

Navires. Navigation. Balisage

par **Luc LEMOINE**

Ingénieur aux Chantiers de l'Atlantique

Guillaume LEYLDÉ

Ingénieur des Travaux Publics de l'État

Service Études Générales et Affaires Industrielles du Port Autonome de Nantes-Saint-Nazaire

et **Jean-Marcel PIETRI**

Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées

Délégué Général de l' Union des Ports Autonomes et des Chambres de Commerce et d'Industrie Maritimes (UPACCIM)

1. Navires	C 4 620 - 2
1.1 Différents types de navires	— 2
1.2 Caractéristiques particulières aux navires	— 2
1.3 Modes de propulsion des navires	— 3
1.3.1 Hélices et propulseurs spéciaux	— 3
1.3.2 Machines	— 4
1.3.3 Liaison hélice-moteur	— 4
1.4 Modes de construction des navires	— 4
1.5 Statique du navire	— 5
1.6 Dynamique du navire	— 6
1.6.1 Performances. Puissance. Vitesse	— 6
1.6.2 Manœuvrabilité	— 6
2. Navigation et signalisation	— 7
2.1 Navigation au large des côtes	— 7
2.1.1 Documents nautiques et choix de la route	— 7
2.1.2 Instruments de navigation	— 8
2.1.3 Aides radioélectriques	— 8
2.2 Navigation au voisinage des côtes	— 8
2.2.1 Signalisation	— 8
2.2.2 Balisage	— 8
2.2.3 Aides radioélectriques	— 9
3. Manœuvres dans les chenaux et dans les ports	— 9
3.1 Comportement d'un navire dans un chenal	— 9
3.1.1 Rayon des chenaux	— 9
3.1.2 Dérive. Largeur des chenaux	— 9
3.1.3 Mouvements verticaux	— 10
3.2 Distance d'arrêt et zone d'évitage	— 10
3.2.1 Arrêt	— 10
3.2.2 Évitage	— 10
3.3 Mouillage, accostage et amarrage	— 10
3.3.1 Mouillage	— 10
3.3.2 Accostage	— 12
3.3.3 Amarrage	— 12
3.3.4 Amarrage sur point unique	— 13
Pour en savoir plus	Doc. C 4 620

La recherche d'une bonne adéquation technique des navires à leurs missions et d'une productivité accrue, aussi bien à la mer qu'au port, se traduit par l'existence de nombreux types de bâtiments et par une évolution constante de ceux-ci.

Le présent article reprend des extraits de l'édition précédente rédigée par **Christian Brossier** et **André Graillet**.

1. Navires

1.1 Différents types de navires

■ Navires à passagers

Si les grands paquebots de lignes transocéaniques ont pratiquement disparu, ceux destinés à la croisière sont devenus plus nombreux.

Une autre catégorie de navire à passagers est constituée par les transbordeurs qui effectuent des trajets réguliers sur des distances courtes. Les plus répandus sont les car-ferries qui permettent, avec une manutention horizontale, le transport de voitures et de camions en même temps que celui des passagers.

Il existe également des trains-ferries.

Enfin, on commence à utiliser pour de très courtes traversées d'autres types de navires : catamarans légers, navires à effet de surface. Il s'agit, dans ce cas, de petits navires.

■ Navires à marchandises diverses traditionnels

Les marchandises sont arrimées dans les différentes cales, et manutentionnées verticalement soit par les mâts de charge ou bigues du navire, soit par les grues de quai du port.

Ces navires peuvent disposer d'installations spécifiques pour certains produits (fruits, viandes, grumes, etc.).

■ Navires pour unités de charge

Ce sont essentiellement soit des navires porte-conteneurs à manutention verticale (*lift on/lift off*) dont certains peuvent transporter plus de 3 000 conteneurs, soit des navires rouliers à manutention horizontale (*roll on/roll off*) transportant des camions, remorques, véhicules ou encore colis lourds sur essieux, soit des navires porte-barges qui manutentionnent eux-mêmes, par portique ou ascenseur, les barges. On peut citer également des navires mixtes, à la fois porte-conteneurs et rouliers.

■ Navires pour vrac solide

Ils ne comprennent pas de cloisons horizontales ; de larges ouvertures sont aménagées dans le pont, ce qui facilite la manutention du vrac transporté (le plus souvent : charbons, minerais, céréales).

Il existe des navires mixtes OBO (*Ore-Bulk-Oil*) qui peuvent charger soit du vrac solide, soit du pétrole, ce qui améliore leurs conditions d'exploitation, mais impose des contraintes supplémentaires à la construction pour des raisons de résistance de la coque.

■ Navires transporteurs de vrac liquide (hydrocarbures, vins, huiles, produits chimiques, gaz naturel ou de pétrole liquéfié)

Les navires pétroliers, qui constituent plus de la moitié de la flotte mondiale, couvrent une très large gamme de dimensions, puisque leur port en lourd varie entre quelques milliers de tonnes et 350 000 t.

Les navires pétroliers de 550 000 t construits dans les années 70 ont été, tout au moins en Europe, retirés du marché ; plusieurs d'entre eux ont été démolis. Il reste actuellement en service, de par le monde, quatre navires de plus de 500 000 t.

Les navires transporteurs de gaz utilisent des techniques cryogéniques ($-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour les méthanières) très sophistiquées. Les plus grands transporteurs de gaz naturel (GNL) ont une capacité de $135\,000\text{ m}^3$, mais des unités de $200\,000\text{ m}^3$ sont à l'étude (1992).

■ Navires divers

On peut citer les barges de mer tractées ou poussées, les navires de pêche, les unités de servitude ou de travaux, les navires de plaisance et les navires militaires.

Des nouveaux types de navires ont également été mis en service : des catamarans légers, des paquebots à voile.

À titre d'illustration, le tableau 1 donne les caractéristiques d'un certain nombre de navires en service en 1992.

1.2 Caractéristiques particulières aux navires

Les principales dimensions linéaires sont indiquées sur la figure 1. Ce sont la longueur hors tout *LHT*, la longueur entre perpendiculaires *LPP*, la largeur hors membres *B*, le creux *C*, la profondeur de carène *p*, les tirants d'eau avant *TAV* et arrière *TAR*.

Les dimensions de capacité les plus usuelles sont :

- le volume de la carène de référence *W*, volume de la partie immergée du navire sous la ligne de flottaison de référence ;
- le déplacement *D*, masse en tonnes du volume d'eau déplacé par la carène ;
- le port en lourd, exprimé en tonnes ou *tons dead-weight* (tdw), masse totale de la charge que le navire peut transporter ; la différence entre le déplacement et le port en lourd est appelé navire léger ;
- la jauge internationale exprimée en UMS (*Universal Measurement System*) est calculée à partir du volume fermé, soit total (jauge brute), soit utile pour les cargaisons (jauge nette), du navire ; il existe d'autres jauges (Suez, Panama ou règlements nationaux), exprimées en tonneaux.

L'architecture navale distingue souvent deux coefficients de forme :

- le rapport LPP/B , de l'ordre de 5 à 7, qui a une influence sur le comportement en marche du navire ;
- le *block coefficient* $CB = W/(LPP \cdot B \cdot p)$, pouvant varier de 0,55 à 0,85 et qui caractérise la finesse des formes de la carène.

Pour des raisons de sécurité et pour l'établissement des tarifs d'assurance maritime, des conventions internationales imposent la surveillance et le classement des navires, tout au long de leur vie active, par des sociétés de classification agréées (Bureau Veritas, Lloyd Register, Det Norske Veritas, par exemple).

Ces sociétés définissent également l'enfoncement maximal autorisé du navire, selon les saisons et les mers, enfoncement repéré sur la coque par des marques de franc-bord (figure 2).

Tableau 1 – Caractéristiques de navires en service en 1992

Type	Nom	Jauge (tjb) (1)	Port en lourd (tdw) (1)	Longueur (m)	Largeur (m)	Tirant d'eau (m)	Puissance (ch) (2)	Vitesse (n) (3)
Pétrolier	AGIP Lazio	127 069	254 659	348,93	51,87	20	38 600	14,5
Transporteur de GNL (4)	Edouard Ld	78 212	67 460	280,63	41,64	11,20	45 000	20,5
Transporteur de GPL (4)	Murray River	16 134	17 699	171,10	24,44	9,03	2 800	17
Transporteur de vrac solide	Adeline Delmas	23 275	33 504	176,21	30	10,5	7 340	14
Cargo	Arktis Sirius	1 829	2 671	79,57	13,47	5,18	1 018	11
Porte-conteneurs	Marchem Maersk	52 191	60 639	294,11	32,28	13,52	53 565	23
Navire roulier	Monte Cinto	13 977	3 400	136	22,5	6,4	1 181	18
Car-ferry	Bretagne	24 534	3 249	151,20	29,25	6,2	24 498	19,5
Paquebot	Star Princess	63 524	7 506	245,60	32,2	8,12	52 858	21
Transporteur de produits chimiques	Bunga Anggerik	18 453	29 500	172,20	26	11	9 890	15
Citernier à huile	Dakota	999	2 578	85	13	4,85	1 800	12

(1) tjb (tonneau de jauge brute). 1 tonneau = 2,83 m³.

tdw (ton dead-weight). 1 tdw = 1 t.

