Bureau des Longitudes

Collection du Bureau des longitudes

Volume 4

PER HANC PROSUNT OMNIBUS ARTES

ACADÉMIE DE MARINE

Bureau des Longitudes

BORDA

Actes du colloque du lundi 3 juin 2019

École Militaire

Collection du Bureau des longitudes - Volume 4

PER HANC PROSUNT OMNIBUS ARTES

ACADÉMIE DE MARINE

Bureau des Longitudes

BORDA

Actes du colloque du lundi 3 juin 2019
École Militaire

Bureau des longitudes

© Bureau des longitudes, 2019

ISBN : 978-2-491688-00-4
ISSN : En cours

Grâce aux progrès des connaissances et à une approche scientifique du monde, le XVIIIème siècle fut aussi celui des Lumières pour les sciences de la mer, la marine et la navigation. Dès 1752, pour mettre ces connaissances nouvelles au service des navigateurs, l'Académie de marine, « société de pensée », est fondée à Brest par des officiers de marine, des astronomes, des ingénieurs, des dessinateurs, pour, dans l'« esprit des Lumières », éclairer la pratique de la navigation en faisant appel aux progrès des sciences et des techniques.

En 1795, la Convention crée le Bureau des longitudes qui, dans le même esprit que l'Académie de marine, doit répondre au besoin de l'application de la connaissance scientifique, astronomiques notamment, à la navigation, avec en particulier d'établir une méthode permettant la détermination précise de la longitude.

Un homme, le chevalier Jean-Charles de Borda (1733-1799), membre de ces deux institutions représente bien ces nouveaux marins « savants » associant leur expérience de la mer et les progrès des sciences. Officier du génie de l'armée de terre il s'est intéressé rapidement à la construction des navires et à la navigation et il entre, en 1762, en tant qu'officier, dans la marine où il exerce différentes fonctions y compris de commandement ; en tant que major de l'escadre du vice-amiral d'Estaing, il participe à différentes batailles. Il expérimente les horloges marines et, en 1772, il invente un instrument qui permet la mesure avec une très grande précision de la lecture des angles sur 180°, instrument baptisé cercle hydrographique Borda, qui va être pendant deux siècles un des instruments de base des travaux hydrographiques. Par la suite, en 1784, avec l'ingénieur Jacques Noël Sané, il établit les plans des vaisseaux et frégates qui formeront les escadres françaises. Il est l'auteur de nombreux rapports et publications, il est, notamment, un des rédacteurs du rapport du 19 mars 1791 qui définit la valeur du mètre. Bprda fut par ailleurs le premier président du Bureau des longitudes.

L'Académie de marine et le Bureau des longitudes se sont associés pour organiser le 3 juin 2019 dans l'amphithéatre Suffren de l'Ecole militaire une journée consacrée à Jean-Charles de Borda. Quatre orateurs ont présenté divers aspects de sa carrière, dans le domaine maritime, dans ses contributions au Bureau des longitudes et à l'Académie des sciences, et enfin dans le domaine de la métrologie.

Ce document recueille les textes de ces interventions, également accessibles sous forme électronique.

Yves Desnoës
Président de l'Académie de marine

Claude Boucher
Président du Bureau des longitudes

Table des matières

BORDA, MEMBRE DU BUREAU DES LONGITUDES
par Claude Boucher, Président du Bureau des longitudes p. 7

JEAN-CHARLES DE BORDA
par l'Amiral François Bellec, de l'Académie de marine p. 13

BORDA, MEMBRE DE L'ACADEMIE DES SCIENCES
par Jean-Paul Poirier, Membre de l'Académie des sciences p. 21

BORDA ET LE SYSTEME METRIQUE
par Terry Quinn, ancien directeur du Bureau international des poids et mesures p. 27

BORDA, MEMBRE DU BUREAU DES LONGITUDES
par Claude Boucher, Président du Bureau des longitudes

Cette Journée sur Borda organisée conjointement par l'Académie de marine et le Bureau des longitudes donne l'occasion d'évoquer les liens forts qui rattachent ce navigateur au Bureau.

Création du Bureau des longitudes

Le Bureau des longitudes a été institué par la loi du 7 Messidor An III (25 juin 1795). Cette loi de la Convention nationale a été votée après l'audition du rapport enthousiaste et argumenté de l'Abbé Grégoire, qui précise en introduction : « *Je viens, au nom de vos Comités de Marine, des Finances et de l'Instruction publique, vous proposer l'établissement d'un Bureau des longitudes. L'exposé des raisons qui motivent cette demande prouvera l'indispensable nécessité de ce moyen pour faire fleurir notre Marine.* » Il affirme très clairement les buts pratiques : reprendre « *la maîtrise des mers aux Anglais* » grâce à la détermination des longitudes en mer. Ce nouvel organisme doit donc, à l'imitation du Board of Longitudes anglais, créé en 1791, résoudre les problèmes astronomiques que pose la détermination des longitudes, d'où son nom. Mais, à la différence avec ce Bureau anglais, qui était chargé de cette unique mission, et qui sera dissout au début du XIXe siècle, quand cette question sera considérée comme résolue, les attributions du Bureau des longitudes sont multiples.

L'argumentation très détaillée de l'abbé Grégoire montre l'importance des points motivant sa création, chacun d'entre eux constituant un article de la loi. Ainsi,

- Le Bureau a la responsabilité des observatoires astronomiques de la Nation, dont l'Observatoire de Paris et de l'Ecole Militaire, ainsi de tous les instruments astronomiques
- Il est chargé des relations avec les observatoires étrangers
- Il est chargé de la publication de la Connaissance des Temps, ainsi que de diverses publications, notamment celles relatives aux observations astronomiques et météorologiques
- Il est chargé d'améliorer les méthodes de détermination astronomiques
- Le Bureau est également chargé de donner un cours d'astronomie

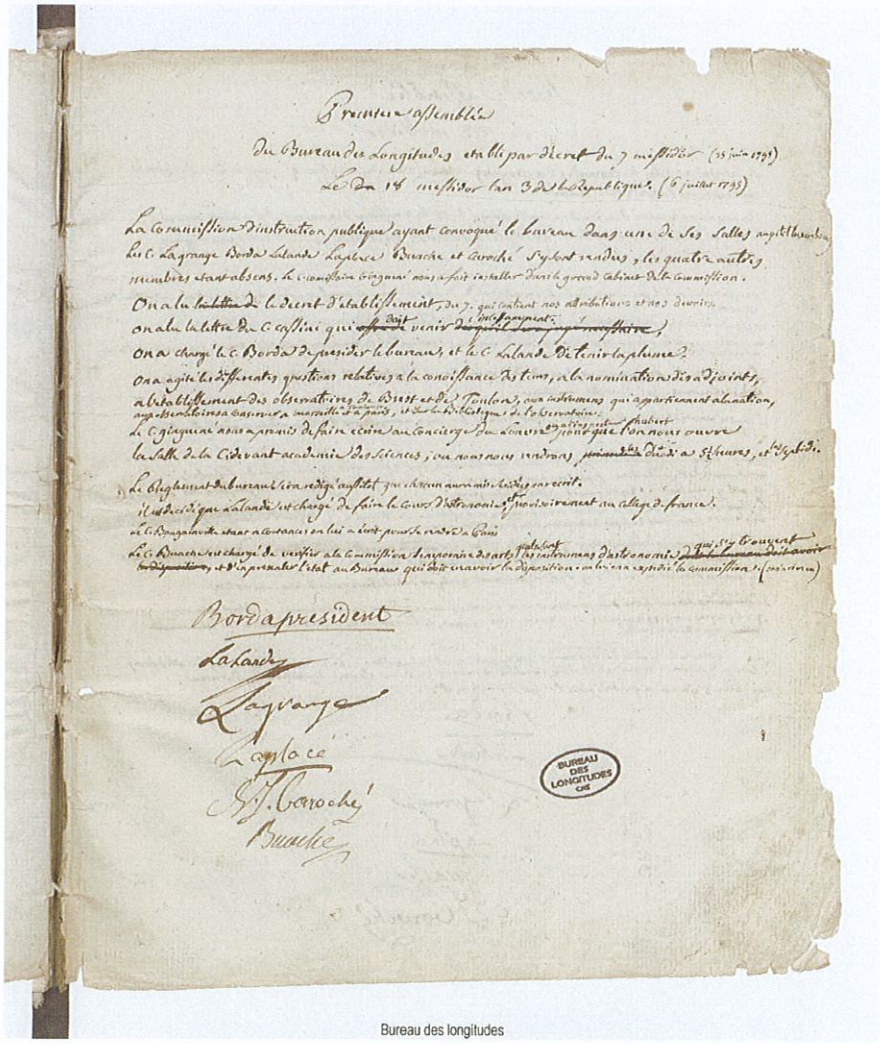
La loi précise également la composition du Bureau, à savoir deux géomètres, quatre astronomes, deux navigateurs, un géographe et un artiste constructeur d'instruments astronomiques.

