

# ÉPREUVE COMMUNE DE TIPE 2014 - Partie D

TITRE :

## Les Hydrofoils

Temps de préparation :	2 h 15 minutes
Temps de présentation devant le jury :	10 minutes
Entretien avec le jury :	10 minutes

### GUIDE POUR LE CANDIDAT :

---

Le dossier ci-joint comporte au total : 14 pages

Guide candidat : 1 page

Document principal : 11 pages

Documents complémentaires : 2 pages

Travail *suggéré* au candidat :

A partir d'une exploitation et d'un approfondissement des données du document et d'une comparaison avec l'aérodynamique (aile d'avion) vous pourrez synthétiser les avantages et les inconvénients des systèmes à hydrofoils par rapport aux navires classiques, ainsi que les principes de dimensionnement de tels dispositifs, en fonction du navire considéré.

*Attention : si le candidat préfère effectuer un autre travail sur le dossier, il lui est expressément recommandé d'en informer le jury avant de commencer l'exposé.*

### CONSEILS GENERAUX POUR LA PREPARATION DE L'ÉPREUVE:

---

- Lisez le dossier en entier dans un temps raisonnable.
- Réservez du temps pour préparer l'exposé devant les examinateurs.
- Vous pouvez écrire sur le présent dossier, le surligner, le découper ... mais tout sera à remettre aux examinateurs en fin d'oral.
- En fin de préparation, rassemblez et ordonnez soigneusement TOUS les documents (transparents, etc.) dont vous comptez vous servir pendant l'oral, ainsi que le dossier, les transparents et les brouillons utilisés pendant la préparation. En entrant dans la salle d'oral, vous devez être prêt à débiter votre exposé.

**Il est interdit de sortir le sujet du site de l'épreuve**

**A l'issue de l'épreuve, vous devez remettre aux examinateurs le dossier scientifique.**

**Tout ce que vous aurez présenté pourra être retenu en vue de sa destruction**



## LES HYDROFOILS

### 0. Liminaire

L'eau qui supporte les navires « gratuitement » grâce au bon vieux principe d'Archimède, devient un frein à leur avancement dès que l'on quitte le domaine statique pour le domaine dynamique.

Si l'on veut augmenter la vitesse d'un navire, il n'y a que deux solutions : augmenter la puissance propulsive ou réduire la résistance à l'avancement !

La première solution n'étant pas toujours possible d'un point de vue technique ni plus très acceptable d'un point de vue écologique, il reste la seconde. Après avoir joué sur des formes plus hydrodynamiques et les états de surface des coques, il ne restait plus qu'une seule voie : extraire au maximum la coque de l'eau (Fig.1). L'étude des hydrofoils sera donc le propos de cette étude.



Fig. 1 : Navires équipés d'hydrofoils

### 1. Rappels d'hydrodynamique

La résistance à l'avancement  $R_x$  d'un navire, ou traînée, est la force qu'il faut exercer pour le déplacer d'un mouvement rectiligne uniforme à vitesse constante sur un plan d'eau parfaitement calme. On montre que cette résistance est principalement la somme de deux résistances : une résistance visqueuse  $R_f$  et une résistance de vagues  $R_w$  :

$$R_x = R_f + R_w$$

La résistance visqueuse est due au frottement de l'eau sur la coque et peut se mettre sous la forme :

$$R_f = \frac{1}{2} C_f \rho S V^2$$

Où  $\rho$  est la masse volumique de l'eau,  $C_f$  le coefficient de traînée qui dépend des formes plus ou moins hydrodynamiques du navire, de la **rugosité** de la coque et du nombre de **Reynolds**,  $S$  la surface mouillée et  $V$  la vitesse du navire. La masse volumique  $\rho$  de l'eau de mer pouvant être considérée comme constante et quasiment égale à 1020 kg par m<sup>3</sup>.

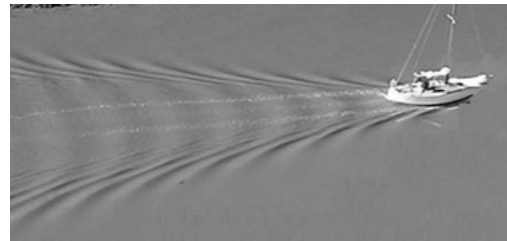
La résistance de vagues est spécifique à l'interface eau/air et produit des vagues d'étrave et de sillage par déformation de la surface libre de l'eau (Fig. 2 et 3). Elle est de la forme :

$$R_W = \frac{1}{2} C_W \rho S V^2$$

30  $C_W$  étant un coefficient sans dimension qui dépend du nombre de Froude, les autres coefficients étant les mêmes que pour la résistance visqueuse.



**Fig. 2 : Vague d'étrave**



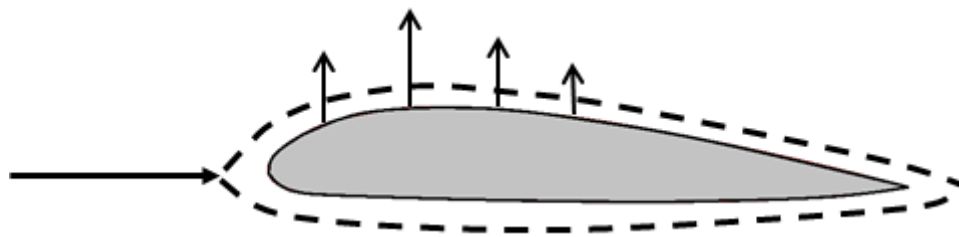
**Fig. 3 : Vagues de sillage**

35 Dès que l'on essaye d'accélérer, les résistances de frottement et de vagues deviennent rapidement énormes et limitant ainsi toute augmentation de vitesse.

Après avoir essayé de modifier les formes et l'état de surface des carènes pour les rendre plus hydrodynamiques, après avoir essayé les multicoques, une nouvelle piste d'amélioration a été explorée : faire sortir le navire de l'eau pour réduire d'un seul coup les résistances visqueuse et de vagues.

