Documents pour l’histoire des techniques
Nouvelle série

16 | 2e semestre 2008
Les sources de l'Histoire des Mines : Nouveaux outils, Nouvelles approches

L’ingénierie cartésienne de Renau d’Élissagaray

Renau d’Elissagaray’s Cartesian geometry

Jean-Jacques Brioist

Édition électronique
URL : http://journals.openedition.org/dht/818
ISSN : 1775-4194

Éditeur :
Centre d'histoire des techniques et de l'environnement du Cnam (CDHTE-Cnam), Société des élèves du CDHTE-Cnam

Édition imprimée
Date de publication : 1 décembre 2008
Pagination : 169-186
ISBN : 978-2-95-30779-2-6
ISSN : 0417-8726

Référence électronique
Jean-Jacques Brioist, « L’ingénierie cartésienne de Renau d’Élissagaray », *Documents pour l’histoire des techniques* [En ligne], 16 | 2e semestre 2008, mis en ligne le 06 octobre 2010, consulté le 30 avril 2019. URL : http://journals.openedition.org/dht/818

L'ingénierie cartésienne de Renau d'Élissagaray

Jean-Jacques Brioist
Service de la Navigation du Nord

Résumé
Le *Mémoire sur la construction des vaisseaux* jette un éclairage particulier sur la façon dont un ingénieur du XVIIe siècle pouvait concevoir les rapports entre la philosophie naturelle et les arts de la construction. Renau d'Élissagaray se propose d'appréhender l'interaction entre l'air et les voiles d'un navire, puis entre la coque du navire et l'eau, avec ses connaissances de la science du mouvement et des machines : les termes utilisés, ainsi que le principe de physique sur lequel s'appuie toute la démarche, renvoient sans ambiguïté aux écrits de Descartes, et plus particulièrement aux premiers chapitres de la *Dioptrique*. En outre, en plusieurs passages, Renau insiste sur la nécessité de connaître la géométrie ; mais c'est d'une géométrie qui traite des courbes décrites par certains instruments-machines dont il s'agit, et là encore, les conceptions cartésiennes président au raisonnement. Ainsi il apparaît que la pensée de Descartes, souvent critiquée pour ses aspects spéculatifs et ses raisonnements analogiques, a su inspirer une réforme technique aux enjeux considérables.

Résumés et mots clés en anglais sont regroupés en fin de volume, accompagnés des mots clés français

Pour les auteurs de la *scientia navalis* [1] du XVIIIe siècle [2], Renau d'Élissagaray est, dans l'ordre chronologique, le premier à rapporter les principes de conception des navires à des considérations géométriques. Toutefois leur hommage est nuancé ; l'ingénieur de Louis XIV ayant manqué de clarté dans l'exposé de ses principes, il aurait par là-même, comme l'écrit l'ingénieur Bellin dans l'*Encyclopédie*, compromis le développement ultérieur d'une science appliquée de la construction[3]. Pour autant, si pendant plusieurs décennies la pertinence technique des conclusions du *Mémoire sur la construction des vaisseaux* et sa valeur scientifique furent âprement discutées, la méthode géométrique de Renau pour former les façons de carène offrit la seule alternative aux méthodes artisanales. Il faut bien dire qu'après l'échec du père Hoste (1700), le discrédit jeté sur les démarches trop théoriques n'encouragea guère la recherche dans ce domaine. L'argumentation scientifique de Renau n'apparaît cependant pas comme l'apport essentiel

1 Le terme de *scientia navalis* reprend le titre d'un traité d'Euler (1747), consacré spécifiquement au jaugeage et à ses applications, tant à la stabilité qu'aux oscillations principales d'un navire (tangage, roulis). Jean Dhombres (*La course en mer ou l'intégrale de vitesse*, pp. 235-262, in *Le calcul des Longitudes*, Presses universitaires de Rennes, 2002) propose de regrouper sous ce terme les écrits suscités par l'irruption massive du calcul différentiel et intégral, vers le milieu du XVIIIe siècle, dans les considérations de marine (hydrographie, architecture navale, manœuvre, repérage en mer), par opposition à une technique reposant sur des mathématiques plus traditionnelles (« euclidiennes »).

2 Notamment Pierre Bouguer, *Traité du navire, de sa construction et de ses mouvements* (1746) ; André-François Boureau-Deslandes, « Lettre ... sur la construction des vaisseaux », *Journal de Trévoux* (1747) ; J.-N. Bellin, article « Manœuvre » dans Denis Diderot, Jean le Rond d'Alembert, *Encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers* (1752-1761) ; Henri-Louis Duhamel du Monceau, *Eléments de l'architecture navale* (1758).

3 J.-N. Bellin, art. « Manœuvre », *op. cit* : « M. Huyghens attaqua ces principes & forma des objections, qui furent repoussées avec force par le chevalier Renau ; mais ce dernier s'étant trompé dans les principes, on reconnut l'erreur, & les marins savans virent avec douleur tomber par ce moyen une théorie qu'ils se préparoient de réduire en pratique ».

de son Mémoire. Ses lecteurs, hommes de l'art, officiers ou investisseurs le regardent plutôt comme la démonstration qu'une construction planifiée et standardisée des navires, avec ses outils propres, est possible, contre l'avis des charpentiers[4]. L'intervention de la géométrie et de la physique dans l'architecture navale, qui paraît si évidente aujourd'hui, ne s'imposait-elle donc pas jusqu'alors ? N'a-t-elle fonctionné que comme un prétexte, un argument presque rhétorique ?

Renau d'Élissagaray ne surprend certes pas ses lecteurs en avançant que le dénominateur commun entre le comportement d'un vaisseau à la mer et la construction du navire ressortit à l'art des « mécaniques ». Ce qu'il s'efforce d'établir, c'est que la mise en rapport des qualités d'un vaisseau et sa forme exigent une science des « forces mouvantes », c'est-à-dire une analyse quantitative. Mais cette analyse, assise comme il se doit sur un nombre réduit de principes, est d'abord le moyen d'identifier ce qu'on entend par les qualités d'un vaisseau.

Or, précisément, les qualités d'un navire hauturier sont de différents ordres et requièrent des dispositions constructives souvent distinctes, parfois contradictoires. Voici par exemple ce qu'en écrit André-François Boureau-Deslandes dans sa revue critique du *Traité du navire* de Pierre Bouguer (1747) :

> ... un vaisseau demande des qualités si différentes, et si souvent contraires les unes aux autres, que l'art de Constructeur est peut-être le plus épineux, & le plus compliqué de tous les arts. Veut-on par exemple qu'il ait par-dessus tout l'avantage de la voilure, & que la vitesse de sa marche soit aussi grande qu'elle peut être ? on nuit alors à la solidité de ses liaisons, & ce vaisseau moins fort de bois d'échantillon sera hors d'état de porter son artillerie (...) Veut-on un navire, dont les fonds soient fins & taillés, faits en forme de coin, afin qu'il divise mieux le liquide dans lequel il flotte, & qu'il ait un moindre volume d'eau à repousser ? On nuit à son arrimage (...) ce qui le fait rouler terriblement. Veut-on que la mâture soit élevée au dessus des proportions ordinaires, que les voiles ayent plus de chute ou plus de hauteur, afin de mieux intercepter les lits de vent supérieurs ? On nuit à la marche du vaisseau, par ce qu'il faut augmenter (...) le lest (...) Veut-on donner à un navire la plus petite largeur possible, afin qu'il porte la voile fièrement et sans plier, qu'il obéisse à toutes les impulsions du vent et de l'eau ? On trouvera que ce navire a trop d'ardeur, qu'en virant de bord les voiles coifferont les mâts, enfin que le gouvernail ne le maîtrisera point assez. Je ne parle point du recul, que doivent avoir les canons, & qui suppose à chaque Vaisseau de guerre une largeur proportionnée à leur calibre (...) Un vaisseau est un tout composé d'une infinité de parties : il paroît comme impossible, quand on veut qu'une certaine qualité domine, qu'elle ne préjudicie aux autres[5].

Le « maître de l'ouvrage » se trouve, par conséquent, dans l'obligation de privilégier certaines qualités du navire sur la base des effets reconnus de telle ou telle disposition constructive, et l'on s'attend, deux siècles après les premières grandes explorations transocéaniques, à trouver dans les arsenaux des maîtres d'œuvre ou des spécialistes compétents pour le conseiller. C'est qu'en effet, parmi les artefacts de la période moderne en Europe occidentale, les navires de guerre offrent sans contredit les spécimens de la plus grande sophistication dans l'art, comme l'écrit le père jésuite Ignace Gaston Pardies dans son traité de statique : « Je prends donc pour sujet le mouvement d'un Vaisseau qui est sans doute un des plus beaux ouvrages de l'Art, & où l'industrie des hommes semble le mieux ménager les loix méchaniques de la Nature. » [6] Devant affronter l'élément marin, sujet à des lois aussi déroutantes, par rapport à l'expérience quotidienne, que celles du roulis ou de la propulsion vélique, les vaisseaux sont construits par des artisans spécialisés, et requièrent une grande quantité de matières premières coûteuses[7].

Or les spécialistes, nous dit Renau dans son exorde, ne sont à rechercher ni chez les officiers de marine, ni chez les constructeurs. Les navigateurs, en effet, qui pourtant s'arrogent ordinairement le droit de juger des dispositions convenables, ignorent le détail du mode d'une fabrication d'un navire. Ils ne jugent des qualités du vaisseau qu'à partir de critères visuels et de leur expérience vécue ; ils regardent le vaisseau comme un tout, un système dont les qualités et les défauts ne sont pas réductibles à telle ou telle ca-

---

4 Voir *infra* dans la « Mise en œuvre de la méthode de Renau », les rapports de l'Académie des sciences, la réaction de Tourville et les implications de la méthode pour la formation des cadets de marine ; également Hélène Vérin, *La gloire des ingénieurs. L'intelligence technique du XVI*^{e} *au XVIII*^{e} *siècle*, Paris, Albin Michel, 1993, chap.VII, pp. 337-340.

5 A.-F. Boureau-Deslandes, *op. cit.*, pp. 2055-2067.

6 Ignace Gaston Pardies, *La statique, ou la science des forces mouvantes*, vol. 1, in-12° , impr. Mabre-Cramoysi, 1673.

7 Selon Gérard Le Bouëdec, *Activités maritimes et sociétés littorales de l'Europe atlantique*, Paris, A. Colin, 1997, p.215, la construction d'un vaisseau de second rang (longueur×largeur = 165×43 pieds) exige 3000 stères de (bon) bois.

ractéristique particulière du navire, mais aux relations diverses des parties entre elles. Pire : selon le commissaire de marine Boureau-Deslandes, il suffit d'un rien pour bouleverser les prédictions les plus assurées. En effet, comme ce dernier se plaît à le rappeler :

> « On construisit, il y a environ 50 ans [dans les années 1690] quatre Vaisseaux à Toulon, qu'on nommoit les Quatre Freres. Ils avoient même longueur, même largeur, même creux, même elancement de l'estrave, même queste de l'etambot &c. (...) mais quand il fallut les faire naviger (sic) il fallut aussi les agreer differemment. L'un vouloit que les haubans fussent ridés (...) l'autre que ces mêmes haubans fussent laches : 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. » [8]

Enfin, les navigateurs se méprennent dans l'attribution à certaines causes des effets qu'ils observent.