Le Bureau devra faire un rapport annuel aux autorités et également publier un Annuaire.

La loi précitée donne également les nominations des membres, à savoir :

- Géomètres : Lagrange, Laplace
- Astronomes : Lalande, Delambre, Mechain, Cassini
- Navigateurs : Bougainville, Borda
- Géographe : Buache
- Artiste : Caroché

La première séance aura lieu le 18 Messidor An III (6 juillet 1795) dans une salle du Petit Palais du Luxembourg.


Première assemblée
du Bureau des Longitudes établi par décret du 7 messidor (25 juin 1795)
Le Dn 18 messidor l'an 3e de la République (6 juillet 1795)

La Commission d'instruction publique ayant convoqué le bureau dans une de ses salles, après l'avoir
les C. Lagrange, Borda, Lalande, Laplace, Buache et Caroché, Sylvestre rendus, les quatre autres
membres étant absents, le C. Bougainville nous a fait installer dans le grand cabinet de la commission.
On a lu la lettre du décret d'établissement du 7, qui contient nos attributions et nos devoirs.
on a lu la lettre du C. Cassini qui doit venir incessamment.
On a chargé le C. Borda de présider le bureau, et le C. Lalande de tenir la plume.
On a agité les différentes questions relatives à la connaissance des tems, à la nomination des adjoints,
à l'établissement des observatoires de Brest et de Toulon, aux instrumens qui appartiennent à l'ancienne
académie, à l'assemblée générale, à l'imprimerie, et sur la bibliothèque de l'observatoire.
Le C. Bougainville nous a promis de faire écrire au Concierge du Louvre pour que Hubert
la salle de l'ci-devant académie des sciences, où nous nous rendrons, ~~prochainement~~ à dix à 5 heures, et tous les dimanches.
Le Règlement du bureau sera rédigé aussitôt que chacun aura mis les idées par écrit.
Il est décidé que Lalande est chargé de faire le cours d'astronomie, et Laplace celui au collège de France.
Le C. Bougainville est chargé de faire le cours de navigation.
Le C. Buache est chargé de vérifier à la commission l'inventaire des arts, et les instrumens d'astronomie, qui sont au Louvre, ~~et d'en prendre l'état~~, et d'en prendre l'état au Bureau qui doit en avoir la disposition, on lui en a remis la commission. (suite au verso)

Borda président
Lalande
Lagrange
Laplace
J.J. Caroché
Buache

BUREAU DES LONGITUDES CNS

Bureau des longitudes

Borda au Bureau des longitudes

C'est ainsi que Jean-Charles de Borda apparaît comme l'un des membres fondateurs du Bureau des longitudes. Né à Dax le 4 mai 1733, il fut d'abord officier de l'Armée, puis de la Marine. Ses multiples activités, dont divers travaux scientifiques en mathématique, hydraulique, mécanique, métrologie, génie maritime, astronomie, géodésie ou cartographie, sont également exposées par les autres intervenants de ce colloque.

L'examen des procès-verbaux des séances du Bureau des longitudes est désormais considérablement facilité par un site web public qui permet la consultation de ces procès-verbaux désormais numérisés. Ce travail est l'œuvre d'une équipe de chercheurs en histoire des sciences rattachée à l'Université de Lorraine, avec le soutien du Bureau des longitudes.

Avant tout, il faut mentionner que Borda a été le premier président du Bureau.

Un examen chronologique des procès-verbaux permet d'inventorier les interventions de Borda pendant ses dernières années, jusqu'à sa mort en 1799 :

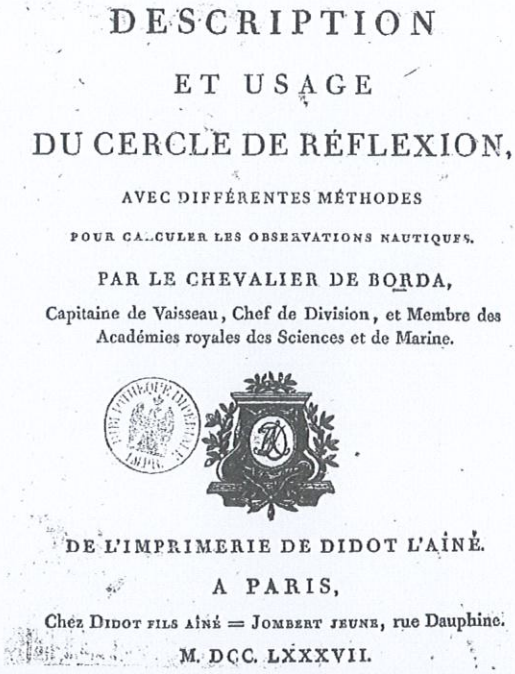
- 13 septembre 1795 : Borda présente sa table des sinus décimaux
- 18 novembre 1795 : Borda rapporte sur un travail de Mendoza sur la réduction des distances, soumis à publication
- 3 décembre 1795 : Borda propose la création par le Bureau de boussoles étalon pour contrôler celles des navires
- 2 mars 1796 : Borda demande que le Bureau trouve un atelier pour Lenoir, qui vient par ailleurs de livrer un cercle de Borda à l'observatoire de l'Ecole militaire
- 22 mars 1796 : Borda présente une méthode pour améliorer les corrections de réfraction et de parallaxe
- 15 juillet 1796 : Borda présente la proposition de base géodésique de Perpignan
- 22 juillet 1796 : Borda présente un projet de baromètre étalon à faire construire par le Bureau
- 20 octobre 1796 : Borda est chargé d'établir de nouvelles tables relatives aux unités de mesure, en vue d'une publication dans la Connaissance des Temps
- 24 novembre 1797 : Borda présente une nouvelle méthode de calclu des différences logarithmiques
- 26 aout 1798 : dans le cadre de corrections proposées par la Commission des Poids et Mesures pour l'Annuaire, Borda propose d'y ajouter d'autres tables
- 22 février 1799 : on annonce que Borda est décédé trois jours avant

Cet inventaire est une bonne illustration de la diversité des contributions de Borda pendant ces quatre années.

Il nous a semblé opportun de revenir sur quelques contributions antérieures dans des domaines de compétence du Bureau des longitudes, sans retenir les sujets touchant la navigation ou la métrologie exposés par ailleurs.

Le cercle de réflexion de Borda

C'est lors de l'expédition que Borda fit sur le Flore en 1771 qu'il eut l'occasion de trouver des améliorations au cercle de Mayer, et spécifia ainsi un nouvel instrument qui fut d'abord réalisé par un constructeur anglais en 1775, puis par Lenoir en 1783. La description détaillée de cet instrument fut d'ailleurs publiée en 1787 :


DESCRIPTION

ET USAGE

DU CERCLE DE RÉFLEXION,

AVEC DIFFÉRENTES MÉTHODES

POUR CALCULER LES OBSERVATIONS NAUTIQUES.

PAR LE CHEVALIER DE BORDA,

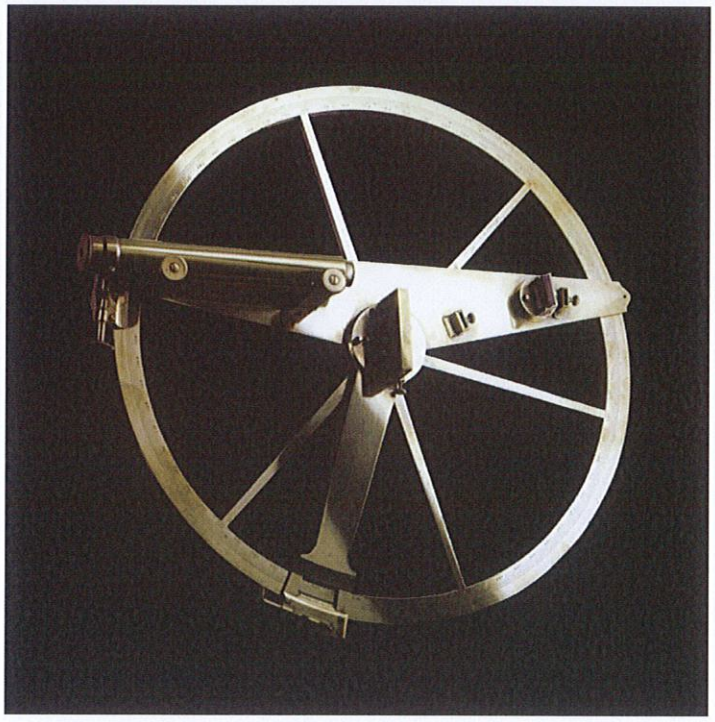
Capitaine de Vaisseau, Chef de Division, et Membre des Académies royales des Sciences et de Marine.