(2) On rappelle que 1 ch = 735,5 W (mais on s'efforce d'exprimer la puissance en kW).

(3) n (nœud). 1 n = 1 mille marin par heure = 1 852 m/h = 0,514 m/s.

(4) GNL : gaz naturel liquéfié. GPL : gaz de pétrole liquéfié.

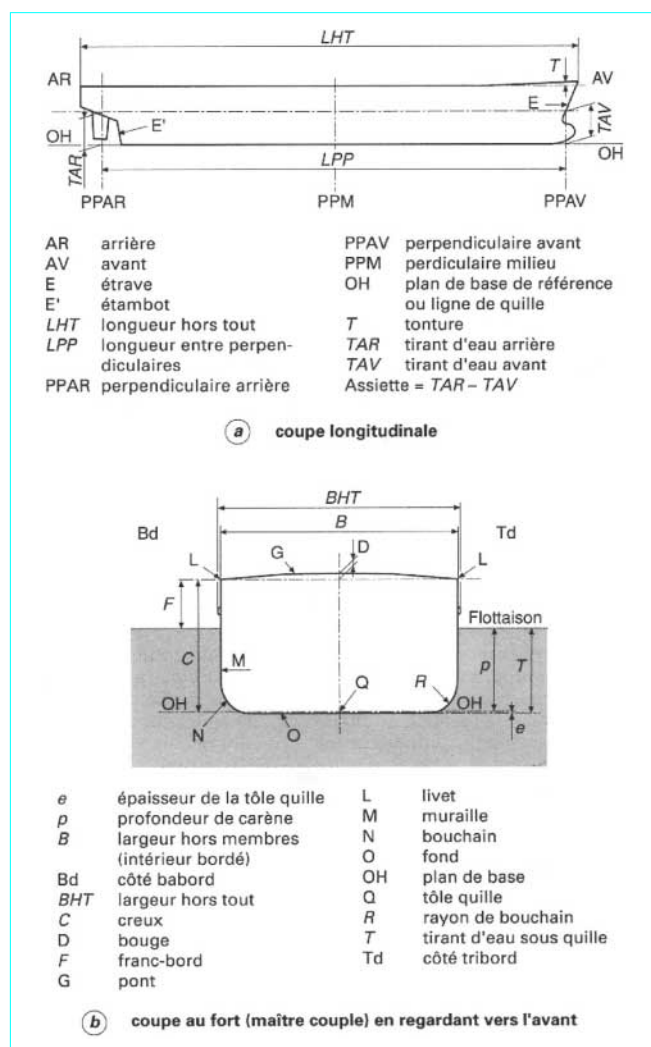


Figure 1 – Principales dimensions linéaires d'un navire

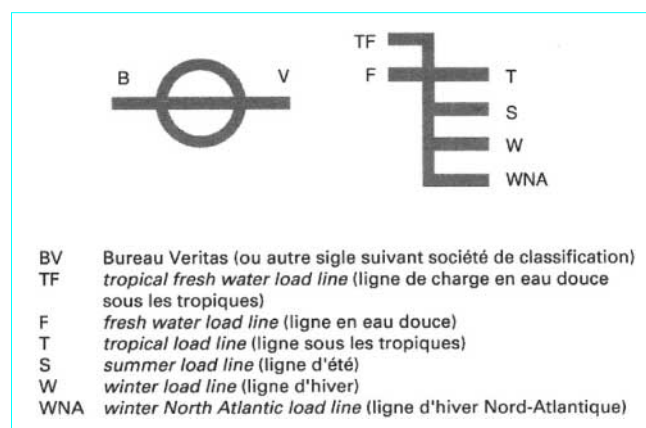


Figure 2 – Marques de franc-bord sur la coque du navire

1.3 Modes de propulsion des navires

1.3.1 Hélices et propulseurs spéciaux

Les hélices, qui sont moulées en bronze ou en acier inoxydable, peuvent être soit fabriquées d'une seule pièce, soit composées de pales boulonnées sur un moyeu. Dans les cas courants, leur vitesse de rotation est celle des moteurs Diesel lents (80 à 120 tr/min, mais pour les grands navires, l'optimum de vitesse de rotation diminue jusqu'à 50 tr/min et le diamètre augmente jusqu'à atteindre 10 m).

Pour des puissances inférieures à 25 000 kW, on peut utiliser des hélices à pales orientables, qui permettent d'adapter le pas au couple résistant sans modifier la vitesse de rotation du moteur.

Les engins de servitude (par exemple remorqueurs, dragues, engins de levage flottants) sont souvent équipés de dispositifs plus sophistiqués comme les systèmes Schottel, qui ont une hélice à axe horizontal orientable, ou le propulseur Voith Schneider, qui est constitué d'un plateau horizontal et circulaire sur lequel sont montées quatre à six pales verticales. Ces dispositifs donnent de bonnes qualités manœuvrières, mais au prix d'un rendement énergétique plus médiocre que celui d'une hélice classique.

On peut citer encore, pour les navires rapides, des propulseurs à réaction, par pompage de l'eau à forte pression et grand débit, et pour les aéroglisseurs, les hélices aériennes.

1.3.2 Machines

Les **moteurs Diesel** lents ont une vitesse de rotation comprise entre 50 et 180 tr/min. Leur puissance atteint jusqu'à 50 000 kW avec 12 cylindres en ligne pour une masse de l'ordre de 2 000 t. Ils consomment environ 165 g/(kW · h).

Les moteurs Diesel semi-rapides (400 à 700 tr/min) sont en expansion en raison de leur faible encombrement. On fabrique aujourd'hui des moteurs qui atteignent 22 000 kW avec 18 cylindres en V. Leur consommation de combustible est légèrement supérieure à celle des moteurs lents.

Les moteurs Diesel rapides (1 200 à 2 000 tr/min), consomment du gaz-oil et sont réservés aux faibles puissances (200 à 2 000 kW). Ils sont surtout utilisés pour les navires de pêche et pour les auxiliaires des navires de commerce.

Les **machines à vapeur** ne comprennent plus aujourd'hui que les turbines. Celles-ci tournent à vitesse élevée (8 000 tr/min) et couvrent la gamme des hautes puissances (8 000 à 50 000 kW). Elles consomment entre 270 et 300 g/kWh de fuel lourd et utilisent de la vapeur à 510 °C et 60 bar. Le principe de fonctionnement de la turbine ne permet pas d'inverser la marche, et c'est pourquoi l'on installe une turbine de marche arrière dont la puissance est le tiers de celle de marche avant.

On peut encore citer la **turbine à gaz**, d'un volume et d'une masse très réduits (15 t pour 45 000 kW) mais, en raison de sa forte consommation de fuel léger (240 g/kWh), son usage est limité à quelques navires porte-conteneurs, à des navires militaires et aux navires rapides.

La **propulsion dite nucléaire**, qui est utilisée dans le monde par plus de 200 navires, essentiellement militaires, n'est qu'une variante de la propulsion à vapeur.

1.3.3 Liaison hélice-moteur

L'accouplement hélice-moteur peut avoir lieu directement dans le cas de moteurs Diesel lents et d'hélices calculées pour tourner à la même vitesse. Dans les autres cas, on utilise, au-dessous de 2 000 kW un réducteur-inverseur mécanique et, au-dessus de 2 000 kW, des réducteurs mécaniques, avec ou sans accouplement en marche (électromagnétiques ou hydrauliques).

Dans certains cas, on peut mettre en œuvre le système moteur thermique - génératrice - moteur électrique (Diesel électrique), qui est très souple d'emploi mais qui donne un rendement global plus faible.

1.4 Modes de construction des navires

La structure d'un navire est soumise aux efforts résultant de la répartition des poids à bord (navire lui-même + chargement), et de la poussée hydrostatique. Il s'y ajoute les efforts dynamiques dus à la houle. La coque peut être assimilée à une poutre soumise à une répartition d'efforts tranchants, de moments fléchissants et de moments de torsion.

Les efforts à prendre en compte, ainsi que l'échantillonnage résultant (module d'inertie de la poutre navire) sont définis par le règlement de la société de classification.

On distingue deux types principaux de construction.

■ Système de construction transversale.

Le supportage des tôles de bordé est réalisé par des éléments transversaux appelés couples de construction, constitués d'un ensemble varangue, membrane, barrot (figure 3). L'espacement des couples est d'environ 0,70 m. Tous les 3 à 5 m, on dispose des couples renforcés, appelés porques.

■ Système de construction longitudinale.

Le supportage des tôles de bordé est réalisé par des éléments longitudinaux appelés lisses. Ces lisses sont appuyées sur des porques (figure 4).

