

# Chapitre I

## RESISTANCE A L'AVANCEMENT

### 1 - Généralités sur la résistance à l'avancement

#### 1.1 - Introduction

La résistance à l'avancement est un sujet important de l'hydrodynamique navale car il s'agit de déterminer l'effort à vaincre pour déplacer un engin maritime.

Historiquement, c'est l'un des premiers thèmes étudiés en hydrodynamique navale, discipline apparue au XVIII<sup>e</sup> siècle. C'est à la suite des travaux de D'Alembert, puis de Reech et de Froude, que la théorie de la similitude appliquée au problème de la résistance à l'avancement a été mise au point, théorie qui régit maintenant toute expérience sur modèle réduit. C'est aussi un domaine complexe qui pose encore aujourd'hui des problèmes non résolus du point de vue de la recherche. C'est enfin un sujet vital pour la connaissance des performances d'un navire car la résistance à l'avancement est nécessaire pour dimensionner l'appareil propulsif à mettre à bord.

Par définition, on appelle résistance à l'avancement d'un engin, l'effort nécessaire qu'il faut exercer sur lui pour le déplacer d'un mouvement rectiligne uniforme à vitesse constante sur une mer complètement calme. La connaissance de cette résistance donne une première idée de la puissance à installer à bord qui doit être au moins égale au produit de la résistance par la vitesse d'avance.

Il convient de prendre en compte des phénomènes supplémentaires qui conduisent à majorer la puissance à installer :

- L'appareil propulsif (en général les hélices) accélère l'écoulement autour du navire et a tendance à augmenter la résistance par un phénomène de succion.
- Les navires se déplacent dans la houle qui crée une résistance supplémentaire, la résistance ajoutée sous houle.

Le dimensionnement précis de l'appareil propulsif doit prendre en compte ces différents éléments. Il reste néanmoins fondamental de s'intéresser au problème de résistance à l'avancement que l'on peut aussi appeler résistance de remorquage.

#### 1.2 - Composantes de la résistance à l'avancement

##### *a) Description*

Plusieurs phénomènes d'origine physique différente contribuent à créer la résistance à l'avancement :

- La résistance visqueuse

Un corps en mouvement dans un fluide visqueux entraîne avec lui une mince pellicule de

fluide, appelée couche limite. Ce phénomène induit une dépense d'énergie qui se traduit par une force s'opposant au mouvement du corps.

- La résistance de vagues

Lorsque le corps se déplace à la surface de l'eau ou à proximité de la surface (exemple : navire de surface ou sous-marin à faible immersion), son déplacement crée un train d'onde à la surface de l'eau, appelé champ de vagues d'accompagnement. La création et l'entretien de ce champ de vagues nécessitent de l'énergie qui se manifeste par une force s'opposant au mouvement.

- La résistance tourbillonnaire

Elle est liée au développement de tourbillons sur les arêtes vives ou appendices de la carène. L'origine de ces tourbillons peut être visqueuse (décollement de couches limites) ou non visqueuse (tourbillons de portance de profils).

- La résistance d'embruns

Elle est associée à la création de jets à l'étrave ou au déferlement des vagues d'accompagnement qui peuvent exister dans des configurations de navires rapides. Comme pour la résistance tourbillonnaire, elle peut être assez difficile à distinguer quantitativement des autres composantes de la résistance.

- La résistance aérodynamique

Elle provient du frottement et des tourbillons générés par les superstructures (œuvres mortes). Sa contribution est faible et peut être raisonnablement estimée à l'aide de formules empiriques.

***b) Analyse dimensionnelle***

L'analyse dimensionnelle consiste, après avoir fait des hypothèses sur les paramètres les plus influents pour décrire un phénomène physique, à déterminer les nombres sans dimension indépendants qui le caractérisent quantitativement.

