

L'INGENIEUR, LE GENIE MARITIME ET L'IDEE DE PROGRES THEORIQUES DE L'ARCHITECTURE NAVALE A L'AUBE DU XIX^e SIECLE

Analyse critique des cours de l'Ecole Spéciale du Génie Maritime - 1827

Par Youri Guedj

2015-2016



1

Université Paris Diderot

Département d'Histoire et Philosophie des Sciences

Mémoire de Master II LOPHISS

Dirigé par Olivier Darrigol (CNRS/Université Paris Diderot)

***Soutenu le 7 septembre 2016 devant Bruno Belhoste (IHMC/Université Paris
Panthéon Sorbonne) et Nadine de Courtenay (Université Paris Diderot)***

¹ La polytechnique, chaloupe construite par les élèves de l'Ecole Polytechnique, Juin 1803, image extraite de *l'Histoire de l'Ecole Polytechnique* de G. Pinet (1803).

Résumé

Les origines de l'art de la construction navale et de la pratique de la navigation remontent au début de l'entreprise humaine de conquête du globe depuis son berceau africain. La diversité des formes et des techniques de fabrication des embarcations rencontrées à travers le monde témoigne d'un développement étendu et ramifié, fondé sur l'expérience de la mer, la créativité technique et la tradition.

L'ambition d'une approche analytique de l'architecture navale prend forme à la Renaissance dans la société occidentale moderne naissante. L'architecture navale théorique, ses objets d'étude et ses problématiques se sont construits historiquement. Depuis les écrits des ambitieux savants du XVII^e siècle - inspirés par l'entreprise de rationalisation d'une société moderne et les projets de géométrisation des sciences naturelles - les développements de l'architecture navale théorique se sont rapidement heurtés aux limites des modèles mathématiques à représenter la complexité des phénomènes réels mis en jeu dans la construction et la navigation. Mais, au XVIII^e siècle, la vision que déploieront quelques géomètres et ingénieurs, au delà de la pluralité des phénomènes observés, semble avoir nourri l'ambition de ces hommes à transgresser les frontières entre le royaume de la pure abstraction et celui de la réalité pratique. Au sein de la luxuriance du monde, il existe des arrière-plans théoriques capables de dissoudre les contingences et les particularités. Les concepts de point vélique, de métacentre, de solide de moindre résistance, de ligne de courant... prennent ainsi forme. Le navire et l'environnement dans lequel il évolue forme un système physique complexe, paramétré par un grand nombre de variables interdépendantes. L'idéal d'une complète maîtrise de ce système est à l'origine du désir de progrès théorique de l'architecture navale.

A la fin du siècle des Lumières, l'architecture navale n'est encore qu'un système inachevé, livré à l'esprit des ingénieurs. Au carrefour entre rigueur déductive et synthèse constructive, la démarche des ingénieurs formés à l'Ecole d'Application du Génie Maritime est représentative de la fonction que l'ingénieur du XIX^e hérite de la tradition du XVIII^e. Il s'agit de faire converger théorie savante et pratiques tâtonneuses pour servir les intérêts multiples d'une société industrielle naissante : intérêts techniques, industriels, économiques, politiques et patriotiques. Dans cet effort, un véritable discours sur les sciences et les techniques navales s'établit : une techno-logie maritime, à travers laquelle on tache d'évaluer les outils et d'orienter les développements de l'architecture navale.

L'analyse critique des éléments de cours professés par l'ingénieur Philippe-Jacques Moreau, à l'Ecole Spéciale du Génie Maritime dans les années 1815-1830, en plus de témoigner de la formation que reçoivent les futurs ingénieurs du corps du Génie Maritime, nous éclaire sur la nature et l'état de développement de ce système de connaissances et le discours qui l'accompagne.

L'étude historique des développements de l'architecture navale et du génie maritime est une opportunité de revisiter, à partir d'un cas particulier, les conditions de l'établissement d'une des figures pivot de la société moderne : l'ingénieur, mais aussi de mettre en évidence les contrariétés, les faiblesses et les allotélies du programme dans lequel il fut enchaîné.

Mots clefs : ingénieur, Génie Maritime, architecture navale, théorie du navire, espace des techniques, progrès, modernité

Abstract

The origins of the art of shipbuilding and the practice of navigation date back to the beginning of mans desire to conquer the globe from its African cradle. The diversity of vessel shapes and manufacturing techniques seen around the world demonstrates an extensive and diversified development, based on experiences at sea, technical creativity and tradition.

The desire for an analytical approach to naval architecture took place during the Renaissance with the emergence of a modern Western society. Theoretical naval architecture, its studies and problems incurred have been historically documented. Since the writings of ambitious scholars of the XVIIth century - inspired by the idea of the rationalisation of a modern society and the aspects of geometric natural sciences - the development of a ship theory was soon faced with the limitation of mathematical models and the complexity of the phenomena found in building and navigation.

However in the XVIIIth century, the vision of a few scholars and engineers managed to surpass the boundaries that had previously been imposed on the realm of pure abstraction and of practical reality. Within the luxuriance of the world, there were theoretical backgrounds able to dissolve contingencies and particularities. The concepts of point vélique, metacentre, solid of least resistance, streamlines ... were taking shape. The vessels and the environment in which they evolved formed a complex physical system, configured by a large number of interrelated variables. The ideal of complete control of the system was behind the desire to advance theoretical naval architecture.

At the end of the Enlightenment, naval architecture was still an incomplete system, at the mercy of engineers. At the crossroads between deductive rigor and constructive synthesis, the approach of engineers trained at the l'Ecole Spéciale du Génie Maritime represented the functions that XIXth century engineers had inherited from the traditions of the XVIIIth century. They applied theory and practice to serve the multiple interests of a young industrial society: technical, industrial, economic, political and patriotic. By doing this, a discourse on naval sciences and techniques was established: maritime technology, through which today one tries to evaluate and guide the future development of naval architecture.

Critical analysis of the lessons given by the engineer Philippe-Jacques Moreau, at l'Ecole Spéciale du Génie Maritime in the 1815-1830 s, plus eye witness accounts from the training given to future engineers of the Corps du Génie Maritime, sheds light on the nature and state of development and the discourse that accompanied it.

The study of historical developments in naval architecture and marine engineering is an opportunity to revisit, often from an individual case, the conditions in which a pivotal figure of modern society was established: the engineer. It also serves to highlight contrarities, the weaknesses of the programs in which they were embroiled.

Key Words: *engineer, Génie Maritime, naval architecture, ship theory, progress, technology, modernity*

Remerciements à

Olivier Darrigol (Directeur de recherches - CNRS/Université Paris Diderot) pour ses précieux conseils et l'inspiration de ses riches travaux en histoire des sciences,

David Plouvier (Professeur d'histoire maritime, Université de Nantes), Lilliane Perez (Professeur d'histoire moderne, Université Paris Diderot), et Sylvianne Llinares (Professeur des universités, spécialiste de l'histoire maritime et littorale, chercheuse à l'université de Bretagne-Sud) pour avoir partagé intérêt et enthousiasme à l'égard de ces recherches,

Larrie D.Ferriero (Architecte naval et historien, Imperial College, Londres) et Horst Nowaki (Architecte naval et historien, Technical University, Berlin) pour leurs encouragements et leurs passionnants travaux sur l'histoire de l'architecture navale,

Oriane pour sa patience et son soutien tout au long de cette riche année,

Ma tante Sylvie et ma mère, pour leurs critiques et leur aide précieuse.

TABLE DES MATIERES

1 LA GLOIRE DES INGENIEURS.....	7
1.1 LES ORIGINES, DE L'ANTIQUITE AU MOYEN AGE	9
1.2 L'INGENIEUR-ARTISTE DE LA RENAISSANCE	10
1.3 L'INGENIEUR ADMINISTRATEUR DE L'EPOQUE CLASSIQUE	11
2 L'IDEE DE PROGRES THEORIQUES DE L'ARCHITECTURE NAVALE ET LE GENIE MARITIME	15
2.1 HISTOIRE DU NAVIRE, DE LA CONSTRUCTION ET DE LA NAVIGATION.....	22
2.2 L'IDEE DE PROGRES THEORIQUES DE L'ARCHITECTURE NAVALE	25
2.2.1 Les savants et la <i>Scientia Navalis</i>	28
2.2.2 La normalisation des vaisseaux de ligne.....	30
2.2.3 La science en système	33
2.3 PROMOTION DES CONNAISSANCES THEORIQUES ET DES SAVOIRS PRATIQUES	35
2.3.1 Les tribulations de la Marine royale française du XVI ^e au XVIII ^e siècle.....	35
2.3.2 Le rôle des flottes marchandes.....	38
2.3.3 Science du navire et doctrine navale.....	39
2.3.4 Pour une société des savoirs : l'Esprit des Lumières	40
2.4 CHEMINS DE DIFFUSION DES CONNAISSANCES THEORIQUES ET DES SAVOIRS PRATIQUES.....	41
2.4.1 L'évolution des traités d'architecture navale	41
2.4.2 L'enseignement de l'architecture navale en France.....	44
3 ANALYSE CRITIQUE DES ELEMENTS DE COURS DE L'ECOLE SPECIALE DU GENIE MARITIME 1814-1830	51
3.1 ENJEUX ET PROBLEMATIQUES	53
3.1.1 La formation, le rôle et la fonction des ingénieurs	53
3.1.2 L'adaptation d'un corpus de connaissances théoriques aux innovations techniques	54
3.1.3 La standardisation et normalisation des vaisseaux	54
3.1.4 Confrontation entre modèles mathématiques et réalité des phénomènes : de la théorie à la prédiction	54
3.1.5 La Science de l'ingénieur.....	55
3.1.6 L'Unité : une idée régulatrice ?.....	56
3.2 BIBLIOGRAPHIE ET INTRODUCTION DU <i>SOMMAIRE</i>	57
3.2.1 Bibliographie.....	57
3.2.2 Les qualités de la « machine navire »	58
3.2.3 Les systèmes de guerre	59

3.2.4	La catégorisation par classes, rangs et ordres	60
3.3	LA SCIENCE EXPRIMEE EN SYSTEME, LE SAVOIR-FAIRE ILLUSTRE EN METHODE.....	63
3.3.1	Théorie du Navire	63
3.3.2	Construction du navire et pratique du chantier	132
4	CONCLUSION	140
4.1	SYSTEME DE CONNAISSANCES THEORIQUES ET SAVOIR-FAIRE PRATIQUE : L'INGENIUM AU SERVICE D'UNE ADMINISTRATION REGLEE OU LES PREMISSES D'UNE ECONOMIE DE L'INNOVATION ?.....	140
4.2	LA GLOIRE DES INGENIEURS ?	150
4.2.1	L'ingénieur de la Révolution industrielle	150
4.2.2	L'ingénieur cadre-technicien	151
4.2.3	L'ingénieur aujourd'hui	152
4.2.4	Ingénieur et <i>post-modernité</i>	158

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1-1 : REPRESENTATION DE L'INGENIEUR AUX XIXE : <i>CONFERENCE OF ENGINEERS AT THE MENAI STRAITS PREPARATORY TO FLOATING ONE OF THE TUBES OF THE BRITANNIA BRIDGE</i> , DE JOHN SEYMOUR LUCAS (1868).	7
FIGURE 2-1 : REPRESENTATION D'UN NAVIRE, PETROGLYPHE DES ROCHES DE BUHUSLAN.....	22
FIGURE 2-2 : FRONTISPICE DU <i>NOVUM ORGANUM</i> DE BACON.....	25
FIGURE 2-3 : LA <i>COURONNE</i> . FRONTISPICE DE <i>L'HYDROGRAPHIE</i> (1643) DE GEORGES FOURNIER.	36
FIGURE 2-4 : DESSIN EXTRAIT DE <i>FRAGMENT OF ANCIENT ENGLISH SHIPWRIGHTRY</i> DE MATHEW BAKER (1570)	44
FIGURE 3-1 : PLANCHE EXTRAITE D' <i>ARCHITECTURA NAVALIS MERCATORIA</i> (1768) DE FREDRIK HENRIK AF CHAPMAN	64
FIGURE 3-2 : PLANCHE EXTRAITE DE <i>TRAITE ELEMENTAIRE DE LA CONSTRUCTION DES VAISSEAUX</i> (1787) DE VIAL DU CLAIRBOIS.....	65
FIGURE 3-3 : DESSIN EXTRAIT DE <i>FRAGMENT OF ACIENT SHIPWRIGHTRY</i> DE MATHEW BAKER (1570)	67
FIGURE 3-4 : MOMENT DE REDRESSEMENT POUR UN PARABOLOÏDE HOMOGENE (NOWACKI, <i>ARCHIMEDES AND SHIP STABILITY</i> (2001/2002), P.15)	75
FIGURE 3-5 : DEPLACEMENT DU CENTROIDE POUR UNE SECTION MINCE INCLINEE (EULER, <i>SCIENTIA NAVALIS</i> (1749/1968/1972), VOL. 1, FIG.39).....	77
FIGURE 3-6 : DIAGRAMME DU METACENTRE (BOUGUER, <i>TRAITE DU NAVIRE</i> (1746), PLATE 6).....	80
FIGURE 3-7 : EXPERIENCE DE TORRICELLI	88

FIGURE 3-8 EQUILIBRE D'UN NAVIRE EN MANŒUVRE, FORCES ET ANGLES (NOWAKI 2005)	100
FIGURE 3-9 : ESTIMATION DE LA DERIVE (RENAU D'ELIZAGARAY 1689).....	107
FIGURE 3-10 : DIAGRAMME DE VITESSE (FERREIRO 2007).....	108
FIGURE 3-11 : POINT VELIQUE (BOUGUER 1746)	109
FIGURE 3-12 : POINT VELIQUE (L. EULER 1749)	110
FIGURE 3-13 : MODELE DE ROUE HYDRAULIQUE PAR JOHN SMEATON (1759)	124
FIGURE 3-14 : PLAN ELABORE SUR LE MODELE DU DISPOSITIF DE PONCELET	125
FIGURE 3-15 : MACHINE DE WATT.....	127
FIGURE 3-16 : REGULATEUR DE WATT.....	128
FIGURE 3-17 : PARALLELOGRAMME DE WATT	128
FIGURE 3-18 : TIROIR DE REGULATION.....	129
FIGURE 3-19 : BRINS DE CHANVRE.....	132
FIGURE 3-20 : DUHAMEL DU MONCEAU - <i>L'ART DE LA CORDERIE PERFECTIONNE</i> , « CHAPITRE SIXIEME-DE L'ATELIER DES COMMETTEURS », P. 284, 1719.....	133
FIGURE 4-1 : BOUCLE NAVIRE : DIAGRAMME GENERAL D'EVANS.....	144
FIGURE 4-2 : JULES VERNE, <i>UNE VILLE FLOTTANTE</i> (1869), DESSINS PAR JULES FERAT.	153

1 LA GLOIRE DES INGENIEURS

Parce que nous sommes des ingénieurs, croit-on donc que la beauté ne nous préoccupe pas dans nos constructions, et qu'en même temps que nous faisons solide et durable nous ne nous efforçons pas de faire élégant ? Est-ce que les véritables conditions de la force ne sont pas toujours conformes aux conditions secrètes de l'harmonie ?²

A l'origine de ce mémoire, il y a des questions sur la figure de l'ingénieur. Elles concernent, son rôle et sa fonction, et le récit que l'on en fait à l'époque contemporaine. Puisqu'il s'agit d'histoire des sciences, le spectre de ma réflexion s'est élargi à l'époque moderne et les questions se sont affinées : Quelle place l'ingénieur occupe-t-il dans la société moderne ? Dans quels récits historiques s'inscrit-il ? De quelles traditions hérite-t-il ? Dans quelles conceptions philosophiques s'inscrivent son travail et sa démarche ?



Figure 1-1 : Représentation de l'ingénieur aux XIXe : *Conference of Engineers at the Menai Straits Preparatory to Floating one of the Tubes of the Britannia Bridge*, de John Seymour Lucas (1868).

² Gustave Eiffel, réponse à la « Protestation contre la Tour de M. Eiffel » dans un interview accordé au Temps le 14 février 1887.

A en juger par le nombre d'écoles et les louanges qu'elles reçoivent dès le secondaire, l'ingénieur et les savoirs qui lui sont associés, sont à l'évidence d'une importance remarquable dans nos sociétés. Aujourd'hui plus que jamais, on y enseigne, tout un ensemble de connaissances et de savoir-faire dont le spectre s'étend de la mécanique à la programmation informatique et aux nouvelles technologies. Cependant, aussi généraliste que la formation de nos ingénieurs tend à devenir, les cours d'histoire et de philosophie manquent souvent aux programmes des *Grandes Ecoles*³ ou bien ils y figurent trop peu. D'ailleurs, quelle histoire faut-il y enseigner ? Quels courants philosophiques ? Il s'agit avant tout de savoir dans quel récit inscrire cette profession et ses pratiques à une époque où ses prétentions généralistes semblent compromettre l'affirmation d'une identité circonscrite et stable. D'ailleurs, les différents modèles d'ingénieurs qui s'imposent au cours de l'histoire, selon les méthodes intellectuelles employées, l'objet de leurs travaux et leur place dans la société, n'offrent pas le visage d'une grande unité. Derrière quelle identité commune rassembler un ensemble de métiers, de préoccupations et d'objets, en apparence aussi hétérogènes ?

³ Terme générique pour désigner les écoles dans lesquelles sont formés les ingénieurs.

1.1 Les origines, de l'Antiquité au Moyen Age

Une fonction sociale ? Une profession ? Ou la faculté de l'esprit humain à inventer ? Quelle définition pour l'ingénieur ? En latin, l'*ingenium*, désigne une disposition naturelle de l'esprit : le génie.⁴ De l'*ingeniosus* du II^e siècle, à l'*ingeniator* ou *engigneor* de l'époque médiévale, l'ingénieur est avant tout un artisan spécialisé dans les machines de guerre et les fortifications. Si l'ingénieur *moderne* apparaît en occident à la fin du Moyen Age, il faut admettre une certaine « continuité » dans l'histoire, depuis les machines de guerre et les mécanismes en tout genre du monde antique, aux inventions de la Renaissance.⁵ Pourtant, dans l'antiquité grecque, la profession n'est pas reconnue, si bien qu'on ne sait pas comment les nommer. Malgré l'importance des machines de guerres, des fortifications et de la construction navale, les ingénieurs sont rejetés des responsabilités politiques parce qu'ils perçoivent salaires et qu'ils sont considérés comme de simples spécialistes des questions techniques dans une société qui n'est pas fondée sur l'idée de progrès mais sur le maintien de valeurs. La technique y est méprisée. Ce n'est d'ailleurs que lorsque l'*idée de progrès* deviendra une valeur morale que la figure de l'ingénieur s'imposera dans un ordre social.

Le Moyen Age est une période de transition. Les copistes permettent de diffuser les connaissances et l'actualité de la guerre maintient vivants les savoirs pratiques.⁶ L'ingénieur est avant tout militaire. L'*enginour*, on le reconnaît à son esprit, son intelligence, son *engin*, qu'il met en œuvre dans la réalisation des *engins* : fortifications et instruments de siège.⁷ C'est d'ailleurs cette aptitude à la ruse guerrière qui donne parfois une mauvaise image de l'ingénieur au Moyen Age et, au terme *engin*, une connotation maléfique.

⁴ Hélène Vérin, *La gloire des ingénieurs, L'intelligence technique du XVI^e au XVIII^e siècle* (Paris: Albin Michel, 1993), p. 19.

⁵⁵ Bertrand Gille, *Les ingénieurs de la Renaissance*, S15 vols. (Paris: Hermann Points Sciences, 1964).

⁶ Denis Lemaître, «Le métier d'ingénieur: Héritage et Devenir» Formation Humaine et Sociale, ENSTA BRETAGNE (2010), p. 2.

⁷ Hélène Vérin, *La gloire des ingénieurs, L'intelligence technique du XVI^e au XVIII^e siècle* (Paris: Albin Michel, 1993), p. 22.

Le XV^e siècle marque le passage « d'un rationalisme empirique fragmentaire et concret à une spéculation universelle ».⁸ A partir de la deuxième moitié du XV^e, le monde bascule alors dans la modernité.⁹ La naissance du système bielle manivelle est peut-être le symbole de cette *révolution*.

1.2 L'ingénieur-artiste de la Renaissance

A la Renaissance, avec le développement et la promotion d'une pensée théorique, la figure de l'ingénieur change radicalement. L'entrée dans la modernité signifie l'acceptation du progrès technique comme modèle social, si bien que l'ingénieur et ses travaux intègrent le réel social comme une modification positive de l'environnement.¹⁰

De toutes parts on commençait à rendre hommage à « l'ingénieur », sous ses aspects les plus multiples, non pas seulement à l'homme de guerre, habile à construire une fortification imprenable, à conduire un siège heureux, à fabriquer une machine étonnante, mais aussi à ceux qui savaient améliorer une fabrication, creuser un port de mer, construire un canal.¹¹

L'ingénieur-artiste de la Renaissance est caractérisé par sa liberté d'invention comme en témoigne l'œuvre de Léonard de Vinci. Il est étonnant de remarquer l'aisance avec laquelle certains d'entre eux passent de l'architecture, à la sculpture, aux questions hydrauliques et aux machines de guerres, en fonction des besoins du « Prince ». Au-delà de la maîtrise des mathématiques, du foisonnement des réalisations techniques en marge d'une pratique artistique, l'ingénieur de la Renaissance brille d'une réflexion sur les méthodes et de sa capacité à rationaliser et à généraliser. Il passe « insensiblement d'une pratique exercée par beaucoup de personnes, avec des résultats variables, vers la réflexion que pouvait suggérer l'emploi de techniques diverses. Et c'est là où Léonard de Vinci se montra (...) plus technologue que technicien ».¹²

⁸ Bertrand Gille, *Les ingénieurs de la Renaissance*, S15 vols. (Paris: Hermann Points Sciences, 1964).

⁹ Ibid

¹⁰ Denis Lemaître, «Le métier d'ingénieur: Héritage et Devenir,» Formation Humaine et Sociale, ENSTA BRETAGNE (2010), p. 4.

¹¹ Bertrand Gille, *Les ingénieurs de la Renaissance*, S15 vols. (Paris: Hermann Points Sciences, 1964).

¹² Ibid.

1.3 L'ingénieur administrateur de l'époque classique

C'est au début du XVIII^e siècle que se mettent en place explicitement les caractéristiques de l'ingénieur moderne avec le modèle français de l'ingénieur administrateur. Officier, mathématicien habile, expert et hardi, il a pour mission de servir les intérêts de l'Etat. Comme en témoigne l'article de *l'Encyclopédie*, le Génie Militaire, le Génie Maritime et le Génie Civil forment alors les canons de la profession :

Nous avons trois sortes d'ingénieurs, les uns pour la guerre ; ils doivent savoir tout ce qui concerne la construction, l'attaque et la défense des places. Les seconds pour la marine, qui sont versés dans ce qui a rapport à la guerre et au service de la mer, et les troisièmes pour les ponts et chaussées, qui sont perpétuellement occupés de la perfection des grandes routes, de la construction des ponts, de l'embellissement des rues, de la conduite et de la réparation des canaux, etc. Toutes ces sortes d'hommes sont élevés dans des écoles, d'où ils passent à leur service, commençant par les postes les plus bas, et s'élevant avec le temps et le mérite aux places les plus distinguées.¹³

L'ingénieur devient un acteur administratif, un « technocrate ».¹⁴ Au service du roi, il incarne des fonctions techniques et administratives qui servent au développement économique et militaire du royaume. Cette fonction nouvelle lui fait perdre la dimension de liberté créatrice qui caractérisait l'ingénieur-artiste. Il intègre des Corps de l'Etat. Cette institutionnalisation est marquée par une spécialisation de l'ingénieur et le développement d'une formation qui lui correspond.

Alors que jusqu'au XVII^e siècle, il n'existe pas d'enseignement formel pour les ingénieurs, la fin du XVII^e et le XVIII^e siècle sont marqués par un effort d'institutionnaliser la profession. Le corps des Ingénieurs du Roi est établi en 1676 par Sébastien Le Prestre, futur Marquis de Vauban. Il est consacré au Génie Militaire et aux constructions navales. A cette époque l'ingénieur est militaire. En 1716, apparaissent les premiers ingénieurs civils, avec la création du Corps des Ponts et Chaussées dont le rôle est de développer les moyens de communications. Ils sont au service exclusif de l'Etat. Initialement, il ne reçoivent aucune formation particulière et

¹³ d'Alembert et Diderot, *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers* (1780).

¹⁴ Bruno Belhoste, *La Formation d'une technocratie. L'Ecole polytechnique et ses élèves de la Révolution au Second Empire* (Paris: Belin, 2003).

sont directement promus dans le Corps.¹⁵ Mais le besoin de développer les services publics conduit à la création de l'Ecole des Ponts et Chaussées en 1747. En 1748, l'Ecole Royale du Génie est établie à Mézières dans les Ardennes, destinée à former les ingénieurs des fortifications, dans la tradition initiée par l'illustre ingénieur Vauban. En 1765, c'est la création du Corps du Génie Maritime. Enfin, 1783 correspond à l'année de l'ouverture de l'Ecole des Mines. A la fin du XVIIIe, les trois grands corps d'Etat : le Génie Militaire, le Génie Maritime ainsi que le Génie Civil ont leurs cursus respectifs et exercent sous les ordres du roi.

Le rôle de l'ingénieur est tout autant technique que social et politique. La formation dans les écoles correspond à un « ordre de préoccupation » : « celui du traité (enseignement de la discipline) ; celui du projet (conception de l'ouvrage) ; celui du devis (contrat avec les entrepreneurs) ; celui de la réalisation (conduite des travaux). L'élève ingénieur doit apprendre à passer de l'une à l'autre de ces définitions, à comprendre en quoi il s'agit du même objet et en quoi, et pourquoi, chacune de ces définitions répond aux exigences d'un moment particulier du projet ».¹⁶

La France, à la différence de l'Angleterre, n'entrera dans la *Révolution industrielle* qu'à partir du milieu du XIX^e. Ainsi, à la période classique, l'ingénieur est en quelque sorte contraint par ce modèle étatique. Il est moins enclin à innover qu'à organiser, rationaliser et contrôler. Son emprise sur le monde est fondée sur un savoir théorique et abstrait qui caractérise sa formation.

Les écoles créées à la fin du XVIII^e sont influencées par l'*Encyclopédie*. Les philosophes développent une attention particulière à l'industrie. Le projet d'une formation spécialisée d'artisans destinés aux manufactures et aux constructions diverses, imaginé par D'Alembert, se concrétise avec la création du conservatoire des Arts et Métiers en 1793-1794, puis, par les écoles des Arts et Métiers, destinées à combler le manque de techniciens et d'ouvriers spécialisés. Leurs origines et leurs destinées sociales les placent au dessous des élèves issus de l'Ecole Polytechnique, fondée en 1794 par la Convention. L'Ecole Polytechnique propose une formation initiale commune pour les différents corps d'ingénieurs de l'Etat. Les autres écoles

¹⁵ Denis Lemaître, «Le métier d'ingénieur: Héritage et Devenir,» Formation Humaine et Sociale, ENSTA BRETAGNE (2010), p. 6.

¹⁶ Hélène Vérin, *La gloire des ingénieurs, L'intelligence technique du XVIe au XVIIIe siècle* (Paris: Albin Michel, 1993), p. 245.

sont alors des écoles d'application. Pour être reçu au concours, il faut maîtriser en plus des sciences, l'escrime, l'équitation, la gymnastique, l'histoire de l'art. C'est une formation humaniste qui correspond au programme de l'*Encyclopédie*. L'apparition simultanée des deux écoles est significative. Elles deviennent des modèles de formation. L'une, tournée vers la pratique adopte une approche pragmatique des sciences, l'autre est l'archétype de la *Grande Ecole* qui diffuse un apprentissage théorique et encyclopédique à l'origine de l'autonomisation d'une classe sociale technocratique. A ce sujet, il faut aller consulter les travaux de Bruno Belhoste, auteur de *La Formation d'une technocratie*.¹⁷ Cet ouvrage, a non seulement pour objet l'étude des transformations de l'institution, de son personnel et des modalités de construction et de diffusion des savoirs dont elle est le théâtre, mais il interroge le rôle qu'a joué l'Ecole Polytechnique dans la constitution d'une *bureaucratie technique* et d'une *culture technocratique* en France à partir du XIX^e siècle. L'étude historique du projet pédagogique de l'Ecole Polytechnique pose les bases d'une réflexion générale sur les relations entre science et pouvoir qui caractérisera le régime napoléonien.

Dans un essai publié en 1993, intitulé *La gloire des ingénieurs*, la philosophe Hélène Vérin nous invite à pénétrer dans l'histoire de la figure qui nous intéresse sur une période allant du XVI^e au XVIII^e siècle. Vérin esquisse l'espace dans lequel les ingénieurs ont été placés : un espace au carrefour de l'esprit et de la matière, à la confluence d'intérêts contraires. Elle nous rappelle que c'est entre le XVI^e et XVIII^e siècle que se mettent en place les conditions de l'organisation de la *technique moderne* dans la société occidentale. C'est dans ce « lieu inédit » que le rôle et la fonction de l'ingénieur s'imposent. Comme le signale, à la fin du XVIII^e siècle, l'article de l'*Encyclopédie Méthodique* consacré aux ingénieurs de la Marine, les ingénieurs « se trouvent placés où l'on ne s'était jamais avisé de mettre personne ». ¹⁸ L'Etat, l'enseignement et la science, mais aussi l'entreprise, contribuèrent fortement à l'ouverture de cet *espace*. La figure que l'interaction de ces institutions suscitèrent et modelèrent, celle de l'ingénieur moderne, ne peut être réduite à la simple

¹⁷ Bruno Belhoste, *La Formation d'une technocratie. L'Ecole polytechnique et ses élèves de la Révolution au Second Empire* (Paris: Belin, 2003) et Bruno Belhoste, Amy Dahan Dalmedico et Antoine Picon, *La formation polytechnicienne, 1794-1994* (Paris: Dunod, 1994).

¹⁸ *Encyclopédie Méthodique*, « Marine », tome I, p. 454, article « constructeur »

combinaison de fonctions préalablement établies, son rôle ne se substitue pas non plus à celui exercé jusqu'alors par l'artisan. Mais, elle résulte de la confrontation d'intentions et d'intérêts particuliers : impératifs militaires, exigences économiques, ambitions positivistes (le terme est anachronique), idée de progrès... Créé de toute pièce par un système qui attend de lui qu'il le maintienne et le sublime et pour lequel il est indispensable, l'ingénieur moderne du XVII^e siècle à nos jours, s'efforcera d'affirmer sa place au sein des contradictions, de chercher la reconnaissance par delà les déconsidérations sociales et administratives dont il est parfois l'objet.¹⁹ L'objectif étant de défendre son art et sa science et, de sauvegarder, tant bien que mal, les conditions d'expression de son génie.

¹⁹ Hélène Vérin, *La gloire des ingénieurs, L'intelligence technique du XVI^e au XVIII^e siècle* (Paris: Albin Michel, 1993), p. 182-186.

2 L'IDEE DE PROGRES THEORIQUES DE L'ARCHITECTURE NAVALE ET LE GENIE MARITIME

Allez sur les cales ou dans les bassins de radoub, considérez les grâces et les forces des carènes, leurs volumes, les modulations très délicates et minutieusement calculées de leurs formes qui doivent satisfaire à tant de conditions simultanées. L'art intervient ici ; il n'est point d'architecture plus sensible que celle qui fonde sur le mobile un édifice mouvant et moteur.²⁰

Cette épure d'un portrait historique de la figure de l'ingénieur, de ses origines antiques, à l'avènement de l'époque moderne, j'ai taché de la détailler, de la compléter à travers des recherches sur l'histoire d'une discipline qui m'est chère puisque j'ai fait le choix de lui accorder ma carrière : *le génie maritime et l'architecture navale*. L'étude historique du génie maritime et de l'idée de progrès théoriques de l'architecture navale forme un formidable cas d'étude de la fonction, des pratiques et des problématiques de l'ingénieur moderne. Mais ce qui est encore plus frappant, c'est qu'elle nous éclaire sur les conditions d'apparition du modèle de l'ingénieur moderne dont nous héritons, aujourd'hui, un certain nombre de caractéristiques.

Nous l'avons dit plus haut, en France, le Corps du Génie Maritime est inauguré en 1765, en plein siècle des Lumières, un siècle qui témoigne de recherches soutenues et d'intenses développements dans le domaine de la *Science Navale*²¹ dans le but de marquer une distance avec une tradition millénaire de construction navale et de navigation. Cette étape marque explicitement la volonté de faire du navire l'objet de l'*ingenium*. Mais elle est le résultat d'un long processus de pensée qui s'est construit sur une préoccupation simple : comment fonder « sur le mobile, un édifice mouvant et moteur », capable de sillonner les mers et les océans avec à son bord des objets et des hommes ?

²⁰ Paul Valéry, Pièces sur l'art, *Regards sur la mer* (1930), dans Œuvres, éd. J. Hytier, Paris, Gallimard, « Bibliothèque de la Pléiade », t. II, 1960, p. 1341.

²¹ La Science Navale, en latin Scientia Navalis, qui a pour objet l'étude de la construction, de la manœuvre et de la navigation, s'est constituée comme une discipline à part entière en France au XVIII^e siècle et a acquis une réputation internationale. Elle implique une formation de haut niveau des ingénieurs de la marine de guerre et mobilise la communauté savante académique parisienne.

Naturellement, cette question nous renvoie aux origines de l'art de la construction navale et à la pratique de la navigation, c'est-à-dire aux prémisses de l'entreprise de conquête du globe à partir du berceau africain. Cependant, dans cette longue histoire qui est celle du navire et de la navigation - qui connaît d'ailleurs des évolutions et des développements spectaculaires bien avant l'intervention de la science moderne, de l'embarcation primitive destinée à la pêche et au cabotage, à la caravelle qui permit la conquête du Nouveau Monde - on peut identifier un mouvement de pensée dont l'ambition fut de rationaliser et de perfectionner l'*objet-navire*, à la lumière des sciences physiques et des mathématiques. Ce programme prend forme à la Renaissance, dans une société occidentale moderne naissante et nous conduit jusqu'à nos jours, où l'architecture navale, ses pratiques et ses théories, sont enseignées dans les écoles d'ingénieur et d'architecture.

Éléments historiographiques

L'étude historique et philosophique de l'architecture navale et de ses fondements théoriques, est un champ de recherche qui fait encore l'objet de relativement peu de travaux critiques en comparaison à d'autres disciplines. Si les recherches en histoire maritime et en archéologie navale ne peuvent pas négliger l'influence des sciences physico-mathématiques dans les pratiques de la construction et de la navigation à partir du XVII^e siècle et alimentent le récit de la Science Navale, peu de travaux se consacrent spécifiquement aux problématiques de la conception du navire et aux outils mis au point pour les résoudre. Il convient, ici, de citer les travaux que j'ai rencontrés au cours de mes recherches et qui ont inspirés mon récit.

Étonnement, l'historiographie débute assez tôt dans l'histoire de l'architecture navale théorique et suggère à la fois, une certaine fascination et, un véritable investissement des pionniers de la discipline, à l'égard de la science qu'ils développèrent. A ce sujet on citera la préface de l'*Examen maritimo* de Jorge Juan y Santacilia, publié en 1771.²² Ou encore l'*Histoire des mathématiques* de Jean Etienne Montucla (1802) qui contient un long récit des avancées mathématiques appliquées à l'architecture navale et à la navigation.²³ En 1800, l'historien britannique John Charnock, rédige *A History*

²² Jorge Juan y Santacilia, *Examen maritimo* (Madrid, 1771), Vol. 1, pp. v-xxx.

²³ Jean Etienne Montucla, *Histoire des mathématiques* (1802/1968), Vol. book 4, pp. 381-504.

of *Marine Architecture*, mais l'ouvrage traite principalement d'une histoire maritime et n'évoque que succinctement les développements théoriques de la construction navale et de la navigation. En 1851, le constructeur John Fincham, introduit son ouvrage, *A History of Naval Architecture*, avec une « Introductory Dissertation on the Application of Mathematical Science to the Art of Naval Construction ».²⁴

Plus récemment, il faut citer la leçon d'ouverture du célèbre historien Alfred Rupert Hall, donnée en 1979 au Science Museum de Londres, devant les membres de la Newcomen Society.²⁵ Aussi la thèse de Larrie Ferreiro, *Ships and Science*²⁶, publiée en 2007, offre une synthèse critique ambitieuse de l'application des sciences physico-mathématiques à l'architecture navale au cours de la *Révolution Scientifique*.

Sur le thème de l'hydrodynamique navale, on pourra se référer à la thèse de Thomas Wright de 1983²⁷, aux travaux d'Horst Nowacki²⁸ et à l'ouvrage d'Olivier Darrigol²⁹, sur l'histoire de l'hydrodynamique, qui consacre un chapitre au problème de la résistance des navires.

Les travaux de Simon Schaffer, fournissent une analyse critique des développements théoriques de l'architecture navale et traitent, en particulier, de l'usage de modèles réduits dans les pratiques des pionniers de la discipline.³⁰ Dans cette liste non exhaustive, n'oublions pas le magnifique essai de la philosophe Hélène Verin, *La gloire des ingénieurs*, publié en 1993, auquel nous avons déjà fait référence et sur

²⁴ John Fincham, *A History of Naval Architecture*, (London, 1851/1979), pp. ix-lxxxiv .

²⁵ Alfred Rupert Hall, «Architectura Navalis,» in *lecture read at Science Museum before the Newcomen Society* (London: Newcomen Society, 1979), 157-174.

²⁶ Larrie Ferreiro, *Ships and Science: The Birth of Naval Architecture in the Scientific Revolution 1600-1800* (MIT Press, 2007).

²⁷ Thomas Wright, *Ship Hydrodynamics 1710-1830* (University of Manchester Institute of Science and Thechnology, 1983).

²⁸ Horst Nowaki, *Developments in fluid mechanics theory and ship design before Trafagar* (Technical University of Berlin, 2005).

²⁹ Olivier Darrigol, *Worlds of Flow, A history of hydrodynamics from Bernoulli to Prandtl* (Oxford: Oxford university press, 2005).

³⁰ Simon Schaffer, «Modèles normatifs et architecture navale dans un Etat militaro-fiscal,» *Réseaux, La fabrication des normes*, 195-225 et Simon Schaffer, *Fish and Ships: Models in the Age of Reason*, Vol. ch. 4, chez *Models: The Third Dimension.*, 71-108 (Stanford, CA: Stanford University Press, 2004).

lequel nous reviendrons à plusieurs reprises dans ce mémoire.³¹ L'objet de son travail concerne plus généralement l'établissement de la figure de l'ingénieur moderne, mais l'ouvrage contient un précieux chapitre sur l'histoire des développements théoriques de la construction navale et les débats qu'ils suscitèrent au sein des sociétés savantes, de la communauté des ingénieurs et de l'administration d'Etat.

Définitions : Architecture Navale, Théorie du Navire et Génie Maritime

Le terme *architecture navale* fait, aujourd'hui encore, l'objet d'un certain flou lexical qu'il convient ici d'éclaircir. Architecture de l'objet-navire, science de la construction navale, discipline du génie maritime ? En France, et dans le reste du monde, l'architecture navale est enseignée dans des écoles d'ingénieurs, mais également dans des écoles d'architecture. Le flottement qui subsiste dans la définition de ce terme, témoigne, peut-être, de l'étendu des connaissances et des savoir-faire que l'exercice de la profession exige. Géométrie, arithmétique, analyse, mécanique, thermodynamique, dessin industriel, design, construction, gestion de projet, maîtrise du chantier... Tantôt présentée comme un art, parfois comme une science, il semble évident qu'aujourd'hui, cette activité ne peut pas être réduite à l'une ou l'autre de ces pratiques. Elle puise ses influences et ses références, aussi bien dans la tradition artisanale qui l'a fait naître, que dans la tradition analytique, qui, inspirée des sciences, a tant espéré ses progrès futurs.

³¹ Hélène Vérin, *La gloire des ingénieurs, L'intelligence technique du XVIe au XVIIIe siècle* (Paris: Albin Michel, 1993), pp. 335-368.

La première définition connue du terme *architecture navale*, est attribuée au mathématicien portugais, Joao Baptista Lavanha dans son traité *Livro primeiro da architectura naval* de 1610. « L'Architecture Navale, nous dit l'auteur, est ce qui suivant certaines règles, enseigne la construction de navires propres à naviguer convenablement ». ³² L'ouvrage de Lavanha ne fut cependant rendu public qu'au XX^e siècle. En 1629, l'architecte allemand, Joseph Furttenbach, publie *Architectura Navalis*. C'est le sixième volume d'une série d'ouvrages sur le thème de l'architecture. Le terme est alors entendu comme une discipline de l'architecture. On remarquera qu'à aucun endroit, l'auteur ne définit le terme *architecture navale*. Cela signifie, peut-être, qu'il était à cette époque déjà, employé couramment. ³³

Puisque la maîtrise des proportions a toujours été d'usage dans la construction navale traditionnelle, le terme pouvait faire référence à une certaine connaissance des mathématiques, telles qu'une arithmétique et une géométrie rudimentaire. En 1579, le mathématicien Thomas Digges s'était promis d'écrire « a briefe Treaties of Architecture Nauticall », il ne le fera jamais. En 1677, le constructeur français Charles Dassier remarquait que l'architecture navale avait été trop peu investie par les mathématiques :

Nous avons un grand nombre d'Auteurs qui ont amplement traité de toutes les parties des Mathématiques, & principalement de l'Architecture Civile & Militaire : Mais il semble que la plupart ayent négligé de nous instruire à fond de l'Architecture Navale. ³⁴

³² Larrie Ferreiro, *Ships and Science: The Birth of Naval Architecture in the Scientific Revolution 1600-1800* (MIT Press, 2007), p. xiii.

³³ Joseph Furttenbach, *Architectura Navalis* (1629/1975).

³⁴ Charles Dassié, *L'Architecture navale* (1677/1695/1994).

Rappelant à ses lecteurs que c'est grâce à cette science que l'on découvrit le Nouveau Monde, que l'on put instruire des lumières de l'Évangile les peuples qui y vivaient sans police ni religion, et que c'est par elle que l'on assure la grandeur, la félicité et l'éclat de l'Etat, il poursuit :

Le principal sujet de mon dessein n'a été que de réduire en Art le plus méthodiquement qu'il m'a été possible, une Science si nécessaire & si utile à l'Etat ; de le rendre familier ; d'inciter ces savants Mathématiciens & ces illustres Ingénieurs de l'Académie Royale, à chercher des moyens infailibles pour rendre les Vaisseaux plus légers à la voile, & pour trouver le juste poids de tonneaux & la véritable symétrie, afin de porter l'Architecture Navale au plus haut point de la perfection.³⁵

Au-delà de la maîtrise de l'arithmétique et de la géométrie, c'est au moment où l'on tâche d'intégrer, au sein de l'architecture navale et de ses exigences pratiques, les outils de la *mécanique rationnelle* - la statique, la dynamique et l'hydrodynamique, aux XVII^e et XVIII^e siècles, puis ceux de la thermodynamique au XIX^e siècle - que s'organise le projet d'établir une *Théorie du Navire*, soit une application des principes de la physique à la modélisation des comportements de l'objet-navire dans son environnement.

Reste que sous tous les aspects qu'elle recouvre, l'architecture navale est une discipline, un art, une science, une pratique dont l'objet est de fonder « sur le mobile un édifice mouvant et moteur ». En cela, et nous tâcherons de le justifier au cours de ce mémoire, elle requiert l'expression d'une certaine intelligence technique appliquée aux contraintes et exigences de la mer. C'est peut-être ainsi que l'on parle, à partir du XVIII^e siècle, de *génie maritime*, comme un espace à part entière d'expression de l'*ingenium*. Espace essentiellement *maritime* dans le sens où le *génie* prend pour objet la mer, ses exigences et ses pratiques. Cette idée fait, incontestablement, de l'architecture navale une discipline du génie maritime.

Aujourd'hui, lorsque l'architecte naval entame un projet, il emploie des règles simples de proportions et fait l'usage de connaissances géométriques rudimentaires, comme le faisaient déjà les charpentiers de marine, il y a de ça plusieurs siècles. Dans la suite du projet, l'usage des principes de la *Théorie du Navire*, s'impose dans le but de prédire les performances et caractéristiques du navire avant qu'il ne soit construit.

³⁵ Charles Dassié, *L'Architecture navale* (1677/1695/1994).

A présent, examinons la définition que donnent, Jules Pollard et Auguste Dudebout, professeurs de l'Ecole de Génie Maritime, dans leur ouvrage intitulé *Architecture navale : Théorie du navire*, publié en 1894, qui clôture le XIX^e siècle et introduit la forme contemporaine de la discipline :

Sous la dénomination générale d'Architecture Navale, comprend toutes les connaissances théoriques et pratiques relatives aux Navires, à l'établissement de ses formes, au choix de ses dimensions, à l'étude de ses qualités nautiques, à la construction de ses diverses parties, à son aménagement, etc.