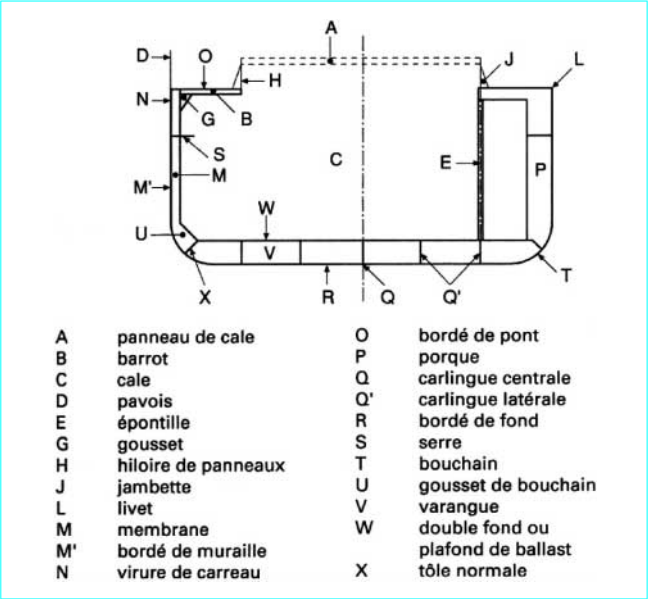


Figure 3 – Structure de la coque d'un navire : construction transversale

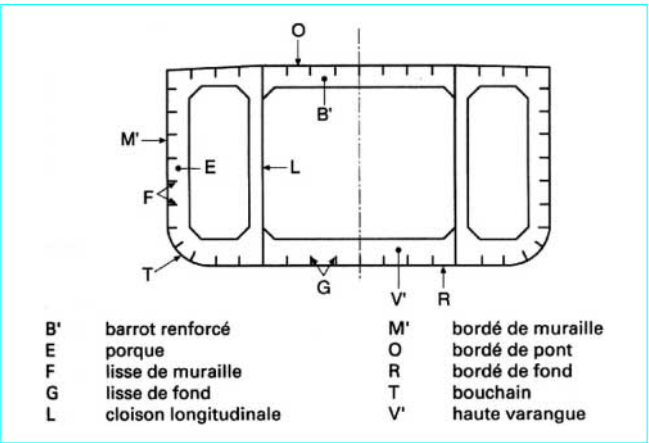


Figure 4 – Structure de la coque d'un navire : construction longitudinale

La construction transversale est plutôt réservée aux petits navires ou aux navires dont les formes et/ou les fonctions ne permettent pas de placer des lisses. Certains navires peuvent comporter des doubles coques, soit pour respecter un règlement (méthaniers, pétroliers), soit pour avoir une cale lisse (porte-conteneurs). Cette double coque offre également un volume de ballastage.

1.5 Statique du navire

Un navire de masse M est soumis à son poids Mg appliqué à son centre de gravité G et à la résultante des pressions hydrostatiques (poussée hydrostatique) égale au poids du liquide déplacé, appliquée au centre de carène C . Ces éléments hydrostatiques permettant de déterminer la poussée hydrostatique sont donc liés aux données suivantes :

- volume de carène sous la flottaison : V
- position du centre de carène : C
- Il y a équilibre hydrostatique si deux conditions sont remplies :
- le poids est égal à la poussée :

$$Mg = g \gamma V$$

avec g accélération due à la pesanteur,

- γ masse volumique du liquide ;
- le centre de gravité du navire est à la verticale du centre de carène.

■ Si l'on incline le navire autour d'un axe longitudinal à déplacement constant d'un angle de gîte θ , le centre de carène décrit une courbe C_0C_1 (figure 5a).

● Pour les petits angles de gîte ($\leq 10^\circ$), cette courbe est assimilable à un arc de cercle dont le rayon est appelé rayon métacentrique ρ .

Le centre de courbure M_t est appelé métacentre transversal. On a :

$$CM_t = \rho = I_t / V$$

avec I_t moment d'inertie de la surface de flottaison par rapport à l'axe longitudinal passant par le centre de surface.

L'équilibre est stable si le centre de gravité du navire est au-dessous du métacentre. La stabilité du navire aux petits angles est caractérisée par la distance GM_t , appelée hauteur métacentrique transversale encore égale à $\rho - a$ (a étant égal à la distance entre le centre de gravité et le centre de carène).

En ordre de grandeur ($\rho - a$) est compris entre 0,30 et 3 m ; il est de 2 m pour les paquebots et d'environ 0,50 m pour les porte-conteneurs. Mais, pour certains navires, il peut être supérieur à 3 m ; ainsi, les navires méthaniers ont un ($\rho - a$) de 4 m en charge et de 10 m sur ballast.

Si, dans un navire, une capacité à produit liquide (caisse à combustibles, cuve pour cargaison...) est partiellement remplie, cela introduit un effet de carène qui est défavorable pour la stabilité. Aux petits angles de gîte, tout se passe comme si le poids du liquide était appliqué au métacentre de la carène liquide. La hauteur métacentrique du navire est alors réduite de la quantité :

$$i \gamma / M$$

avec i moment d'inertie de la surface libre de la capacité par rapport à l'axe longitudinal passant par le centre de cette surface,

γ masse volumique du liquide contenu dans la capacité,

M masse totale du navire.

L'addition de cloison longitudinale dans les capacités permet de réduire beaucoup cet effet de carène liquide.

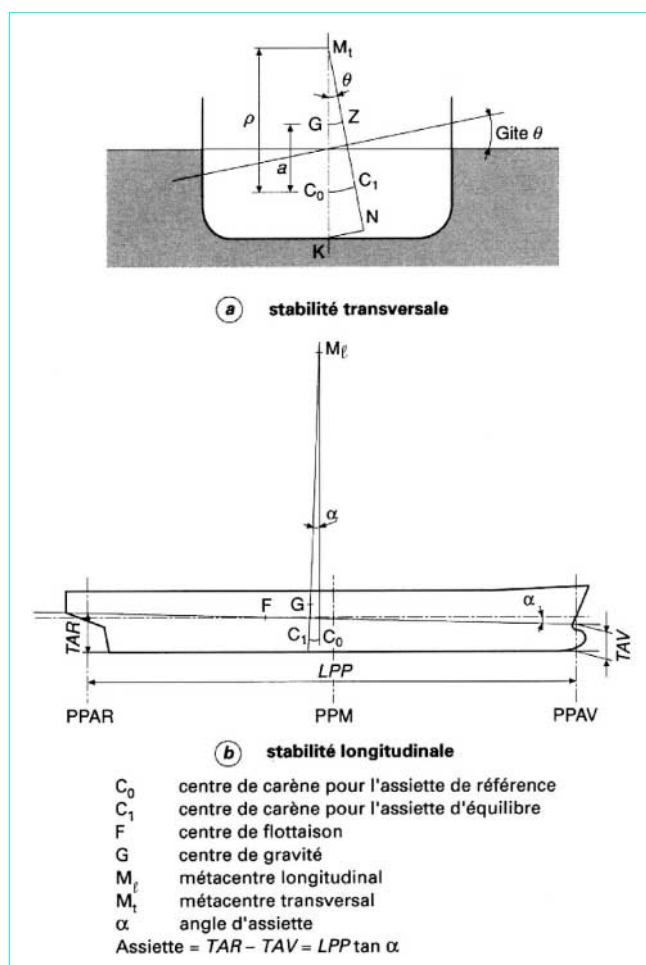


Figure 5 – Stabilité d'un navire

● Aux grands angles de gîte, la stabilité est caractérisée par le bras de levier de redressement du couple poids-poussée appelé GZ . On a la relation :

$$GZ = KN - KG \sin \theta$$

■ Pour une inclinaison autour d'un axe transversal, on définit de la même manière le métacentre longitudinal M_l et la hauteur métacentrique longitudinale GM_l , celle-ci étant de l'ordre de 1,5 à 2 fois la longueur du navire.

Conventionnellement, l'inclinaison longitudinale est mesurée par l'assiette qui est égale à la différence entre les tirants d'eau arrière et avant ($TAR - TAV$).

Les tirants d'eau arrière et avant sont mesurés aux perpendiculaires arrière et avant qui limitent conventionnellement la longueur de référence du navire.

Pour de petites variations d'assiette, l'intersection des flottaisons passe par le centre de surface F (figure 5b).

1.6 Dynamique du navire

1.6.1 Performances. Puissance. Vitesse

Un navire en mouvement relatif dans l'eau est soumis à une résistance de rencontre R_d , encore appelée résistance de vague, et à une résistance de frottement R_f de la forme $k' \Sigma V^{1,825}$, avec V vitesse du navire et Σ surface mouillée.

Si la vitesse V (en m/s) est inférieure à \sqrt{L} [avec L (m) : longueur du navire à la flottaison], on a $R_d < R_f$.

Si $V \approx 1,125 \sqrt{L}$, $R_d \approx R_f$.

Si $V > 2 \sqrt{L}$, $R_d \gg R_f$.

La poussée d'une hélice est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation et à la puissance quatrième de son diamètre. Le rendement de l'hélice croît lorsque son allure est plus lente et son diamètre plus grand. Le rendement maximal est de l'ordre de 0,6 à 0,7. Il est possible de l'augmenter en plaçant l'hélice dans une tuyère et en canalisant mieux les circulations de l'eau au voisinage de l'étrambot.

1.6.2 Manœuvrabilité

Le navire modifie son cap en orientant son gouvernail. On peut en améliorer les qualités évolutives par la mise en œuvre de plusieurs hélices ou par l'utilisation d'un propulseur transversal placé dans l'étrave (figure 6) ou encore en équipant le gouvernail d'un volet articulé.

Au cours d'une giration, le navire prend une dérive et balaie par conséquent une couronne circulaire d'une largeur supérieure à sa largeur propre (figure 7). Il prend, en outre, une gîte vers l'extérieur, qui peut atteindre 5 à 6°.