## 40 2. Principe du foil ou de l'aile d'avion

L'équation de Bernoulli :  $p + \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho g z = \text{cste}$  montre que si on déplace dans un fluide (air ou eau) un profil asymétrique, il se crée une différence de pression entre le dessous du profil (surface la plus faible ou intrados) et le dessus (surface la plus grande ou extrados) 45 comme montré sur la figure 4 :



**Fig. 4 : Coupe d'un hydrofoil**

La force  $F_z$  qui tend à faire monter le profil s'appelle la portance et est de la forme :

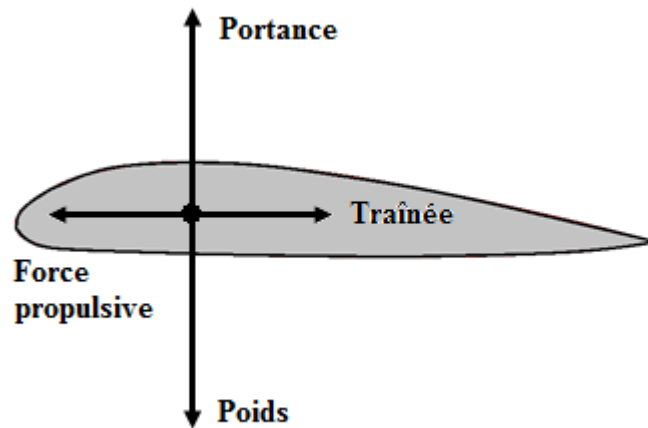
$$F_z = \frac{1}{2} C_z \rho S V^2$$

50 Le fluide, dans son déplacement relatif, frottant sur la surface du profil provoque aussi une résistance à l'avancement, la traînée  $F_x$  qui est de la forme :

$$F_x = \frac{1}{2} C_x \rho S V^2$$

On retrouve des formules analogues à celles des résistances visqueuse et de vague, avec  $C_z$  et  $C_x$  respectivement les coefficients de portance et de traînée,  $V$  la vitesse du navire et  $S$  la surface des foils.

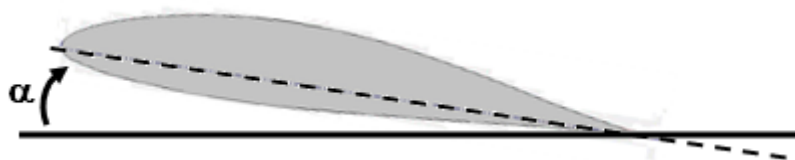
Le bilan global des forces s'exerçant sur le profil devient alors tel que présenté en Fig. 5 :



55

**Fig. 5 : bilan des forces à l'équilibre**

Si on fait varier l'angle d'incidence  $\alpha$  (Fig. 6), les valeurs des coefficients de portance  $C_z$  et de traînée  $C_x$  varient comme présenté dans le tableau 1, et en Fig. 7 et 8 :



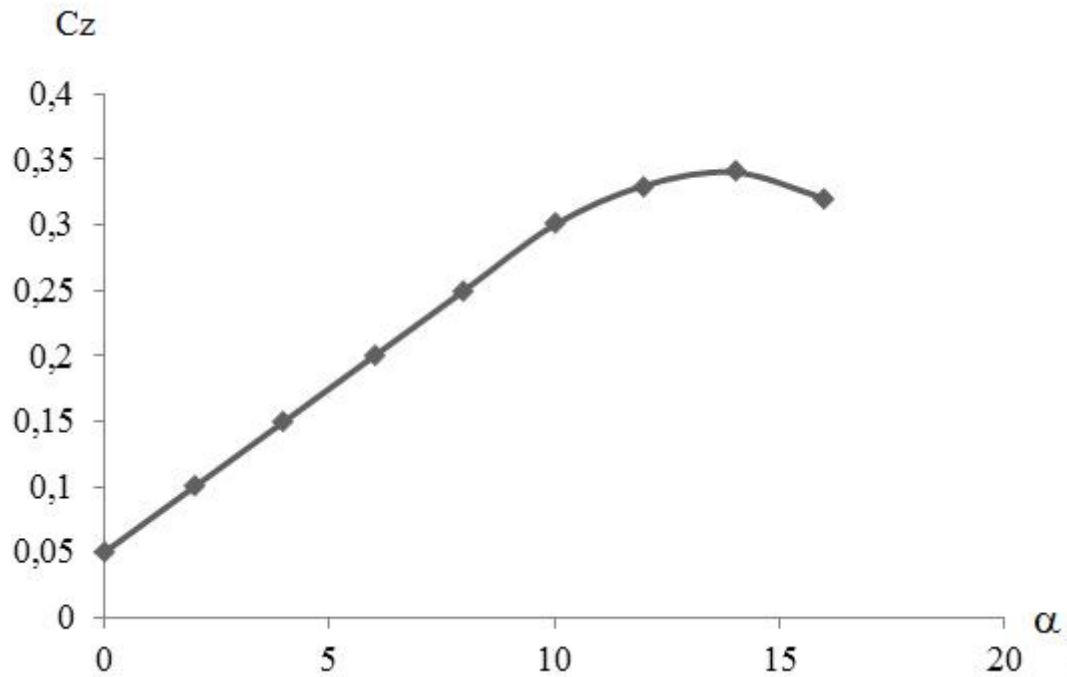
60

**Fig. 6 : l'angle d'incidence  $\alpha$**

Incidence $\alpha$	0°	2°	4°	6°	8°	10°	12°	14°	16°
$C_z$	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.33	0.34	0.32
$C_x$	0.006	0.006	0.0065	0.008	0.0105	0.012	0.014	0.016	0.02