Les constructeurs ne valent guère mieux : incultes pour la plupart de la géométrie la plus élémentaire, ils ignorent tout de la navigation, et n'ont d'autres principes que ceux de la coupe et de l'assemblage des bois, adoptés d'ailleurs sans justification plus précise que la tradition de leur métier ; leurs instruments (tablette et gabarits) les dispensent même d'effectuer de simples toisés.

Les hommes de l'art curieux de géométrie euclidienne, tels l'Anglais Deane, ne trouvent pas davantage grâce aux yeux de Renau, car c'est d'une géométrie plus subtile que, selon lui, relèvent les vraies questions de construction, et surtout de principes de mécanique.

La dénonciation des pratiques « grossières et fautives » des artisans par les lettrés est un lieu commun au XVII[e] siècle. Les termes employés par Renau font écho, en effet, à ceux du géomètre Girard Desargues, dénonçant dans la préface de son *Brouillon project de la coupe des pierres* (1642) :

> « ...les ouvriers en l'art de Maçonnerie qui dans leur pratique tâtonneuse (...) se mécontent souvent (...) et qui pour s'asseurer de la justesse de leurs traicts les ont tous coupés de leur propre main, ce qui n'est pas démonstration aux intelligens. » [9]

Le dénigrement de la pratique grossière des charpentiers de marine par les officiers s'exprime aussi en Angleterre : ainsi le conseiller Samuel Pepys rapporte qu'en visite à l'arsenal de Deptford, « et requérant de Mr. Shish, maitre charpentier, qu'il mesurât une pièce ou deux de planche, il le fit extrêmement mal et causa la perte, pour le roi, de 12 ou 13 shillings par pièce de 23 pieds » [10].

Renau d'Élissagaray entend dépasser les approximations des navigateurs et l'ignorance des charpentiers en réglant la forme des carènes selon une théorie de la transmission du mouvement par le vent au navire, et du navire à l'eau. Il faut pour cela remédier à la méconnaissance réciproque des savoir-faire entre navigateurs et constructeurs : mais il ne suffit pas de s'informer auprès des intéressés, il faut encore savoir interpréter leurs propos et leurs arguments selon un même langage, de façon à pouvoir mettre en équation, c'est-à-dire comparer, avantages de navigation et avantages de construction. Si l'on considère le propos de son auteur, le plan du *Mémoire* paraît curieux, car au lieu d'entrer de plain-pied dans le sujet annoncé, le premier tiers du texte est consacré à une question de manœuvre (la « marche au vent » ou « à la bouline »). Cette manœuvre, nous dit l'*Encyclopédie*, apparue avec les Génois au temps de François I[er], entrait dans la pratique des meilleurs officiers de marine de Louis XIV[11] :

> Les anciens ne connoissoient point cet art. André Doria génois, qui commandoit les galeres de France sous François Ier, fixa la naissance de la manœuvre par une pratique toute nouvelle : il connut le premier qu'on pouvoit aller sur mer par un vent presque opposé à la route. En dirigeant la proue de son vaisseau vers un air de vent, voisin de celui qui lui étoit contraire, il dépassoit plusieurs navires, qui bien loin d'avancer ne pouvoient que retrograder, ce qui étonna tellement les navigateurs de ce tems, qu'ils crurent qu'il y avoit quelque chose de surnaturel[12].

La première partie du *Mémoire sur la manœuvre* joue un double rôle. Renau fait tout d'abord remarquer

8 A.-F. Boureau-Deslandes, *op. cit.*

9 Cité par Joël Sakarovitch, *Épures d'architecture*, Bâle, Birkhaüser, 2000, p. 180.

10 « *and putting Mr. Shish, master shipwright, to measure a piece or two of timber, which he did most cruelly wrong and to the King's loss 12 or 13 shillings in a piece of 23 ft. in contents...* » ; Samuel Pepys, *Diary*, « 22[nd] July 1664 », édition utilisée : *The shorter Pepys* , R. Latham éd., Penguin Books, Londres, 1987.

11 Note 2 du *Mémoire*.

12 J.-N. Bellin, art. *Manœuvre* dans *l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert* (1752-1761).

que les constructeurs ignorent cet « art », ou qu'en tout cas (à l'exemple de Deane) ils sont incapables d'en « rendre raison ». Et puisqu'il y a « quelque rapport entre la manœuvre et les façons », cette ignorance porte en germe l'incapacité à conduire des façons qui soient propres à améliorer le comportement du navire à la mer. D'autre part, l'exemple de la manœuvre à la bouline démontre parfaitement comment une mécanique réduite à quelques principes est à même de rendre compte de ce qui jusque-là était du domaine d'une pratique appuyée sur des expériences renouvelées.

Renau indique ensuite la voie la plus plausible pour comparer manœuvre et façons[13] : « tout ce qu'on peut dire là dessus en général, c'est qu'il est necessaire de beaucoup de geometrie et particulierement de la mechanique (...) pour parvenir à quelque chose de methodique et de certain » . Au XVII^e^ siècle, en effet, la manœuvre aussi bien que la charpenterie de marine sont reconnues depuis longtemps déjà comme appartenant aux arts mécaniques[14] : on entend généralement par là que ces deux disciplines, au plan philosophique ou, comme nous dirions aujourd'hui, théorique, relèvent d'une science du « mouvement violent » ou « mouvement délibéré », par opposition à la physique, qui relève du « mouvement naturel » (étranger aux besoins humains)[15]. Le diagnostic est donc porté : ce qui fait défaut aux navigateurs comme aux constructeurs, c'est un discours précis et ordonné sur le « mouvement », et pour dissiper toute ambiguïté, Renau précise même sur le « mouvement loccal. » [16]

Les qualités d'un vaisseau, pour pouvoir être rapportées aux façons, doivent donc être réduites à des considérations de mouvement. Mais quelles sont ces qualités ? Boureau-Deslandes, dans l'extrait cité ci-dessus, dénombre la vitesse (qui peut être obtenue soit par renfort de voilure, soit par des avantages hydrodynamiques particuliers de la carène) ; la sensibilité au gouvernail et la promptitude de réponse à l'ordre de barre ; la stabilité aux oscillations ; enfin la résistance structurale (Boureau-Deslandes dit « la force ») du navire, qui le met en état d'embarquer une artillerie importante (et donc, par métonymie, d'être fort !). Au delà de certaines limites, ces qualités deviennent antagonistes l'une de l'autre, et par exemple, on ne peut « tout sacrifier » à la vitesse sans compromettre la « force» du navire, ni gagner en stabilité sans perdre en réactivité. Il faut donc trouver un compromis, et pour cela réduire à un même terme les qualités contradictoires pour les soupeser et les faire s'équilibrer.

La première partie du *Mémoire* montre par l'exemple comment des considérations de « mouvement local » permettent de mesurer l'effet des voiles, et plus loin l'auteur évoque la comparaison des basses voiles et des huniers. On conçoit que l'effet du gouvernail relève d'un raisonnement analogue, encore que, comme l'indique De Lalande, la sensibilité d'un vaisseau à la manœuvre du gouvernail est conditionnée par la forme de la carène, car à la différence des navires de rivière, le gouvernail d'un navire de mer n'a « ... que peu de largeur, et par une suite nécessaire, il a fallu pincer le vaisseau en arrière, en sorte que sa courbure aille, dans ses œuvres vives, mourir sur l'étambot ; par ce moyen l'eau coulant le long des flancs du navire va nécessairement choquer le plan du gouvernail, presque avec la vitesse dont le vaisseau est lui-même emporté. C'est ce choc qui est souvent de plusieurs milliers de livres, qui sert à faire tourner le vaisseau autour d'un axe vertical passant à-peu-près par son centre de gravité » [17].

Renau d'Élissagaray ne discute pas davantage des questions de stabilité, mais si l'on en croit Brian Lavery, les vaisseaux français et hollandais, plus larges, étaient à cette époque moins sujets au roulis que les galions anglais et espagnols, et Deane a d'ailleurs dû porter ses efforts sur cet aspect[18]. Mais le plus étonnant sans doute, d'un point de vue moderne, est la mise à l'écart dans le *Mémoire*, de toute discussion sur la résistance structurale de la coque. Ce n'est pas

13 Pour faire admettre au lecteur ses vues mécanistes, Renau en appelle ici à « quelque sorte d'évidence ». Il exprime également une opinion lorsqu'il écrit : « tout ce qu'on peut dire... »

14 Walter Roy Laird, *The Scope of Renaissance mechanics*, *Osiris*, 2^nd^ Series, 1986, n°2, pp. 43-68 ; H. Verin, *La gloire des ingénieurs*, *op. cit*., pp.71-73

15 Cette distinction entre le mouvement naturel et le mouvement violent est due à Aristote : *Physique*, livre IV, chap. 8, §215-a1 ; *Traité du Ciel*, Livre I, chap. II, §269-a.

16 Précision qui suggère qu'il s'adresse à des lettrés, cette terminologie renvoyant, là encore, à la *Physique* d'Aristote : voir la note 14 du *Mémoire*.

17 Jacques de Lalande in *Histoire des mathématiques*, éd. J.-E. Montucla, impr. Jombert, Paris 1758, vol. IV, p. 429

18 Brian Lavery éd., *Deane's doctrine of naval architecture*, Londres, Conway Maritime Press, 1986, p. 12. Un navire comme la flûte hollandaise, apparue vers 1600, jouissait particulièrement de cette stabilité : Robert Parthesius, « Flûtes, frégates et chantiers navals », dans *Amsterdam XVII^e^ siècle. Marchands et philosophes: les bénéfices de la tolérance*, Paris, Autrement, série Mémoires, 1993, pp. 103-123.

que la « force des bois » (c'est-à-dire la résistance des charpentes) ne soit pas à l'ordre du jour au XVII[e] siècle (Galilée en a traité dès 1634 dans la première journée des *Discorsi*, aussi bien que Mariotte et Huyghens)[19], mais tout porte à croire que, dans l'esprit du chevalier Renau, cet aspect puisse être abandonné sans inconvénient aux charpentiers de marine. Ce point reste à éclaircir, mais on peut avancer l'explication suivante : la carène n'est pas moins sollicitée à sec, dans la forme de radoub, qu'elle ne le sera une fois dans l'eau : à certains égards, elle est même bien davantage chargée, puisque le poids propre de la charpente n'est pas compensé par la poussée d'Archimède. Du reste, on sait que c'est lors du lancement à la mer que le vaisseau subit l'épreuve de charge la plus critique : si la coque résiste à cette mise à l'eau, l'expérience montre qu'elle tiendra généralement dans des mers fortes[20].

On le voit, Renau fait l'économie de la discussion qui précède lorsqu'il pose son « *criterium* » des meilleures façons : « celles qui sans changer ses proportions fondamentales, font le moins de resistance qu'il se peust par devant comparee à celle des costez » (fol. 9 r°).