La qualité giratoire d'un navire se mesure notamment par le rapport D/L ou D/LPP du diamètre de giration à sa longueur. Le tableau 2 donne à ce sujet des résultantes d'essais relevées par Doerfer [1]. Le tableau 3 donne également des valeurs correspondant à des essais en mer effectués sur des navires construits par les Chantiers de l'Atlantique ; les essais de giration sont faits avec un angle de barre de 35° en général.

Tableau 2 – Qualités giratoires de navires (d'après [1])

Caractéristiques des navires			Cercle de giration			
Port en lourd	Vitesse	Longueur L	Translation		Diamètre de giration	
(tdw)	(n)	(m)	T	T/L	D	D/L
			(m)		(m)	
18 000	14,5	166	500	3,0	741	4,5
36 000	16,5	210	680	3,2	617	2,9
50 000	16,5	225	834	3,7	908	4,0
87 800	16,75	258	958	3,7	909	3,5
101 200	17,15	275	900	3,3	850	3,1
191 000	16,5	324	843	2,6	930	2,9
210 000	16,1	328	908	2,8	1 223	3,7

Pour des navires à un seul gouvernail, le rapport D/LPP est en général compris entre 2,5 et 5. Pour des navires à deux gouvernails, le rapport D/LPP peut être réduit à des valeurs comprises entre 1,5 et 4. En eaux peu profondes, le navire est évidemment moins manœuvrant.

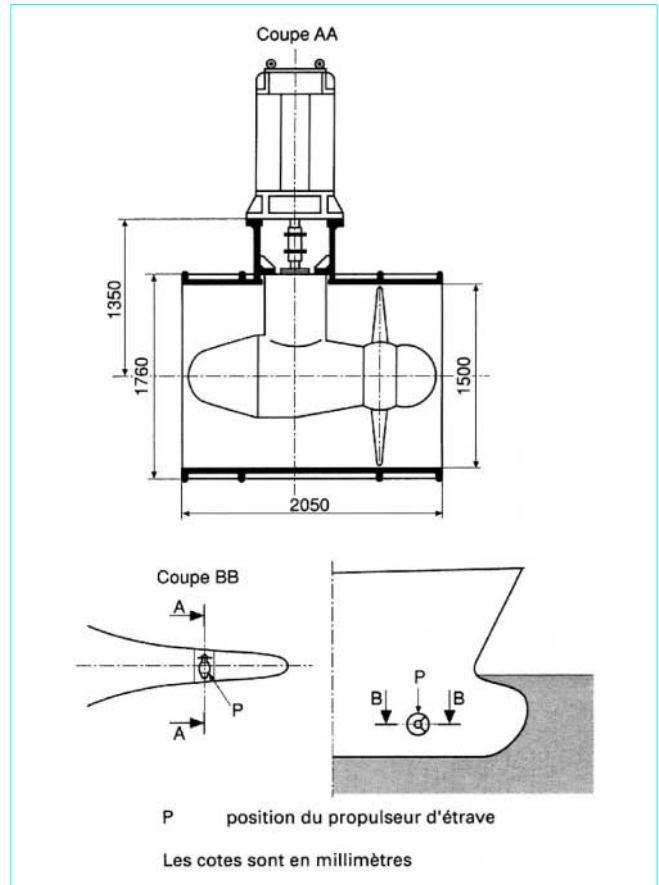


Figure 6 – Propulseur d'étrave de 500 ch

Certains navires, qui ont besoin d'être particulièrement manœuvrants (car-ferries, paquebots, dragues...) sont équipés de deux lignes d'arbre avec hélices à pales orientables.

Enfin, il convient de signaler que le pas de l'hélice a un effet sur le comportement du navire, car la pression qui s'exerce sur les pales varie avec la profondeur d'immersion. Il en résulte qu'avec une hélice ayant un pas à droite le navire tend à venir à babord en marche avant et à tribord en marche arrière (et inversement avec un pas à gauche).

L'arrêt d'un navire s'obtient par le renversement du sens de rotation de l'hélice lorsqu'elle est à pales fixes. L'opération peut être délicate.

Exemple : en effet, avec un moteur Diesel, il est nécessaire d'arrêter ce dernier, puis de le relancer en marche arrière avec du gaz comprimé, soit un délai de 30 s. La puissance en marche arrière est d'environ 80 % de celle en marche avant.

Dans le cas d'une turbine, il faut mettre en route la turbine pour marche arrière, soit un délai de 75 à 90 s. La puissance est de l'ordre de 40 % de celle de la turbine principale.

En outre, si l'on passe brutalement de *en avant toute* à *en arrière toute*, le navire n'est plus manœuvrant et son comportement est fortement désordonné et particulièrement sensible à l'action du vent et du courant.

Tableau 3 – Qualités giratoires de navires (essais sur navires des Chantiers de l'Atlantique)

Caractéristiques des navires				Caractéristiques des trajectoires					
Type de navire	Port en lourd (tdw)	Longueur LPP (m)	Vitesse (n)	Avance A (m)	A/LPP	Diamètre tactique DT (m)	DT/LPP	Diamètre de giration D (m)	D/LPP
Pétroliers	550 000	401	17	1 185	3,0	1 480	3,7	1 100	2,7
	260 000	343	16	800	2,3	1 000	2,9	950	2,8
	28 000	165	16	540	3,3	500	3,0	375	2,3
Porte-conteneurs	54 000	230	22	750	3,3	760	3,3	662	2,9
	32 000	175	18	637	3,6	538	3,1	428	2,4
	29 000	204	22	676	3,3	756	3,7	600	2,9
	25 000	173	21	525	3,0	625	3,6	500	2,9
Car-ferries	3 400	150	24	660	4,4	660	4,4	625	4,2
	3 200	133	20	440	3,3	465	3,5	497	3,1
Méthaniers	66 000	260	20	825	3,1	730	2,8	555	2,1
Paquebots	7 000	236	20	730	3,1	540	2,3	350	1,5

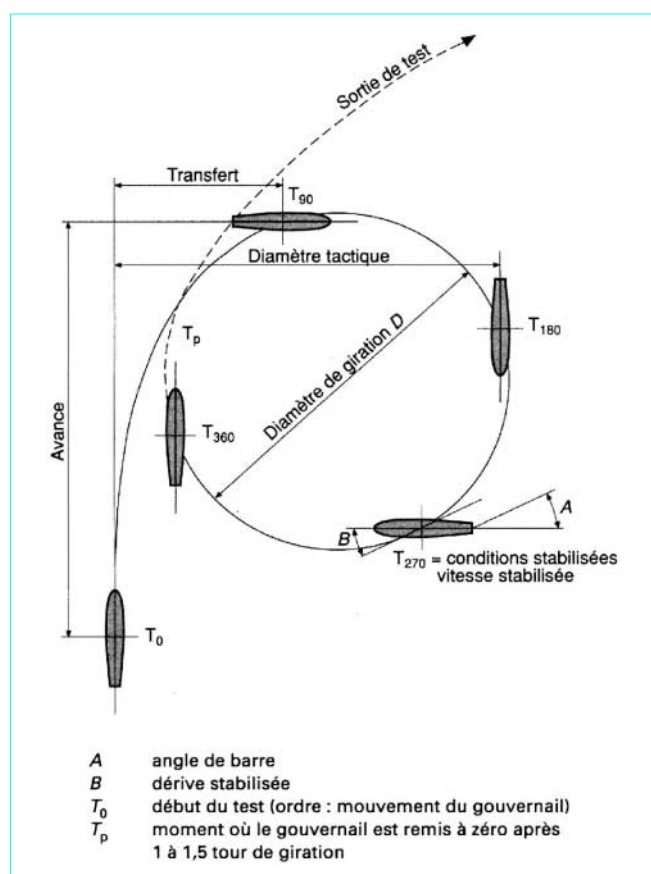


Figure 7 – Test de giration

Correctement mené, l'arrêt nécessite une longueur de 3 fois celle du navire. En cas de panne de moteur, la distance d'arrêt est de 11 à 14 fois la longueur du navire, pour une vitesse initiale de l'ordre de 15 nœuds.

Avec des moyens de propulsion spéciaux, la distance d'arrêt est beaucoup plus courte et, par exemple, égale à 1,5 fois la longueur du navire dans le cas d'une hélice à pas variable.

Dans la houle (article *Mouvements de la mer* [C 4 610]), un navire est soumis à des mouvements complexes que l'on peut décomposer en rotations autour des trois axes passant par le centre de gravité (dont le tangage et le roulis) et en déplacements de celui-ci le long de ces axes [2].

Il peut y avoir résonance et mouvements de grande amplitude quand la période de la houle vue par le navire est voisine d'une de ses périodes propres d'oscillation.

Pour des études précises de manœuvres de navire, il peut être fait appel à des modèles réduits à l'échelle 1/40 environ testés en bassin des carènes ou à des modèles mathématiques.

2. Navigation et signalisation

2.1 Navigation au large des côtes

2.1.1 Documents nautiques et choix de la route

Nota : on se reportera utilement à l'article *Topographie. Topométrie. Géodésie* [C 5 010] dans ce traité.

Les documents nautiques comprennent, outre les cartes marines, les instructions nautiques, les livres des feux et signaux de brume, les ouvrages de radiosignaux, les annuaires des marées, pour lesquels on se reportera aux publications du Service Hydrographique de la Marine [3].

