

## Comment un bateau sera-t-il capable de tenir la mer ?(\*)

Andreas Kindlimann(\*\*) et Mireille Schumacher(\*\*\*)

Leonhard Euler(1707 - 1783) fut sans doute l'un des fondateurs de l'architecture navale moderne. Si les scientifiques Huygens et Pascal ont ouvert la voie dans la redécouverte de l'ancien savoir-faire d'Archimède avec des méthodes nouvelles, c'est pourtant à Euler que revient l'essentiel des fondements de l'hydrostatique et de l'hydrodynamique.

### La théorie de la construction et de la manœuvre des vaisseaux

De nos jours, il est possible de calculer exactement comment un bateau doit être conçu pour tenir la mer. Au 17<sup>e</sup> siècle, les architectes utilisaient des tables contenant les mesures qui avaient bien fonctionné dans le passé. On n'effectuait que peu de calculs, et les navires n'étaient pratiquement pas construits sur la base de plans. Seuls la longueur, la largeur, ainsi que d'éventuels chargements, étaient pris en compte dans le cadre des contrats entre le client et le constructeur. On réalisait des modèles réduits dont on conservait les proportions. Ces méthodes de travail traditionnelles, ainsi que les constructions navales toujours hasardeuses, furent à l'origine de nombreuses catastrophes.

L'un des naufrages les plus spectaculaires de cette époque fut celui du navire de guerre suédois, le Vasa, construit par le roi Gustave II Adolphe de Suède, de la dynastie des Vasa, entre 1626 et 1628. Le Vasa était un trois-mâts de 62 mètres de long, 52 mètres de haut et 11,7 mètres de large. Il pesait 1200 tonnes et embarquait 64 canons. Le 10 août 1628, lorsque le navire quitta le port pour la première fois, il chavira brusquement, se renversant sur le côté, et coula en l'espace de quelques minutes. Ce naufrage donna lieu à un procès pour en éclaircir les causes. En réalité, c'est une combinaison de différentes circonstances qui avait conduit au naufrage. Le roi avait d'une part constamment modifié la taille du bateau durant sa construction, si bien que les proportions étaient faussées. D'autre part, des canons supplémentaires avaient été montés, de sorte que le centre de gravité du navire se déplaça beaucoup plus haut que prévu. Si les théories d'Euler avaient pu être appliquées à cette époque, cette catastrophe aurait pu être évitée.

Le renflouement du Vasa eut lieu en 1961, après 333 ans passés dans les eaux glaciales de la Baltique. Il se trouve aujourd'hui dans le très beau Musée Vasa à Stockholm.

---

(\*) Atelier des Journées nationales de Paris.

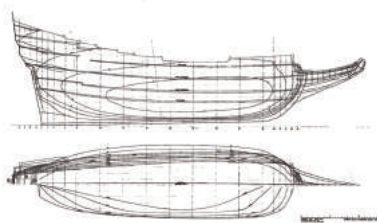
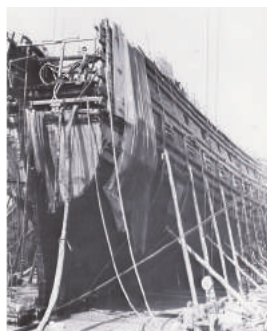
(\*\*) architecte naval.

(\*\*\*) mireille.schumacher@gmail.com



Le Vasa quitte le port le 10 août 1628

(aquarelle de Nils Stödberg)



C'est à Archimède (287-212 av. J.-C.) que l'on doit les fondements de l'hydrostatique. Il est aussi à l'origine d'un critère de stabilité pour des formes très simples. Mais ce savoir fut perdu au Moyen Âge pour plusieurs centaines d'années. Euler fut l'un des premiers à utiliser les progrès récents des sciences physiques et mathématiques pour étudier en détail le génie naval. Euler attachait toujours beaucoup d'importance à développer des solutions aussi concrètes que possible aux problèmes de la construction des bateaux. Mais il renonça à les accompagner d'exemples d'utilisation, si bien que ses théories et ses méthodes ne furent pratiquement pas appliquées de son temps. Deux raisons ultérieures peuvent être invoquées pour expliquer leur manque de diffusion aux 18<sup>e</sup> et 19<sup>e</sup> siècles : en premier lieu, la plupart des publications étaient rédigées en latin ; par ailleurs, jusqu'au développement de l'informatique, il n'était guère envisageable de réaliser des calculs si astreignants.

