

**Travaux Personnels Encadrés (TPE) 2005/2006**  
**« Modèles, Modélisation »**

## La modélisation dans l'architecture navale

du modèle réduit ...



Le modèle ....

... au bateau réel



... le paquebot « Le France »

**Andresen Philip et Chatelain Théophile**  
**1 S 1, Lycée Charles de Gaulle, Compiègne**

# Plan

<b>PLAN.....</b>	<b>2</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>3</b>
<b>1. L'ENJEU DE LA MODELISATION .....</b>	<b>5</b>
<b>2. LES MODELES DANS LES BASSINS D'ESSAIS DE CARENES.....</b>	<b>6</b>
2.1 Un exemple : le bassin de Duisburg.....	7
2.2 Le modèle : sa construction.....	7
2.3 Les essais .....	8
<b>3. LES ETAPES DU MODELE AU REEL .....</b>	<b>10</b>
3.1 L'évolution des savoirs en construction navale.....	10
3.2 La démarche actuelle : les données du problème.....	11
3.3 Les composantes de la résistance à l'avancement.....	11
3.4 Etape 1 : La résistance de frottement .....	12
3.4.1 La formule de résistance de frottement .....	12
3.4.2 Vitesse et nombre de Froude .....	13
3.4.3 Surface mouillée et homothétie .....	14
3.4.4 Coefficient de frottement et nombre de Reynolds.....	16
3.5 Etape 2 : Résistance résiduaire.....	18
3.5.1 La loi de similitude .....	18
3.5.2 Le coefficient de bloc .....	19
3.5.3 Calcul du déplacement.....	19
3.6 Résistance totale du réel.....	20
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>22</b>

## Introduction

Dans toutes les civilisations, pour se déplacer sur l'eau, l'homme a su construire des embarcations. Du tronc d'arbre creusé à la caravelle, en passant par la trière grecque et le drakkar viking, les performances relevaient des découvertes empiriques. Mais avec la seconde révolution industrielle pendant la 2<sup>ième</sup> moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, l'introduction des sciences dans l'industrie a largement contribué aux progrès qui ont permis de construire toujours plus performant et plus grand.

On pourrait penser que l'apport des sciences, en particulier de l'informatique, permet aujourd'hui de construire des bateaux uniquement d'après des formules mathématiques et physiques. Or, les principaux paramètres à considérer sont trop variables en raison de la complexité du comportement du bateau, « édifice » non figé mais mobile, dans le milieu marin, environnement spécifique en perpétuel mouvement et souvent hostile (différents états de l'eau). Alors comment les architectes navals procèdent-ils pour parvenir à construire des bateaux au fonctionnement optimal ?

Les compétences en ingénierie ne vont pas sans les moyens d'essais. Or, on ne peut pas envisager de faire des essais grandeur réelle pour des bateaux aujourd'hui souvent gigantesques et/ou à très haut budget. Alors on utilise la modélisation. Des tests sur modèles sont réalisés dans des bassins d'essais.

### **En quoi le modèle est-il un outil de compréhension dans la construction navale?**

Après avoir exposé l'enjeu de la modélisation nous verrons le travail sur les modèles dans les bassins d'essais de carènes. Puis nous prendrons un exemple précis pour expliquer les différentes étapes du modèle au réel qui permettent de déterminer la résistance totale à l'avancement du bateau réel à partir de la mesure de la résistance totale à l'avancement du modèle dans le bassin d'essai.

## Définitions des termes navals

**Bateau**, nom générique des embarcations de toutes sortes et de toutes dimensions susceptibles de naviguer sur les voies d'eau intérieures ou en mer.

**Carène**, une partie du bateau. C'est l'ensemble des lignes longitudinales et transversales qui forment le dessin de la coque dans sa partie immergée. Elle varie en fonction du chargement.

**Déplacement** (noté  $\nabla$ ) le volume de l'eau déplacée par sa carène (unité en  $m^3$ ). Ne pas confondre avec la poussée d'Archimède  $\Delta$  qui est une force dirigée verticalement vers le haut (unité en N).

**Emergements (= appendices)**, appareils fixés à l'extérieur de la coque sur la partie mouillée y compris les déformations volontaires (« bosses ») de la coque. Ils sont nécessaires pour la sécurité, la manœuvrabilité et la stabilité.

**Forme du bateau**, définition des caractéristiques de la forme, exprimée par le « coefficient de bloc »  $c_b = \nabla / (L \times B \times T)$ , c'est-à-dire le rapport entre le volume immergé  $\nabla$  et celui du parallélépipède rectangle qui le contient jusqu'à la ligne d'eau.

**Longueur** (noté  $L_{WL}$ ), mesurée au niveau de la ligne d'eau (appelée aussi ligne de flottaison = water line) qui correspond au déplacement considéré.

**Surface mouillée** (noté  $S$ ), partie sous la ligne d'eau.

**Tirant d'eau** (noté  $T$ ), hauteur de la partie immergée du bateau.

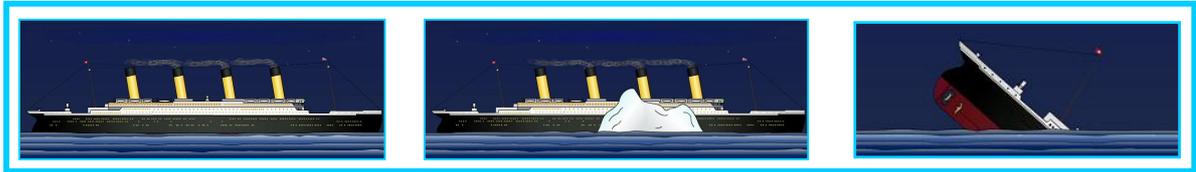
## Abréviations

Remarque : les abréviations suivent les recommandations de l'ITTC (International Towing Tank Conference)

B	Largeur à la flottaison	m
$c_b$	Coefficient de bloc	-
$c_f$	Coefficient de frottement	-
g	Gravité	$m/s^2$
FN	Nombre de Froude	-
$L_{WL}$	Longueur à la flottaison	m
Ry	Nombre de Reynolds	-
R	Résistance	N
S	Surface mouillée	$m^2$
T	Tirant	m
V	Vitesse	$m/s$
$\nabla$	Déplacement	$m^3$
$\rho$	Masse volumique du fluide	$kg/m^3$

# 1. L'enjeu de la modélisation

Un bateau réussi est un bateau qui non seulement répond aux critères de rapidité et d'efficacité requis mais aussi qui arrive à bon port. Il est préférable par exemple d'éviter ceci :



L'armateur définit son programme de bateau qui sera réalisé par le chantier constructeur. C'est l'architecte naval qui en assure la conception. Avant la construction du bateau dans le chantier naval ( phase 4 ) on peut décomposer le projet naval en 3 phases :

Phase 1 : l'armateur définit son cahier des charges aussi précisément que possible en indiquant les caractéristiques techniques, en particulier : dimensions, vitesse, matériaux, capacité, de même que son budget.