Les cartes marines sont nécessaires pour déterminer et contrôler la route du navire. Elles sont établies en projection conforme, c'est-à-dire conservant les angles.

La *projection de Mercator* est effectuée sur un cylindre tangent à la terre le long de l'équateur ; elle introduit une distorsion des échelles en fonction de la latitude. La *projection stéréographique* consiste à faire une inversion de la sphère sur un plan tangent à un pôle à partir du pôle opposé.

Pour les levés hydrographiques au voisinage des côtes, on utilise la *projection Lambert* (projection sur un cône tangent le long d'un parallèle), la *projection de Gauss* (projection sur un cylindre tangent le long d'un parallèle) ou la *projection des côtes de France* (rabattement, sans correction, d'une triangulation côtière sur un plan tangent).

La route choisie peut être une *loxodromie*, à cap constant, c'est-à-dire faisant un angle constant avec les méridiens. C'est la plus facile à suivre avec un compas ou une boussole. En projection de Mercator, elle est représentée par une droite, mais ce n'est pas la route la plus courte, appelée *orthodromie*, qui suit un arc de grand cercle de la sphère terrestre.

2.1.2 Instruments de navigation

Les instruments les plus élémentaires sont le compas magnétique, le loch et le sondeur ; ils sont indispensables et suffisants pour effectuer l'estime en l'absence d'instruments électroniques plus sophistiqués. En navigation astronomique, on utilise le sextant et le chronomètre.

Les instruments modernes sont constitués des aides radioélectriques et des systèmes informatiques (système de pilotage automatique, cartes marines informatisées...). Les lochs et sondeurs sont, eux aussi, de plus en plus sophistiqués.

2.1.3 Aides radioélectriques

On peut citer le radiogoniomètre, le gyrocompas et le radar ainsi que les différents systèmes de radiolocalisation, à savoir : systèmes hyperboliques Oméga, Loran-C, Decca, Rana P 17, Toran ; système Transit et système GPS pour la navigation par satellite (article *Radio-localisation. Radionavigation* [E 6 600] dans le traité Télécoms).

Le gyrocompas remplace avantageusement le compas magnétique, qui reste cependant obligatoire sur tout navire.

Le radar, dont l'utilisation anticollision est primordiale, est aussi un bon moyen de localisation à l'approche des côtes.

2.2 Navigation au voisinage des côtes

Le procédé le plus simple consiste à se repérer par rapport à des *amers* dont la position est connue. On peut, par exemple, déterminer simultanément le relèvement de plusieurs amers en faisant intervenir l'arc capable sous lequel on voit un segment ayant pour extrémité deux amers.

2.2.1 Signalisation

Une aide tout aussi traditionnelle que le repérage par rapport à des amers est fournie par les signalisations optiques ou sonores.

■ Signalisations optiques

Les **phares** et **feux** sont le moyen le plus ancien de transmission d'informations pour guider les navigateurs et les prévenir des dangers topographiques (bancs, écueils, récifs, obstacles). Le relèvement d'un feu est précis, le fonctionnement sûr, mais son efficacité dépend fortement des conditions atmosphériques. Il existe dans le monde environ 75 000 feux, dont un feu tous les 4 km de côte en France, en moyenne.

Les feux sont classés d'après le rythme d'apparition de la lumière (fixes ou rythmés), la coloration de la lumière (blancs ou colorés) et leur répartition (isolés ou groupés).

Les feux blancs sont toujours rythmés. Les feux colorés balisant la route des navires ou signalant des obstacles sont rouges, verts ou violets, fixes ou rythmés.

La portée géographique Δ (figure 8) est déterminée par la courbure de la Terre et la réfraction qui augmente la portée rectiligne :

$$\Delta = \sqrt{(C+H)r \frac{2m}{m-1}} + \sqrt{hr \frac{2m}{m-1}}$$

avec r rayon de la Terre,

$C+H$ cote du feu par rapport à la mer,

$m = \frac{R}{r} = \frac{\text{rayon de courbure du rayon lumineux}}{\text{rayon de la Terre}}$

variant aléatoirement au cours d'une journée, de 2 à 20 selon l'indice de réfraction de l'atmosphère, en fonction de la densité de l'air,

h hauteur de l'observateur au-dessus de la mer.

En raison de la diffraction de la lumière, la lueur du feu est vue au-delà de la portée géographique.

La portée lumineuse dépend de l'intensité du feu, de l'absorption de la lumière par l'atmosphère, du seuil d'éclairement de l'œil humain ou du seuil de contraste sur un fond lumineux. Elle est déterminée par des abaques [19].

Les sources lumineuses sont des feux à gaz (butane, propane ou acétylène), des lampes à incandescence de 100 à 1 000 cd/cm² de luminance, des lampes à arcs atteignant 50 000 cd/cm², des lampes à décharge de xénon atteignant 60 000 cd/cm².

■ Signalisations sonores

Les signalisations sonores sont placées aux entrées du port et pour marquer certains points dangereux. Afin de mieux les identifier, on leur donne le même rythme que le signal optique associé. Elles sont constituées par des cloches de brume pour les faibles portées, des canons et pétards, des sifflets et trompettes, des sirènes et diaphragmes à air comprimé, des vibreurs électromagnétiques groupés par deux à une distance d'une demi-longueur d'onde, et qui ont une grande portée (1 à 2 milles marins).

2.2.2 Balisage

Les règles de balisage sont internationales et font appel au système combiné latéral et cardinal fixé par l'Association Internationale de Signalisation Maritime (AISM) et par l'Organisation Maritime Internationale OMI.

Le **balisage fixe** situé à terre est constitué, outre les phares, par la peinture des musoirs des jetées portuaires, des balises ou tourelles formant amers, des feux de rives de port, des plates-formes métalliques ou en béton portant des feux, des émetteurs radar dont l'action peut être renforcée par la présence de balises répondeuses à bord du navire.

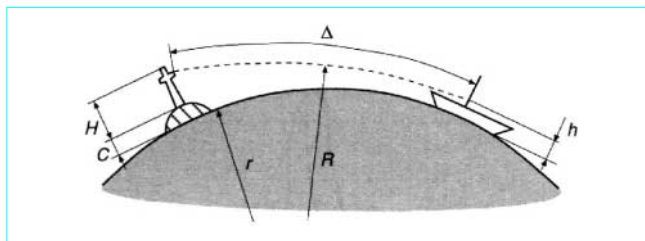


Figure 8 – Portée géographique d'un feu

Le **balisage flottant** peut être constitué par des bateaux ou des bouées.

De grande taille (environ 40 m), les **bateaux-feux** marquent des entrées de chenal, des bancs. Ils portent des signaux sonores, lumineux et radioélectriques. On a tendance à leur substituer des plates-formes métalliques ou en béton armé, qui requièrent moins de personnel.

Les **bouées**, lumineuses ou non, sont construites généralement en acier. Elles comportent un corps de bouée constitué par un réservoir de gaz ou un conteneur à batteries d'accumulateurs ou de piles, une superstructure couronnée par une tête de bouée où est installé le feu et éventuellement un réflecteur radar. Elles peuvent comporter aussi un signal sonore ou un système de radiophare.

Enfin, il existe des aides radioélectriques de types fort divers.

2.2.3 Aides radioélectriques

Les aides radioélectriques tendent à supplanter efficacement les aides traditionnelles (balisage fixe à terre, balisage flottant).

Le radiogoniomètre utilise la polarisation de l'aide électromagnétique à l'aide d'un cadre vertical tournant relié au récepteur à bord du navire. Il est de moins en moins employé et tend à être remplacé par le radar.

Il existe également des aides radioélectriques faisant appel à des balises à terre (Oméga, Loran-C, Sylédis Trident, Axyle...) ou à des satellites (Transit, GPS...) ; elles permettent non seulement l'aide à la navigation au long cours ou côtière, mais également, à partir d'adaptations spécifiques, l'aide au chenalage des navires dans les ports et les estuaires (Syléport) (article *Radiolocalisation. Radio-navigation* [E 6 600], dans le traité Télécoms).

3. Manœuvres dans les chenaux et dans les ports

On s'intéresse ici aux conditions d'évolution à l'entrée des ports.

Lorsqu'il arrive au voisinage d'un port, le navire s'arrête généralement pour attendre le pilote ou l'autorisation d'entrer au port. Il s'immobilise sur son ancre. Cette opération s'appelle le **mouillage**.

Lorsque le navire peut entrer au port, il quitte le mouillage et *engaine* le chenal d'accès au port. Après avoir remonté le chenal à une certaine vitesse, dont on verra l'intérêt ci-après, le navire doit *casser son erre*, voire s'arrêter dans l'avant-port pour être remorqué à son poste, éventuellement après avoir *évit*é, et il est ensuite *amar*ré au poste pour ses opérations.

3.1 Comportement d'un navire dans un chenal

Les chenaux des ports sont généralement étroits ; leur largeur est le plus souvent égale à la longueur du plus grand navire reçu ; ils sont en outre peu profonds, ce qui limite les qualités évolutives des navires. Ils peuvent être soumis à la houle, être parcourus par des courants, notamment ceux liés à la marée, et être balayés par des vents qui perturbent le comportement des navires.