Ce choix s'éclaire en partie si l'on considère que dans le contexte de 1680, la demande du Conseil du roi va davantage dans le sens d'un accroissement de la puissance de feu, donc du tonnage et de la largeur des vaisseaux, que dans celui de gains de vitesse (ce qui suppose un allégement) : le meilleur vaisseau est donc celui qui, *à offre de cale donnée*, est meilleur manœuvrier. Sont donc remisées les questions de stabilité et de résistance structurale. Mais déjà Renau a posé les bases du travail du concepteur en lui assignant un objectif précis : il écarte ainsi les palinodies des officiers et met les constructeurs en demeure de répondre par leur art à cet objectif.

L'enseignement mécaniste

Il faut maintenant en venir à la science du mouvement, puisque c'est le langage dans lequel s'exprime la relation entre « façons de charpente » et « manœuvre ». L'auteur exprime d'emblée qu'il n'a besoin que d'un nombre réduit de principes, plaçant son discours sur un mode hypothético-déductif (« ... il m'obligea à en faire une démonstration (...) j'ay besoin pour cela de quelques propositions du mouvement loccal.... »), plus familier aux clercs qu'aux hommes de l'art.

D'où viennent ces principes ? Le recours à la notion de *détermination* d'un mobile, dont la définition forme l'entrée en matière du raisonnement, révèle que le texte est d'inspiration nettement cartésienne. Descartes a en effet forgé ce concept dans le cadre de la « physique du plein », et s'en est servi systématiquement dans l'exposé de sa physique. De tous les résultats établis en mécanique par Descartes, Renau d'Élissagaray n'aura besoin, au fond, que de la proposition relative au choc d'un mobile ponctuel sur un plan fixe, et cette proposition constitue ce qu'on pourrait appeler la « Loi du sinus » : dans un tel choc, le mobile conserve sa détermination tangentielle à l'obstacle, et ne peut donc céder de mouvement que par altération de la détermination perpendiculaire à l'obstacle ; la paroi percutée ne reçoit de mouvement, autrement dit, que selon la direction qui lui est perpendiculaire.

Cette loi du sinus n'est pas un acquis négligeable de la *mathesis* cartésienne : la physique mathématique, au XIX[e] siècle, l'a intégrée comme condition de continuité d'un champ conservatif à la traversée de deux milieux différents[21]. Il est significatif que c'est sur cette propriété des percussions que Renau fonde ses raisonnements, plutôt que sur les sept règles du choc, énoncées par Descartes dans les *Principes de Philosophie*, et qui servent chez presque tous les commentateurs depuis Leibniz à dénigrer la physique cartésienne. C'est aussi presque sur cette seule règle que repose la théorie de Descartes sur la réfraction[22].

19 Edme Mariotte *Traité du mouvement des eaux et des autres corps fluides,* Paris, Étienne Michallet, 1686 ; Christiaan Huyghens, *Œuvres complètes*, vol. 16, pp. 333-336.

20 Il faut bien voir du reste que, en dehors de tout calcul, la préoccupation de résistance structurale avait mené les constructeurs à certaines dispositions touchant l'économie générale des vaisseaux. Ainsi la « tonture », qui consiste à conformer la coque en voûte inversée, et à l'étayer par des ponts continus de la proue à la poupe (cf. R. Parthesius, *op. cit*., p. 106).

21 Sous sa forme actuelle, la loi de continuité à la traversée d'une interface est due à G. Green, *On the reflexion and refraction of Sound* et *On the laws of reflexion and refraction of light at the common surface of two non-crystallised media*, in *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 1838. Pierre Louis Moreau de Maupertuis, au siècle précédent, avait tenté de justifier la relation de Descartes par son principe de moindre action : Amy Dahan-Dalmedico, *Mathématisations. Augustin-Louis Cauchy et l'École française*, Éditions du Choix, Librairie A. Blanchard, Paris, pp. 71-72.

22 René Descartes, *La Dioptrique*, Discours second « *De la refraction* », éd. Ch. Adam et P. Tannery, vol.VI, Vrin, Paris

Il y a un parallèle complet entre le paragraphe où Renau démontre cette proposition et le deuxième discours de la *Dioptrique* de 1637 : les raisonnements de l'ingénieur n'appellent donc pas d'autres explications que ceux du philosophe[23] . La démonstration de Renau d'Élissagaray sur la dérive (folios 7 v° et 8), quoique procédant des mêmes principes, est en revanche une application originale et manifeste bien les caractères propres au *cinétisme* cartésien.

Considérant l'effet du vent sur la voile d'un navire dans deux positions de la vergue, Renau applique deux fois son « théorème du sinus » : d'abord à l'action du vent sur la voile, puis à l'action de l'eau sur la coque du vaisseau. Le résultat est le suivant : d'une part le gréement ne transmet au vaisseau que cette fraction d'*impulsion* qui est perpendiculaire à la voile, et d'autre part le vaisseau est *déterminé à se mouvoir* principalement en longitude. Il faut bien voir qu'en tout ce passage, il n'est jamais question de « pression », de « poussée », de « force » au sens statique de « poids » : ce que le vent transmet aux voiles, et ce que l'eau retire au vaisseau, c'est du *mouvement*, c'est-à-dire de la vitesse dans une direction particulière, ce qui se traduit par une modification de la *détermination*. Ainsi, lorsque « *l'air est beaucoup plus difficile à fendre en latitude* » (fol. 6 v°), cela signifie qu'il faut « *une fois plus de temps à fendre l'air de ce costé-là qu'auparavant*... », autrement dit cette difficulté peut être exprimée directement en terme de vitesse ; et de même pour le vaisseau (fol. 7 v°) : « il faut suposer (...) qu'à cause qu'il y a beaucoup plus d'eau qui s'oppose par son costé que par devant, qu'il y a aussy cent fois plus de difficulté à fendre l'eau de ce costé la que de l'autre [et] que comme il trouve cent fois plus d'obstacle, à sa determination en longitude qu'en latitude par ma suposition, il sera aussy cent fois plus de temps à faire cinq quarts de lieue en longitude... »

Cette conception, et la terminologie qui l'accompagne, est parfaitement conforme au système de Descartes, dans lequel les actions ne peuvent être que des actions de contact, et dans lequel ces actions ne sont que des échanges de vitesse. Recevoir de l'impulsion signifie voir sa vitesse passer d'une intensité à une autre, de façon discontinue et instantanée, et l'échange de quantité de mouvement est un pur échange d'intensité de vitesse.

Dans le raisonnement qui nous est proposé, tout se fait à vitesse constante : le vent souffle à vitesse constante, il transmet une quantité de mouvement constante à la voile, donc au vaisseau ; et l'eau en s'opposant à la marche du vaisseau, le *détermine* simplement dans une direction particulière, sans altérer la constance de sa marche : en somme, un raisonnement cinématique pur, où toute la question est de déterminer les directions, ou déterminations, *actives*. Pour Renau, le vaisseau dérive, c'est-à-dire que sa marche s'écarte du cap (Renau parle de longitude), non pas par un jeu de forces et de résistances statiques (et encore moins dynamiques), mais parce qu'une partie de la vitesse est irrémédiablement dérobée par l'eau au navire.

Or, la démonstration de Renau aboutit à un résultat non seulement conforme à la nature, mais encore correct d'un point de vue moderne, c'est-à-dire newtonien. Dans une perspective newtonienne, en effet, faisant l'hypothèse, fondée expérimentalement, d'une loi de résistance proportionnelle à la vitesse, ou au carré de la vitesse relative du navire par rapport à l'eau, on peut démontrer que le navire atteint au bout d'un certain temps une vitesse limite, constante (cf. annexe).

Ces principes, Renau ne les attribue toutefois pas à Descartes, ni même à Nicolas Malebranche, mais indique qu'il les a pris dans la Statique du père jésuite Ignace Gaston Pardies[24] (1636-1673). En effet, dans une lettre à Christiaan Huyghens de janvier 1694[25], il écrit : « J'avois premierement fait mon livre [*Théorie de la manœuvre des vaisseaux*] en suposant pour vrai un principe faux que le Père Pardies a donné dans la *Science des Forces Mouvantes* art. 118. quoi que tout son ouvrage sur le mouvement d'un vaisseau ne consiste qu'en ce seul principe, qu'il n'a apliqué à rien, ni donné aucun moyen de resoudre aucune des propositions de la theorie de la manœuvre des vaisseaux. » L'emprunt sera rappelé 50 ans plus tard par Bouguer : « L'Auteur [le Père Hoste] avoit réussi quel-

23 On se référera utilement à l'ouvrage de Paul Mouy, *Le développement de la physique cartésienne 1646-1712*, Paris, Vrin, 1934, pp. 55-61. Voir également O. Knudsen et K.M. Pedersen « The link between determination and conservation of motion in Descartes' dynamics », *Centaurus*, vol. 13, nr. 2, 1968, pp. 183-186.

24 I. G. Pardies, *La statique, ..., op. cit*. Il est permis de penser qu'après l'interdiction par Louis XIV de la doctrine de Descartes (1671), il eût été fort imprudent de la part de Renau d'évoquer le nom du philosophe dans son *Mémoire*.

25 Cette lettre est une réponse polémique au compte-rendu de Huyghens (septembre 1693) sur la « Théorie de la manœuvre des vaisseaux » de Renau, pour la *Bibliothèque universelle et historique*. Elle a été transmise à Huyghens par le marquis de L'Hôpital en mars 1694.

ques années auparavant à composer un *Traité de manœuvre particulière* (...) imprimé à Lyon en 1692, qui conserve actuellement presque tout son prix, quoi qu'il soit fondé en partie sur les mêmes principes que celui du chevalier Renau. Ils avoient l'un et l'autre puisé ces principes dans le Père Pardies, qui s'étoit laissé séduire par des raisonnements qui n'étoient que plausibles, lorsqu'il a tâché le premier dans son discours sur les forces mouvantes d'expliquer les particularités des mouvemens des vaisseaux. » [26]

L'indication de Renau est corroborée par la similitude entre son calcul pour la dérive, et celui publié dans la *Statique* de 1673 du père Pardies. Un détail suggère effectivement l'emprunt de l'ingénieur : Renau adopte, comme l'auteur de la *Statique*, l'hypothèse d'un rapport 100 entre la résistance de l'eau par le travers et par la proue du vaisseau. Or, quoique le raisonnement reproduit par Renau s'appuie sur une terminologie fortement empreinte de la *Dioptrique* de Descartes, Pardies, lui, n'est pas exactement cartésien, et d'ailleurs les Jésuites combattent alors les idées de Descartes. Ainsi, Pierre Duhem mentionne l'opposition de Pardies à la théorie des animaux-machines, et montre que sa statique rejette les considérations de déplacement (présentes chez Descartes) comme explication première des états d'équilibres[27] . Sur ce point, la position de Duhem, qui juge l'ouvrage du savant jésuite « un livre fort peu original, bien qu'il semble avoir eu quelque vogue », est sans doute trop tranchée, et du reste ce jugement se borne aux seules questions d'axiomatique de la statique.