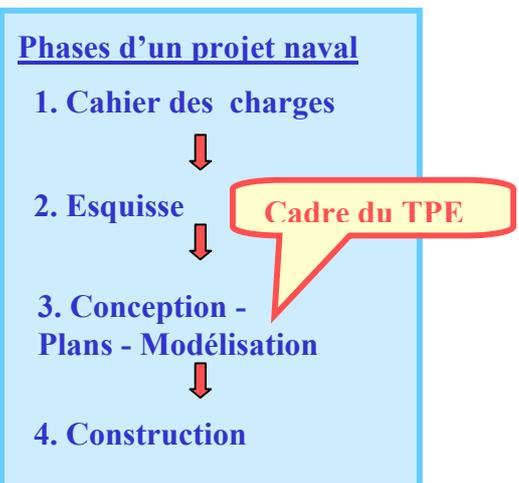
Phase 2 : l'architecte naval, en concertation avec l'armateur, étudie le cahier des charges et crée une esquisse. Il utilise pour cela ses réalisations passées, les documents techniques sur des bateaux similaires et l'expérience de techniciens constructeurs.

Phase 3 : l'architecte naval entreprend la conception du bateau, c'est-à-dire la production des plans détaillés pour la construction :

- Le plan de construction détaillant l'ensemble des composants du bateau.
- Le plan de formes en trois dimensions. Il est aidé dans ce travail par des logiciels informatiques puisque les problèmes de la conception d'un bateau découlent tous plus ou moins directement de sa géométrie, c'est-à-dire des formes avec deux problèmes majeurs : **le tracé** et non des moindres **le calcul des carènes**.

En effet la **carène** est la partie immergée de la coque, elle constitue le **flotteur**. Elle est donc l'**élément majeur**. Le calcul de la carène consiste à évaluer les principales caractéristiques du flotteur afin d'apprécier les conditions de **flottabilité** et de **stabilité** (hydrostatique) puis les performances du futur bateau, donc son **comportement à l'eau** et de manière plus complexe à la mer (hydrodynamique).

On pourrait penser qu'il suffit à l'architecte naval d'appliquer ses connaissances de la « théorie du navire ». (hydrostatique et hydrodynamique) pour obtenir un tracé idéal et des résultats de calculs fiables. Or, contrairement à une maison de type classique les espaces (intérieurs et extérieurs) d'un bateau ne sont pas délimités par des murs verticaux. Les espaces doivent épouser des formes qui peuvent être complexes comme particulièrement celle de la coque donc de la carène.

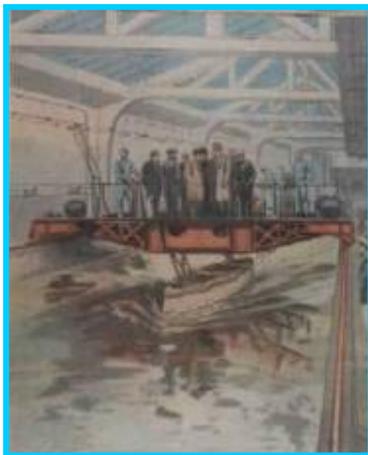


De plus, un bateau est un « engin » mobile dans un environnement en mouvement. Parmi les caractéristiques les plus difficiles à apprécier il y a la résistance de vagues, les accélérations, le tangage et l'influence des appendices comme l'hélice. Si les mouvements et les comportements probables du bateau à l'eau peuvent être définis et calculés à l'aide de formules, la variabilité de l'environnement est telle que certains paramètres ne peuvent être étudiés qualitativement et/ou quantitativement que par des essais sur modèles. **L'architecte fait vérifier par des essais de remorquage et d'autopropulsion sur modèle réduit si les formes de la coque, la puissance de l'appareil propulsif et l'hélice** prévues permettront de réaliser au réel les performances inscrites au contrat. Ces essais sont pratiqués dans des bassins spéciaux équipés d'instruments de mesure adéquats : **les bassins d'essais de carènes**.

**Il est clair que, non pour des bateaux construits en série mais pour des prototypes, des projets spéciaux ou à haut budget comme par exemple les voiliers de la coupe de l'Amérique et autres bateaux de compétition, la phase de modélisation dans les bassins de carènes est une étape clef.**

Voyons comment se présentent et fonctionnent les bassins d'essais de carènes avec les modèles.

## 2. Les modèles dans les bassins d'essais de carènes



Le 1<sup>er</sup> bassin à Paris, 1906

Des bassins existent dans tous les pays ayant de grands chantiers navals et/ou des centres de recherche navale. On compte environ 35 bassins d'essais dans le monde ce qui souligne l'importance de leur travail.

Dès la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, aux Etats Unis, l'Amiral **D. W. Taylor** crée un bassin d'essais de carènes afin de tester les premiers modèles de navires militaires. D'autres pays suivent cette démarche.

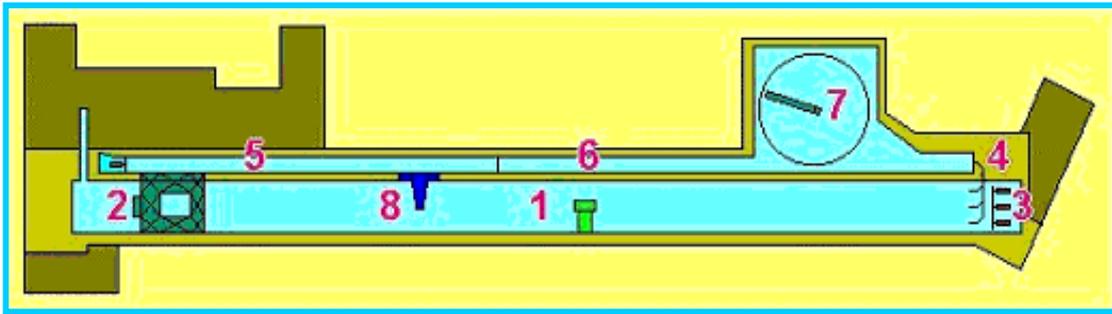
En Europe, le premier bassin voit le jour en Allemagne en **1901** à **Berlin**, puis d'autres sont construits à Potsdam, Hambourg et Duisburg. En France, le premier bassin est construit en **1906** à **Paris** ; il est transféré en 1992 à Val-de-Reuil, près de Rouen.

Là il suit sa mission de travail et recherche mais exclusivement militaire. Il en existe un autre à Nantes. Et en Hollande, depuis plusieurs années, le bassin d'essais de l'université de Delft s'est spécialisé dans les essais de carènes de voiliers de course.

Aujourd'hui, c'est le « David Taylor Model Basin » (aux USA), qui est le plus grand bassin d'essais mondial. Il ne sert pratiquement qu'aux travaux secrets de la marine.

Vu que le bassin d'essais de Val-de-Reuil n'est pas ouvert au public nous prenons l'exemple du bassin d'essais de Duisburg.