### La biographie d'Euler à la lumière de la construction navale

C'est à l'époque de ses études à l'Université de Bâle, à l'âge de 15 ans, qu'Euler entra en contact avec celui qui deviendra son maître. Jean Bernoulli, à la pointe de la recherche dans le domaine de la construction navale, reconnut le talent d'Euler et le soutint beaucoup. Il l'invita à des réunions privées le samedi, où l'on discutait de littérature et de physique. C'est là qu'il fit la connaissance de son fils Daniel Bernoulli, avec lequel il entretint une longue amitié.

Jean Bernoulli s'était déjà occupé auparavant de questions d'hydrodynamique, et il avait fait de grands progrès dans le domaine. Mais les résultats s'accordaient mal avec la réalité, car certaines bases, largement reconnues, étaient trop imprécises.

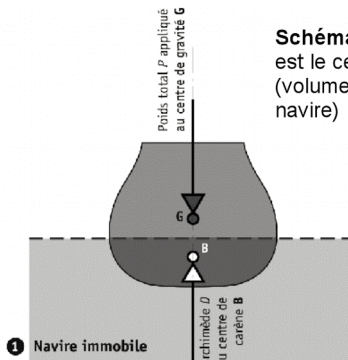
Euler se fixa pour but d'éliminer ces imprécisions. Ce fut là à la fois son premier grand travail et son entrée dans le champ de l'hydrodynamique.

Sur le conseil de Bernoulli, Euler participa au concours de l'Académie des Sciences de Paris. On ne sait pas exactement pour quelle raison Bernoulli n'y prit pas part lui-même, mais on suppose qu'il ne voulait pas prendre le risque d'un blâme dans ce domaine nouveau. Le premier prix fut remporté par le français Pierre Bouguer. Euler gagna le deuxième prix, ce qui lui conféra une reconnaissance officielle.

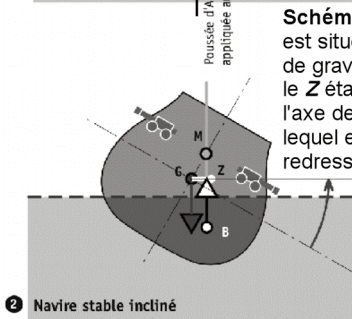
La même année, Euler fut invité à occuper un poste d'enseignement à l'Académie des Sciences russe. Il passa à Saint-Petersbourg 14 années fécondes qui conduisirent au concept remarquable du « moment de force » dans la stabilité du vaisseau.

Pour des raisons politiques, Euler quitta Saint-Petersbourg pour Berlin, où il définit les bases de la mécanique des fluides, qui conservent leur validité aujourd'hui. Il développa aussi des lois régissant la propulsion des navires et le calcul de leurs mouvements.

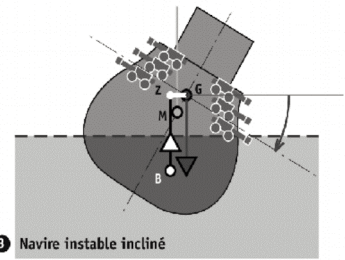
On évoquera ci-dessous l'influence d'Euler dans le domaine de la stabilité et de la résistance des navires.