L'Architecture Navale se divise naturellement en deux parties bien distinctes : la Théorie du Navire et la Construction du Navire.

La Théorie du Navire, ou Architecture Navale Théorique, comprend le tracé des plans, l'étude géométrique et mécanique des corps flottants dans les diverses circonstances de repos et de mouvement.

La Construction du Navire vise plus spécialement la description de la charpente et de ses accessoires, ainsi que les procédés de mise en œuvre des matériaux qui la composent.³⁶

Comme en témoignent les premières phrases de cet ouvrage, la distinction entre un savoir théorique fondé sur la maîtrise des principes des sciences mécaniques, et des connaissances pratiques héritées d'un savoir-faire traditionnel, est un schéma courant qui structure encore les ouvrages de référence d'architecture navale contemporaine. Cette distinction, met en évidence deux sources de savoirs : une tradition artisanale millénaire de la construction navale et une approche analytique de la discipline.

Avant de poursuivre, il fallait encore se familiariser avec les origines d'une pratique qui débute bien avant l'établissement de la science dans la société moderne. Il s'agissait d'envisager par quels moyens, l'idée de progrès théorique, a investi une pratique millénaire. Comprendre pourquoi cette conception nouvelle s'est développée en Europe, sur une période qui recouvre le XVII^e et le XVIII^e siècle. Mais aussi, comment l'architecture navale fut l'objet d'une véritable institutionnalisation en réponse aux problématiques d'une société moderne. Société dans laquelle on fait le pari que l'expression de la puissance de l'Etat, qui s'exprime à travers sa supériorité économique et militaire, pourra être sublimée par le progrès technique, catalysé par la science.

³⁶ Pollard et Dudebout, *Architecture navale : Théorie du navire* (1890).

2.1 Histoire du navire, de la construction et de la navigation

Si l'on songe, après tout, que le bateau, c'est un morceau flottant d'espace, un lieu sans lieu, qui vit par lui-même, qui est fermé sur soi et qui est livré en même temps à l'infini de la mer et qui, de port en port, de bordée en bordée, de maison close en maison close, va jusqu'aux colonies chercher ce qu'elles recèlent de plus précieux en leurs jardins, vous comprenez pourquoi le bateau a été pour notre civilisation, depuis le XVI^e siècle jusqu'à nos jours, à la fois non seulement, bien sûr, le plus grand instrument de développement économique (ce n'est pas de cela que je parle aujourd'hui), mais la plus grande réserve d'imagination. Le navire, c'est l'hétérotopie par excellence. Dans les civilisations sans bateaux les rêves se tarissent, l'espionnage y remplace l'aventure, et la police, les corsaires.³⁷

A la différence du vol, de la fission nucléaire, ou des télécommunications, qui apparaissent comme des *révolutions* dans l'histoire des techniques modernes, la construction navale et la navigation connaissent une toute autre destinée.

Il est commun de prétendre que l'histoire du navire accompagne celle de l'homme, probablement car il est peine perdue d'envisager les origines de cette pratique. Les traces connues, d'embarcations les plus anciennes remontent à la période du Mésolithique (entre 10 000 et 5000 av. J.-C.). Les pétroglyphes découverts dans la région de Gobustan en Azerbaïdjan marquent la trace d'activités nautiques vers 10 000 av. J.-C. Autre témoignage, les bateaux inscrits sur les roches de Bohuslan en Suède datent de la période intermédiaire entre l'âge de pierre et l'âge de fer, entre 5000 et 3000 av. J.-C (Figure 2-1). La pirogue de Pesse découverte au Pays-Bas en 1955, est considérée comme la plus ancienne embarcation *connue* au monde. La datation au carbone 14 indique que le bateau, de 3m de long et de 50 cm de large, a été construit au cours du début de la période Mésolithique, entre 8040 av. J.-C. et 7510 av. J.-C.

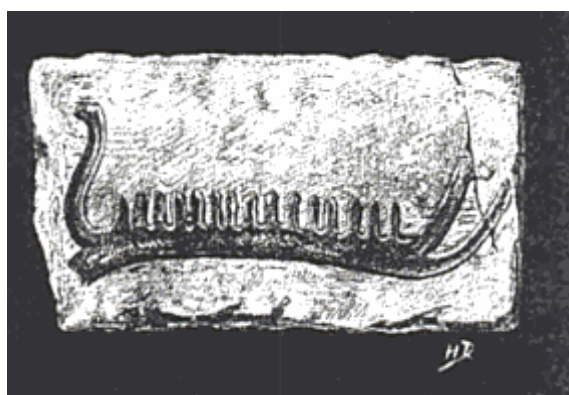


Figure 2-1 : Représentation d'un navire, pétroglyphe des Roches de Buhuslan

³⁷ Michel Foucault, Dits et écrits 1984, Des espaces autres (conférence au Cercle d'études architecturales, 14 mars 1967), in Architecture, Mouvement, Continuité, n°5, octobre 1984, pp. 46-49.

A ces traces matérielles, s'ajoutent des hypothèses relatives au peuplement de certaines parties du monde qui font remonter l'origine de la navigation et donc de la construction de bateau encore plus loin. Le peuplement du plateau continental *Sahul* dont aujourd'hui les parties émergées correspondent à l'Australie, l'île de la Tasmanie et la Nouvelle Guinée remonterait à 60 000 ans. Il est difficile d'envisager raisonnablement que des hommes aient atteint cette région, isolée du *Sunda* d'une centaine de mille nautiques, à la nage. En 2009, la découverte d'outils associés à l'*Homo erectus* sur l'île de la Crête, isolée du continent depuis 5 millions d'années, suggère que l'île fut atteinte par la mer il y a plus de 130 000 ans.

A ces premières remarques, s'ajoute l'étonnante diversité des solutions mises au point pour circuler sur les mers ; si bien que raconter l'histoire du navire est une entreprise ambitieuse, dans laquelle seul un nombre restreint de passionnés se sont engagés. Ce fut l'objet du commandant Guilleux la Roërie en 1956 qui dans *Introduction à une histoire du navire*, opérait déjà des distinctions :

L'histoire des navires de tous les temps et de toutes les régions, ou plutôt, de ce que l'on peut connaître, est un domaine immense que beaucoup de gros volumes n'épuiserait pas. Le problème, pour moi, est de faire un choix. J'ai donc écarté, parmi les innombrables engins flottants et navigants, tous ceux dont le développement était voués à s'arrêter ; je compte me borner à ceux ayant joué quelque rôle dans la genèse et l'élaboration de ce qui est aujourd'hui le navire de mer de notre civilisation occidentale. Autrement dit, ce que je cherche à ordonner, ce sont les réponses à la question que, devant le navire d'aujourd'hui, se posent parfois les gens aimant à réfléchir, penseurs ou rêveurs curieux du passé : comment étaient faits les ancêtres dont ce navire représente l'aboutissement ? Suivant le fil de cette évolution, jusqu'où peut-on remonter ?³⁸

Le récit du navire, nourrit des découvertes archéologiques et de la recherche historique, est étendu et lacunaire. L'historiographie lorsqu'elle cherche la cohérence et la continuité est dans l'obligation de faire des distinctions.

L'illustre architecte naval suédois, Fredrick Henrik af Chapman, distinguait deux classes de bâtiments : « ceux dont on se sert pour le cabotage et les petites navigations » et « les plus grands, ceux, que l'on emploie aux voyages de long cours & qui sont propres à naviguer sur l'Océan ».³⁹ Si comme le climat, l'étendue et la

³⁸ Guilleux la Roërie, *Introduction à une histoire du navire*, Vol. 11e année, 2 vols. (Annales. Economie, Société et Civilisation, 1956).

³⁹ Fredrik Henrik af Chapman, *Traité de la construction des vaisseaux. Avec des éclaircissements & démonstrations touchant l'ouvrage intitulé: Architectura Navalis Mercatoria, & C. Traduit du suédois, publié avec quelques notes et additions.*, trad. Honoré Sébastien Vial de Clairbois (Brest et Paris: Malassis, 1781), préface.

profondeur des mers, les positions des pays par rapport à la mer et entre eux, les moyens de productions, sont très différents de nation à nation, les bâtiments de la première classe ne peuvent être que de la même espèce. Si ensuite on observe les bâtiments compris dans la seconde classe, on reconnaîtra que, construits pour le même but, ils sont, quoique de nations différentes, ressemblants dans les parties essentielles : leurs proportions sont comprises dans certaines bornes dictées par « des essais et des expériences infinis ».

A la lumière de ces remarques préliminaires, qui ont pour objet de faire sentir au lecteur la profondeur et l'étendue de l'histoire de la pratique de la construction navale, il s'agit de préciser que le but de notre propos n'est pas de raconter l'histoire du navire, de sa construction comme technique, de la navigation comme pratique. Mais plutôt de s'intéresser à une étape remarquable de cette histoire. Une étape qui est le résultat d'un long processus d'abstraction qui commença dans l'esprit de l'homme primitif ou plutôt du premier marin. A partir de l'expérience de la mer, on dû extraire les *qualités sensibles* du navire : vitesse, stabilité, confort, réactivité, que l'on voulût ramener à des *dispositions constructives*. Mais alors comment un discours sur des qualités qui prennent leurs origines dans notre rapport sensible et subjectif au monde et à l'expérience de la mer, pouvait prétendre amener à des dispositions techniques formelles et objectives ? On assiste, ici, à l'évolution d'une approche *artisanale*, empirique de l'architecture navale vers une approche *analytique*, où l'on démontre que l'expérience n'est plus suffisante pour faire des navires de qualité.

Cette évolution est reflétée, en Europe, par un changement de registre dans la littérature du milieu du XVII^e siècle. La mise en rapport entre *qualités nautiques* visées et la *forme* d'un navire nécessite alors de se fonder, non seulement sur l'expérience (de la mer, et des chantiers), mais aussi sur des *principes*. Il s'agit de distinguer le *concept* de *l'expérience sensible*.

2.2 L'idée de progrès théoriques de l'architecture navale

Depuis la fin du XV^e siècle, les traversées et les circumnavigations se succèdent. Au début du XVII^e, le navire océanique et les grandes découvertes qu'il a rendu possible, semblent inspirer le programme d'une société des savoirs modernes à en juger le fameux frontispice du *Novum Organum* de Francis Bacon paru en 1620.⁴⁰ On y voit figuré un de ces fameux navires traversant les colonnes d'Hercule qui bordent le détroit de Gibraltar et marquent le passage de l'ancien monde, celui de la tradition vers un monde nouveau, celui de la connaissance.

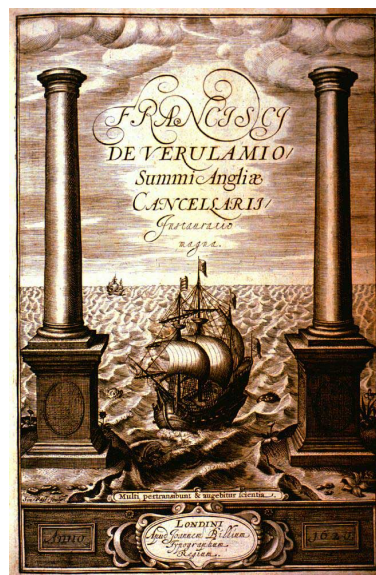


Figure 2-2 : Frontispice du *Novum Organum* de Bacon

Le navire est très certainement un des objets les plus complexes de l'époque. Support des voyages scientifiques, c'est un instrument de connaissance. Un outil de développement qui promeut le commerce international. Une machine de guerre, au service du pouvoir. A n'en pas douter, derrière le progrès de l'architecture navale se dessine la promesse du rayonnement des empires du monde moderne.

⁴⁰ Francis Bacon, *Novum Organum or true directions concerning the interpretation of nature*, trad. traduction et notes par M. Malherbe et J.-M. Pousseur Introduction (1620).

A partir de la fin du XVII^e siècle et les écrits programmatiques du chevalier Renau d'Elizagaray (1689) et de Paul Hoste (1697), on estimait que le progrès de l'architecture navale devait passer par l'examen théorique. On constatait :

Le hazard a tant de part à la construction, que les Vaisseaux qu'on construit avec plus de soins, se trouvent d'ordinaire les plus mauvais ; & ceux qu'on a négligés, se trouvent quelquefois les meilleurs... Aussi les traités de l'Architecture navale, qui ont paru jusqu'ici, n'ont touché qu'à l'écorce de la construction des Vaisseaux. On s'est contenté de donner le nom, la figure, la liaison, & l'usage des diverses parties du Vaisseau, avec quelques proportions générales, que le hazard ou le caprice avoit introduit parmi les Constructeurs. Mais qui ne voit, que tout cela peut bien apprendre à bâtir des vaisseaux bons ou mauvais ; & non pas à en faire de bons le plus sûrement, le plus aisément, & avec le moins de frais qu'il se peut, comme la perfection de l'art l'exige ?

Il est vrai que depuis quelques années les Constructeurs François ont travaillé à perfectionner leur art. Quelques-uns ont commencé de faire des plans, où ils ont déterminé tous mes Gabaris ou modèles de l'avant à l'arrière ; mais comme ils n'ont pas les principes nécessaires ; ils travaillent avec peu de sûreté. Leurs Vaisseaux ne sont pas meilleurs, que ceux qu'on bâtissait, sans savoir ni lire ni écrire : ils ne vont pas mieux, ils portent souvent moins la voile, ils tombent plutôt, ils durent moins : en un mot les Constructeurs d'aujourd'hui conviennent comme les Anciens, qu'on ne sait pas encore *ce que veut la mer*.⁴¹

Ce sévère jugement, dont le Père Hoste est l'auteur et qui semble inspiré de la rhétorique galiléenne dans *l'Essayeur*⁴², définit la problématique de *l'architecture navale théorique*. Il s'agit de réduire à quelques *principes fondamentaux*, un art, une pratique, qui avait trop longtemps adopté « les préjugés de la tradition ». Les qualités nautiques du navire devaient être ramenées à sa forme, au moyen de la géométrie et d'une science du mouvement.

Sur ce registre, le XVII^e et le XVIII^e siècle connaissent toute une émulation académique autour de problèmes théoriques et de considérations techniques liées à la navigation, à la manœuvre et à la construction navale. L'abondance des publications dont la Science Navale, la *Scientia Navalis*, fait l'objet au cours de cette période, est à la fois le reflet et la conséquence du programme de reconstruction et de réorganisation de la flotte Française qui avait été initié par Jean-Baptiste Colbert en 1669 et promu par ses successeurs au secrétariat de la Marine. Colbert, dont on connaît les tendances, cherche à trouver les meilleurs plans, les meilleurs formes de vaisseaux ; il veut comparer les travaux des constructeurs des divers ports de France : Brest, Rochefort,

⁴¹ Paul Hoste, *Théorie de la construction des vaisseaux* (Lyon: Anisson & Posuel, 1697).

⁴² « La philosophie est écrite dans ce livre gigantesque qui est continuellement ouvert à nos yeux (je parle de l'Univers), mais on ne peut le comprendre si d'abord on n'apprend pas à comprendre la langue et à connaître les caractères dans lesquels il est écrit. Il est écrit en langage mathématique, et les caractères sont des triangles, des cercles, et d'autres figures géométriques, sans lesquelles il est impossible d'y comprendre un mot. Dépouvé de ces moyens, on erre vainement dans un labyrinthe obscur » Galileo Galilei, *Il Saggiatore (l'Essayeur)*, éd. les Belles Lettres, trad. Christiane Chauviré (Rome, 1623).

Toulon mais aussi de l'étranger. Il voudrait comme le fera son fils, Jean-Baptiste Antoine Colbert, marquis Seignelay, codifier les types et normaliser conformément aux meilleurs tracés.

Parmi les auteurs de cette littérature, on s'accorde à reconnaître dans le système que forme la mécanique rationnelle, les outils qui permettraient de rationaliser une pratique que l'on juge encore obscure et incertaine. Il s'agit donc d'investir le monde de la construction navale et de la navigation avec la géométrie, d'organiser les conditions d'une confrontation entre le savoir traditionnel des maîtres charpentiers, l'expérience de la mer des officiers de la Marine et l'ambition théorique des géomètres.⁴³ Si pour les géomètres, cette confrontation doit s'organiser dans le domaine de la pure abstraction, pour le roi et ses ministres, elle doit s'établir dans le domaine du sensible face aux modèles. Là où la science doit permettre, au mieux, de découvrir des principes intelligibles nécessaires à la déduction de formes véritables, et pour le moins de réduire le champ des possibles, l'administration tend à normaliser les opinions par la standardisation des navires.

⁴³ Hélène Vérin, *La gloire des ingénieurs, L'intelligence technique du XVIe au XVIIIe siècle* (Paris: Albin Michel, 1993), p. 337.

2.2.1 Les savants et la *Scientia Navalis*

Le contraste entre l'ignorance des artisans et la perfection théorique, dont le ton fut donné dans l'ouvrage du Père Hoste, est un thème récurrent dans la littérature des analystes de la *Scientia Navalis* du XVII^e et du XVIII^e siècle. En 1783, le mathématicien espagnol, Don Jorge Juan y Santacilia, dans la préface de son *Examen maritime*, se lamentait que l'architecture navale avait été abandonnée à « De Simples Charpentiers (qui) adoptoient très souvent les préjugés de la tradition : flottant ainsi dans les espaces immenses de l'erreur, ce n'étoit que par un hasard singulier qu'ils pouvoient parvenir à faire des Vaisseaux qui eussent de bonnes qualités ».⁴⁴ On prend donc la mesure que le secret des constructeurs et leurs règles du pouce compromettent le progrès d'un art pour lequel on s'accorde à reconnaître l'importance économique et politique de l'artifice dont il est à l'origine.

On reconnaît trois périodes de publication. A la fin du XVII^e, les écrits programmatiques du chevalier Renau d'Elizagaray⁴⁵ et du père Hoste⁴⁶, en 1689 et 1697, marquent le début et les ambitions de cette nouvelle science. Moins directement, mais non sans conséquence pour la suite de l'histoire, rappelons qu'à cette période, Isaac Newton, ayant mis au point dans ses *Principia* (1687) une méthode pour calculer la résistance éprouvée par un corps en mouvement dans un fluide, conclut avec prudence dans le scolie : « Je ne crois pas cette proposition inutile pour la construction des vaisseaux ».⁴⁷ Au milieu du XVIII^e, on connaît trois grands auteurs : Pierre Bouguer et son *Traité du navire* (1746)⁴⁸, et Leonhard Euler sa *Scientia Navalis* (1749)⁴⁹ et sa *Théorie complète de la construction et de la manœuvre*

⁴⁴ Georges Juan y Santacilia, *Examen maritime, théorique et pratique*, trad. Pierre Lévêque, 2 vols. (Nante: Malassis & Despillay, 1771).

⁴⁵ Bernard Renau d'Elizagaray, *De la Théorie de la manoeuvre des vaisseaux* (Paris: Michallet, 1689).

⁴⁶ Paul Hoste, *Théorie de la construction des vaisseaux* (Lyon: Anisson & Posuel, 1697).

⁴⁷ Isaac Newton, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, livre II, section 7, prop. 34, th 38, scolie, trad. Chastellet, Paris, 1759, p. 353.

⁴⁸ Pierre Bouguer, *Traité du navire, de sa construction et de ses mouvements* (Paris, 1746).

⁴⁹ Leonhard Euler, *Scientia Navalis* (1749).

des vaisseaux (1773)⁵⁰. En 1752, Henri Louis Duhamel du Monceau publie un manuel, *Elemens de l'architecture navale ou traité pratique de la construction des vaisseaux*, destiné à la « petite école » : la première école des *Ingénieurs-constructeurs* de vaisseaux royaux, qui avait ouvert ses portes à Paris en 1741. Enfin, à la fin du XVIII^e siècle, on trouve une grande synthèse, avec *L'Encyclopédie Méthodique* : « *Marine* » rédigée en partie par Honoré-Sébastien Vial du Clairbois (1783-1787).

A la fin du XVIII^e siècle, l'essentiel des énigmes et fondements théoriques qui forment l'architecture navale théorique est posé, mais les modèles de la *Théorie du Navire* ne sont pas encore assez solides pour répondre aux exigences de la pratique et se confronter à la réalité d'un monde où tout change. La complexité des phénomènes mis en jeu est difficilement formalisée par les géomètres et l'espoir de connaître *ce que veut la mer*, se dissipe.

D'ailleurs en une cinquantaine d'année, de Hoste à Bouguer, l'attitude des savants de la physique du navire a bien évoluée. Face à la complexité de l'entreprise, Bouguer interroge :

Comment comparer (...) un grand nombre de quantités ou de conditions qui ne peuvent être représentées que par des courbes d'un genre fort élevé, ou par des équations formées d'un grand nombre de terme ? Vouloir alors se priver du secours nécessaire de l'Algèbre, c'est comme si l'on entreprenait sans Rame, sans Voile et même sans Radeau, de franchir à la nage une vaste mer.⁵¹

Jauger le navire, établir son centre de gravité, estimer les effets de ses déplacements, régler chacune de ses parties – des entrailles de sa carène, aux mats et aux voiles - projeter son évolution, mais aussi mettre en doute, autant que faire ce peut, les règles de proportion des charpentiers, comme pour rendre légitime une place dûment acquise : tel est l'ambitieux programme de ces ingénieux savants, qui se réalise à travers l'application des principes généraux d'une physique encore immature, à un objet de la plus grande complexité. Le champ est donc ouvert à la recherche, administré par l'Etat et ses inspecteurs.

⁵⁰ Leonard Euler, *Théorie complète de la construction et de la manoeuvre des vaisseaux, mise à la portée de ceux qui s'appliqueent à la navigation* (1773).

⁵¹ Pierre Bouguer, *Traité du navire, de sa construction et de ses mouvements* (Paris, 1746).

2.2.2 La normalisation des vaisseaux de ligne

Ce n'est peut être pas une simple coïncidence si, à la fin du XVIII^e siècle, la question de la normalisation des vaisseaux selon des rangs déterminés, qui avait été suggérée par le Grand Colbert un siècle plus tôt, revient à l'ordre du jour. Un mémoire de Briqueville envoyé dans les ports en 1778 annonce que « l'art de la construction des vaisseaux de guerre est maintenant assés connu par les essais qui ont été faits, pour prononcer définitivement sur les principales dimensions que demande chaque rang ».⁵² Il s'agit donc de clore un épisode de l'histoire de l'architecture navale : celui des essais et des tâtonnements. Pour le bénéfice des exigences économiques ? Pour le bienfait d'une organisation industrielle ? Pour palier l'insuffisance des théories physiques ? Ces prétentions normalisatrices dépassent la fixation des dimensions principales du navire, puisque pour chaque rang, l'objectif est d'obtenir des vaisseaux identiques dans toutes leurs parties. Trois ans plus tard, Jean-Charles, Chevalier de Borda, est chargé de fixer les plans des navires de chaque rang. En 1782, les plans et les devis du vaisseau de soixante-quatorze canons sont envoyés dans les ports ; le cent dix-huit et le quatre-vingts canons suivront en 1786 et 1787.

La normalisation, l'uniformisation de la production et de produits ne sont-elles pas contraires aux progrès que suggérerait l'application des sciences à l'art de l'ingénieur ? Faut-il privilégier la production, le choix de l'industrie, la reproduction en série de prototypes au détriment de la liberté créatrice qui caractérisait l'héritage légué par les ingénieurs de la Renaissance ?

En 1793, un groupe d'ingénieurs se révoltèrent dans un *Mémoire sur les causes qui s'opposent au progrès de l'architecture navale*.⁵³ Il convient, pour notre propos, de citer l'ensemble des passages rassemblés dans l'ouvrage de Hélène Vérin, tant l'opposition entre l'idée de progrès théoriques de l'architecture navale et la question de la normalisation des vaisseaux semble animer les débats de la période qui nous intéresse. Parlant de « forteresses flottantes », de « châteaux ailés » pour désigner les

⁵² A.N. Mar. G 141, 25, « Mémoire de Briqueville sur les principales dimensions des vaisseaux », 23 septembre 1771, dans Hélène Vérin, *La gloire des ingénieurs, L'intelligence technique du XVI^e au XVIII^e siècle* (Paris: Albin Michel, 1993), p. 360.

⁵³ Cf. Amphion IV, voir Hélène Vérin, *La gloire des ingénieurs, L'intelligence technique du XVI^e au XVIII^e siècle* (Paris: Albin Michel, 1993), p. 365.

navires qu'ils construisent, ils interrogent : « le dernier point de perfection est-il trouvé ? ». A cela, ils répondent :

Non, Messieurs ! (...) En vain sacrifions-nous nos jeunes ans à ces examens sévères sur ce que la géométrie a de plus transcendant, la physique de plus concluant, la chimie de plus plausible, nos efforts ont été superflus.

(...) Il existe donc une cause plus réelle, plus puissante, plus destructive, plus funeste, produite par une crainte qui ne peut souffrir, perpétuée par l'erreur (...). Un règlement ayant force de loi, promulgué depuis plusieurs années, qui adopte des plans propres à servir de modèles vaisseaux présents et futurs, est un obstacle insurmontable. C'est lui qui fermant le chemin que l'on pourroit parcourir avec les succès les plus distingués, nous place parmi les copistes dont l'ennuyeuse et triste destinée est celle d'ignorer les premiers principes, de ne pas connoître ce que peut produire les bonnes qualités des vaisseaux ; de suivre douloureusement une routine aussi aveugle que superstitieuse, lorsque notre éducation nous assigne un rang infiniment plus élevé, nous permet de créer.

Ce règlement date de 1782 pour les vaisseaux de 74 canons, de 1786 pour ceux à trois ponts et de 1787 pour ceux de 80. Avant de le rendre, on a exigé des ingénieurs les plus instruits, les plus expérimentés, de ceux mêmes auxquels une carrière glorieuse offroit une réputation que la Nation avoit reconnue, des plans exposés à une espèce de concours dont le jugement n'a pas été plus motivé que les causes qui ont établi la préférence. Les plans adoptés sont tous du même auteur, et ceux qui ont concouru, non seulement ignorent les raisons qui ont engagé à décerner la palme, mais condamnés encore à ensevelir dans l'oubli des talents qu'ils auroient pu faire fructifier, nul d'eux n'a obtenu la gloire de l'accessit. Cette marche est d'autant plus propre à exciter l'étonnement que dans les sociétés savantes, dans les académies, elle est proscrite ; et que dans les unes et dans les autres ce sont ceux qui sont passés par ces épreuves de mérite qui, assez généralement, en sont proclamés les juges. Ainsi un jugement qui n'est fondé sur aucune raison publiquement connue, prononcée dans l'ombre du silence, exécuté avec adresse, voilà ce qui constitue le règlement qui existe, voilà la loi qui détruit les analogies, qui captive le talent, et perpétue les préjugés qui font rougir le vrai mérite et deviennent son tombeau.

Liberté créatrice et considération, voilà ce que revendiquent nos ingénieurs avec le style emphatique qui est tant caractéristique du XVIII^e siècle. La décision de ne plus construire qu'un seul modèle avait été si bien justifiée que le mémoire s'efforce d'en détruire les arguments :

Examinons donc les avantages de ce système, comparons les aux inconvénients et concluons. Une uniformité constante dans les formes des vaisseaux, uniformité dont la nature n'offre aucun exemple dans ses merveilles, en apporte une dans la consommation, rend la comptabilité plus facile, accélère le mouvement du service, détruit toute espèce de crainte, voilà sans doute ce qui a ébloui les partisans des plans généraux. Quelle illusion. Que l'on examine les diverses formes qu'un siècle d'application a produites, que trouvera-t-on ? Des variétés dans les causes, des analogies dans leurs effets, et des différences dans les valeurs intrinsèques en raison des dimensions principales. Toutes les ordonnances de la marine ayant fixé ces dimensions, ainsi que celles des mâtures d'une manière aussi constante que relative au service, il s'ensuit que le précieux avantage de l'Economie est nul, et que l'art n'en est plus un.

Comme le remarque, à juste titre, Hélène Vérin, le mémoire élimine curieusement l'argument déterminant dans cette décision administrative.⁵⁴ Il ne s'agit pas seulement, d'avantages économiques et techniques, mais bien d'un choix militaire : privilégier le combat en escadre à la guerre de course. Il fallait donc construire des navires capables d'évoluer suivant un même régime et d'effectuer des manœuvres synchronisées.

A ce sujet, l'expérience avait montré auparavant que la standardisation de la construction n'était pas gage de performance. Dans sa critique du *Traité du navire* de Pierre Bouguer (1747) le Commissaire de la Marine, Boureau-Deslandes, se plaisait à rappeler :

On construisit, il y a environ cinquante ans quatre Vaisseaux à Toulon, qu'on nommoit les quatre Frères. Ils avoient même longueur, même largeur, même creux, même élancement d'étrave, même queue de l'étambot &c. (...) mais quand il fallut les faire naviguer, il fallu aussi les gréer différemment. L'un vouloit que les haubans fussent ridés (...) l'autre que ces même haubans fussent lâches : l'un demandoit un certain tirant d'eau, l'autre en demandoit un plus grand ou plus petit (...) sans que personne pût répondre de ces bizarreries.⁵⁵

Que fallait-il conclure de ces débats ? Alors que la science du navire ne cessait de montrer des faiblesses, on imposa l'idée d'un modèle général qui puisse former le cadre de ses futurs développements. Devant tant de contrariétés, l'idée semblait à l'évidence la plus sage. En limitant les conditions de résolution du *problème du navire*, on se donnait la possibilité de converger vers une solution favorable.

⁵⁴ Hélène Vérin, *La gloire des ingénieurs, L'intelligence technique du XVIe au XVIIIe siècle* (Paris: Albin Michel, 1993), p. 367

⁵⁵ Voir Jean-Jacques Briost, «L'ingénierie cartésienne de Renau d'Élissagaray,» *Documents pour l'histoire des techniques*, Vol. 16, éd. <http://dht.revues.org/818> (2e semestre 2008).

2.2.3 La science en système

« La science de l'ingénieur des vaisseaux de guerre est encore en système », remarque Vial du Clairbois en 1783 ; c'est pourquoi, pense-t-il, il faut que les ingénieurs soient constamment sollicités à « voir les choses par eux-mêmes » ; qu'on les envoie à la guerre, à la mer, « c'est le moyen d'avoir un corps éclairé dont la lumière, avec le temps, perce les plus profondes ténèbres ».⁵⁶

Un système au sens de Vial, résulte d'un choix qui ne maîtrise pas tous les possibles, et qui se tient cependant dans l'ordre des possibles. Si la science des ingénieurs était inachevée, ce que suggèrent les propos de Vial c'est qu'elle est idéalement achevable. « (...) actuellement limitée, elle ne s'exprime que dans des solutions partielles et partiales qui sont autant d'étapes vers une théorie plus générale ».⁵⁷ Vial, qui deviendra plus tard directeur de l'Ecole du Génie Maritime (anciennement la « petite école » de Du Monceau), se place dans la tradition d'une philosophie de l'expérience que véhicule l'*Encyclopédie*. « Partant du divers sensible, l'esprit forme des idées, les confronte et élargit le domaine de ses considérations. C'est parce qu'entre le sensible et l'intelligible, il y a continuité que la théorie locale peut féconder la théorie générale, les progrès de l'application des sciences en sont la preuve par les faits ».⁵⁸ La science ne peut pas être la seule à susciter le progrès en l'architecture navale. Devant les insuffisances de la physique mécanique, la suffisance des premiers géomètres se trouve ici nuancée.

Dans ses *Eléments d'architecture navale*, Duhamel du Monceau suivait déjà la tradition engagée par Colbert et Seignelay.⁵⁹ On exposait aux élèves les différentes méthodes des constructeurs dans le but de dégager quelques principes généraux qui pouvaient faire l'objet d'une étude physique et mathématique. « Mais l'essentiel de l'effort pédagogique consiste, par ces énumérations et confrontations, à introduire le doute dans l'esprit des élèves ou, plutôt, de faire naître chez eux un esprit de doute

⁵⁶ Honoré-Sébastien Vial du Clairbois, *Encyclopédie Méthodique: Marine*, Vol. I (Paris: Panckouke, 1783-1787).

⁵⁷ Hélène Vérin, *La gloire des ingénieurs, L'intelligence technique du XVIIe au XVIIIe siècle* (Paris: Albin Michel, 1993), p. 361.

⁵⁸ Ibid.

⁵⁹ Henri-Louis Duhamel du Monceau, *Eléments de l'architecture navale ou traité pratique de la construction des vaisseaux* (Paris, 1752).

devant toute prétention au « meilleur », et à affiner leurs évaluations ».⁶⁰ Devant la profusion des débats, et face au pouvoir limité de la science qu'on leur enseigne, la culture d'un *Esprit critique* est, peut-être, la meilleure instruction que de jeunes ingénieurs pourront recevoir. Mais n'allons pas trop vite et tâchons à présent d'éclaircir le contexte dans lequel les débats sur la question des progrès théorique de l'architecture navale se sont imposés.

⁶⁰ Hélène Vérin, *La gloire des ingénieurs, L'intelligence technique du XVIe au XVIIIe siècle* (Paris: Albin Michel, 1993), p. 359.

2.3 Promotion des connaissances théoriques et des savoirs pratiques

Si l'enthousiasme pour investir l'art millénaire de la construction navale à la lumière des outils de la science moderne marque la littérature du XVII^e et du XVIII^e siècle, il faut envisager ici les raisons de la promotion et du développement d'une telle conception dans notre Europe renaissante. Au service des intérêts militaires et économiques de l'Etat, le développement de la Science Navale fut aussi une étape incontournable du projet de société moderne des savoirs promue par l'Esprit des Lumières.

2.3.1 Les tribulations de la Marine royale française du XVI^e au XVIII^e siècle

Les développements théoriques de l'architecture navale s'inscrivent dans une histoire maritime essentiellement militaire qu'il convient de se remémorer succinctement avant de poursuivre, tant elle forme le terreau de ses développements futurs.⁶¹

Au cours du XVI^e siècle, une série de guerres civiles entraîne la disparition de la Marine française. A l'aube du XVII^e siècle, on compte seulement une petite flotte de galères et aucun vaisseau de guerre à voile. En 1624, le Cardinal Richelieu, devenu premier ministre de Louis XIII, prend en charge les affaires navales et maritimes. Dans ses efforts pour reconstituer une flotte militaire, Richelieu fait rechercher à quel charpentier il pourrait confier la construction d'un grand navire. Il fait venir Morieu, un dieppois, qui construira la célèbre *Couronne* à la Roche Bernard, à l'embouchure de la Vilaine (Figure 2-3). Grâce à ses efforts, Richelieu parvint à reconstruire une flotte de 53 navires en 1640. Mais la guerre avec l'Espagne (1653-1659), réduit la flotte à 26 navires au moment où Jean-Baptiste Colbert monte au pouvoir en 1661.

⁶¹ Larrie Ferreira, *Ships and Science: The Birth of Naval Architecture in the Scientific Revolution 1600-1800* (MIT Press, 2007), pp. 26-33.

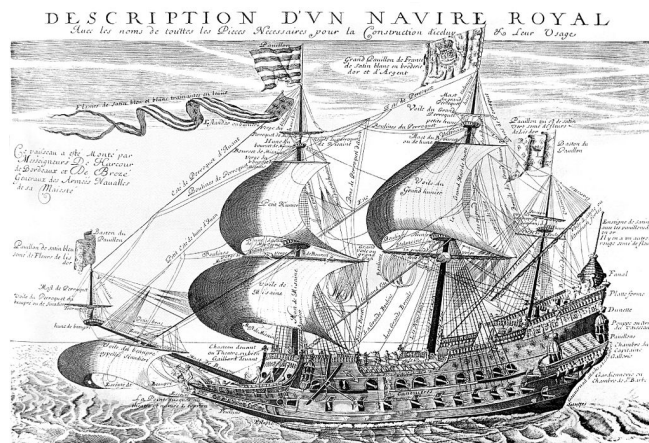


Figure 2-3 : La Couronne. Frontispice de l'*Hydrographie* (1643) de Georges Fournier.

En 1669, Colbert devient Secrétaire d'Etat à la Marine jusqu'en 1683 et œuvre au projet de bâtir une flotte qui devait dépasser en nombre la flotte britannique. Pour soutenir ce programme ambitieux, Colbert organise la construction de deux nouveaux chantiers, l'un à Brest, l'autre à Rochefort. Il commande des navires à la Hollande et au Danemark. Si bien qu'en 1680, la flotte française dénombre 135 navires, alors que la flotte britannique n'en compte que 115. Colbert, supporte les travaux d'académiciens comme ceux du chevalier Renau afin d'atteindre optimum et standardisation.

Jean-Baptiste Antoine Colbert, Marquis de Seignelay succède à son père, le Grand Colbert, dans ses fonctions de Secrétaire d'Etat à la Marine de 1683 et 1690. En 1689, après une courte alliance lors d'un conflit contre la Hollande de 1672 à 1674, la France revient en guerre contre la Grande-Bretagne, cette fois alliée avec l'Espagne et la Hollande. La doctrine navale française évolue alors d'une guerre d'escadre, qui consiste à aligner d'imposants et coûteux navires, vers une guerre de course, où l'on privilégie des navires plus légers et plus rapides.

De 1723 à 1749, la Marine française est reconstruite sous la direction du nouveau Secrétaire d'Etat de la Marine, Jean-Frédéric Philippe Phélyppeaux, Comte de Maurepas. Tout comme les Colbert, Maurepas voit dans le développement de la Science Navale un précieux atout pour sa flotte. Par conséquent, le Comte supporte financièrement les travaux d'académiciens tels que Bouguer et Duhamel de Monceau.

Les guerres de l'oreille de Jenkins et de Succession d'Autriche de 1739 à 1748 opposent la France et l'Espagne à l'Angleterre et la Hollande. Puis, c'est la guerre de Sept ans, de 1756 à 1763, à laquelle s'ensuit une période d'intense construction sous

la reforme du Ministre de la Guerre et de la Marine, Etienne-François Duc de Choiseul, dont l'ordonnance de 1765 promeut pour la premier fois l'application de la *Théorie du Navire* dans le processus de conception de sa flotte. Il mettra d'ailleurs en place le Corps des Ingénieurs-constructeurs de la Marine (qui deviendra le Corps du Génie Maritime) pour concevoir la flotte qui s'opposera aux Anglais lors de la Guerre d'indépendance américaine de 1778 à 1783. Les guerres de l'empire de Napoléon qui succèdent à la Révolution (1789) se solderont par l'échec de l'alliance franco-espagnole face à l'empire britannique lors de la bataille de Trafalgar en 1805.

Table 1 : Évolution des flottes royales européennes entre 1600 et 1800 (Glete, *Navies and Nation* 1993, pp 522-704)

	France	Espagne	Danemark	Suisse	Angleterre	Hollande	Venise
1600	-	-	16	56	34	?	
1620	3	-	24	34	29	?	-
1640	53	-	43	42	43	97	-
1660	26	-	16	33	131	97	-
1680	135	-	53	28	115	93	7
1700	146	-	42	49	177	113	29
1720	33	29	40	33	155	74	27
1740	59	59	33	33	154	59	9
1760	95	89	52	40	301	57	15
1780	162	125	56	35	286	66	14
1800	110	113	37	24	328	22	-

2.3.2 Le rôle des flottes marchandes

Si cette histoire est essentiellement militaire, il ne faut pas négliger le rôle des flottes marchandes qui s'organisent à travers l'Europe et entretiennent des liens étroits avec les Etats et les flottes royales.⁶²

Entre le XIII^e et le XVI^e siècle, un réseau complexe de petits chantiers navals indépendants s'était développé en Europe. Au début du XVII^e siècle, un groupe de compagnies commerciales influentes, supportées par les Etats, dominant le commerce maritime. En 1555, l'English Muscovy Company est établie pour alimenter en matières premières aussi bien les industries d'Etat bourgeonnantes que les armées. En 1600 et 1602, la British East Company et la Dutch Verenigde Oostindische Compagnie, deviennent les principales rivales en matière de commerce maritime. En 1616, c'est la formation de la Dansk Ostindien (Danmark). Entre 1632 et 1721, plusieurs compagnies de commerce allemandes sont créées à Brandenburg. Le gouvernement français rejoint la compétition relativement tard, avec la fameuse Compagnie des Indes Orientales, fondée en 1669 par le Grand Colbert. A Trieste, la Compagnia Orientale est une des dernières grandes compagnies européennes à s'organiser en 1719.

Ces compagnies combinent des activités diverses allant de la production de biens à l'étranger (culture du coton et de la canne à sucre issue de l'esclavage), à la construction navale. En général, elles possèdent leurs propres bateaux et leurs infrastructures (entrepôts, et installations portuaires). Ces flottes marchandes ressemblaient tant aux flottes militaires que souvent, la distinction entre une compagnie commerciale et l'autorité publique s'émoussait. En effet, les flottes marchandes pouvaient négocier au nom des gouvernements dont elles dépendaient. Elles pouvaient même déclencher des conflits. Bien que les marines d'Etat missent à disposition des vaisseaux de guerre pour servir d'escortes aux convois précieux, beaucoup de navires marchands étaient eux-mêmes équipés de canons pour assurer leur propre protection. Parfois, les flottes marchandes et les flottes royales en venaient à partager leurs infrastructures portuaires et leurs constructeurs. En France, par

⁶² Larrie Ferreiro, *Ships and Science: The Birth of Naval Architecture in the Scientific Revolution 1600-1800* (MIT Press, 2007), pp. 26-33.

exemple, le port de Lorient (ou plus justement le Port-Louis), construit pour abriter la Compagnie des Indes, hébergeât la flotte royale pendant des années avant qu'il ne soit récupéré par la compagnie en 1719. La Compagnie des Indes échangea des constructeurs avec la Marine comme Pierre Coulomb et Antoine Groignard. Elle investit aussi dans le développement théorique de l'architecture navale ; comme en témoigne le prix de 1765 de l'Académie des Sciences pour des travaux sur le ballastage et l'arrimage des navires. Elle supporta une campagne d'essais sur la résistance des navires, dirigée par le Comte de Thévenard entre 1768 et 1769.

2.3.3 Science du navire et doctrine navale

L'administration navale française mais aussi les compagnies marchandes, par l'intermédiaire de l'Académie Royale des Sciences⁶³, de prix organisés, de publications diverses et de traités, sont donc à l'origine de la promotion et du développement de la Science Navale. Il s'agissait de mettre en place une politique de construction qui mise sur le progrès théorique.

Le contrôle des chantiers, à travers l'exigence de plans et de modèles réduits contractuels, la rationalisation de la construction à l'aide des mathématiques, et la standardisation des flottes, en imposant au constructeur l'usage de plans types, sont autant de solutions mises en œuvre pour répondre, d'une part, aux problématiques militaires de la France, comme l'alignement de la flotte royale française avec les flottes royales européennes concourantes, aux exigences économiques des compagnies marchandes et de l'Etat; et d'autre part, aux ambitions coloniales puisque ce mouvement de pensée coïncide historiquement avec le développement du premier empire colonial. L'architecture navale théorique prend donc une importance grandissante dans la *doctrine navale* française.

⁶³ Créée en 1666

2.3.4 Pour une société des savoirs : l'Esprit des Lumières

Mais n'oublions pas que l'architecture navale théorique prend son essor dans le projet d'une société des savoirs moderne promue par l'Esprit des Lumières. Au-delà des exigences économiques et des impératifs militaires qui expliquent l'actif investissement de l'administration militaire et des compagnies marchandes pour le progrès de l'architecture navale, on voit aussi l'horizon de nouvelles découvertes, la possibilité de nouveaux échanges.

D'ailleurs, un certain retournement heuristique dans le projet de la Science Navale peut être noté. Si le calcul échoue dans sa tentative de faire progresser l'architecture navale, le navire devient un objet qui fait progresser la science du calcul.⁶⁴ Euler et d'Alembert furent les pionniers du calcul différentiel partiel qu'ils mirent au point pour répondre aux besoins des ingénieurs de prédire la résistance qu'éprouve un corps dans un écoulement. Les modèles réduits de carène utilisés dans les premières expériences de vérification des hypothèses de calculs infinitésimaux permettent de mettre à l'épreuve les fondements d'une nouvelle théorie de l'Hydrodynamique.

⁶⁴ Sylviane Llinares, «La science navale au XVIIIe siècle,» *Les Mardis de la Recherche*, éd. Université Bretagne Sud (Lorient, 2015).

2.4 Chemins de diffusion des connaissances théoriques et des savoirs pratiques

La promotion de l'idée de progrès théorique de l'architecture navale s'accompagne naturellement d'une diffusion. On peut distinguer deux chemins de diffusion : les traités et les écoles à travers lesquels on tâche de transmettre d'une part l'ordre de la discipline, mais aussi celui du projet, c'est-à-dire de la conception de l'ouvrage.