DE L'IMPRIMERIE DE DIDOT L'AÎNÉ.

A PARIS,

Chez DIDOT FILS AÎNÉ = JOMBERT JEUNE, rue Dauphine.

M. DCC. LXXXVII.



Le cercle répétiteur de Borda

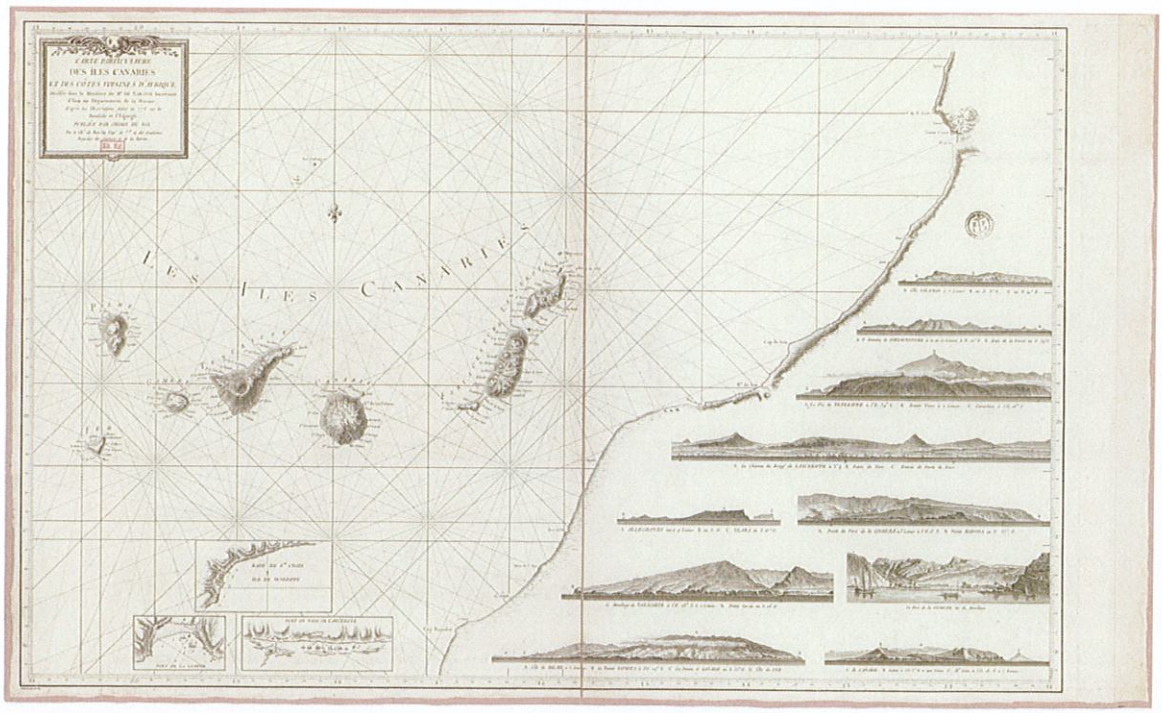
Ce cercle répétiteur fut créé en 1784 et réalisé par Lenoir.

Il fut utilisé pour la jonction géodésique entre la France et l'Espagne en 1787, puis la même année pour le raccordement des méridiens de Paris et Greenwich.

C'est l'un des instruments utilisés pour la mesure de la méridienne de Delambre et Méchain de 1792 à 1798, puis lors de son extension aux Baléares par Biot et Arago en 1806.

Les travaux de cartographie des Canaries

Borda participation à une expédition sur la Boussole de 1786 à 1788 dont l'objectif premier était l'évaluation de montres marines. Ce fut également l'occasion d'établir un certain nombre de cartes couvrant les iles Canaries, les iles du Cap Vert et les côtes d'Afrique correspondantes. Ci-dessous une carte signée Borda, numérisée par la Bibliothèque Nationale :



Cette note a essayé d'évoquer les liens multiples et forts qui existent entre Borda et le Bureau des longitudes, qui souhaite pour conclure souligner la fructueuse coopération qui se perpétue avec l'Académie de marine, et que l'organisation conjointe de cette Journée consacrée à Borda illustre bien.

JEAN-CHARLES DE BORDA
par l'Amiral François Bellec, de l'Académie de marine

Né le 4 mai 1733 à Dax, le 10e enfant de Jean Antoine de Borda devra une carrière hors du commun à l'heureuse conjonction de son intelligence exceptionnelle et du souffle qui rénove la navigation en général et la marine française en particulier dans le dernier quart du XVIIIe siècle. Il sera l'homme providentiel de la marine. Ses multiples aptitudes s'entrecroiseront tout au long de sa carrière, de ses carrières successives ou simultanées d'ingénieur du Génie d'abord, puis d'ingénieur constructeur de la marine, d'officier de marine plus tard, lieutenant de port et lieutenant de vaisseau à 43 ans, alors qu'il travaille déjà depuis six ans à la longitude au sein de l'Académie de marine.

L'imprégnation maritime d'un surdoué

Après des études chez le Barnabites de Dax, les Jésuites du collège Henri IV de La Flèche remarquent le don exceptionnel de Jean-Charles pour les mathématiques. Il entre à 22 ans dans la compagnie des Chevau-légers de la garde du roi, un corps dont même les hommes du rang sont nobles. Aide de camp du maréchal de Maillebois, il assiste le 26 juillet 1757 à Hastenbeck à la brillante victoire du maréchal d'Estrées sur l'armée hanovrienne, l'une des batailles de la Guerre de Sept-ans. Maillebois s'y est d'ailleurs uniquement employé à gêner l'action de son supérieur qu'il déteste. Borda reste peu aux Chevau-légers, car son *Mémoire sur le mouvement des projectiles* qui retient l'attention de l'Académie des Sciences, le fait diriger vers le Génie militaire. Il est admis en septembre 1758 parmi la vingtaine d'élèves de l'Ecole du Génie de Mézières, réservée sur concours aux jeunes-gens nobles. Il y suit une année de cours de mathématiques, d'hydraulique, de fortification et de stéréotomie, suivie d'une année d'application aux tactiques de sièges et aux levés de plans de villes et de forteresses.

À sa sortie de l'école le 27 septembre 1759 comme lieutenant Ingénieur ordinaire, Borda est désigné pour Dunkerque. C'est là qu'il prend intérêt aux problèmes de la construction navale et de la navigation. Affecté à Brest en 1762, le chef d'escadre de Roquefeuil commandant la marine voit en lui – je cite - « *l'un des meilleurs géomètres de ce temps* », et il le presse de passer dans la marine en lui conseillant de se familiariser avec la construction des vaisseaux. En un temps où les carrières militaires sont poreuses, Bora va glisser, comme Bougainville de la terre à la marine au double titre d'officier et d'ingénieur. Il est nommé lieutenant de port surnuméraire en octobre 1767, et il sera plus tard capitaine lieutenant en second au régiment de Bordeaux. Les lieutenants de ports créés par Richelieu à Bordeaux, Brest et Le Havre, choisis parmi les meilleurs officiers pour entretenir les navires dans les ports, sont un peu dévalués à cette époque, mais c'est une transition naturelle pour cet officier venu du Génie militaire, qui entre d'ailleurs le mois suivant le 14 novembre 1767 dans le corps *des Ingénieurs constructeurs*. C'est la nouvelle appellation des *Élèves constructeurs* formés par l'École

des constructeurs fondée par Duhamel du Monceau. L'Inspecteur général de la marine a ainsi professionnalisé les *Maîtres constructeurs*, eux-mêmes héritiers au début du siècle, des *Maîtres charpentiers* qui avaient tout dans la tête et dans l'œil. L'art intuitif des charpentiers se soumet aux mathématiques. Et justement, les mathématiques sont le fort de Borda.