En réalité, Pardies est un critique attentif des débats de son temps, et lorsqu'il fréquente vers 1670 l'académie de l'abbé Bourdelot, où la nouvelle physique (celle de Descartes) est à l'honneur, c'est pour inviter ses interlocuteurs à lever toute ambiguïté dans leur définition de la « quantité de mouvement » [28]. L'emploi de ces concepts cartésiens du mouvement dans ses écrits vaut d'ailleurs à Pardies divers reproches de la part de ses confrères [29], au point qu'il doit s'en défendre par une série de *Réponses* annexées à son *Discours du Mouvement local* (1670). D'autre part, l'opposition des jésuites au cartésianisme, qui s'est effectivement traduite par une mise à l'Index (1663), n'attaque pas l'ensemble de la doctrine, mais certains points précis en conflit avec le dogme de la transsubstantiation (l'espace comme continuum matériel) ou l'âme des animaux (animaux-machines) ; la théorie physique de Descartes est implicitement tolérée, et même soulève un intérêt croissant (dans la mesure où elle fait pièce au janséniste Pascal ou aux gassendistes) chez ces professeurs [30].

Ce qui est certain, c'est que la loi des sinus forme la dernière partie de la *Statique* : Pardies se sert de ce résultat (et il est, semble-t-il, le premier à le faire) pour résoudre les équilibres dans le cas de forces réparties sur des parois courbes, en l'appliquant notamment à la statique des câbles, à la résistance des édifices au vent, enfin à la marche des vaisseaux. Ce seul aspect suffirait à réhabiliter le traité, dont il paraît que Newton, correspondant de Pardies, se soit inspiré dans ses *Principia* pour déterminer la résistance opposée par un fluide à la marche d'une sphère [31].

Examinons à présent comment Renau d'Élissagaray établit les relations entre le comportement du navire et sa forme. Les meilleures carènes sont « celles qui sans changer ses proportions fondamentales, font le moins de resistance qu'il se peust par devant comparee à celle des costez » (fol. 9 r°). Le raisonnement s'établit en quatre points :

- les lois du choc d'une particule sur un plan permettent de déterminer le rapport entre résistance frontale et résistance latérale pour une coque rectangulaire et plus généralement pour une coque de surface polyédrique, c'est-à-dire dont le contour, vu en plan, consiste en segments rectilignes ;
- de ces formes de carène, la coque triangulaire, offrant moins de prise à la traînée qu'à la dérive, est la plus adaptée à la manœuvre ;
- toutes les formes curvilignes intermédiaires entre coque triangulaire et rectangulaire, auront des performances elles-mêmes intermédiaires, donc le profil triangulaire est, en ce sens, optimal ;

26 Pierre Bouguer, *Traité du Navire*, Paris, chez Jombert, 1746, préface, p. viii.

27 Pierre Duhem, *Les origines de la statique*, t. II, chap. XVII, §5, Paris, Hermann, 1906. Quant à la « vogue » du traité, celui-ci connut en effet cinq éditions jusqu'en 1725.

28 Katia Béguin, « L'académie du Grand Condé », dans Éric Brian, Christiane Demeulenaere-Douyere éd., *Règlement, usages et science in la France de l'absolutisme*, Paris, Tec & Doc, Lavoisier, 2002, pp. 25-35 ; Paul Mouy, *op. cit.*, chap. I, section 6, §6 ; P. Duhem, *op. cit*.

29 August Ziggelaar, « Aux origines de la théorie des vibrations harmoniques : Ignace-Gaston Pardies », *Centaurus*, vol. XI, n°3, 1965, pp. 147-148

30 Voir notamment Paul Mouy, *op. cit.*,

31 Isaac Newton, *Principia mathematica philosophiæ naturalis*, livre II, prop. XXXIV, théor. XXVIII. Egalement dans René Dugas, *Histoire de la mécanique*, Paris, Dunod, 1950, la troisième partie, chap. IX « Expériences sur la résistance des fluides ».

• toutefois le profil triangulaire présente un inconvénient : son point anguleux à la proue. Or cet inconvénient est tel qu'il faut préférer les coques n'ayant aucun point anguleux, donc à contour arrondi.

Le détail de ces différentes étapes présente essentiellement un intérêt de technique mathématique, sur lequel nous reviendrons. Au plan des principes de physique, deux aspects méritent d'être relevés : d'une part, la façon dont Renau évalue la quantité de résistance opposée par le fluide à une paroi plane (Renau écrit : « *un costé* ») ; et d'autre part, la façon dont il expose l'inconvénient des points anguleux sur le bordé du navire.

Renau se propose dans un premier temps de calculer un rapport de « résistances » qui, pour lui, caractérise la performance d'un profil de coque :

$$\rho = \frac{\text{Résistance latérale}}{\text{Résistance frontale}}$$

mais, comme nous l'avons indiqué, ce terme de « résistance » désigne ici une perte de vitesse du mobile due à l'interaction avec l'eau ; ce n'est pas une « force » au sens newtonien, c'est-à-dire une grandeur que l'on pourrait comparer par exemple à un poids.

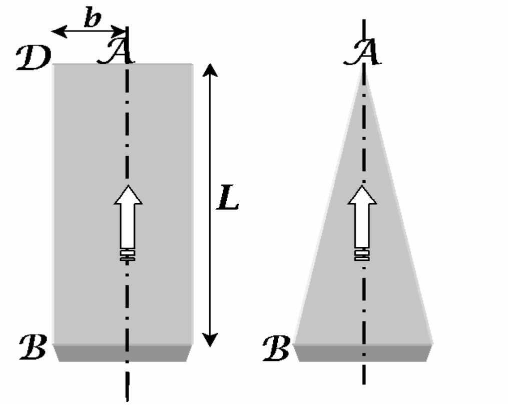

fig. 1 – Vue en plan des carènes pour lesquelles Renau d'Élissagaray calcule les résistances opposées par l'eau à la marche du vaisseau

L'auteur du mémoire entend calculer ce rapport grâce à deux « propositions du mouvement loccal » : le long d'un « costé », c'est-à-dire d'une face plane, l'intensité de la résistance de l'eau est uniforme parce que la « quantité d'eau qui s'oppose » au mouvement du vaisseau est la même en tout point, et par conséquent cette résistance est proportionnelle à la surface opposée à l'eau ; d'autre part, il faut naturellement tenir compte de la détermination à laquelle le fluide s'oppose, et à cette fin employer le « théorème du sinus » : la résistance est proportionnelle au sinus de l'angle entre le « costé » et la vitesse du navire. Ces deux principes suffisent à Renau pour établir que, *L* désignant la longueur *BD* du navire, et *b* la largeur *AD* (cf. fig. 1), les performances des carènes rectangulaires et triangulaires de mêmes dimensions seront respectivement :

$$\rho_{rect} = \frac{L}{b} \qquad \rho_{trg} = \frac{L^2}{b^2}$$

Comme la longueur d'un vaisseau est couramment quatre fois supérieure à sa largeur, le « rendement » de la coque triangulaire est donc bien supérieur à celui de la coque carrée.

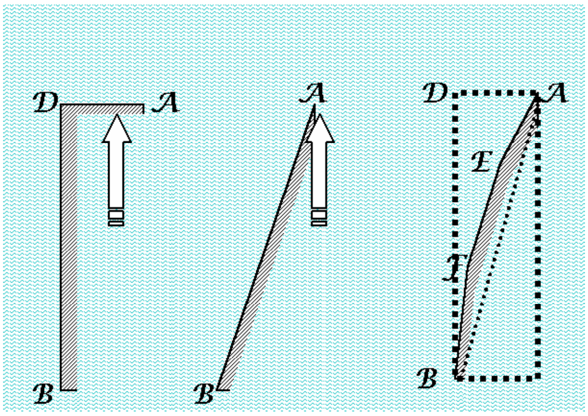

fig. 2 – Modélisation du *Mémoire* : le calcul ne porte que sur la moitié bâbord des navires, réduite au bordé extérieur

Et l'on peut évaluer l'effet de tous les autres profils possibles (par exemple la coque polyédrique AEFB, fig. 2) qui s'inscrivent entre ces deux limites : ils seront plus efficients que la coque rectangulaire, et moins efficients que la coque triangulaire. Dans ce raisonnement, il y a lieu de relever que l'auteur du *Mémoire* ne considère en réalité que la moitié bâbord du vaisseau, ce qui est légitime, mais il ne l'indique pas clairement. D'autre part, il s'intéresse en réalité aux seules parois battues par l'eau : il n'explicite pas ce qui se produit à la poupe, c'est-à-dire dans le sillage du vaisseau. En réalité, son calcul évalue la résistance opposée par l'eau à deux plaques minces, l'une formée d'un coin à angle droit propulsé « de bout » (c'est-à-dire perpendiculairement à *AD*, fig. 1), l'autre plane mais propulsée en biais. Peu importe, en somme, que le vaisseau ait un certain volume en arrière du bordé extérieur de la carène, car l'eau y est indifférente. Cette hydrodynamique primitive se fonde sur l'hypothèse que le choc de la carène sur l'eau n'a que des conséquences locales, d'un point de la coque à l'autre, et que les particules d'eau s'opposent au mouvement, ou gagnent du mouvement dérobé au vaisseau, indépendamment les unes des autres, alors qu'il est patent que l'interaction des particules d'eau se propage en tourbillons et en ondes autour du navire, rendant l'effet de pénétration de la coque à l'étrave (et aussi à la poupe), indissociable de la forme globale de la carène.

Pourtant, Renau d'Élissagaray a bien observé qu'il se produisait un remous à l'étrave aussi bien qu'en certains endroits de la ligne de flottaison par le travers des vaisseaux. Il attribue ce remous au fait que le bordé fasse « un angle », et cet angle, le calcul qu'il a donné précédemment n'en a pas indiqué l'effet. Or, contre l'intuition commune et l'imagerie des « mécaniques », où le vaisseau fend l'eau comme un coin fend le bois, Renau est d'avis que ce remous, loin d'être un indice de performance, trahit en réalité une perte de mouvement inutile, nuisible à la marche du vaisseau : c'est l'un de ces effets que les navigateurs « ont assez souvent mal observez, et qui ont d'autres causes que celles qu'ils jugent, puisqu'on prouveroit quelque fois sans beaucoup de peine, que celles qu'ils citent produiroient des effets tous contraires. » Devant justifier ce jugement par un calcul, l'ingénieur cherche à s'appuyer encore une fois sur les seuls principes du mouvement local qu'il a utilisés jusqu'ici. Il lui apparaît que le point anguleux d'une carène empêche l'eau de s'opposer au vaisseau en suivant une direction définie ; or l'eau doit bien frapper un « costé » à la fin, et quel que soit le biais emprunté, on peut en mesurer l'effet : « ... il ne faudroit considerer (parlant comme j'ay fait jusqu'ici) la latitude que le long de BA et qu'il soit obligé de se mouvoir sur cette ligne, ce qui lui feroit perdre [du mouvement] (...) ce qui seroit trop considerable, comme il se voit par la seule veüe de cette figure... » (fol. 9 v°). Autrement dit, le point anguleux détermine le navire à se déplacer le long d'un des côtés du biseau : ce qui présente pour le navire un double inconvénient. D'une part, la vitesse du navire n'est pas dirigée selon le cap tant que le navire n'a pas fini de virer ; et d'autre part, pendant cette manœuvre, l'eau oppose à l'autre côté du biseau une résistance élevée au mouvement.