3.1.1 Rayon des chenaux

On a donné (§ 1.6) des exemples de rayon de giration de navires en eau libre. On peut admettre que ces données restent valables tant que la profondeur d'eau excède le tirant d'eau de plus de 30 %, c'est-à-dire que le **pied de pilote** ou profondeur d'eau libre sous la quille est supérieur à 30 % du tirant d'eau du navire.

Généralement, le pied de pilote est de 15 % du tirant d'eau dans les zones exposées à la houle et de l'ordre de 10 % dans les zones abritées. Dans ce cas, on admet que les rayons de courbure doivent être le double des rayons de giration pour tenir compte des vents et des courants.

Un navire qui reçoit le courant de l'avant est maître de sa manœuvre, tandis qu'un navire qui reçoit le courant de l'arrière manœuvre mal.

3.1.2 Dérive. Largeur des chenaux

Sous l'action du vent et du courant, le navire prend un angle de dérive δ (figure 9).

Pour un navire en marche avant à vitesse V , propulsé par une force P , la vitesse apparente du vent V_a exerce sur le fardage (c'est-à-dire la surface de la partie émergée de la coque) une force normale Q , la vitesse du vent étant W .

L'angle δ est tel que la composante normale R_y du courant équilibre Q . L'action R du courant fait alors avec l'axe du navire un angle $\alpha > \delta$; elle est tangente à la courbe de dérive.

Comme R croît proportionnellement à V^2 , α est d'autant plus petit que la vitesse est grande : un navire gouverne d'autant mieux par vent traversier que sa vitesse est grande.

Exemple : Pages [4] a calculé l'angle δ pour un paquebot soumis à un vent de 30 m/s et marchant à 3 nœuds. Il a trouvé $\delta = 31^\circ$. Ce calcul justifie donc la règle selon laquelle la largeur d'un chenal d'accès doit être égale autant que possible à la longueur du plus grand navire devant y accéder.

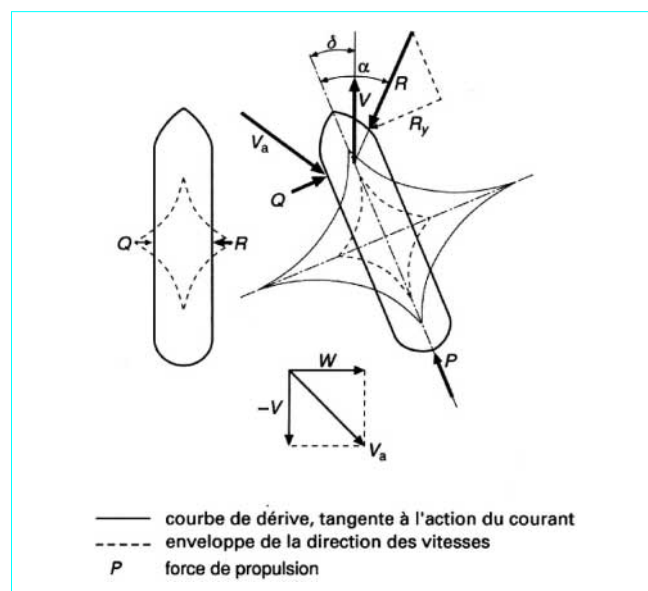


Figure 9 – Dérive δ d'un navire sous l'action du vent V_a et du courant R

Dans la pratique, la largeur et le tracé d'un chenal sont déterminés à partir des résultats de modèles de simulation de navigation. Divers modèles de simulation peuvent intervenir dans la conception des chenaux : modèles physiques à pilotage humain (pilotes ou télécommandés), modèles mathématiques, modèles physiques à pilote automatique, avec simulations en temps réel et en temps accéléré. Ainsi, la largeur du chenal est fonction de la largeur du plus grand navire appelé à le fréquenter et peut être égale à une valeur comprise entre 5 et 10 fois cette largeur, selon que le chenal est le siège de courants traversiers faibles à forts et selon la qualité de la signalisation et des aides à la navigation.

3.1.3 Mouvements verticaux

3.1.3.1 Squat

Un navire se déplaçant dans l'eau engendre des forces de pression entraînant :

- un abaissement du niveau de l'eau ;
- l'enfoncement du navire dans l'eau et son changement d'assiette. La résultante de ces deux mouvements est appelée *squat*.

Le squat augmente proportionnellement au carré de la vitesse et à la longueur du navire.

La figure 10 donne des courbes permettant de calculer le squat d'un navire en eau peu profonde.

3.1.3.2 Mouvements oscillatoires

La houle (article *Mouvements de la mer* [C 4 610]) induit trois mouvements oscillatoires verticaux du navire, le **pilonnement**, le **roulis** et le **tangage**.

L'importance de ces mouvements dépend de l'amplitude, de la fréquence et de la direction de la houle, du rapport de la profondeur au tirant d'eau, de la vitesse du navire et de son block coefficient (§ 1.2).

Les études qui ont été faites [5] à [15] montrent que :

- le mouvement vertical décroît lorsque la taille du navire augmente ;
- pour les petits navires, les mouvements sont plus importants en marche qu'à l'arrêt ; c'est le contraire pour les grands navires ;
- une réduction du pied de pilote (§ 3.1.1) réduit le mouvement vertical ;
- dans le cas d'une houle de face, l'importance du mouvement du navire dépendra en particulier de l'angle d'incidence de la houle, des périodes de la houle et des périodes propres de roulis et de tangage du navire, de la longueur d'onde de la houle, de la longueur du navire et de l'amplitude de la houle.
- dans le cas d'une houle arrière, le navire est moins manœuvrant.

La figure 11 indique le mouvement résultant en fonction d'un certain nombre de facteurs. Les mouvements verticaux sont des valeurs moyennes.

3.2 Distance d'arrêt et zone d'évitage

3.2.1 Arrêt

La distance d'arrêt est donnée au paragraphe 1.6.

Comme il est souhaitable que le navire conserve une vitesse notable dans les chenaux (§ 3.1.2), on doit ménager dans ceux-ci une zone abritée permettant au navire de s'arrêter. On adopte généralement une longueur comprise entre 3,5 et 5 L (L étant la longueur du navire) et on élargit progressivement la zone d'arrêt jusqu'à 1,5 L en raison d'écarts éventuels.

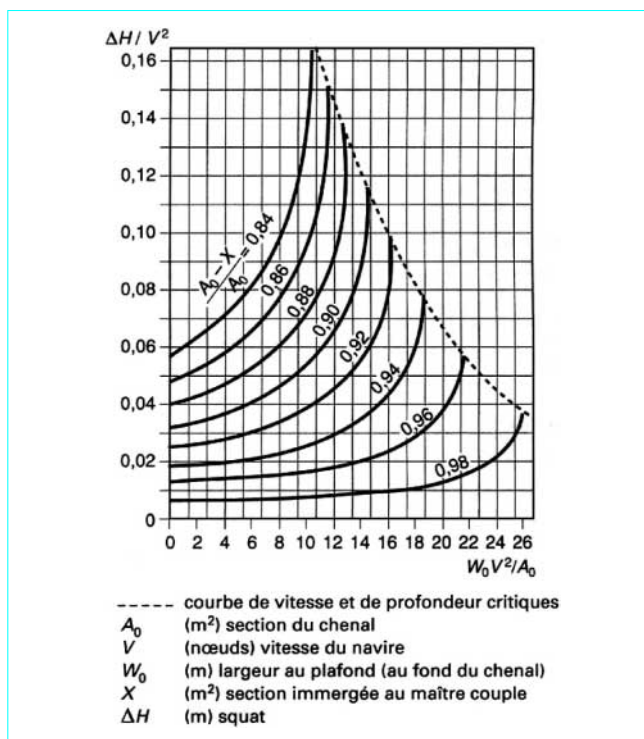


Figure 10 – Calcul de l'enfoncement d'un navire dans un chenal rétréci (d'après [15])

3.2.2 Évitage

La zone d'évitage est la zone où le navire change son cap de 180°, généralement pour se diriger vers un poste ou vers la sortie du port.

La zone d'évitage est à l'intérieur du port, donc en principe à l'abri des courants. Cependant, elle doit être d'autant plus vaste que le navire est soumis à un vent violent.

Sans l'aide de remorqueurs, avec des vents d'intensité inférieure à 15 nœuds et des courants inférieurs à 1 nœud, le diamètre d'évitage est de trois fois la longueur du navire pour les navires à deux hélices, et cinq fois la longueur du navire pour les navires à une hélice.

Avec l'assistance de remorqueurs, le diamètre d'évitage peut être réduit à 1,5 ou 2 fois la longueur du navire.

Dans le cas des ports d'estuaire où la zone d'évitage est établie dans une section de fleuve, et donc soumise aux courants, on donne généralement à la zone d'évitage une longueur un peu plus importante que sa largeur, celle-ci correspondant aux valeurs de diamètre indiquées ci-avant.

3.3 Mouillage, accostage et amarrage

3.3.1 Mouillage

Il consiste à immobiliser le navire en fixant celui-ci sur une ou plusieurs ancrs, ou sur des coffres.