La construction navale est en cours de rationalisation. Les progrès réalisés dans la fonte et la standardisation des canons augmentent leur puissance de feu, incitant à reconsidérer l'armement des vaisseaux. Un Conseil de construction réuni en 1766 à Brest sous la présidence de Choiseul-Praslin vient de faire prendre au ministre la décision de ne plus construire de vaisseaux inférieurs à 64 canons, et de fixer les mensurations principales de vaisseaux relativement standardisés de 64, 74 et 80 canons. Borda arrive à point nommé pour s'impliquer dans l'histoire de la construction navale. Au même moment, une révolution de la navigation se prépare, analogue mutatis mutandis à celle du GPS : Les deux moyens de mesure de la longitude deviennent opérationnels dans les années 1770. Borda se trouve en situation de contribuer à l'expérimentation et à l'amélioration des instruments nautiques, des horloges et des méthodes d'observation et de calcul. Sous ses deux tricornes, ses intérêts multiformes en feront paradoxalement plutôt un officier savant dans les années 1770-1780 alors qu'il vient d'être nommé ingénieur, et principalement ingénieur dans la décennie suivante, alors qu'il est devenu officier de vaisseau. Ce qui permet de proposer une biographie marine de Borda en deux grandes phases.

Borda officier savant

Dans l'esprit de curiosité du siècle des Lumières et de l 'Encyclopédie, l'Académie de marine avait été fondée à Brest en 1749 à l'initiative du capitaine de vaisseau Bigot de Morogues, l'un de ceux que l'on nommait les « officiers savants », et de Duhamel du Monceau. Cette société d'initiative locale avait été dotée en 1752 d'un règlement lui donnant pour mission – je cite - « *d'éclairer la pratique de la navigation en la soumettant à l'épreuve d'une théorie rigoureuse* ». Elle entendait répondre ainsi à la remarque fondamentale de Cassini : « *Il vaut mieux ignorer où l'on est et savoir qu'on l'ignore, que de se croire avec confiance où l'on n'est pas.* » Mais elle allait aussi s'appliquer à la construction et à la manœuvre des vaisseaux, à l'hydrographie, à l'hygiène et à la santé en mer.

Quand l'Académie de marine coopte Borda comme membre ordinaire le 24 avril 1769, elle est en cours de réorganisation car elle vient d'être érigée en Académie royale. Les confrères de Borda sont ou seront des astronomes dont Lalande, Rochon ou le chanoine Pingré, des hydrographes comme Après de Mannevillette ou Bellin, des mathématiciens comme Bouguer et le père Chattelard, des ingénieurs comme Sané ou Choquet de Lindu. La plupart sont des officiers de marine ouverts aux mathématiques tels que Claret de Fleurieu, Bougainville, auteur d'un *Traité de calcul intégral*, ou Fleuriot de Langle capable de remplacer au pied levé son astronome au cours de l'expédition Lapérouse. Les travaux de la compagnie sont d'ailleurs perturbés pendant les cinq ans de guerre d'Amérique car ils sont d'abord des officiers de vaisseau détournés des exercices intellectuels par les opérations navales. Plusieurs, comme Duhamel du Monceau, Bezout et le marquis de Chabert-Cogolin sont membres de l'Académie des Sciences comme Borda le sera lui-même plus tard.

Il n'existe pas encore d'école navale, les futurs officiers se formant dans les compagnies de gardes puis au cours d'embarquements d'application. Borda s'instruit en tout cas puisqu'il est désigné le 10 octobre 1771 comme commandant en second de la frégate *la Flore*. C'est un embarquement d'officier de marine, mais pas seulement, car il va plonger Borda dans la question de la longitude. On y travaille depuis une soixantaine d'années tant le seuil technique de sa résolution est difficile à atteindre. Le principe de la longitude a été exposé depuis longtemps. Sa détermination par la mesure des distances lunaires grâce à l'arbalète a été énoncée par Johann Werner de Nuremberg en 1514. Sa théorie a été reprise et commentée par l'astronome saxon Peter von Bienewitz, dit Apian. La couverture de son *Introductio Geographica* montrait la mesure d'une distance lunaire avec une arbalète. La méthode restait purement théorique car son exploitation utile à la navigation supposait la disposition d'instruments de mesure, d'un catalogue d'étoiles et d'éphémérides d'une précision hors de portée en ce temps. L'observatoire de Paris édifié en 1667 pour Cassini et celui de Greenwich 8 ans plus tard pour Flamsteed avaient eu explicitement pour mission de rectifier le catalogue des étoiles et les éphémérides, afin de fournir les bases astronomiques du calcul de la longitude, mais c'est la détermination anglaise du *Longitude Act* qui avait donné en 1714 l'impulsion déterminante à sa résolution.

La récompense de 20.000 livres offerte par le Parlement britannique à toute méthode de nature à fournir la longitude à un demi-degré près après un voyage transatlantique, la dotation en France par le conseiller au Parlement Rouillé de Mesly d'une thèse à soumettre à l'Académie des Sciences ont stimulé les observatoires, les horlogers et les inventeurs farfelus. Elles ont fait naître une émulation voire une rivalité entre astronomes et horlogers. Ils sont les uns et les autres en train d'aboutir. *La Flore* sur laquelle embarque Borda le 10 octobre 1771, est commandée par le lieutenant de vaisseau Verdun de La Crenne qui vient d'être élu à l'Académie de marine. La frégate va expérimenter les horloges marines n° 6 et n° 8 de Ferdinand Berthoud. Cet horloger français d'origine suisse, nommé horloger du roi, sera le premier fournisseur des montres de la marine. La frégate emporte également deux prototypes de son concurrent Pierre Le Roy, excellent horloger lui aussi mais qui ne parviendra pas à construire en série des horloges opérationnelles. Les méthodes de calcul de la longitude par les distances sont également à tester. Outre le graphique de l'abbé de La Caille, divers imprimés pour conduire les calculs sont proposés aux navigateurs. Ils évalueront aussi le *British Mariner's Guide* ainsi que le nouveau *Nautical Almanac* de l'astronome royal Maskelyne. Le chef de la mission est le chanoine Pingré. Ce théologien passionné par l'astronomie et par ses applications nautiques, auteur d'éphémérides, est astronome de la marine, et expérimentateur à ce titre des horloges, des instruments et des méthodes. Il a déjà dirigé en 1767 le voyage de *l'Aurore* et en 1768 la campagne de l'*Isis* chargées de telles missions. La *Flore* décrit une boucle atlantique par les îles du Cap Vert, les Antilles, Terre-Neuve, la Norvège, la Baltique et la mer du Nord, et rentre à Brest le 8 octobre 1772. À la suite de cette campagne, Le Roy est récompensé par un nouveau prix de l'Académie, et la pension de Berthoud est portée de 3 000 à 4 500 livres.

L'année 1772 est un tournant de l'art français de naviguer. L'Académie de marine prend l'initiative de faire connaître en France les travaux britanniques. Elle publie l'analyse et l'explication du tout nouveau *British Mariner's Guide*, qui a reçu l'approbation de Borda. La méthode des distances lunaires y est expliquée. Et l'*Almanach Nautique*,

avec les *Tables et instructions propres à la détermination des longitudes en mer pour l'année 1773*. L'ouvrage recopie explicitement le *Nautical Almanac* britannique faute du temps et du budget nécessaire pour faire mieux. Sans lui savoir gré de cette initiative utile aux navigateurs, on lui fera le reproche immérité et sans doute teinté d'aigreur, qu'il se réfère au méridien de Greenwich. L'Académie des Sciences reprendra la publication des tables anglaises dans la *Connaissance des Temps* et la Convention deux décennies plus tard fondera le Bureau des longitudes pour – je cite - « *étouffer la tyrannie britannique* ».