Telles sont les conclusions de la mécanique à l'œuvre dans le *Mémoire* : les meilleures façons de vaisseaux sont celles par lesquelles la carène affecte le plan le plus effilé, le plus proche d'un triangle allongé ; mais en évitant toutefois absolument les « angles ». À ce stade, ces conclusions ne déterminent donc pas très précisément la forme : mais elles fournissent les lignes directrices de la conception rationnelle du vaisseau.

Entre exactitude et adaptabilité

La géométrie, affirme Renau, est indispensable pour formuler la méthode de conduire les façons, et c'est pourquoi les navigateurs « ... n'ont pas sy facile d'en discourir, parce qu'il faudroit expliquer certaines propriétés de lignes courbes pour en parler profondément... » L'auteur reconnaît bien que plusieurs constructeurs ont pris conscience de l'importance de la géométrie dans leur métier, et pourtant ils sont minoritaires [32]. La Madeleine écrit : « Nos premiers constructeurs, à qui la geometrie n'etoit pas connüe, travailloient à l'aide d'un maître gabary avec lequel ils formoient les couples... » [33] ; et même bien plus tard (1783), don Georges Juan rappelle : « Les anciens constructeurs (...) n'ont pas connu l'art de tracer les plans, et même aujourd'hui il en est encore beaucoup qui n'en connoissent nullement l'usage. » [34]

Les maîtres-charpentiers dessinent toujours leurs pièces avant de les couper et l'exactitude de leurs dessins nécessite des connaissances en géométrie [35]. Renau évoque à la fin de son mémoire les principaux avantages de sa méthode graphique : elle permet de se représenter à l'avance l'allure d'ensemble de la carène, de dresser un devis précis de la quantité de bois nécessaire, de s'assurer *a priori* des continuités aux assemblages, de limiter les reprises d'équarrissage et surtout les rebuts au fil du montage. Et c'est par ces arguments qu'il compte justifier son système auprès des hommes de l'art, et les amener à renoncer aux outils traditionnels.

Pourtant, Renau développe d'autres arguments, tournés cette fois vers le comportement du vaisseau à la mer. La géométrie qu'il invoque s'assi-

32 C'est le cas particulièrement des Anglais Anthony Deane et Matthew Baker, et, à Gênes, de Dudley, alias Dudleo.

33 La Madeleine, *Tablettes de marine*, manuscrit daté de 1712. Cité par Eric Rieth, *Le maître gabarit, la tablette et le trébuchet*, Paris, CTHS, 1996, p. 61.

34 Don Georges Juan, *Examen Maritime théorique et pratique*, cité par E. Rieth, *op. cit*., p. 97.

35 Mais à la différence de Renau, ils ne tracent pas de plan d'ensemble du navire, et progressent de pièce en pièce pour l'équarrissage sauf s'ils ont des gabarits tous prêts d'une précédente construction reproduite.

gne en conséquence d'autres ambitions que celles des charpentiers géomètres : d'une part, il s'agit de trouver « de toutes les lignes qui composent les façons de vaisseaux » celles qui sont « les meilleures, qui sans changer ses proportions fondamentales, font le moins de resistance qu'il se peust par devant comparee à celle des costez » (fol. 9 r°) ; d'autre part, ayant montré l'inconvénient, dans la manœuvre, d'une carène formant un angle sur un côté, de donner l'assurance au constructeur qu'en appliquant son système, il décrira « une courbe régulière » (sans arête vive) en plaquant les lisses du bordage contre des couples de forme conçue scientifiquement (fol. 10 r°).

La géométrie requise par la mise en équation de Renau dépasse les simples « traits de charpentier », puisqu'elle doit être à même de trouver une courbe réalisant un extremum, mais également de caractériser les courbes régulières, c'est-à-dire sans point anguleux ou, comme l'écrit Renau, sans « angle ». Ces deux exigences étant posées, nos méthodes modernes suggèrent une forme, même primitive, de calcul différentiel. Et après tout, on trouve déjà ce type de calcul chez Roberval (cours du Collège de France, repris dans le *Traité des indivisibles* posthume de 1693), Pierre de Fermat (*Méthode des maximis et minimis*, 1637 et 1644) ou Blaise Pascal (*Lettres d'Amos Dettonville*, 1659) ; Christiaan Huyghens, qui a participé au concours sur la Roulette, a naturellement reçu et étudié dans ces *Lettres d'Amos Dettonville*, dont il a remis plus tard un exemplaire à Gottfried Wilhelm Leibniz[36]. Renau en a-t-il eu connaissance, sous une forme ou sous une autre, dès 1680 ?

Il semble bien que non, car certains indices ne trompent pas. Non seulement l'auteur du *Mémoire* évite les calculs de sommation les plus courants, comme la position des barycentres, le calcul de résultante de résistances non uniformes sur une paroi (ce que Pardies savait faire), mais il est même visiblement gêné par les passages à la limite. Notre auteur encadre un bordé courbe par des polygones inscrits et circonscrits, à la manière d'Archimède, mais sans réel passage à la limite. La limitation de calcul la plus caractéristique, de ce point de vue, apparaît dans la comparaison de la dérive pour les coques « triangulaire » et « rectangulaire ». Cherchant à évaluer le « rendement » d'un profil de coque rectangulaire, Renau d'Élissagaray considère que « par le devant », l'eau s'oppose perpendiculairement, ce qui revient à assigner au fluide un rôle statique : l'eau est repoussée « en bloc » par l'étrave du navire. Mais la même considération prévaut encore, selon l'auteur, par le travers du vaisseau, ce qui instaure dans la démonstration une disjonction complète avec le parement biais d'une coque triangulaire. En effet, il serait logique de regarder le travers d'un vaisseau rectangulaire comme un bordé infiniment biais, où, par une application rigoureuse de la « loi du sinus », aucune impulsion n'est absorbée par l'eau, la détermination étant parallèle aux filets fluides. On arriverait ainsi à ce résultat, qu'un vaisseau rectangulaire dérive infiniment. Un tel calcul était délicat à prendre en compte dans la trame du *Mémoire*, où les comparaisons se font, suivant l'usage de l'époque, par des proportions ; mais il témoigne surtout de la difficulté pour Renau de considérer les situations limites et les rapports infinis (ici : un diviseur qui tend vers zéro). Un blocage technique similaire transparaît dans la transition du polygonal au courbe : ayant classé les rendements des carènes polygonales inscrites dans un rectangle (fig. 1), le *Mémoire* conclut pour l'optimum : « il faut donc que la ligne qui est menée du point B au point A ne fasse point d'angle en B ny en aucun endroit, et que par consequent soit une ligne courbe... ».

Parmi les courbes génératrices possibles, il lui faut trouver une courbe régulière et qui en outre permette des raccordements, c'est-à-dire possède deux points de tangentes perpendiculaires, mutuellement éloignés d'une distance finie : « une ligne courbe, qui ne peut être, de celles qui sont régulières, que cercle ou elipse, parce que la parabole ny l'hyperbole ne peuvent avoir de touchante parallèle à l'axe et d'autres raisons considérables qui supposeroient trop de principes de geometrie.... » (fol. 10 r°).

Mais comme l'ingénieur vise également à reléguer les instruments traditionnels des charpentiers, il lui faut maintenant reprendre ce que ces instruments apportaient à l'ouvrier (une certaine adaptabilité à l'intérieur des « dimensions en usage », laissant une place à l'art), en conservant l'aspect manuel (maniable) de ces instruments. Autrement dit, il faut que le tracé des courbes génératrices de la carène se matérialise, autant que possible, en quelque nouvel instrument. C'est ici, semble-t-il, qu'apparaît le vrai sens que Renau donne à la géométrie invoquée dans son introduction : il s'agit d'une discipline qui doit « expliquer certaines propriétés des lignes courbes », par-

36 « Une dizaine d'années après la mort de Pascal, Huyghens prêtait les écrits de Dettonville à un jeune Allemand qui venait d'arriver à Paris, Gottfried Wilhelm Leibnitz », Léon Brunschvicg, *Les étapes de la philosophie mathématique*, Paris, Alcan, 1912, livre III, chap. 9, p. 172.

ticulièrement celles des touchantes (c'est-à-dire des droites tangentes aux lignes courbes), et dépasser « l'usage du compas et de la règle » dans la description de ces lignes (fol. 10 r°). De telles connaissances dépassent donc clairement les *Éléments* d'Euclide mais, comme nous l'avons suggéré, il n'est pas ici question de calcul différentiel.

La nouvelle géométrie que paraît évoquer Renau, qui s'efforce de classer les courbes avec cet objectif instrumental, tout en apportant un critère de généralité et d'exactitude, cette géométrie capable de déterminer les tangentes sans calcul infinitésimal ne peut être que celle de Descartes [37]. En effet, le philosophe a donné au livre II de sa *Géométrie* (1637) une méthode pour déterminer algébriquement les tangentes aux lignes courbes [38]. D'autre part, et cela importe pour la géométrisation des varangues, Descartes développe au début du même livre II la thèse que ce n'est pas parce qu'une courbe est décrite par un mécanisme, ou même parce qu'elle consiste en raccordement de différents arcs, qu'elle doit être *a priori* rejetée des mathématiques :

> « ... entre ces lignes plus composées, je ne saurois comprendre pourquoi ils [les Anciens] les ont nommées Méchaniques plutost que Géométriques. Car de dire que c'est à cause qu'il est besoin de se servir de quelque machine pour les descrire, il faudroit rejeter, par mesme raison, les cercles et les lignes droites, vû qu'on ne les descrit sur le papier qu'avec un compas et une reigle, qu'on peut aussi nommer des machines. (...) Il est, ce me semble, très clair que, prenant, comme on fait, pour Geometrique ce qui est précis & exact, & pour Méchanique ce qui ne l'est pas ; et considerant la Geometrie comme une science qui enseigne généralement à connoistre les mesures de tous les cors ; on n'en doit pas plutost exclure les lignes les plus composées que les plus simples, pourvu qu'on les puisse imaginer estre descrites par un mouvement continu, ou par plusieurs qui s'entresuivent & dont les derniers soient entièrement réglés par ceux qui les précèdent : car par ce moyen, on peut tousjours avoir une connoissance exacte de leur mesure. » [39]

Renau ne parle pas de courbe « méchanique » ou « géométrique » mais de « courbe régulière ». Il entend par là les sections coniques : « il faut donc que la ligne ... par conséquent soit une ligne courbe qui ne peut estre de celles qui sont régulières, que cercle ou elipse parce que la parabole ny l'hyperbole ne peuvent avoir de touchante parallele à l'axe... » (fol. 10 r°). Mais la géométrie de Descartes a montré que les sections coniques étaient assurément constructibles par des pantographes particuliers, et elle a même fixé entre autres programmes d'étude aux géomètres, l'analyse des tracés obtenus par ces appareils.