## 2.1 Un exemple : le bassin de Duisburg



Bassin d'essais de carènes à Duisburg/Allemagne, vu du dessus

### Légende :

- |                           |                         |                         |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1. Grand bassin 190 x 6 m | 4. Directeur de courant | 7. Bassin circulaire    |
| 2. Pont tracteur          | 5. Petit Bassin profond | 8. Pont tracteur rapide |
| 3. Générateur de vagues   | 6. Petit bassin         |                         |

Le grand bassin d'essais (1) de Duisburg consiste en un canal d'eau de 190 sur 6m. Mais d'un centre d'essai à l'autre la longueur varie de 80 et 900m et la largeur de 5 à 15m avec une profondeur comprise entre 1 et 7m. Des rails sont installés des deux côtés du grand bassin. Sur ces rails on fait rouler un pont (2) sous lequel on fixe le modèle à tester et les instruments de mesure. Le pont du centre de Duisburg en Allemagne a une masse de 30 tonnes et les modèles en bois peuvent avoir une masse de 500kg. La masse énorme du pont est donc au moins 60 fois plus grande que la masse du bateau à tester. Une telle masse permet d'éviter que le bateau vibre lors de l'essai et crée des effets indésirables pour les mesures.

Il est possible de faire varier la hauteur du niveau d'eau et un système mécanique peut produire des vagues (3). Cela permet de tester les bateaux sous différentes conditions, soit en eau calme, soit sur houle simulée. Deux types de tests peuvent être réalisés :

- dans le grand bassin (1) avec un mouvement rectiligne (photo de droite),
- dans le bassin circulaire pour des manœuvres (7).



Bassin d'essais de Duisburg

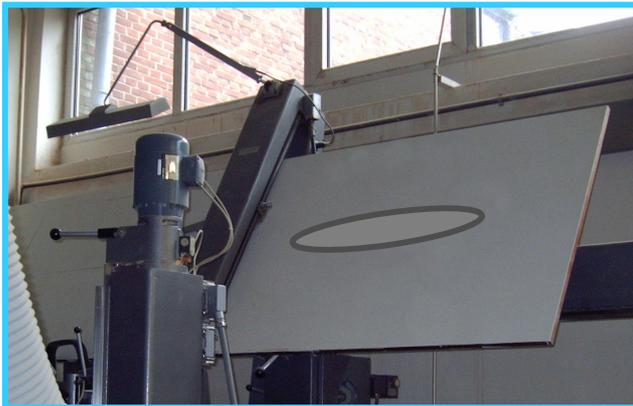
Les modèles sont non seulement testés mais aussi construits dans les bassins d'essais.

## 2.2 Le modèle : sa construction

Un modèle est une réplique à échelle réduite du bateau commandé par l'armateur. Les modèles de bateaux sont fabriqués en paraffine ou en bois. Ce bois est l'abachi, originaire des côtes du Golfe de Guinée. C'est un bois exotique à gros vaisseaux, sans nœuds et facile à travailler. Paraffine et bois sont les deux matériaux les plus rapides et les plus économiques à utiliser. Toutefois, le prix pour la réalisation d'un modèle en bois de 6m est compris entre 10 000 et 15 000 €.

Les centres d'essais de carènes utilisent différentes méthodes pour le design et la réalisation du bateau modèle :

- rarement la technique CNC (Computer Numerical Control), une méthode qui coûte cher à installer et qui n'est rentable qu'avec une utilisation fréquente,
- une semi-automatisée (voir photos).



**Lecteur avec plan de creusement**



**Fraise, Banc de travail, Duisburg**

Le « plan de creusement », le plus souvent à l'échelle 1/10, est tracé et fixé sur le tableau d'une fraise sous le bras du « lecteur » (voir photo de gauche). Un bloc de poutres collées, est monté sur le banc de travail de la fraise. Selon le plan de creusement, la fraise creuse le bloc pour former l'intérieur du modèle (voir photo de droite, mais sans bloc). Ensuite l'extérieur du bateau est travaillé, le gros-œuvre avec une machine, la finition à la main. Le modèle est verni et équipé d'un ou deux appareil(s) de mesure de résistance (voir photos a. et b. ). A l'issue de ce travail on obtient un modèle « nu » : l'extérieur ne présente aucun émergement. Le modèle est alors prêt pour les essais.

### 2.3 Les essais

L'expérimentation est divisée en **deux phases** :

- La première avec un **bateau « nu »** pour mesurer la résistance totale à l'avancement du modèle et étudier le comportement du bateau.
- La deuxième phase prend en compte le fait que le **bateau** réel est « **équipé** » (sous la ligne d'eau) de différents émergements. Les plus connus sont l'hélice, la quille, les stabilisateurs, les « sorties des sonars », la dérive, le safran. Les éléments extérieurs sont indispensables pour le bon fonctionnement et la sécurité d'un navire,



**Stock d'hélices pour les modèles (Duisburg)**

certains sont obligatoires. Chaque élément a son importance pour optimiser un comportement sécurisé. Il faut donc aussi effectuer des essais avec ces appendices.

Le modèle fixé sous le pont comme sur la photo a. est prêt pour les essais.

Prendrons un exemple d'essai : la mesure de la résistance à l'avancement d'un modèle « nu ».



a. Un modèle tracté dans le bassin

La vitesse maximale du pont est de  $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  utilisée en priorité pour les petits modèles. Un grand modèle est tiré à une vitesse de  $6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Pour obtenir une vitesse de  $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , le pont doit avoir une accélération comprise entre  $1000$  et  $2000\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  (donnée du bassin de Duisburg) pour arriver rapidement à la vitesse d'essai et pouvoir garder un maximum de longueur de bassin réservée aux mesures d'essais. La vitesse est constante pour chaque essai.



b. Barres avec extensomètres

On peut voir sur la photo a. , de profil, le système de mesure de la résistance à l'avancement du modèle.

Un **bras de mesure** (ou parfois deux, voir photo b. ) est fixé à une extrémité au pont tracteur et à l'autre extrémité au fond du modèle. Quatre **capteurs** sont collés sur ce bras. Ils sont réalisés par des **jauges de contrainte** (extensomètres) qui sont constituées d'un fil très fin collé sur un support mince. Le fil est aligné selon la

direction dans laquelle on souhaite mesurer la déformation. Ce fil subit les mêmes déformations que la surface sur laquelle la jauge est collée. En conséquence ce fil s'allonge ou se contracte ce qui engendre une variation de la résistance électrique.

**La déformation du bras est due à la résistance du bateau à l'avancement. C'est donc cette résistance à l'avancement qui est mesurée.**

Le modèle est tracté plusieurs fois, à des vitesses différentes, et à chaque essai la résistance qu'oppose le modèle à l'avancement est mesurée.

**C'est à partir de cette résistance totale à l'avancement du modèle qu'on calcule la résistance totale à l'avancement du bateau réel.** La connaissance de la résistance totale à l'avancement est essentielle pour permettre à l'architecte naval de définir correctement l'ensemble de l'appareil propulsif d'un futur bateau et les performances optimales qui en découleront.

La démarche en bassin d'essais pour établir la valeur de la résistance totale à l'avancement du bateau réel est une combinaison des résultats des tests et de l'application de formules, établies dès le XIX<sup>e</sup> siècle par les scientifiques Froude et Reynolds et complétées de nos jours par des coefficients donnés par l'ITTC (International Towing Tank Conference).

Prenons maintenant un exemple précis pour comprendre les étapes qui mènent au réel à partir de l'outil modèle. Il faut savoir qu'aucune formule permet de passer directement de la résistance totale mesurée pour le modèle à la résistance totale du réel.