Cette même année 1772, Borda confie les dessins d'un instrument de son invention au mécanicien Etienne Lenoir. Vingt-trois ans avant de présider le 6 juillet 1795 au Petit Luxembourg la première réunion du Bureau des longitudes, Borda est déjà investi dans l'évaluation de leur résolution. Il va intervenir en dotant les navigateurs d'un nouvel instrument : le cercle de Borda. Les instruments à double réflexion, l'octant première retombée du *Longitude Act*, et son avatar le sextant au champ élargi pour la mesure des distances lunaires ont été améliorés dans les décennies 1760-1770, grâce aux machines à diviser les limbes et à l'invention du vernier. Les procédures de leur réglage et de l'optimisation de leur utilisation les ont rendus compatibles avec la qualité des nouvelles tables des astronomes. Mais s'ils apportent une précision accrue aux latitudes et partant au recalage d'une des coordonnées des cartes marines, ils manquent d'envergure pour la mesure des distances horizontales entre la Lune et le Soleil. D'autre part on doit encore améliorer la précision des observations en raison de la multiplication systématique par vingt-sept des erreurs commises sur les données des calculs. Pendant que la distance entre la Lune et une étoile varie d'une minute d'arc, la Terre tourne de 27' 15'', soit d'une différence de longitude vingt-sept fois plus grande. Le coefficient est de vingt-neuf pour les distances luni-solaires.

Tobias Mayer, directeur de l'observatoire allemand de Göttingen, avait proposé en 1755 en complément de ses éphémérides lunaires un nouvel instrument : le cercle de réflexion. Son intérêt était double. Il étendait d'abord les capacités de mesures angulaires au maximum de 180°, mais il était aussi plus précis. Mayer avait imaginé que la répétition de mesures tout au long d'un limbe circulaire diminuerait les erreurs instrumentales de division et d'excentricité, en les moyennant. L'expérimentation du cercle de Mayer, avait été décevante. Il était malcommode d'emploi et surtout, la reprise nécessaire du parallélisme des deux miroirs entre chaque mesure allongeait trop le délai de répétition eu égard au déplacement relatif des astres visés. C'étaient d'ailleurs ces imperfections qui avaient donné l'idée d'agrandir l'octant au sextant.

Borda imagine comment contourner le défaut de principe de l'excellente idée du cercle de répétition. Le positionnement mécanique de la lunette et du grand miroir du cercle de Mayer est conçu pour répéter les observations dans le même sens. Borda dessine un cercle réduit à une trentaine de centimètres, permettant, grâce à un positionnement adéquat de la lunette, des réflexions indifféremment à droite ou à gauche de son axe. La moyenne des observations croisées, en renversant le cercle pour les mesures de distances horizontales, et secondairement en le changeant de main pour les mesures de hauteurs, permettra d'annuler l'erreur de parallélisme, et donc de gagner du temps en supprimant ce réglage en cours d'opération. Borda choisit de faire exécuter son cercle par Etienne Lenoir. Ce mécanicien est en train de d'imposer son art à Paris. L'atelier construira la

plupart des grands instruments astronomiques et géodésiques français de l'époque. Nommé ingénieur du roi en 1787, Lenoir sera pour la France, comme Jesse Ramsden pour la Grande-Bretagne, le plus grand mécanicien de l'astronomie nautique du XVIIIe siècle. Lenoir concevra aussi, on le sait moins, le réflecteur parabolique du phare de Cordouan, et il travaillera à l'amélioration du rendement optique des systèmes lumineux avant l'invention des lentilles de Fresnel.

Borda est promu lieutenant de vaisseau en 1775. Il a déjà acquis une réputation d'ingénieur quand l'Académie de marine le charge, conjointement avec Duhamel du Monceau et Bigot de Morogues, d'examiner avant impression le *Traité de la construction des Vaisseaux* d'un académicien de la première heure, le capitaine de vaisseau Dumaitz de Goimpy, un officier savant exemplaire qui va bientôt s'illustré lors des combats de la Guerre d'Amérique.

Borda et Lenoir achèvent de mettre au point leur cercle pour faciliter son emploi et le pousser à une perfection inégalée. Après des essais de Verdun de la Crenne, Borda va tester lui-même son invention. Conjuguant à nouveau ses qualité d'officier de vaisseau et d'officier savant. Il prend le commandement de la gabare la *Boussole*, qu'il conduit du 20 juin 1776 au 25 février 1777, sur les côtes d'Afrique jusqu'au Cap-Vert. Il doit soumettre la montre à ressort N°4 de Berthoud à de nouvelles épreuves, évaluer les tables et les graphiques de réduction, et bien sûr expérimenter son cercle. Il appliquera tout cela à l'amélioration des cartes marines des Canaries dont il doit en préciser la longitude. La plupart des nations européennes continuent en effet à caler l'origine des carroyages de leurs cartes sur l'île de Fer, rémanence d'un œkoumène antique commençant aux Îles Fortunées puisqu'il n'y avait plus rien à l'ouest. Au cours de son escale à Tenerife, il détermine l'altitude du pic du Teide, et il rencontre Cook, en route pour son troisième voyage. Ils échangent en expérimentateurs passionnés leurs observations sur le réglage et les mérites des montres et horloges de Harrison et de Berthoud. Borda met au point au cours de ce voyage sa propre méthode pour les distances lunaires, et démontre que la précision de son cercle construit par Lenoir atteint 4 à 5 secondes d'ac. Il en expliquera le fonctionnement dans sa *Description et usage du cercle de réflexion, avec différentes méthodes pour calculer les observations nautiques*.

C'est le début d'une époque brillante pour la marine, qui se relève du désintérêt du règne de Louis XV grâce à des ministres éclairés. Sartine, appelé en 1774 ignorait tout de la mer et s'est révélé un excellent ministre. Quand les colons américains se soulèvent, quand un traité d'alliance et de commerce est signé le 6 février 1778 avec les États Unis d'Amérique, la marine est prête. Les premiers engagements victorieux de la guerre d'Amérique montrent que la France a recouvré sa force navale. Borda est maintenant un officier de vaisseau qualifié. Au point qu'il est choisi par le vice-amiral d'Estaing malgré son modeste grade et son inexpérience des escadres, en qualité de major général de son escadre à bord du *Languedoc* de 80 canons. Il participe aux batailles de la mer des Antilles. L'amiral d'Estaing a déçu par son manque de combativité et ses occasions manquées. Borda, lui, est promu au retour capitaine de vaisseau et reçoit une pension de 1 000 livres sur le Trésor royal.

Borda ingénieur constructeur

Administrateur au dos large, Sartine engage avec enthousiasme des dépenses échappant quelquefois au contrôle des finances, qui finissent par inquiéter Necker, le forçant à se retirer en 1780. Le marquis de Castries, arrivé de l'armée pour le remplacer poursuit son effort, dynamisant les arsenaux et les opérations navales. L'idée de constructions navales standardisées fait son chemin de ministre en ministre. Le ministère est sous l'influence de l'ingénieur Groignard, qui jouit d'une réputation méritée. Nommé à ce titre Ingénieur général de la marine par Castries dès son arrivée au ministère, Groignard lui a aussitôt présenté son plan d'un vaisseau de 74 canons qui dort dans ses catons. Malheureusement, le *Pégasus*, premier des 6 vaisseaux mis sur cale sur ces plans se révèle dès ses premiers essais à la mer d'une grave instabilité. Castries demande à Claret de Fleurieu, directeur des ports et arsenaux au ministère, et à ce titre chargé des plans d'opérations navales, et à Borda, de tirer parti des enseignements de la guerre d'Indépendance américaine pour définir un programme de bâtiments modernes. Au cours de sa campagne dans l'escadre d'Estaing, Borda a constaté les remarquables performances à la mer du 74 canons *Annibal,* qui évolue avec l'agilité d'une frégate. Il sait aussi que le *Northumberland* du même constructeur a confirmé ces qualités dans l'escadre de Grasse. Ce sont les deux premiers vaisseaux dessinés par un jeune diplômé ingénieur constructeur brestois : Jacques-Noël Sané. On lui doit aussi les frégates de la classe *Hébé* qui sont très réussies. Borda et Sané travailleront ensemble à moderniser la flotte. On rendra plus tard hommage à leur collaboration exemplaire : « *Ces deux hommes étrangers aux rivalités misérables et fatales qui divisèrent longtemps les principales armes de la marine, unirent leur expérience, leur savoir et leur talents, pour faire un grand pas au plus difficile des arts militaires.* » Sané, le « Vauban de la marine » traversera le Révolution, sera membre de l'Institut, Inspecteur général du Génie maritime et baron d'Empire, en ayant construit plus de 200 vaisseaux et frégates sans équivalents européens.