Du fait des phénomènes physiques responsables de la résistance à l'avancement, celle-ci, que l'on note  $R_T$ , doit au minimum dépendre des paramètres dimensionnels suivants :

$L$	longueur caractéristique du navire	( m )
$U$	vitesse d'avance	( m / s )
$g$	accélération de la pesanteur	( m / s <sup>2</sup> )
$\rho$	masse volumique de l'eau	( kg / m <sup>3</sup> )
$\nu$	viscosité cinématique de l'eau	( m <sup>2</sup> / s )

Comme on le verra dans la suite, la longueur  $L$  à considérer est la longueur de la carène correspondant donc à la partie immergée du navire. Le raisonnement qui suit se veut le plus simple possible et n'a pour but que de mettre en évidence les ordres de grandeur et paramètres physiques les plus influents. Il est bien évident que tenir compte de la forme du navire uniquement au travers de sa longueur est limitatif car de nombreux autres paramètres de forme interviennent (déplacement, largeur, etc.). Ils peuvent être caractérisés à l'aide de coefficients sans dimension liés à la longueur de la carène.

En première approximation, on peut donc supposer que :

$$\text{Équation I-1} \quad R_T = f(L, U, g, \rho, \nu)$$

$R_T$  s'exprime en newtons ( $N = \text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2$ ). On voit que toutes ces grandeurs s'expriment à l'aide des trois grandeurs fondamentales que sont la masse (kg), la longueur (m) et le temps (s). Les lois de la physique étant indépendantes des unités dans lesquelles s'expriment les paramètres, elles peuvent s'écrire sous la forme de relation entre nombres sans dimension. Ce principe d'homogénéité, connu sous le nom de Vaschy-Buckingham ou théorème Pi, se traduit par le fait que l'Équation I-1 peut être réécrite comme une relation entre nombres sans dimension construits à partir des 6 paramètres intervenants dans cette équation. Comme le nombre de grandeurs fondamentales est égal à 3, le nombre de nombres adimensionnels entrant dans la relation finale doit être égal à  $6 - 3 = 3$ .

On cherche à donner la dimension de trois des paramètres en fonction des autres :

- $R_T$  s'exprime en  $N = \text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2$  et a donc la même dimension que  $\rho L^2 U^2$ .
- $U$  s'exprime en  $\text{m} / \text{s}$  et a donc la même dimension que  $\sqrt{gL}$ .
- $\nu$  s'exprime en  $\text{m}^2 / \text{s}$  et a donc la même dimension que  $LU$ .

La relation adimensionnelle entre tous ces paramètres est donc de la forme :

$$\text{Équation I-2} \quad \frac{R_T}{\rho L^2 U^2} = f\left(\frac{U}{\sqrt{gL}}, \frac{LU}{\nu}\right)$$

Souvent, on préfère adimensionnaliser la résistance  $R_T$  en utilisant la surface mouillée de la carène  $S$  plutôt que  $L^2$ . On définit alors le coefficient de résistance  $C_T$  suivant :

$$\text{Équation I-3} \quad C_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2} \rho S U^2}$$

Les nombres sans dimension intervenant dans l'Équation I-2 sont :

- Le nombre de Froude ( $F_N = \frac{U}{\sqrt{gL}}$ ), qui détermine le rapport entre effets d'inertie et effets de gravité.
- Le nombre de Reynolds ( $R_N = \frac{LU}{\nu}$ ), qui détermine quant à lui le rapport entre effets d'inertie et effets visqueux.

### c) Hypothèse de Froude

Le besoin de prévision de la résistance à l'avancement d'un navire avant sa construction est absolument nécessaire. L'Équation I-2 est intéressante dans cette optique car elle souligne le fait que l'on peut déduire la résistance à l'avancement, pour peu que des paramètres sans dimension soient conservés (Froude, Reynolds).

C'est sur cette base que William Froude a eu l'idée de construire des bassins de traction dans lesquels on mesure la résistance à l'avancement sur une maquette du navire à une échelle réduite.

On affecte d'un indice  $r$  (pour réel) les grandeurs à l'échelle réelle et d'un indice  $m$  (pour modèle) les grandeurs à l'échelle de la maquette. Le rapport d'échelle est noté  $e = \frac{L_r}{L_m}$ .