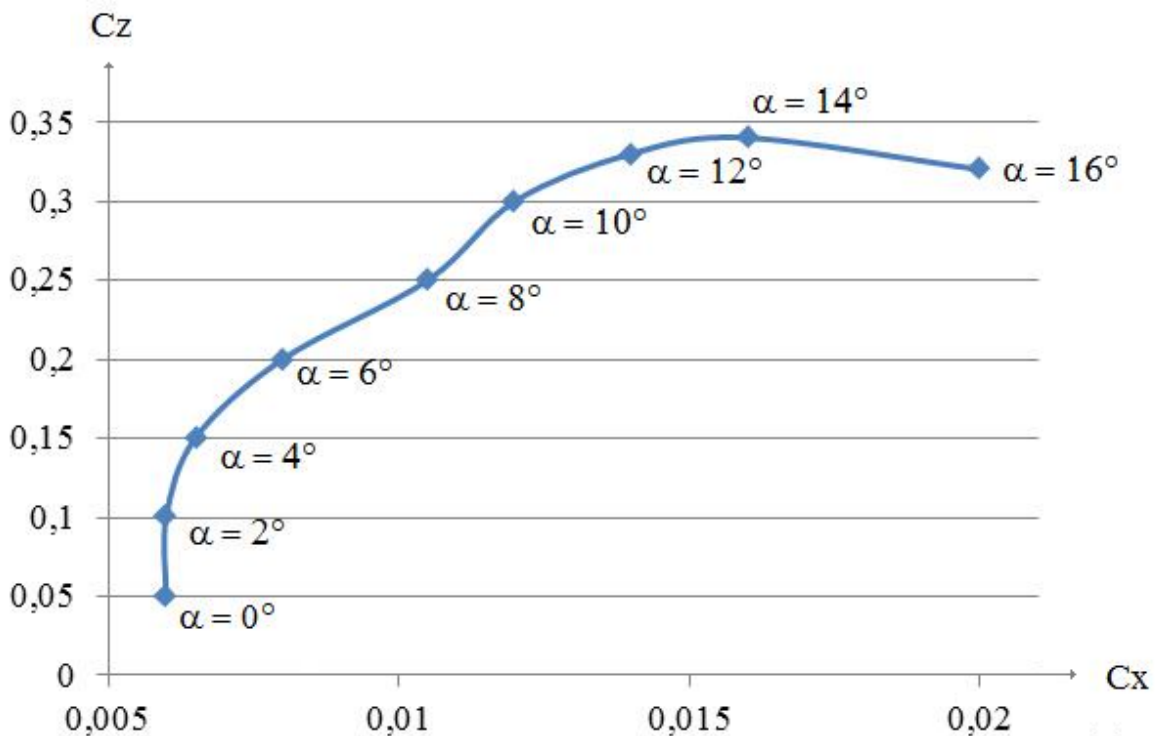
**Tableau 1 : Coefficients de portance  $C_z$  et de traînée  $C_x$  en fonction de l'angle d'incidence  $\alpha$ .**

65



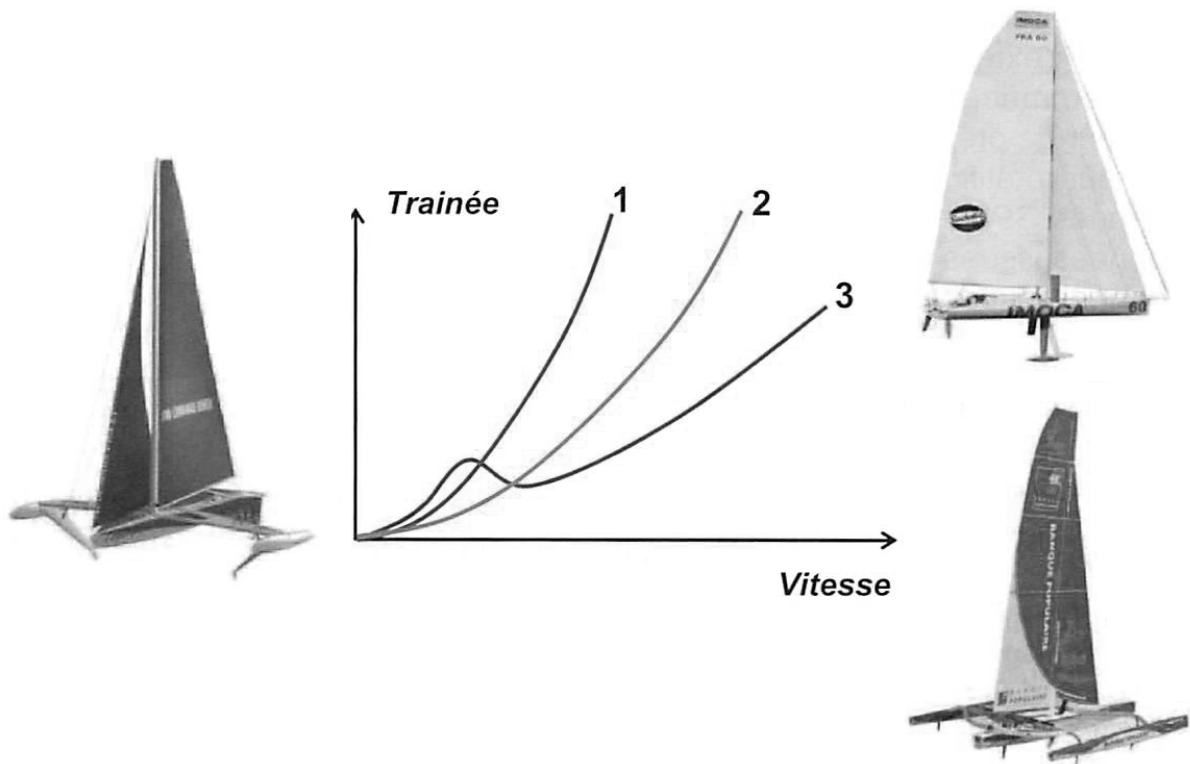
**Fig. 7 : Tracé du coefficient de portance en fonction de l'incidence.**

70 On peut aussi tracer la polaire du foil ( $C_z$  en fonction de  $C_x$ , fig 7) où l'on constate qu'à partir d'un certain angle d'incidence (ici environ  $14^\circ$ ) la portance commence à diminuer alors que la traînée continue d'augmenter : c'est le début du décrochage.