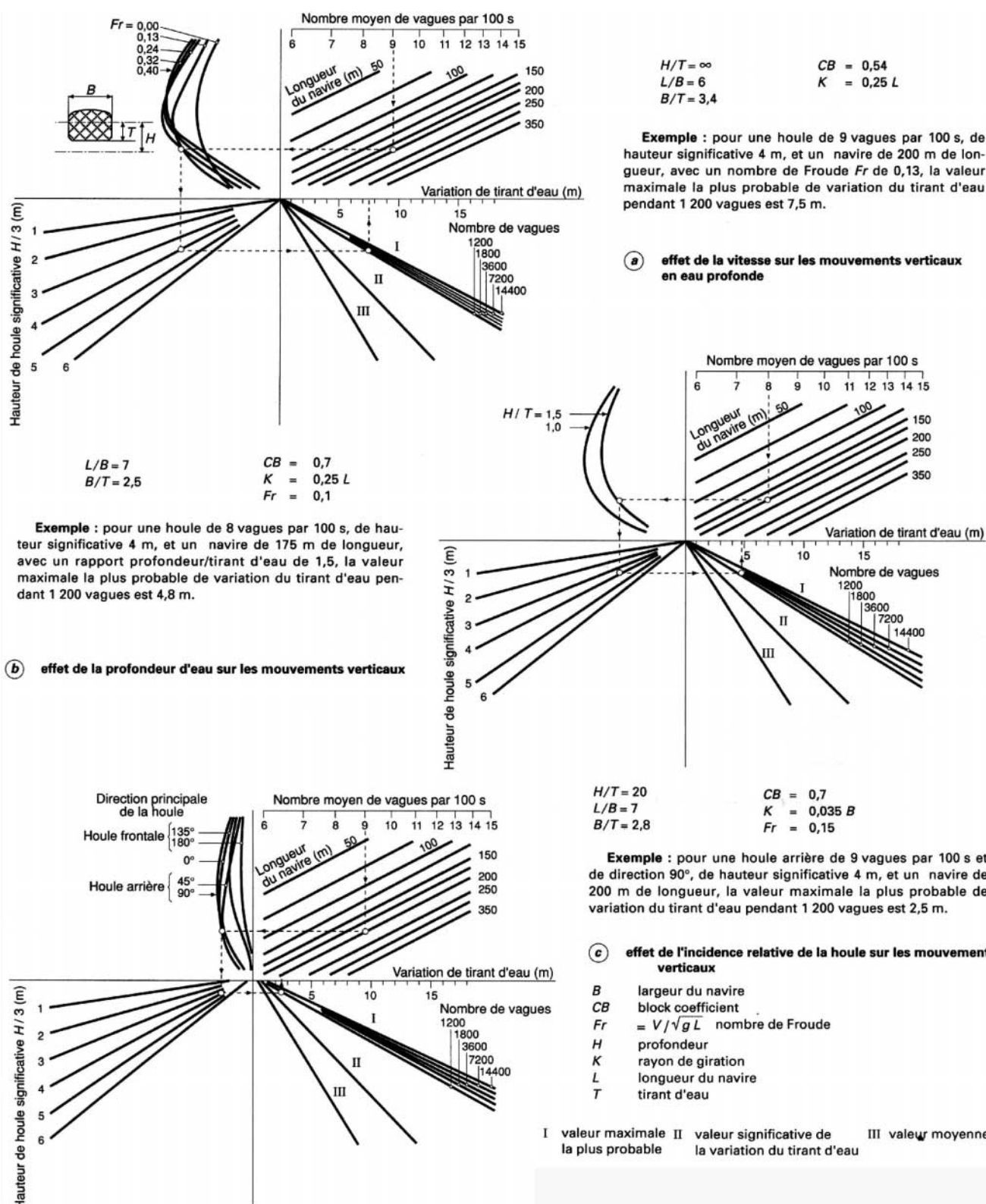


Figure 11 – Mouvements verticaux d'un navire sous l'effet de la vitesse, de la profondeur d'eau et de l'incidence de la houle (d'après [15])

3.3.1.1 Dispositions de mouillage

Les dispositions classiques de mouillage sont représentées sur la figure 12.

3.3.1.2 Description d'une ligne de mouillage

La ligne de mouillage est constituée, du navire à l'ancre, par :

- une **manille** qui fixe la chaîne au navire ;
- une **chaîne** composée de plusieurs maillons (unité de longueur égale à 27,50 m) ;
- un **émerillon** permettant la rotation de l'ancre autour de la chaîne ;
- des manilles et mailles d'extrémité ;
- une **ancre** métallique en acier, de type Marel à pattes articulées ou Danforth à pattes élargies.

Les caractéristiques des lignes de mouillage sont fixées par les sociétés de classification des navires (§ 1.2).

3.3.1.3 Règles de mouillage

L'ancre doit s'enfoncer dans le sol et subir une traction horizontale. À cet effet, la chaîne comporte une partie dormante posée à plat sur le fond.

Cela est obtenu si la ligne de mouillage est au moins égale à trois fois la profondeur d'eau.

La résistance à l'arrachement horizontal est de l'ordre de trois à quatre fois son poids pour une ancre Marel et huit à dix fois son poids pour une ancre Danforth.

L'arrachage de l'ancre s'effectue en amenant le navire à l'aplomb de l'ancre : on *vire à pic* l'ancre en la soulevant.

La manœuvre d'une ligne de mouillage s'effectue par l'intermédiaire d'un **guindeau**.

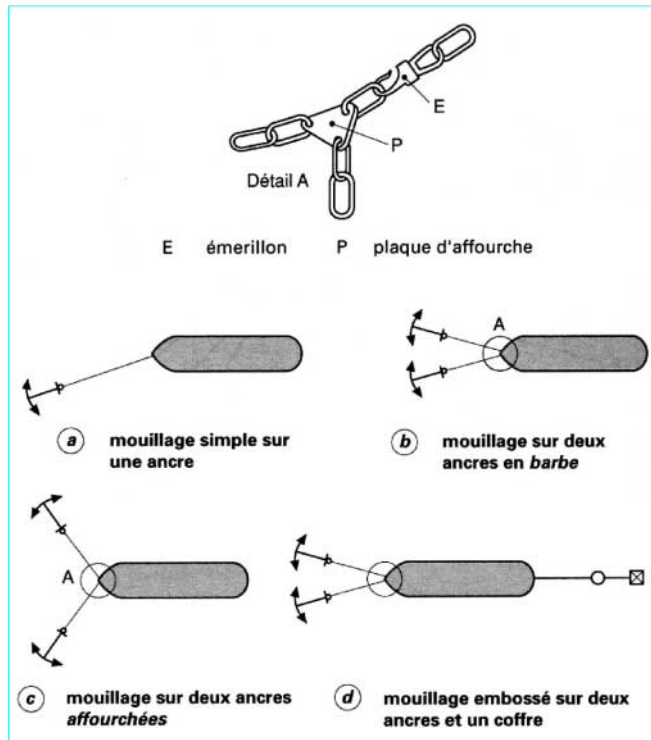


Figure 12 – Dispositions de mouillage

3.3.2 Accostage

Il consiste à mettre en place le navire à son poste à quai.

3.3.2.1 Accostage sans remorqueur

L'accostage dépend des conditions de vent et de courant. Pour ce dernier, il importe, dans toute la mesure du possible, qu'il soit parallèle au quai ou faiblement incliné. Pour se déplacer parallèlement à lui-même, le navire utilise les qualités évolutives provenant du couple de l'hélice. Lorsque le navire a le vent de l'avant ou de 3/4 avant, le vent agit comme un frein et le navire est très contrôlable.

Lorsque le navire a le vent venant de l'arrière, il se présente au plus près du quai et parallèlement à celui-ci.

En cas de vent perpendiculaire au quai et tendant à le plaquer à celui-ci, le navire se présente avec une légère obliquité vers le quai et se laisse dériver en combattant toute tendance à l'embarquée qui le projetterait vers le quai.

Lorsque le vent, perpendiculaire au quai, tend à écarter le navire du quai, le navire se présente obliquement par rapport au quai, généralement face au courant, l'avant ayant le premier contact avec le quai. Le navire pivote ensuite autour de son avant pour rabattre l'arrière devant le quai.

Dans les zones très ventées ou de courants très forts, il peut être nécessaire de posséder des points d'appui fixes à terre, ou en mer sous forme de coffres, pour permettre un accostage sans heurts.

3.3.2.2 Accostage avec remorqueur

Les dimensions des navires modernes ont conduit à généraliser l'emploi de remorqueurs de port.

Selon les usages, les remorqueurs peuvent être attelés :

- soit un en proue et un en poupe (disposition en flèche) ;
- soit en couple à l'arrière.

Au cours des évitages ou pour les mises à poste, les remorqueurs peuvent pousser avec leur étrave.

Pour les mouvements de cargos moyens, on utilise des remorqueurs de 1 000 à 2 000 ch. Pour les plus gros navires, les remorqueurs dépassent 5 000 ch.

3.3.3 Amarrage

3.3.3.1 Définition

Les amarres, qui ont pour but d'immobiliser le navire au cours des opérations au poste, sont des chaînes ou des câbles fixés, d'une part, au navire et, d'autre part, à des points fixes à terre ou dans le plan d'eau (figure 13).