Pour que l'essai sur le modèle représente une situation physique identique au remorquage sur le navire réel, il faut, outre le fait que la géométrie du navire soit respectée sur la maquette, que, d'après l'Équation I-2, on ait le même nombre de Froude et le même nombre de Reynolds au réel et au modèle. Dans ces conditions, on peut écrire :

$$\text{Équation I-4} \quad \frac{R_r^r}{\rho^r L_r^2 U_r^2} = \frac{R_r^m}{\rho^m L_m^2 U_m^2}$$

et déduire  $R_r^r$  à l'aide de la mesure de  $R_r^m$ . Ces deux conditions impliquent :

$$\text{Équation I-5} \quad F_N^r = \frac{U_r}{\sqrt{gL_r}} = F_N^m = \frac{U_m}{\sqrt{gL_m}} \quad \text{donc} \quad \frac{U_r}{U_m} = \sqrt{e}$$

$$\text{Équation I-6} \quad R_N^r = \frac{L_r U_r}{\nu_r} = R_N^m = \frac{L_m U_m}{\nu_m} \quad \text{donc} \quad \frac{U_r}{U_m} = \frac{\nu_r}{\nu_m} \cdot \frac{1}{e}$$

La viscosité de l'eau de mer et de l'eau douce (en bassin) étant très voisines, les relations I-5 et I-6 sont impossibles à respecter en même temps, à moins que  $e \square 1$ . L'essai en bassin ne peut donc pas modéliser de manière complètement équivalente le même essai fait à l'échelle réelle.

Pour pouvoir estimer la résistance au réel à partir d'essais effectués en bassin, il est nécessaire d'introduire une hypothèse supplémentaire. Formulée par Froude, elle consiste à supposer que la résistance totale se décompose en une résistance de vagues et une résistance visqueuse indépendantes. Cela signifie que la résistance de vagues ne dépend pas du frottement, donc du Reynolds et que la résistance visqueuse ne dépend pas du champ de vagues, donc du Froude. On traduit cette hypothèse par :

$$\text{Équation I-7} \quad C_T = C_W(F_N) + C_V(R_N)$$

Cette décomposition ne permet pas de prendre en compte les composantes annexes de la résistance (tourbillon, embrun, aérodynamique), mais elle donne une idée suffisante pour une bonne estimation. Très largement utilisée dans toutes les méthodes d'extrapolation des mesures en bassin de traction vers le réel, elle est également à la base de certaines méthodes numériques.

Le retour d'expérience par la confrontation avec des essais à l'échelle réelle a rapidement montré la très grande utilité et la bonne validité de l'hypothèse de Froude. L'erreur commise en supposant l'indépendance des effets de vagues et visqueux n'est ainsi pas significative par rapport aux autres sources d'erreurs pouvant exister dans la détermination de la résistance à l'avancement.

La mise en œuvre pratique de la décomposition de la résistance à l'avancement est différente suivant la méthode utilisée, comme le résume le schéma de la Figure I-1.<sup>3</sup>