**Fig. 8 : Tracé du coefficient de portance en fonction du coefficient de traînée (polaire).**

75 Lorsque l'on compare les traînées de trois types de navire (monocoque, multicoque et hydrofoils) on obtient le graphe suivant (Fig. 9) :

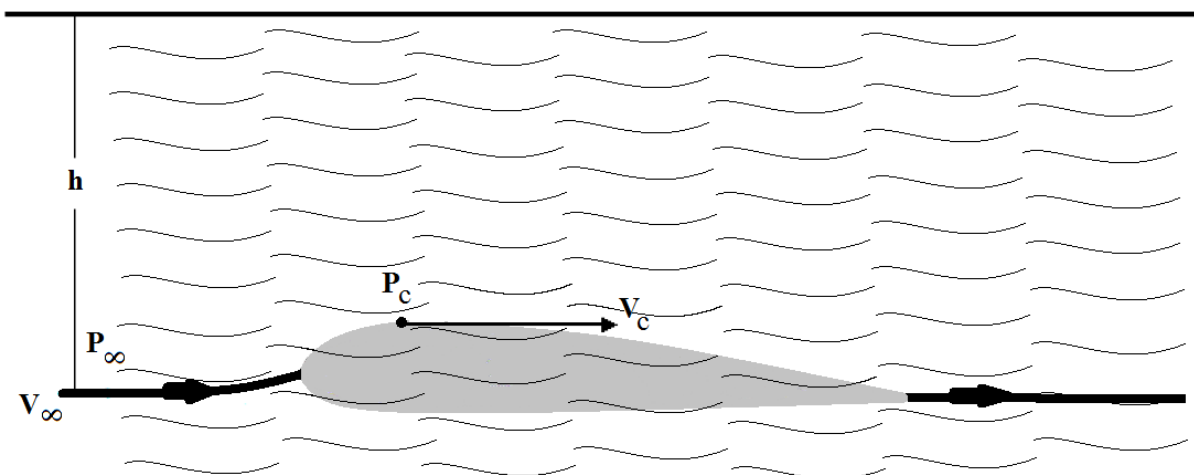


**Fig. 9 : Comparaison des traînées générées par trois types de navires.**

80 Si l'on note  $P_\infty$  et  $V_\infty$  les pression et vitesse de l'eau loin devant l'hydrofoil et  $P_c$  et  $V_c$  les valeurs en un point C de l'extrados (Fig. 10), l'application du théorème de Bernoulli donne :

$$P_\infty + \frac{1}{2}\rho V_\infty^2 = P_c + \frac{1}{2}\rho V_c^2$$

Avec  $P_\infty = P_{atm} + \rho gh$



**Fig. 10 : Pression et vitesse de l'eau sur un foil immergé**

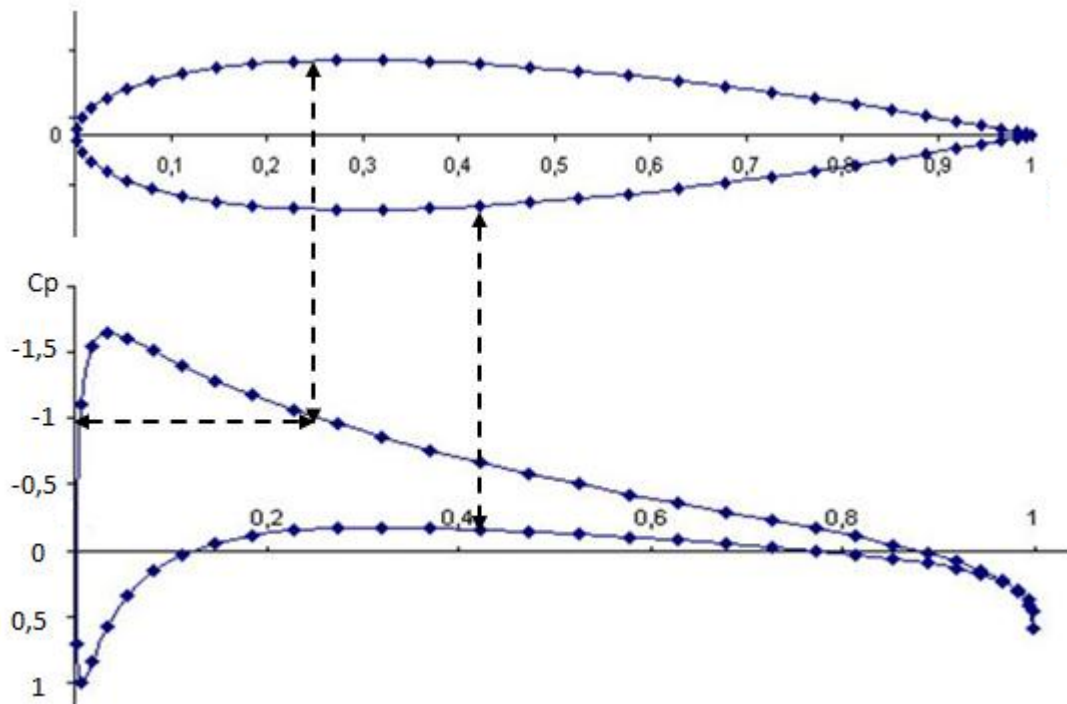
On définit ainsi le coefficient de pression  $C_p$  tel que :

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{Q_\infty}$$

85 Avec :

$$Q_\infty = \frac{1}{2} \rho V_\infty^2$$

Répartition des valeurs de  $C_p$  autour du profil d'un foil : les flèches en pointillés indiquent les correspondances entre les points sur le profil et la valeur de  $C_p$ .