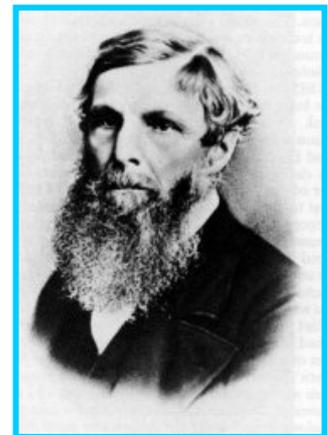
### 3. Les étapes du modèle au réel

Le modèle n'a pas été de tous temps un outil de compréhension de la construction navale.

#### 3.1 L'évolution des savoirs en construction navale

De la préhistoire jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle, les bateaux de petite et de grande taille, les bateaux de marchandises ou les bateaux de guerre sont tous conçus et bâtis par des constructeurs qui appliquent l'expérience des générations précédentes. Les savoirs se transmettent de père en fils ou par alliance et l'on cultive le secret. En se protégeant de l'extérieur, on préserve un patrimoine économique et culturel au sein d'une parenté plus ou moins élargie. Toutefois cela ne veut pas dire immobilisme technique. La construction navale évolue. Les volumes avant et arrière de la coque ne sont plus laissés au « coup d'œil » du maître-charpentier sur le chantier. On passe du dessin au sol en grandeur nature du contour aux plans de projection dessinés à échelle réduite. En 1741 est créée l'école de Paris qui intègre les acquis de la physique mathématique. L'industrialisation des ateliers, l'idée de la fabrication en série, l'avancement des mathématiques et de la physique, et la recherche systématisée permettent aux architectes navals d'établir un métier sur des bases scientifiques, reproductibles et mesurables.

Durant les années 1850-1870, en Angleterre, **William Froude** fait les premiers essais de mesure de la résistance d'un rigide tiré dans l'eau. Il utilise une planche tirée dans un bassin de 100m de longueur. A chaque essai il modifie la vitesse de l'avancement et note la résistance à l'avancement puis trace des courbes de résistance. Il constate que la composante la plus importante de la résistance totale est la résistance de frottement de l'objet dans l'eau. En ne prenant en compte que la longueur de l'objet et la vitesse d'avancement Froude observe une régularité. Il en déduit une formule : le nombre de Froude.



**William Froude**



**Osborne Reynolds**

**Osborne Reynolds**, ingénieur et physicien irlandais fit d'importantes contributions à la dynamique des fluides, la plus notable étant l'introduction du nombre de Reynolds en 1883 qui prend en compte la viscosité de l'eau dans le calcul de la résistance à l'avancement.

Puis, les recherches en Mathématiques et Physique s'intensifient et des universités construisent leur bassin d'essai de carènes.

### 3.2 La démarche actuelle : les données du problème

Pour comprendre comment aujourd'hui s'enchaînent les étapes « essais – calculs » entre modèle et réel nous allons prendre l'exemple d'un modèle dont la longueur de carène est une réduction de celle du bateau réel (cargo de 180m de longueur). On fixe la longueur du modèle en fonction des conditions techniques du bassin. Le modèle aura une longueur (L) de 6m. Les autres dimensions, largeur (B) et tirant (T), sont calculées à partir des rapport de proportions données par l'organisme mondial d'agrégation de l'architecture navale, « International Towing Tank Conference » (= ITTC), selon le type du bateau. Dans le cas de notre exemple  $L/B = 7,25$  et  $B/T = 2,3$ . Ce qui donne pour le modèle à partir de  $L=6\text{m}$  ;  $B=0,83\text{m}$  ;  $T=0,36\text{m}$ . Ce modèle est tracté une fois à une vitesse constante ( $= 1,61 \text{ m.s}^{-1}$ ) dans le grand bassin d'essais.

L'objectif est de déterminer la résistance totale du réel à partir de la mesure (20N) de la résistance totale à l'avancement du modèle en bassin d'essais (cf. 2.3).

Les apports de Froude servent de base à cette démarche, et tout d'abord ceux concernant les composantes de la résistance à l'avancement.

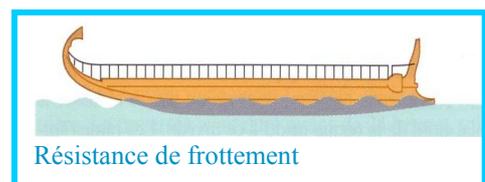
### 3.3 Les composantes de la résistance à l'avancement

Lorsqu'un bateau progresse dans l'eau, sa vitesse d'avancement est limitée par la capacité qu'il a de s'opposer à la résistance de l'eau. On sait que pour une voiture sa vitesse est stabilisée lorsque la force de propulsion équilibre l'ensemble des résistances à l'avancement. De même pour une vitesse donnée la force qui tend à déplacer le bateau est égale et opposée à sa résistance à l'avancement. Il s'établit un équilibre entre la force de propulsion et la résistance.

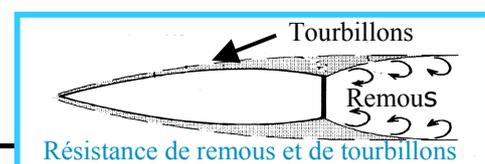
Puisque la force de propulsion et la résistance à l'avancement sont en équilibre, Froude a analysé et catégorisé les composantes de la résistance à l'avancement d'un bateau dans des expériences avec des modèles. Il a identifié quatre types de résistance, appelées les composantes de la résistance à l'avancement. Elles représentent les résistances qui agissent sur chaque bateau, indépendamment de sa forme et de sa taille.

Les quatre composantes de la résistance totale à l'avancement (noté  $R_T$ ) d'un bateau (modèle ou réel) ne sont pas indépendantes mais s'influencent réciproquement.  $R_T$  est décomposée ainsi :

1. La **résistance de frottement** (notée  $R_F$ ), c'est la résistance créée par le frottement et les turbulences dans la zone perturbée au voisinage de la carène. Elle est prédominante à faible vitesse et constitue la résistance principale de tous les bateaux, avec un avancement classique.

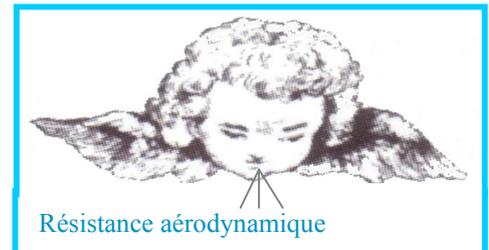
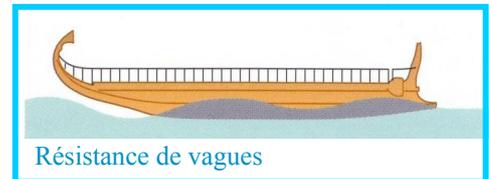


2. La **résistance de remous** (notée  $R_R$ ), c'est la résistance de remous et de tourbillons liés à des



décollements des veines fluides au niveau de la carène. C'est une conséquence du frottement plus important qui s'établit autour du bateau quand sa vitesse augmente.