2.4.1 L'évolution des traités d'architecture navale

La transformation du contenu et de la forme des traités d'architecture navale, depuis la fin du XVI^e siècle, jusqu'à la période qui nous intéresse, reflète une évolution sociale et intellectuelle des professionnels du monde naval. Peut-on parler d'une tendance à l'ouverture d'une catégorie professionnelle élitiste et à la rationalisation d'un art qui fonctionnait jusqu'alors sur un schéma empirique ?⁶⁵

Le plus ancien traité d'architecture navale connu est un manuscrit datant de 1434 ou 1444, écrit par un marin Vénitien, Michel de Rhodes.⁶⁶ Bien qu'il ne fût jamais publié, il fut largement diffusé. Certaines parties furent même recopiées dans d'autres traités sur la construction navale, tel que *Fabrica di galere* (1500) et *Arte di far vaselli* (1550) de Theodoro de Nicolo.⁶⁷

La plupart des traités écrits avant la fin du XVII^e siècle, ne furent jamais publiés. Il semble qu'ils étaient destinés à d'autres constructeurs puisqu'ils étaient rédigés en langages vernaculaires (italien ou dialecte vénitien), transcrivant sur le papier ce que la tradition orale enseignait des proportions des navires qu'ils construisaient. Ils adoptaient souvent la forme de carnets de notes qui accumulaient des pensées sur de nombreux sujets comme c'est le cas du traité du constructeur britannique Mathew

⁶⁵ Sylviane Llinares, «La science navale au XVIII^e siècle,» *Les Mardis de la Recherche*, éd. Université Bretagne Sud (Lorient, 2015).

⁶⁶ Larrie Ferreiro, *Ships and Science: The Birth of Naval Architecture in the Scientific Revolution 1600-1800* (MIT Press, 2007), p. 46.

⁶⁷ Ibid

Baker, *Fragment of Ancient English Shipwrightry* (1570), qui, comme le suggère son titre, est lacunaire et disjoint.⁶⁸

Le premier ouvrage publié, le fut au Nouveau Monde, en 1587, par Diego García de Palacio, un officiel, d'origine espagnol, de la vice-royauté du Mexique, qui publia en 1587, *Instrucion nauthica, para el buen uso y regimiento de las noas su traça, y gobierno conforme à la altura de México*.⁶⁹ Comme il est d'usage à l'époque, l'ouvrage est rédigé sous la forme d'un dialogue entre deux hommes, et traite de nombreux sujets telle que la navigation, l'astronomie et la prédiction météorologique. Seul un quart du livre est dédié à la construction navale. Mais, *Instrucion nauthica*, marque un changement distinct dans le style des traités d'architecture navale. Plus qu'une accumulation de témoignages personnels adressés à d'autres constructeurs, l'ouvrage est un document subventionné par l'Etat, réalisé dans le but de diffuser un savoir maritime, aussi bien à des officiels qu'à des administrateurs navals.⁷⁰ Aussi, en plus de proposer des règles de proportions à suivre pour la construction des coques et des gréements, García de Palacio, ajoute des indications et des explications sur des calculs à réaliser, ce qui donne à l'ouvrage un caractère instructif en plus d'être prescriptif.

Au cours du XVII^e siècle, la plupart des ouvrages sur le thème de la construction navale, traitent le sujet comme une branche de l'architecture. C'est à ce moment que l'on commence à employer le terme d'« architecture navale » avec l'idée d'une « architecture de la mer ». ⁷¹ Cette idée commence peut-être avec un manuscrit *Navis*, écrit en 1450 par l'artiste italien Leon Battista Alberti. L'ouvrage, aujourd'hui perdu, était inclus dans l'un des premiers traités théoriques d'architecture. Vettor Fausto, professeur Vénitien, qui conçut quelques galères à partir de textes classiques, avança en 1530 que si l'architecture terrestre avec ses lignes droites était difficile à apprendre, celle de la mer l'était encore plus, puisqu'elle impliquait la maîtrise des

⁶⁸ Larrie Ferreiro, *Ships and Science: The Birth of Naval Architecture in the Scientific Revolution 1600-1800* (MIT Press, 2007), p. 47.

⁶⁹ Une traduction anglaise de cet ouvrage est disponible sous le nom de Garcia de Palacio, *Nautical Instruction 1787* (1986)

⁷⁰ Larrie Ferreiro, *Ships and Science: The Birth of Naval Architecture in the Scientific Revolution 1600-1800* (MIT Press, 2007), p. 47.

⁷¹ Ibid

courbes.⁷² En 1610, le mathématicien et ingénieur Portugais Joao Baptista Lavanha définit et utilise, pour la première fois, le terme d'« architecture navale » dans son œuvre inédite, *Livro primeiro da architectura naval*.⁷³ Comme *Instrucion nauthica*, l'ouvrage était rédigé par un savant, non par un constructeur et à l'attention d'un large lectorat. Le premier ouvrage publié à faire usage du terme « architecture navale », est le livre de l'architecte allemand, Joseph Furtenback, *Architectura Navalis* (1629) qui fait partie d'une série de 6 volumes sur le thème de l'architecture.

A la fin du XVII^e siècle, chaque nation de l'Ancien Monde avait commis au moins un traité sur le thème de la construction navale. On peut identifier deux sources. La première provient directement des chantiers navals et correspond aux carnets de notes manuscrites rédigés en langage vernaculaire par des constructeurs à l'intention d'autres constructeurs. La deuxième correspond à des publications commandées par des officiels de l'administration navale à des constructeurs, ou parfois, à des savants sans connexion particulière avec les chantiers et dont l'objet était de diffuser ce savoir élitiste à un public plus large. On peut penser à *l'Hydrographie* de George Fournier, publié en 1643, qui inclut un discours substantiel sur l'architecture navale.⁷⁴ Ou encore en 1670, *Doctrine of Naval Architecture* d'Antony Deane commandé par le secrétaire de l'Amirauté, Samuel Pepys, qui, bien que jamais publié, circula dans l'Amirauté.⁷⁵ En France, le constructeur Charles Dassié publia *l'Architecture Navale* en 1677, qui fournissait aux constructeurs et administrateurs de la Marine de précieuses instructions sur la conception des navires de guerre et des galères récemment codifiée par Colbert.⁷⁶

A la fin du XVII^e siècle, les administrations navales avaient mis en œuvre un ensemble de mesures destinées à obtenir un plus grand contrôle sur la conception et la construction de leurs bateaux. En plus d'exiger de leurs constructeurs de produire plans et modèles réduits contractuels dans le but de mieux comprendre l'objet qu'elles

⁷² Alberti et Fausto font l'objet des travaux de Concina, « Humanism on the Sea » (1988) et dans *Navis : l'umanesimo su mare* (1990), pp. 71-99

⁷³ Une traduction anglaise de Lavanha est consultable sur le site de Richard Barker

⁷⁴ George Fournier, *Hydrographie* (1643/1667/1973).

⁷⁵ Antony Deane, *Deanes Doctrine of Naval Architecture* (1670/1981).

⁷⁶ Charles Dassié, *L'Architecture navale* (1677/1695/1994).

commandaient ainsi que de s'assurer qu'on leur livrait ce qui avait été commandé, elles autorisaient et payaient pour la rédaction de traités dans le but de diffuser le savoir-faire au delà des frontières des chantiers. Ce fut le cas des travaux théoriques de Renau d'Elizagaray en 1689⁷⁷, de Paul Hoste en 1697⁷⁸ et plus tard, de Pierre Bouguer en 1746⁷⁹ et Leonhard Euler en 1749 et 1773.⁸⁰

2.4.2 L'enseignement de l'architecture navale en France

Jusqu'à la fin du XVII^e siècle, l'activité de conception d'un navire s'organise principalement sur des bases empiriques et un savoir-faire transmis de père en fils. La formation des charpentiers et maîtres-charpentiers s'effectue dans un cadre privé et le corpus de connaissances transmises demeure mal connu puisqu'il est peu formalisé. Ni principes mathématiques, ni formules empiriques, ni dessins préparatoires ne nous sont parvenus. Seuls quelques rares ouvrages, réalisés par des artisans lettrés, tel que celui de Mathew Baker, *Fragment of Ancient English Shipwrightry* (1570), ou de Antony Deane (1670), témoignent des pratiques et de l'imaginaire des constructeurs de vaisseaux du XVI^e et du XVII^e siècle (Figure 2-4).

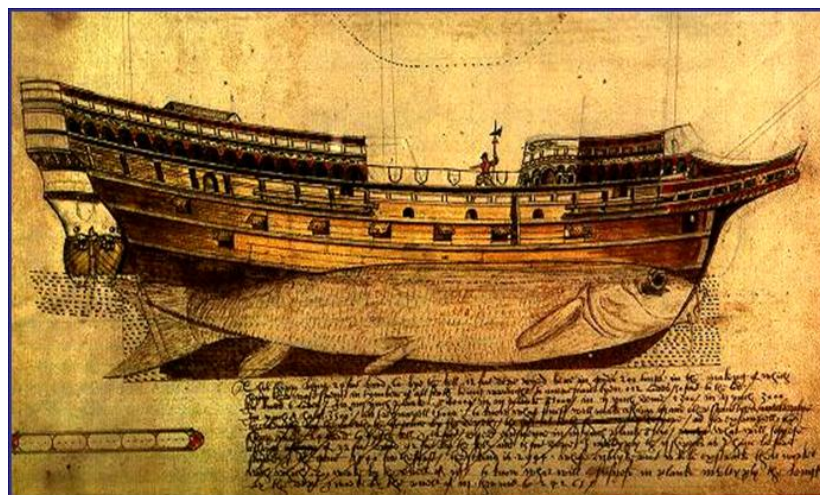


Figure 2-4 : Dessin extrait de *Fragment of Ancient English Shipwrightry* de Mathew Baker (1570)

⁷⁷ Bernard Renau d'Elizagaray, *De la Théorie de la manoeuvre des vaisseaux* (Paris: Michallet, 1689).

⁷⁸ Paul Hoste, *Théorie de la construction des vaisseaux* (Lyon: Anisson & Posuel, 1697).

⁷⁹ Pierre Bouguer, *Traité du navire, de sa construction et de ses mouvements* (Paris, 1746).

⁸⁰ Leonhard Euler, *Scientia Navalis* (1749) et *Théorie complète de la construction et de la manoeuvre des vaisseaux, mise à la portée de ceux qui s'appliquent à la navigation* (1773).

En France, lorsque Colbert exprime son intention de rationaliser la construction des vaisseaux royaux, il entend par la même occasion professionnaliser l'ensemble de la Marine royale. Paradoxalement, au lieu de formaliser l'instruction des constructeurs, il ouvre un petit collège naval à Saint Malo, en 1669, et une école d'artillerie, en 1679, pour former les officiers de la Marine et les cadets. Quelques écoles d'hydrographie ouvriront en 1781 pour former les pilotes. On enseignait alors aux officiers des flottes militaires et des flottes marchandes, les rudiments des proportions des vaisseaux royaux, le tracé des formes, la sélection des bois de construction et on leur présentait les méthodes de construction et d'armement pratiquées dans les chantiers.⁸¹

En 1683, Colbert établit l'école des Gardes de la Marine, qui permet aux cadets de devenir officiers. L'enseignement est organisé dans les principaux ports : à Rochefort, à Brest et à Toulon. On y enseigne l'artillerie, l'escrime, mais aussi les mathématiques, l'art de la fortification, l'hydrographie et la construction navale. Une fois diplômés, les Gardes de la Marine rejoignent le corps des Officiers d'Épée. Colbert, établit aussi un second corps d'officiers, les Officiers de Plume. En charge des affaires navales, de l'administration du matériel, des infrastructures et des constructions, ils sont recrutés parmi les Officiers d'Épée, et quelques fois parmi des civils. Etant données leurs fonctions, les officiers doivent acquérir une bonne compréhension des pratiques des chantiers et particulièrement des règles et principes de conception des vaisseaux qu'ils supervisent. En 1680, Colbert instruit les intendants des ports de Rochefort, Brest et Toulon d'établir, au sein même des chantiers, des écoles de constructions. Les constructeurs les plus expérimentés doivent y enseigner leurs pratiques aux officiers de Plume et d'Épée. Mais les constructeurs, réticents à l'idée de révéler leurs secrets, refusent d'y enseigner, si bien que ces écoles disparaissent assez rapidement. On décide alors d'intégrer l'enseignement de la construction navale dans le cursus de l'Ecole des Gardes de la Marine.⁸²

⁸¹ Larrie Ferreiro, *Ships and Science: The Birth of Naval Architecture in the Scientific Revolution 1600-1800* (MIT Press, 2007), pp. 280-290.

⁸² Ibid.

A la différence des officiers, la formalisation de l'enseignement des constructeurs demanda beaucoup plus de temps et d'efforts pour se mettre en place car chaque chantier était un monde. L'instruction des constructeurs avait couramment lieu en famille, dans l'enceinte même du chantier. L'instruction, informelle et principalement pratique, incluait tout de même la maîtrise des rudiments d'arithmétique et de géométrie. Mais bien souvent, les constructeurs n'étaient pas lettrés. La situation changea au milieu du XVII^e siècle, sous l'influence des Jésuites qui développèrent des structures d'enseignement autour des villes et près des ports, si bien qu'en près d'une génération, la communauté des constructeurs savait à peu près lire et écrire.⁸³

L'impulsion pour une véritable formalisation de l'instruction des constructeurs fût donnée lorsque l'Inspecteur Général de la Marine, Henry-Louis Duhamel du Monceau, identifia le besoin d'apporter aux maîtres-charpentiers de marine, des connaissances théoriques, notamment en mathématiques et physique, nécessaires à une meilleure compréhension de leur métier. Avec le soutien du Secrétaire d'Etat à la Marine, le Comte de Maurepas, Duhamel du Monceau initie la création d'une école de construction navale en 1741. Elle fût surnommée la « petite école de la marine » en raison du peu d'élèves qu'elle reçût pendant plusieurs années. L'année de son ouverture, l'école ne comptait qu'un seul élève. Les années suivantes, les étudiants étaient sélectionnés sur les différents chantiers de France. L'instruction était délivrée dans la demeure familiale de Duhamel du Monceau à Paris sur l'île Saint Louis. Les ouvrages de Paul Hoste, de Johann Bernoulli et d'Henri de Pitot, formaient la base de l'enseignement qu'on y délivrait. En 1746, l'ouvrage de Bouguer, *Traité du Navire*, vint compléter la bibliothèque de l'école. En 1748, l'école déménageait rue de Richelieu. Mais la collection de modèles réduits qui servaient à l'instruction des futurs constructeurs souffrait de l'humidité ambiante du bâtiment. On déplaça donc l'école au Louvre en 1753. Un an auparavant, l'ouvrage commis par Duhamel du Monceau, était devenu le manuel de référence de l'école.⁸⁴

⁸³ Ibid.

⁸⁴ Ibid

La « petite école » fermera ses portes en 1758 et connaîtra une éclipse pendant la Guerre de Sept Ans (1756-1763) pour des raisons budgétaires. Elle rouvrira en 1765, sous le nom de l'École des Ingénieurs Constructeurs des Vaisseaux Royaux, à la suite d'une ordonnance émise par le Secrétaire d'Etat à la Marine, successeur de Maurepas, le Duc de Choiseul. Parmi un ensemble de mesures susceptibles de reformer la Marine Française, l'ordonnance établissait le nouveau Corps des Ingénieurs Constructeurs de la Marine. L'objectif était de développer un système de professionnalisation et de standardisation de l'ensemble de la Marine Royale. L'ordonnance de 1765 concrétise, en quelques sortes, le projet que Colbert avait suggéré un siècle plus tôt. Sous l'influence de Duhamel du Monceau, le Duc de Choiseul exige qu'en plus de fournir des plans et des devis pour chaque projet, les constructeurs doivent effectuer certains calculs tels ceux du métacentre et du quotient de résistance d'étrave.⁸⁵ L'objectif de cette exigence est de fournir aux administrateurs de la Marine un moyen de contrôle sur les constructeurs de vaisseaux et leurs projets.⁸⁶

L'ordonnance de 1765, n'est que la préface d'un projet plus ambitieux qui sera mené à son terme par Charles-Eugène de la Croix de Castrie, en 1780, qui succède à Choiseul dans ses fonctions. La Croix, demandera au mathématicien Jean-Charles de Borda, qui n'avait aucune expérience de la conception, de concevoir une flotte entière sur des plans normalisés. Borda collaborera avec le jeune constructeur Jacques-Noël Sané pour la réalisation des plans types. Ces plans restèrent une référence pour la Marine Royale jusque dans les années 1830.⁸⁷

Le passage du titre de charpentier, à celui de constructeur puis celui d'ingénieur-constructeur, marque l'évolution du statut social accordé aux concepteurs de vaisseaux, mais témoigne également du développement de leurs pratiques et de leurs responsabilités. Alors que le rôle des charpentiers de marine et des maîtres-charpentiers, qui supervisent les constructions, est restreint aux chantiers, au suivi des constructions et des réparations, le titre de constructeur et de chef constructeur qu'on

⁸⁵ Nous définirons ces concepts dans la seconde partie du mémoire

⁸⁶ Larrie Ferreiro, *Ships and Science: The Birth of Naval Architecture in the Scientific Revolution 1600-1800* (MIT Press, 2007), pp. 280-290.

⁸⁷ Ibid.

leurs accorde, en 1717, permet de créer des liens étroits avec des officiers de marine, des savants et parfois quelques figures politiques. En 1765 le titre d'Ingénieur-constructeur qu'on leur octroie, les place au même rang social que les officiers.⁸⁸

Tous les membres du Corps des Ingénieurs-constructeurs doivent passer par l'école du Duhamel du Monceau, qui prend alors le nom de l'Ecole des Elèves Ingénieurs-constructeurs de la Marine. Les instructeurs de l'école sont issus de l'Académie des Sciences et des chantiers. Ils enseignent les mathématiques, la physique, le dessin, la Théorie du Navire. En plus du manuel de Duhamel du Monceau et du traité de Bouguer, les travaux d'Euler, de Chapman et de Juan y Santacilia servent de supports à l'instruction des élèves. Deux ou trois étudiants étaient admis chaque année. Ils passaient un examen à l'âge de 16 ans, s'exerçaient ensuite pendant deux ans dans un chantier, avant d'intégrer l'école pendant deux ou trois ans. L'obtention du diplôme nécessitait de remettre à un instructeur un projet complet de conception, accompagné d'une note de calculs. Par la suite, les jeunes diplômés partaient six mois en mer avant d'intégrer un chantier. Ils pouvaient alors passer d'autres examens pour évoluer dans les rangs et, à terme, prétendre au titre d'Inspecteur Général (plus haut grade de la profession).⁸⁹

L'Ecole des Elèves Ingénieurs-constructeurs de la Marine sera dirigée par Duhamel du Monceau jusqu'à sa mort, en 1782. Pendant deux ans alors, l'école, sans direction est menacée de fermeture. En 1784, Jean-Charles de Borda, est désigné pour diriger l'école. Deux ans plus tard, elle ouvre ses portes aux constructeurs des flottes marchandes et aux élèves ingénieurs civils, destinés à la construction d'ouvrages maritimes et d'infrastructures portuaires. La Révolution Française qui commence en 1789, voit la montée en puissance d'un mouvement antiacadémique parmi les révolutionnaires qui se traduit par la fermeture de l'Académie, en 1793, et l'exécution de nombreux académiciens. La plupart des ingénieurs et des savants investis dans les développements théoriques de l'architecture navale, recevait un précieux soutien de l'Académie. Sa fermeture eu donc pour conséquence de cesser presque toute activité dans ce champ de recherche, pendant presque vingt ans. L'Ecole des Elèves

⁸⁸ Ibid.

⁸⁹ Ibid.

Ingénieurs-constructeurs de la Marine considérée comme une annexe de l'Académie est alors fermée.⁹⁰ Mais au même moment, la Commission de Sécurité Publique, qui dirige la Révolution établit de nouveaux instituts de formations. L'Ecole Centrale des Travaux Publics, devient en 1795, l'Ecole Polytechnique. Borda est alors autorisé à rouvrir son école mais en tant qu'école d'application de l'Ecole Polytechnique.⁹¹

A partir de ce moment, le Corps des Ingénieur-constructeurs de la Marine partage le même enseignement que les autres corps de l'armée, avant d'intégrer l'Ecole des Ingénieurs des Vaisseaux pour se spécialiser dans l'architecture navale. L'école n'est plus au Louvre, mais elle est installée dans une maison rue Saint Dominique. En 1799, année du décès de Borda, le corps des constructeur est renommé Corps du Génie Maritime et l'école prend le nom d'Ecole Spéciale du Génie Maritime. Le poste de directeur est occupé brièvement, par Jean-François Gautier, un constructeur qui avait mis en place le Corps des Ingénieurs de la Marine en Espagne dans les années 1770. A la mort de Gautier en 1800, Honoré-Sébastien Vial du Clairbois, traducteur des travaux du suédois Chapman et rédacteur de *l'Encyclopédie méthodique : « Marine »*, devient directeur de l'Ecole du Génie maritime qui déménage à Brest, en 1801. En 1805, tous les directeurs des constructions navales de Brest, Lorient, Rochefort ou Toulon ont été formés sous l'ancien régime dans l'école de Duhamel du Monceau. En 1810, Vial du Clairbois prend sa retraite. L'école est déplacée à Anvers, puis à Toulon en 1814 lorsque l'Empire de Napoléon se dissout. De 1814 à 1830, la formation des élèves est encadrée par Philippe-Jacques Moreau puis par Ferdinand Reech qui dirigera l'école de 1831 à 1870, déplacée à Lorient.⁹²

Le Corps des Ingénieurs du Génie Maritime devient un modèle pour la nouvelle vague de professionnalisation des constructeurs qui recouvrira l'Europe au cours du XIX^e siècle. L'Ecole Spéciale du Génie Maritime servira de référence pour la formalisation de l'instruction de l'architecture navale à travers le monde. En un siècle, les charpentiers de marine étaient devenus des constructeurs, puis des ingénieurs, membre d'un Corps reconnu par l'Etat. L'architecture navale, ses théories et ses pratiques étaient devenues, une discipline à part entière et renommée. Le gigantisme

⁹⁰ Ibid.

⁹¹ Ibid.

⁹² Ibid

des vaisseaux que réalisaient ces ingénieurs ne pouvait que soutenir cette opinion. La capacité de ces ingénieurs à réaliser de tels ouvrages ne tenait pas tant à la maîtrise des outils théoriques qu'ils manipulaient avec agilité, qu'à la rigoureuse éducation, à la fois théorique mais aussi pratique qu'ils avaient suivie et qui constituait le terreau de l'expression magistrale de leur génie.

3 ANALYSE CRITIQUE DES ELEMENTS DE COURS DE L'ECOLE SPECIALE DU GENIE MARITIME 1814-1830

Le cadre étant posé, il convient de rappeler au lecteur que l'objet de ces recherches est d'étudier les développements historiques dont l'architecture navale contemporaine, telle qu'elle est enseignée aujourd'hui dans les écoles et pratiquée dans les entreprises, représente l'aboutissement. Il s'agit de mettre en évidence comment, à partir de questions simples sur l'objet-navire - ses fonctions, ses qualités et ses possibles développements - les problèmes propres à cette discipline ont été formulés et quels outils rationnels ont été mis au point pour les résoudre. Ce récit est l'opportunité de comprendre dans quelle tradition s'inscrit l'ingénieur - architecte naval d'aujourd'hui, comment les connaissances dont il hérite furent découvertes, quel système de connaissances véhicule la profession et quels discours accompagnent ce système. Mais, au-delà de cette approche interne de l'histoire du génie maritime et de l'architecture navale, il s'agit de sentir, au mieux de comprendre, les conditions d'apparition du modèle de l'ingénieur dans une société moderne à l'aube de son entreprise d'industrialisation.

L'analyse qui suit a pour objet les éléments de cours professés par Philippe-Jacques Moreau, directeur des études à l'Ecole Spéciale du Génie Maritime au début de XIX^e siècle, de 1814 à 1830.⁹³ Philippe-Jacques Moreau, nommé Chevalier des ordres royaux de Saint Louis et de la Légion d'Honneur pour avoir jeté un pont sur le Danube qui permit à la France de triompher à la bataille de Wagram en 1809, fut ingénieur des constructions navales et membre du Conseil des constructions navales. Il fut également ancien élève de l'Ecole Polytechnique et de l'Ecole Spéciale du Génie Maritime.

⁹³ Le choix de cette date est en réalité arbitraire, faute de sources précises, et correspond à l'arrivée de Ferdinand Reech dans l'école, qui assurera les cours pendant l'année 1830 et dirigera l'école de 1831 à 1870. Il est fort probable que l'enseignement ait été fondé sur la base du *Sommaire* de Philippe-Jacques Moreau bien après 1830.

En 1814, le Conseil des constructions navales est dissous. Moreau est envoyé à Toulon pour diriger les études des élèves de l'Ecole Spéciale du Génie Maritime. Pour préparer son instruction, il rédige des notes de cours qui seront publiées sous l'intitulé : *Sommaire du cours de l'école spéciale du génie maritime, Sur la théorie et la pratique de la Construction des Vaisseaux et sur les Machines utilisées dans les Ports ; le Lancement sur Ber et sur Coëtes mortes ; la Mature et l'Armement*, en 1827, chez Lefournier et Deperiers à Brest. Moreau est alors âgé de 50 ans.

Le document de 158 pages concentre l'ensemble des connaissances, théoriques et pratiques, enseignées aux futurs ingénieurs de la Marine, en ce début du XIX^e siècle. Il est d'un intérêt remarquable pour deux raisons. D'une part, il couvre un spectre de connaissances théoriques et de savoir-faire pratiques, très large. Puisqu'on y retrouve aussi bien de la géométrie descriptive, que de la pratique du chantier, il offre un tableau panoramique de l'ensemble des connaissances théoriques et pratiques que recevaient les ingénieurs du Génie Maritime. D'autre part, le cours apparaît comme une véritable synthèse critique des développements de l'architecture navale qui ont eu lieu au cours du siècle précédent. De fait, il offre l'opportunité de rendre compte des liens qu'entretiennent les recherches académiques menées par les géomètres et physiciens de la Sciences Navale, la pratique des chantiers et l'instruction des futurs ingénieurs. Bien que détaillé, ce document ne reste cependant qu'un sommaire. Il exige donc que les notions, qui ne sont que suggérées, fassent l'objet de recherches historiques, pour en exposer le contenu et les enjeux.

Sur la page de garde, on trouve une note manuscrite :

A Monsieur Lacroix, membre de l'Institut, hommage de son ancien élève Moreau.

Il semble que cette note fut adressée à Sylvestre-François Lacroix ou De la Croix, mathématicien français dont le *Traité du calcul différentiel et du calcul intégral* eut une grande influence au XIX^e siècle. À partir de 1799, il est répétiteur puis instituteur d'analyse à l'École Polytechnique. Le décret du 7 juillet 1809 le nomme examinateur permanent de l'École Polytechnique en remplacement de l'abbé Bossut, admis à la retraite. Moreau et Lacroix se sont peut-être rencontrés dans ce cadre.

Moreau ne commettra qu'un seul autre ouvrage en 1830. Encore une fois très court (44 pages), il est intitulé : *Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement des corps flottans dans deux milieux résistans : à l'usage des élèves de l'Ecole royale du génie maritime*, et publié chez le même éditeur. Moreau y développera des considérations sur l'hydrostatique et la stabilité, qu'il ne fait qu'évoquer dans le présent *Sommaire*.

3.1 Enjeux et problématiques

A la lumière des considérations et des débats présentés jusqu'ici, examinons les interrogations que ce matériau et la période qu'il recouvre, suscitent.

3.1.1 La formation, le rôle et la fonction des ingénieurs

Au XVIII^e siècle, la montée en puissance des corps des ingénieurs accompagne les progrès d'une nouvelle « rationalité technique ». Elle privilégie l'analyse des flux et des processus, et abandonne l'idéal d'ordre et de solidité qui caractérisait l'âge classique.⁹⁴ Cette évolution est à rapprocher avec l'extension des échanges, aussi bien dans la sphère intellectuelle que dans la sphère économique. Mais la culture technique acquise demeure traditionnelle. Tout change avec la Révolution. La formation mathématique acquise à l'Ecole Polytechnique et l'explosion des innovations techniques, accueillies d'ailleurs parfois avec réticence, favorise chez les ingénieurs, le développement d'une nouvelle rationalité. L'analyse des procédés d'invention déduite de l'application des sciences est substituée à la description de l'objet technique.⁹⁵ Dans ce contexte, comment est formalisé l'enseignement que les élèves-ingénieurs reçoivent ? Que peut-on conjecturer quant au rôle et la fonction que les l'ingénieurs du Génie Maritime devront jouer en ce début du XIX^e siècle ?

⁹⁴ Antoine Picon, *L'invention de l'ingénieur moderne: l'Ecole des Ponts et chaussées, 1447-1851* (Paris: Presse de l'Ecole nationale des Ponts et chaussées, 1992).

⁹⁵ Ibid

3.1.2 L'adaptation d'un corpus de connaissances théoriques aux innovations techniques

La grande nouveauté du XIX^e siècle est l'introduction de la machine à vapeur dans le monde de la navigation en 1776. Les premières expérimentations de l'hélice, qui concurrence les roues à aubes, eurent lieu dans les années 1830. Si l'acier ne s'imposera dans la construction navale que dans la seconde moitié du XIX^e siècle, on envisage déjà l'emploi de ce matériau, plus résistant et maîtrisable que le bois, dans les charpentes des grands navires. Il convient de s'interroger sur la manière dont le corpus de connaissances que forme l'architecture navale théorique va évoluer, s'adapter, confronté aux innovations techniques qui bouleverseront le monde maritime avant la fin du XIX^e siècle.

3.1.3 La standardisation et normalisation des vaisseaux

Nous l'avons vu, les débats autour de l'entreprise de standardisation et de normalisation des vaisseaux royaux, animent vivement la communauté des ingénieurs depuis la fin du XVIII^e siècle. Comment cette actualité est-elle reflétée dans l'instruction des futurs ingénieurs ?

3.1.4 Confrontation entre modèles mathématiques et réalité des phénomènes : de la théorie à la prédiction

Dans le cadre de la Science Navale et de l'architecture navale théorique, les développements de la théorie de l'hydrodynamique posent les bases d'une réflexion sur la confrontation entre les modèles mathématiques et la réalité complexe des phénomènes que l'on cherche à modéliser. Par exemple, le problème de la résistance éprouvée par une carène en mouvement dans l'eau est un des canons de l'architecture navale théorique. Il fut, pour la première fois, formalisé dans les *Principia* de Newton qui suggéra l'idée qu'il existait une forme idéale : *le solide de moindre résistance*, que l'analyse permettrait de découvrir. Si, dès le milieu du XVII^e siècle, les principes du mouvement des fluides sont posés par des géomètres (Bernoulli, Euler, d'Alembert), il faut attendre au moins les années 1830 pour que l'on mette en place une méthode pour quantifier raisonnablement la résistance d'un navire. Le *Paradoxe de d'Alembert* – que l'on enseigne encore dans les classes d'hydrodynamique – symbolise l'échec de

la mécanique rationnelle à prédire les phénomènes qui s'imposent dans le monde réel, comme la turbulence et l'instabilité des écoulements.

L'hydrodynamique - la « science des lumières » - se distingue des autres théories physiques (l'électromagnétisme, la relativité et la physique quantique) par le temps qu'il fallut attendre avant que la théorie produise des prédictions qui soient raisonnables.⁹⁶ Face à l'échec des mathématiques dans la tentative de réduction des phénomènes à quelques principes intelligibles, il fallut développer des stratégies ingénieuses et innovantes pour pallier l'impuissance prédictive de la théorie. Les innombrables essais et expériences réalisés avec des modèles réduits de navires témoignent de l'ambition de surpasser les insuffisances pratiques des mathématiques. L'unification des savoirs, la synthèse des connaissances, suggéraient la possibilité de développer à partir de l'observation et de la description, des inférences prescriptives. Nous tâcherons d'identifier quelle est la position adoptée par le corps enseignement face à ces déboires théoriques.

3.1.5 La Science de l'ingénieur

Au XVIII^e siècle, les savants reconnaissent les insuffisances pratiques de leur science. Le passage de la suffisance des premiers géomètres à l'insuffisance de la physique mécanique peut être reflété par l'affirmation d'une figure dans la société du XVIII^e : l'ingénieur moderne. Si les considérations des géomètres et physiciens et leur quête d'une perfection de leurs sciences se déploient dans l'ordre de l'universel et du général, la perfection de l'activité technique est recherchée dans l'ordre du particulier. « Entre universel et singulier, général et particulier, abstrait et concret, la science et la technique ne procèdent pas selon les mêmes cheminements. (...) Les projets des ingénieurs sont impliqués dans la matière ».⁹⁷ L'ingénieur et sa science se trouve combler un espace crucial dans une société en pleine industrialisation. Là où les savants et leurs sciences recherchent le « nécessaire », il s'agit pour les ingénieurs de définir le « meilleur possible » dans l'ordre de particulier. Pour ce faire, on met au point des outils qui permettent d'évaluer les avantages d'une solution particulière. On

⁹⁶ Voir Olivier Darrigol, *Worlds of Flow, A history of hydrodynamics from Bernoulli to Prandtl* (Oxford: Oxford university press, 2005).

⁹⁷ Hélène Vérin, *La gloire des ingénieurs, L'intelligence technique du XVI^e au XVIII^e siècle* (Paris: Albin Michel, 1993), p. 11.

privilégie la définition du modèle qui, confronté à la théorie est apprécié pour son adéquation à chaque cas particulier. Le modèle du *problème à résoudre* est constitutif du système que forme la science de l'ingénieur. Il s'agit d'attribuer à une situation confuse, la forme d'un énoncé qui tient dans ses termes les conditions de possibilité de sa résolution. A la lumière de ces quelques remarques, nous tâcherons de mettre en évidence en quoi la démarche de l'ingénieur se distingue de celle du savant et, de déterminer les conditions d'élaboration de la science qui lui est propre, qui définit son art et détermine l'expression de son génie.

3.1.6 L'Unité : une idée régulatrice ?

L'étude historique de l'architecture navale théorique suggère que le mouvement vers l'unité irrigue la démarche scientifique. Au sein de la luxuriance du monde, il existe des objets élémentaires et des arrière-plans théoriques capables de « fracasser » le noyau des contingences et des particularités. L'ambition réductionniste de quelques géomètres du XVII^e a nourri, et nourrit encore, tout un programme d'échafaudage d'une théorie complète, capable de prédire et de contrôler les performances d'un navire en mer avant qu'il ne soit construit. Ce programme, alimente les espérances des ingénieurs qui tâcheront de construire leurs discours et d'élaborer leur science et leurs pratiques autour de cette idée régulatrice.

3.2 Bibliographie et introduction du *Sommaire*

3.2.1 Bibliographie

Le *Sommaire* est introduit par une présentation bibliographique. Moreau rappelle que lorsqu'il était élève, on y étudiait principalement *la Théorie de la construction et de la manœuvre des vaisseaux* d'Euler. Mais les traités de Bouguer, Duhamel du Monceau, G. Juan, Chapman, Romme et Vial du Clairbois, renferment des matériaux utiles à l'instruction théorique des ingénieurs.⁹⁸ Les traités de Forfait et de l'Escalier serviront de base pour l'enseignement de la mâture, la voilure et le gréement.⁹⁹ Pour la construction pratique, Moreau se réfère à l'ouvrage du constructeur britannique, David Steel.¹⁰⁰ Enfin, les travaux du Comte de Missiessy et les leçons inédites de Tupiniers serviront aux sujets de l'arrimage et l'armement des vaisseaux.¹⁰¹ Le cours est donc une véritable synthèse des travaux réalisés principalement au siècle dernier.

Naturellement, le cours est organisé suivant deux parties : l'une théorique, l'autre pratique. Pour ce qui est de la théorie, « Il fallait d'abord reconnaître dans plusieurs des ouvrages cités les parties théoriques susceptibles d'être enseignées, telles qu'elles sont exposées, et celles qui, par leur imperfection et leur mauvais fondement, conduisent à des résultats trop éloignés de la pratique pour qu'on puisse s'en servir ». Dans l'effort de synthèse, il s'agit donc de ne conserver que ce qui est démontré

⁹⁸ Pierre Bouguer, *Traité du navire, de sa construction et de ses mouvements* (Paris, 1746). Leonhard Euler, *Scientia Navalis* (1749). Leonhard Euler, *Théorie complète de la construction et de la manœuvre des vaisseaux, mise à la portée de ceux qui s'appliquent à la navigation* (1773). Henri-Louis Duhamel du Monceau, *Elémens de l'architecture navale ou traité pratique de la construction des vaisseaux* (Paris, 1752). Fredrik Henrik af Chapman, *Traité de la construction des vaisseaux. Avec des éclaircissemens & démonstrations touchant l'ouvrage intitulé: Architectura Navalis Mercatoria, & C. Traduit du suédois, publié avec quelques notes et additions.*, trad. Honoré Sébastien Vial de Clairbois (Brest et Paris: Malassis, 1781). Honoré-Sébastien Vial du Clairbois, *Encyclopédie Méthodique: Marine*, Vol. I (Paris: Panckouke, 1783-1787). Honoré Vial du Clairbois, *Traité élémentaire de la construction des batimens de mer, à l'usage des élèves du Génie Maritime, & propre aux Marins, Armateurs* (Paris, 1805). Jorge Juan y Santacilia, *Examen marítimo* (Madrid, 1771). Charles Nicolas Romme, *L'Art de la marine* (Paris, 1787).

⁹⁹ Pierre Alexandre Laurence Forfait, *Traité élémentaire de la mâture des vaisseaux, à l'usage des élèves de la marine* (Paris, 1788).

¹⁰⁰ David Steel, *The Elements and Practice of Naval Architecture* (London, 1806).

¹⁰¹ Edouard-Thomas de Missiessy-Quiers, *Arrimage des vaisseaux* (Paris, 1789).

rigoureusement. « Quant à la pratique, poursuit l’auteur, j’ai ordonné et suivi, pièce par pièce, la construction et l’armement d’un bâtiment que les Elèves ont eu sous les yeux ». On reconnaît ici l’influence des instructions données par Vial du Clairbois qui dirigeât l’école lorsque Moreau n’y était encore qu’un élève.

La science de l’ingénieur des vaisseaux de guerre est encore en système », remarque Vial du Clairbois en 1783 ; c’est pourquoi, pense-t-il, il faut que les ingénieurs soient constamment sollicités à « voir les choses par eux même » ; qu’on les envoie à la guerre, à la mer, « c’est le moyen d’avoir un corps éclairé dont la lumière, avec le temps, perce les plus profondes ténèbres ».¹⁰²

3.2.2 Les qualités de la « machine navire »

En guise de préliminaire, Moreau introduit la « machine navire » et énumère les qualités qu’elle doit développer :

Un vaisseau est une forteresse flottante destinée à se mouvoir dans deux fluides dont l’un produit la force poussante et l’autre la résistance. Les qualités qu’il doit avoir, sont :

1. De flotter en portant un poids déterminé, et d’avoir toutes ses parties bien liées entr’elles.
2. D’avoir une stabilité suffisante pour être en sûreté dans toutes les circonstances de la mer : c’est à dire, que quand une force étrangère l’éloigne de sa position d’équilibre, il tende sans cesse à y revenir.
3. De prendre, sous l’impulsion de la force qui doit le mouvoir, la plus grande vitesse possible.
4. De suivre une route qui fasse, avec son grand axe, le plus petit angle possible, lorsque la direction de la force poussante est oblique à cet axe.
5. De tourner facilement autour de l’axe vertical élevé par son centre de gravité, soit au moyen du gouvernail, soit à l’aide des voiles.
6. D’avoir, dans une mer orageuse et élevée, des mouvements d’oscillation doux, réguliers et peu étendus, et pour lesquels le centre de gravité ne monte et ne s’abaisse alternativement que le moins possible : ou ce qui est mieux, qu’il ne fasse que monter lorsque le vaisseau s’incline autour de tous les axes horizontaux qu’on peut mener par son centre de gravité.
7. Que dans l’inclinaison autour d’un axe horizontal quelconque, le grand axe ne change pas de direction, afin de ne pas fatiguer la timonerie.
8. De s’élever aisément sur les lames pour se soustraire à l’inondation.

Le navire, mis en système, fait l’objet d’une analyse fonctionnelle. Flottabilité, force, stabilité, vitesse, dérive, manœuvrabilité et tenue à la mer, sont autant de qualités qui déterminent ses proportions. Bien que distinctes, ces qualités sont interdépendantes, parfois conflictuelles. Si de larges voiles, déployées sur de grands mâts, disposées sur une coque fine, améliorent la vitesse, la stabilité est compromise et la puissance de feu réduite. Tout comme il est difficile d’assurer qu’un grand navire, bien armé, soit rapide, il est impensable de transformer un navire léger et rapide en une plateforme à

¹⁰² Honoré-Sébastien Vial du Clairbois, *Encyclopédie Méthodique: Marine*, Vol. I (Paris: Panckouke, 1783-1787).

canons. C'est pourquoi les flottes développèrent différentes classes de navires destinées à intégrer différents *systèmes de guerre*.

La tâche du concepteur est de ce fait introduite aux élèves : il s'agit de réconcilier des qualités conflictuelles, non pas autour d'un modèle idéal absolu, mais autour du meilleur compromis possible. Ce compromis est suggéré par la fonction visée du navire. Dans le cas particulier d'une flotte militaire, il s'agit de rapprocher les qualités d'un navire au *système de guerre* favorisé. Dans ces termes, Moreau justifie les raisons de l'entreprise de normalisation des vaisseaux royaux. L'argument, n'est pas économique, ni technique, mais bien militaire.

3.2.3 Les systèmes de guerre

Les rapports entre les dimensions principales des vaisseaux de différents rangs doivent être subordonnés au système de guerre auquel on les destine, suivant qu'ils doivent combattre en ligne, ou de vaisseau à vaisseau, ou à l'abordage.

Dans le combat en *ligne* (escadre), les vaisseaux doivent être de même vitesse. La facilité à virer est essentielle pour ne pas perdre son poste et il est bon de gouverner plus par le gouvernail que par les voiles. Pour le combat de *vaisseau à vaisseau*, une bonne manœuvrabilité est très avantageuse car elle permet de conserver une position favorable. Pour l'*abordage*, la qualité de bien gouverner est la plus précieuse, mais il faut que le navire ait aussi une marche supérieure et qu'il puisse gagner le vent quand il est sous le vent. Il doit pouvoir aborder avec le gouvernail seul. Ces exigences sont celles de la manœuvre, auxquelles on doit rapprocher des dispositions constructives :

Dans l'art de la marine, on distingue l'art de la manœuvre pour naviguer et effectuer les évolutions navales, et l'art de construire les vaisseaux. Si les ingénieurs n'ont pas l'habitude de faire exécuter les manœuvres, ils doivent néanmoins connaître tous les procédés usités pour les effectuer, afin de projeter leur plans de manière à satisfaire aux conditions nécessaires, et donner aux vaisseaux les dispositions les plus convenables à l'exécution des ces manœuvres.

Le rôle du concepteur est subordonné à celui de l'utilisateur. Comment pourrait-il en être autrement ?

3.2.4 La catégorisation par classes, rangs et ordres

Les bâtiments de la Marine royale se distinguent par le nombre de leurs batteries, la force et le nombre des bouches à feu qu'ils portent. Ils sont organisés par classes, rangs et par ordres (voir Table 2).

Table 2 : Classes, Rangs et Ordres des bâtiments de la Marine royale

1 ^{er} Classe Comprenant tous les vaisseaux dits de haut bord, destinés à combattre en ligne.	1 ^{er} Rang Vaisseaux à 3 batteries complètes, deux gaillards ¹⁰³ et 1 dunette ¹⁰⁴ .	1 ^{er} Ordre, composé des vaisseaux de 120, 116 et 110 bouches à feu.
		2 ^e Ordre, composé des vaisseaux de 110, 90 et 80 bouches à feu.
	2 ^e Rang Vaisseaux à 2 batteries complètes, deux gaillards et 1 dunette.	1 ^{er} Ordre, vaisseaux de 80 à 74 bouches à feu.
		2 ^e Ordre, vaisseaux de 74 à 60 bouches à feu ayant une dunette.
	3 ^e Rang Vaisseaux à 2 batteries complètes, deux gaillards.	1 ^{er} Ordre, vaisseaux de 60 à 50 bouches à feu.
		2 ^e Ordre, vaisseaux de 50 à 46 bouches à feu.
2 ^e Classe Comprenant les batimens destinés à porter des secours dans les combats, soutenir des petits combats, porter des ordres, faire des reconnaissances, convoier, naviguer isolement et gêner le commerce ennemie ; les bâtiments destinés à la reconnaissance des côtes et à la reconnaissance dans les environs des ports	1 ^{er} Rang	1 ^{er} Ordre, frégates de 46 à 40 canons, ayant deux batteries complètes et deux gaillards.
		2 ^e Ordre, <i>idem</i> de 40 à 32, ayant deux ponts, un batterie complète sur le deuxième, et deux petit gaillards.
	2 ^e Rang	Frégates de 32 à 26, ayant deux ponts, le 2 ^e portait la plus grande partie de l'artillerie, deux gaillards.
3 ^e Classe comprenant les bâtiments armés pour le transport.	On appelle corvettes les frégates au-dessous de 26, un pont, deux gaillards.	
	Les flûtes et les corvettes de charge : ces batimens portent les ustensiles et les munitions de guerre à la suite des armées navales, et servent quelquefois d'hôpitaux. On s'en sert aussi pour le transport des bois, des mâture et autre munitions dans les ports et aux colonies, et aux divisions qui doivent tenir longtemps en mer. On les désigne comme les bâtiments de la marine marchande, par le poids de leur charge.	