90 **Fig. 11 : Répartition des valeurs de  $C_p$  autour du profil d'un foil : les flèches en pointillés indiquent les correspondances entre les points sur le profil et la valeur de  $C_p$ .**

Il est alors possible d'analyser l'évolution du coefficient de pression tout autour du profil (Fig. 11). Par exemple, le coefficient de pression sur l'extrados, au quart de la longueur du foil ci-dessus vaut -1.

95 On peut alors en déduire la valeur dimensionnelle de la pression, pour une vitesse de 30 nœuds avec un tirant d'eau de 2 m, par la relation :

$$P = P_\infty + C_p \cdot Q_\infty$$

Avec  $P_\infty = 1,013 \cdot 10^5 + (1020 \times 9,81 \times 2) = 121312,4$  pa

D'où :  $P = 121312,4 - \left(1 \times \frac{1}{2} \times 1020 \times (15^2)\right) = 6562,4$  pa. On est bien en dépression !

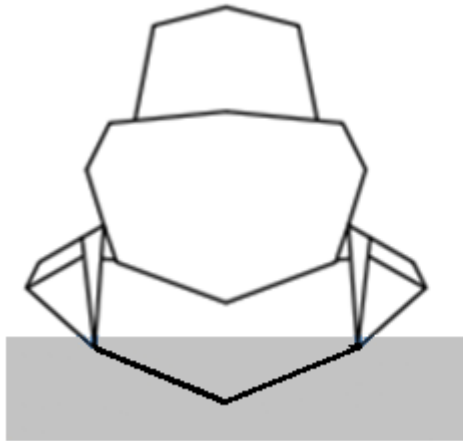


### 3. Les hydrofoils

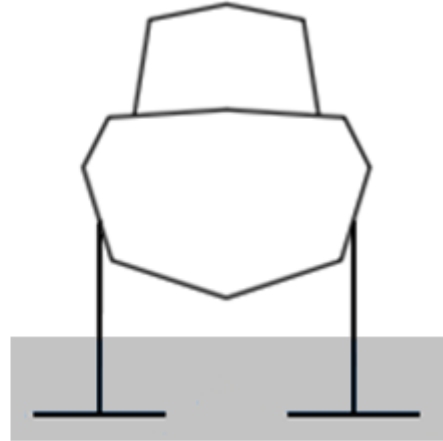
100 Si les ailes d'avion fonctionnent dans l'air, les hydrofoils travaillent eux dans l'eau. Ces deux fluides ont des propriétés très différentes : l'eau est environ 800 fois plus lourde que l'air, a une viscosité environ 1000 fois plus grande, n'est pas compressible et peut changer d'état.

Il existe deux grands types d'hydrofoils :

- Les foils « traversant » (ou foils en V) (Fig. 12a)
- 105 - Les foils totalement immergés (ou foils en T) (Fig. 12b).



**Fig. 12a : Foils en V**



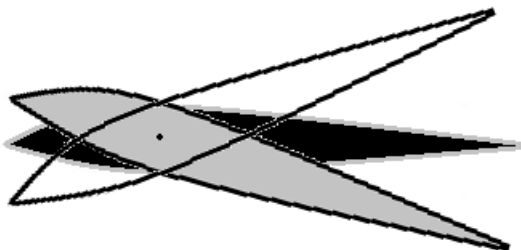
**Fig. 12b : Foils en T**

110 Dans le système des foils traversant, seule une partie de ceux-ci se trouve sous l'eau. Au fur et à mesure que la vitesse du navire augmente, la portance augmente, ce qui entraîne une élévation du bateau et par suite une diminution de la surface immergée des foils. Il y a donc à terme un état d'équilibre précaire.

115 Les foils du système « totalement immergé » sont prévus, eux, pour fonctionner en permanence sous l'eau. Dans cette configuration, le système n'est plus auto stable et en fonction de la vitesse, du poids du navire ou des conditions de mer, il faut faire varier la portance.

L'avantage de ce système est d'isoler la coque de l'effet des vagues, permettant ainsi à des navires de faible longueur de pouvoir naviguer à grande vitesse dans des mers relativement mauvaises.

120 On peut faire varier la portance des foils soit en modifiant son angle d'incidence (Fig. 13a) soit en réglant un volet sur le bord de fuite (Fig. 13b) :



**Fig 13a : configuration à incidence variable**



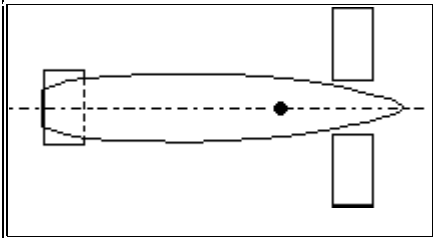
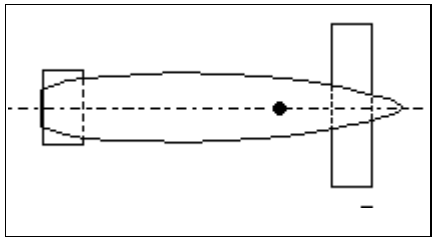
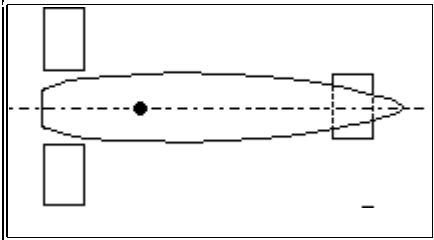
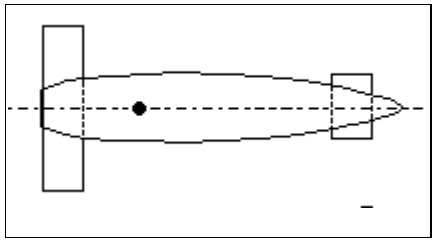
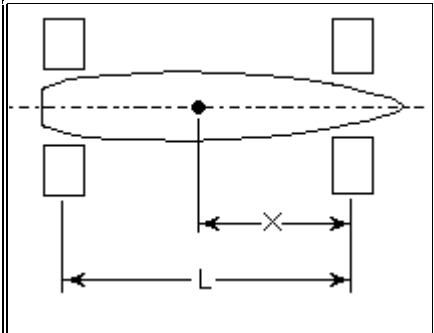
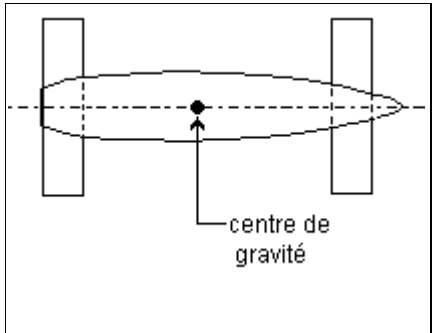
**Fig 13b : configuration à volet**