3. La **résistance de vagues** (notée  $R_W$ ), c'est la résistance de vagues, traduisant la formation d'un système de vagues d'accompagnement.
4. La **résistance aérodynamique** (notée  $R_{AA}$ ), prend en compte toutes les résistances « hors eaux » mais avec peu d'importance pour la résistance totale et donc négligeable.



$$R_T = R_F + R_R + R_W + R_{AA}$$

$R_{AA}$  étant négligeable :

$$R_T = R_F + R_R + R_W$$

On appelle la somme des deux composantes  $R_R$  et  $R_W$  la résistance directe  $R_D$  ou résistance résiduaire, qui est de plus petite importance que la résistance de frottement  $R_F$ .

$$R_R + R_W = R_D$$

d'où :

$$R_T = R_F + R_D$$

$R_T$  est la résistance totale :  
pour le modèle elle est mesurée pendant les essais,  
pour le réel elle fait l'objet du travail suivant.

L'étude de  $R_T$  se fait en deux étapes :

Etape 1 :  $R_F$  avec des formules physiques et mathématiques.

Etape 2 :  $R_D$ .

### 3.4 Etape 1 : La résistance de frottement

#### 3.4.1 La formule de résistance de frottement

La **résistance de frottement** est définie d'après des expérimentations et en accord avec l'organisme mondial d'agrégation de l'architecture navale « International Towing Tank Conference » (= ITTC), par la formule :

$$R_F = (1/2) \times \rho \times S \times V^2 \times c_f$$

avec

- $\rho$  = Masse volumique de l'eau ( $\text{kg/m}^3$ )
- $S$  = Surface mouillée ( $\text{m}^2$ )
- $V$  = Vitesse ( $\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$ )
- $c_f$  = coefficient de résistance de frottement (sans unité)

Le calcul de  $R_F$  fait intervenir la vitesse, la surface mouillée, et le coefficient de frottement.

### 3.4.2 Vitesse et nombre de Froude

Chaque bateau en mouvement est soumis à des résistances de frottement liées à sa vitesse et à sa longueur.

$$F_N = \frac{V}{\sqrt{g \times L_{WL}}}$$

Avec

- $F_N$  le nombre de Froude (sans unité)
- $V$  la vitesse ( $\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$ )
- $g$  la gravité ( $9,81 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-2}$ )
- $L_{WL}$  la longueur à la flottaison (m), WL = water line.

Le nombre de Froude n'entre pas directement dans le calcul de la résistance de frottement mais il permet de calculer la vitesse du bateau réel uniquement à partir de deux paramètres : la vitesse de l'essai et la longueur du modèle.

Pour le modèle, on connaît la vitesse à laquelle on le fait avancer de même que sa longueur,  $g$  étant une constante on calcule  $F_N$ , le nombre de Froude.

Pour le réel, on connaît la longueur définie par l'armateur. Avec  $F_N$  du modèle on peut calculer la vitesse du réel en utilisant cette même valeur du nombre de Froude.

#### Calcul du nombre de Froude et à partir de celui-ci calcul de la vitesse du réel

Donnée s	Description	Valeurs - du Modèle	Valeurs - du Réel	Unités
$L_{WL}$	Longueur	6	180 (défini par l'armateur)	m
$V$	Vitesse	1,61	cherchée	m/s
$g$	Gravité	9,81	9,81	$\text{m/s}^2$
Calculs				
Etape 1	Nombre de Froude	$F_N = \frac{V}{\sqrt{g \times L_{WL}}}$ $F_N = \frac{1,61}{\sqrt{9,81 \times 6}}$ $F_N = 0,21$		

Etape 2	Vitesse en m/sec		$V_S = F_N \times \sqrt{g \times L_R}$ $V_S = 0,21 \times \sqrt{9,81 \times 180}$ $V_S = 8,824$	m/s
	Vitesse en nœuds	1 nd = 0,5144 m/s $V_M = 1,61 / 0,5144$ $V_M = 3,13$	1 nd = 0,5144 m/s $V_R = 8,824 / 0,5144$ $V_R = 17,15$	nd

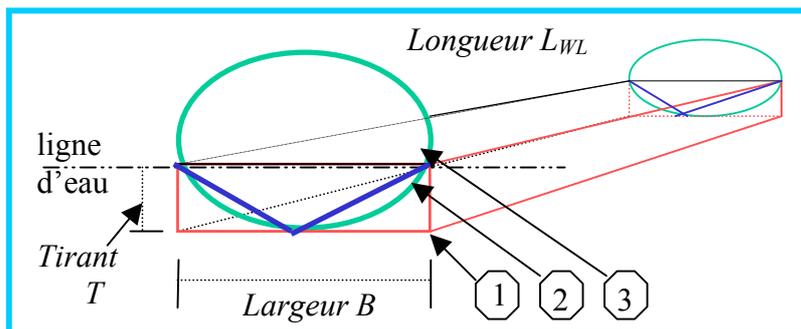
**Remarque :**

1. Les valeurs en bleu sont données
2. La vitesse en nœuds est utilisée de préférence en navigation maritime.

### 3.4.3 Surface mouillée et homothétie

La **surface mouillée** est la partie immergée de la carène. La surface mouillée est une cause importante de la résistance à l'avancement d'un navire, essentiellement dans l'eau à surface libre, c'est à dire avec une forte hauteur d'eau, une faible vitesse de courants et sans turbulences.

Pendant la phase des essais avec des modèles l'approche est la suivante.



Puisque les différents types de bateaux ont des sections différentes, alors différentes formules de géométrie s'appliquent.

**Coupe de trois coques différentes**

On peut assimiler la coupe d'une péniche (1) à un rectangle, la coupe d'un cargo (2) à une demi ellipse et la coupe d'un cuirassier (3) à un triangle.

On calcule la surface mouillée pour (1) en appliquant la formule de la surface d'un parallélépipède rectangle, pour (2) celle d'une demi-ellipse multipliée par deux et par la demi surface développée. Pour (3) on applique la formules du prisme droit à base triangulaire. Il est entendu que chaque forme ne prend en compte que la surface en contact avec l'eau.

**La surface mouillée du modèle est donnée par le centre d'essais ( $S=4m^2$ ), elle est la base du calcul de la surface mouillée du réel.**

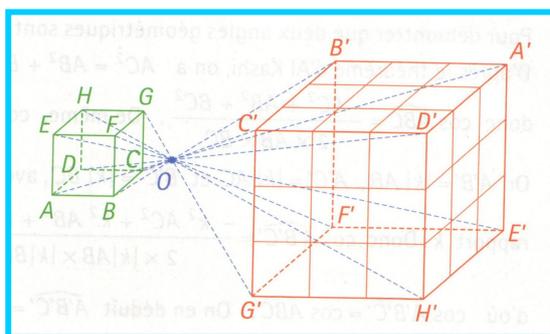
### Calcul de la surface mouillée du réel

L'**homothétie de l'espace** est une transformation qui à tout point M associe le point M' défini par

$$\overrightarrow{OM'} \rightarrow k \cdot \overrightarrow{OM}$$

avec un réel positif **k**, appelé rapport, pour la transformation du modèle au réel.