¹⁰³ superstructure

¹⁰⁴ partie surélevée de la superstructure

Les dimensions principales de ces vaisseaux furent fixées initialement par les règlements de 1670, 1671, 1673, 1689 (sous l'impulsion de Colbert et de Maurepas). Mais les qualités nautiques n'étaient pas au même degré et il n'y avait pas non plus d'uniformité dans les armements. Dans le siècle dernier, « on sentit la nécessité d'avoir des plans généraux de vaisseaux dont les dimensions fussent les mêmes pour chaque rang ». En 1765, année de la création du Corps du Génie Maritime, les constructeurs Olivier, Groignard, Coulomb, Guignace, Lamothe et Sané produisirent des plans standards. En 1786, le Baron Sané, ingénieur devenu depuis Inspecteur Général du Génie Maritime, donna même un plan de vaisseau de 118 canons sur lequel il fit construire l'*Océan*. Le traité de construction de Vial du Clairbois fournit les dimensions des vaisseaux et frégates de ces plans.¹⁰⁵ Tous les modèles des meilleurs bâtiments que la Marine possède sont mis sous les yeux des élèves et on leur fait prendre connaissance des devis de campagne. Les modifications apportées par les marines étrangères et les critiques, plus ou moins bien fondées, sur les constructions françaises, ont donné lieu à des observations judicieuses sur les dimensions des vaisseaux, publiées par Tupinier, Directeur de la division des ports, dans les annales maritimes de 1822. Moreau renvoie à cet ouvrage et promet d'exposer dans le cours, les améliorations considérables apportées dans les constructions navales françaises depuis la standardisation des plans.

En comparaison au ton adopté par les ingénieurs qui rédigèrent le *Mémoire sur les causes qui s'opposent au progrès de l'architecture navale*¹⁰⁶ que nous avons cité plus haut, les propos de Moreau, au sujet de la standardisation, semblent bien timides. Si, comme ces ingénieurs, c'est avec emphase que Moreau présente aux élèves ces « forteresses flottantes » qui feront l'objet de leurs travaux futurs, on ne distingue pas une once de revendication. La catégorisation des navires en rang et la normalisation, semble être à l'évidence justifiée par les impératifs militaires. Mais, ne jugeons pas trop vite, car, il faudrait être déraisonnable ou simplement inconscient pour critiquer,

¹⁰⁵ Honoré Vial du Clairbois, *Traité élémentaire de la construction des batimens de mer, à l'usage des élèves du Génie Maritime, & propre aux Marins, Armateurs* (Paris, 1805).

¹⁰⁶ Cf. Amphion IV, voire Hélène Vérin, *La gloire des ingénieurs, L'intelligence technique du XVIe au XVIIIe siècle* (Paris: Albin Michel, 1993), p. 365.

ouvertement et publiquement (puisque le *Sommaire* à fait l'objet d'une publication), l'entreprise d'une administration dont dépendent statut et salaire.

D'ailleurs, un cours, adressé à de futurs ingénieurs, dont le rôle sera de servir l'Etat, doit-il être le lieu de débats politiques ou de revendications statutaires ? Ce qui aura été dit devant les élèves, nous ne le saurons sans doute jamais.

3.3 La science exprimée en système, le savoir-faire illustré en méthode

Le *Sommaire* est structuré en deux parties. La première partie, théorique, est organisée en systèmes. Elle traite de la Géométrie, de l'Hydrostatique (comprenant la théorie de la Stabilité), de l'Hydrodynamique (comprenant les théories de la Résistance des fluides, de la Tenue à la mer et de la Manœuvrabilité, mais aussi la théorie des rames et des roues hydrauliques), de la Résistance des Matériaux, de la Thermodynamique (appliquée à la propulsion à vapeur). La seconde partie s'attache à la pratique : ou plutôt à la conduite du projet. Suivant une organisation chronologique, on traite de la composition des plans, du tracé en salle, de la construction et de la mise à l'eau des navires.

3.3.1 Théorie du Navire

3.3.1.1 Géométrie Descriptive

On connaît l'importance de la Géométrie Descriptive, inaugurée par Gaspard Monge, dans la formation des élèves de l'Ecole Polytechnique. Il n'y a donc rien de surprenant à ce que Moreau, formé à l'Ecole Polytechnique, débute son cours par une description géométrique de l'anatomie du navire et introduise ses étudiants aux notions fondamentales de l'architecture navale.

On distingue *les œuvres vives (ou carène)* des *œuvres mortes (accastillage)*, séparées par le *plan de flottaison*. La *longueur de la carène* est généralement définie comme le quart de la *largeur*. On aborde la description de la structure même du flotteur : la *charpente*, établie sur une pièce de bois horizontale, la *quille* qui joint l'*étrave* à l'*étambot*. La distance de la flottaison à l'arête supérieure de la *râblure* de la quille (qui permet de loger le bordage extérieur) définit la *profondeur de la carène*. La profondeur est à peu près la moitié de la largeur du bâtiment. Le *plan longitudinal*, élevé à partir du milieu de la largeur de la quille, de l'*étrave* et de l'*étambot*, divise le vaisseau en deux parties symétriques, de volume égal. A partir de l'*étambot*, en regardant vers l'avant, la partie de droite est nommée *tribord*, la partie de gauche, *bâbord*. Le plan vertical, élevé par la plus grande largeur de la flottaison,

perpendiculairement à la quille est nommé *plan transversal*. La section faite dans la carène par ce plan est le *maître*.

La *proue* est la partie du vaisseau en avant du maître et la *poupe* celle qui est en arrière. Ces deux parties sont généralement inégales entre elles.

A partir de ces trois plans : du *plan de flottaison*, du *plan longitudinal* et du *plan transversal*, l'ingénieur trace les projections de toutes les sections du vaisseau et de toutes ses parties (voir Figure 3-1). Chaque section verticale perpendiculaire à la quille forme un *couple*. Les lignes d'eau sont les sections horizontales faites au-dessous de la flottaison, « ces lignes font connaître la forme de la carène, sa facilité à diviser le fluide et le soutien du bâtiment sur l'eau dans toute la longueur de la carène ».

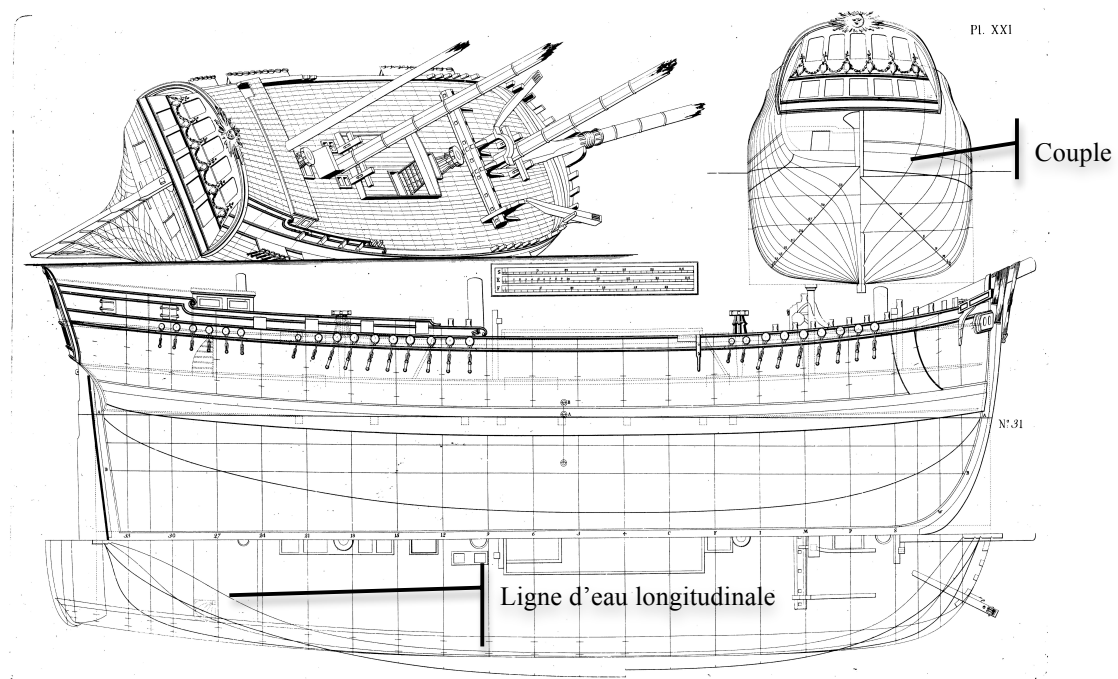


Figure 3-1 : planche extraite d' *Architectura Navalis Mercatoria* (1768) de Fredrik Henrik af Chapman

Moreau fonde sa description sur le principe de construction à franc-bord, dit « charpente première » qui consiste à assembler, dans un premier temps, les membrures le long la quille préalablement connectée à l'étrave et l'étambot ; puis, dans un second temps, à disposer les virures de bordée, qui formeront la coque, sur le squelette du navire (Figure 3-2). Ce principe de construction prend son origine dans les chantiers méditerranéens du Moyen Age.¹⁰⁷

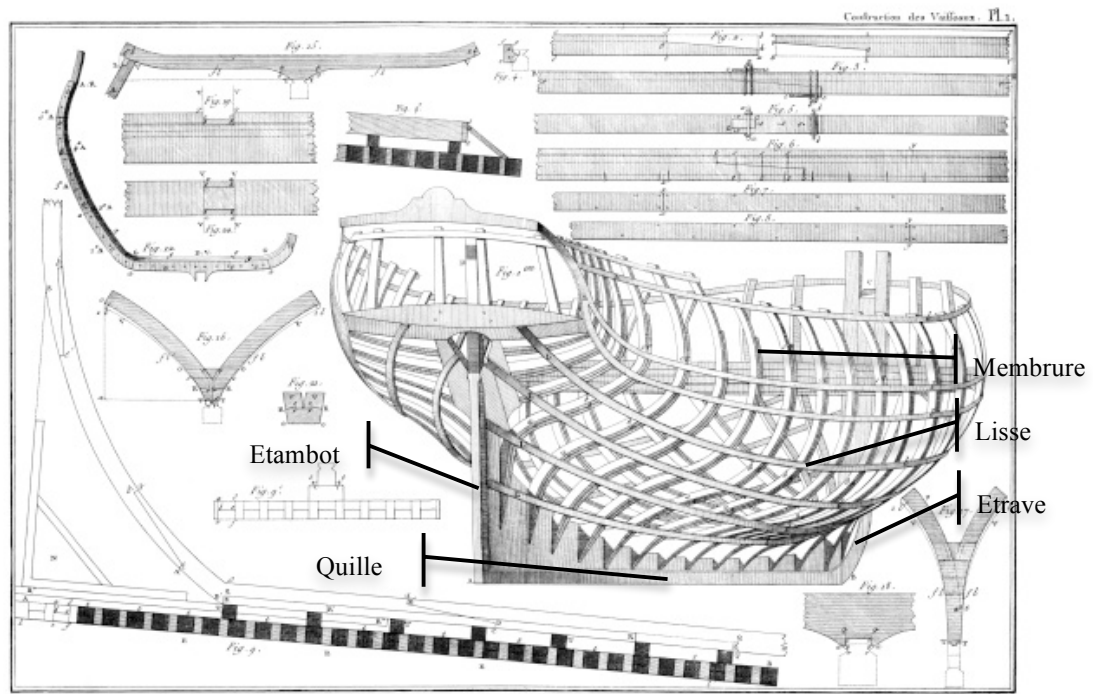


Figure 3-2 : planche extraite de *Traité élémentaire de la construction des vaisseaux* (1787) de Vial du Clairbois

¹⁰⁷ Eric Reith, « Concevoir et construire les navires: De la trière aux picoteux, » éd. Eres, *Technologie/Idéologie/Pratiques* XIII, n° 1 (1998).

Du tracé à l'échelle au plan de forme coté

L'architecture navale théorique n'aurait pas pu se développer sans le recours au *plan de forme* comme mode de représentation. En effet, la quantification des grandeurs physiques caractéristiques du navire nécessite l'usage d'un support réglé qui permette de mesurer précisément les surfaces et volumes d'une carène.

Traditionnellement, la géométrie d'une coque était définie par une méthode de traçage à l'échelle, à même le sol, à l'aide d'un *maître gabarit*. Le maître gabarit était un outil employé à l'élévation des *couples* ainsi que d'autres parties planes du navire. Le procédé repose sur des règles d'interpolation longitudinale pour dériver de la forme du maître gabarit, la géométrie des couples le long du navire. Le maître couple ainsi que les sections qui en dérivent, étaient généralement composées d'arcs et de segments droits. Le lissage de la forme longitudinale de la carène était assuré au cours de l'assemblage par l'ajout de *lisses* provisoires, destinées à vérifier l'alignement des couples. Ce procédé, développé jusqu'à la fin du XVII^e siècle, était particulièrement approprié à la production de navires en série mais limitait la construction de formes plus complexes.

Les premiers tracés de plans de formes cotés, furent découverts dans les documents d'archives du constructeur britannique Mathew Baker (1530-1613) (Figure 3-3). On y trouve des représentations de navires au moyen de trois vues orthogonales (plans, élévation et coupe).¹⁰⁸

¹⁰⁸ Richard Barker, «Fragments from the Pepysian Library,» *Revista de Universidade de Coimbra*, 1985: 161-178.

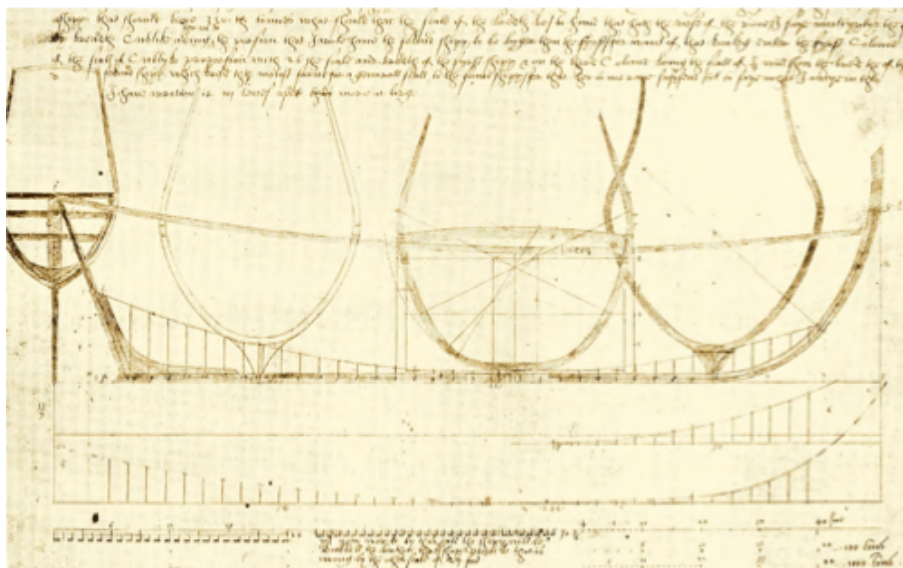


Figure 3-3 : Dessin extrait de *Fragment of Acient Shipwrigthtry* de Mathew Baker (1570)

Ce type de représentation qui constitue un moyen de documentation et de développement de la géométrie d'un navire, atteint une certaine maturité à la fin du XVII^e siècle. A partir de 1720, la Marine française exige des plans de formes comme documents contractuels.¹⁰⁹ En parallèle, les instruments de traçage se développent, bien que les couples restent généralement construits à partir de figures simples comme les arcs de cercles. L'usage du plan coté permet l'introduction de nouvelles méthodes d'interpolation pour dériver la forme des sections transversales à partir du maître couple. Au milieu du XVII^e siècle, l'académicien Pierre Bouguer, critiquant les procédés traditionnels de traçage, introduit une méthode d'intégration numérique qui permet de mesurer les propriétés géométriques des coques (i.e. aires et volumes). La méthode fournit aux concepteurs un outil d'évaluation des caractéristiques géométriques des formes, indépendamment des outils avec lesquels elles ont été tracées. Bouguer définit, pour la première fois, le *coefficient bloc*¹¹⁰, ainsi que le *coefficient prismatique*¹¹¹, qui facilitent la comparaison entres coques. Le constructeur suédois, Frederik Henrik Chapman, dont les magnifiques planches de son *Architectura Navalis Mercatoria* firent grande impression devant ses pairs, introduit

¹⁰⁹ Larrie Ferreiro, *Ships and Science: The Birth of Naval Architecture in the Scientific Revolution 1600-1800* (MIT Press, 2007), p. 38.

¹¹⁰ Ratio du volume de carène immergé et du volume du parallélépipède circonscrit

¹¹¹ Ratio de l'aire de la surface de flottaisons et du prisme circonscrit

le diagramme des aires des sections immergées le long du navire qui est un outil très puissant pour contrôler la distribution longitudinale du déplacement.¹¹²

Le tracé géométrique et le développement des méthodes de calculs infinitésimaux, qui marquent le XVIII^e siècle, sont essentiels au progrès de l'architecture navale théorique. En effet, ces nouveaux outils analytiques devaient permettre d'établir des corrélations entre les performances physiques d'une carène et sa définition géométrique, ainsi que de servir de base aux développements des théories de l'Hydrostatique et de l'Hydrodynamique.

¹¹² Fredrik Henrik af Chapman, *Traité de la construction des vaisseaux. Avec des éclaircissements & démonstrations touchant l'ouvrage intitulé: Architectura Navalis Mercatoria, & C. Traduit du suédois, publié avec quelques notes et additions.*, trad. Honoré Sébastien Vial de Clairbois (Brest et Paris: Malassis, 1781).

3.3.1.2 Hydrostatique

Une fois en possession d'un modèle géométrique réglé, il s'agit de déterminer les grandeurs et les relations qui caractérisent son état de repos sur l'eau. Moreau présente, tout d'abord aux élèves différentes méthodes d'intégration (trapèzes, arcs, paraboles) pour déterminer les surfaces caractéristiques, le déplacement et les centres de gravités du navire. Ces éléments forment la base de l'analyse de l'équilibre du navire.

Équilibre et stabilité

On rappelle aux élèves les conditions d'équilibre d'un corps flottant et les moments qui tendent à éloigner le corps de sa position d'équilibre, ou à le ramener à cette position.

Aujourd'hui, la quantification de la stabilité d'un navire est une tâche centrale dans processus de conception d'un navire. Elle fait office de point de contrôle à chaque étape de la conception et assure la cohérence d'ensemble du projet. C'est d'ailleurs l'un des premiers enseignements que reçoit l'architecte naval puisque la sûreté de l'embarcation qu'il conçoit en dépend.

La systématisation d'un tel calcul dans le processus de conception ne fut, cependant, mise en place que tardivement dans l'histoire de l'architecture navale théorique. Tout d'abord, les concepts essentiels à l'élaboration d'une théorie cohérente de la Stabilité ne furent rigoureusement formulés qu'à partir du XVIII^e siècle ; mais aussi, la nécessité de quantifier la qualité d'un navire à revenir dans sa position initiale ne semblait pas faire l'objet d'une urgence particulière pour le monde maritime, à la différence des problématiques liées à d'autres aspects de la navigation tels que le repérage en mer, la manœuvrabilité ou encore la résistance des coques. Si les problèmes liés à la stabilité ne focalisèrent pas l'attention des officiers de la Marine, des officiels de l'administration et donc l'effort des académiciens, cela tient à ce que les défauts de stabilité étaient souvent corrigés, après construction, par des moyens pratiques, tels que le *ballastage* ou *soufflage* (nous reviendrons plus tard sur la

signification de ces termes techniques). De plus, il existait en réalité peu de véritables accidents dont on identifiait la cause comme relevant d'un défaut de stabilité.¹¹³

Mais, avant même d'évaluer la qualité d'un navire à revenir à son état d'équilibre naturel après perturbation, il fallait être en mesure de caractériser précisément cet état d'équilibre, déterminé par le chargement du navire : son *poids*, et le volume d'eau qu'il déplace sous l'effet de ce chargement : le *déplacement*.

Jauge et tonnage

La tendance des armateurs à caractériser un navire par sa capacité à contenir de la cargaison : la *jauge* ou mesure du *tonnage*, plutôt que par leur *déplacement* (volume d'eau déplacé) n'a pas favorisé le développement d'une théorie de la Stabilité qui devait être fondée sur une bonne estimation de la masse totale d'un navire et du volume d'eau déplacé sous cette condition de chargement. La méthode de la *jauge* qui permettait de caractériser un navire par sa capacité de transport, mesurée en *tonneau*, n'était d'aucune utilité pour les ingénieurs, tant les mesures étaient imprécises puisque qu'elles dépendaient de la nature des matériaux transportés dans les tonneaux. Elle représentait cependant, pour les armateurs, un moyen de quantifier le potentiel économique de leurs flottes. En France, le volume du tonneau fut fixé, en 1681, sous l'ordonnance de Colbert, à une valeur de 42 pieds cube (1,146 litre). Dès 1700, d'un simple moyen de quantification mis en place par les marchands soucieux de comparer le potentiel économique de leurs navires, la jauge devint une norme, un standard de classification des navires.

¹¹³ Larrie Ferreiro, *Ships and Science: The Birth of Naval Architecture in the Scientific Revolution 1600-1800* (MIT Press, 2007), p. 187.

La mesure du franc-bord

Un autre attribut qui détermine la condition d'équilibre du navire est la mesure du *franc-bord*. Longtemps avant que l'on réalise les premiers calculs de déplacement, on portait un intérêt certain pour la hauteur de franc-bord des navires. Le franc-bord correspond à la distance entre la ligne de flottaison et le pont principal d'un navire. Cette hauteur caractérise l'équilibre entre le chargement et le déplacement. A Venise, le *Capitulare Navium* de 1255, établissait des marques d'enfoncement (croix en acier fixée sur la carène) selon l'âge du navire.¹¹⁴ Cent ans plus tard, la République de Gênes adoptait un statut qui définissait un franc-bord minimum selon les routes de navigation empruntées et en fonction des conditions de mer rencontrées : large franc-bord pour les navires destinés à naviguer dans le golf de Gascogne, plus petit franc-bord pour les navigations circonscrites aux eaux protégées de la mer méditerranée.¹¹⁵ Bien qu'il n'existait aucun moyen de prévoir le franc-bord des navires en projet, il y avait un vif intérêt pour rapporter la mesure de cette grandeur après construction, à la nature et à l'état du navire et aux conditions climatiques qui caractérisaient son périmètre de navigation.

La rapide évolution des vaisseaux de guerre à partir du XVI^e siècle, avec notamment l'introduction des sabords, rendit la prédiction du franc-bord (soit dans ce cas la distance entre la ligne de flottaison et la première ouverture dans la muraille) - et par conséquent le calcul du déplacement pour différents enfoncements d'une carène - incontournable dès la phase de projet. L'invention des sabords est attribuée à un constructeur Bretois nommé Descharges, et datée de 1501. L'usage de ces ouvertures réalisées dans les murailles des navires de guerre, pour que celui-ci puisse abriter dans sa carcasse plusieurs rangées de canons sur un même bord, deviendra commun à partir des années 1540.¹¹⁶ Cette disposition, qui offrait l'avantage de multiplier la puissance de feux d'un navire, avait pour conséquence directe de rendre le bâtiment d'autant plus vulnérable, à l'état de la mer et aux caprices du vent, que les sabords

¹¹⁴ Lane, *Venetian Maritime Law* (1962), pp. 34-35 dans Larrie Ferreiro, *Ships and Science: The Birth of Naval Architecture in the Scientific Revolution 1600-1800* (MIT Press, 2007), p. 195.

¹¹⁵ Attomz-Pepe, *Un aperçu du franc-bord des navires au moyen âge* (1976), p. 13 dans *ibid.*

¹¹⁶ Cette information est avancée dans l'ouvrage de J. Charnock, *A History of Marine Architecture*, vol 2 (1800), p. 26

étaient nombreux et disposés à proximité de l'eau. En parallèle, les navires s'alourdissaient puisqu'on y entreposait beaucoup plus de canons et de munitions, et qu'il fallait renforcer leurs charpentes pour supporter la charge de cet armement excédentaire. Dans ce nouveau contexte technique, il n'y avait que peu de place à l'erreur et la prédiction du franc-bord devint une nécessité première pour assurer le succès d'un projet au moment de sa construction.

Les premières tentatives de quantification du déplacement d'un navire, pour différentes conditions de chargement, sont attribuées à Anthony Deane et Nikolaes Witsen.¹¹⁷ Les travaux de Sir Anthony Deane, considéré, en Angleterre comme en France, comme l'un des plus grands constructeurs de son temps, illustrent justement la manière dont les constructeurs employaient les mathématiques dans leurs projets de construction au XVI^e siècle.¹¹⁸ Dans son manuscrit, Deane présente deux méthodes pour calculer l'aire des sections immergées des couples d'un navire. Lorsque cela était raisonnable, il approximait l'aire de la section à calculer par la surface du demi cercle circonscrit à la section du couple immergé. Autrement, il divisait la section immergée en petits rectangles et triangles dont il sommait les surfaces. La carène était divisée en 21 couples.¹¹⁹ L'aire de chaque section immergée était alors multipliée par la distance entre chaque couple et divisée par la masse volumique de l'eau pour obtenir le déplacement du navire.

A partir de ces calculs, on établissait, ce qu'on nommera plus tard une *échelle de solidité*, qui mettait en relation différentes valeurs du déplacement à des enfoncements successifs du navire. De cette manière on pouvait suivre et anticiper l'évolution du franc-bord durant les phases de constructions et déterminer le poids des ballasts et du chargement nécessaire pour atteindre le franc-bord désiré lorsque le navire était à l'eau.

¹¹⁷ Horst Nowaki, *Developments in fluid mechanics theory and ship design before Trafagar* (Technical University of Berlin, 2005).

¹¹⁸ Anthony Deanes, *Deane's Doctrine of Naval Architecture 1670*, éd. Brian Lavery (London: Conway Maritime Press, 1981).

¹¹⁹ De nos jours, on divise en général la carène par 20 sections transversales.

Devis de poids

Cependant, sans une connaissance précise du poids total d'un navire et de son chargement, il demeurerait impossible de prédire l'enfoncement qu'il adopterait au moment de sa mise à l'eau. Pour atteindre cet objectif, il fallait établir un devis détaillé de toutes les pièces et matériaux mis en œuvre par le chantier pour construire la charpente, l'accastillage et la mâture d'un bâtiment. C'est ce que l'on nomme le *devis de poids*. En plus de réconcilier les concepts de poids et de déplacement, le devis sera plus tard, un élément clef pour la détermination du centre de gravité du navire, grandeur indispensable pour évaluer la stabilité de son équilibre.

Archimède, les fondements de l'Hydrostatique et ses développements

Mais, revenons sur les origines de ces considérations. Les principes physiques de la Statique des corps flottants furent posés par Archimède autour de 220 avant notre ère, dans la colonie de Syracuse sur l'île de la Sicile. Dans son ouvrage, *De l'équilibre des figures planes*, Archimède introduit le principe du levier et définit le concept de centroïde qui permet de concentrer les effets d'une grandeur en un point. Il propose aussi une méthode de composition des centroïdes.¹²⁰ Ces concepts forment la base de son travail sur l'Hydrostatique : *Sur les Corps Flottants*. L'œuvre, manuscrite, fut traduite, en 1269, en latin par le moine dominicain Willem van Moerbeke. Cette traduction resta la seule reproduction des travaux d'Archimède pendant 500 ans jusqu'à ce qu'on découvre, en 1906, dans un monastère grecque d'Istanbul, un palimpseste datant du X^e siècle.¹²¹

¹²⁰ Archimède, *The Works of Archimedes*, éd. T.L Heath, trad. T.L Heath (Mineola, N.Y. : Dover Publ., 2002).

¹²¹ Larrie Ferreiro, *Ships and Science: The Birth of Naval Architecture in the Scientific Revolution 1600-1800* (MIT Press, 2007).

Le célèbre principe est énoncé dans la 5^{ème} proposition du livre I :

Un solide plus léger que le liquide dans lequel on l'abandonne s'y enfonce de telle façon qu'un volume de liquide égal à la partie immergée a le même poids que le solide entier.

Soit dans sa formulation moderne :

$$\Delta = \rho V$$

Δ , désignant le déplacement du corps flottant en kg ;

ρ , la masse volumique du liquide ;

V , le volume immergé.

La démonstration du principe est fondée sur l'argument suivant : à l'équilibre, le solide est au repos dans un fluide au repos. Si le corps solide est retiré du fluide et que la cavité restante se remplit de fluide, pour conserver l'état de repos du fluide, le poids du volume de fluide comblant la cavité doit être égale au poids du solide.

Dans le livre II, Archimède recherche un moyen d'évaluer la stabilité d'une situation d'équilibre hydrostatique dans le cas de solides de formes simples. Il considère le segment d'un paraboloïde de révolution, constitué d'un matériau homogène dont la densité est plus faible que le fluide sur lequel il repose (Figure 3-4). A l'équilibre, le solide est droit. La stabilité est mise à l'épreuve en inclinant le solide d'un angle fini par rapport à son axe vertical. L'équilibre est considéré stable si le solide, lorsqu'il est dans sa position inclinée, développe un moment qui le redresse vers sa position d'origine. Pour un corps homogène, le critère de stabilité est évalué géométriquement en examinant le bras de levier entre la poussée hydrostatique du fluide et le poids du solide. La poussée agit sur le centroïde du volume de la partie immergée de la carène. Le poids s'exerce sur le centre de gravité du solide homogène. Plutôt que de démontrer que le bras de levier conventionnel BR est positif, Archimède tient le raisonnement suivant : il soustrait le poids du volume immergé Δ_1 et l'effort de la poussée correspondante, puisque ce couple de force n'établit pas de moment en B. Seul le poids de la section émergente, Δ_2 , agissant en son centre de gravité C et la poussée correspondante agissant en C, sont considérés. Le centroïde C est déterminé à partir des positions de B et R en appliquant le théorème de déplacement des centroïdes. Le moment de redressement résultant étant positif, on conclut que solide retrouve sa position d'équilibre.

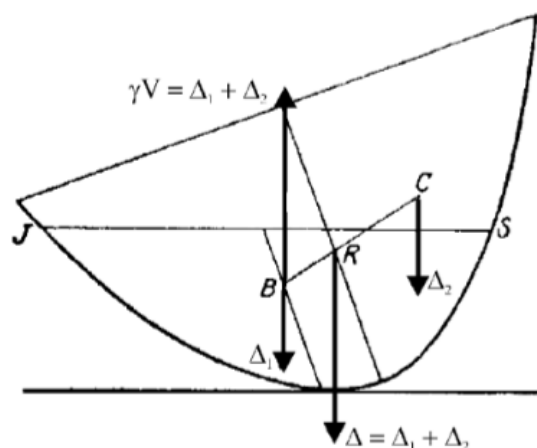


Figure 3-4 : Moment de redressement pour un paraboloïde homogène (Nowacki, *Archimedes and Ship Stability* (2001/2002), p.15)

Pour envisager l'application de ce principe à un navire, il fallait évidemment généraliser cette première idée à des solides de forme quelconque et surtout à des solides non homogènes. Il faut donc attendre près de deux millénaires, avant que les résultats établis par le philosophe de Syracuse soient développés par les géomètres de la Renaissance.

En 1586, l'ingénieur hollandais Simon Stevin avança qu'à l'équilibre, le centre de flottaison d'une coque immergée doit se trouver sur la même verticale que le centre de gravité du navire. Il considéra, cependant, que le centre de gravité devait toujours se trouver sous le centre de flottaison sans quoi le navire chavirerait. Blaise Pascal est aussi reconnu pour avoir revisité les travaux d'Archimède. En 1663, dans son *Traité de l'équilibre de liqueurs*, il parvient aux mêmes conclusions que Stevin, bien qu'il ne considère pas un navire comme objet d'étude. En 1650, l'éminent géomètre, Christiaan Huygens, tâcha d'étendre les résultats d'Archimède à d'autres solides, mais toujours homogènes.¹²²

C'est le professeur de mathématique français, Paul Hoste, qui sera à l'origine de la première tentative de quantification de la stabilité d'un navire.¹²³ Dans sa *Théorie de la construction des vaisseaux* (1687), sans faire référence aux travaux de Stevin, Hoste fait l'hypothèse qu'à l'équilibre, le centre de gravité et le centre de poussée,

¹²² Larrie Ferreiro, *Ships and Science: The Birth of Naval Architecture in the Scientific Revolution 1600-1800* (MIT Press, 2007), pp. 187-257.

¹²³ Ibid.

sont toujours disposés sur une même droite verticale. En revanche, il avance (sans le démontrer) que le centre de gravité peut se situer au-dessus du centre de poussée. Il poursuit en avançant que le moment de redressement d'un navire est égal au produit du poids du navire et de la distance entre le centre de poussée et le centre de gravité.

$$M = \Delta(\overline{KG} - \overline{KB})$$

En d'autres termes, il avançait que, plus le centre de gravité d'un navire était haut, plus le navire était stable... Les travaux de Hoste, bien que fondés sur des arguments faux, demeurèrent l'unique publication traitant du problème de la stabilité pendant près de 50 ans.

Il faut ensuite citer les travaux de César-Marie de La Croix, intendant et directeur des finances des chantiers de Rochefort. La Croix, qui n'était ni savant, ni ingénieur, s'intéressa au moment redressant d'un parallélépipède incliné. Il avait bien compris le rôle du poids et de la poussée agissant sur une même verticale à l'équilibre et suivit le raisonnement qu'Archimède avait établi pour déterminer l'existence d'un bras de levier positif. Cependant, il fit erreur dans la quantification du bras de levier. Ces travaux forment, la base des recherches que Leonhard Euler entreprit sur le sujet.¹²⁴

On doit à Pierre Bouguer et Leonhard Euler les premiers fondements d'une théorie de la Stabilité moderne et la formulation de critères de stabilité transversale. Le couple, formé par le poids du navire et la poussée d'Archimède (résultante de forces de pression), étant par définition égaux et de directions opposées, la stabilité est évaluée lorsqu'en inclinant le navire d'un angle infiniment petit par rapport à sa position d'équilibre, il résulte un moment de redressant positif. Cette formulation permet d'envisager la stabilité, non plus seulement en terme d'équilibre naturel initial, mais permet également de considérer des situations particulières de chargement (comme le vent, ou le tassement des passagers sur un bord du navire).

¹²⁴ Ibid.

Euler et le moment de redressement initial

En 1749, dans sa *Scientia Navalis*, Euler s'emploie à déterminer le moment de redressement initial d'une section plane mince, AFB, d'une forme quelconque flottant droit (Figure 3-5).

La section est inclinée d'un angle infinitésimal, $d\theta$, de sorte que, dans ce nouvel état, la flottaison est déterminée par la droite ab . Le centre de gravité G est considéré comme le point de référence de la construction géométrique. Euler, trace les droites MN et mn respectivement parallèles aux lignes de flottaison avant et après inclinaison passant par G . Le point O désigne le centre de flottaison de la section mince. L'égalité des sections immergées (Aca) et émergées (BcB) implique que les droites ab et AB sont sécantes en un point C tel que $AC=CB$.

Δ , désigne le déplacement par unité de longueur de la section AFB ;

et, ρ , la masse volumique du fluide.

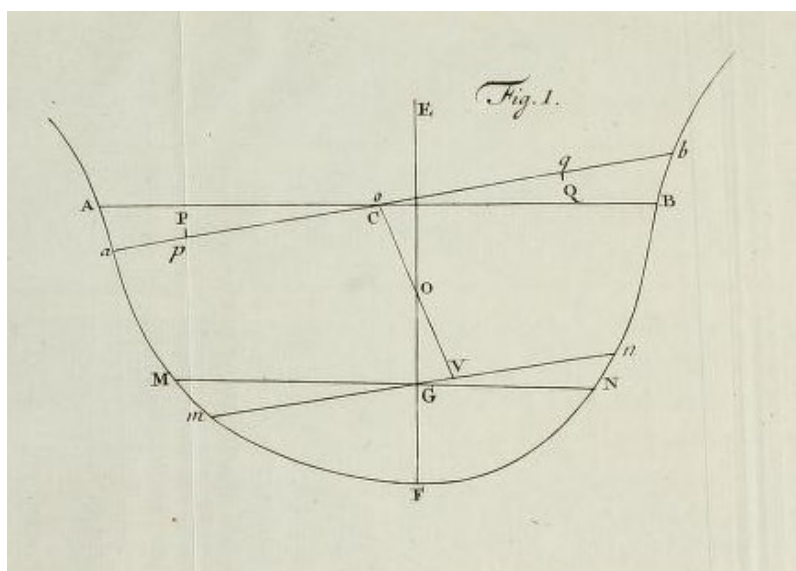


Figure 3-5 : Déplacement du centroïde pour une section mince inclinée (Euler, *Scientia Navalis* (1749/1968/1972), vol. 1, fig.39)

Dans cette position inclinée, Euler remarque la contribution de trois moments qui tendent à redresser la section vers sa position initiale :

1. Le moment généré par l'élévation du centre de gravité G en V tel que :

$$\Delta GV = \Delta GO \sin d\theta \approx \Delta GO d\theta$$

2. Le moment généré par la submersion de la section BCb d'aire S :

$$-\rho \frac{AB^2 d\theta}{8} (qo + GV) \quad \text{avec } qo = \frac{2}{3} Cb = \frac{1}{3} AB$$

avec,

$$S = \frac{BC^2 \sin d\theta}{2} \approx \frac{BC^2 d\theta}{2} \approx \frac{AB^2 d\theta}{8}$$

3. Et enfin, le moment généré par l'immersion de la section Aca d'aire S :

$$\rho \frac{AB^2 d\theta}{8} (po - GV) \quad \text{avec } po = \frac{2}{3} Ca = \frac{1}{3} AB$$

En combinant l'action de ces trois moments, on obtient la formulation du moment de redressement initial :

$$dM = \Delta GO d\theta + \frac{\Delta (AB^2 d\theta) (po + qo)}{8AFB}$$

avec, $\rho = \frac{\Delta}{AFB}$

Soit :

$$\frac{dM}{d\theta} = \Delta \left[GO + \frac{AB^3}{12AFB} \right]$$

Euler démontre ensuite, l'expression du moment de redressement pour le cas général d'un solide tridimensionnel de forme quelconque :

$$\frac{dM}{d\theta} = \Delta \left[GO + \frac{\int (y^3 + z^3) dx}{3V} \right]$$

Puis, il propose une formulation pour le cas particulier d'une symétrie bâbord/tribord (y=z) :

$$\frac{dM}{d\theta} = \Delta \left[GO + \frac{I_t}{V} \right]$$

avec, $I_t = \frac{2}{3} \int y^3 dx$ le moment d'inertie du plan de flottaison par rapport au grand axe du navire.

La quantité $\frac{I_t}{V} = OM$, exprime la distance du centre de carène au point que Bouguer nommera le *métacentre* (M). De sorte que :

$$\frac{dM}{d\theta} = \Delta \overline{GM}$$

On retrouve ainsi la formulation moderne du moment de redressement initial.

$M = \Delta \overline{GZ} = \Delta \overline{GM} \sin \theta$

ou encore avec K représentant le point le plus bas de la carène :

$$\frac{dM}{d\theta} = \Delta \left[KO - KG + \frac{I_t}{V} \right]$$

Formulée ainsi, l'expression du moment de redressement initial, fait sentir que pour améliorer la stabilité initiale d'un navire, quatre solutions sont envisageables :

1. abaisser la hauteur du centre de gravité (KG),
2. augmenter le poids du navire par l'emploi de ballasts (au risque de réduire le franc-bord),
3. augmenter la hauteur du centre de flottaison (KO),
4. élargir les dimensions transversales du navire (AB), ce qui reste la solution la plus efficace puisque le rayon métacentrique évolue en raison du carré de la largeur.

Cette dernière solution explique pourquoi la technique du *soufflage* de carène, qui consiste à doubler le bordé d'une coque sous la surface de flottaison, fut tant pratiquée pour résoudre des problèmes de stabilité avant qu'une théorie de la Stabilité ne soit mise au point. Cette technique est d'ailleurs toujours d'actualité et permet de résoudre, en pratique, des erreurs de calculs.

Bouguer et le métacentre

Sur des bases similaires, Bouguer introduit presque simultanément, en 1746, mais indépendamment (il rédige son *Traité du Navire* sur les montagnes du Pérou lors d'une expédition pour déterminer la forme de la Terre) le concept de *métacentre*, comme critère de stabilité pour de petites inclinaisons (Figure 3-6).

A l'équilibre, le centre de gravité g est toujours sur la même verticale que le centre de flottaison Γ , mais cette configuration géométrique n'est pas constante puisque l'équilibre du navire peut être perturbé par une cause extérieure. Lorsqu'un navire avec un centre de gravité très haut, I , passe d'un état de flottaison AB vers un état ab , le navire n'est plus statiquement stable. Le centre de flottaison Γ se déplace en γ . Le poids du navire, centré en I , à l'opposé du nouveau centre de flottaison γ , tend à écarter d'autant plus le navire de sa position d'équilibre. Cependant, lorsque le centre de gravité se situe en G , en dessous de l'intersection des directions des poussées à l'état d'équilibre et à l'état incliné (le point g), le centre de gravité est alors du même côté que le nouveau centre de flottaison, et le moment résultant tend à redresser le navire dans sa position initiale.

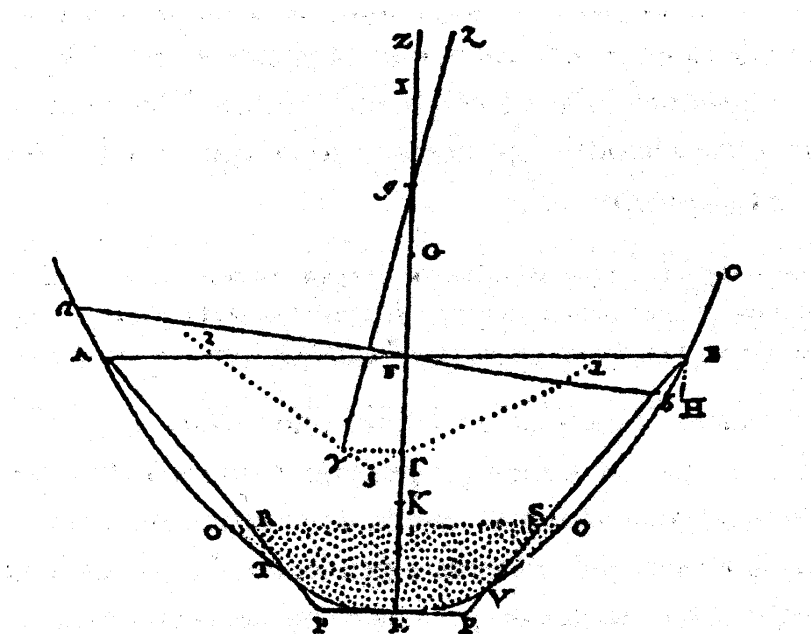


Figure 3-6 : Diagramme du métacentre (Bouguer, *Traité du navire* (1746), plate 6)

Le *métacentre* est donc un point fictif, défini par l'intersection des directions des efforts de poussée dans deux conditions de flottaison. Le métacentre donne à la fois, une limite géométrique à la hauteur du centre de gravité d'un navire et permet de distinguer le cas où le navire retrouvera sa position d'équilibre, du cas où il s'en écartera après avoir été perturbé par une cause extérieure. Le métacentre est un point que le centre de gravité ne peut dépasser, ni même atteindre.

Pour Bouguer la détermination de ce point d'intersection se réduit à la mesure de la distance entre le centre de flottaison primitif Γ , et le centre de flottaison à l'état incliné γ . Bouguer définit le triangle construit à partir des centroïdes des volumes 1, 2, et 3. Puisque les centres de flottaison, Γ et γ , appartiennent aux cotés de ce triangle, la distance $\Gamma\gamma$ doit être proportionnelle à la distance qui sépare les centroïdes de 1 et 2. De même, la distance entre Γ et le centroïde du volume 3 est proportionnelle au quotient des volumes de la coque et des onglets, telle que :

$$\Gamma\gamma.V_3 = C_1C_2.V_1 = C_1C_2.V_2$$

Il s'agit donc de déterminer analytiquement, la distance $\Gamma\gamma$, le volume de la coque immergée, et le volume des onglets. En considérant, la section AEP comme une tranche infiniment mince intégrable sur la longueur du navire dans la direction x , on procède comme suit :

1. les volumes des parties émergées et immergées de la carène sont intégrés comme il suit :

$$V_1 = V_2 = \frac{HB}{AB} \int y^2 dx$$

2. la distance entre les centroïdes des deux volumes est calculée:

$$C_1C_2 = \frac{4}{3} \frac{\int y^3 dx}{\int y^2 dx}$$

3. le volume de la coque est intégré par la méthode des trapèzes.