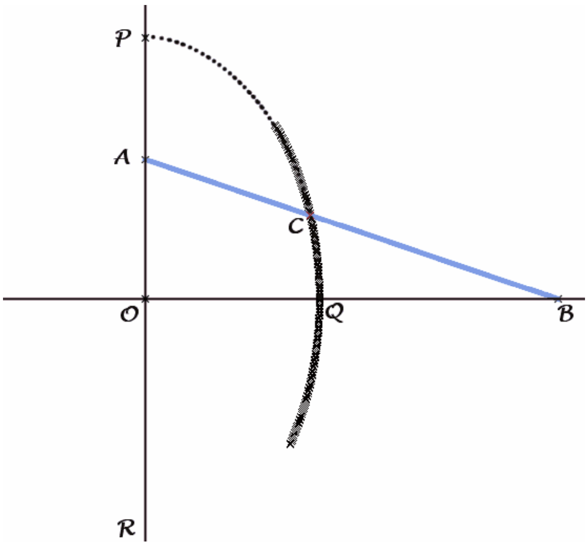

fig. 3 – Notations pour la méthode de la bande de papier

Le trace-ellipse que décrit Renau repose sur la « méthode de la bande de papier » : soit par exemple à tracer une ellipse (PQRP) de centre O, de demi-grand axe OP et de demi-petit axe OQ. La méthode consiste à découper une bande de papier de longueur AB = OP+OQ, et à marquer dessus un point C tel que AC = OQ. On fait ensuite pivoter cette bande de papier de telle façon que son extrémité A glisse constamment le long de la droite ROP, et son extrémité constamment sur la droite OQ : dans ces conditions, le point C décrit l'ellipse cherchée.

37 Une étude de cas suggestive sur la réception de la géométrie cartésienne au XVII^e siècle est donnée par Aldo. Brigaglia, « Algèbre et géométrie dans l'œuvre de Carlo Rinaldini », dans *Géométrie, atomisme et vide dans l'école de Galilée*, ENS Éditions, coll. Theoria, Fontenay-aux-Roses, 1999.

38 Descartes propose de déterminer le centre du cercle osculateur, c'est-à-dire le centre du cercle tangent à la courbe : la tangente est alors simplement la droite perpendiculaire au rayon joignant le centre de ce cercle au point de contact (R. Descartes, *La géométrie*, livre II, §345-346, lignes 28-32, Ch. Adam et P. Tannery éd., vol.VI, Paris, Vrin, 1964-1974).

39 R. Descartes, *La géométrie*, *op. cit.*, livre II, §315-316, lignes 28-32.

L'appareil décrit par Renau, quoiqu'il fût connu au moins depuis Guido Ubaldo[40], avait été généralisé par Frans van Schooten et J. de Witt dans l'esprit de la géométrie cartésienne en 1656. Il est possible que Renau ait lu l'édition commentée de la *Géométrie* de Descartes par van Schooten[41], étant donné son intérêt pour le cartésianisme et les sciences ; quoi qu'il en soit, l'étude des mécanismes et des courbes engendrées (qu'on songe aux engrenages de La Hire et à la théorie des développées de Huyghens) était une tendance forte de la géométrie jusqu'à l'avènement du calcul différentiel[42].

Ainsi, l'emploi d'arcs de coniques pour les tracés de la carène nous garantit l'existence d'une machine pour le tracé, en sorte que l'on pourra proposer sur ce principe une machine aux ateliers. Mais cet appareil présente un grave inconvénient : il n'est utilisable que pour le tracé des couples (ce qui n'est déjà pas si mal : les charpentiers utilisent deux instruments pour cela !), et n'est d'aucun secours pour former les acculements de varangue et la ligne du fort, qui sont des arcs longs d'une centaine de pieds en général : la taille de l'appareil de Renau est totalement inadaptée. Le *Mémoire* doit donc offrir une méthode plus générale : le tracé par affinité d'un cercle[43]. Présentée à la fin du mémoire, cette méthode, qui ne fournit qu'une construction par points, et non un tracé continu, mécanique, n'a été visiblement indiquée par l'auteur qu'à regret et dans un souci pratique : celui de ne laisser dans l'ombre aucune étape de la construction de la carène. Elle montre que, d'une part, Renau n'a pas étudié en détail le problème des tracés continus de grands arcs d'ellipse, et qu'il n'a donc vraisemblablement pas réinventé la méthode de la bande de papier : car, s'il s'était posé le problème d'une façon très générale d'emblée, il aurait proposé une machine de conformation différente, et utilisable à toutes les échelles de longueur rencontrées ; d'autre part, si la méthode d'affinité indiquée par Renau est d'une grande lourdeur (elle requiert même à l'occasion l'emploi de tables trigonométriques!), elle n'en est pas moins géométriquement exacte : et c'est là un principe auquel l'auteur, on l'a vu, ne souhaite absolument pas déroger. L'exactitude géométrique est le fondement même de sa méthode, parce qu'elle est le gage que les raccordements avec le plat des varangues et les autres plans se fait sans point anguleux, donc sans inconvénients pour l'hydrodynamique du vaisseau.

Cependant, pour former l'arc (d'un couple ou d'une lisse), la donnée des extrémités est évidemment insuffisante : l'information supplémentaire dont on dispose est en général la concavité, ou la connaissance d'un point intermédiaire, ou enfin un centre. Renau observe que dans les façons de vaisseau, l'usage a déterminé un point intermédiaire dans deux cas (fig. 4):

- dans la conduite de la « ligne du fort » ou celle des « ouvertures de varangue », qui correspondent à des vues en plan (horizontales) à deux niveaux différents, c'est la diminution de la ligne du fort (resp. de la varangue) où commencent les façons (fol. 14 v°) ;
- dans la « conduite des acculemens », qui correspond à l'élévation de profil, c'est l'acculement de la varangue où commencent les façons (fol. 11 r°).

Quant à la *conduite des gabarits*, qui correspond à la coupe en travers (transversale) on connaît en fait le centre de l'ellipse (fol. 15 r°) : il s'agit du point situé à hauteur de la ligne du fort, pris à la verticale de l'extrémité de la varangue. Renau n'examine que les coniques, sans autre justification que l'unicité de détermination de la courbe : « Je ne diray point qu'il faut faire passer par ces points la ligne courbe la plus convenable pour la façon du vaisseau, parce qu'ils m'assujetissent à une seule ligne, n'y pouvant y en avoir deux, pas mesme d'une mesme nature qui y puissent passer comme je le ferai veoir cy apres. » (fol. 11 r°)

Parmi les courbes géométriques de Descartes, Renau considère donc vraisemblablement les seules coniques, parce que leur degré correspond à la donnée de trois points exactement : une courbe géométrique de degré supérieur demanderait des

---

40 Proclus de Lycie (410-485) est le premier auteur qui évoque cette construction dans ses *Commentaires sur le premier livre d'Euclide* de (commentaire sur la définition n°4 du livre I). Le commentaire de Proclus a peut-être inspiré Guidobaldo dal Monte, qui décrit le même instrument dans sa *Planisphærium universalium theorica* (1579).

41 Renatus Descartes, *Geometria* suvi de *Exercitationum geometricárum* (Frans van Schooten) *et Elementa curvarum (J. de Witt),* 2e éd. Elzevier de 1656. Le professeur hollandais y traite la question suivante : trouver le lieu décrit par le sommet d'un triangle dont les deux autres sommets glissent le long de deux droites sécantes. Une machine similaire à celle de Renau est décrite dans la *Planisphærium Universalium Theorica* de Guidobaldo dal Monte (1579) : selon Chasles, l'idée de ce tracé vient d'un passage de Proclus (*Commentaire sur le 1er livre des Eléments d'Euclide*, définition 4).

42 Henk Bos, *Redefining geometrical exactness*, Springer Verlag, New York, 2001.

43 Méthode démontrée par Apollonius de Perge *Traité des sections coniques*, Livre III, prop. LII. trad. P. ver Eecke, Paris, Blanchard, 1969.

données supplémentaires. Et la seule conique possédant des tangentes orthogonales à distance finie est l'ellipse, dont le cercle est bien sûr un cas particulier.

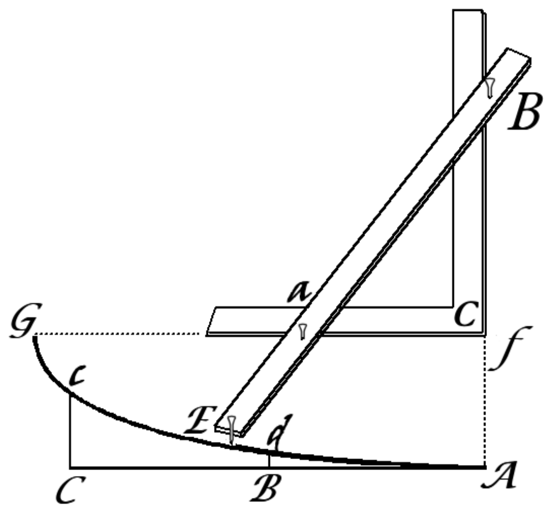

fig. 4 – Trois points déterminent, sous des conditions assez générales, une conique d'axe donné.

Dans le contexte d'une méthode graphique, la description, et donc a fortiori la fabrication d'une carène, supposent une capacité à représenter les surfaces dans l'espace. L'un des reproches de Renau à l'endroit des constructeurs est que, précisément, ils construisent sans plan prédéfini. Les instruments qui les guident (réglette, maître gabarit et trébuchet, ou leurs substituts), donnent en effet l'impression d'un montage effectué de proche en proche, par démaigrissement du maître-couple le long de la lisse, et procédant de l'imitation de modèles prétendument éprouvés. D'une part, les instruments des charpentiers ne s'appuient pas sur une analyse précise, la surface qu'ils engendrent n'est pas réductible à un dessin, encore moins à des raisonnements sur la courbure ou la surface totale (« prise offerte à l'eau »). D'autre part, ils n'offrent aucune garantie sur l'unicité du résultat produit par leur utilisation : ils donnent juste une heuristique pour former une carène, c'est-à-dire des membrures dont la diminution reste compatible avec la flexibilité des lisses et la résistance structurale de l'ensemble dans des efforts de mer et sous des chargements courants.

Or, pour décrire une surface aussi composite qu'une coque de navire présentant des inflexions et des méplats, Renau est confronté aux mêmes difficultés conceptuelles que ses contemporains : si les surfaces de révolution sont réductibles aux considérations sur leurs courbes méridiennes, il n'en va pas de même des surfaces plus composées. Il faut donc disposer d'un outil graphique permettant de ramener l'étude des surfaces à l'étude des propriétés de courbes caractéristiques de cette surface.

Pour atteindre son but, Renau a recours, comme son prédécesseur Matthew Baker[44], au géométral des artistes. Dans cette démarche, la carène est décrite successivement :

- par l'élévation de la ligne des plats de varangue (fol. 11 r°), et de la ligne du fort (fol. 15 r°) ;
- par le plan des ouvertures de varangue (fol. 14 v°) ;
- enfin par l'élévation du maître couple (fol. 15 v°).