L'homothétie conserve les angles, l'image d'une droite reste une droite, l'image d'un cercle reste un cercle. En conservant la forme entre le modèle et le réel et en ne changeant que le rapport, on travaille sur deux corps « semblables ». L'homothétie de rapport k multiplie les longueurs par |k|, les aires par  $k^2$  et les volumes par  $|k|^3$ .



**L'homothétie de l'espace**

Le modèle du bateau est façonné selon les formes et proportions du navire à construire (un cargo). On peut dire que le modèle et le bateau sont géométriquement semblables. La loi de l'homothétie peut donc être appliquée.

$$k = \frac{OM'}{OM} \quad \text{avec } OM' = \text{longueur du réel} \quad \text{et } OM = \text{longueur du modèle.}$$

### Calcul de la surface mouillée du réel

Donnée	Description	Valeurs - du Modèle	Valeurs - du Réel	Unités
$L_{WL}$	Longueur	6	180 (défini par l'armateur)	m
S	Surface mouillée	4	cherchée	$m^2$
Calculs	L'application de la loi de homothétie donne le rapport géométrique k avec lequel on calcule la surface mouillée du réel.			
	Rapport modèle/réel	$k = L_{réel} / L_{Mod}$ $k = 180 / 6$ $k = 30$		sans
	Surface mouillée	$S_{Mod}$ est donné	$S = k^2 \times S_{Mod}$ $S = 30^2 \times 4$ $S = 3600$	$m^2$

#### Remarque :

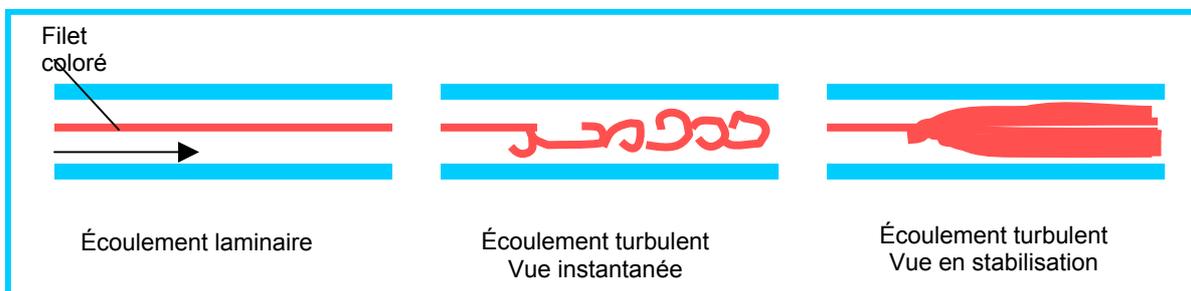
- Les valeurs en bleu sont données

Il nous reste maintenant à calculer le coefficient de frottement cf. On le calcule à partir du nombre de Reynolds, lui-même calculer à partir des paramètres du modèle.

### 3.4.4 Coefficient de frottement et nombre de Reynolds

La résistance interne d'un fluide à s'écouler est appelée viscosité cinématique. Le mot cinématique fait référence à la vitesse et au mouvement. Le bateau est destiné à se déplacer dans un fluide : l'eau de mer.

C'est la viscosité cinématique qui est la cause de la résistance hydrodynamique de l'eau sur la surface du bateau. Le physicien Osborne Reynolds a réalisé des expériences en 1883 sur l'écoulement d'un fluide dans une conduite cylindrique (voir dessin suivant). Il augmente progressivement la vitesse du fluide et met en évidence l'existence de deux régimes d'écoulement : **laminaire** et **turbulent**.



L'écoulement est d'abord laminaire, puis à partir d'une vitesse plus élevée, il devient turbulent. A grande vitesse, la présence de tourbillons dans l'écoulement crée une plus grande résistance. Un écoulement laminaire crée très peu de résistance : la trajectoire des particules est confondue avec les lignes de courant. Par contre en phase de stabilisation, l'écoulement turbulent atteint un niveau très élevé de résistance.

En utilisant des fluides divers (viscosités différentes), en faisant varier le débit, la vitesse et le diamètre de la canalisation, Reynolds a montré que le paramètre qui permettait de déterminer si l'écoulement est laminaire ou turbulent est un nombre sans unité, ce nombre a été appelé nombre de Reynolds.

Le nombre de Reynolds est défini par

$$Ry = (V \times L_{WL} / 1,08) \times 10^6$$

avec

Ry = le nombre de Reynolds (sans unité)

V = la vitesse en m/s

L<sub>WL</sub> = la longueur mouillée de la carène en m

Données	Description	Valeurs - du Modèle	Valeurs - du Réel	Unités
L <sub>WL</sub>	Longueur	6		m
V	Vitesse	1,61		m/s

	Nombre de Reynolds	$Ry = (V \times L_{WL} / 1,08) \times 10^6$ $Ry = (1,61 \times 6 / 1,08) \times 10^6$ $Ry = 8,9 \times 10^6$		sans
--	--------------------	--	--	------

Le nombre de Reynolds entre dans le calcul du coefficient de frottement.

$$c_f = \frac{0,075}{(\log Ry - 2)^2}$$

avec

$c_f$  = coefficient de résistance de frottement (sans unité)

$Ry$  = le nombre de Reynolds (sans unité)

log = logarithme décimal (log 10 = 1, log 100 = 2)

Données	Description	Valeurs - du Modèle	Valeurs - du Réel	Unités
	log Ry	$\log Ry = \log(8,9 \times 10^6)$ $\log Ry = 6,95$		sans
Ry	Coefficient de frottement	$c_f = \frac{0,075}{(\log Ry - 2)^2}$ $c_f = \frac{0,075}{(6,95 - 2)^2}$ $c_f = 3,06 \times 10^{-3}$		sans

Nous avons maintenant tous les paramètres pour calculer  $R_F$  du modèle et  $R_F$  du réel.

Données	Description	Valeurs - du Modèle	Valeurs - du Réel	Unités
$\rho$	Masse volumique de l'eau de mer	1025	1025	$\text{Kg.m}^{-3}$
S	Surface mouillée	4	3600	$\text{m}^2$
V	Vitesse	1,61	8,824	$\text{m.s}^{-1}$
$c_f$	coefficient de frottement	$3,06 \times 10^{-3}$	$3,06 \times 10^{-3}$	--

Résistance de frottement	$R_F = \rho / 2 \times S \times V^2 \times c_f$ $R_F = 1025 / 2 \times 4 \times$ $\dots 1,61^2 \times 3,06 \times 10^{-3}$ $R_F = 16$ $R_F = 16 \times 10^{-3}$	$R_F = \rho / 2 \times S \times V^2 \times c_f$ $R_F = 1025 / 2 \times 3600 \times$ $\dots 8,824^2 \times 3,06 \times 10^{-3}$ $R_F = 439\ 687$ $R_F = 440$	N kN
--------------------------	---	---	---------

Ce sont les paramètres du modèle qui nous ont permis de calculer  $R_y$  et  $c_f$  indispensables pour le calcul de  $R_F$  du modèle. C'est donc à partir du modèle que nous avons pu trouver la  $R_F$  du réel.

Calculons maintenant la résistance résiduaire  $R_D$  avec les données précédentes et deux valeurs supplémentaires de la géométrie du modèle.