La distance entre les deux centres de flottaison est alors :

$$\Gamma\gamma = \frac{2e}{3} \frac{\int y^3 dx}{AB.V}$$

Le triangle $\Gamma g \gamma$ étant similaire aux onglets immergés BFb et émergés AFa. Bouguer déduit l'expression du rayon métacentrique :

Puisque :

$$\Gamma \gamma = \Gamma g \sin \theta$$

Le rayon métacentrique vaut :

$$\Gamma g = \frac{2}{3} \frac{\int y^3 dx}{V}$$

Dans la formulation moderne on définit le déplacement du centre de carène par :

$$\overline{BB'} = \overline{BM} \sin \theta$$

Et le rayon métacentrique par la *formule de Bouguer* :

$$BM = \frac{2}{3} \frac{\int y^3 dx}{V}$$

Moreau et ses critiques

Après cette digression historique, revenons en à notre cours de 1827. Moreau rappelle aux élèves le principe général de la statique :

Un système de corps pesans ne peut être généralement en équilibre, que lorsque le centre de gravité de système est le plus bas ou le plus haut possible, et on déduit immédiatement de ce principe les deux conditions connues ; l'une, que le poids du corps est égal à celui du volume de la partie plongée, l'autre, que le centre de gravité du corps et celui de la carène sont sur la même verticale.

Puis vient la définition de la stabilité :

Le repos durable, ou équilibre stable, exige que le centre de la plus grande courbure de la surface des centres de carène soit au dessus du centre de gravité du corps ; c'est à dire, qu'un corps flottant est dans le même cas que si il était terminé par la surface des centres de carène, et posé sur un plan horizontal ; que sa propriété est absolument la même que celle de ce corps, dont la position stable exige que la normale, abaissé du centre de gravité sur le plan, soit un minimum, et la position instable veut que cette normale soit un maximum.

Ces considérations générales sont poursuivies par la critique des travaux de Bouguer et d'Euler que nous venons d'exposer brièvement.

Si on reconnaît que Bouguer a bien déterminé les conditions de stabilité d'un vaisseau qui tourne autour de son grand axe, Moreau lui reproche cependant d'avoir trop généralisé la dénomination du métacentre. Ce n'est que par rapport à une inclinaison infiniment petite autour du grand axe horizontal, mené par le centre de gravité, que la direction de la poussée du fluide rencontre la droite menée par le centre de gravité du système et par le centre de la carène primitive. En considérant une troisième position, la verticale élevée par le centre de la nouvelle carène, ne rencontre pas la ligne qui précède. Le mouvement se faisant toujours autour du grand axe, il n'y a autour de cet axe qu'un seul point de rencontre qui est le métacentre. Dans les inclinaisons autour des axes intermédiaires entre le grand axe horizontal et le petit axe horizontal la poussée du fluide ne rencontre pas la verticale primitive. Les courbes métacentriques ne peuvent donc pas être déterminées.

« La stabilité est traitée dans l'ouvrage d'Euler, d'une manière fort claire », poursuit Moreau, mais on ne trouve pas dans ses travaux l'expression du moment par rapport à un axe perpendiculaire au grand axe du navire (stabilité longitudinale). Aussi, l'espace parcouru le long de la verticale par le centre de gravité dépend de la forme des parois de la carène et de la position du centre de la tranche mince à la flottaison. Ainsi pour certain corps, le centre de gravité du système monte lorsque le corps

s'incline d'un côté et descend lorsque l'inclinaison est de sens contraire, ce qui a fait croire qu'il y avait là un paradoxe. Mais Moreau fait remarquer que le paradoxe ne tient pas puisque cette observation ne contredit pas le principe d'équilibre des corps flottants selon lequel l'équilibre stable exige que la distance du centre de gravité du système à celui de la carène soit un minimum.

Mises à part ces quelques critiques qui feront l'objet des développements futurs de la théorie, la découverte du métacentre peut être considérée comme un véritable succès théorique, puisque, pour la première fois dans l'histoire de l'architecture navale, un attribut associé à la performance du navire, et à sa sécurité, pouvait être évalué dès l'établissement des plans d'un vaisseau. Suivant la position relative du centre de gravité du navire par rapport au métacentre, les plans pouvaient être modifiés en conséquence pour répondre à l'exigence de ce critère.

Application pratique : l'expérience de stabilité

A partir de ce cadre théorique, on fait envisager aux élèves les changements qu'apportent à la stabilité la modification du chargement du navire et ce que devient la stabilité lorsqu'on ajoute un soufflage dans les fonds. On montre comment rechercher expérimentalement le moment de stabilité initial d'un navire et en déduire la position du centre de gravité, c'est ce que l'on nomme *l'expérience de stabilité*.

Les premières épreuves pratiques destinées à juger de la stabilité d'un navire, devaient avoir été mises en œuvre bien avant qu'une théorie cohérente soit mise au point. Ces épreuves impliquaient le déplacement de canons et d'hommes à bord d'un navire pour observer les effets de ces déplacements sur la gîte et l'assiette. En France, la règle de Borda, en place depuis 1783, permettait de reconnaître si un vaisseau, armé et prêt à mettre les voiles avait trop ou pas assez de stabilité. Il s'agissait de rassembler un certain nombre d'hommes, alternativement de part et d'autre d'un navire, et de mesurer la différence de hauteur des francs-bords à bâbord et à tribord. Ce type d'expériences fournissaient certes des informations utiles pour un jugement qualitatif mais ne permettait pas de définir rigoureusement le degré de stabilité d'un navire. Pour cela il fallait réaliser des expériences de stabilité.

La première expérience de stabilité rapportée, fut menée en 1748, deux ans après la publication des travaux de Bouguer. Clairin-Deslaurier, encore apprenti constructeur au port de Brest, réalisa une épreuve sur l'*Intrepide*, un vaisseau de 74 canon, qui sortait du chantier. Il suspendit deux canons sur un portique aménagé sur le flan du navire. Bien que le portique fini par rompre, il put tout de même réaliser suffisamment de mesures pour calculer un métacentre de 1.8m.¹²⁵

¹²⁵ Larrie Ferreiro, *Ships and Science: The Birth of Naval Architecture in the Scientific Revolution 1600-1800* (MIT Press, 2007), pp. 187-257.

Extension de la théorie

Les travaux de Bouguer et Euler ouvrirent la voie à de possibles extensions. Il s'agissait dans un premier temps d'étendre la théorie à l'étude de la stabilité longitudinale pour déterminer l'assiette d'un navire chargé. D'autre part, il s'agissait de généraliser les conditions d'application d'une théorie limitée aux petits déplacements à des inclinaisons quelconques. Plus généralement, on souhaitait étudier les mouvements d'oscillation, générés par les sollicitations de la mer et du vent (roulis, tangage, pilonnement).

Les critères d'évaluation proposés par Bouguer (métacentre) et Euler (moment de redressement initial), ne valent que pour une « stabilité initiale », c'est-à-dire pour des inclinaisons proches d'une position d'équilibre stable théorie du métacentre. Leurs travaux ne fournissent qu'une image incomplète de la stabilité. Les premières courbes décrivant l'évolution du bras de redressement (GZ) d'un navire sur l'ensemble des inclinaisons autour de son grand axe furent réalisées par George Atwood et Vial du Clairbois, respectivement en 1796 et 1798. C'est d'ailleurs ce que Moreau fait retrouver à ses élèves.

On peut remarquer, en dernière analyse, que la détermination du moment de redressement initial proposée par Euler, n'est utile qu'à partir du moment où une évaluation précise des moments inclinant, dus au vent, aux vagues, au recul des canons, aux accélérations, n'est possible. Sans cette information, la valeur du GM ne pouvait pas être spécifiée sur des bases physiques. On comprend alors que le calcul du métacentre (critère de Bouguer) fournissait la mesure d'une quantité simple (unité en mètre) dont on pouvait directement comparer la valeur avec celle de navires dont le degré de stabilité avait été mis à l'épreuve en mer.

3.3.1.3 Hydrodynamique

A la suite de l'étude de l'équilibre statique du navire, vient naturellement des considérations sur son évolution dynamique dans le fluide. Mais avant de ce concentrer sur l'objet navire (hydrodynamique navale), il faut plus généralement introduire aux élèves le cadre conceptuel et les développements de la Mécanique de fluides :

On rappelle aux élèves l'équation du mouvement des fluides ; la solution de l'écoulement d'un fluide par un petit orifice dans l'hypothèse du parallélisme des tranches ; que dans un très court intervalle, le mouvement diffère infiniment peu de l'uniformité, et que la hauteur due à la vitesse approche de celle du fluide au-dessus de l'orifice. Expérience de Torricelli, qui confirme cette limite. La contraction de la veine fluide, le rapport de la dépense théorique à celle qui résulte de l'expérience. Les oscillations de l'eau dans un tuyau recourbé. Application aux oscillations de la mer.

Moreau introduit ici l'équation d'Euler qui régit le mouvement dynamique des particules d'un fluide. Soit, dans sa formulation moderne :

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = \vec{f} - \nabla P$$

avec, $\vec{v}$, la vitesse d'une particule de fluide ;

$\vec{f}$, les efforts extérieurs (dont l'accélération gravitationnelle de la Terre dans le cas d'un écoulement terrestre) ;

P , la pression locale du fluide ;

ρ , la masse volumique du fluide.

L'hypothèse du parallélisme des tranches permet de retrouver la forme dérivée de l'équation de Bernoulli. En considérant un écoulement potentiel tel que : $\vec{v} = \nabla \varphi$, on obtient :

$$\frac{d}{dt}(\nabla \varphi) + \frac{1}{2} \nabla(\vec{v}^2) = \vec{g} - \frac{\nabla P}{\rho}$$

L'intégration spatiale de cette dernière équation donne une forme généralisée de la loi de Bernoulli :

$$P = \rho \vec{g} \cdot \vec{r} - \frac{1}{2} \rho v^2 - \frac{\partial \varphi}{\partial t} + C$$

Dans l'hypothèse d'un écoulement uniforme, on retrouve la loi de Bernoulli :

$$P + \rho gz + \frac{1}{2}v^2 = C$$

Soit dans le cas de l'expérience rapportée par Torricelli en 1643 :

$$U = \sqrt{2gH}$$

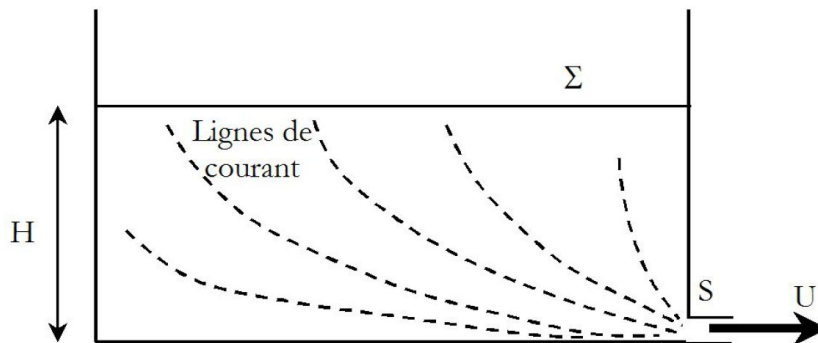


Figure 3-7 : Expérience de Torricelli

Sur ces considérations théoriques et générales, Moreau se propose d'investiguer le problème qui forme un des canons de l'architecture navale depuis le début de ses fondements théoriques, à savoir : comment déterminer la résistance qu'éprouve une carène lors de son évolution dans l'eau ?

Le problème de la résistance et ses fondements théoriques

Lorsqu'il s'agit de performance, la qualité essentielle d'un navire est bien évidemment la rapidité de son évolution dans l'eau. Cette qualité, la vitesse, dépend de la grandeur de la force motrice que le navire reçoit de l'action du vent sur ses voiles, lorsqu'il s'agit d'un voilier, ou de la puissance du mécanisme mettant à profit l'énergie du feu, lorsqu'il s'agit d'un navire à vapeur. Mais, la vitesse du navire dépendra, tout autant, de l'effort qu'il recevra du fluide dans lequel il est immergé. En l'occurrence l'eau. Cet effort retardateur, il s'agit de la caractériser, de le formuler, de réduire son expression aux causes premières dont il est l'effet. Parmi ces causes, l'une d'elle est formelle et par définition maîtrisable par l'homme, il s'agit de la figure de la carène. On peut aisément imaginer que depuis les débuts de la navigation, on sentait que certaines formes d'embarcation nécessitaient peu d'efforts pour ce mouvoir à des vitesses élevés. Mais dans le cadre qui nous intéresse, il s'agit de considérer les outils

analytiques mis au point pour évaluer, au mieux de prédire, cet effort pour chaque navire conçu, avec peut-être l'espoir de parvenir à découvrir une forme véritable. Voilà ainsi formulé le problème de la résistance, dont les développements historiques vont occuper les quelques pages qui suivent, avant de revenir aux propos de notre *Sommaire*.

Théorie des chocs

Cent cinquante ans avant la publication de ce cours, Newton, dans les *Principia Mathematica*, avait suggéré une piste théorique pour la résolution du problème de la résistance qu'éprouve un corps matériel en mouvement dans un fluide.

Un fluide est défini comme un corps matériel dont les parties, cédant sous l'action d'une force, se déplacent instantanément relativement entre elles. Newton discute du mouvement dynamique d'un corps dans un fluide dans le cadre d'une loi de vitesses linéaires, quadratiques ou hybrides. La question de la dépendance de la résistance à la vitesse est donc laissée ouverte. Newton, reconnaît explicitement l'existence de différentes catégories d'effets mis en jeu dans le mouvement dynamique des fluides : les effets inertiels et les effets visqueux. Mais, au regard de ses autres travaux sur la gravitation, on peut imaginer qu'il a à l'esprit, l'influence des effets de la gravité sur la matière fluide. Cependant, son analyse se limite à la quantification des effets inertiels. Newton avance que, sous les prémisses d'une similitude géométrique et dynamique, des corps immergés dans un fluide expérimenteront une résistance proportionnelle à la vitesse de l'écoulement élevé au carré et à un diamètre caractéristique élevé au carré. Dans sa formulation moderne, la loi générale de la résistance est donnée par :

$$R = C_d v^2 A$$

Dans cette expression,

A désigne une surface de référence du système ;

C_d le coefficient de résistance d'une forme donnée dans un écoulement donné ;

v , la vitesse de l'écoulement.

Ce qu'il faut remarquer dans cette expression, c'est que, sous l'hypothèse de similitude, le coefficient de résistance est constant pour une forme donnée. Il ne dépend donc, ni de la vitesse, ni de la taille du système. La détermination du coefficient de résistance peut donc se faire soit par le biais d'expériences, soit analytiquement, en posant des hypothèses supplémentaires sur les propriétés et le comportement du fluide considéré. Newton suivra ces deux voies.

En ce qui concerne la voie analytique, Newton restreint ses considérations à un cas limite : celui du « rare medium ». Ce fluide, purement conceptuel, permet d'adopter un modèle corpusculaire et de ne considérer que l'action des forces inertielles. Le « *rare medium* » est donc défini comme un milieu corpusculaire dont les particules, de masses et de tailles égales, se déplacent dans l'écoulement à distance courte et finie. Les particules sont supposées ne pas interagir entre elles et le fluide est considéré comme élastique. Newton, avance explicitement que l'eau n'est pas milieu « rare ».¹²⁶

Il est clair qu'un fluide, tel que l'eau, doit être soumis aux effets visqueux et gravitationnels. D'ailleurs, les développements de la Mécanique des fluides démontreront, plus tard, que lorsqu'un écoulement est gouverné par le couplage d'effets inertiels et visqueux ou gravitationnels (c'est-à-dire majoritairement par deux catégories de forces), alors le coefficient de traînée C_d n'est plus constant mais dépend d'un paramètre de similitude : le nombre de Reynold pour les effets visqueux, et le nombre de Reech/Froude pour les effets gravitationnels (il semble que l'ingénieur français, Ferdinand Reech, en détient la paternité bien que l'histoire et les manuels ne lui rendent pas cet hommage). De plus, lorsque les trois catégories de forces agissent simultanément dans un système, alors, un seul coefficient, même variable ne suffit plus. L'expression de la résistance adopte une structure plus complexe que celle énoncée plus haut. Mais, ce qui semble évident aujourd'hui ne l'était pas pour Newton et ses prédécesseurs, si bien que la plupart des géomètres et ingénieurs du XVIII^e siècle s'efforcèrent de rendre compatibles leurs observations avec l'expression d'une résistance dont la structure ne correspondait pas aux effets mis en jeu dans leurs expériences. On découvrait alors que pour un solide donné, et

¹²⁶ Horst Nowaki, *Developments in fluid mechanics theory and ship design before Trafagar* (Technical University of Berlin, 2005).

donc pour un coefficient donné, la loi des vitesses ne devait plus être quadratique, ni même linéaire, mais adoptait un exposant fractionnel.

Cet effort de généralisation d'un modèle idéal et partiel explique l'échec des applications de la théorie « des chocs » à servir de cadre interprétatif pour les écoulements réels, et à fortiori, à fournir des prédictions. Aussi, la responsabilité de Newton pour l'impasse théorique qu'emprunta l'Hydrodynamique pendant près de deux siècles semble être à revoir. Cependant, cet arrière-plan théorique ouvre, dans le sillage de Newton, deux questions : comment appliquer cette méthode à différentes formes de solide (et notamment celle d'un navire) et vérifier les résultats expérimentalement ? Comment, à partir de cette théorie, concevoir une forme qui minimiserait les effets de la résistance ? Newton ne répondra qu'en partie à ces deux questions. Après avoir intégré les coefficients associés à des formes simples telles qu'une sphère, il avait avancé l'idée qu'il existait une forme unique pour laquelle la résistance serait minimum et que l'analyse théorique permettrait de « découvrir ». Cette forme prit le nom du « solide de moindre résistance » dont Newton proposera une représentation mystique résultant d'un calcul différentiel dont le détail est inexistant dans ses écrits.¹²⁷

Le mythe du « solide de moindre résistance », excita l'ambition de beaucoup d'analystes. Johann Bernoulli fut l'un d'entre eux, et sera ainsi en 1714, le premier à appliquer la théorie newtonienne au système d'un navire dans l'eau et de sa voile dans l'air. La méthode avait atteint un degré de perfection remarquable et bien que Bernoulli obtînt des valeurs numériques de résistance, aucune ne concordait avec l'expérience puisqu'elles résultaient de calculs fondés sur des prémisses erronées. Plus tard, en 1727, à l'occasion d'un prix ouvert par l'Académie des Sciences sur le thème de la mâture, Pierre Bouguer reprend à son compte la théorie newtonienne et réduit l'analyse de la résistance d'un navire à celle de son étrave. Il transforme ainsi le problème du « solide de moindre résistance » en celui d'une « étrave de moindre résistance ».

¹²⁷ Larrie Ferreiro, *Ships and Science: The Birth of Naval Architecture in the Scientific Revolution 1600-1800* (MIT Press, 2007), pp. 113-185.

Leonhard Euler, élève de Johann Bernoulli, suit une direction similaire. Il applique la formule de la résistance de la théorie des chocs sur une surface plane dont l'aire correspond à celui du maître couple du navire. Il reconnaît cependant, que la valeur ainsi calculée est une valeur limite qui doit être réduite pour rendre compte de la finesse de l'étrave. A l'instar de Bouguer, la résistance de l'étrave est évaluée en discrétisant la carène en panneaux dont les résistances sont estimées approximativement grâce à la formule appliquée à une plaque plane. Euler note que la résistance de la poupe ne doit pas être négligée, mais n'offre cependant aucun remède analytique. S'il semble peu satisfait de cette approche, il ne proposera aucune alternative dans le reste de son œuvre.¹²⁸

Théorie des lignes de courant

En 1736, Daniel Bernoulli, fils de Johann, en considérant des écoulements sur des plaques planes, introduit le concept de « défection avant impact » qui concurrence l'idée de « réflexion après impact » de la théorie corpusculaire. Le concept de ligne de courant est substitué à celui de corpuscule. Cette idée ouvrira la voie aux développements d'une théorie plus générale de la résistance dans le cadre d'une mécanique des fluides continus.

La plupart des résultats des expériences menées au XVIII^e siècle sont en conflit avec les prédictions de la théorie des chocs. Krafft (1736), Robins (1742), Juan y Santacillia (1771), et Du Buat (1780), font remarquer l'importance de la partie arrière des corps sur la résistance que la théorie newtonienne négligeait.¹²⁹

En 1750, il n'existe pas de théorie générale de la dynamique des fluides. La théorie corpusculaire de Newton ne rend pas compte des déformations globales que subit un écoulement de matière fluide en présence d'un objet solide. Pour prendre en compte les effets globaux, il fallait une théorie applicable à un domaine de fluide déformable. Une théorie qui satisfasse les principes de la dynamique (les lois de Newton), munie d'équations constitutives, décrivant les propriétés du fluide et la configuration du domaine considéré (équations aux limites), et d'équations de conservations (énergie et

¹²⁸ Horst Nowaki, *Developments in fluid mechanics theory and ship design before Trafagar* (Technical University of Berlin, 2005).

¹²⁹ Ibid.

matière). Dans un tel domaine, l'état physique du fluide pourrait alors être décrit par la distribution de variables locales : la pression et la vitesse. Les équations devaient être formulées dans un espace continu, à deux ou trois dimensions, et les variables locales être fonction de l'espace. Il fallait donc mettre au point les outils mathématiques qui puissent satisfaire à ces exigences. C'est dans ce cadre que les équations différentielles aux dérivées partielles sont introduites en physique. Jean le Rond d'Alembert et Leonhard Euler sont les pionniers de cette nouvelle approche.¹³⁰

La méthode de résolution dans le cadre de la théorie des lignes de courant est la suivante : trouver les lignes de courant à la surface du corps immergé puis déterminer la distribution des vitesses le long de ces lignes de champs. La distribution des pressions est alors déduite à partir d'un équivalent de la formule de Bernoulli. Enfin, la résistance est obtenue par intégration des pressions sur la surface du corps. La théorie des champs était donc posée sur des fondations saines puisqu'elle se donnait pour objectif de rendre compte des effets globaux de l'écoulement. Pour autant, elle est encore trop immature pour servir à la prédiction dans la conception des navires. D'une part, seul le cas d'un fluide idéal pouvait être résolu et encore fallait-il intégrer dans les équations un terme rendant compte des effets de la viscosité et des phénomènes d'instabilité. D'autre part, l'analyse de formes complexes qui représentaient les carènes des navires nécessitait des outils analytiques qui n'arrivèrent que bien plus tard.

Approche expérimentale

A partir de 1760, les physiciens ont conscience que les théories fondées sur des modèles corpusculaires sont bien trop irréalistes pour être applicables dans le processus de conception d'un navire. L'alternative, la théorie des lignes de courant, est encore trop idéale et immature pour produire des résultats intéressants pour les ingénieurs. Face à cette insuffisance de la géométrie, c'est donc la déception qui prime parmi les géomètres et les ingénieurs. On se retourne alors vers l'expérience avec l'idée que c'est en interrogeant directement la matière que l'on obtient des résultats fiables. Pour cela, encore faut-il savoir comment l'interroger et anticiper sa réponse.

¹³⁰ Ibid.

En Grande-Bretagne, un groupe de gentleman, fondateurs de la Société des Arts à Londres, engagèrent sur la période 1758 à 1763, une compétition d'essais de modèles de bateaux. Ils invitèrent des modèles de vaisseaux de 74 canons et de frégates, à une échelle de 1/48, à participer à l'évènement. L'objectif était de mettre en exergue le modèle le plus rapide et le moins sujet à la dérive. Dans le cours des épreuves, on mena des essais de résistance en eaux calmes au Peerless Pool à Londres (en tractant les modèles avec des masses suspendues), des essais de stabilité au moyen de balances, et même, des essais de tenue à la mer dans le lac d'Epping Forest. Les résultats obtenus avec deux modèles de vaisseaux et cinq modèles de frégates furent soigneusement archivés et le prix fut décerné au modèle le plus performant. Bien que l'évènement ne fût pas une première dans l'histoire, il ouvrit la voie au développement de cette branche expérimentale de l'architecture navale.

En 1763 en France, Borda rapporta les résultats d'essais réalisés dans l'air et dans l'eau avec des plaques planes, des prismes, des pyramides, des sphères et d'autres solides de formes assez simples. Pour mener à bien ses expériences et tester la validité des résultats avancés par Newton, il utilisa un système de bras rotatif actionné par la chute d'une masse. Ses résultats furent les suivants : il confirma, la nature quadratique de la loi des vitesses, il réfuta la dépendance au sinus carré de la résistance de plaques minces exposées à un flux avec incidence. Il démontra également la dépendance linéaire de la résistance au sinus de l'angle d'incidence et conclut que les résultats de la théorie des chocs étaient absolument faux et inutiles pour l'architecture navale.

Le fameux architecte navale suédois Frederik Henrik af Chapman, insatisfait de l'état de l'art des théories de la résistance, développa l'étude de séries systématiques de formes. Il réalisa des essais avec des profils axisymétriques, totalement immergés, dont il faisait varier la position longitudinale du maître couple.

Bossut, encouragé et financé par le ministre des finances engagea quant à lui, une importante campagne d'essais en bassin. Ses résultats publiés en 1778, confirmèrent la proportionnalité de la résistance à la vitesse au carré, réfutèrent la dépendance au sinus carré pour une plaque inclinée et mirent en évidence l'influence de la profondeur et de la largeur des canaux sur les essais de résistance. Les vagues d'étrave étaient soigneusement notées. Bossut conclut cependant que la résistance de frottement était une composante négligeable.

Il faut aussi mentionner les travaux de Pierre Louis George Du Buat rapportés en 1779 dans *Principes d'hydrauliques*. Il sont intéressants pour deux raisons : d'une part, Du Buat réalisera des mesures de pression dynamique pour évaluer la résistance autour d'un corps flottant au moyen de tube de Pitot et, d'autre part, il prit le soin de séparer l'expression de la résistance en plusieurs composantes dont une correspondant à la friction. Le tube de Pitot est un instrument mis au point par Henry de Pitot en 1732. Cet instrument mesure la vitesse d'un écoulement en comparant la hauteur d'eau de deux manomètres. L'un est exposé à l'écoulement et subit donc l'effet de la pression dynamique, l'autre est protégé et mesure l'effet de la pression hydrostatique. Du Buat, installa ces tubes de Pitot autour de solides disposés dans un flux d'eau. Il mesura une surpression considérable à l'avant des solides, une dépression à l'arrière, et une variation uniforme de la pression de l'avant vers l'arrière. Du Buat fit aussi l'hypothèse qu'un navire serait sujet à trois formes de résistance : une résistance due au choc des particules de fluide à l'étrave en proportion de 40 à 60% (on retrouve ici le concept newtonien), une friction latérale (20-30%) et une résistance « rétrograde » due à la différence de pression entre l'avant et l'arrière du solide (15-25%).

A la fin du XVIII^e, les travaux de l'anglais Mark Beaufoy, financés par la British Society for the Improvement of Naval Architecture, ouvrirent une nouvelle direction pour la recherche expérimentale. Au cours de ses expériences Beaufoy met à l'épreuve une grande variété d'étraves et de poupes, et teste en particulier, la résistance éprouvée par des plaques minces dans un écoulement parallèle. Pour éliminer la résistance de la section frontale, il réalise des essais avec des planches de longueurs différentes complètement immergées. De cette manière il démontre que la composante de frottement n'est en aucune manière négligeable devant les composantes inertielles et gravitationnelles. En ce qui concerne les composantes de la résistance, il observe :

1. Une résistance de pression de l'étrave associée à un système de vague,
2. Une force de frottement le long des côtés de la coque du navire,
3. Une pression négative à la poupe.

A la fin du XVIII^e siècle, la théorie comme l'expérience échouent dans leur tentative de poser les bases d'une interprétation correcte et rigoureuse de la résistance. La prédiction des performances hydrodynamiques d'un navire avant qu'il ne soit construit, n'est donc encore qu'un idéal pour les ingénieurs constructeurs. Cet échec

tient en particulier au manque de connaissances des différentes causes de la résistance et à une pauvre maîtrise des similitudes mécaniques qui suivent différentes lois pour différentes causes. La théorie des chocs de Newton, qui considère les effets inertiels de la résistance, néglige les effets visqueux et gravitationnels. Elle n'est valable que pour le cas idéal d'un « rare medium ». La simplification théorique ne tient pas lorsque l'on considère les écoulements de l'eau. Une théorie fondée sur le modèle d'un coefficient unique décrivant l'influence de paramètres de similitudes multiples ne pouvait pas prétendre représenter la réalité complexe des phénomènes.

Les déficits de la théorie des chocs ont très certainement entravés une interprétation correcte des résultats des nombreux essais réalisés sur des navires en grandeur réelle et à échelle réduite. Sans une décomposition rigoureuse de la trainée fondée sur des paramètres de similitudes, l'explication des phénomènes hydrodynamiques, l'extrapolation aux échelles réelles et la définition des vitesses correspondantes étaient impossibles. La plupart des expérimentateurs se contentaient de comparer les mérites respectifs des différentes formes et modèles mais les effets d'échelles condamnaient la pluparts de leurs prescriptions à demeurer dans l'erreur.

De plus, la tendance à la standardisation des formes promues par les marines européennes, n'a pas dû servir le progrès dans la résolution du problème de la résistance à l'avancement d'une carène. En effet, les recherches expérimentales et la collecte de données empiriques (sur modèle et à grande échelle) se limitaient aux spectres restreints de formes standards.

En 1805, avant de se retirer de ses fonctions de directeur de l'école d'application du génie maritime, Vial du Clairbois introduit le second tome de son *Traité élémentaire de la construction des bâtiments de mer* par les propos suivants :

Cela ne suffisoit pas ; jusqu'à présent, quoiqu'il y ait des ingénieurs de vaisseaux, il n'y a pas eu un seul vaisseau de calculé. Un calcul pour déterminer le degré de célérité de marche seroit à la vérité un *leure*, une sorte de charlatanisme, parce que l'hydrodynamique ne nous offre pas de bases satisfaisantes ; la question de la résistance est encore loin d'être résolue : mais l'hydrostatique est une science physico-mathématique certaine ; & par conséquent solubles sont les problèmes qui en dépendent ; ces solutions exigent, à la vérité, un grand travail en tracé de plans, & surtout en calculs numérique, effrayants par leur longueur, si l'on n'avoit su les simplifier...¹³¹

¹³¹ Honoré Vial du Clairbois, *Traité élémentaire de la construction des batimens de mer, à l'usage des élèves du Génie Maritime, & propre aux Marins, Armateurs* (Paris, 1805), préface, p. ij.

L'ancien directeur de l'Ecole du Génie Maritime, laissait entendre à travers ces propos que le problème de la résistance n'était pas insoluble.

La critique de Moreau

Le récit précédant et les débats qu'il suscite sont introduits aux élèves. On leur rappelle la théorie de Newton, dont on expose les contradictions avec l'expérience ; soit, l'hypothèse du « rare medium » et de la loi du carré du sinus de l'angle d'incidence. On présente ensuite les raisonnements d'Euler, les résultats des expériences de Bossut, Borda et Du Buat. Les expériences font voir que la résistance est à peu près comme le carré de la vitesse, et que, lorsque la vitesse est très petite, la résistance approche davantage de la raison simple de la vitesse, ou d'un terme dont l'exposant de la vitesse diffère peu de l'unité. En admettant cette hypothèse, ainsi que le fait qu'il ne soit pas nécessaire de supposer dans la résistance une partie constante que l'expérience n'a pu faire apprécier, la résistance depuis le mouvement lent jusqu'à la vitesse de 15 centimètres (soit 1,7m/s) , devrait donc être exprimée au moins par deux termes : l'un proportionnel au carré de la vitesse, l'autre à une puissance fractionnaire, tels que le premier soit très petit devant le second dans les mouvements lents et très grands dans les mouvements moyens.

$$R \propto v^2 + v^{\frac{1}{\alpha}} \text{ et } \alpha \geq 1$$

Dans le mouvement lent, le frottement de l'eau contre la surface et l'adhérence des molécules entre elles et avec les parois, se communiquent par l'effet de la viscosité à la masse fluide et il en résulte des forces accélératrices qui se détruisent dans le mouvement uniforme du corps.

Lorsque la vitesse est d'un mètre (soit 4,5 m/s), le terme proportionnel au carré de cette vitesse est très grand par rapport aux autres. L'inertie du fluide oppose une grande résistance par rapport aux autres résistances relatives aux vitesses. Le terme proportionnel au carré de la vitesse représente assez bien la résistance d'un corps flottant quand la dénivellation n'est pas considérable. Le coefficient de ce terme est fonction de l'angle d'incidence et ne peut donc être déterminé que par des interpolations sur un grand nombre d'expériences. L'hypothèse de la dépendance au carré du sinus de l'angle d'incidence, qui est au fondement des travaux de Bouguer et d'Euler sur la résistance, est vivement critiquée.

Moreau rappelle ensuite les résultats des expériences de l'ingénieur Chapman et du vice-Amiral Thévenard. La théorie de George Juan est écartée du cours comme étant basée sur un mauvais fondement et donnant des résistances entièrement contredites par l'expérience et de plus « conduisant à des expressions absurdes ».

On fait envisager aux élèves la question sous son véritable point de vue, en considérant les courbes que décrivent les molécules du fluide autour du corps flottant, et on leur fait voir par le moyen de ces courbes de quelle influence est l'arrière du corps et le vide qui peut s'y former ; qu'en remplissant ce vide par le corps, on augmente la capacité mais pas la résistance. Cette expérience donne une première idée du solide de moindre résistance ; elle fait voir aussi que ce solide est fonction de la vitesse. Les poissons, les plongeurs et les oiseaux nageurs, présentent une seconde idée de ce solide, et il résulte de ces considérations, ce précepte général : Que les navires, pour éprouver la moindre résistance, doivent avoir à leur avant une surface convexe, commencer à s'amincir à environ un tiers, ou entre le tiers et la moitié de la longueur, en allant à l'arrière, suivant la vitesse avec laquelle le corps doit se mouvoir.

En comparaison au problème de la stabilité, le problème de la résistance est visiblement loin d'être résolu. Si quelques maximes, extraites des innombrables expériences et des théories en développement, fournissent aux élèves quelques principes qualitatifs pour appréhender les effets de forme d'une carène lors de son évolution dans un fluide, la prédiction de la résistance d'un navire et, a fortiori, la découverte du « solide de moindre résistance » restent un idéal. Il faudra attendre les années 1830, pour le l'ingénieur britannique, William Froude, mette au point un procédé, fondé sur le concept de similitude, capable de prédire la résistance d'un navire à partir d'essais en bassin réalisés sur des modèles réduits. Froude fera l'hypothèse de séparation des effets de pressions (résistance de vagues) et des effets visqueux (résistance de frottements) dans la structure de résistance. Soit :

$$R_T = R_w + R_v$$

avec :

$$R_w = \frac{1}{2} C_w(F_r) \rho S V^2$$

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

F_r , est le nombre de Froude tel que $F_r = \frac{V}{\sqrt{gL}}$

R_e , le nombre de Reynolds tel que $R_e = \frac{VL}{\mu}$, μ étant la viscosité de l'eau.

Aujourd'hui, cette décomposition fondamentale permet la détermination de la résistance total à partir d'essais en bassin réalisés sur des modèle réduits et un calcul normalisé (convention ITTC).

En effet, la loi de similitude établit que pour deux carènes géométriquement semblables, au même nombre de Froude, la résistance de vague est proportionnelle au déplacement, soit $\frac{R_w}{\Delta} = \frac{R_w'}{\Delta'}$. La résistance de frottement, qui relève d'un phénomène de surface, est alors déterminée par le calcul du coefficient de frottement pour une plaque mince immergée, donné par la formule de Schoenherr : $C_f = \frac{0,075}{(\log_{10} R_e - 2)^2}$ et

majoré par un facteur de forme k, tel que $R_f = (1 + k) \frac{1}{2} C_f (R_e) \rho S V^2$.

3.3.1.4 Equilibre du navire, Dérive, Manœuvrabilité et Tenue à la mer

L'équilibre du navire

L'art de la navigation consiste fondamentalement à contrôler l'équilibre dynamique d'un navire en évolution à l'intersection de deux milieux résistants. Le premier milieu, l'air, produit une force motrice, l'effort aérodynamique, le second, l'eau, produit une force retardatrice, l'effort hydrodynamique. L'effort aérodynamique, dont la composante parallèle à la direction de la route du navire fournit l'énergie nécessaire à la propulsion, dépend de nombreux paramètres. Notamment, le nombre, la taille et la position des voiles, la force et la direction du vent, ainsi que l'angle entre le vent apparent et les voiles (incidence). L'effort hydrodynamique dépend quant à lui, de la forme de la carène, de son incidence dans l'eau (angle de dérive) et de l'état de la mer.

A travers des siècles d'expériences et de pratiques de la mer, les navigateurs, ont accumulé un ensemble de connaissances empiriques qui permettent d'anticiper, plus ou moins intuitivement, l'évolution de cet équilibre et de déterminer le réglage le plus performant. Cependant, prédire de façon précise et rigoureuse le comportement dynamique d'un voilier est loin d'être un problème trivial. L'équilibre dynamique d'un navire, composé d'une coque, d'un gouvernail et d'un grément, évoluant à vitesse constante dans un vent de force et de direction données, doit être traité comme

un système rigide à six degrés de liberté, auquel on applique les équations fondamentales du mouvement. D'autre part, il faut pouvoir estimer l'intensité et la direction des principaux efforts qui participent à cet équilibre. Enfin, à partir de ces données, il s'agit d'extraire des prescriptions constructives (position et forme des voiles...), et pratiques (angle de barre, cap à suivre...) pour développer en même temps une poussée maximale et une dérive minimale pour chaque allure dans des conditions de vent données. Ce problème, est présenté très généralement aux élèves.

Avant d'atteindre l'équilibre, le navire accélère jusqu'à ce que l'effort du vent apparent sur les voiles s'équilibre avec la résistance hydrodynamique (Figure 3-8 Les équations générales du mouvement appliquées au système navire donnent :

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_{RA} + \vec{F}_{RH}$$

$$m \vec{M}_{a/CG} = \vec{M}_{F_{RA}/CG} + \vec{M}_{F_{RH}/CG}$$

où $\vec{F}_{RA}$ est l'effort aérodynamique appliqué au centre de voilure ;

$\vec{F}_{RH}$ est l'effort hydrodynamique appliqué au centre de carène ;

$\vec{M}_{F_{RA}/CG}$ est le moment développé par l'effort aérodynamique au centre de gravité des masses du navire ;

$\vec{M}_{F_{RH}/CG}$ est le moment développé par l'effort hydrodynamique au centre de gravité des masses du navire.

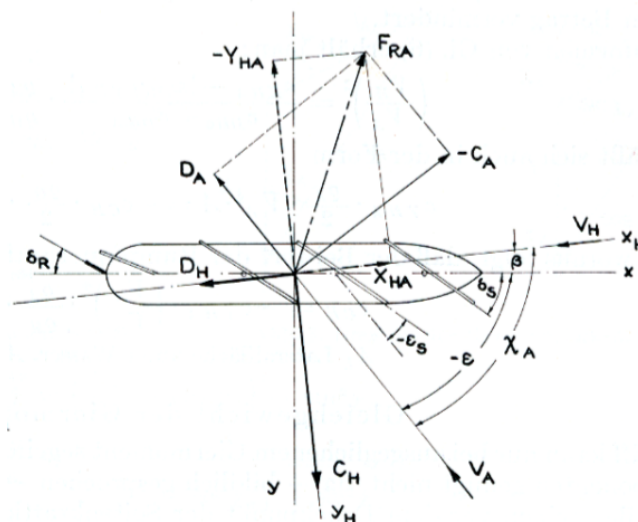


Figure 3-8 Equilibre d'un navire en manœuvre, forces et angles (Nowaki 2005)

A vitesse constante, l'équilibre est alors défini comme suit :

$$\vec{F}_{RA} = \vec{F}_{RH}$$

$$\vec{M}_{F_{RA}/CG} = \vec{M}_{F_{RH}/CG}$$

Moreau introduit dans ce système la notion de hauteur de la colonne de pression dans la résistance de l'eau, H_H , et de hauteur de la colonne de pression de l'air, H_A , qui agit sur la surface de voilure :

$$K_{DA} \rho_A S_A H_A = K_{DH} \rho_H S_H H_H$$

$$\text{avec } H_A = \frac{V_A^2}{2g} \text{ et } H_H = \frac{V_H^2}{2g}$$

K_{DA} , fonction de l'angle d'incidence des voiles, représente le coefficient de trainée aérodynamique ;

K_{DH} , fonction de l'angle de dérive du navire, représente le coefficient de trainée hydrodynamique ;

ρ_A et ρ_H représentent, respectivement, les masses volumiques de l'air et de l'eau ;

S_A la surface de voilure et S_H la surface immergée du maître couple ;

V_A la vitesse du vent apparent et V_H la vitesse du navire.

On détermine les résistances horizontales et verticales qu'éprouve le vaisseau suivant ses trois axes rectangulaires, dans la route directe et dans les routes obliques. Dans le cas bi-dimensionnel, représenté Figure 3-8, la résistance hydrodynamique se décompose en un effort de trainée hydrodynamique D_H , parallèle à la route du navire, et un effort de portance C_H , perpendiculaire à la route du navire. Soit :

$$\vec{F}_{RH} = \vec{D}_H + \vec{C}_H$$

$$\vec{D}_H = \frac{1}{2} K_{DH}(\beta) \rho_H S_H V_H^2 \vec{x}_H$$

$$\vec{C}_H = \frac{1}{2} K_{CH}(\beta) \rho_H S_H V_H^2 \vec{y}_H$$

Avec β , angle de dérive.

De même, l'effort aérodynamique peut être décomposé en un effort de trainée D_A , parallèle à la direction du vent apparent, et un effort de portance C_A , perpendiculaire à la direction du vent apparent.

$$\begin{aligned}\vec{F}_{RA} &= \vec{D}_A + \vec{C}_A \\ \vec{D}_A &= \frac{1}{2} K_{D_A} (\varepsilon_s) \rho_A S_A V_A^2 \vec{x}_A \\ \vec{C}_A &= \frac{1}{2} K_{C_A} (\varepsilon_s) \rho_A S_A V_A^2 \vec{y}_A\end{aligned}$$

Avec ε_s , angle d'incidence de la voile.

On peut aussi décomposer l'effort aérodynamique en une force de propulsive, X_{HA} , parallèle à la route du navire et en une force de dérive, Y_{HA} , perpendiculaire à cette route.

$$\begin{aligned}\vec{F}_{RA} &= \vec{X}_{HA} + \vec{Y}_{HA} \\ \vec{X}_{HA} &= F_{RA} \cos \delta \vec{x}_H \\ \vec{Y}_{HA} &= F_{RA} \sin \delta \vec{y}_H\end{aligned}$$

Avec δ , l'angle entre la direction de la force aérodynamique et l'axe de la route du navire. On remarquera que la valeur de cet angle dépend de l'angle d'attaque de la voile lorsque celle-ci travaille en finesse (c'est-à-dire qu'elle développe une portance).

Cette décomposition nous donne le système suivant:

$$\begin{aligned}D_H &= X_{HA} \\ C_H &= Y_{HA}\end{aligned}$$

Soit,

$$\begin{aligned}\frac{1}{2} K_{D_H} (\beta) \rho_H S_H V_H^2 &= F_{RA} \cos \delta (\varepsilon_s) \\ \frac{1}{2} K_{C_H} (\beta) \rho_H S_H V_H^2 &= F_{RA} \sin \delta (\varepsilon_s)\end{aligned}$$

avec,

$$F_{RA} = \frac{1}{2} \sqrt{[K_{D_A} (\varepsilon_s)^2 + K_{C_A} (\varepsilon_s)^2]} \rho_A S_A V_A^2$$

On montre comment on détermine le vent apparent quand la surface est frappée obliquement et qu'on connaît le vent réel.

Soit,

$$\begin{aligned}\vec{V}_A &= \vec{V}_R + \vec{V}_H \\ V_A &= \sqrt{V_R^2 + V_H^2 + 2V_R V_H \cos(\alpha)} \\ \cos(\chi_A) &= \frac{V_R + V_H \cos(\alpha)}{V_A}\end{aligned}$$

Avec, V_A , la vitesse du vent apparent ;

V_R , la vitesse du vent réel :

et α angle entre la direction de la route réelle du navire et la direction du vent réel.

A partir des équations générales du mouvement, Moreau se propose de déduire :

1. La vitesse que prend le vaisseau dans la route directe et dans les routes obliques.
2. La position des vergues et la grandeur de la dérive pour que la vitesse soit la plus grande possible, la vitesse du vent étant donnée.
3. Calcul des mêmes quantités pour que le vaisseau gagne le plus vite possible le vent.
4. Pour qu'il s'éloigne le plus vite possible d'une côte ou d'une ligne donnée.