**Schéma 1 :** Le point **B** est le centre de carène (volume immergé du navire)



**Schéma 2 :** Le métacentre **M** est situé au-dessus du centre de gravité. Le **GZ** est positif, le **Z** étant situé à droite de l'axe de symétrie du navire, lequel est donc en voie de redressement



**Schéma 3 :** Le métacentre **M** est situé au-dessous du centre de gravité. Le **GZ** est négatif, le **Z** étant situé à gauche de l'axe de symétrie du navire. Le navire surchargé est en voie de chavirement

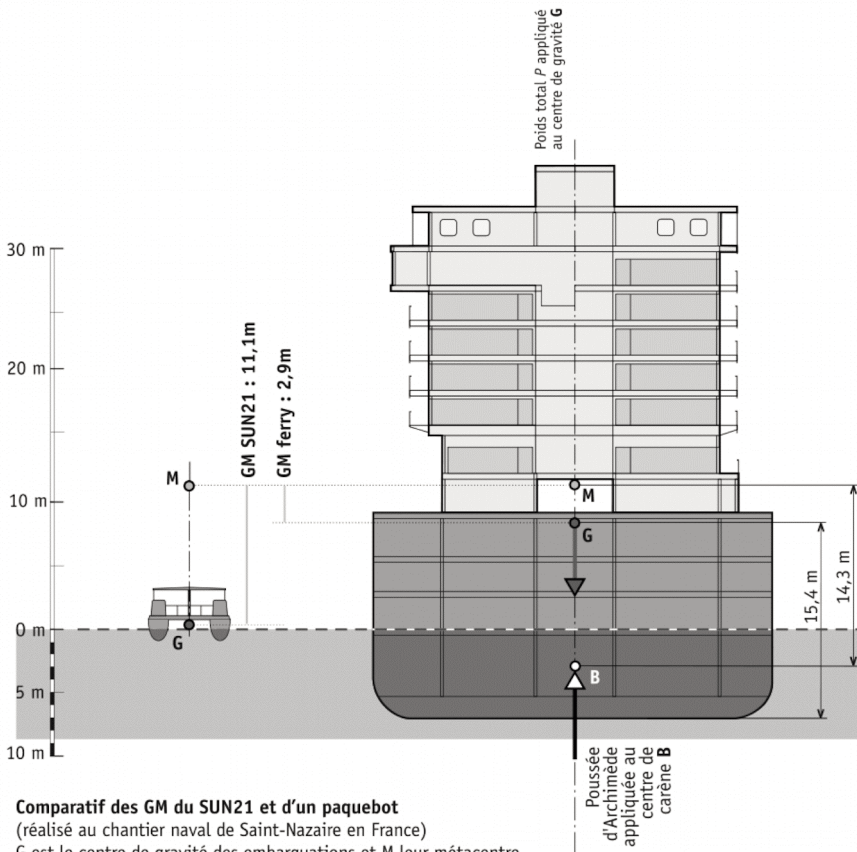
## Hydrostatique et stabilité

### L'hydrostatique étudie le navire immobile : flottabilité et stabilité

L'une des acquisitions les plus remarquables que l'on doit à Euler dans ce domaine, fut le recours au calcul intégral, encore récent, pour résoudre des problèmes jusqu'alors sans réponse. Avant Euler, il n'était pas possible de déterminer la stabilité de vaisseaux avant la mise à l'eau du bâtiment.

Dans des recherches élaborées en parallèle avec Pierre Bouguer, Euler développa le

concept de la *hauteur métacentrique*. Le *métacentre* est un point géométrique déterminé uniquement par la géométrie de la coque du bateau<sup>(1)</sup>. Des prévisions très précises quant à la stabilité du navire peuvent être faites à l'aide de ce point et du centre de gravité du navire. Les principes de base posés par Euler permettent de réaliser des courbes dites « de stabilité », telles qu'elles sont reproduites à la page suivante dans le graphique du SUN21. Le SUN21 est un catamaran (bateau à deux coques), le premier bateau solaire à avoir traversé l'Atlantique (mai 2007). Grâce à ses deux coques, il a un métacentre élevé, ce qui lui confère une grande stabilité.