### 3.5 Etape 2 : Résistance résiduaire

La résistance résiduaire n'est pas accessible par des formules. Elle est calculée sur la base des mesures prises pendant les essais et sur ses paramètres géométriques du bateau.

Pour calculer la résistance résiduaire du modèle il suffit de déduire la résistance de frottement de la résistance totale mesurée pendant les essais.

$$R_D = R_T - R_F$$

#### 3.5.1 La loi de similitude

Pour le réel on applique la loi de similitude : pour deux carènes géométriquement semblables au même nombre de Froude  $\frac{V}{\sqrt{g \times L}}$ , la résistance résiduaire est proportionnelle au déplacement.

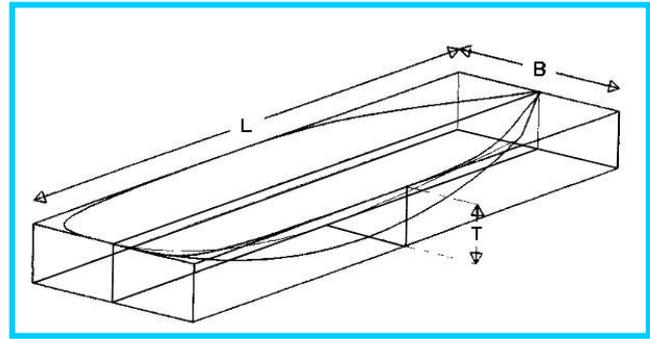
$$\frac{R_{DMod}}{\nabla_{Mod}} = \frac{R_{DRéel}}{\nabla_{Réel}} \quad \text{d'ou} \quad R_{DRéel} = R_{DMod} \times \frac{\nabla_{Réel}}{\nabla_{Mod}}$$

Pour calculer  $R_D$  réel, on connaît  $R_D$  mod ; il faut calculer  $\nabla$  du réel et du modèle. Trois facteurs entrent dans le calcul de la résistance résiduaire du réel : le coefficient de bloc, le déplacement (= volume mouillé) et les résultats des essais avec le modèle. Pour calculer le déplacement il faut connaître le coefficient de bloc  $c_b$ .

### 3.5.2 Le coefficient de bloc

Le coefficient de bloc, appelé coefficient de remplissage, caractérise le remplissage qui exprime le rapport entre le volume immergé  $\nabla$  et celui du parallélépipède rectangle qui le contient entièrement. Il est défini par la formule :

$$c_b = \nabla / (L_{WL} \times B \times T)$$



Le coefficient de bloc

Ce  $c_b$  est défini par l'ITTC selon le type du bateau à la fois pour le modèle et le réel. Pour un cargo  $c_b = 0,783$ .

### 3.5.3 Calcul du déplacement

Le calcul se fait à partir de la formule précédente.

$$\nabla_{\text{modèle}} = c_b (L_{WL} \times B \times T)$$

a) Pour le modèle :

On connaît les mesures géométriques  $L_{WL}$ ,  $B$ ,  $T$ . On calcule le déplacement.

b) Pour le réel :

Il faut calculer les dimensions géométriques à partir des données de l'ITTC qui sont pour un cargo :

$$L_{WL}/B = 7,25 \quad B/T = 2,3$$

On connaît la longueur du cargo réel : 180m, d'où la possibilité de calculer  $B$  et  $T$ .

Connaissant maintenant les dimensions géométriques du réel et  $c_b$ , on applique la formule pour calculer le déplacement du réel.

$$\nabla_{\text{réel}} = c_b (L_{WL} \times B \times T)$$

Nous avons maintenant les trois paramètres :  $R_D$  mod,  $\nabla$  mod et  $\nabla$  réel qui permettent de calculer  $R_D$  réel.

### 3.6 Résistance totale du réel

Nous connaissons maintenant  $R_{D \text{ Réel}}$  et  $R_{F \text{ Réel}}$ , il suffit de les additionner pour trouver la résistance totale

$$R_T = R_F + R_D.$$

L'objectif est atteint.

Données	Description	Valeurs - du Modèle	Valeurs - du Réel	Unités
$L_{WL}$	Longueur	6	180	m
S	Surface mouillée	4	3600	m <sup>2</sup>
$R_T$	Résistance totale	20	voir calcul plus bas	kN
V	Vitesse	1,61	8,824	m/s
<b>Calculs</b>				
B	Largeur	B = 0,83	$L_{WL}/B = 7,25$ B = 180/7,25 B = 24,8	m
T	Tirant	T = 0,36	$B/T = 2,3$ T = 24,8/2,3 T = 10,8	m
Le coefficient de bloc est défini pour un cargo par ITTC avec $c_b = 0,783$				
$c_b$	Coefficient de bloc (modèle=réel)	$c_b = 0,783$ pour cargo	$c_b = 0,783$ pour cargo	
$\nabla$	Déplacement	$c_b = \nabla / (L_{WL} \times B \times T)$ $\nabla =$ 0,783x6x0,83x0,36 $\nabla = 1,41$	$\nabla =$ 0,783x180x24,8x10,8 $\nabla = 37749,4$	m <sup>3</sup>
$R_D$	Résistance résiduaire - Modèle	$R_T = R_F + R_D$ ou $R_D = R_T - R_F$ $R_D = 20 - 16$ $R_D = 4$		N
	Résistance résiduaire - Réel		$\frac{R_{DMod}}{\nabla_{Mod}} = \frac{R_{DRéel}}{\nabla_{Réel}}$ 4 / 1,41 = $R_{DRéel} / 37749,4$ $R_{DRéel} = 83,839$	kN
Calcul de $R_T$	Résistance totale	donnée, voir en haut	$R_T = R_F + R_D$ $R_T = 440 + 84$ <b><math>R_T = 564</math></b>	kN
Calcul de $P_{eff}$	Puissance effective		$P_{eff} = R_T * V$ $P_{eff} = 564 * 8,824$ <b><math>P_{eff} = 4977</math></b>	kW

On constate d'après les résultats que pour un rapport de longueurs  $180/6 = 30$  (réel/modèle) le rapport des résistances totales est de  $564\ 000/20 = 28\ 200$ .

Pour un bateau réel qui est 30 fois plus long que le modèle, la résistance totale est presque 30 000 fois plus grande.

Les essais en bassin et les résultats des calculs sont aussi la base pour le calcul de la puissance requise et ensuite pour la définition de l'espace nécessaire pour loger l'appareil propulsif, les réservoirs de carburant et les agrégats liés.

La résistance à l'avancement du navire et ensuite la puissance requise ont été calculées uniquement à partir de deux sources :

1. une longueur « cible » et la forme du navire définies par l'armateur,
2. des essais en bassin de carènes sur modèle.

Certes des formules géométriques et physique ont permis de trouver les paramètres du réel mais ce sont les mesures effectuées sur le modèle en bassin d'essai qui en ont été les bases indispensables. Cela montre donc bien que le modèle est l'outil de compréhension et la modélisation la condition préalable pour la construction de grands bateaux.