Autrement dit, la surface de la coque est déterminée par la donnée de trois familles de courbes planes, décrites sur trois plans mutuellement orthogonaux. Cette procédure, qu'il faut rapprocher de la double projection des architectes, est née à la Renaissance de l'effort de géométrisation des pratiques manuelles. Cet effort a porté sur la réduction de l'art du trait des charpentiers et des tailleurs de pierre, un façonnage, dans les faits, instrumental (s'appuyant sur des gabarits d'équarrissage[45]), en une technique proprement graphique (l'épure). Or, jusqu'à la fin du XVII[e] siècle, les surfaces étudiées en géométrie (tonneau de Johannes Kepler, caténoïde de Fermat et Huyghens, lentilles en hyperboloïde de Descartes ou escaliers de Pascal, par exemple) sont exclusivement des surfaces de révolution, éventuellement tronquées par des plans, ou des polyèdres : la méthode des projections est la seule pour appréhender des surfaces plus générales ; mais vers 1675, son usage ne s'est encore diffusé de l'art des tailleurs de pierre que vers celui des fortifications [46].

Ainsi, à la date de rédaction du *Mémoire*, la description géométrale des surfaces fait partie du bagage des ingénieurs : elle devance, en tant qu'outil, la représentation paramétrique en coordonnées cartésiennes, plus tardive[47]. Ce texte s'adresse donc

44 Michel Dœffler « Le compas et l'herminette », *Journal de la Renaissance*, n°2, 2003, pp.41-52.

45 Les charpentiers utilisaient la sauterelle et le niveau de dévers, les tailleurs de pierre la cerce, la jauge et le contre-panneau. Voir J. Sakarovitch, *op. cit*.

46 J. Sakarovitch, *op. cit*., chap. II « *L'enjeu de la géométrie* », pp. 179-183.

47 La représentation paramétrique en coordonnées cartésiennes ne paraît avoir été utilisée que très progressivement en géométrie pour décrire les surfaces et les courbes gauches. Ce n'est qu'en 1731 qu'Alexis Claude Clairaut l'emploie dans son *Traité des courbes à double courbure*. Il y a

bien à un public de techniciens, mais de techniciens lettrés, puisqu'ils doivent s'être assimilés la pratique de l'épure.

Calculer ou tracer ?

Avant de pouvoir utiliser la machine de Renau pour tracer les arcs d'ellipse, le charpentier doit, sauf pour former les couples, effectuer un calcul intermédiaire : en effet, qu'il s'agisse de la ligne des acculements ou de la ligne du fort, ce qui est donné de la forme du bateau, ce sont trois points particuliers (un des trois points étant un méplat) par lesquels la coque doit passer ; or la « machine » nécessite la détermination de deux longueurs qui en sont dérivées : le grand axe et le petit axe de l'ellipse à tracer.

Dans l'exposé complet de sa méthode, Renau doit donc expliciter le passage entre la donnée des trois points et la valeur de ces deux longueurs ; dans la pratique, on sait que l'ingénieur du roi dressera dans chacun des grands arsenaux des tables numériques pour les charpentiers, les affranchissant de ces calculs. Dans sa démonstration, Renau doit ainsi caractériser la courbe « ellipse » par des relations de longueurs, ou alors produire une construction géométrique des axes principaux à partir de la position des trois points donnés : c'est la première voie qu'il choisit, une voie de calcul pur.

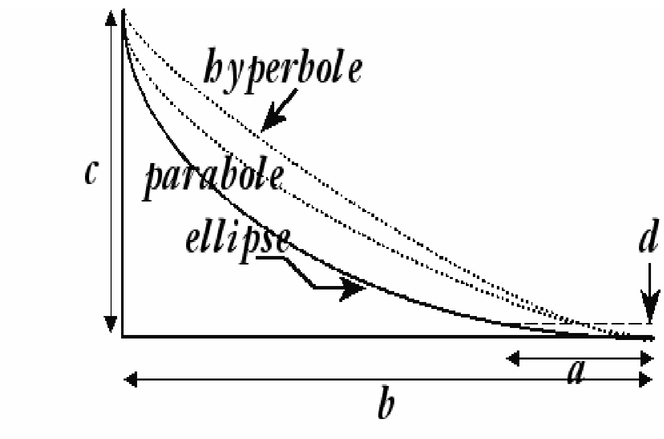

fig. 5 – L'ellipse impose une condition géométrique sur le point intermédiaire

certainement une étude à mener qui détaillerait par quels processus la méthode Clairaut a été élaborée. Rétrospectivement, on peut remarquer que les deux principaux ingrédients de la méthode paramétrique sont apparus chez Descartes : les coordonnées, et la génération cinématique d'un ensemble continu de points, courbe ou surface.

Ce choix peut s'expliquer par la difficulté qu'aurait présenté une construction purement géométrique des axes lorsque les trois points donnés sont absolument quelconques : car dans le cas général, un sommet et deux autres points « au hasard » déterminent une conique (ellipse, parabole ou hyperbole), mais pas nécessairement une ellipse. Autrement dit, l'ellipse impose une condition supplémentaire à la géométrie de la coque (cf. fig. 5) : Renau établit en effet que, pour joindre deux points distants de b et dénivelés d'une hauteur c, le point intermédiaire distant de a doit avoir une hauteur d comprise strictement entre deux bornes :

$$0 < d < c \times \frac{a^2}{b^2}$$

Si tel n'est pas le cas, la conique d'interpolation est en général une hyperbole (un cas exceptionnel et de transition étant évidemment la parabole, dans le cas d'égalité) : la condition de tangente verticale ne peut être satisfaite, et la coque présente un point anguleux. Si « la hauteur d'acculement à l'endroit où commencent les façons » n'est pas comprise dans des bornes assez resserrées, l'appareil de Renau devient inutilisable. Une construction absolument générale aurait exigé une démarche « à la Desargues » c'est-à-dire, en termes modernes, « projective » : la voie algébrique a sans doute paru plus claire à Renau.

Reste à caractériser algébriquement l'ellipse : quelle propriété fondamentale pouvait-on admettre au XVII[e] siècle dans un texte destiné à des techniciens ? L'enseignement des sections coniques ne fait pas partie du cursus élémentaire en géométrie, qui recouvre *grosso modo* les livres I à VI des *Eléments* d'Euclide, la trigonométrie et quelques propriétés des surfaces et volumes de solides tirées d'Archimède : en somme, les connaissances déjà disponibles dans les universités médiévales. Le traité fondamental d'Apollonius de Perge sur les *Coniques* est trop technique pour pouvoir faire école, de même que la *Collection mathématique de Pappus*, dans laquelle Descartes a étudié. Le même Descartes indique (dans sa *Dioptrique*) que la construction de l'ellipse par la « méthode du jardinier » (une corde tendue sur deux piquets) est connue, mais elle ne se prête guère au calcul des proportions.

La propriété sur laquelle Renau identifie sa courbe procède de cette idée que l'ellipse est un cercle contracté dans une direction : pour tout point

E de l'ellipse, G étant la projection de E sur le grand axe (KC), la proportion suivante est vérifiée :

$$\frac{KC^2}{KC^2 - CG^2} = \frac{CF^2}{GE^2}$$

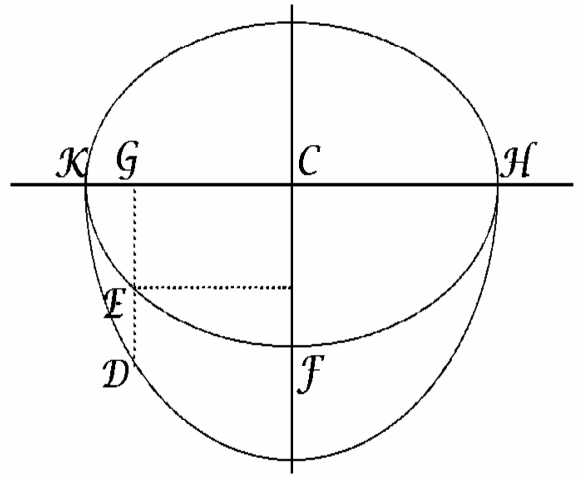

fig. 6 - Notations pour les proportions dans une ellipse

Que traduit cette proportion ? Si l'on trace le cercle de centre C et de rayon KC, et que, prolongeant GE par delà le point E, l'on porte le point D intersection de ce cercle et de la droite (GE),

$$KC^2 - CG^2 = DC^2 - CG^2 = DG^2$$

de sorte que la relation ci-dessus n'exprime rien d'autre que la proportion « GE est à GD comme CF est à KC » : autrement dit, l'ellipse est l'image d'un cercle par affinité. C'est cette même caractérisation que Renau utilise plus loin dans le dernier procédé de construction indiqué dans le mémoire, lorsque sa machine est trop petite pour former les arcs les plus allongés décrivant la carène.

La relation caractéristique de l'ellipse que nous venons d'indiquer n'a pas un caractère vraiment algébrique, dans la mesure où elle exprime une proportion. D'ailleurs Renau emploie pour l'écrire une notation « traditionnelle » :

$$\square KC . \square KC - \square CG :: \square CF . \square GE$$

ce qui reflète le caractère familier des relations de proportion pour ses lecteurs [48]. Au contraire, les *Regulæ* et la *Géométrie* de Descartes avaient entre autres pour objet de montrer que l'on peut s'affranchir, moyennant le respect de certaines règles, du concept de proportionnalité pour écrire les relations entre grandeurs ; et que, au lieu de l'écriture « géométrique »

$$a . b :: c . d$$

l'écriture « polynomiale »

$$a{\times}d - b{\times}c = 0$$

est équivalente et tout aussi rigoureuse[49]. En disciple de Descartes, Renau n'aurait donc pas dû recourir aux proportions : s'il le fait, c'est pour être compris des gens de métier. Il suit peut-être en cela l'exemple de Descartes lui-même, qui, dans sa *Dioptrique*, recourt à l'expression traditionnelle : « a est à b, comme c est à d » pour être compris des artisans. Toutefois, lorsqu'il s'agit d'exprimer la longueur du grand axe de l'ellipse passant par trois points donnés, le résultat ne peut plus s'exprimer sans faire intervenir un radical et un rapport entre des produits de surfaces (fol. 11 v°) : l'intuition géométrique n'est plus d'aucun secours.

Le défaut d'unité dans l'exposé mathématique de Renau (un exposé géométrique élaboré jusqu'au folio 11 r°, qui ne peut se poursuivre que moyennant un développement d'algèbre) suggère que l'auteur n'a pas réellement voulu enseigner sa « méthode pour conduire les façons » à ses lecteurs, mais bien plutôt qu'il a cherché à les convaincre de l'unité et de la généralité de la démarche proposée.