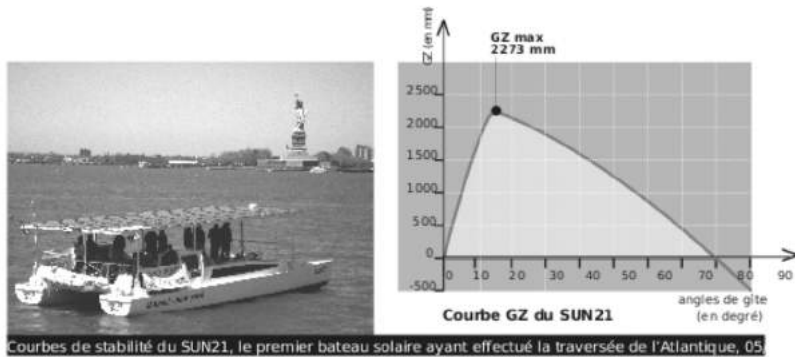
#### Comparatif des GM du SUN21 et d'un paquebot

(réalisé au chantier naval de Saint-Nazaire en France)

G est le centre de gravité des embarcations et M leur métacentre.

La valeur GM de 2.9 mètres est classique pour un paquebot.

(1) Pierre Bouguer a développé la théorie du métacentre comme mesure de la stabilité des navires, dans son ouvrage « Théorie du navire, de sa construction et de ses mouvements ». Selon la position du point d'appui de la poussée d'Archimède par rapport à celle du centre de gravité du navire, il y a ou non stabilité. Le point d'appui est appelé métacentre. La désignation est de Bouguer, elle est restée dans la marine jusqu'à aujourd'hui. Voir par exemple [http://eric.collard.free.fr/e\\_help\\_v5\\_fr/z\\_hydrostat\\_meta.htm](http://eric.collard.free.fr/e_help_v5_fr/z_hydrostat_meta.htm) ainsi que l'atelier d'Andreas Kindlimann en complément à cet article sur le site de l'APMEP.



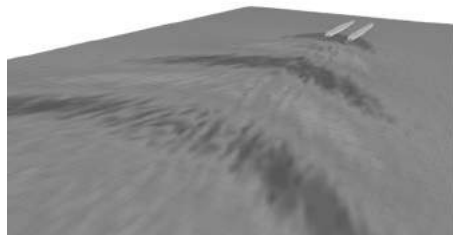
## Hydrodynamique et résistance du vaisseau

**L'hydrodynamique considère le navire en mouvement : propulsion, manœuvrabilité.**

Euler s'intéressa très tôt au calcul de la résistance des vaisseaux. L'importance de ces calculs réside en ce qu'ils permettent de déterminer la vitesse du navire avant la construction, de connaître avec précision la surface des voiles nécessaires ou la puissance adéquate pour les propulsions mécaniques (rames, machine à vapeur). Si Euler ne réussit pas à proposer une solution aux problèmes pratiques dans ce domaine, il a le mérite d'avoir réfuté les théories, alors admises, de Newton et d'avoir proposé de nouvelles approches. Dans sa « Théorie des champs fluides », Euler relia les principes de la dynamique mécanique à ses propres observations et à de nouveaux outils mathématiques.

**Les conquêtes de l'industrie informatique ont été indispensables à la réalisation des calculs qu'Euler avait exposés**

Ces dernières décennies, l'avènement de l'ordinateur a radicalement changé la pratique de l'architecture et de la construction navale à tous les niveaux. Le concept CFD (Computational Fluid Dynamics) est le principe de la construction moderne des bateaux et des yachts. Le CFD permet de simuler le champ du relief des vagues autour de n'importe quel bateau et de faire des pronostics rigoureux sur la hauteur des vagues autour de celui-ci. De la même manière, on peut déterminer l'énergie nécessaire à la marche du bateau dans l'eau à une vitesse donnée. Pour atteindre une précision élevée, des ordinateurs puissants doivent calculer pendant plusieurs jours. Seules les ressources d'ordinateurs ultra performants du 21<sup>e</sup> siècle permettent aux constructeurs navals de réaliser les calculs qu'Euler avait proposés.



Champ du relief des vagues autour du C100, un projet de ferry solaire pour 100 personnes, développé par la société MW-Line.