En entrée du système, il faut fixer la magnitude et l'orientation du vent réel, V_R , ainsi que le cap souhaité, soit la valeur de l'angle α . Le réglage de la voile, l'angle b_s , est un paramètre. Enfin, en sortie, il s'agit d'obtenir la vitesse du navire V_H , la magnitude et la direction du vent apparent V_A et χ_A , l'effort de propulsion et la dérive. Cependant, sans une théorie capable de quantifier précisément les coefficients de portance et de trainée de la coque et des voiles, il est difficile de comprendre comment Moreau parvient à résoudre rigoureusement ce système.

Le problème de la Dérive

L'investigation du problème de l'équilibre dynamique des forces agissant sur un navire en route, remonte à la deuxième moitié du XVII^e siècle. A cette époque, on se concentre particulièrement sur le problème de la *dérive*.

Au début des années 1670, Le prêtre Jésuite et mathématicien, Ignace Pardies, avait pour projet d'écrire une série d'ouvrages sur la Mécanique. Malheureusement, il n'en termina qu'un seul, intitulé *La Statique ; ou la Science des forces mouvantes*, publié en 1673 quelques semaines avant sa mort.¹³² Pour démontrer le principe de composition des efforts dans le cas d'un solide évoluant dans un milieu résistant, Pardies s'appuie sur l'exemple d'un navire sous voiles. Bien que ce principe avait été démontré, en 1636, par le mathématicien Gille Personne de Roberval, Pardies met en évidence le fait qu'un navire développe une plus grande résistance latérale que longitudinale. Ce comportement, bien connu des marins depuis les débuts de la navigation à voile, permet au navire de s'orienter suivant un cap plus ou moins proche de la direction du vent. L'idée de Pardies est que la *dérive*, qui détermine la trajectoire perpendiculaire au cap du navire, peut être estimée à partir de la connaissance du quotient entre la résistance longitudinale et la résistance latérale de la carène. Dans son raisonnement, Pardies estime ce quotient à 100 et à aucun moment il ne mentionne la dépendance de la résistance à la vitesse, son raisonnement est purement géométrique.¹³³

En 1679, le chevalier Renau d'Elissagaray est convié à Versailles pour enseigner les mathématiques et la navigation au fils illégitime du roi, Louis de Bourbon, comte de Vermandois, qui fut élevé par le Grand Colbert et nommé Amiral d'une flotte à l'âge de 12 ans. C'est à ce moment que Renau écrit son premier mémoire : *Mémoire sur les constructions des vaisseaux, dans lequel il y a une méthode pour en conduire les façons*. Le manuscrit de 17 pages n'est cependant jamais publié.

La rédaction de ce mémoire est motivée par une simple question que le roi Louis XIV avait posée 4 ans auparavant. Le traité secret de Dover de 1672 marque le début d'une

¹³² Pardies, *La Statique ; ou la Science des forces mouvantes* (1673), pp 239-246

¹³³ Larrie Ferreiro, *Ships and Science: The Birth of Naval Architecture in the Scientific Revolution 1600-1800* (MIT Press, 2007), pp. 52-112.

courte alliance entre la France et la Grande-Bretagne et Louis XIV profita de cette période de trêve pour commander deux yachts au constructeur anglais de renom, Sir Antony Deane. Les deux yachts furent livrés à Versailles en 1675 et alors que Deane était venu assisté à la livraison, le roi interrogeât : « Pourquoi un vaisseau va, pour ainsi dire, contre le vent ? ». ¹³⁴ Face à cette question enfantine, Deane, qui ne savait probablement pas quoi répondre, la posa à son tour, au jeune Bernard Renau d'Elizagaray, alors âgé de 23 ans, protégé de la famille Colbert et dont la notoriété d'expert naval se faisait de plus en plus grande dans le royaume. Le « petit Renau », comme on le surnommait, confia alors à Hubert de Champy, baron de Desclouzeaux (alors commissaire générale des installations navales) qu'il ne se contenterait pas de démontrer pourquoi les navires remontent au vent, mais qu'il pouvait déterminer avec quel cap et à quelle vitesse ils le faisaient. ¹³⁵ La confiance de Renau tenait probablement de sa connaissance des travaux que Pardies avait publié six ans plus tôt.

Le petit mémoire de Renau, est notablement la première tentative identifiée de fonder la conception d'un navire sur des bases analytiques. Cela ferait donc de ce mémoire le premier travail d'Architecture Navale théorique. En effet, les travaux de Renau se distinguent des traités contemporains sur la construction navale tels que *l'Architecture Navale* de Charles Dassié publié en 1677. Dans ce manuscrit, Renau ne se contente pas de rassembler dans un même ouvrage, un ensemble de règles de proportions basées sur la pratique et l'expériences des chantiers, mais il se propose de mettre en place des principes mécaniques et géométriques destinés à déterminer les caractéristiques et performances d'un navire avant qu'il ne soit construit.

Bien que Pardies ne soit pas cité, il semble que ses travaux aient particulièrement inspirés l'analyse de Renau. Ce dernier introduit son raisonnement d'une manière très similaire à celle de Pardies. Il imagine le mouvement d'un navire de forme sphérique qui éprouverait la même résistance dans toutes les directions. Tout comme Pardies, Renau évalue le quotient de dérive à 100 fois la résistance à l'avancement et à aucun moment il ne prend en compte la vitesse dans ses démonstrations.

¹³⁴ Renau, « Mémoire... » f° 229, v°. Sur ordre du roi Charles.

¹³⁵ Renau d'Elizagaray, *Mémoire sur les constructions des vaisseaux* (1679), p. 1

L'idée de Renau est de déterminer, à partir des principes de la mécanique, une forme de coque qui produise le moins de dérive possible, de sorte que le navire remonte parfaitement au vent. Mais dans son raisonnement Renau attache une attention particulière à ne pas modifier les proportions des navires fixées par Colbert en 1673. Il décide de montrer que parmi ces proportions il existe une forme idéale. Cette forme est celle de l'ellipse.¹³⁶

Les arguments avancés pour démontrer ce résultat sont clairement faux. Renau avance que pour un rectangle de 10 par 1 la résistance à l'avancement est 10 fois plus faible que la résistance à la dérive, soit que la résistance est directement proportionnelle à la surface de la section immergée. Lorsqu'il considère un triangle inscrit au premier rectangle, la résistance à la dérive du rectangle circonscrit est réduite par le sinus de l'angle d'incidence, soit 1/10. La dérive du triangle est donc dix fois moindre que celle d'un rectangle. Mais, si le triangle offre le moins de dérive, Renau considère qu'il virera trop lors des manœuvres. De plus, pour des raisons pratiques, Renau ajoute que les lignes d'un navire doivent être parallèles à son axe en son milieu et perpendiculaires à son axe à ses extrémités. L'ellipse, connue pour répondre à ces critères géométriques, fournit donc la figure idéale pour la carène d'un navire. L'examen rigoureux de ce raisonnement aurait démontré que la dérive d'un rectangle est identique à celle du triangle inscrit.

Un modèle (nommé plus tard *Modèle*), long de 10 mètres, navigué par six hommes, construit selon cette théorie de la construction, sera mis à l'épreuve durant l'hivers 1681, lors d'une série de conférences sur la construction navale, tenues sur le Grand Canal de Versailles. Le modèle elliptique de Renau devait affronter le modèle d'une frégate construite sur les plans du constructeur Dusquesne. Cependant, alors que *Modèle* déplaçait 17 tonnes d'eau, la *Frégate* n'en déplaçait que 2, ce qui rendait évidemment la comparaison tout à fait veine. Une douzaine de navires furent tout de même construits sur le principe de Renau et firent de bons services.¹³⁷

¹³⁶ Larrie Ferreiro, *Ships and Science: The Birth of Naval Architecture in the Scientific Revolution 1600-1800* (MIT Press, 2007), pp. 52-112.

¹³⁷ Ibid.

En 1686, Renau reprend son mémoire et le transforme en un travail bien différent. Il retire sa théorie de l'ellipse et se concentre sur le problème de la dérive. La raison de cette relecture, est peut être associée à la publication des travaux de Edmé Mariotte, en 1686, sur la résistance des plaques inclinées dans lesquels il présente une loi de la résistance proportionnelle au carré de la vitesse et au carré du sinus de l'angle d'incidence. En 1689, Renau publie *De la théorie de la manœuvre des vaisseaux*. Dans cet ouvrage, la méthode que Renau met en place pour estimer la dérive témoigne d'un état assez grossier de l'Architecture Navale théorique à cette époque. L'objectif était dans un premier temps de déterminer l'angle de dérive d'un navire existant, pour un cap et une vitesse de vent donnée, à partir de l'alignement de deux amers (L et H).

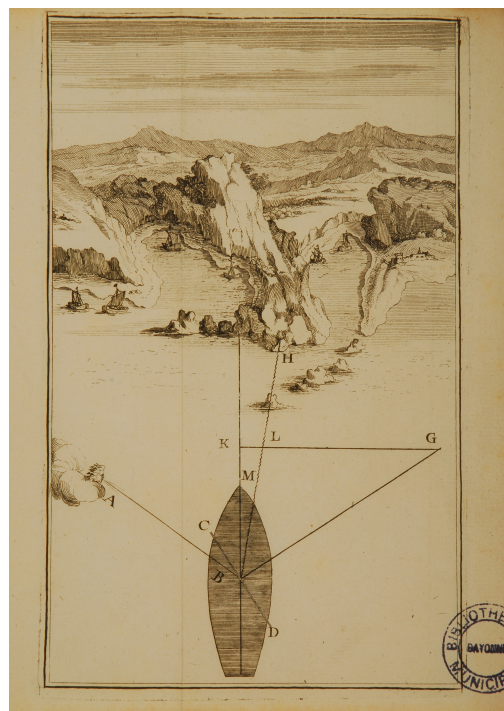


Figure 3-9 : Estimation de la dérive (Renau d'Elizagaray 1689)

Il fallait ensuite être capable d'estimer la vitesse et le cap d'un navire suivant l'angle entre le vent et les voiles. Dans ce but, Renau construit sur un diagramme un demi-cercle représentant les vitesses d'un navire à différentes allures. Il dérive l'équation des vitesses à partir du théorème de Pythagore appliqué au triangle rectangle inscrit dans le cercle de diamètre BG. BG représentant la vitesse du maximale du navire en vent arrière et β l'angle entre les voiles et l'axe principal du navire.

$$BG^2 = BK^2 + KG^2$$

$$BK = \sqrt{BG^2 - KG^2}$$

$$BG = v_{\max}$$

$$BK = v = v_{\max} \sin \beta$$

Pour prendre en compte la dérive, la vitesse d'avance BK est réduite à BL à partir du ratio entre la vitesse d'avance et la vitesse de dérive BI/BG. Le raisonnement de Renau est évidemment faux puisqu'il ne prend pas en compte la loi de la résistance proportionnelle au carré de la vitesse. Cette erreur marque le début d'une controverse entre Renau et le savant Christian Huygens.

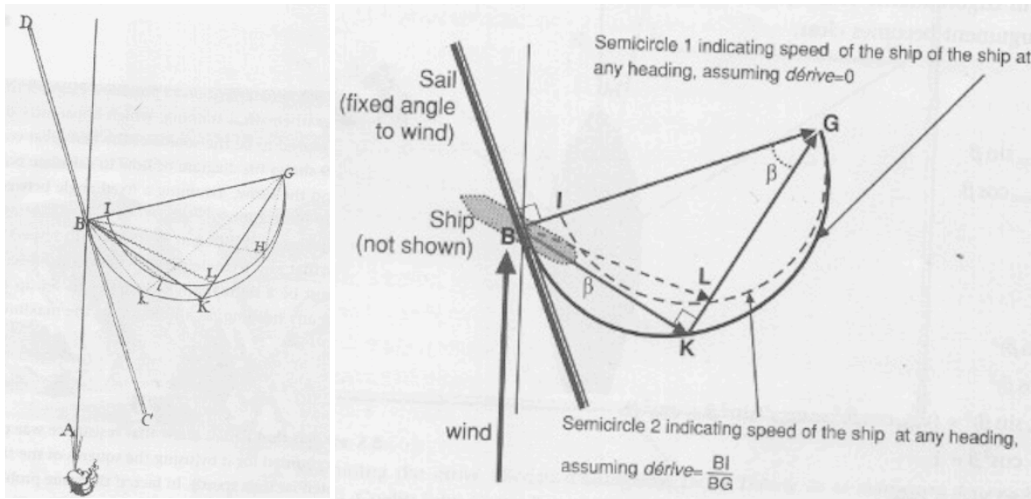


Figure 3-10 : Diagramme de vitesse (Ferreiro 2007)

Huygens, avança que le cercle circonscrit au triangle BKG, doit représenter non pas les vitesses, mais les résistances suivant les allures du navire.

La vitesse est alors définie par la somme $BS = \frac{BK + BG}{2}$ qui détermine non pas un cercle mais une ellipse.

$$BG = R_{\max} \approx v_{\max}^2$$

$$BK = R \approx v^2$$

$$\text{et } BK = R = R_{\max} \sin \beta \approx v_{\max}^2 \sin \beta$$

$$\text{donc } v = v_{\max} \sqrt{\sin \beta}$$

La première erreur fut de penser que la dérive est la même pour n'importe quelle allure.

En 1714, Johann Bernoulli publie un traité dans lequel il applique la théorie des chocs de Newton à l'étrave d'un navire, pour déduire la résistance, mais aussi à la voile pour dériver l'effort de poussée et le centre de pression de la voile. A partir de ces données, il estime une valeur de l'angle de dérive pour des formes de carène simple. L'influence de la gîte et l'assiette est négligée, mais Bernoulli remarque que la dérive dépend de la forme de la carène. C'est sur ces bases que Moreau détermine le système d'équation à résoudre.

Le point vélique

Il est intéressant de retrouver dans ce cours la définition du point vélique. En 1727, Bouguer et Euler soumettront des travaux sur le matage à l'Académie des Sciences. Inspirés par les travaux de Bernoulli, tous deux définissent le point vélique qui fournit un critère de placement et d'optimisation de matage. Le point vélique est défini par l'intersection entre la résultante hydrodynamique de la carène – qui selon la théorie des chocs n'agit que sur l'étrave – et la résultante aérodynamique des voiles.

La résistance hydrodynamique NR et la poussée aérodynamique NP forment la résultante NT dont la composante horizontale à l'équilibre est nulle. NT est donc verticale. Idéalement, N doit être placé sur le même plan verticale que le centre de gravité pour que le navire en mouvement ne prennent pas d'assiette.

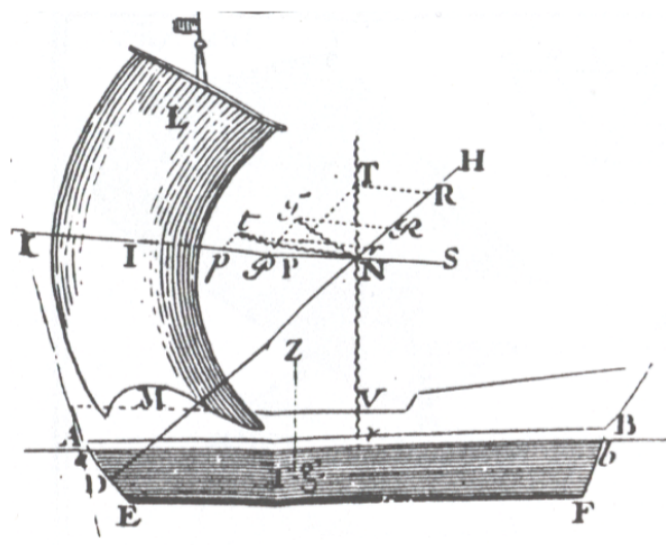


Figure 3-11 : Point vélique (Bouguer 1746)

Euler, suggéra l'emploi d'étrave sphériques, de sorte que la résultante agirait sur le même point peu importe l'allure.¹³⁸

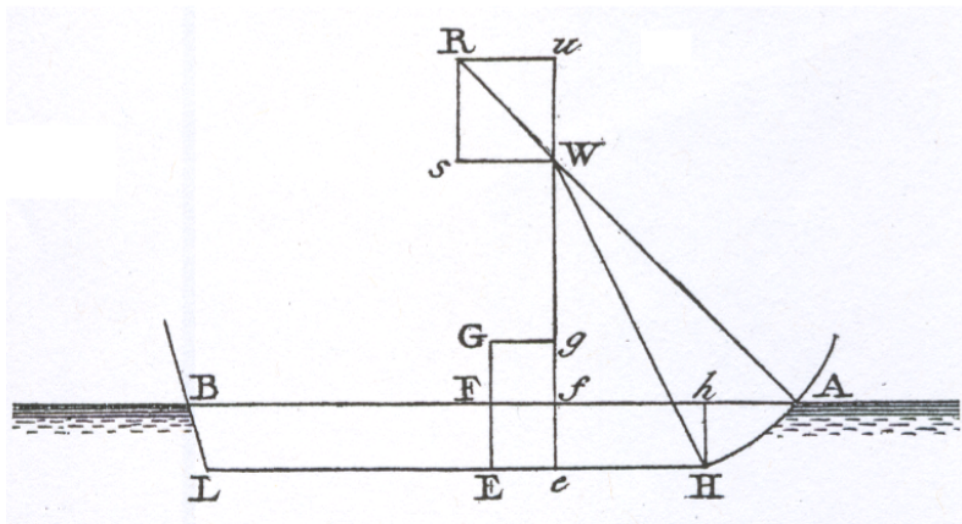


Figure 3-12 : Point vélique (L. Euler 1749)

Cette discussion autour du point vélique n'a en pratique aucun sens puisqu'elle fait référence à un point fictif, défini par l'intersection de deux forces fictives dont l'intensité et la direction sont estimées à partir d'hypothèses fausses. Cependant, le concept de point vélique fut enseigné pendant des années à partir du manuel de Duhamel du Monceau et figure dans notre *Sommaire* de 1827. En pratique, il existe toujours un moment de tangage¹³⁹ qui peut être composé en partie par une distribution des charges du navire, ou grâce à une réaction hydrodynamique de la coque.

¹³⁸ Route du navire par rapport au vent

¹³⁹ Mouvement de rotation autour de l'axe transversal du navire

Manœuvrabilité

L'étude de la manœuvrabilité consiste à déterminer, d'une part, la capacité d'un navire à garder sa course en ligne droite et, d'autre part, la réponse d'un navire à la manœuvre, c'est-à-dire à la sollicitation du gouvernail et des voiles. Il s'agit d'évaluer le couple de force défini par la résistance latérale du navire (C_H) et la composante latérale de la résultante aérodynamique (Y_{HA}) des voiles (Figure 3-8).

Lorsqu'à vitesse constante, les deux efforts, de direction et de magnitude égales, n'agissent pas sur le même point, il se forme un moment, positif ou négatif qui tend naturellement à faire évoluer le navire vers le vent, ou à l'en écarter. Dans l'un de ces deux cas, une action du gouvernail est nécessaire pour compenser ce moment naturel. Mais elle a pour conséquence d'augmenter la résistance du navire et donc de réduire la vitesse. On comprend alors que le réglage de ces deux forces est un sujet sensible aussi bien pour le confort et la facilité des manœuvres, que pour la vitesse du navire en route directe.

Encore une fois, l'analyse se fonde sur la théorie des chocs. Le centre de pression des voiles est estimé comme le centroïde de toutes les surfaces exposées au vent. Cette approximation est raisonnable en vent arrière, mais elle l'est de moins en moins lorsque le navire se rapproche du vent. En effet, le centre des pressions aérodynamiques se déplace vers le guidant¹⁴⁰. Le calcul d'un centroïde globale, néglige les recouvrements et les obstructions. De même, la position du centre des pressions hydrodynamiques dépend de l'incidence de la carène avec l'écoulement. Ces phénomènes et approximations étaient qualitativement compris par les scientifiques et les ingénieurs. Ainsi, des corrections empiriques étaient souvent appliquées.

L'étude de la réponse du navire aux sollicitations du gouvernail nous place cette fois dans un problème de nature dynamique. Sa résolution nécessite la connaissance des forces hydrodynamiques sur la coque et sur le gouvernail, aérodynamique sur les voiles, et les termes d'inerties associés aux accélérations de lacet¹⁴¹.

¹⁴⁰ Bord d'attaque de la voile

¹⁴¹ Mouvement de rotation autour de l'axe vertical du navire

La formulation la plus mature de ce problème, nous la devons à Euler en 1773 (Euler, *Théorie complète de la construction et de la manoeuvre des vaisseaux*, mise à la portée de ceux qui s'appliquent à la navigation 1773). Bien qu'il discute en majorité de la stabilité en course droite, il accorde une section de son ouvrage à l'effort du gouvernail et à l'étude du mouvement de rotation du navire. Les quantifications des efforts sur la carène, les voiles et le gouvernail sont basées sur la théorie des chocs. Mais il modélise correctement le terme d'inertie de rotation de la coque avec lequel il parvient à estimer une valeur de l'accélération angulaire produite par le gouvernail. Son approche néglige cependant l'influence du moment d'inertie hydrodynamique du navire qui peut être du même ordre de grandeur que celui de la coque.¹⁴²

Dans son cours, Moreau, propose à ce sujet quelques maximes sur l'arrimage le plus favorable à la manoeuvre. Il remarque à juste titre qu'en centrant les poids autour du centre de gravité du navire, la rotation autour de son axe vertical se fait plus facilement.

¹⁴² Horst Nowaki, *Developments in fluid mechanics theory and ship design before Trafagar* (Technical University of Berlin, 2005), p 29.

Tenue à la mer

La capacité d'un navire à affronter une mer agitée avec le minimum de perturbations, a toujours été une qualité vivement appréciée par les gens de mer. Si elle garantit la sécurité de l'équipage, elle est aussi gage de confort. La quantification du comportement dynamique d'un navire soumis à des perturbations extérieures est, aujourd'hui, une tâche essentielle dans un projet de conception. Une première tentative d'investigation ce problème fut de quantifier les périodes naturelles d'oscillation de chaque mouvement oscillatoire du navire: soit le roulis¹⁴³, le tangage¹⁴⁴ et pilonnement¹⁴⁵ et le lacet¹⁴⁶. Cette quantification ne devient possible qu'à partir du moment où on est capable d'estimer analytiquement l'inertie de masse d'un solide, et les efforts de redressement, pour chaque degré de liberté du navire.

Au milieu du XVIIIe siècle, Euler, à la suite d'une réflexion partagée avec les Bernoulli, découvre une analogie frappante entre le mouvement naturel de roulis du navire et le pendule isochrone, dont la théorie avait été initialement développé par Galilée¹⁴⁷. Euler suggère qu'une longueur équivalente de pendule peut être dérivée pour un navire à partir du quotient entre le moment d'inertie et le moment de redressement hydrostatique, soit :

$$l_{eq} = \frac{\Delta i_T^2}{\Delta GM} = \frac{i_T^2}{GM}$$

¹⁴³ Mouvement de rotation autour de l'axe longitudinal du navire

¹⁴⁴ Mouvement de rotation autour de l'axe transversal du navire

¹⁴⁵ Mouvement de translation suivant de l'axe vertical du navire

¹⁴⁶ Mouvement de rotation autour de l'axe vertical du navire

¹⁴⁷ Horst Nowaki, *Developments in fluid mechanics theory and ship design before Trafagar* (Technical University of Berlin, 2005), p 30.

La période naturelle du pendule équivalent est alors donnée par l'expression :

$$T_{roulis} = 2\pi \sqrt{\frac{l_{eq}}{g}}$$

soit,

$$T_{roulis} = 2\pi \frac{i_T}{\sqrt{gGM}}$$

Avec Δ , le déplacement du navire ;

Δi_T^2 , le moment d'inertie de masse du navire pour le roulis ;

i_T , le rayon d'inertie de masse du navire pour le roulis ;

GM, le rayon métacentrique ;

Et g l'accélération de la pesanteur.

Des résultats correspondants furent établis pour le tangage et le pilonnement. Encore une fois, Pierre Bouguer dans son *Traité du navire* de 1746 était parvenu, simultanément et indépendamment, à un résultat similaire. Il reconnaît, à juste titre, l'analogie entre les oscillations d'un navire et celles du pendule isochrone. Il présente une méthode pour calculer le moment d'inertie et utilise les résultats de ses travaux sur la stabilité pour le calcul du rayon métacentrique.

Quelles conclusions pratiques pouvait-on faire d'un tel résultat théorique? Pour qu'un navire tienne bien la mer, il est nécessaire dans un premier temps de réduire l'amplitude de ses oscillations, mais aussi de limiter les accélérations qui génère des charges importantes sur la coque et le gréement. Cependant, pour le cas du roulis, de telles mesures ne doivent pas compromettre la stabilité du navire (on ne peut pas réduire le GM). Il ne reste donc qu'à augmenter le moment d'inertie du navire en recherchant une répartition des masses favorable.

En 1757, Daniel Bernoulli met en évidence l'importance d'éviter la résonance lorsque le système navire est excité par une houle sinusoïdale.¹⁴⁸ Il s'agit donc de faire en sorte que la période naturelle du navire ne s'approche en aucun cas d'une

¹⁴⁸ Daniel Bernoulli, *Quelle est la meilleur manière de diminuer le roulis et le tangage d'un navire*, Acad. Royale des Sciences, Paris, 1757 (1771)

période probable d'excitation. Une longue période naturelle semble alors favorable puisqu'il est rare de rencontrer une mer qui puisse produire une excitation de la sorte.

Moreau expose les résultats que nous venons de présenter et il ajoute que le terme de masse ajoutée, proportionnelle à la vitesse du mouvement oscillatoire, manquant dans les formules de Bouguer et Euler, a peu d'influence sur la durée des oscillations.

Cependant, on remarquera d'une part, que l'omission du terme de masse ajoutée dans l'expression de la période naturelle est une grave erreur dans les mouvements de tangage et de pilonnement. D'autre part, le cours se limite aux petites amplitudes, négligeant les effets non linéaires.

En conclusion, qu'il s'agisse de manœuvrabilité ou de dérive, la théorie du navire souffre d'un déficit pour la prédiction des efforts aérodynamiques et hydrodynamiques agissant sur le navire en mouvement. Ce déficit repose en particulier sur l'insuffisance de la physique à établir une théorie cohérente de la résistance. Cependant la compréhension de la dynamique des systèmes est suffisamment avancée pour prendre en compte l'ensemble des paramètres influents sur l'équilibre du système navire. « La science de l'ingénieur est encore en système » disait Vial du Clairbois.

3.3.1.5 Résistance des solides

Dans ce chapitre il s'agit de traiter de la Résistance des solides, partie de la mécanique appliquée ayant pour objet l'évaluation des contraintes et des déformations subies par une structure sous l'action de forces extérieures données. Le navire est un assemblage de pièces et de matériaux hétérogènes. Pour en assurer la cohérence globale, il est nécessaire de sélectionner et de dimensionner rigoureusement chacune de ses parties suivant les charges auxquelles elles seront exposées. Une fois en mer, le navire sera sollicité par de nombreux efforts : son poids propre, celui de son chargement, la pression de l'eau, du vent et les vagues. On fait donc connaître aux élèves les différentes espèces de bois propres aux constructions navales. Comment reconnaître un bois sain à l'inspection des couches ligneuses séparées par un réseau très mince à la couleur pâle. On explique d'ailleurs que la force d'une pièce de bois dépend du nombre de couches de fibres ligneuses et de la résistance de chacune d'elles. Dans le reste du cours, Moreau s'attarde sur les différents modes de dégradation des matériaux mis en œuvre et pour chaque cas, on expose les résultats de la théorie linéaire de poutres dont Galilée, Hooke, Bernoulli, Coulomb et Navier en furent les fondateurs et qui serviront à un dimensionnement local des parties du navire.

Resistance des solides à l'extension

On donne les résistances absolues à la rupture en traction de différents bois, métaux et cordages déterminées à partir des expériences de Barlow, Tregold, Niou et Perronnet. Ces données fournissent aux élèves un moyen de déterminer que les contraintes de traction σ_x dans les pièces mises en œuvre dans la construction n'entraîneront pas la détérioration du matériau.

$$\sigma_x = \frac{F_x}{S} \leq \sigma_{rupture}$$

Resistance des solides à la flexion

On présente ensuite, la sollicitation d'un solide en flexion. On fait voir l'existence, dans le solide, d'une fibre neutre, qui sépare les extensions, des compressions et au niveau de laquelle les forces horizontales sont en équilibre. On montre l'expression de la force (contrainte) du faisceau considéré :

$$\sigma_f = \frac{M_z}{I_z} v \leq \sigma_{\text{élastique}}$$

avec, M_z , moment de flexion,

I_z , moment quadratique de la section transversale du solide,

v , rayon de courbure de la section courbée.

On donne ensuite, l'expression des moments de flexion et des flèches pour différentes configurations.

1. Flexion d'un solide encastré en un bout chargé en son extrémité
2. Flexion d'un solide posé sur deux appuis chargé en son milieu
3. Flexion d'un solide posé en un bout avec un chargement uniformément réparti
4. Flexion d'un solide posé sur deux appuis avec un chargement uniformément réparti

On expose ensuite les théories de la résistance des solides au flambement et à la torsion.

Flexion du vaisseau

Les vaisseaux que l'on considère à l'époque de ce *Sommaire* sont relativement petits en longueur et déplacement. Dans l'analyse structurelle de telles charpentes, les sollicitations locales dominent devant les sollicitations globales du navire. Cependant, on a conscience que de tels engins souffrent de déformations en arc et contre-arc en raison de leurs chargements et de l'état de la mer. La concentration des batteries de canons aux extrémités latérales de la charpente génère un déséquilibre avec l'action des forces de pressions qui agit au centre de carène. L'intégrité structurelle du navire était donc menacée et on craignait les voies d'eaux.

Dans ses travaux¹⁴⁹, Euler suggéra l'application de la théorie linéaire des poutres à la structure du navire dans le but d'évaluer le moment maximum au milieu du navire. Mais la difficulté à évaluer les propriétés structurelles d'assemblage de matériaux anisotrope rend le problème difficilement soluble. De fait on ne se risquait pas à concevoir des navires trop longs.

¹⁴⁹ Leonard Euler, *Théorie complète de la construction et de la manoeuvre des vaisseaux, mise à la portée de ceux qui s'appliquent à la navigation* (1773).

3.3.1.6 Machines

Dans ce chapitre, on s'emploie à la description de quelques machines et mécanismes que l'on retrouve sur les chantiers et les navires. Presse hydraulique, cabestan, volant d'inertie, engrenage, poulie et treuil. On met en évidence la théorie qui régit leur fonctionnement. On étudie quelques applications pratiques de ces mécanismes, comme le cas d'un bateau flottant dans un fleuve tiré en amont par un mécanisme mue par le courant ou le remontage d'un navire sur un plan incliné.

3.3.1.7 Théorie des rames

On expose aux élèves la théorie des rames. Des rames mues par des agents libres dont les efforts varient suivant leur volonté, produisent des accélérations et des retardations alternatives, mais on peut mesurer le mouvement du navire par un mouvement uniforme en raison de l'inertie du navire. Moreau ajoute que seul le tiers des efforts fournis par les rameurs est employé à mettre le vaisseau en mouvement. En outre, seul le tiers des rameurs qui travaillent continuellement à pousser le vaisseau. On discute ensuite de l'installation des rames à bords, de la relation qui doit exister entre la partie intérieure et la partie extérieure de la rame, de la surface choquante qu'on doit admettre par chaque rameur et des pertes de force vive. Cet exposé nous mène à considérer l'emploi des roues à aubes à la navigation, substituées aux rameurs, dont la théorie générale fera l'objet du chapitre suivant.

3.3.1.8 Roues hydrauliques

L'investigation analytique du problème de la roue hydraulique s'étend bien au delà de son application à la navigation comme engin de propulsion. Il n'est d'ailleurs pas directement question de propulsion dans le chapitre de ce cours dédié aux roues hydrauliques, mais plutôt d'exposer l'état actuel de la théorie des roues hydrauliques.

Depuis l'Antiquité, l'écoulement de l'eau est une source d'énergie abondamment utilisée dans de nombreuses industries. Avant le XVII^e siècle, ces machines n'avaient été considérées que dans leur état d'équilibre.¹⁵⁰ Après avoir estimé l'effort que le courant était capable d'exercer sur elles, effort au sujet duquel Galilée et Descartes avaient donné quelques notions, on calculait le poids qui, placé à l'extrémité d'un levier, lui faisait équilibre. S'il fallait ensuite mouvoir ce poids, on diminuait sa grandeur ou celle du bras de levier jusqu'à ce qu'on obtienne la vitesse voulue. Mais comment savoir jusqu'à quel point devait-on diminuer le poids ou augmenter sa vitesse, c'est à dire celle de la roue, comparativement à la vitesse du courant, pour obtenir le plus grand effet ?

L'application des principes de la mécanique aux systèmes de roues hydrauliques, est motivée par l'idée d'optimiser le transfert de l'énergie issue d'un processus disponible et renouvelable en un travail mécanique continu et exploitable. Il s'agit donc de maximiser l'effet dynamique de la roue.

Au début du XVIII^e siècle, il existait deux espèces ordinaires de roues hydrauliques. Les premières, connues généralement sous le nom de roues à *aubes* ou à *palettes*, se meuvent par le choc de l'eau dans des plans verticaux. Par conséquent, l'axe du mouvement est horizontal. Les autres sont les roues à *plots* ou à *augets* dont le mouvement est dû en partie au choc et au poids du liquide. Les premières espèces de roues se divisent selon la forme des aubes qui peuvent être *planes* ou *courbes*, suivant qu'elles se meuvent dans un coursier *rectiligne* ou *circulaire*. En outre, on a aussi des roues *horizontales* dont l'axe du mouvement est vertical. Les unes, simples conservent le nom de roues. Les autres d'une construction plus compliquée, sont les *turbines* et les roues à *réactions*. Selon le dispositif mis en œuvre, l'eau agit sur les

¹⁵⁰ J.F D'Aubuisson de Voissins, Traité d'hydraulique à l'usage des ingénieurs (1840), Langlois et Leclercq

roues par son poids, par son choc, par sa force centrifuge, ou par réaction. Il est rare que ces différents modes d'action de l'eau interviennent indépendamment. Le plus souvent ils agissent simultanément. La force centrifuge se trouve sur toutes les aubes courbes.

Dans un premier temps, on rappelle aux élèves le calcul d'Antoine Parent réalisé en 1704, dans une communication avec l'Académie Royale à Paris. Au cours de ce mémoire, le premier où l'on proposa d'évaluer l'effet des machines d'un point de vue tout à fait pratique, Parent raisonne à partir de l'idée simple que l'effet d'un écoulement sur les aubes d'une roue hydraulique varie avec la vitesse relative de la roue par rapport à celle du courant.¹⁵¹

$$W_m = f(V - v)$$

V représente la vitesse de l'écoulement et v la vitesse des aubes après le choc.

Il devrait donc y avoir un certain rapport entre ces vitesses, correspondant à un effet maximum de la roue. Le problème étant de déterminer ce rapport.

Parent émet l'hypothèse que l'effort est proportionnel au carré de la vitesse relative et donc que l'effet dynamique de la roue est égale à l'expression suivante :

$$W_m = pv = \frac{\rho S(V - v)^2}{2g} \cdot v$$

p est l'effort de l'impact de l'eau sur une aube ;

S correspond à la surface d'impact d'une aube ;

ρ est la masse volumique de l'eau ;

g l'accélération de la pesanteur.

En différentiant cette expression et en l'égalant à zéro, il trouve que la vitesse de l'aube doit être le tiers de celle du courant. Soit $v = \frac{V}{3}$.

Moreau précise alors que bien que ce résultat soit assez correct pour les écoulements indéfinis, et donc adapté aux dispositifs des moulins à nef et roues suspendus, il ne

¹⁵¹ *Mémoires de l'Académie royale des sciences* (1704)

s'accorde pas avec les expériences faites sur les roues qui se meuvent dans des coursiers.

On expose ensuite la théorie des roues du Chevalier Jean-Charles Borda qui dans un mémoire publié en 1767, reprend les hypothèses avancées par Parent.¹⁵² Borda avait pour intention de perfectionner les roues utilisées couramment dans les machines à eau. Il se proposait de trouver la manière de rendre à chacune des espèces de roues (aubes et godets) le plus grand effet possible et de fixer le rapport qui existe entre les maxima de ces deux dispositifs afin de déterminer la solution la plus avantageuse pour convertir de l'énergie.

Les calculs sont fondés sur l'application du principe de conservation de la force vive (conservation de l'énergie). On considère que la force vive que perd l'eau dans le choc couplé à la force vive qu'elle possède en quittant la roue, est égale à la force vive absorbée par la résistance (W_r). Dans le cas général, l'effet dynamique total d'une roue à aube est donnée par la différence entre l'énergie potentielle de l'écoulement et la force vive résistante :

$$W_m = E_p - W_r$$

Soit,

$$W_m = \rho g \left(h - \frac{z^2}{2g} - \frac{u^2}{2g} \right)$$

ou encore,

$$W_m = \rho g (h - h' - h'')$$

où, h est la hauteur de chute, z , la vitesse avec laquelle l'eau abandonne la machine et $\rho \frac{u^2}{2g}$, la somme des pertes de forces vives éprouvées.

Dans le cas idéal, $u = (V - v)$ et $z = v$.

L'expression du travail moteur s'écrit aussi sous la forme :

$$W_m = p v = \frac{\rho S (V - v)}{2g} \cdot v$$

¹⁵² Borda Jean-Charles , *Mémoire sur les roues hydrauliques* (Mém. Ac. Sci., 1767 (1770), p. 270–287)

Dans cette expression, lorsque la roue est mue par un courant V , v est la seule variable. Si $v = 0$, l'effet sera nul. Une machine qui ne se meut pas, ne serait produire un courant. L'effet sera encore nul lorsque $v = V$, une roue qui va aussi vite que le courant, n'en reçoit aucune action. Il est aussi évident que v ne peut dépasser V .

En différenciant la partie variable de l'expression, il vient :

$$dW_m = Vdv - 2v dv = 0 \text{ pour } v = \frac{V}{2}$$

Ainsi, dans le cas des roues verticales et horizontales à aubes, l'effet utile est égal à la moitié de la force vive de l'eau qui sort du coursier, soit $\eta = \frac{1}{2}$

Pour une roue verticale, l'effet maximum est obtenu lorsque la vitesse de la roue est égale à la moitié de celle du courant, soit $v = \frac{V}{2}$. Pour une roue horizontale, l'effet maximum est obtenu lorsque la vitesse de la roue est égale à la moitié de celle du courant divisé par le sinus de l'angle que fait la palette avec l'horizon, soit $v = \frac{V}{2 \sin \alpha}$.

Pour les roues à augets, on démontre que le volume des godets doit être suffisant pour absorber le débit de l'écoulement. Le diamètre de la roue doit être égal ou supérieur à la hauteur de la chute. La vitesse de circonférence de la roue doit être la moitié de celle du fluide en entrant dans la roue. La vitesse du fluide doit être la plus petite possible en entrant dans les godets. La limite du rapport de l'effet utile obtenu à celui de l'eau dépensée est égale à l'unité, soit $\eta = 1$

On introduit la notion moderne de rendement théorique, soit le rapport de l'effet utile obtenu à la force vive dépensée :

$$\eta = \frac{W_m}{E_p} = 1 - \frac{z^2}{2g} - \frac{u^2}{2g}$$

Il en suit que, pour produire tout son effet, il faut que l'eau motrice arrive et agisse sans choc sur la roue, et qu'elle la quitte sans vitesse.

Après avoir évoqué l'idée d'absorber la force vive perdue par une suite de roues verticales à aubes, Moreau conclut sur la supériorité des roues hydrauliques verticales à godets dont le rendement est supérieur à 1 et horizontales à aubes courbes qui profitent de l'effet de la force centrifuge. On compare ensuite ces considérations

théoriques avec les résultats des expériences de John Smeaton et de Charles Bossut. Smeaton, au moyen du dispositif décrit ci-dessous, à partir duquel il réalisa une trentaine d'expériences, démontre qu'en moyenne la vitesse de la roue doit atteindre les $\frac{2}{5}$ de celle de la veine d'eau pour un effet maximal. Bossut trouva le même rapport pour une roue à 48 palettes. A partir de 16 expériences sur les roues à godets, Smeaton conclut par un rendement de $\frac{4}{3}$ lorsqu'il y a peu d'eau et de $\frac{4}{2}$ lorsqu'il y a beaucoup d'eau. La moyenne est de $\frac{3}{2}$. L'effet de la roue à augets est donc doublement supérieur à l'effet d'une roue à aubes droite.

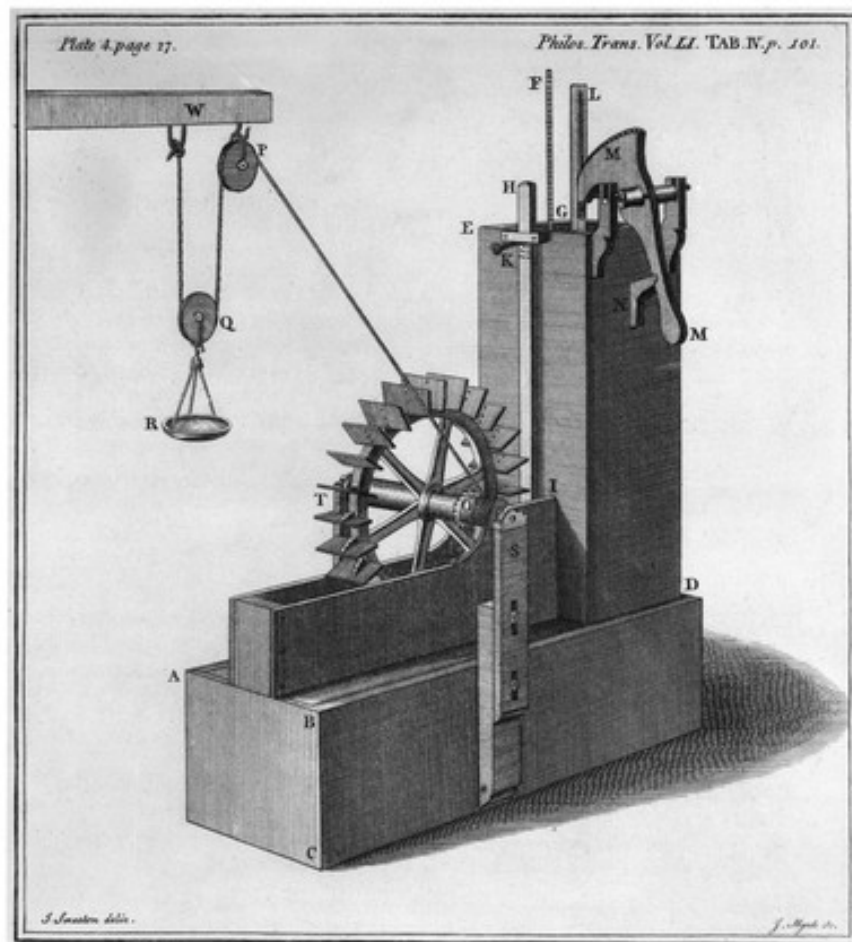


Figure 3-13 : Modèle de roue hydraulique par John Smeaton (1759)

Si la théorie de Borda indique que la vitesse de la circonférence de la roue doit être la plus petite possible, Moreau met en évidence que dans l'exécution il y a une limite fixée par Smeaton à 1 mètre par seconde.

On présente ensuite le dispositif de Poncelet, conçu pour obtenir une entrée d'eau sans choc et une sortie sans vitesse, et annoncée comme donnant le 0,7 de la puissance de l'eau.