Le 5 septembre 1781 sous le cap de Virginie, de Grasse empêche la flotte anglaise de ravitailler la garnison de Yorktown assiégée par les forces combinées franco-américaines. Sa reddition le 19 octobre rend inéluctable l'indépendance des Etats-Unis d'Amérique. Pendant ce temps, une mise au concours dans les ports - dont les preuves en archives sont ténues - semble avoir été de pure forme. Borda est d'ailleurs à ce moment aux Antilles. Il a reçu le commandement du vaisseau de 64 canons *Le Solitaire et* d'une petite division de deux vaisseaux en escorte d'un corps expéditionnaire pour la Martinique. Le 6 décembre 1782, il est intercepté devant la Barbade par 8 vaisseaux anglais. À l'issue d'un violent combat, il est fait prisonnier. Traité avec déférence, il est libéré sur parole. Le secrétariat d'État à la Marine partage à Versailles avec les Affaires étrangères un immeuble surnom Hôtel de la Paix, parce qu'il jouxte l'Hôtel de la guerre. C'est là que sans doute que Borda a convaincu son ami Claret de Fleurieu qu'un concours est inutile puisque la marine dispose d'un ingénieur constructeur de génie dont les navires surclassent tous les autres. Toujours est-il que les plans du 74 canons de Sané sont retenus par le roi comme plans types. Mis sur cale à Brest en 1782, l*e Téméraire* est un vaisseau aux flancs rebondis et aux lignes pures, allégé des décorations inutiles de poupe. Borda obtient que les vaisseaux de ce rang deviennent l'ossature des escadres, et une centaine de 74 seront construits sur ces plans jusqu'à la fin de l'Empire.

Chateaubriand, candidat malheureux à l'examen de garde de la marine, a décrit dans ses *Mémoires d'Outre-tombe* la vie trépidante de la rade et de l'arsenal de Brest en 1783 tel que l'a vu Borda. « *La rade était semée de navires : la grande escadre française rentrait après la signature de la paix. Les vaisseaux manœuvraient sous voiles, se couvraient de feux, arboraient des pavillons, présentaient la poupe, la proue, le flanc* [...] *Tout Brest accourut. Des chaloupes se détachent de la flotte et abordent au môle. Les officiers dont elles étaient remplies, le visage brûlé par le soleil, avaient cet air étrange qu'on apporte d'un autre hémisphère, et je ne sais quoi de gai, de fier, de hardi, comme des hommes qui venaient de rétablir l'honneur du pavillon national.* » Suffren mène aux Indes une campagne combative contre l'escadre anglaise plus puissante de l'amiral Hughes, qu'il bouscule sans répit bien qu'il ne puisse compter sur le soutien de bases-arrières, innovant en tout, tacticien de génie à l'instar de Ruyter et de Nelson.

Nommé en 1784 Inspecteur des Constructions navales et de l'École des élèves-ingénieurs de la marine de Paris, Borda met deux ans plus tard au concours les plans d'un trois ponts de 118 canons dont il définit les caractéristiques directrices. Aucun vaisseau de ce type n'a été vraiment réussi jusqu'alors. Le 14 mai 1786, il propose d'adopter le projet de Sané extrapolé de son 74 canons. Ce sera les *Etats de Bourgogne*, rebaptisé ensuite *Côte d'Or, La Montagne* puis l'*Océan* au fil des péripéties de l'histoire de France. Un trois ponts dont l'exceptionnelle maniabilité et la puissance de feu sont admirables. Un chef d'œuvre. L'année suivante, Borda met au concours un 80 canons dont il définit le programme, et propose une fois encore de retenir les plans de Sané. La classe *Tonnant* sera une réussite, conciliant une puissante artillerie de gros calibre, une maniabilité et une vélocité qui les rend beaucoup plus rapides que tous les vaisseaux britanniques. La Royal Navy s'empressera de les incorporer sous son pavillon et de les copier quand les désastreux combats révolutionnaires les feront capturer.

Rémanence de l'esprit de Borda

13 s'il réfléchissait tout haut : « *Ce n'est pas moi qui ai laissé détruire les marines de l'Europe. C'est la Révolution qui a fait la puissance de l'Angleterre.* »

La dernière lettre de Lapérouse à Claret de Fleurieu, datée de Botany Bay aux New-South Wales le 7 février 1788 fait l'éloge des deux nouvelles méthodes : « *Il me suffira de vous dire que la combinaison de nos deux moyens, les observations de distances et les horloges marines a complètement résolu le problème : nous avons constamment navigué avec moins d'erreurs en longitude qu'on en avait en latitude il y a dix ans, lorsqu'on observait avec des octants en bois, et quatre fois moins peut-être que lorsqu'on faisait usage de l'arbalestrille et du quart de nonante.*» On a retrouvé dans l'épave de la *Boussole* à Vanikoro un des cercles de Borda de l'expédition Lapérouse.

Lenoir construira plus de trois cent cinquante cercles de Borda pour la marine, ainsi que des cercles pour les hydrographes et des instruments de géodésie. Les cercles de Borda seront ensuite construits par les continuateurs de son atelier, Schwartz dit Lenoir puis Lorieux, et par les ateliers de Jecker et de Gambey. La dénomination de cercle à réflexion, au lieu de cercle de réflexion, sera validée par Rossel et Beautemps-Beaupré dans le rapport de l'expédition d'Entrecasteaux en1808. La Grande-Bretagne préféra les chronomètres parce que les cercles anglais conservaient une imperfection systématique,

mais on navigua en France « à la Lune » jusqu'à l'adoption en 1847 de la droite de hauteur découverte accidentelle par le capitaine américain Sumner.

Sans empiéter sur la communication suivante, Borda allait réconcilier horlogers et astronomes dans un rapport *du* 11 vendémiaire an VII (soit 1798) à l'Académie des Sciences : « *Pour donner les différences en longitude entre divers points d'une côte, pour déterminer les longitudes relatives des lieux,* [...] *les horloges marines conviennent mieux que les méthodes astronomiques.* [...] *Mais pour les besoins journaliers de la navigation, les méthodes astronomiques mériteront toujours la préférence.* » Vingt ans après la mise au point de la navigation scientifique, méfiant malgré tout quant aux trop grandes facilités offertes par les montres, il fulminait encore : « *Il est temps que les marins cessent de regarder les Sciences mathématiques et physiques comme inutiles à la pratique de la navigation et à ses progrès.* »

La marine se souviendra de ce qu'elle doit à Borda en rebaptisant de son nom en 1840 le trois ponts *Commerce de Paris* hébergeant la nouvelle École navale en rade de Brest. La tradition du *Borda* est restée assez forte pour que les élèves de l'École navale plusieurs fois réinstallée à terre restent des « Bordaches ».

BORDA, MEMBRE DE L'ACADEMIE DES SCIENCES
par Jean-Paul Poirier, Membre de l'Académie des sciences

Il n'est sans doute pas inutile de présenter l'état de l'Académie des sciences vers le milieu du XVIIIe siècle, à l'époque où Borda y fut élu.
Depuis la fondation de l'Académie en 1666 et le règlement de 1699, le nombre de ses membres avait changé de temps en temps, mais assez peu. Il y avait environ 70 membres, nommés par le Roi, après présentation par l'Académie. Ils étaient répartis en plusieurs catégories : outre les honoraires, en général des membres de la noblesse qui s'intéressaient aux sciences sans pour autant les pratiquer, il y avait une hiérarchie qui, des adjoints et des associés, allait jusqu'aux pensionnaires. Ceux-ci, comme leur nom l'indique, recevaient une pension du Roi.
Les membres étaient répartis en 6 classes : géométrie, astronomie, mécanique, anatomie, chimie, botanique. Le nombre des académiciens étant fixe, on ne pouvait être nommé dans une catégorie que si l'un des membres de cette catégorie était promu au rang supérieur ou décédait.
Le 27 juin 1756, Borda entra à l'Académie, comme adjoint géomètre en remplacement de Deparcieux[1], promu associé. Le 30 juin 1768, il fut nommé associé géomètre en remplacement encore de Deparcieux, promu pensionnaire surnuméraire.
Enfin, le 1er février 1772, il fut nommé pensionnaire géomètre en remplacement de Fontaine, décédé.
Borda présenta une dizaine de mémoires à l'Académie, dont certains fort importants.
En 1756, un mois avant son élection, Borda avait envoyé à l'Académie un *Mémoire sur le jet des bombes*, qui fut lu le 29 mai et sera publié en 1769, dans les Mémoires de l'Académie des sciences : *Sur la courbe décrite par les boulets et les bombes, en ayant égard à la résistance de l'air*[2].
Dans l'*Histoire de l'Académie,* le mémoire est ainsi présenté, de façon élogieuse, par les commissaires, Bouguer et Clairaut[3]:
« On a déterminé dans presque tous les Traités élémentaires d'Artillerie, la courbe que décrivent les bombes & les boulets, par l'action de la poudre, combinée avec celle de leur pesanteur, & on a très bien démontré que cette courbe étoit une parabole ; mais on a toujours supposé, dans cette recherche, que ces corps n'éprouveroient de la part de l'air aucune résistance sensible, ou du moins on n'a eu aucun égard à cette résistance. Il est cependant très certain que cette résistance de l'air n'est nullement insensible, qu'elle retarde la marche du boulet, qu'elle change la nature de la courbe, la distance des portées

