ce que personne ne mette les pieds dans une boucle d'aussière.

Ecarter le personnel des aussières qui forcent.