Conclusion

L'analyse des façons de vaisseau offerte par le *Mémoire sur la construction des vaisseaux* procède de l'idée que « manœuvre » et « construction » appartiennent aux arts mécaniques, et que, par consé-

48 Sur ce sujet, voir Jean Dhombres, « La culture mathématique au temps de la formation de Desargues : le monde des coniques », dans J. Dhombres, Joël Sakarovitch éd., *Desargues en son temps*, Paris, Blanchard, 1994, pp. 55-85 ; et Vincent Jullien, « Le concept euclidien de proportion », dans Michel Blay, Robert Halleux éd., *La science classique, Paris,* Flammarion, 1998, pp. 506-509. Il faut noter que ces relations de proportions, si elles traduisent, de notre point de vue moderne, une égalité de fractions, exprimaient plutôt une relation géométrique entre quatre longueurs.

49 L'explication détaillée est donnée dans les « Règles pour la direction de l'esprit » (règles XVII et XVIII), notamment dans l'édition annotée par L. Brunschvicg (rééd. Garnier, 1998, pp. 191-202). Le livre I de *La géométrie* de Descartes est l'aboutissement de cette méthode algébrique (titre « Comment il faut venir aux équations qui servent à résoudre ces problèmes »), mais il la décrit aussi avec moins de détails.

quent, leur dénominateur commun ne peut être qu'un discours raisonné sur le mouvement. Partant de cette formulation philosophique très générale, l'orientation cartésienne de Renau d'Élissagaray donne à son propos un tour physico-mathématique dont la modernité tranche avec les démarches antérieures. En effet, s'il apparaît aujourd'hui que l'émergence d'une physique mathématique, issue de la science galiléenne, devait tôt ou tard se décliner en un nouveau paradigme technique, force est de constater qu'en 1680, seule l'optique instrumentale avait réellement bénéficié d'une théorie mathématique féconde pour l'invention.

Que la pensée cartésienne ait inspiré une réforme, même limitée dans ses résultats, dans la pratique des arsenaux, ne serait donc pas un moindre mérite. Depuis la mort de Bernard de Fontenelle et le triomphe sans partage des principes newtoniens, la philosophie naturelle de Descartes s'est acquise, par ses aspects spéculatifs et ses raisonnements analogiques, mauvaise réputation. Ce n'est pas seulement que les canons de la science moderne lui soient en partie étrangers : sa capacité à agir sur la Nature est mise en cause et il semble *a fortiori* paradoxal qu'elle ait pu susciter une forme primitive d'ingénierie. Or, tant la théorie du mouvement que la géométrie utilisées par Renau d'Élissagaray sont fortement empreintes des idées et de la terminologie cartésiennes. Un temps obscurcie par un débat avec Huyghens sur les principes, puis par la confrontation entre le père Hoste et le vice-amiral Tourville, la démarche initiée par Renau d'Élissagaray – combiner la mécanique mathématique à la technique de fabrication – aura tout de même inspiré la génération de Pierre Bouguer. Les racines cartésiennes de cette démarche sont restées enfouies.

Annexe

poussée, résistance et vitesse du navire

Renau d'Élissagaray expose sa théorie en s'appuyant sur le fait que le navire, sous l'action antagoniste de la propulsion du vent et de la résistance de l'eau, est animé d'une vitesse constante. Dans le *Mémoire*, ce fait expérimental est expliqué (plus que réellement démontré) par une soustraction de mouvement (c'est-à-dire, en termes modernes, de vitesse) de l'eau au vaisseau, dans une direction précise. Cette soustraction devrait, dans une optique cartésienne, être instantanée.

La science newtonienne devait, à son tour, rendre compte de la vitesse constante des vaisseaux sous un vent constant : mais dans le contexte d'une explication dynamique, la démonstration procède d'un bilan de forces (c'est-à-dire de grandeurs homogènes à un poids) agissant sur le mobile, et développant ses effets dans la durée. C'est donc parce que la résistance de l'eau à la marche du navire dépend de la vitesse de ce navire, que la vitesse acquise par le navire sous un vent constant peut être bornée par une certaine limite. De manière algébrique,

x	position du vaisseau, comptée le long de sa trajectoire
F	poussée exercée sur le navire, supposée constante
T	résistance opposée par le fluide au vaisseau, ou force de traînée

T dépend de la vitesse du navire, et s'oppose à elle. Ainsi, *t* désignant le temps

et $v = \dfrac{dx}{dt}$ la vitesse du vaisseau, on pourrait écrire :

$$T = - h \times f(v)$$

où *f* est une certaine fonction et *h* est un « coefficient hydrodynamique » dépendant de la forme du mobile (plus ou moins effilé ou caréné), de la nature du fluide, etc. D'après la loi de la dynamique, *m* désignant la masse inertielle du vaisseau,

$$m \times \frac{d^2x}{dt^2} = T$$

Si l'on connaît la vitesse initiale v_0 du navire (qui peut être nulle, le navire étant initialement au repos), il est possible d'exprimer la vitesse en fonction du temps écoulé t. Lorsque la loi de résistance est une certaine puissance de la vitesse du vaisseau, la loi de vitesse s'exprime analytiquement[1].

- Dans le cas où la résistance est proportionnelle à la vitesse du vaisseau, ce dernier est animé d'une vitesse qui, partant de la vitesse initiale v_0, décroît rapidement vers une vitesse limite *P/h*.

- Dans le cas où la résistance est proportionnelle au carré de la vitesse du vaisseau, le vaisseau est animé d'une vitesse qui, partant de la vitesse initiale v_0, décroît régulièrement vers une vitesse limite $\sqrt{}P/h$.

La différence essentielle entre la théorie de Newton et celle du *Mémoire sur la construction des vaisseaux*, est que la description de Newton est dynamique : la vitesse du vaisseau se stabilise dans le temps ; alors que pour Renau, l'échange de vitesse entre les fluides et le navire est instantané.

Une dizaine d'années après la rédaction du *Mémoire*, Renau d'Élissagaray, dans un traité fondateur *De la Théorie de la manœuvre des vaisseaux* (1692), reprend en détail sa démonstration sur la « manœuvre au près » et précise, à cette occasion, ses idées sur la poussée et la résistance. La poussée est provoquée naturellement par l'action du vent sur les voiles. Des considérations sur le choc des particules d'air amènent Renau à conclure que cette poussée est « en raison doublée » (c'est-à-dire proportionnelle au carré) de la vitesse relative du vent sur la voile ; elle est aussi proportionnelle à la densité de l'air, puisqu'un fluide plus lourd frappe plus fort ; enfin elle est proportionnelle à la section efficace de voile exposée au courant d'air.

Par un raisonnement sur le mouvement relatif de l'eau par rapport à la coque du navire, Renau attribue la même forme à la loi de résistance de l'eau. Cette

1 On trouvera les détails de ce calcul classique (dans le cadre du « problème balistique ») en annexe de l'ouvrage de Michel Blay, *La naissance de la mécanique analytique*, Paris, PUF, 1992 ; aussi ne le reprendrons-nous pas ici, n'indiquant que la forme du résultat obtenu.

résistance est proportionnelle au carré de la vitesse relative du navire, proportionnelle à la densité de l'eau, proportionnelle à la section efficace de coque battue par l'eau. Toutefois, dans le raisonnement, la vitesse du navire est modifiée de façon graduelle :

> « La vitesse que reçoit le vaisseau au premier instant est très petite, & elle s'augmente à chaque instant. Mais le vaisseau ne pouvant avancer qu'il ne déplace l'eau, il y trouve de la résistance. Pour soumettre cette résistance aux principes qu'on a établis, d'une manière facile à concevoir ; il faut seulement remarquer que c'est visiblement la même chose d'imaginer que le vaisseau en mouvement pousse l'eau, qu'on suppose en repos, en la rencontrant, avec une certaine vitesse, ou que c'est l'eau, qui étant en mouvement, vient choquer avec la même vitesse le vaisseau qui est en repos. On voit clairement que l'une & l'autre de ces suppositions produisent séparément le même effet, & qu'elles peuvent être prises l'une pour l'autre.
> Il suit de là clairement que la résistance que fait l'eau au mouvement du vaisseau, devient plus grande à mesure que l'impulsion continuelle du vent augmente les degrés de vitesse du vaisseau ; & que ces résistances de l'eau, qui vont en augmentant, sont entre elles comme les carrés des vitesses du vaisseau à mesure que les vitesses du vaisseau augmentent. »
>
> Mais quand le vaisseau a déjà quelque vitesse, il suit le vent ; & le vent n'agit plus sur la voile en la rencontrant avec la même vitesse, mais seulement avec le surplus de sa vitesse sur celle de la voile. La vitesse du vent sur la voile, & par conséquent la force du vent, va donc en diminuant depuis le premier instant de l'action du vent sur la voile ; la résistance de l'eau au contraire va en augmentant depuis le même premier instant » [2]

Il semble bien qu'à ce moment, Renau ne soit plus aussi cartésien qu'en 1679. C'est aussi ce que reflète la lettre à Huyghens de janvier 1694, dans laquelle Renau récuse un « principe faux » qu'il a pris, dit-il, du livre de Pardies : celui de déduire du rapport des « forces » exercées sur le navire la direction de la vitesse du vaisseau. À ce moment de la controverse, Renau considère effectivement les forces exercées comme des grandeurs homogènes à des poids ; et dans la mesure où la force de résistance de l'eau à l'avancement du vaisseau dans une direction n'est pas une fonction linéaire de sa vitesse dans cette même direction, la direction de la vitesse ne se déduit plus directement de la direction des forces.

Or, chez Pardies, les forces sont des « forces de vitesse » (des intensités de vitesse) dans chaque direction, et la vitesse du vaisseau n'est qu'une vitesse empruntée au fluide environnant : l'idée d'assimiler une force à un « poids » est étrangère au cartésianisme originel. Seulement le manque de clarté de la terminologie mécaniste de Descartes, qui a abusé Renau dans sa correspondance avec Huyghens, a mal survécu au dépassement de la physique aristotélicienne (où la vitesse du mobile était, par principe, proportionnelle à l'intensité du « poids » moteur) par la nouvelle dynamique de Huyghens, Newton et Leibniz.

2 Renau d'Élissagaray, *Mémoire où est démontré un principe de la méchanique des liqueurs dont on s'est servi dans la Théorie de la manœuvre des vaisseaux, et qui a été contesté par M. Hughen*, s. n., 1685-1695 (l'ouvrage est numérisé sur Gallica). La date est peut-être plus tardive d'après l'introduction de Renau (au moins 1696). De plus, Jean-Étienne Montucla (*Histoire des mathématiques*, 1754, partie V, livre VIII, p. 412) date ce livre de 1712, ce qui est tout-à-fait plausible : « Cette espèce de triomphe [de Bernoulli] auroit peut-être duré beaucoup plus long-temps, si un nouveau mémoire de Renau, publié en 1712, sur la question agitée entre luiet Huygens, n'eût été pour Bernoulli un motif d'examiner encore de quel côté etoit la raison ». C'est aussi l'avis d'un antiquaire de Bayonne, Jean de Bagneux, auteur en 1932 d'une monographie sur Renau, qui écrit : « La guerre lui laissant du répit, Renau reprend avec ardeur ses travaux scientifiques et en 1712 publie un *Principe de la méchanique des liqueurs* ».