---

[1] Antoine Deparcieux (1703-1768) était l'auteur du célèbre *Essais sur les probabilités de la durée de la vie humaine,* qui contenait les tables de mortalité qui furent utilisées par les compagnies d'assurances pendant plus d'un siècle.
[2] *Sur la courbe décrite par les boulets et les bombes, en ayant égard à la résistance de l'air*, Histoire et Mémoires de l'Académie des sciences, vol. 71, 1769, p. 247.
[3] *Ibid.* p. 116.

[...] En un mot, il n'y a aucune règle de la balistique qui puisse subsister en remettant dans le calcul la résistance de l'air qu'on en avoit mal-à-propos exclue.

Newton & M. Euler s'étoient aperçus de ce défaut & avoient travaillé l'un & l'autre sur cette matière, mais ni l'un ni l'autre n'avoient appliqué leurs calculs aux effets connus de nos pièces d'Artillerie, ce qui ôte à leurs travaux la plus grande partie de l'utilité dont ils auroient pu être.
C'est ce qui a engagé M. le Chevalier de Borda à examiner de nouveau une matière si importante. [...]»
Borda se pose d'abord le problème de trouver la courbe décrite par un corps pesant sphérique, qui se meut dans un milieu résistant. Il introduit une résistance du milieu proportionnelle au carré de la vitesse. Comme la vitesse du boulet va toujours en diminuant, la résistance du fluide diminue aussi comme le carré de la diminution de la vitesse. La courbe décrite n'est donc plus symétrique ; son équation $y(x)$ est la solution d'une équation différentielle que Borda intègre en approximant y en suite de puissances de x, pour différents angles d'élévation du canon et différentes vitesses initiales.
Pour faciliter l'emploi de ses résultats par les artilleurs, Borda calcula des tables, donnant, pour des pièces de différents calibres, les portées, en fonction de l'angle d'élévation et de la vitesse initiale (qui dépend de la charge de poudre). On voit ainsi, par exemple, que pour une vitesse initiale de 2038 pieds par seconde, la portée calculée d'une pièce de 24[4] pointée à 45° est de 2250 toises, alors qu'avec la même vitesse initiale, si on ne tenait pas compte de la résistance de l'air, la portée serait de 22922 toises. « La résistance de l'air diminue donc les portées de neuf dixièmes ; on peut donc juger combien on se trompe en négligeant cet élément. »
Borda continua de s'intéresser à la résistance que les fluides opposent au mouvement des corps qui y sont plongés, et il fit à ce sujet des expériences[5]. Il aborda également le problème de l'écoulement des fluides par les orifices des vases[6], et eut à ce sujet une controverse avec Condorcet, aux observations duquel Borda répondit point par point dans un manuscrit conservé à la Bibliothèque de l'Institut[7]. Borda termine sur une note cordiale : « Voilà une réponse à votre profession de foi : je suis fâché que vous ne soyez pas de ma croyance, mais nous n'en irons pas moins tous les deux au Paradis, sauf à y disputer sur les fluides...Je vous embrasse de tout cœur. »

C'est aussi peut-être avec Condorcet que Borda discuta du problème des modes d'élection sur lequel il présenta, dès 1770, un mémoire qui fut publié seulement en 1781[8]. Borda présente le problème qu'il se pose : « C'est une opinion généralement reçue, & contre laquelle je ne sache pas qu'on ait jamais fait d'objection, que dans une élection au

---

[4] Une pièce de 24 était un canon tirant des boulets de 24 livres, utilisé sur des vaisseaux de guerre ou comme artillerie de siège.
[5] Borda, *Expériences sur la résistance des fluides*, Histoires et Mémoires de l'Académie des Sciences, vol. 65, 1763, p. 358 ; vol. 69, 1767, p.495.
[6] Borda, *Mémoire sur l'écoulement des fluides par les orifices des vases,* Histoires et Mémoires de l'Académie des Sciences, vol. 68, 1766, p. 579.

[7] Bibliothèque de l'Institut, *Ms 876/F. 81-102/ F. 82-83.*
[8] Borda, *Mémoire sur les élections au scrutin*, Histoires et Mémoires de l'Académie des Sciences, vol. 84, 1781, p. 657.

scrutin, la pluralité des voix indique toujours le vœu des électeurs, c'est-à-dire que le Candidat qui obtient cette pluralité est nécessairement celui que les électeurs préfèrent à ses concurrents. Mais je vais faire voir que cette opinion, qui est vraie dans le cas où cette élection se fait entre deux sujets seulement, peut induire en erreur dans tous les autres cas. »

Borda donne l'exemple d'une élection dans laquelle 21 électeurs ont à choisir un parmi 3 candidats, A, B, C et classent les candidats par ordre de préférence : 13 électeurs mettent B et C devant A, et 8 seulement mettent A en tête. A n'ayant que 8 voix contre 13 est éliminé. Mais si sur les 13 votants qui ont mis B et C en tête, 7 mettent B devant C et 6 mettent C devant B, on voit alors que A a 8 voix, B en a 7 et C en a 6. « Ainsi le sujet A aurait la pluralité des voix, quoique par l'hypothèse l'opinion des électeurs lui fût contraire. » Borda en conclut que « pour qu'une forme d'élection soit bonne, il faut qu'elle donne aux électeurs le moyen de se prononcer sur le mérite de chaque sujet, comparé successivement aux mérites de chacun de ses concurrens. » Il propose alors un système par lesquel on obtiendrait la valeur comparative des suffrages, en assignant un coefficient 1 au candidat placé en troisième position sur chaque bulletin, un coefficient 2 au suivant et un coefficient 3 à celui placé en tête. Ainsi, si A a été placé en tête sur 8 bulletins et en dernier sur 13 bulletins, sa note totale sera de 3x8 + 1x13 = 37, de même, si B a été 7 fois en première position, et autant en deuxième et troisième position, sa note sera de 7x3 + 7x2 + 7x1 = 42, enfin si C a été 6 fois en première position, 14 fois en deuxième et 1 fois en troisième, sa note sera de 6x3 +14x2 + 1 = 47. On voit qu'alors C serait élu.
Borda montre alors que le résultat serait le même si on procédait à trois scrutins deux à deux, entre A et B, A et C, et B et C. C'est le « Paradoxe de Borda » : une pluralité d'électeurs préfèrent A à B et C, mais A serait battu par B et C dans un vote par paires.
C'est aussi la méthode que préconisa Condorcet[9] : le vainqueur de l'élection doit être le candidat qui est préféré dans la comparaison tour à tour à tous les autres candidats. Il y a cependant une difficulté, dans le cas d'une majorité cyclique, c'est à dire si A bat B, B bat C et C bat A. C'est le « Paradoxe de Condorcet[10]».
Le mode de scrutin imaginé par Borda fut adopté pour les élections à l'Académie des sciences, par la loi du 15 germinal an IV[11]. Lorsque Bonaparte fut élu président de la 1ère Classe de l'Institut, le 1er germinal an VIII, il n'eut apparemment rien de plus pressé que de critiquer le mode d'élection. Bien entendu, la Classe se rallia aux vues de son président, et le décret du 3 pluviôse an XI ramena l'ancien système[12].
Dans le *New York Times* du 28 mars, le chroniqueur David Leonhard note que lors de l'élection présidentielle de 2000 aux États-Unis, davantage d'électeurs en Floride préféraient Al Gore à George W. Bush. Mais Bush gagna, parce que beaucoup de ceux qui préféraient Gore à Bush avaient voté pour Ralph Nader en premier choix. Et Leonhard poursuit en décrivant le meilleur système, celui de Borda (qu'il ne nomme pas) qui, dit-il, est appliqué pour quelques élections en Australie, Grande Bretagne, Canada, Irlande et Nouvelle Zélande.