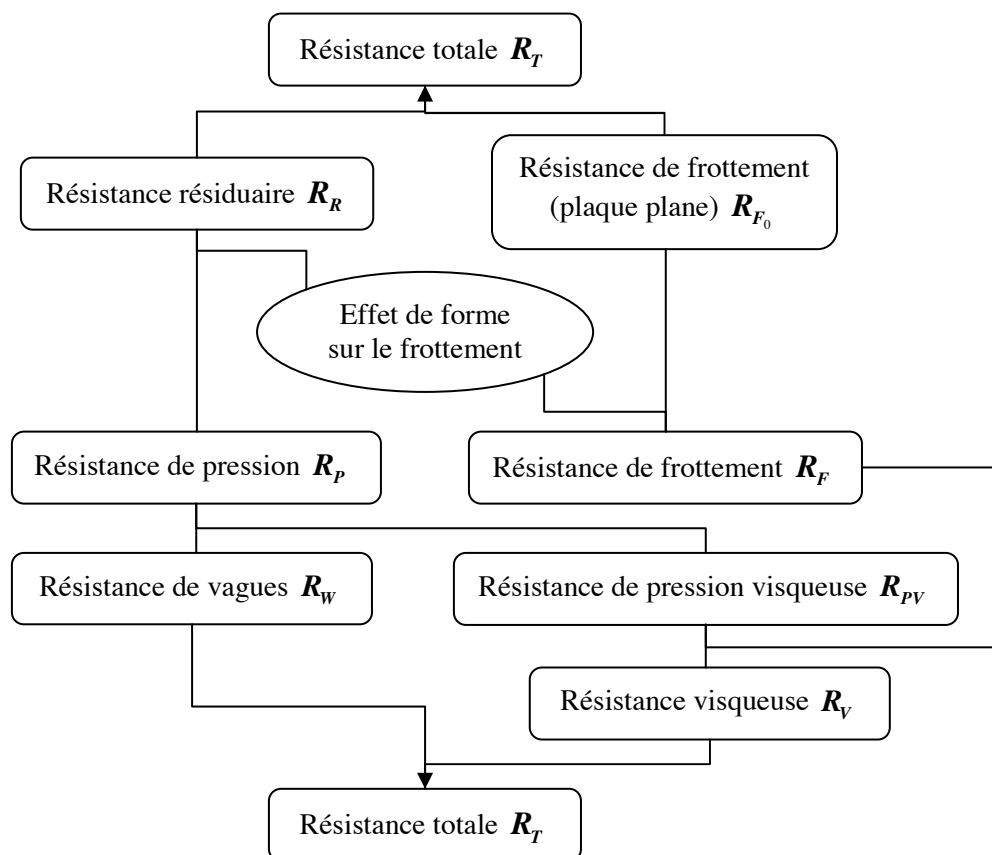


Figure I-1 Différentes décompositions de la résistance à l'avancement



Figure I-2 Déferlement de la vague d'étrave (Photo BEC<sup>4</sup>)

<sup>3</sup> cf. Bibliographie, référence [4], p. 65

<sup>4</sup> Bassin d'Essais des Carènes

### 1.3 - Principales méthodes de détermination de la résistance à l'avancement

#### a) Méthodes statistiques

Ces méthodes reposent sur la détermination de formules de régression basées sur de nombreux essais en bassin.

En phase d'avant-projet, cette étape est utile pour estimer, même grossièrement, la puissance à embarquer. On essaye dans ce cas de se baser sur des résultats obtenus avec des familles de carène ressemblant au type de celle que l'on est en train de concevoir.

L'ordre de grandeur de la précision de ces méthodes dépend de la base de données qui est utilisée.

#### b) Méthodes expérimentales

Ces méthodes sont basées sur l'utilisation de bassins de traction, moyens d'essais pouvant être de dimensions et coûts relativement importants.

Les essais sont faits sur des maquettes en respectant la similitude de Froude, ce qui implique que l'on ne peut pas respecter la similitude de Reynolds.<sup>5</sup>

Les méthodes d'extrapolation des résultats de résistance obtenus à l'échelle du modèle vers l'échelle du réel reposent toutes sur le même principe. On évalue d'abord par des formules semi-empiriques la part de résistance due au frottement à l'échelle du modèle. On retranche cette part aux valeurs mesurées, ce qui permet d'estimer la résistance due aux vagues à l'échelle du modèle. Par simple changement d'échelle, on obtient la résistance due aux vagues à l'échelle du réel, à laquelle on ajoute la résistance due au frottement à l'échelle du réel estimée par la même formule semi-empirique, pour obtenir la résistance totale au réel.

Si on utilise des méthodes d'extrapolation dites 2D qui reposent sur l'assimilation de la carène à une plaque plane de même surface et de même longueur, la décomposition de  $R_T$  (Équation I-8) correspond à la première ligne de la Figure I-1.

Équation I-8 
$$R_T = R_R + R_{F_0}$$

$R_R$  résistance résiduaire

$R_{F_0}$  résistance de frottement de la plaque plane équivalente

Si on utilise des méthodes d'extrapolation dites 3D qui impliquent l'utilisation d'un coefficient de forme, la décomposition de  $R_T$  (Équation I-9) correspond aux lignes du bas de la Figure I-1.

---

<sup>5</sup> cf. section 1.2 - Composantes de la résistance à l'avancement, paragraphe c)

Équation I-9

$$R_T = R_W + R_V$$

 $R_W$  résistance de vagues $R_V$  résistance visqueuse

On verra que certaines méthodes prennent en compte des composantes non mentionnées dans la Figure I-1 pour le calcul au réel comme la résistance aérodynamique, la rugosité de la carène et la résistance ajoutée sous houle. Elles sont calculées à l'aide de formules empiriques obtenues par corrélation avec des essais faits en mer sur le bateau réel.<sup>6</sup>

Les essais en bassin sont actuellement le moyen le plus précis pour estimer la résistance à l'avancement (quelques pourcents). Ils sont néanmoins assez coûteux et n'interviennent généralement que pour valider un projet.