#### 4. Disposition des foils

125 Selon le type de navire et principalement suivant la position longitudinale de son centre de gravité, il y a trois façons de positionner les foils (Fig. 14) :

- en canard,
- classique, et
- en tandem.

130 Dans chaque cas, les foils peuvent être groupés ou séparés.

Foils séparés	Foils groupés	Disposition des foils
		<p>Classique  <math>0,00 &lt; X/L &lt; 0,35</math></p>
		<p>Canard  <math>0,65 &lt; X/L &lt; 1,00</math></p>
		<p>Tandem  <math>0,35 &lt; X/L &lt; 0,65</math></p>

**Fig. 14 Dispositions des foils**

#### 5. Limites des systèmes à hydrofoils

135 La longueur des bateaux a augmenté au fil des siècles pour passer de petites embarcations de quelques mètres de long à de gigantesques navires longs de plusieurs centaines de mètres. On peut alors se poser la question de savoir jusqu'où l'on peut aller avec des hydrofoils.

La loi "carré-cube" impose une limitation naturelle au développement de ces systèmes.

En effet dans l'équilibre portance/poids, la portance générée par les foils est proportionnelle à leur surface, alors que le poids à soulever est lui proportionnel au volume.

140 Quand on multiplie les dimensions d'un navire par 2, on divise le rapport portance/poids par 2 !

Ce qui fait que si l'on veut augmenter la longueur d'un bateau à hydrofoils, les dimensions de ses foils augmenteront encore plus vite pour atteindre des dimensions telles qu'ils tendront à déborder exagérément de part et d'autre de la coque.

145 La mer étant rarement un grand miroir sans rides, il faut tenir aussi de l'impact des vagues et en particulier de leur hauteur : le graphique de la figure 15 montre les vitesses maximum atteintes pour différents navires suivant leurs longueurs et leurs poids.

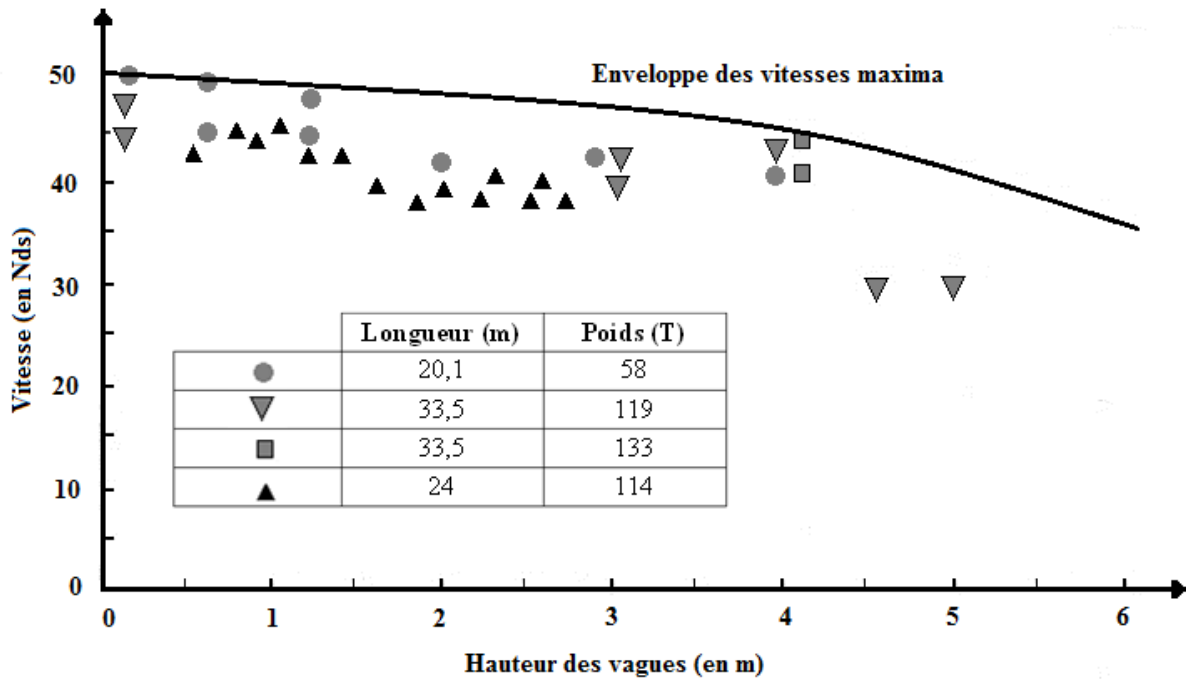


Fig. 15 : Diagrammes des vitesses des navires en fonction des conditions de mer.

## 150 6. La cavitation

On a vu que si l'on voulait augmenter la portance d'un foil sans pour autant augmenter de façon exagérée ses dimensions, il suffisait d'augmenter la vitesse du navire. Cette solution, qui semble *a priori* plus facile que celle qui consiste à augmenter les dimensions, atteint elle aussi très vite ses limites à cause d'un phénomène particulier : la cavitation.

155 La cavitation (du latin cavus, « trou ») est la création de bulles de gaz ou de vapeur dans un liquide soumis à une dépression.

La cavitation peut se produire quand la dépression sur le foil devient telle qu'elle peut descendre sous la valeur de la tension de vapeur saturante de l'eau de mer.