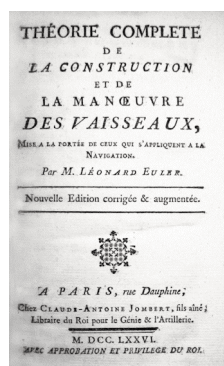
## Euler un regard vers le futur

Euler a été le premier à utiliser le calcul infinitésimal pour décrire le mouvement d'un fluide s'écoulant autour d'une forme. Sa méthode est encore utilisée aujourd'hui avant de construire les avions et les bateaux. Ainsi, le design de l'Airbus A380, celui de la coque d'Alinghi ou l'établissement des prévisions météo recourent aux équations différentielles de la dynamique des fluides qu'il a développées.

## Références :

Leonhard EULER, [www.math.dartmouth.edu/~euler/](http://www.math.dartmouth.edu/~euler/), Articles E4, E78, E94, E110/111, E116, E137, E150, E413, E415, E426 Théorie complète de la construction et de la manœuvre des vaisseaux, Saint-Petersbourg 1781, E520 et E545

ou consulter les Œuvres complètes (allemand-français-latin), 1911, Leonhardi EULERI opera omnia sub auspicii Societatis scientiarum naturalium Helveticae... Series secunda, Opera mechanica et astronomica. Volumen octodecimum - Volumen undevi cesimum, Scientia navalis / éd. Clifford Ambrose Truesdell - [Facsim. de l'éd. de Petropoli : Academiae scientiarum, 1749]. Lausannae ; Turici : O. Füssli, 1967-1972. 2 vol.



Anders SANDSTRÖM, Curt BORGSTAM, *Why Wasa Capsided*, Stockholm, musée maritime national, éd. Erling Matz, Stockholm 1984.

Pierre GUTELLE, *Architecture du voilier* : Tome 1, Théorie, éd. Loisirs nautiques, 2001.

Frédéric VIVIEN, Luc SINÈGRE, *La géométrie au service des corps flottants*, Actes du colloque de géométrie de Liège 2003, Reims : Irem, 2004.  
<<http://www.univ-irem.fr/commissions/geometrie/P7.pdf>>

Horst NOWACKI, *Leonhard Euler and the Theory of Ships*, Berlin, 2007-04-06\_Leonhard\_Euler\_Ship\_Theory.pdf  
<[http://www.engin.umich.edu/dept/name/Announcements/2007-04-16\\_Leonhard\\_Euler\\_Ship\\_Theory.pdf](http://www.engin.umich.edu/dept/name/Announcements/2007-04-16_Leonhard_Euler_Ship_Theory.pdf)>

Pierre BOUGUER, *Théorie du navire, de sa construction et de ses mouvements*, Paris, Jombert, 1746.

Dominique PAULET - Dominique PESLES, *Architecture navale – Connaissance Et Pratique*, éd. de la Villette, 1998.

Jean DHOMBRES, *Histoire et didactique, à partir de la Scientia Navalis et du calcul intégral, quelques réflexions sur la mise en perspective historique de l'apprentissage des mathématiques*, Nantes, Irem 2001. <<http://www.irem.sciences.univ-nantes.fr/>>

Jean DHOMBRES, Plot 98, 99, *Maths & Marine*, Automne 2001.

**eu(er)<sup>n</sup>** publication du Gymnase d'Yverdon (CH) ISBN 978-2-8399-0330-1, 2007  
<http://www.euler-ch.org/>

L'idée, le concept et la réalisation de la publication et de l'exposition Euler sont dus à René GALLAND, Paul GANNAGÉ, Mireille SCHUMACHER et Francis VOLKEN (design graphique), enseignants au Gymnase d'Yverdon. Ont participé à la rédaction de l'article ci-dessus : Andreas KINDLIMANN (architecte naval) et Mireille SCHUMACHER. [mireille.schumacher@vd.educanet2.ch](mailto:mireille.schumacher@vd.educanet2.ch) achat publication et coordination de l'emprunt de l'exposition Euler.