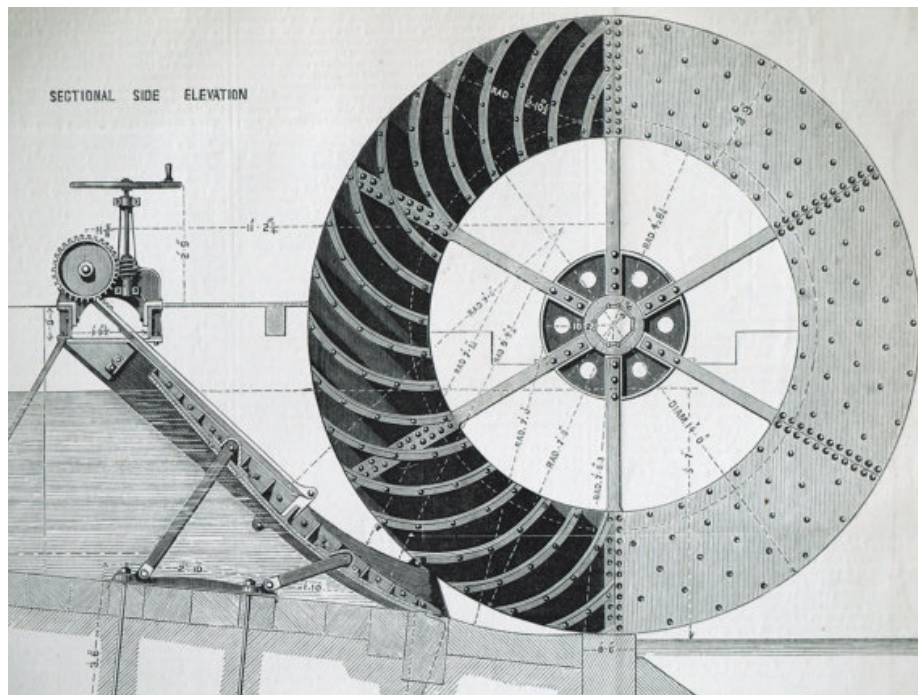


Figure 3-14 : Plan élaboré sur le modèle du dispositif de Poncelet

3.3.1.9 Puissance motrice du feu appliquée à la navigation

La grande nouveauté de la fin du XVIII^e siècle fut l'introduction de la machine à vapeur dans le monde de la navigation et donc dans les considérations des sciences navales. L'usage de la puissance motrice du feu à des fins industrielles remonte à 1712 avec la machine « Thomas Newcomen » qui fut perfectionnée par James Watt en 1769. Mais l'application de la vapeur à la navigation est antérieure à son application dans le transport terrestre. Avant la Révolution, les Français, de Papin à Jouffroy d'Abbans, avaient été des pionniers en la matière. En 1776, Claude de Jouffroy d'Abbans faisait naviguer le *Palmipède*, premier navire à vapeur, sur les eaux du Doubs et annonçait le commencement d'une nouvelle ère. Si la nouvelle technologie reçut ses premières applications en matière de navigation fluviale, c'est en mer que sa supériorité s'avéra, sur le long terme, décisive pour l'avenir du transport maritime. La technologie promettait une indépendance (relative) de la navigation par rapport aux conditions climatiques. La marche des navires ne serait plus contrainte par les caprices du vent.

Il est aujourd'hui bien compris que le perfectionnement des machines à vapeur n'est pas d'ordre principal, mais résulte principalement du développement d'un savoir-faire pratique et d'une maîtrise efficace des matériaux mis en œuvre. Cependant, ce

n'est pas un pur hasard si l'avènement d'une *théorie des machines* et de la *thermodynamique* coïncide historiquement avec le développement des machines à vapeur dans le monde industriel et des transports. Les travaux de Lazare Carnot (1783, 1803) mirent en évidence le fait que le concept de travail mécanique était une quantité physique d'un intérêt économique. Ainsi, dans le but de le conserver, les ingénieurs devaient rendre le mouvement de leurs machines aussi proche que possible de l'idéal d'un mouvement réversible. Cette conception abstraite des systèmes mécaniques inspira la nouvelle génération d'ingénieur-mathématiciens formés à l'Ecole Polytechnique au début du XIX^e. Moreau ne peut donc qu'avoir été imprégné de cette conception.

Moreau débute son cours par un précis historique sur les machines à vapeur. Après un bref exposé des machines à simple, à double effet, à basse et à haute pression, il présente aux élèves l'anatomie principale de la machine de Watt.

Les machines à vapeur de Savery ou de Newcomen posaient le même problème de rendement et de continuité dans le mouvement. Au bout de quelques cycles de fonctionnement les machines s'arrêtaient. Il fallait les arrêter et les remettre en marche. Afin d'améliorer la puissance et la régularité de sa machine à vapeur, James Watt eu l'idée de transformer ces machines à *simple effet* par des machines à *double effet*, faisant ainsi l'usage du phénomène de condensation en y apportant certaines de ses inventions. En 1769, il déposa un brevet pour sa nouvelle machine à vapeur et s'associa à l'industriel Boulton pour la fabriquer à grande échelle.

La machine de Watt est composée d'une chaudière, d'un cylindre à vapeur, d'un régulateur, d'un condenseur externe où se fait l'injection d'eau froide, d'une pompe d'alimentation, d'une pompe d'épuisement, d'un balancier et d'un volant, enfin, d'un manomètre et d'une soupape de sûreté, qui dans les machines à haute pression est chargée d'un poids considérable, rappelle Moreau, Figure 3-15.

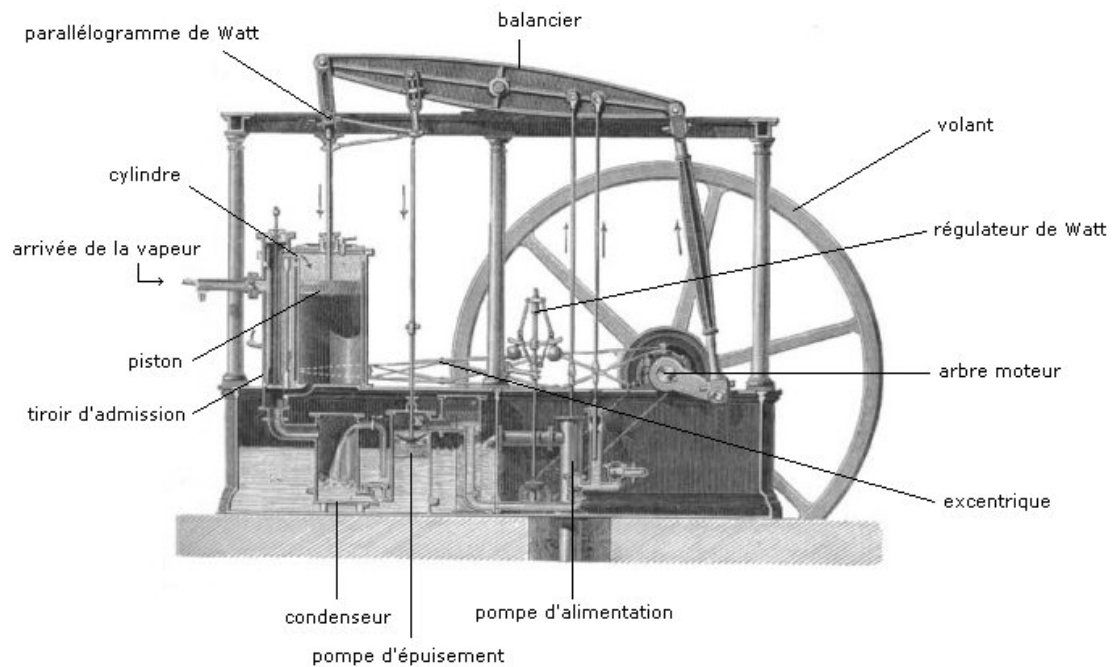


Figure 3-15 : Machine de Watt

Le volant a pour but de réguler la vitesse de fonctionnement de la machine. Si la machine tourne trop vite, le volant se met en rotation plus rapidement et accumule ainsi une partie de l'énergie. Les frottements étant réduits, le volant poursuit son mouvement. Il peut restituer à la machine son énergie cinétique, si sa vitesse de fonctionnement vient à diminuer. Mais, le volant ne suffit pas à réaliser à lui seul une vitesse uniforme de la machine. Il peut même acquérir une vitesse trop élevée si la machine tourne à vide. C'est pour cela que Watt rajouta à sa machine un régulateur.

Le régulateur (Figure 3-16) ou « flyball governor » en anglais, est un dispositif permettant à la machine d'autoréguler sa vitesse de rotation. Cet appareil se compose de deux boules métalliques soutenues par deux tiges articulées autour d'un point fixe O au sommet de l'appareil. Deux autres tiges PM et P'M' reliées aux points P et P' sont fixées au collet en M et M'. Ce collet peut s'élever ou s'abaisser le long de l'axe vertical. Lorsque la machine fonctionne au bon régime, l'écartement des boules permet à la fourchette d'être horizontale. Si la vitesse est trop élevée, les boules s'éloignent de l'axe entraînant le collet vers le haut tandis que la fourchette pivote autour de l'axe A et appuie sur la valve. Si la vitesse de fonctionnement est trop faible, les boules se rapprochent de l'axe, le collet s'abaisse et la fourchette pivote autour de l'axe A et relève la valve. La fourchette est reliée à une valve d'admission de la vapeur provenant de la chaudière, de sorte que lorsque la machine tourne trop vite, la quantité de vapeur diminue et inversement dans le cas contraire.

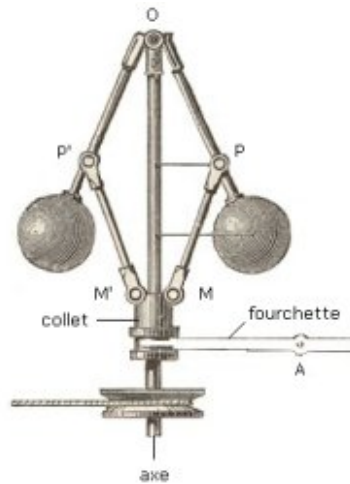


Figure 3-16 : Régulateur de Watt

Le balancier est un dispositif ingénieux qui permet de transformer le mouvement de translation du piston en un mouvement de rotation pour faire tourner par exemple un arbre moteur (Figure 3-17).

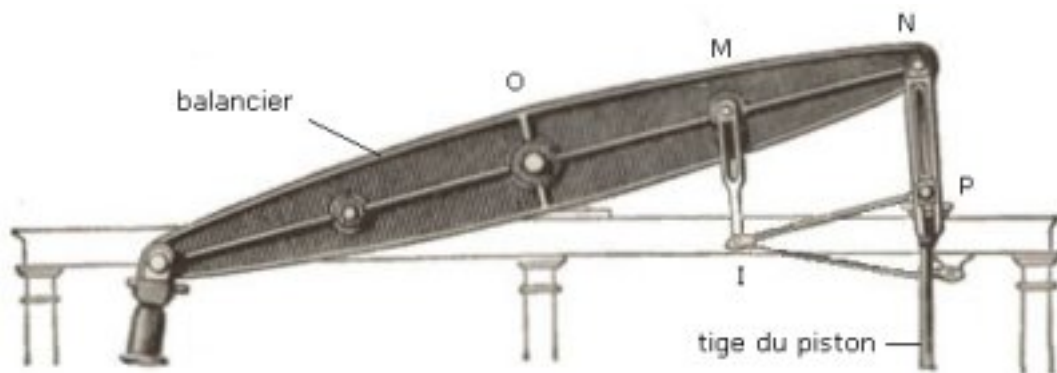


Figure 3-17 : Parallélogramme de Watt

Le balancier tournant autour de l'axe O est lié au parallélogramme MNPI articulé. Lorsque le balancier oscille autour de O, le mouvement de la tige du piston reliée au point P est pratiquement rectiligne. En effet, le dispositif astucieux de Watt consiste en un parallélogramme MNPI dont les quatre côtés sont de longueur constante et qui peut s'articuler autour de ses quatre sommets.

James Watt remarquait que l'eau injectée dans le cylindre pour condenser la vapeur refroidissait considérablement les parois de celui-ci et détériorait le rendement de la machine. Il eut l'idée d'utiliser un condenseur externe. La vapeur arrive par un tuyau latéral et passe dans le cylindre puis est refroidie par injection d'eau froide dans un condenseur placé en-dessous du cylindre. Ce condenseur baigne dans de l'eau froide qui est recyclée quand elle s'est trop réchauffée grâce à une pompe d'épuisement.

L'apport en eau provenant d'un puit ou d'une rivière est assuré par une pompe d'alimentation.

Pour que la vapeur puisse agir de part et d'autre du piston, et, de fait générer un cycle, un excentrique est relié d'un côté à l'arbre moteur et de l'autre à un tiroir d'admission de la vapeur qui est ainsi animé d'un mouvement alternatif (Figure 3-18). La distribution de la vapeur par ce tiroir consiste à faire circuler la vapeur qui vient de la chaudière grâce au mouvement de va-et-vient d'une pièce mobile du tiroir. Pendant que la vapeur, issue de la chaudière est admise d'un côté du piston, de l'autre côté, la vapeur est refoulée vers le condenseur.

1. Le piston commence son mouvement vers le haut, poussé par la vapeur qui arrive par la lumière du bas.
2. Quand le cylindre est complètement rempli, le tiroir qui s'est élevé par l'intermédiaire de l'excentrique, laisse rentrer la vapeur par le haut du cylindre.
3. Le piston redescend et la vapeur est évacuée par la lumière du bas.

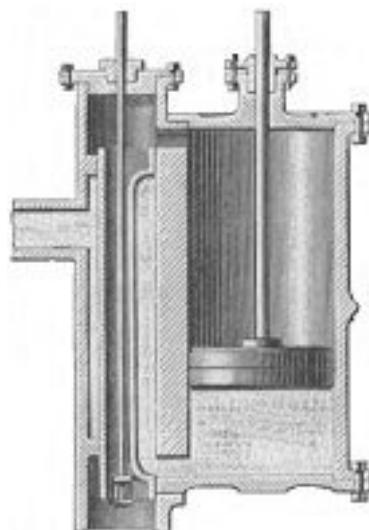


Figure 3-18 : Tiroir de régulation

On fait voir les modifications apportées par Olivier Evans sur le principe de tiroir, dans lequel on a remplacé le mouvement rectiligne alternatif décrit plus tôt par un mouvement circulaire continu.

Après ces considérations anatomiques, vient la théorie. On montre la quantité d'action de la vapeur sur le piston, on présente les lois de Mariotte et Gay Lussac et le principe de détente d'un gaz. On explique l'effet théorique de la machine à basse pression et

diminuée par la raison que le vide n'est jamais parfait dans le condenseur, et qu'on perd de la force pour la pompe à air. On rappelle pourquoi on obtient d'une machine à haute pression 1,5 à 2 fois plus d'effets que sur une machine à basse pression. De plus, le cylindre et la chaudière sont rendus dix fois moindre.

Vient ensuite une discussion sur l'emploi de ces machines à la navigation et notamment sur la façon de les installer sur les navires. Pour cela, les élèves étudient les bateaux américains le *Levingston* et le *Savannach*, mais aussi les bateaux destinés aux ports de France. Il s'agit alors d'appliquer à ces bateaux, les calculs précédemment évoqués. Les élèves évaluent la vitesse que peut prendre un bateau déterminé, étant mu par une machine dont la force est donnée.

La théorie est aussi appliquée aux machines soufflantes employées dans les hauts fourneaux et les forges. Ces machines fournissent l'air de combustion, appelé vent, nécessaire à leur fonctionnement.

La théorie des Machines, introduite au milieu du siècle par Thomson comme la Thermodynamique, est donc un enseignement d'actualité pour les futurs ingénieurs du Génie Maritime. Alors que la majorité de la flotte royale est encore propulsée à la voile, l'emploi de la vapeur à la navigation est une technologie prometteuse qui suscite un vif intérêt dans le monde maritime, et dont les développements font partie intégrante de la formation des futurs ingénieurs.

3.3.1.10 Vers une Théorie générale du Navire ?

Ici s'achève la première partie de notre *Sommaire* dont l'objet fut d'enseigner aux futurs ingénieurs du Corps du Génie Maritime, l'état de l'art d'une théorie générale du navire, objet de tant de développements depuis la fin du XVII^e siècle. Mais peut-on véritablement parler de *théorie générale*, lorsqu'il ne s'agit que d'un exposé, certes critique, de formules mathématiques et de maximes physiques ? Qu'il s'agisse de Propulsion, de Résistance ou de Stabilité, chaque considération théorique est appliquée à un cas pratique qui relève du travail que devront fournir ces ingénieurs dans leur carrière. Cependant, derrière ce premier exposé, qui ne manque pas d'érudition puisqu'on y cite nombre de savants, d'expériences et de données en tout genre, il est difficile de sentir la volonté de dessiner une continuité à travers les différentes problématiques abordées.

Ne l'oublions pas, le travail de l'ingénieur consiste avant tout à concevoir des artifices. Dans cette activité, l'application des sciences a pour objet d'anticiper, de prédire les qualités pressenties de l'artifice à concevoir. Dans le cas du navire, l'estimation du poids d'un navire et de son chargement, permet de déterminer un volume immergé suffisant de manière à obtenir un franc-bord désiré. Le poids et le volume immergé sont alors distribués de sorte que le navire, à l'équilibre, flotte droit et réponde aux exigences de vitesse et de manœuvrabilité. Énoncé ainsi, la tâche semble triviale, mais on l'aura compris, ce procédé relève de la maîtrise d'un système physique complexe, paramétré par un grand nombre de variables interdépendantes. Par exemple, la sélection de la puissance d'un système de propulsion (voile ou moteur) requière la connaissance de la résistance. En revanche, la géométrie de la coque ne peut pas être entièrement déterminée tant que le poids du navire n'est pas bien défini.

Il apparaît alors que la connaissance de principes généraux, ne fait pas un navire. Si les règles de la géométrie, les principes de la mécanique et les maximes de la thermodynamique permettent aux ingénieurs de régler leurs actions, de maîtriser les effets pressentis, d'élucider leurs succès et leurs échecs, d'argumenter leurs choix. La réalisation d'un projet, ne peut être réduite à la seule maîtrise des mathématiques. De quoi s'agit-il exactement ? C'est de méthode dont il est question ici, c'est la raison pour laquelle elle fera l'objet de la seconde partie de ce *Sommaire*.

3.3.2 Construction du navire et pratique du chantier

Comme l'indique une note de bas de page, cette seconde partie, fait l'objet de l'enseignement de la seconde année de l'Ecole Spéciale du Génie Maritime. Elle relève de l'organisation et du suivi d'un projet complet que les élèves auront eu sous leurs yeux. Cependant, Moreau débute cette partie par une digression sur le travail du chanvre, utilisé pour la réalisation des cordages servant à l'armement des navires

3.3.2.1 Travail du chanvre et machines tractoires

Depuis 1661, les cordages des navires de la flotte royale sont confectionnés à Rochefort, dans le Corderie royale que Colbert avait faite construire. Le travail des fibres de chanvre, filées en fil de caret est d'abord présenté aux élèves. Elles forment l'élément premier du cordage. Le commettage est l'action qui consiste à créer le cordage, en enroulant ensemble et sur eux-mêmes 3, parfois 4, brins, dans le sens inverse de l'enroulement de chacun des brins. Le « brin » pouvant être un fil de caret, un toron, une aussière ou un grelin (Figure 3-19).

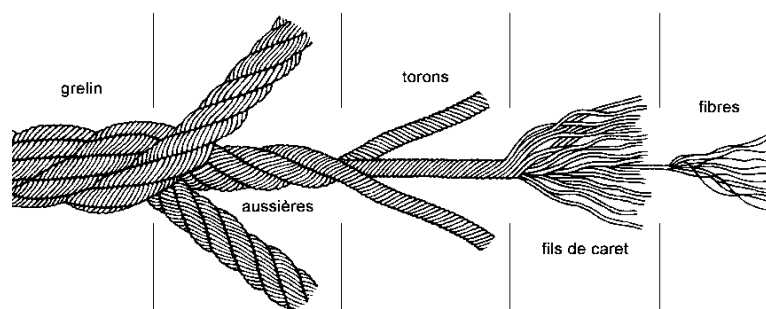
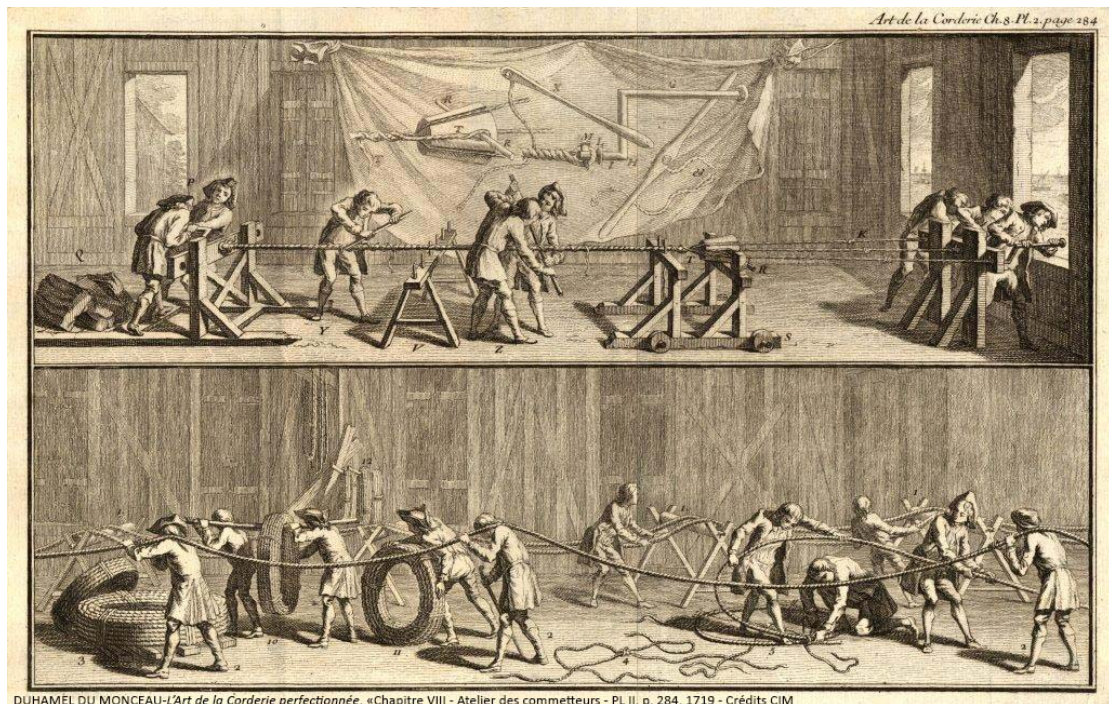


Figure 3-19 : Brins de chanvre

Pour fabriquer tous ces cordages, les cordiers utilisent traditionnellement une machine en bois divisée en deux parties. D'un côté de l'atelier se trouve « le chantier », une machine munie de crochets et de manivelles, et de l'autre se trouve « le carré » équipé également de crochets et de manivelles, reposant sur un tréteau. On place les chevalets et le chariot du toupin entre les deux. Le toupin est un élément essentiel du commettage. Cette pièce de bois va guider la torsion des fils de chanvre (Figure 3-20).



DUHAMEL DU MONCEAU-L'Art de la Corderie perfectionnée, «Chapitre VIII - Atelier des commetteurs - PL II, p. 284, 1719 - Crédits CIM

Figure 3-20 : Duhamel du Monceau - *L'Art de la Corderie perfectionnée*, « Chapitre Sixième-De l'Atelier des commetteurs », p. 284, 1719

Le commettage exige le recours à des machines assurant une torsion puissante : les machines tractoires. On apprend à ce sujet que notre auteur présenta à l'Institut, en décembre 1821, un mémoire intitulé *Théorie des machines tractoires, suivie d'une exposition du cours théorique et pratique de la construction des vaisseaux et des machines usitées dans les ports* dans lequel on fait connaître le fonctionnement de différentes machines tractoires propres à la confection de torons, d'aussières et de grelins. Ces machines consistent en un chariot engrené dans deux crémaillères, une machine à traction établie à l'une des extrémités du local et une machine à commettre.

La théorie mécanique est employée au dimensionnement des machines tractoires. La théorie linéaire de la poutre exposée dans la première partie de ce *Sommaire*, est employée à l'analyse et au réglage du commettage.

Viennent ensuite des considérations sur le travail du bois de construction. On initie les élèves aux machines à percussion, machines de sciage rectiligne alternatif, rotatif. On compare la puissance respective de ces machines avec celle que fourniraient des hommes.

3.3.2.2 Etude d'un projet : de la composition des plans, du tracé en salle, à la pratique des chantiers.

Venons en au cœur de cette seconde partie de notre *Sommaire* : l'étude d'un projet complet d'architecture navale. Depuis la détermination des dimensions principales jusqu'à la mise à l'eau, l'objectif est de présenter aux élèves de l'Ecole Spéciale du Génie Maritime l'ensemble des étapes qui composent le processus de conception d'un vaisseau. On remarquera tout d'abord, que ce projet succède à l'exposé systématique des principes de la Théorie du Navire. Principes sur lesquels, Moreau ne manquera pas de revenir au cours des différentes étapes de conception. A la différence de la partie théorique, cette section adopte une organisation chronologique et forme ainsi une véritable *méthode* de conduite d'un projet. On commence par la détermination des dimensions principales du navire et on dresse les devis. Vient ensuite le tracé des plans, puis le tracé en salle et à l'échelle, à la suite duquel on commence la construction. La construction achevée, le navire est mis à l'eau et l'on s'empresse de mesurer les francs-bords avant de procéder à son armement.

Dimensions principales et devis préliminaires

C'est d'après le nombre des canons de la première batterie qu'on fixe la longueur d'un bâtiment et par conséquent les dimensions principales de la carène, en ayant soin toutefois d'établir la hauteur de batterie au dessus de la flottaison ainsi que nous l'avons dit au commencement, alors on marque le creux au milieu et aux extrémités, et l'élancement de l'étrave. Quand à l'étambot on ne lui donne plus de quête depuis quelques années ; on ne voit pas en effet de raisons valables pour incliner cette pièce en dehors du navire. On calcule ensuite tous les poids qui doivent entrer dans l'armement.

La conception d'un navire de guerre, ou d'une plateforme à canons, nécessite de déterminer les dimensions principales (longueur, largeur, creux et tirant d'eau) à partir de la puissance de feu qu'exige le rang auquel appartiendra le navire. De cette première esquisse, dont l'allure générale n'est pas sans faire l'objet d'une certaine mode, on dresse un devis de poids complet du projet : poids de la mature, agrès et rechanges, artillerie et munitions, eau et vivres (d'après le nombre d'hommes d'équipage pour un temps donné), poids de la coque et du lest. Ce devis, dont le degré de détail ne cessera d'augmenter au cours du projet, est initialement établi à partir des « devis de campagnes et une foule de documens que possèdent les directions des constructions navales ».

Moreau détaille les calculs, qui, suivant le nombre de pièces d'artillerie désirées, donnent la quantité de poudre en barils et la grandeur des soutes à munition, et on détermine, en fonction du nombre d'équipage et de la durée d'une campagne, la grandeur de la cale au vin, de la cale à eau, de la soute au charbon, l'emplacement du magasin général, et les soutes à biscuits.

Tracé des plans

Vient ensuite le tracé des plans que l'on décompose en 16 étapes :

1. Tracé du maître couple et de la quille et de l'étrave et de l'étambot.
2. Tracé des couples.
3. Tracé des lignes d'eau.
4. Tracé des lisses.
5. Tracé du pont principal.
6. Tracé des entreponts et des sabords.
7. Tracé des préceintes¹⁵³ et distribution des virures de bordages.
8. Calcul du déplacement, du centre de flottaison, de la stabilité et correction du tracé pour que le navire déplace suffisamment d'eau pour supporter son chargement.
9. Tracé du mât et de la voilure, calcul du centre de voilure et étude de la stabilité sous voile.
10. Division des sabords et distribution des chaînes de haubans.
11. Distribution des couples renforcés.
12. Distribution des emménagements conformément au règlement du mois d'avril 1825, arrêté par le Roi.
13. Distribution des baux¹⁵⁴ suivant l'emplacement des équipements : archipompe, four, écoutilles, drome, cuisine, cabestan et bittes.
14. Tracé des éléments de poupe.
15. Tracé des éléments de proue.
16. Marquage des soutes et du magasin et du lest.

« Ces conditions principales étant satisfaites on arrête le projet et on fait le devis ».

¹⁵³ Les préceintes sont des ceintures de bordage en chêne plus épais, plus larges et plus épaisses que ceux qui sont employés pour le reste du bordé. Elles sont établies autour du navire dans le sens de la longueur, comme moyen de consolidation et au-dessous de chaque rangée de sabord.

¹⁵⁴ Les baux sont les poutres principales disposées perpendiculairement à l'axe de la quille afin de constituer la base de l'édification des ponts et permet aussi de maintenir la forme des couples et leur écartement. Ils ont du bouge, c'est à dire un renflement sur le milieu afin d'aider à l'écoulement de l'eau, de modérer le recul des canons et de faciliter leur retour aux sabords.

Tracé en salle

Vient ensuite l'étape du tracé en salle, réalisé à l'échelle. Le bâtiment étant plus fin dans ses fonds à l'arrière qu'à l'avant, on le met en chantier avec la poupe placée du côté de l'eau. L'idée ici, étant que cette extrémité ne soit pas trop soulevée dans le lancement, ou qu'elle ne s'appuie que le moins possible sur l'avant cale afin de ne pas fatiguer les liaisons du navire. On procède alors à la construction de l'étrave à l'étambot. Il est rare que la longueur de la salle des gabarits permette de tracer un vaisseau dans son intégralité. L'opération doit par conséquent, être réalisée en deux temps. On commence par la proue, en tracant d'abord le maître, puis l'étrave et la quille que l'on prolonge au delà du milieu du vaisseau, autant que la salle le permet. Vient ensuite le tracé des couples intermédiaires et des lisses.

« Ce travail fait, on peut commencer la construction en même tems qu'on trace la partie de l'arrière ».

Construction

« Lorsque les gabarits de l'étrave, de l'étambot, des couples et des lisses sont achevés, que les planches d'ouvertures sont faites ; que les équerrages des pièces qui entrent dans la structure du vaisseau sont relevés sur des tablettes et que les devis des échantillons et de main-d'œuvre sont approuvés, on rassemble sur le terrain les matériaux nécessaires à la construction. »

On fait connaître aux élèves combien il importe de reconnaître la solidité du terrain qui doit supporter l'édifice, et de sonder le fleuve, ou la mer, dans la direction que le bâtiment doit suivre afin d'être sûr d'avoir assez d'eau. Si le fond est dur, il suffit d'un lit de longrines et un de transversales. S'il ne l'est pas, on établit une cale de 6 mètres de large sur trois murs parallèles d'un mètre d'épaisseur sur lesquels on pose des transversales.

Viennent ensuite des considérations sur l'assemblage de pièces maîtresses de la charpente : quille, étrave étambot, et couples et lisses. Le levage des couples sur la quille. On présente ensuite les lisses qui doivent passer par les points marqués sur les gabarits à la salle et par suite sur les couples. Lorsque la charpente entière est montée, on établit des échafauds à plusieurs étages qui facilitent la mise en place de diverses pièces. Vers le milieu du chantier, on laisse une ouverture pour entrer dans le

bâtiment et y passer toutes les pièces de l'intérieur. On établit aussi une toiture mobile sur le vaisseau qui assure le hors d'eau hors d'aire du bâtiment. Lorsque le bois est séché et qu'on reprend le travail du bâtiment, c'est par l'intérieur qu'il faut commencer. Le détail et la mise en œuvre de chaque pièces du navire sont alors rigoureusement décrits. Moreau établit un véritable modèle virtuel qui puisse servir de référence aux élèves.

Mise à l'eau

Le vaisseau étant construit sur le bord de mer, et placé de manière que dans les hautes marées l'eau ne vienne qu'à l'extrémité de la quille, au dessous du talon de l'étambot, il s'agit de le lancer à l'eau. La mise à flot est réalisée par glissement sur sa cale de construction avant de rejoindre une avant-cale puis l'eau. Le plus souvent, les navires sont lancés longitudinalement, mais parfois ils peuvent l'être transversalement. Le lancement longitudinal s'effectue de façon à ce que la partie arrière de la coque pénètre la première dans l'eau. Au moment où le navire commence à flotter, il pivote sur le tournant de l'étrave, ou brion, renforcé spécialement à cet effet.

Pendant sa construction sur la cale, le navire repose sur des empilages de bois appelés tins, ses flancs étant soutenus par des arcs-boutants, les accores. En vue du lancement, on construit sous la coque une charpente en bois qui en épouse les formes inférieures, le ber ou berceau, reposant sur une ou plusieurs coulisses graissées qui constituent un chemin de glissement. Coulisses et berceau sont substitués, par tronçons successifs, aux tins supérieurs, le berceau étant relié au navire et les coulisses aux tins inférieurs.

Pour le lancement longitudinal, deux coulisses sont le plus souvent utilisées, mais l'opération peut aussi s'effectuer sur une seule coulisse et exceptionnellement sur trois. S'il n'y a qu'une seule coulisse, le lancement est dit « sur savate », en raison du nom donné à la poutre longitudinale fixée sous la quille et à laquelle se réduit le berceau. Afin d'éviter le déversement accidentel du bâtiment au cours de l'opération, on fixe également sous la coque, de chaque côté, des ventrières en bois et, à quelques centimètres au-dessous de celles-ci, des couettes mortes reliées à des tins latéraux. Avec le procédé sur double coulisse, le berceau se compose de deux pièces longitudinales, les couettes vives, fixées sous le navire et reposant sur les deux coulisses, ou couettes mortes, fixées aux tins inférieurs. Aux extrémités, là où les formes du navire se relèvent, on interpose souvent des massifs verticaux, les

colombiers, entre les couettes vives et la coque afin de soutenir les parties en porte-à-faux de celle-ci.

La pente de la cale de lancement et le coefficient de frottement des coulisses sont calculés pour que le navire se mette à glisser sous l'effet de son propre poids. Divers moyens sont utilisés pour retenir le navire avant le lancement : tôles ou filins reliés au berceau et à la cale, que l'on coupe pour amorcer le lancement, arcs-boutants obliques ou clefs intercalés entre les coulisses et le berceau et que l'on fait sauter le moment venu, ou encore linguets à échappement maintenus au moyen de presses hydrauliques. Ces diverses retenues peuvent être employées simultanément sur des unités importantes. Si, après la suppression des retenues, le navire ne part pas, il suffit généralement d'exercer une légère poussée au moyen de béliers pour que s'amorce le glissement.

D'autre-part, il est presque toujours nécessaire de freiner le navire afin de limiter sa course dans l'eau. À cet effet, on utilise généralement de gros câbles de retenue fixés à une extrémité au navire et reliés en outre à celui-ci, sur une partie de leur longueur, par des bosses cassantes, câbles moins résistants calculés et disposés pour se rompre successivement pendant le lancement, ce qui permet d'absorber une partie de l'énergie cinétique du bâtiment. L'autre extrémité des câbles de retenue est reliée à des paquets de chaînes ou à des traîneaux qui, entraînés par les câbles, concourent au freinage du navire par leur frottement sur le sol. On peut encore freiner le navire au moyen d'un masque disposé transversalement à l'arrière.

Toutes les circonstances du mouvement du vaisseau sur la cale sont déterminées par la théorie du mouvement d'un corps sur un plan incliné. En ayant égard au frottement, à l'adhésion et à la résistance de l'eau, on détermine la grandeur des obstacles qui pourraient anéantir le mouvement en divers point de la cale ; on compare leurs effets sur les gros et les petits bâtiments. On expose les précautions qu'il faut prendre en plus pour lancer les bâtiments dans les ports de Méditerranée et que n'exigent point les ports de l'Océan qui ont de grandes marées.

Pesée

Le bâtiment étant à l'eau, on relève de suite les tirants d'eau et la hauteur de batterie, tribord et bâbord, que l'on compare aux échelles de solidité établies au moment du tracé et on met aussitôt du lest dans la cale.

Devis financier

On fait déterminer aux élèves le prix qu'on doit allouer à chaque pièce, d'après le nombre de journées de travail, et aussi les prix des pièces confectionnées d'après les matières employées.

4 CONCLUSION

4.1 Système de connaissances théoriques et savoir-faire pratique : *l'ingénium* au service d'une administration réglée ou les prémisses d'une économie de l'innovation ?

Quels enseignements peut-on tirer de ce *Sommaire* au regard des questions posées dans ce mémoire? L'érudition technique et la variété des sujets traités dans ce cours imposent de réduire nos considérations à quelques points essentiels. Commençons par quelques remarques générales.

Nous l'avons déjà dit, et l'analyse de ce *Sommaire* ne fait que supporter ce propos, ce cours, adressé à de futurs ingénieurs, dresse un tableau général et synthétique de l'état de l'art du Génie Maritime au début du XIX^e siècle. Mais qu'est-ce que le Génie Maritime ? Si l'architecture navale demeure une discipline centrale dans l'enseignement de ce corps d'Etat, il semble qu'il ne s'agisse pas que de cela. Au regard des digressions et des exposés qui dépassent le cadre de la Théorie du Navire, et la conduite du projet, il semblerait plutôt que l'on projette d'enseigner, avant tout, une culture des sciences appliquées aux techniques du monde maritime. On ne se contente pas d'élucider, lorsqu'ils sont élucidables, les problèmes associés à la conception de la « machine navire », mais, chaque mécanisme, chaque équipement et chaque installation nécessaire à la construction, à l'armement, à la mise à l'eau, à la confection de cordage, à la découpe du bois, à la fonte de l'acier, est étudié dans ses derniers développements techniques et à la lumière des sciences physiques. Si bien, qu'à l'instar de la machine navire, c'est l'ensemble du chantier qui est mis en système, et parfois même ses ouvriers.

Quant à la distinction entre théorie et pratique, qui structure ce *Sommaire* et peut-être l'esprit des ingénieurs, elle ne semble plus si nette dès lors que l'on parcourt ce cours dans son contenu. La première section de ce cours, qui est présentée par Moreau comme théorique, est illustrée par de nombreux résultats d'expériences, applications pratiques et par des maximes générales. Symétriquement, la seconde section de ce cours, introduite par Moreau comme pratique, fait référence à de nombreux calculs et à des dimensionnements divers de mécanismes et pièces mis en œuvre lors de la construction. Elle semble également relever davantage d'une théorie de la méthode

que d'un exposé objectif des pratiques du chantier. Nous reviendrons sur ce dernier point plus tard. Reste que dans la forme et l'intention, Moreau choisit d'opérer cette distinction : les principes de la science du navire sont introduits avant que soit étudié le travail véritable de l'ingénieur, la composition du projet. Ce choix de priorité est d'ailleurs une caractéristique que l'on retrouve aujourd'hui encore dans les écoles d'ingénieur, dans lesquelles sont privilégiées, pendant plusieurs années consécutives, l'apprentissage des mathématiques et de la physique au détriment du savoir-faire pratique, de la maîtrise technique et de l'esprit de synthèse qu'exige un projet de conception. Cet apprentissage est rendu possible lors des premières expériences professionnelles. En 1827, la formation des élèves de l'Ecole Spéciale du Génie Maritime est à l'image de la structure de ce *Sommaire* : après deux années de formation théorique à l'Ecole Polytechnique, où il reçoivent une instruction soutenue en sciences physiques mais surtout en mathématiques (analyse et géométrie)¹⁵⁵, ils ont à leur charge, la réalisation d'un navire.

Ce projet, de la composition des plans, au lancement du navire est virtuellement décrit par l'auteur : chaque tracé, chaque pièce, chaque assemblage, chaque étape du projet, fait l'objet d'un récit minutieux et réglé. S'il ne s'agit que d'un *Sommaire*, dont l'objet est de présenter dans ses grandes lignes ce qui sera sujet à des digressions et des approfondissements ; la forme et le style employés par Moreau pour décrire le projet navire, de l'esquisse à l'armement, s'apparente à une symphonie dont l'ingénieur est le chef d'orchestre. C'est dans un ordre prédéterminé que l'on trace le maître, puis la quille, que l'on détermine le déplacement avant d'évaluer la stabilité, que l'on ordonne l'assemblage de certaines pièces... La moindre perturbation, le moindre écart est anticipé. C'est peut-être en cela que réside toute la solidité de l'entreprise de standardisation des plans et d'administration des pratiques développées depuis plus d'un siècle déjà par la Marine royale, et qui illustre les prémisses d'une organisation industrielle.

Mais alors, quel rôle pour la Théorie du Navire dans une recette éprouvée qui, en apparence, ne présente aucune faille ? Que pouvons-nous véritablement attendre des principes que l'on prend tout de même soin de présenter dans toute une section du

¹⁵⁵ Bruno Belhoste, Amy Dahan Dalmedico et Antoine Picon, *La formation polytechnicienne, 1794-1994* (Paris: Dunod, 1994).

cours, lorsque leur mise en œuvre ne semble pas nécessaire à la réussite d'un projet ? Certes, les calculs de déplacements et de stabilité semblent relever d'une pratique courante chez les ingénieurs de cette époque. S'ils guident le tracé des formes et confortent le concepteur dans les choix qu'il opère, bien souvent, ils confirment ce que l'expérience ou le sens commun faisaient déjà connaître. Pire, dans une industrie normalisée et standardisée, ces calculs ne sont que des points de passage, de simples formalités. Qu'en est-il alors des espérances des premiers géomètres de la science du navire ? Souvenons-nous, il s'agissait de *connaître ce que la mer veut*, de découvrir les formes véritables, la meilleure disposition, de réduire un ensemble de pratiques tâtonneuses à un dessin optimal. Ces projets ambitieux n'ont pu être réalisés tant ils reposent sur les principes d'une science encore immature. A la lumière de ce cours, nous pouvons d'ailleurs procéder à un bilan.

La Théorie du Navire

A partir du tracé des plans fixés par le règlement, l'ingénieur est en mesure de calculer chaque surface, chaque volume, chaque centre. Ces premières mesures rapportées aux devis qu'il aura pris le soin de dresser, permettent d'évaluer les conditions d'équilibre du navire. Vient alors le dessin de la voilure qui, rapporté au devis, permet de procéder à l'étude de la stabilité sous voiles, si l'on parvient à évaluer correctement les efforts qu'elles développent. Quant à la détermination de la vitesse et du cap d'un navire évoluant dans un vent donné, s'il existe des pistes de résolution, la question reste encore ouverte puisqu'il est impossible de prédire la résistance de sa carène. En pratique, on se contente donc d'appliquer des règles de proportion à des navires que l'on sait avoir fait leurs preuves. La résolution des questions de la tenue à la mer et de la manœuvrabilité semble en partie bien entamée. Cependant, sans une théorie cohérente de la résistance, la résolution ne peut être que partielle et l'absence de connaissance précise des conditions de mer qu'un navire pourra rencontrer, rend toute conclusion vaine. Pour ce qui est de la résistance locale et globale de la charpente, il semble que la théorie linéaire des poutres fournisse un outil efficace pour le dimensionnement de certaines pièces et parfois de certains assemblages. Encore faut-il avoir accès à leur chargement. L'emploi de la puissance motrice du feu à la navigation est, sans aucun doute, un sujet d'actualité dans ce cours. Au même moment, la Marine royale met à l'épreuve, dans les principaux ports

de France, des navires à vapeur. Les ingénieurs, au moyen des principes de la Thermodynamique, ont pour ambition de prédire la puissance de ces nouvelles machines et leur consommation. Mais encore une fois, sans accès à la résistance d'un navire, il est impossible de déterminer analytiquement leur vitesse et consommation réelles. Enfin, on remarquera que, ni l'usage de l'hélice comme mode de propulsion, ni l'emploi de l'acier comme matériau de construction, ne sont évoqués dans ce *Sommaire*. La roue à aubes ainsi que le bois restent des références techniques dans un enseignement conservateur.

La science de l'ingénieur

Ces considérations nous mènent à la question centrale que pose ce *Sommaire* et dont la réponse détermine l'élaboration de la Science de l'ingénieur. Comment s'efforce-t-on d'articuler l'ordre de la discipline enseignée à celui de la conception du projet ? Deux démarches conspirent à formaliser le projet, celle de la science et de son exposé systématique, qui définit la *nécessité*, et celle de la conception et de sa méthode, qui détermine le *meilleur possible*. Il faut donc les concilier pour ainsi tenter de faire coïncider la synthèse des savoir-faire avec l'application de principe. Prendre position sur les rapports de la théorie à la pratique revient à constituer une doctrine de l'art. Dans son contenu, ce *Sommaire* nous en dit trop peu à ce sujet et nous force ainsi à conjecturer. Cependant, dans sa forme, il semble limpide que ce qui occupe les considérations diverses de ce cours est bien l'articulation entre les principes de la science moderne et les savoir-faire d'un art millénaire.

A quelle fin ? S'agit-il de découvrir le véritable ? Le meilleur possible ? D'élucider les conditions de l'échec ou la réussite de certaines pratiques ? Ou est-il question de rhétorique ? La fin est déterminée par les moyens. Les moyens sont les principes d'une science toujours en développement. Lorsque cela est possible, on met au point des outils pour évaluer les avantages donnés par certaines configurations. Le calcul du quotient de résistance d'étrave et la détermination du point vélique fournissent de bons exemples. Si ces outils font l'usage, parfois à outrance, des mathématiques, encore faut-il qu'ils ne contredisent pas les principes de la physique. Si bien que sans base solide, on se contente de maximes générales qui procurent aux ingénieurs une bibliothèque d'outils rhétoriques pour trancher les débats d'opinions.

Sur cette question de l'articulation entre science et projet, principe et méthode, le diagramme d'Evans¹⁵⁶, établi en 1969 (Figure 4-1), fournit un exemple intéressant de paradigme de conception d'un navire. Sur la spirale figure chaque problématique qui doit être résolue au cours du processus de conception. La résolution de ces problématiques implique l'usage des principes de la Théorie du Navire. Le procédé est itératif, chaque tâche est résolue de manière séquentielle. A chaque itération, l'objectif est de résoudre les conflits apparents jusqu'à atteindre la convergence : c'est-à-dire le projet qui pourra être envoyé en construction.