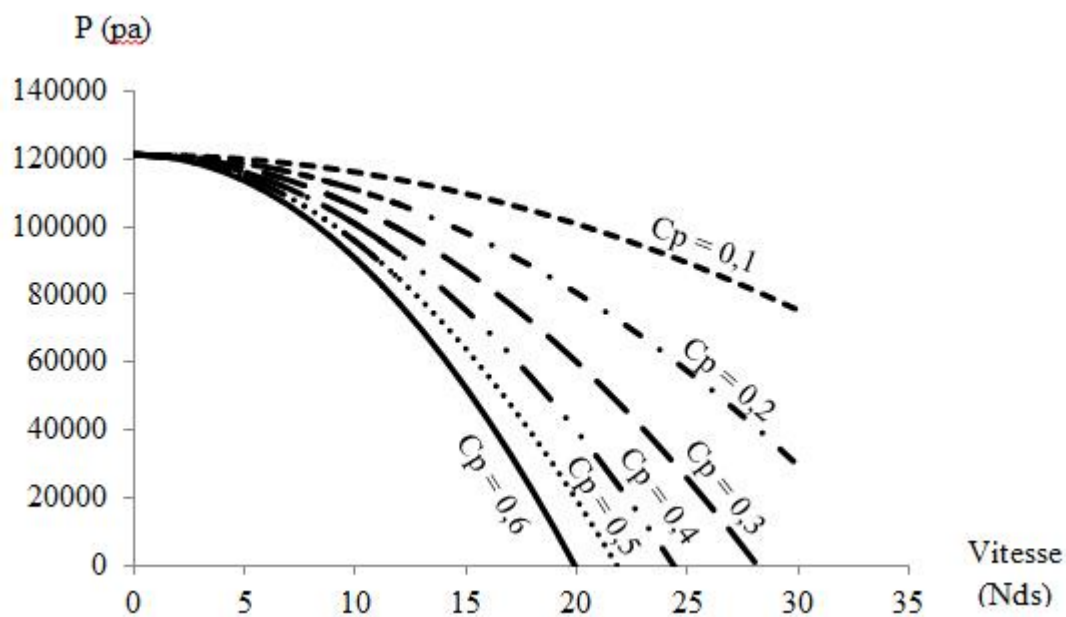
160 Il se produit alors un phénomène d'ébullition avec apparition de bulles de vapeur qui vont avoir des effets très néfastes sur le fonctionnement des foils :

- Décrochage du profil,
- Apparition de bruits et de vibrations,
- Destruction de la surface des foils.

165 Si on calcule, pour un tirant d'eau fixe et égal à 2 m, la pression en différents points du foils en fonction du coefficient de pression  $C_p$  et de la vitesse du bateau, on obtient les résultats du tableau 2 représentés Fig. 47 :

Vitesse (m/s)	$C_p$					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0	121312,4	121312,4	121312,4	121312,4	121312,4	121312,4
1	121108,4	120904,4	120700,4	120496,4	120292,4	120088,4
3	119476,4	117640,4	115804,4	113968,4	112132,4	110296,4
5	116212,4	111112,4	106012,4	100912,4	95812,4	90712,4
7	111316,4	101320,4	91324,4	81328,4	71332,4	61336,4
9	104788,4	88264,4	71740,4	55216,4	38692,4	22168,4
11	96628,4	71944,4	47260,4	22576,4	-2107,6	-26791,6
13	86836,4	52360,4	17884,4	-16591,6	-51067,6	-85543,6
15	75412,4	29512,4	-16387,6	-62287,6	-108187,6	-154087,6

**Tableau 2 : Evolution de la valeur de la pression (pa) en un point du foil en fonction de la vitesse du navire et du coefficient de pression.**



170

**Fig 17 : Evolution de la valeur de la pression (pa) en un point du foil en fonction de la vitesse du navire et du coefficient de pression.**

On constate, par exemple, qu'en Méditerranée en octobre, la cavitation est atteinte sur le bord d'attaque des foils dès 20 nœuds. (Voir tables numériques en fin de document).

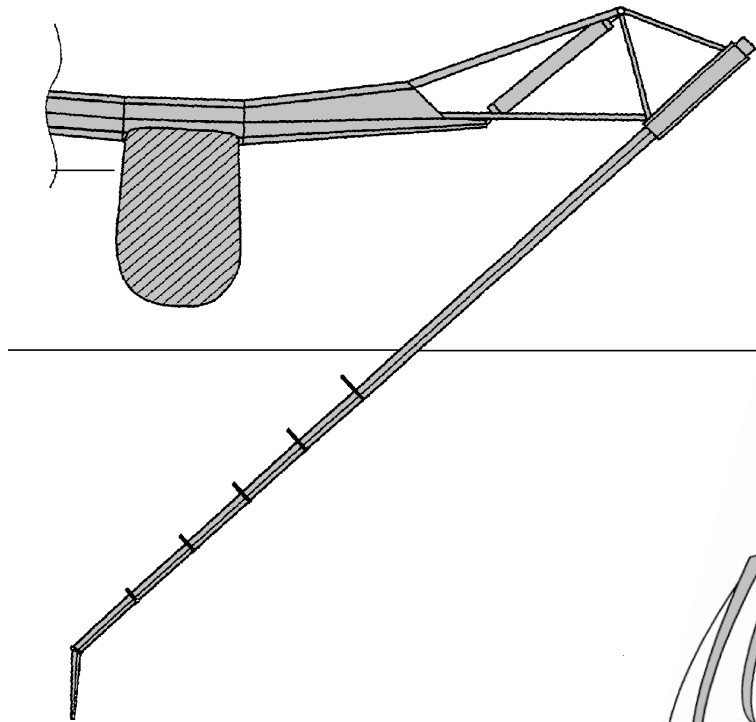
175

## 7. La ventilation

Autre effet limitant, la ventilation ! C'est un phénomène qui se traduit par une chute brutale de la portance lorsque la dépression sur l'extrados du foil entraîne une aspiration d'air.