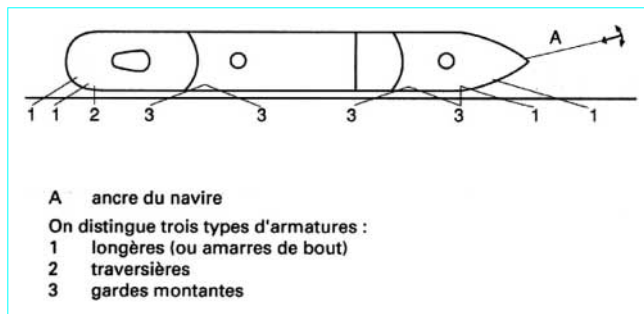


Figure 13 – Amarrage d'un navire : vue en plan

Elles sont manœuvrées par des treuils et guindeaux à vapeur ou électriques ; elles sont guidées par des pièces en fonte ou en acier moulé, appelées **chaumards** ou **écubiers**.

Elles sont fixées au navire sur des treuils ou sur des **bittes d'amarrage** placées sur le pont. Les treuils peuvent être à tension constante ou être bloqués par serrage des freins.

3.3.3.2 Différents types d'amarres

On distingue les types suivants :

- les chaînes, qui ne sont utilisées qu'au mouillage ;
- les câbles d'acier, en fils d'acier galvanisé, commis en aussières, à 6 torons de 12, 24 ou 30 fils avec parfois une âme textile. Ils sont utilisés en général au 1/3 ou au 1/4 de leur charge de rupture ;
- les cordages en fibres textiles naturelles : les fibres utilisées sont des fibres de chanvre, de manille ou de sisal. Les fils sont commis en torons, eux-mêmes commis en aussières formant des grelins ; ils peuvent être écus ou goudronnés ;
- les cordages en fibres textiles artificielles sont constitués de fils de *Nylon* ou de *Perlon*. Très simples, ils sont également très élastiques. Ils sont utilisés sous forme de *springs* de 8 à 10 m de longueur, prolongés par un câble d'acier, ce qui permet d'absorber les mouvements brusques du navire.

3.3.3.3 Considérations pratiques sur l'amarrage

L'amarrage doit être symétrique. Les amarres doivent en outre réagir dès le moindre déplacement du navire ; elles doivent donc être tendues, au moins pour celles qui comportent une certaine élasticité.

L'intérêt des amarres élastiques réside dans la possibilité d'équilibrer l'amarrage, et fait intervenir les autres amarres si l'une est trop chargée.

Certains navires récents sont équipés de treuils comportant un dispositif de réglage automatique de la tension des amarres. Ces dispositifs sont très intéressants dans le cas des écluses et des plans d'eau soumis à un fort marnage.

La position d'équilibre des amarres est un ou plusieurs arcs de chaînette, selon qu'elles sont homogènes ou non.

3.3.4 Amarrage sur point unique

Des systèmes d'amarrage sur point unique se sont développés à travers le monde pour l'amarrage et le déchargement des navires pétroliers. Leur emploi peut être envisagé d'une façon générale, pour tous les navires dont le chargement ou le déchargement peut être effectué par refoulement dans une canalisation sans nécessiter leur immobilisation le long d'un ouvrage d'accostage pour effectuer leurs manutentions.

Les systèmes d'amarrage sur point unique sont constitués soit de colonnes reposant sur le fond, voire articulées, soit de bouées ancrées sur des corps morts, ou un pieu, soit encore de tours.

3.3.4.1 Modes d'amarrage

L'amarrage s'effectue sur deux longères, en *Nylon* de préférence, en raison de son élasticité, fixées à la proue du navire. Le navire peut éviter, selon le courant et le vent autour de la bouée.

Cette disposition permet de limiter les efforts dans les amarres.

Par **exemple**, pour une vitesse du vent de 35 m/s, l'effort exercé pour des navires de 100 000 tdw sur la bouée s'élève à 1,35 MN tandis que, dans le cas d'un amarrage rigide sur quatre bouées, l'effort est de 5,6 MN.

3.3.4.2 Bouées

Elles sont constituées du corps de la bouée, de la table tournante montée sur le dessus, d'une unité de chargement à rotule, des manches de cargaison et d'un système d'ancrage.

Ce système présente cependant plusieurs inconvénients : l'amarrage devient difficile dès que les creux dépassent 3 m. Les opérations de chargement ou de déchargement doivent être arrêtées dès lors que les creux atteignent 6 m environ.

Il peut résister par contre à des creux importants.

En tout état de cause, ce système simplifié n'offre pas la sécurité d'un port et ne peut répondre qu'à des situations très spécifiques concernant exclusivement la manutention de matières en phase liquide.

Navires. Navigation. Balisage

par **Luc LEMOINE**

Ingénieur aux Chantiers de l'Atlantique

Guillaume LEYLDÉ

Ingénieur des Travaux Publics de l'État

Service Études Générales et Affaires Industrielles du Port Autonome de Nantes-Saint-Nazaire

et **Jean-Marcel PIETRI**

Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées

Délégué Général de l'Union des Ports Autonomes et des Chambres de Commerce et d'Industrie Maritimes (UPACCIM)

Bibliographie

Références

- [1] DÉRIFER (J.W.). – *Freinage des grands navires à l'aide d'un dispositif de freinage situé à l'avant*. Conférence à l'Association Technique Maritime et Aéronautique, 19 p. (1976).
- [2] DUONG (C.) et HUTHER (M.). – *Comportement transversal des navires et stabilité*. Nouveautés Techn. Maritimes (F), p. 118-25 (1975).
- [3] *Renseignements relatifs aux documents nautiques et à la navigation*. Service Hydrographique de la Marine, 376 p.
- [4] PAGES. – *Influence de l'action du vent sur le mouvement des navires*. Ann. Ponts et Chaussées (F), mars-avril 1952.

Études du Laboratoire National d'Hydraulique

- [5] GRAFFE (O.). – *Modèle mathématique d'un navire à six degrés de liberté en faible profondeur*. HC/O41/34, déc. 1971.
 - [6] BOULOT (F.). – *Mouvement par faible pied de pilote d'un navire. Approche et accostage*. HC/O41/72/18, HC/O41/72/14, déc. 1972.
 - [7] BOULOT (F.). – *Approche des grands navires dans les chenaux*. C 41/73/26, déc. 1973.
- Pied de pilote des grands navires en approche dans les chenaux :*
- [8] DAVESNE (M.). – *Vérification des possibilités des modèles mathématiques BIPIED et TREPIED*. C 42/74.43, déc. 1974.

- [9] DAVESNE (M.). – *Action d'une houle oblique (Application du modèle mathématique TREPIED)*. C 42/74.42, déc. 1974.
- [10] DAVESNE (M.). – *Modèle simple de calcul du pied de pilote dans la houle*. HC 042/75.51, déc. 1975.

Études de SOGREAH

- [11] CANEL, BOUYSSOU et COTTIN. – *Golfe de Fos. Réception des pétroliers de 500 000 t. Tenue à poste et amarrage. Essais sur modèle physique*. R 11 491, juin 1973.
- [12] SOMMET, BOUYSSOU et COTTIN. – *Golfe de Fos. Tenue à poste d'un pétrolier de 125 000 t au poste de dégazage. Essais sur modèle physique*. R 11 547, août 1973.
- [13] SOMMET, BOUYSSOU et COTTIN. – *Port pétrolier d'Antifer. Étude du pied de pilote d'un navire de 540 000 t, sur modèle réduit au 1/130*. R 11 432, juil. 1973.
- [14] SOMMET, BOUYSSOU et COTTIN. – *Étude des conditions nautiques d'accès au Port d'Antifer. Essais au centre de Revel*. R 11 467, mars-avril 1973.
- [15] *Port approach design : a survey of ship behaviour*. Studies National Port Council., sept. 1975.

On consultera également

- [16] *Rapport de la Commission Internationale sur les grands pétroliers*. Assoc. Intern. Permanente, Congrès Navigation.

- [17] IAPH : Publié par « The International Association of Ports and Harbours ».
- [18] CHAPON (M.). – *Cours de travaux maritimes*. Eyrolles (1984).
- [19] *Documentation technique du personnel des Phares et Balises. Dir. du Service Phares et Balises*.
- [20] SERVIÈRE (M.). – *Cours de constructions maritimes. Théorie du navire*. ENSTA (1973).
- [21] SERVIÈRE (M.). – *Cours de constructions maritimes. La coque*. ENSTA (1976).
- [22] SERVIÈRE (M.). – *Cours de constructions maritimes. Les machines*. ENSTA (1977).
- [23] AIPCN. – *Commission internationale pour la réception de grands navires, 1984. Rapport du groupe de travail IV* (1980).
- [24] AIPCN. – *Rapport final du groupe de travail n° 20 sur les possibilités offertes par les modèles de simulation de navigation des navires pour la conception de chenaux d'accès au port* (1982).

Revue

Navires, Ports et Chantiers.

Nouveautés Techniques Maritimes.

Hansa.

Fairplay.

Organismes

Français

Bassin d'Essais des Carènes de Paris (BCP).

Bureau Veritas.

Chambre syndicale des Constructeurs de Navires (CSCN).

Institut de Recherche de la Construction Navale (IRCN).

Union des Ports Autonomes et des Chambres de Commerce et d'Industries Maritimes (UPACCIM).

Internationaux

Association Internationale Permanente des Congrès de Navigation/Permanent International Association of Navigation Congresses (AIPCN/PIANC).

Association Internationale de Signalisation Maritime (AISM).

International Association of Ports and Harbours (IAPH).

International Marine Organisation/Organisation Maritime Internationale (IMO/OMI).