## Conclusion

Nombreux sont ceux qui associent la construction de bateaux comme le « France » aux grands chantiers navals mais rares sont ceux qui imaginent des modèles testés dans les bassins d'essais de carènes. Pourtant comme nous venons de le montrer un « grand » a besoin d'un plus « petit » que lui.

Le modèle est un outil indispensable de compréhension dans la construction navale puisqu'il permet de tester les paramètres très complexes que seuls les essais en bassins peuvent étudier qualitativement et quantitativement. Effectivement les formules établies depuis le XIXe siècle par Froude et Reynolds et plus récemment les coefficients établis par l'ITTC nécessitent des données qui ne peuvent être obtenues que par les tests sur le modèle. Toutefois le procédé étant très coûteux il est réservé à des constructions à haut budget ou requérant une performance maximale comme c'est le cas par exemple pour des voiliers de course. Ce procédé qui peut sembler « artisanal » à l'époque de la haute technologie et de l'informatique a pourtant toute son importance comme en témoignent les trente-cinq bassins d'essais de carènes répartis dans le monde.

Il est aussi intéressant de savoir que ces bassins ne se limitent pas à des essais sur des modèles de bateaux. Avec l'évolution des moyens de transport et en fonction de leurs compétences civiles ou militaires, ils testent des modèles d'avions ou des chars d'assaut grandeur nature. Effectivement tout bâtiment entrant ou pouvant entrer en contact avec l'eau est du ressort de leurs compétences. Des compétences toujours accrues grâce aux constants travaux de recherche puisque ces bassins travaillent en étroite collaboration avec des universités.

## Références

N°	Auteur	Titre	Editeur
1	D.Paulet/D.Presles	Architecture Navale, 1999	Ed. de la Villette, Paris
2	B. Hanouch	Maths 1 <sup>re</sup> S, 2005	Hachette Education
3	Dervin	Notes pratiques sur la résistance des coques, 1946	Librairie nautique de yacht, Paris
4	Collectif	Encyclopédie Universalis, Vol. 2, 1968, p. 599	Paris
5	M. Paul Champion	La France de la technologie, 2003	Ministère des affaires étrangères – Conservatoire National des Arts et Métiers
6	Collectif	Les bateaux	Bibliothèque Pour la Science
7	Durandau	Physique 1S	Hachette Education
8	D.W. Taylor	The speed and power of ship, 1910 et 1998	Soc. of Naval Architects and Marine Engineers, Washington
9	Collectif	Déclic Maths 1S, 2001	Hachette Education
10	Sr Dassié	L'architecture navale	Editions du Layeur

N°	Site Web	URL
W1	Technique d'architecture navale	<a href="http://www.imq.qc.ca/carrieres/ARCHITEC.HTM">http://www.imq.qc.ca/carrieres/ARCHITEC.HTM</a>
W2	H. Darvin. Notes pratiques sur la résistance des coques.	<a href="http://www.archivesnationales.cultures.gouv.fr/camt/fr/inventaires1995/1995058-31.html">http://www.archivesnationales.cultures.gouv.fr/camt/fr/inventaires1995/1995058-31.html</a>
W3	Introduction à l'architecture navale	<a href="http://ntl.bts.gov/DOCS/narmain/naintro.html">http://ntl.bts.gov/DOCS/narmain/naintro.html</a>
W4	Logiciel HULLFORM	<a href="http://www.hullform.com/">http://www.hullform.com/</a>
W5	ITTC – “le vatican” de l'architecture navale	<a href="http://ittc.sname.org/">http://ittc.sname.org/</a>
W6	Logiciel de construction navale	<a href="http://www.ghsport.com/stabsw.htm">http://www.ghsport.com/stabsw.htm</a>
W7	Textes réglementaires	<a href="http://europa.eu.int/comm/enterprise/maritime/index.htm">http://europa.eu.int/comm/enterprise/maritime/index.htm</a> (en anglais)
W8	Textes réglementaires	<a href="http://europa.eu.int/comm/enterprise/maritime/shipbuilding_market/doc/leadership_fr.pdf">http://europa.eu.int/comm/enterprise/maritime/shipbuilding_market/doc/leadership_fr.pdf</a>
W9	Textes réglementaires	<a href="http://europa.eu.int/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/03/1607&amp;format=HTML&amp;aged=0&amp;language=FR&amp;guiLanguage=fr">http://europa.eu.int/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/03/1607&amp;format=HTML&amp;aged=0&amp;language=FR&amp;guiLanguage=fr</a>
W10	Jauge de contrainte	<a href="http://stielec.ac-aix-marseille.fr/electron/themes/bts/2003/mesure_pesage.htm">http://stielec.ac-aix-marseille.fr/electron/themes/bts/2003/mesure_pesage.htm</a>
W11	David Taylor Model Basin	<a href="http://www50.dt.navy.mil">http://www50.dt.navy.mil</a>
W12	Tragédie de la Titanic	<a href="http://www.encyclopedia-titanica.org">http://www.encyclopedia-titanica.org</a>
W13	Froude et autres (bien)	<a href="http://www.mecaflux.com/nombre_de_froude.htm">http://www.mecaflux.com/nombre_de_froude.htm</a>
W14	Liste des bassins	<a href="http://www.newavesys.com/towing_tanks.htm">http://www.newavesys.com/towing_tanks.htm</a>
W15	Formes et volumes (navire)	<a href="http://www.formes-et-volumes.fr/index.html">http://www.formes-et-volumes.fr/index.html</a>
W16	Académie navale de Nantes	<a href="http://www.ac-nantes.fr:8080/etab/etab.asp?rne=0440069L">http://www.ac-nantes.fr:8080/etab/etab.asp?rne=0440069L</a>
W17	Architecture navale	<a href="http://perso.wanadoo.fr/c.paulet/archi/">http://perso.wanadoo.fr/c.paulet/archi/</a>
W18	Le bassin de Rouen	<a href="http://www.atma.asso.fr/FR/science-de-base.htm">http://www.atma.asso.fr/FR/science-de-base.htm</a>
W19	Cours d'architecture navale	<a href="http://www.ensieta.fr/naval_design/course_lecturers Naval_design.html">http://www.ensieta.fr/naval_design/course_lecturers Naval_design.html</a>
W20	Résistance aux vagues	<a href="http://www.finot.com/ecrits/vitessecoq/chap2/chap2.htm">http://www.finot.com/ecrits/vitessecoq/chap2/chap2.htm</a>
W21	Institut de recherche	<a href="http://www.ifremer.fr/francais/">http://www.ifremer.fr/francais/</a>
W22	Ecole Centrale de Nantes	<a href="http://www.ec-nantes.fr/Fr/Manifestations/Bassin/Extweb-fr.html">http://www.ec-nantes.fr/Fr/Manifestations/Bassin/Extweb-fr.html</a>
W23	Bureau Veritas	<a href="http://www.bureauveritas.com/homepage_frameset.html">http://www.bureauveritas.com/homepage_frameset.html</a>
W24	Bassin de Duisburg	<a href="http://www.dst-org.de/intro.htm">http://www.dst-org.de/intro.htm</a>
W25	Bassin de Berlin	<a href="http://www.tu-berlin.de/vws/">http://www.tu-berlin.de/vws/</a>