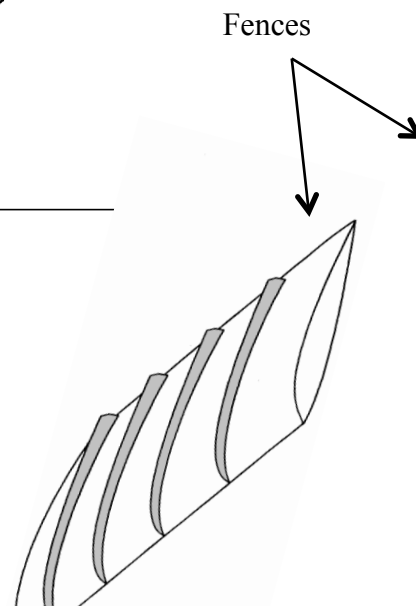
180 On l'observe principalement avec les foils en V.

La solution la plus simple pour supprimer la ventilation consiste à empêcher l'air de passer en ajoutant des « fences » ou barrières sur l'extrados des foils (Fig. 18).



185

**Fig 18a : Configuration en V**



**Fig 18b : Détail des « fences »**

Conclusion : Si les hydrofoils permettent d'obtenir des gains de vitesse important tout en faisant des économies d'énergie, ils ne représentent pas pour autant la panacée.

190

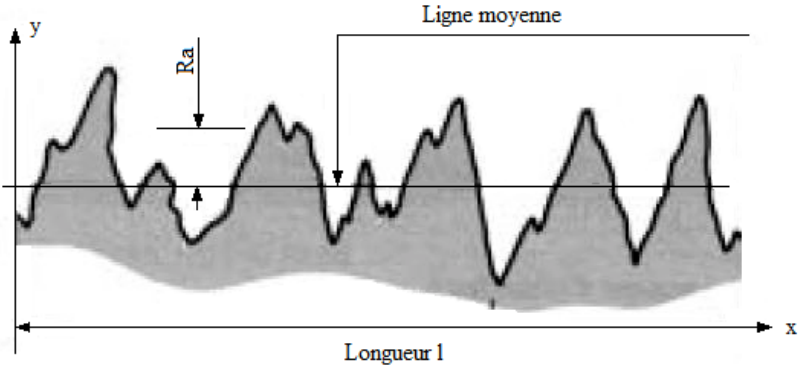
D'une part cette technologie n'est pas applicable aux navires de grandes dimensions (porte-conteneurs, pétroliers, porte-avions, etc.) et d'autre part ne présente que peu d'intérêt pour les tout petits bateaux (à part des considérations ludiques ou sportives).

195

En définitive les foils sont réservés aux navires moyens (quelques dizaines de mètres de long) avec des poids pouvant aller jusqu'à quelques centaines de tonnes. En fait le domaine de prédilection des navires à hydrofoils c'est le transport de quelques dizaines de passagers sur de courtes distances en des temps très courts : îles grecques ou italiennes, lacs et fleuves, détroits ...

200

## Glossaire

<b><u>Rugosité</u></b>	<p>La rugosité Ra caractérise l'état de surface d'un matériau. C'est la moyenne arithmétique sur une longueur l donnée de tous les creux et les bosses :</p>  <p style="text-align: center;"><math>Ra = \frac{1}{l} \int_0^l  y  dx</math></p>
<b><u>Reynolds</u></b>	<p>Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Il caractérise la forme des écoulements (laminaire ou turbulent). Il est de la forme : <math>Re = \frac{\rho VL}{\mu}</math></p>
<b><u>Froude</u></b>	<p>Le nombre de Froude caractérise l'importance relative de l'énergie cinétique de ses particules par rapport à leur énergie potentielle gravitationnelle. C'est donc le rapport la vitesse/force de pesanteur : <math>Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}</math></p>
<b><u>Carène</u></b>	Partie immergée de la coque d'un navire.
<b><u>Multicoque</u></b>	Bateau constitué de plusieurs coques distinctes (2 coques : catamaran, 3 coques : trimaran). Avantages principaux par rapport aux monocoques : très bonne stabilité et légèreté (absence de lest).
<b><u>Nœud</u></b>	Vitesse des navires. Un nœud est égal à 1 mile marin par heure. Environ 1800 m en 3600 s, soit 0,5 m/s.

## Tables numériques

Vitesse moyenne des navires (en nds)					
Pétrolier	Porte-conteneurs	Vedette hydrofoils	Voilier monocoque	Voilier multicoque	Voilier hydrofoils
12 - 15	15 - 20	25 - 40	6 - 14	18 - 30	30 - 50

Salinité moyenne	
Océan Atlantique	Mer Méditerranée
30 g/l	35 g/l

205

Température de l'eau de mer en Atlantique et en Méditerranée selon la saison												
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Atlantique	14	13	12	12	13	16	21	22	21	20	18	15
Méditerranée	13	13	13	13	16	19	23	25	24	20	18	15

		Température (°C)		
		10	20	30
Viscosité (centipoise : $10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Salinité 30 g/l	1,374	1,061	0,850
	Salinité 35 g/l	1,385	1,070	0,858
Masse volumique ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Salinité 30 g/l	1023	1021	1018
	Salinité 35 g/l	1027	1024,8	1021,7

210

Pression de vapeur d'eau (mm Hg) pour différentes températures et salinités								
T, °C	Salinité (g de sel/l)							
	0	5	10	15	20	25	30	35
0	4,58	4,57	4,56	4,55	4,53	4,52	4,51	4,50
10	9,21	9,18	9,16	9,13	9,11	9,09	9,06	9,04
20	17,54	17,49	17,45	17,40	17,35	17,30	17,26	17,21
30	31,85	31,76	31,67	31,59	31,50	31,42	31,33	31,25

1 mm Hg = 133,32 Pa

Le diagramme Pression-Température de l'eau :