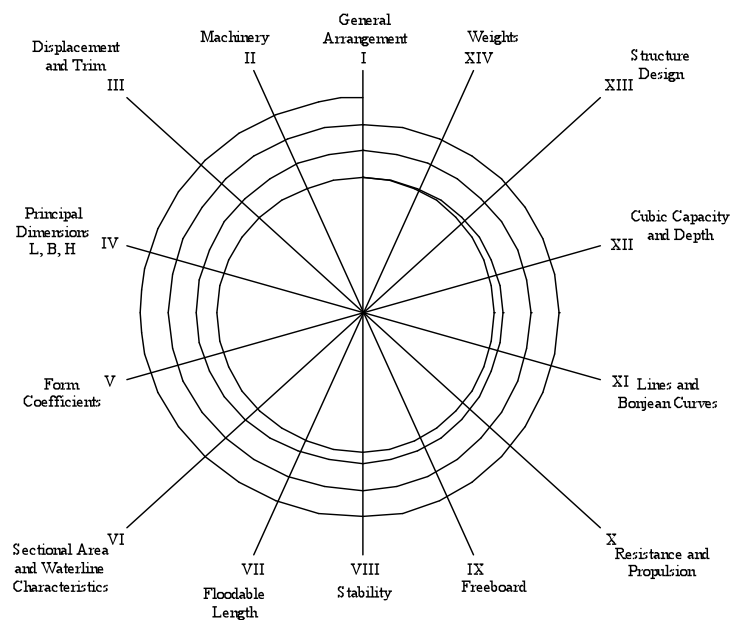


Figure 4-1 : Boucle Navire : Diagramme Général d'Evans

Dans cette perspective moderne (qui d'ailleurs connaît de nombreux modèles alternatifs), les différents modèles fictifs du navire, déterminés par la théorie, doivent coïncider avec la réalité d'un projet. On ne manquera pas de remarquer une certaine similitude avec la méthode de tracé sur plan présentée par Moreau dans ce *Sommaire*.

¹⁵⁶ Evans, J. Harvey, 1959, "Basic Design Concepts," *Naval Engineers Journal*, Vol. 21, Nov

Le rôle et la fonction de l'ingénieur moderne

Que peut-on en déduire du rôle et de la fonction des ingénieurs du Génie Maritime en ce début de XIX^e siècle ? S'agit-il d'administrer la réalisation de projets déterminés par un système étatique tout puissant ? Ou bien d'inventer de nouveaux procédés, de faire progresser des outils et des techniques au moyen de leur science ? La réponse n'est pas évidente. Une certaine tension apparaît au cours de l'exposé de ce cours. L'intention de fournir aux élèves les principes fondamentaux nécessaires à la compréhension et à la maîtrise des artifices qu'ils concevront et manipuleront, et des procédés qu'il superviseront, s'oppose à la volonté de placer les ingénieurs dans les chantiers comme représentants de l'autorité de l'Etat, et de faire appliquer les tenants d'un système réglé depuis plusieurs décennies déjà.

Dans cette perspective, l'idée défendue par Antoine Picon selon laquelle, s'organise au début du XIX^e siècle, le développement d'une nouvelle « rationalité technique » substituée à la description de l'objet technique (qui caractérisait le XVIII^e siècle), est à nuancer. Cette idée convient à une époque plus tardive pour le Génie Maritime.¹⁵⁷ En effet, si l'application des principes de la Mécanique et des lois de la Thermodynamique au commettage, au sciage, à la fonte de l'acier et à la propulsion des navires, suggère la possible industrialisation de procédés traditionnels et alimente une dynamique d'innovation dans le monde de la construction navale, la conception et la conduite du projet navire, reste un processus réglé par les rouages d'une administration encore puissante. L'idée du modèle général forme encore le cadre conceptuel dans lequel l'architecture navale doit progresser.

¹⁵⁷ Antoine Picon, *L'invention de l'ingénieur moderne: l'Ecole des Ponts et chaussées, 1447-1851* (Paris: Presse de l'Ecole nationale des Ponts et chaussées, 1992).

Pouvons-nous en conclure qu'autour du mythe d'un modèle général destiné aux vaisseaux de guerre, s'est établi un « paradigme » de construction, formant le cadre des développements de l'architecture navale ? Comme l'avance Hélène Vérin dans son essai¹⁵⁸, les hagiographes de Borda rappellent que l'idée d'un tel programme lui vint au cours d'une campagne en mer entre 1778 et 1779, sous le commandement du Comte d'Estaing¹⁵⁹. Au début du XIX^e siècle, Lacroix écrit que Borda « ressentit vivement que les évolutions d'une armée navale ne peuvent réussir qu'autant qu'une parfaite similitude des formes et des gréements donnent à tous les vaisseaux une égale facilité et une égale promptitude à exécuter les mouvements prescrits par le général ». Lacroix prétendait alors que les modèles retenus par Borda y réussissaient parce-que les vaisseaux étaient construits « selon des échelles uniformément proportionnelles ».

Or, en réalité, tout contredit l'idée d'un modèle général. Tout d'abord, l'histoire. Lorsqu'en 1786, Borda voulu déterminer le modèle de cent dix-huit canons, il demanda à six ingénieurs-constructeurs d'y concourir. Et puisque chacun des plans paraissait avoir des avantages particuliers, aucun ne pouvait être adopté à l'exclusion des autres. Il fallait donc espérer fondre ensemble ce qu'il y avait de meilleur dans chaque plan et faire exécuter celui qui résulterait ainsi de tous les plans présentés. D'autre part, l'idéal aurait été de n'avoir que des vaisseaux de même rang et construits sur un même plan. Or, une escadre devait développer une diversité dans la puissance de feu. On s'en tint donc à réduire le nombre de rang à trois. Et on conçut en 1787, le modèle du quatre-vingt canons sur les proportions du cent dix-huit. Cependant, il n'y eut pas non plus un seul modèle général pour les trois rangs de vaisseaux, c'eût été contraire aux prescriptions de la Théorie du Navire. Si le vieux rêve d'une proportion identique est posé comme principe, il est aussitôt remis en cause par des considérations physiques. On modifia donc les proportions du cent dix-huit canons. Sa largeur étant plus considérable, il a « par conséquent à refouler une

¹⁵⁸ Hélène Vérin, *La gloire des ingénieurs, L'intelligence technique du XVII^e au XVIII^e siècle* (Paris: Albin Michel, 1993), pp. 366-369.

¹⁵⁹ S.F La Croix, *Eloge historique de Borda*, s.d. Cf. aussi le Discours du vice-amiral Pâris du 24 mai 1891. Ces discours se trouvent dans le dossier Borda, des archives de l'Académie des sciences.

colonne de fluide plus grosse à proportion », on a dû « remplacer ce désavantage en les allongeant un peu plus que les autres vaisseaux ».¹⁶⁰

D'ailleurs, Bouguer avait déjà mis en garde les constructeurs imbus de la fausse idée que « les parties des vaisseaux de différentes grandeurs (devaient suivre) exactement les même proportions »¹⁶¹.

Verin conclut :

L'histoire du classement et de la normalisation des vaisseaux ne peut être lue comme celle de la découverte d'un modèle idéal, qui eût été prédisposé dans les pratiques confuses et tâtonneuses des constructeurs. (...) L'image d'un long cheminement, durant un siècle, en quête de l'hypothétique modèle général de chaque genre d'artifice, n'a pas seulement de quoi séduire les esprits platoniques. Sa force convaincante repose sur sa confusion avec une autre image : celle-ci résulte elle-même de l'assimilation entre la science enfin appliquée à un ordre économique, et réglée par ses impératifs, et l'application de la science à la recherche de nouveaux avantages. Ce qui donne un sens à toutes ces confusions est un vague et totalisateur principe de progrès.¹⁶²

Qu'a-t-il fallu attendre pour mettre fin à ces confusions et abandonner l'idée de modèle général comme ultime horizon du principe de progrès ? Cette question pourrait faire l'objet de travaux futurs. Mais que l'on impose l'idée d'un modèle général, ou que l'on laisse libre cours à la créativité des ingénieurs, n'est pas tant ce sur quoi il s'agit de conclure. Ce qu'il faut retenir ici, c'est que la brèche entre deux ordres de l'activité humaine, la science et l'art, devenait béante et que la recherche du chaînon manquant entre la théorie et la pratique, hantait les hommes de ce temps. Relisant la correspondance de Turgot et de Condorcet, les articles de Vial du Clairbois, les livres de Duhamel du Monceau, ceux de Roland de la Platière... Verin nous éclaire encore une fois par son analyse :

Ce lieu qui toujours se déplace lorsqu'on veut le tenir, Michaud d'Arcon l'annonce comme le domaine que la théorie doit délivrer : celui de multiples choix possibles ; Condorcet veut une chaîne ininterrompue des savoirs, où Coulomb voit l'indéfinie carrière d'une science à déterminer ; Duhamel fait de cet insaisissable le principe d'enseignement des élèves-ingénieurs, en leur infusant le doute ; Roland de La Platière et Vial persuadent : cette place où l'on ne s'était jamais avisé de mettre personne, on y a mis les ingénieurs, les inspecteurs aussi. Pour l'occuper, il leur faut de la vertu. Une vertu qui tient à ce qu'ils ne sont pas situés seulement au point de rencontre de la théorie savante et de la pratique tâtonneuse, des rigueurs déductives et des synthèses constructives, des opérations techniques et des tâches manœuvrières, mais aussi parce qu'ils sont au carrefour d'intérêts contraires et qu'il faut faire convenir à tout prix.¹⁶³

¹⁶⁰ A.N Mar D1 4 f° 70

¹⁶¹ P. Bouguer, *Traité du navire...*, op.cit., préface, p. xxxvi

¹⁶² Hélène Vérin, *La gloire des ingénieurs, L'intelligence technique du XVIe au XVIIIe siècle* (Paris: Albin Michel, 1993), p. 368.

¹⁶³ Hélène Vérin, *La gloire des ingénieurs, L'intelligence technique du XVIe au XVIIIe siècle* (Paris: Albin Michel, 1993), p. 403.

Voilà, en quelque sorte, la condition de l'ingénieur moderne dans un monde où se représente et se renouvelle, sans cesse, le « théâtre des machines » et où les discours et les débats se cristallisent en une véritable technologie.

On citera enfin, les mots d'Auguste Comte, lui-même polytechnicien, qui est certainement le premier à traiter théoriquement du statut de l'ingénieur dans le Cours de philosophie positive au début de la leçon 2 (1830). Son approche est d'un grand intérêt :

Au degré de développement déjà atteint par notre intelligence, ce n'est pas immédiatement que les sciences s'appliquent aux arts, du moins dans les cas les plus parfaits. Il existe entre ces deux ordres d'idées un ordre moyen, qui, encore mal déterminé dans son caractère philosophique, est déjà plus sensible quand on considère la classe sociale qui s'en occupe spécialement. Entre les savants proprement dits et les directeurs effectifs des travaux productifs, il commence à se former de nos jours une classe intermédiaire, celle des ingénieurs, dont la destination spéciale est d'organiser les relations de la théorie et de la pratique. Sans avoir aucunement en vue le progrès des connaissances scientifiques, elle les considère dans leur état présent pour en déduire les applications industrielles dont elles sont susceptibles. Telle est du moins la tendance naturelle des choses, quoiqu'il y ait encore à cet égard beaucoup de confusion. Le corps de doctrine propre à cette classe nouvelle, et qui doit constituer les véritables théories directes des différents arts, pourrait sans doute donner lieu à des considérations philosophiques d'un grand intérêt et d'une importance réelle. Mais un travail qui les embrasserait conjointement avec celles fondées sur les sciences proprement dites, serait aujourd'hui tout à fait prématuré; car ces doctrines intermédiaires entre la théorie pure et la pratique directe ne sont points encore formées; il n'en existe jusqu'ici que quelques éléments imparfaits, relatifs aux sciences et aux arts les plus avancés, et qui permettent seulement de concevoir la nature et la possibilité de semblables travaux pour l'ensemble des opérations humaines. C'est ainsi, pour en citer l'exemple le plus important, qu'on doit envisager la belle conception de Monge, relativement à la géométrie descriptive, qui n'est réellement autre chose qu'une théorie générale des arts de construction. J'aurai soin d'indiquer successivement le petit nombre d'idées analogues déjà formées et d'en faire apprécier l'importance, à mesure que le développement naturel de ce cours les présentera. Mais il est clair que des conceptions jusqu'à présent aussi incomplètes ne doivent point entrer, comme partie essentielle, dans un cours de philosophie positive qui ne doit comprendre, autant que possible, que des doctrines ayant un caractère fixe et nettement déterminé.

Le style de Comte est connu comme difficile mais sa pensée est aussi précise qu'articulée. Comte remarque la réalité sociale de l'ingénieur, puisqu'il désigne une nouvelle classe sociale située entre celle des savants et celle des directeurs de production. D'un point de vue théorique, ce dernier fait une distinction tripartite entre d'une part, les sciences théoriques dont le but est la connaissance, d'autre part, les arts (au sens des arts et métiers) dont le but est la production, et enfin, une science intermédiaire consistant à appliquer les sciences théoriques à la production. C'est cette science intermédiaire qui est la science de l'ingénieur. Comte explique que les arts mettent chaque fois en jeu plusieurs sciences mais qu'en l'attente de l'élaboration de ces sciences au complet, il ne peut y avoir de science de l'ingénieur.

Ces remarques mettent en évidence la valeur du cours projeté par Moreau (qui, notons-le, est contemporain de Comte) et nous permettent de proposer une conclusion. La science de l'ingénieur maritime est encore en système. A travers la synthèse des savoirs, la promotion d'une culture technique et l'application des sciences aux arts, un mouvement vers l'unité semble suggérer que l'idée de progrès théoriques de l'architecture navale, qui fit couler tant d'encre et fut à l'origine de tant de débats, soit un horizon atteignable. L'histoire du navire et de ses développements depuis le début du XIX^e en est la preuve par les faits et ne doit pas cesser de nous émerveiller.

4.2 La gloire des ingénieurs ?

A la lumière de ces travaux, reprenons notre récit de l'ingénieur là où nous l'avons laissé.

4.2.1 L'ingénieur de la Révolution industrielle

Avec le développement de l'industrie au XIX^e siècle, apparaît un nouveau type d'ingénieur. Issus de l'administration, anciens élèves de l'Ecole Polytechnique, ou ingénieurs civils démissionnaires formés à l'Ecole des Ponts et Chaussée, des Mines et des Arts et Métiers, certains autodidactes, ils défendent la liberté d'entreprendre et d'innover. Opposés au contrôle administratif, ils constituent un nouveau groupe social qui défend un modèle économique soutenu par des capitalistes industriels. Leur démarche consiste à promouvoir l'application des savoirs théoriques aux problèmes industriels. La création de l'Ecole Centrale en 1829, de l'Ecole de Physique et de Chimie Industrielle de la Ville de Paris en 1882, de l'Ecole Supérieur d'Electricité en 1894, témoigne de cette dynamique. Le prestige social de l'ingénieur est alors considérable. Au cœur de l'entreprise, l'ingénieur est détenteur des savoirs techniques, acteur de l'innovation, organisateur du travail, intermédiaire entre les ouvriers et les patrons.¹⁶⁴ Dans la continuité des Lumières, il incarne le progrès et son travail s'inscrit dans une ambition positiviste dont le projet est de concilier les différents aspects de l'activité humaine. La science est « réduite à son véritable office, pour construire la base objective de la sagesse humaine, afin de fournir un indispensable fondement à l'art et à l'industrie », annonce Auguste Comte, père du positivisme.¹⁶⁵ L'ingénieur de la révolution industrielle, à la base du fonctionnement des entreprises et dont le prestige social est inégalé, détient alors la responsabilité du personnel et de la formation des ouvriers. Les doctrines du catholicisme social et de l'organisation scientifique du travail sont employées de manière complémentaire pour associer progrès technique et vie de l'entreprise. Mais les événements qui marquent le XX^e siècle vont modifier les représentations que l'on se fait alors de la technique dans la société et par conséquent le rôle social de l'ingénieur.

¹⁶⁴ Denis Lemaître, «Le métier d'ingénieur: Héritage et Devenir,» Formation Humaine et Sociale, ENSTA BRETAGNE (2010), p. 7.

¹⁶⁵ Auguste Comte, *Discours sur l'ensemble du positivisme* (Paris: GF Flammarion, 1998).

4.2.2 L'ingénieur cadre-technicien

La première Guerre Mondiale et la crise de 1929 contribuent à changer sensiblement le prestige de l'ingénieur et sa position dans l'entreprise, la société et l'imaginaire collectif.¹⁶⁶ D'une part, l'entreprise de reconstruction d'après guerre génère une forte demande d'ingénieurs, d'autre part, en 1929, les ingénieurs sont touchés par le chômage. Si bien qu'à ce moment précis, le souci de protéger le titre d'ingénieur conduit à la création d'une loi sur son statut en France, en 1934. Cette loi ne définit ni ne protège vraiment le titre d'ingénieur mais elle régleme la délivrance des diplômes et le titre d'ingénieur diplômé. La Commission des Titres d'Ingénieurs, qui réunit les représentants des écoles, des entreprises et des ingénieurs, est habilitée à délivrer le label de formation d'ingénieur aux écoles et, plus tard, aux universités.¹⁶⁷ Ce modèle fonctionne toujours aujourd'hui, en France.

Le développement des grandes entreprises a pour effet de limiter le champ d'intervention de l'ingénieur, par la spécialisation des tâches et le développement de la hiérarchisation.¹⁶⁸ L'ingénieur cadre-technicien, qui se distingue par son expertise dans un domaine, est substitué à la figure traditionnelle de l'ingénieur au commandement social de la production. Mais l'institutionnalisation de l'innovation au sein de l'entreprise participe au fait que l'ingénieur retrouve un nouvel espace de création au sein d'un « processus collectif de recherche organisée ».¹⁶⁹ En lien avec la recherche, soumis aux exigences et aux impératifs d'une société fondée sur un modèle capitaliste, l'ingénieur voit cependant cette part de créativité limitée à son domaine d'expertise technique. Successivement, la formation des ingénieurs se démocratise et l'oriente vers la spécialisation technique. On s'éloigne du modèle classique de la grande école fondée sur un enseignement fondamental et généraliste et développant un esprit de corps.

¹⁶⁶ Denis Lemaître, «Le métier d'ingénieur: Héritage et Devenir,» Formation Humaine et Sociale, ENSTA BRETAGNE (2010), p. 9.

¹⁶⁷ Ibid, p. 9.

¹⁶⁸ Ibid, p. 10.

¹⁶⁹ Henri Lasserre, *Le pouvoir de l'ingénieur* (Paris: La Découverte, 1997).

4.2.3 L'ingénieur aujourd'hui

Le modèle de l'ingénieur technicien semble avoir évolué aujourd'hui. La multiplication des technologies, la rationalisation de tous les aspects de la vie de l'entreprise ainsi que les mutations technico-économiques de la société contemporaine semblent avoir poussé l'ingénieur vers une diversification de ses domaines de compétences et lui avoir donné de nouvelles responsabilités humaines et sociales. Puisqu'il est appelé à intervenir dans la gestion de la production, l'organisation du travail, la relation au client, l'utilisation de biens et de services, la maîtrise technique, il n'est plus limité à la simple expertise technique et il retrouve un rôle social plus important.

Depuis le XVIII^e siècle, la classification donnée par *l'Encyclopédie* n'a pas été ménagée. Si, depuis la fin du XVI^e siècle, l'ingénieur avait perdu un certain nombre de domaines d'intervention comme l'architecture, il en avait conquis d'autres avec l'invention de nouveaux matériaux, la découverte de nouvelles formes d'énergies telles que l'électricité et le nucléaire. Aujourd'hui, il semble développer de nouveaux métiers : le champ d'exercice de *l'ingenium* s'est étendu à l'aéronautique, l'aérospatial, l'écologie, l'environnement, l'agroalimentaire, les télécommunications et le commerce, et même la gestion. En fin de compte, il est difficile de donner une définition précise de l'ingénieur. Qui a-t-il de commun entre l'artiste sculpteur, architecte de la Renaissance et l'ingénieur informaticien de notre époque ?

Ensemble de savoir-faire, somme d'habileté et d'imagination, le métier d'ingénieur entre peu à peu dans les institutions. Son rôle social se construit historiquement jusqu'à devenir aujourd'hui une profession définie de manière formelle par un diplôme et un statut de cadre. L'ingénieur contemporain synthétise les positions sociales et les compétences développées au cours de l'histoire.¹⁷⁰ Comme à la Renaissance, il doit être créatif. Comme à l'âge classique en France, il doit savoir administrer. Comme l'ingénieur de la Révolution Industrielle, il doit savoir mettre en œuvre des applications. Comme l'ingénieur technicien du XX^e siècle, il doit faire preuve d'expertise théorique dans un domaine donné.

¹⁷⁰ Denis Lemaître, «Le métier d'ingénieur: Héritage et Devenir,» Formation Humaine et Sociale, ENSTA BRETAGNE (2010), p. 12.

Pour tirer un portrait au-delà de la diversité, pour retrouver une identité commune, il s'agit de repérer ce que projettent les ingénieurs sur les objets qu'ils inventent et manipulent, qui nourrissent nos sociétés et dont nous abusons sans remord. Simples navires ou « forteresses flottantes », « châteaux ailés », machines volantes, automobiles, phonographes, téléphones, ordinateurs, armes et engins de toutes sortes... Parmi ces objets, certains fascinent et excitent l'imaginaire, certains laissent indifférents, d'autres effraient. A partir de ces objets et du génie de leurs créateurs, s'est forgé à travers l'histoire un ingénieur mythique : architecte de la cité des temps jadis, artiste-inventeur de la Renaissance, ou bien bâtisseur de la société industrielle au XIX^e siècle dont Jules Verne dépeint les exploits dans son œuvre (Figure 4-2). Mais au-delà de cette vision mythique et positiviste, l'ingénieur, pivot de la société moderne, est aussi son antihéros. Il projette sur les esprits une image ambivalente à l'instar de l'innovation qu'on attend de lui.

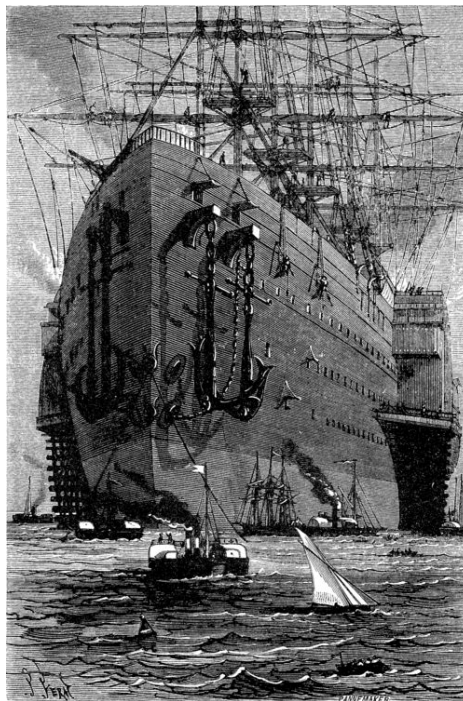


Figure 4-2 : Jules Verne, *Une Ville flottante* (1869), dessins par Jules Férat.

L'innovation, aujourd'hui, en période de crise, est promue comme un ressort économique mais ce mot fait l'objet d'une polysémie et agit dans les discours comme une injonction paradoxale : l'innovation doit promettre des révolutions tout en assurant, à l'avance, que ces révolutions ne seront pas à l'origine de risques pour la

société.¹⁷¹ L'idéologie contemporaine de l'innovation semble être écartelée entre la conception *conservatrice* de Francis Bacon et la conception *libérale* de Schumpeter. Bacon introduit pour la première fois le terme en 1625 dans un contexte scientifique et technique et promeut une innovation incrémentale comme le moyen de corriger l'action d'un temps corrupteur.¹⁷² Dans l'économie politique de Schumpeter l'innovation de rupture offre au système capitaliste la capacité de se renouveler en provoquant un phénomène de *destruction créatrice* de valeur.¹⁷³

L'ingénieur moderne hérite de la responsabilité de cette double injonction. Innover mais, à la fois, prévoir. Reprenons l'analyse d'Hélène Vérin :

Depuis qu'ils existent, nous dit l'auteur, les ingénieurs sont appelés à intervenir dans tous les cas où la nécessité d'un contrôle financier, politique, se combine avec l'obligation d'inventer des solutions techniques particulières, sinon inédites, voire d'innover. Assurer un contrôle rigoureux et, en même temps, innover, paraît contradictoire ; tout comme analyser les raisons de la réussite et réussir au mieux dans l'urgence ; tout comme concevoir un artifice qui n'existe pas ou, encore prévoir l'imprévisible. C'est pourtant l'exigence simultanée de ces contraires qui modèle la fonction impartie aux ingénieurs. Très tôt, il est entendu qu'ils doivent faciliter les décisions en opérant des choix justifiés selon un double impératif : anticiper et optimiser. Ceci à l'aide des mathématiques.¹⁷⁴

Les sciences de l'ingénieur « qui prennent en compte dans leurs évaluations la diversité, la contrariété des avantages recherchés, se tiennent dans un lieu qui n'est pas celui du vrai, mais celui du meilleur possible, définissent le domaine dans lequel la technique moderne est apparue ». ¹⁷⁵ C'est donc une *histoire de la technologie*, distincte, mais pas indépendante pour le moins, d'une *histoire des sciences* qu'il s'agit de reconstruire et dans laquelle il faut inscrire nos ingénieurs. Rendre compte des « conditions concrètes dans lesquelles une nouvelle conception de l'art, de la technique, s'est mise en place, s'est réalisée, c'est-à-dire est devenue une réalité sociale, politique, économique ; aussi une réalité épistémologique, ayant remanié l'ordre des savoirs ; et, enfin philosophique, toute technologie, tous discours sur les

¹⁷¹ Voir Etienne Klein, *de quoi l'innovation est elle le nom*, dans La Conversation scientifique, une émission diffusée sur France Culture le 3 octobre 2015

¹⁷² Francis Bacon, *Essais de morale et de politique* (1625).

¹⁷³ Joseph Schumpeter, *Théorie du développement économique* (1911).

¹⁷⁴ Hélène Vérin, *La gloire des ingénieurs, L'intelligence technique du XVIe au XVIIIe siècle* (Paris: Albin Michel, 1993), p. 10.

¹⁷⁵ Ibid, p. 10.

techniques définissant certains rapports entre l'accomplissement de l'homme et l'accomplissement de la connaissance ».¹⁷⁶

Puisqu'il se trouve à l'interface entre ces deux mondes, la réflexion sur le rôle de l'ingénieur, invite à questionner les rapports qu'entretiennent, l'activité technique et l'activité scientifique. Une opinion courante veut que le progrès des techniques n'ait été que la conséquence de celui des sciences. Or Verin nous rappelle que :

la perfection de l'activité technique est recherchée dans l'ordre du particulier (...), la perfection scientifique est dans la capacité de tenir sous des principes universels - valable toujours et partout – la diversité, tant naturelle qu'artificielle. C'est à dire qu'entre universel et singulier, général et particulier, abstrait et concret, la science et la technique ne procèdent pas selon les mêmes cheminements.¹⁷⁷

Une histoire des techniques ne peut donc être réalisée sur le même modèle qu'une histoire des sciences. Au cours du XVIII^e siècle, on assimila les arts à une application des sciences qui lèguent leurs principes et leurs concepts, élaborés dans des vues de connaissance. Mais « les démonstrations des traités et les recettes des manuels délaissent la question de l'invention, de la quête de l'idée, au profit d'une grande attention aux avantages que procurent les mathématiques et ses instruments. On se contente donc généralement du principe qui veut que toutes les choses artificielles sont avec cela naturelles et obéissent aux lois universelles d'une nature qui ne fait rien en vain. Reste que toutes les lois de la physique ne font pas une horloge, mais l'horloger qui opère les choix entre des dispositifs possibles pour parvenir à son but : construire une machine qui mesure le temps avec exactitude ».¹⁷⁸

Le propre de l'ingénieur depuis le mécanicien grec de l'Antiquité, est de mettre en rapport des formes, des matières, des forces, des figures, des grandeurs hétérogènes, en vue de produire des effets pressentis. Le langage choisi à cet effet est celui des mathématiques. Cette analyse pose donc les bases d'une réflexion sur l'utilité des mathématiques dans ce qui forme aujourd'hui le système des *sciences de l'ingénieur*. Le principe selon lequel les mathématiques peuvent guider l'ingénieur à abstraire les problèmes de la confusion d'une situation réelle et particulière semble avoir inspiré les géomètres et les physiciens du XVII^e siècle.

¹⁷⁶ Ibid, p. 10.

¹⁷⁷ Ibid, p. 11.

¹⁷⁸ Ibid, p. 12.

Ce qui importe alors aux ingénieurs, dans le meilleur de leur œuvre, ce n'est pas tant de maîtriser la nature - encore que, dans leur enthousiasme, ils en énoncent parfois l'espérance – que de multiplier leurs inventions, de maîtriser leurs actions dans la nature, d'élucider leur succès et leurs échecs. Régler la puissance de l'esprit humain (son *ingenium*) à l'aide des mathématiques, pour obtenir des « effets pressentis » et répondre aux « espérances conçues », c'est à quoi s'applique l'ingénieur du début du XVII^e siècle.¹⁷⁹

L'objectif essentiel de toute étude à caractère historique est de procurer aux discours actuels des éléments de réflexion. Ce mémoire et les recherches qui l'accompagnent sont donc l'occasion d'évaluer quelle distance sépare nos discours actuels sur la science, la technique, l'innovation et le progrès, des considérations et des projets d'une société industrielle naissante. *A quelle distance sommes-nous des Lumières ?*¹⁸⁰ Nous qui nous nous plaisons à penser être les héritiers de leur *Esprit*. L'heure est au bilan. Puisque la fonction de l'ingénieur moderne s'établit dans les projets d'une société dont nous constatons aujourd'hui certains échecs¹⁸¹, il est de notre devoir de revisiter les conditions de l'établissement de cette profession afin de mettre en évidence les contrariétés, les faiblesses et les allotélies¹⁸² du programme dans lequel elle fut enchâssée et d'en tirer des enseignements pour l'avenir.

Au-delà des compétences techniques, du savoir et de l'expérience, de la maîtrise du langage de la nature¹⁸³, il s'agit de rendre compte des conditions véritables de l'expression de l'*ingenium*. Intelligence, habileté, inventivité. « Il faut, écrivait Cicéron, un *ingenium* puissant pour détacher son esprit des sens et sa pensée de l'habitude »¹⁸⁴. Le français, dont le vocabulaire est riche en dérivé, ne possède pourtant pas d'équivalent du mot latin. Si bien que c'est peut être le mot *esprit* qui s'en rapproche le plus ainsi qu'on le retrouve dans la définition qu'en donne Voltaire dans l'*Encyclopédie* :

¹⁷⁹ Ibid, p. 17.

¹⁸⁰ La formule correspond à l'intitulé de la leçon de clôture du Forum France Culture : « L'année vue par les sciences », donnée par Etienne Klein le 18 février 2015.

¹⁸¹ Entré dans l'Anthropocène, départ des têtes pensantes, relativisme des valeurs, déclin de la curiosité intellectuelle ... la liste est longue et mériterait une attention particulière dans une étude plus approfondie sur le sujet.

¹⁸² Situation dans laquelle le but atteint est différent de celui qui était prévu

¹⁸³ les mathématiques

¹⁸⁴ Cicéron, *Tusculanes*, I, 16, 38

Ce mot, en tant qu'il signifie une qualité de l'âme, est un de ces termes vagues, auxquels tous ceux qui les prononcent attachent presque toujours des sens différents. Il exprime autre chose que jugement, génie, goût, talent, pénétration, étendue, grâce, finesse ; et il doit tenir de tous ces mérites : on pourrait le définir, raison ingénieuse.¹⁸⁵

Depuis toujours, encore plus aujourd'hui peut-être, l'ingénieur au cours d'un projet se retrouve confronté à des publics variés face auxquels il doit adapter son discours en fonction des intérêts et des connaissances de son interlocuteur. Si l'ingénieur, aux carrefours de l'ordre des idées et de l'ordre de la matière met en œuvre une intelligence technique au service d'intérêts divergents ; celui de l'utilisateur qui espère fiabilité et performance, celui de l'investisseur qui exige économie et rentabilité et souvent celui du public, lequel exige transparence et sécurité ; au-delà de la distinction pascalienne entre l'*esprit de finesse* et *esprit de géométrie*, c'est vers l'*esprit critique* promu par nos Lumières qu'il faut nous retourner. Il me semble alors que donner à voir et à revivre, à de futurs ingénieurs, les conditions dans lesquelles un système de connaissances scientifiques, une culture technique, une démarche, se sont construits historiquement, avec des détours, des renoncements et des révolutions, est le moyen le plus efficace qui soit pour, d'une part, effleurer l'idée même du génie et d'autre part, juger la pertinence des projets dans lesquels ils seront impliqués pour la société qu'ils bâtissent.

¹⁸⁵ d'Alembert et Diderot, *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers* (1780).

4.2.4 Ingénieur et *post-modernité*

La figure de l'ingénieur est liée à la modernité qui marque la rupture avec les sociétés traditionnelles. La nature n'est plus un environnement magique ou sacré mais un objet exploré par la science et manipulé par la technique.¹⁸⁶ Jusqu'au XIX^e siècle, l'ingénieur incarne le progrès et l'idée selon laquelle, la science et la technique, en affranchissant l'homme de la nature, en l'émancipant de ses croyances peuvent conduire vers le bonheur de l'humanité.

Cependant, à partir de la fin de XIX^e siècle, cette idéologie du progrès perd de son prestige dans la société. Comme le montre les romans de Dickens en Angleterre, Zola et Hugo en France, le progrès technique entraîne la déstabilisation de la société et le développement d'une classe ouvrière misérable. Lors de la première guerre mondiale, les progrès techniques sont mis au service de la destruction de masse. La suite du XX^e siècle n'apportera que des désillusions : le totalitarisme, nazi ou communiste, est fondé sur une organisation de la société autour du progrès des sciences. La mise au point de la bombe atomique fournit à l'humanité la capacité de la mener à sa propre perte. Le progrès technique et l'idéologie de l'innovation, tout en continuant à nous affranchir de la nature, apportent de nouvelles inquiétudes. La science physique et les mathématiques se sont coupées de la philosophie. Alors que le progrès s'emballe, les grands idéaux de société s'amenuisent.

Cette situation a convaincu certains auteurs à parler de *post-modernité* pour caractériser notre époque. Dans un sombre portrait, l'individualisme, l'hédonisme, le relativisme des valeurs, la recherche de l'efficacité, la valorisation de l'économie comme modèle d'organisation de la société et de régulation de nos échanges sont les caractéristiques de cette époque.¹⁸⁷ Cette situation interroge sur le rôle actuel de l'ingénieur. Sensé apporter le progrès social en même temps que les avancées techniques, il se trouve aujourd'hui instrumentalisé, perdu dans la société, sommé de

¹⁸⁶ Denis Lemaître, «Le métier d'ingénieur: Héritage et Devenir,» Formation Humaine et Sociale, ENSTA BRETAGNE (2010), p. 13.

¹⁸⁷ Denis Lemaître, «Le métier d'ingénieur: Héritage et Devenir,» Formation Humaine et Sociale, ENSTA BRETAGNE (2010), p. 14.

ne plus s'occuper du bien de la collectivité au profit de la réussite technique et économique de son entreprise.

Ces considérations appellent un certain nombre de questions à la fois pratiques et éthiques : Quel rôle jouer ? Celui de simple technicien ou faut-il garder une autonomie morale dans l'entreprise ? Comment ? Comment concilier les aspirations personnelles avec les impératifs de l'entreprise ? Quelles représentations faut-il se faire du progrès, des sciences et des techniques ? Voilà un ensemble d'interrogations qui devraient faire l'objet d'une réflexion critique, non seulement par nos ingénieurs, dans les écoles et les entreprises, mais aussi dans l'ensemble de notre société.

Bibliographie

Archimède. *The Works of Archimedes*. Édité par T.L Heath. Traduit par T.L Heath. Mineola, N.Y.: Dover Publ., 2002.

Bacon, Francis. *Essais de morale et de politique*. 1625.

—. *Novum Organum or true directions concerning the interpretation of nature*. Traduit par traduction et notes par M. Malherbe et J.-M. Pousseur Introduction. 1620.

Barker, Richard. «Fragments from the Pepysian Library.» *Revista de Universidade de Coimbra*, 1985: 161-178.

Belhoste, Bruno. *La Formation d'une technocratie. L'Ecole polytechnique et ses élèves de la Révolution au Second Empire*. Paris: Belin, 2003.

Belhoste, Bruno, Amy Dahan Dalmedico, et Antoine Picon. *La formation polytechnicienne, 1794-1994*. Paris: Dunod, 1994.

Boudriot, Jean. «Formation et savoir des constructeurs royaux.» Édité par Erès. *Technologie/Idéologie/Pratiques XIII*, n° 1 (1998).

Bouguer, Pierre. *Traité du navire, de sa construction et de ses mouvements*. Paris, 1746.

Brioist, Jean-Jacques. «L'ingénierie cartésienne de Renau d'Élissagaray.» *Documents pour l'histoire des techniques*. Vol. 16. Édité par <http://dht.revues.org/818>. 2e semestre 2008.

Chapman, Fredrik Henrik af,. *Traité de la construction des vaisseaux. Avec des éclaircissements & démonstrations touchant l'ouvrage intitulé: Architectura Navalis Mercatoria, & C. Traduit du suédois, publié avec quelques notes et additions*. Traduit par Honoré Sébastien Vial de Clairbois. Brest et Paris: Malassis, 1781.

Comte, Auguste. *Discours sur l'ensemble du positivisme*. Paris: GF Flammarion, 1998.

d'Alembert, et Diderot. *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*. 1780.

Darrigol, Olivier. *Worlds of Flow, A history of hydrodynamics from Bernoulli to Prandtl*. Oxford: Oxford university press, 2005.

Dassié, Charles. *L'Architecture navale*. 1677/1695/1994.

de Missiessy-Quiès, Edouard-Thomas. *Arrimage des vaisseaux*. Paris, 1789.

Deane, Antony. *Deanes Doctrine of Naval Architecture*. 1670/1981.

Deanes, Anthony. *Deane's Doctrine of Naval Architecture 1670*. Édité par Brian Lavery. London: Conway Maritime Press, 1981.

Dhombres, Jean. «La course en mer ou l'intégrale de la vitesse? Les ambitions de la Scientia navalis des Lumières.» Dans *Le Calcul des longitudes. Un enjeu pour les mathématiques, l'astronomie, la mesure du temps et la navigation*, de Vincent Jullien, 235-262. Rennes: Presses de l'Université de Rennes, 2002.

du Monceau, Henri-Louis Duhamel. *Elemens de l'architecture navale ou traité pratique de la constrcution des vaisseaux*. Paris, 1752.

Euler, Leonhard. *Scientia Navalis*. 1749.

—. *Théorie complète de la constrcution et de la manoeuvre des vaisseaux, mise à la portée de ceux qui s'appliquent à la navigation*. 1773.

Ferreiro, Larrie. *Ships and Science: The Birth of Naval Architecture in the Scientific Revolution 1600-1800*. MIT Press, 2007.

Fincham, John. *A History of Naval Architecture*,. London, 1851/1979.

Forfait, Pierre Alexandre Laurence. *Traité élémentaire de la mature des vaisseaux, à l'usage des élèves de la marine*. Paris , 1788.

Fournier, George. *Hydrographie*. 1643/1667/1973.

Furttenbach, Joseph. *Architectura Navalis*. 1629/1975.

Galilei, Galileo. *Il Saggiatore (l'Essayeur)*. Édité par les Belles Lettres. Traduit par Christiane Chauviré. Rome, 1623.

Gille, Bertrand. *Les ingénieurs de la Renaissance*. S15 vols. Paris: Hermann Points Sciences, 1964.

Guilbaud, Alexandre. « À propos des relations entre savoirs théoriques et pratiques dans l'Encyclopédie : le cas du problème de la résistance des fluides et de ses

applications », [En ligne], mis en ligne le URL : . Consulté le 05 avril 2016.» *Recherches sur Diderot et sur l'Encyclopédie, numéro 47 Diderot et les spectacles*. 09 octobre 2012. <http://rde.revues.org/4948> (accès le avril 05, 2016).

Hall, Alfred Rupert. «Architectura Navalis.» *lecture read at Science Museum before the Newcomen Society*. London: Newcomen Society, 1979. 157-174.

Hoste, Paul. *Théorie de la construction des vaisseaux*. Lyon: Anisson & Posuel, 1697.

Juan y Santacilia, Jorge. *Examen maritime, théorique et pratique*. Traduit par Pierre Lévêque. 2 vols. Nante: Malassis & Despillly, 1771.

—. *Examen maritimo*. Madrid, 1771.

Klein, Étienne. *L'Unité de la Physique*,. Presse Universitaire de France,, 2000.

Kuhn, Thomas. *The structure of scientific revolutions*. Chicago: University of Chicago, 1962, 1970.

la Roerie, Guilleux. *Introduction à une histoire du navire*,. Vol. 11e année. 2 vols. Annales. Economie, Société et Civilisation, 1956.

Lasserre, Henri. *Le pouvoir de l'ingénieur*. Paris: La Découverte, 1997.

—. *Le pouvoir de l'ingénieur*. Paris: La Découverte, 1997.

Lemaître, Denis. «Le métier d'ingénieur: Héritage et Devenir.» Formation Humaine et Sociale, ENSTA BRETAGNE, 2010.

Llinares, Sylviane. «La science navale au XVIIIe siècle.» *Les Mardis de la Recherche*. Édité par Université Bretagne Sud. Lorient, 2015.

McGee, David. «From Craftsmanship to Draftsmanship: Naval Architecture and the Three Traditions of Early Modern Design.» *Technology and Culture*, April 1999: 209-236.

Montucla, Jean Etienne. *Histoire des mathématiques*. Vol. book 4. 1802/1968.

Moreau, Philipe-Jacques. *Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement des corps dans deux milieux résistants*. Brest, 1830.

—. *Sommaire du Cours de l'Ecole Spéciale du Génie Maritime*. Brest, 1827.

- Newton, Isaac. *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Berkeley: University of California Press, 1999. Traduit par I. Bernard Cohen and Anne Whitman. Londre, 1687.
- Nowaki, Horst. *Developments in fluid mechanics theory and ship design before Trafagar*. Technical University of Berlin, 2005.
- Paul Gisserot, René Théry, Ernest Madon et al.,. *Bi-centenaire du génie maritime, 1765-1965*. 1965.
- Picon, Antoine. *L'invention de l'ingénieur moderne: l'Ecole des Ponts et chaussées, 1447-1851*. Paris: Presse de l'Ecole nationale des Ponts et chaussées, 1992.
- Pollard et Dudebout. *Architecture navale : Théorie du navire*. 1890.
- Reech, Ferdinand. *Mémoire sur les machines à vapeur et leur application à la navigation présenté à l'Académie Royale des sciences*. Paris, 1844.
- Reith, Eric. «Concevoir et construire les navires: De la trière aux picoteux.» Édité par Eres. *Technologie/Idéologie/Pratiques XIII*, n° 1 (1998).
- Renau d'Elizagaray, Bernard. *De la Théorie de la manoeuvre des vaisseaux*. Paris: Michallet, 1689.
- Romme, Charles Nicolas. *L'Art de la marine*. Paris, 1787.
- Schaffer, Simon. *Fish and Ships: Models in the Age of Reason*. Vol. ch. 4, chez *Models: The Third Dimension*., de Soraya de Chadarevian and Nick Hop, 71-108. Stanford, CA: Stanford University Press, 2004.
- . «Modèles normatifs et architecture navale dans un Etat militaro-fiscal.» *Réseaux, La fabrication des normes*, 195-225.
- Schumpeter, Joseph. *Théorie du développement économique*. 1911.
- Steel, David. *The Elements and Practice of Naval Architecture*. London, 1806.
- Sutherland, William. *The Ship-builder's Assistant: or some Essays Towards Compleating the Art of Marine Architecture*. London: Bell and Smith, 1711.
- Vérin, Hélène. *La gloire des ingénieurs, L'intelligence technique du XVIIe au XVIIIe siècle*. Paris: Albin Michel, 1993.

Vial du Clairbois, Honoré. *Traité élémentaire de la construction des batimens de mer, à l'usage des élèves du Génie Maritime, & propre aux Marins, Armateurs*. Paris, 1805.

Vial du Clairbois, Honoré-Sébastien. *Encyclopédie Méthodique: Marine*. Vol. I. Paris: Panckouke, 1783-1787.

—. *Traité élémentaire de la construction des vaisseaux, à l'usage des élèves de la marine*. Paris, 1787.

Wright, Thomas. *Ship Hydrodynamics 1710-1830*. University of Manchester Institute of Science and Thechnology, 1983.

Zilsel, Edgar. *The sociological roots of sciences*. Vol. 47. 4 vols. American Journal of Sociology, 1942 .