### c) Méthodes numériques

La physique complexe que représente le problème de résistance à l'avancement nécessite, pour être totalement prise en compte, la résolution des équations de Navier-Stokes avec la modélisation de la surface libre et des phénomènes turbulents.

Grâce à l'accroissement exponentiel de la puissance informatique et aux progrès des méthodes de calcul numérique, les codes « Navier-Stokes à surface libre » commencent à donner des résultats représentatifs et utilisables dans une démarche de conception de navire. En particulier, bien que les temps de calcul soient encore relativement longs, il est aujourd'hui réaliste de les intégrer dans une démarche d'optimisation des formes de carène.

La décomposition de la résistance totale se fait dans ce cas de manière naturelle, selon une composante normale à la carène (pression) et une composante tangentielle (frottement). Elle correspond à la ligne centrale de la Figure I-1.

Équation I-10

$$R_T = R_p + R_f$$

 $R_p$  résistance de pression $R_f$  résistance de frottement

Il existe des méthodes numériques plus anciennes et plus rapides en temps de calcul. Elles sont basées sur des codes potentiels permettant d'évaluer la résistance de vagues et sur des codes de couche limite permettant d'estimer la résistance visqueuse. On obtient alors une décomposition donnée par l'Équation I-9.

---

<sup>6</sup> cf. section 4.2 - Méthodes d'extrapolation, paragraphe c)

### 1.4 - Équations générales du problème de résistance à l'avancement

On considère un navire avançant d'un mouvement rectiligne à vitesse uniforme. Pour écrire les équations du problème, on se place en général dans le repère galiléen lié à ce navire. Dans ce repère, le navire est fixe et voit arriver un écoulement uniforme de vitesse  $U_0 \vec{e}_x$ , si l'on choisit les conventions de la Figure I-3.

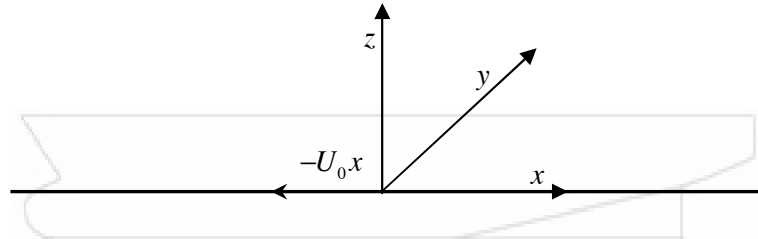


Figure I-3 Navire avançant en eau calme

L'eau est un fluide visqueux considéré comme incompressible. L'écoulement dans l'eau est donc régi par les équations de Navier-Stokes en fluide incompressible.

On a :

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla \vec{U} \right) = -\rho g \vec{e}_z + \text{div} \underline{\underline{\sigma}}$$

avec :

$$\underline{\underline{\sigma}} = (-p + \lambda \text{div} \vec{U}) \underline{\underline{1}} + 2\mu \underline{\underline{D}}$$

où :

$$\underline{\underline{D}}_{ij} = \frac{1}{2} (\partial_i u_j + \partial_j u_i) \quad \text{et} \quad \mu = \nu \rho$$

$\mu$  viscosité dynamique

Du fait de l'incompressibilité de l'eau et en la supposant homogène, l'équation dans le fluide devient :

Équation I-11

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla \vec{U} = -g \vec{e}_z - \frac{1}{\rho} \cdot \nabla p + \nu \Delta \vec{U}$$

L'Équation I-11, qui régit l'évolution de la quantité de mouvement dans le fluide, est complétée par l'hypothèse d'écoulement incompressible qui se traduit par la condition de divergence, nulle pour le champ de vitesse dans tout l'espace fluide.

Équation I-12

$$\text{div} \vec{U} = 0$$

On décrit maintenant les conditions aux limites du domaine fluide. Les frontières du domaine fluide sont constituées d'une part de la carène (surface de la partie immergée du navire), de la surface libre (interface entre la mer et l'atmosphère) et des frontières du bassin océanique (fond et côtes) considérées la plupart du temps comme étant à l'infini. Sur la carène, on a une condition d'adhérence exprimant le fait que l'eau reste accrochée au bateau en raison de sa viscosité. Si on appelle  $\Gamma$  la carène, on a, pour tout point  $M$  :

Équation I-13

$$\vec{U} = 0$$