---

[9] Condorcet, *Essai sur l'application de l'analyse à la probabilité des décisions rendues à la pluralité des voix*, Paris, Imprimerie royale, 1785.
[10] On la même situation dans le «jeu de la feuille, des ciseaux et de la pierre».
[11] J. Mascart, *La vie et les œuvres du chevalier Jean-Charles de Borda*, Lyon, A. Rey, 1919, p. 131-134.
[12] *Ibid.*, p. 134.

Jusqu'à la fin du XVIIIe siècle, l'un des sujets de recherche les plus importants, à la fois par son intérêt scientifique et surtout économique, fut le problème de la détermination de la longitude en mer[13]. En effet, il était vital de connaître, avec assez de précision, la position du navire pour éviter le risque d'échouage lors des atterrissages. La navigation à l'estime accumulait les erreurs qui pouvaient atteindre jusqu'à plusieurs centaines de milles pour les longues traversées.
Ainsi, en 1684, Cavelier de la Salle voulait retourner en Louisiane, dont il avait pris possession pour le roi deux ans auparavant. Il pensait atterrir près du delta du Mississippi, mais en fait il était un millier de kilomètres plus à l'ouest. Son expédition se termina en désastre.
Le 22 octobre 1707, trois vaisseaux de la flotte anglaise, trompés par l'estime et se croyant encore loin de terre, s'échouèrent dans le brouillard devant les îles Sorlingues et sombrèrent. Ce désastre fut à l'origine du *Longitude Act* de 1714 du Parlement anglais, qui offrait un prix de 20 000 livres à qui proposerait une méthode sûre pour déterminer la longitude en mer, avec une erreur n'excédant pas un demi-degré, c'est à dire environ 30 nautiques (milles marins), à l'équateur, après un voyage de six semaines. L'Académie des sciences proposa également, mais plus tard, des prix à ce sujet.
Borda ne pouvait manquer de s'intéresser à ce problème et ce fut l'objet de son plus gros[14] mémoire à l'Académie des sciences, rédigé avec le chanoine Pingré (1711-1796), astronome et bibliothécaire de l'abbaye de Sainte Geneviève.
Connaître la position d'un navire impose de connaître sa latitude et sa longitude. La détermination de la latitude, avec une précision acceptable, ne posait pas de problème : il suffisait de prendre, au sextant, la hauteur du soleil ou d'une étoile, lors du passage au méridien. Il en allait tout autrement pour la longitude.
En 1761, l'illustre mathématicien Euler, dans ses *Lettres à une princesse d'Allemagne sur divers sujets de physique et de philosophie*[15], énuméra et critiqua toutes les solutions possibles du « fameux problème des longitudes ».

Elles se ramènent essentiellement à connaître, lorsqu'on est sur un navire en mer, l'heure au méridien origine, puisqu'on connaît l'heure locale. La différence entre l'heure locale et l'heure au méridien origine donne la longitude : 15 minutes de temps équivalant à 1 degré de longitude.
Au XVIIIe siècle, à part les solutions fantaisistes ou offertes par des charlatans, deux méthodes se partageaient la faveur des savants.
La première méthode était astronomique. Il s'agissait d'observer un phénomène astronomique visible simultanément dans des endroits éloignés, dont des tables donnent l'heure au méridien origine. Si l'on élimine les phénomènes trop rares (éclipses de Lune) ou trop difficiles à observer en mer (éclipses et occultations des satellites de Jupiter), restait la méthode dite des « distances lunaires », c'est à dire l'observation de la position de la Lune dans le ciel, qui ne dépend pas du méridien d'où on l'observe. On mesure la distance angulaire de la Lune au Soleil ou à quelques étoiles. Mais il fallait pour cela des tables de la Lune[16]. L'astronome allemand Tobias Mayer (1723-1762) avait établi

---

[13] J.-P. Poirier, *Le secret des longitudes*, Navigation, vol. 50, 2002, p.94-107.
[14] 64 pages.
[15] L. Euler, *Lettres à une princesse d'Allemagne sur divers sujets de physique et de philosophie*, Leipzig, Steidel, 1770.
[16] Voir la thèse de Guy Boistel, *L'astronomie nautique au XVIIIe siècle en France : tables de la Lune et longitudes en mer*, Université de Nantes, 2001.

de bonnes tables, mais les calculs étaient compliqués et la méthode n'était pas facilement utilisable en pratique par les marins. Elle le fut cependant pendant longtemps. En 1774, les distances lunaires furent introduites dans la *Connaissance des temps* et y demeurèrent jusqu'en 1905.

L'autre méthode était du ressort des horlogers. Il s'agissait de transporter l'heure du méridien origine à bord du vaisseau. Le transport de l'heure, impliquait d'avoir des garde-temps fiables, ce qui éliminait les pendules et horloges à balancier. Restaient donc les chronomètres ou montres marines, que les horlogers tant en Angleterre (John Harrison) qu'en France (Pierre Leroy et Ferdinand Berthoud) commençaient à construire, mais dont il fallait éprouver la fiabilité lors de longs voyages en mer.

L'Académie avait proposé un prix de 2000 livres pour 1767, ayant pour sujet *la meilleure manière de mesurer le temps à la mer*, mais elle ne l'attribua pas et décida de le doubler pour 1769 avec le même sujet, complété des exigences d'épreuves faites en mer.

En 1763, l'horloger parisien Pierre Leroy (1717-1785) avait présenté à l'Académie des sciences une montre marine. Le marquis de Courtanvaux (1718-1781), membre de l'Académie, fit construire à ses frais une corvette, l'*Aurore*, pour en faire l'épreuve à la mer. On peut voir une belle maquette de l'*Aurore* à la bibliothèque Sainte Geneviève. En 1767, accompagné de Pingré et de Messier[17], Courtanvaux avait navigué du Havre à Amsterdam et d'Amsterdam au Havre, mais la corvette avait essuyé une tempête à l'aller et, dans l'ensemble, l'épreuve ne fut pas concluante[18]. Le prix fut attribué à Pierre Leroy, mais l'Académie jugea néanmoins les résultats décevants et voulant donner toutes les chances aux candidats avec le temps nécessaire aux épreuves des montres en mer, elle proposa à nouveau le même sujet au prix de 1771. Il ne fut pas non plus attribué cette année-là, et fut doublé et reporté pour 1773.

Le secrétaire d'État à la Marine, M. de Boyne, écrivit à l'Académie, en juin 1771, « que le Roy avoit ordonné d'armer à Brest la frégate la *Flore*, que l'expédition ne devoit avoir pour objet que des opérations relatives à la perfection de la Navigation, & spécialement l'examen & la vérification des Longitudes sur mer. »

La frégate était commandée par le lieutenant de vaisseau Jean-René de Verdun de la Crenne (1741-1805), le lieutenant de vaisseau Borda était officier en second et chargé, avec Pingré, de procéder à l'épreuve des instruments.

Partie de Brest le 29 octobre 1771, la *Flore* passa à Cadix, au Cap Vert, aux îles Canaries, aux Antilles, à Terre-Neuve, à Saint-Pierre-et-Miquelon, en Islande, aux îles Feroë, à Copenhague et fut de retour le 8 octobre 1772. Le voyage fut publié en 1778[19], mais dès 1773, un précis en fut imprimé dans les *Histoire et Mémoires* de l'Académie[20]. Le prix de 4.000 livres fut attribué à Leroy.

Outre sextants, octants et autres instruments destiné à mesurer des angles, on avait embarqué cinq montres marines, dont une de Berthoud, ainsi que deux montres de Leroy

---

[17]Charles Messier (1730-1817), astronome de la marine. Découvreur de comètes et de nébuleuses (galaxies), dont il dressa un catalogue qui porte son nom. Ainsi la galaxie la plus proche de nous porte le numéro M 87.

[18] *Journal du Voyage de M. le Marquis de Courtanvaux, sur la Frégate l'Aurore, pour essayer par ordre de l'Académie plusieurs Instrumens relatifs à la Longitude*, Paris, Imprimerie Royale, 1768.

[19] *Voyage fait par ordre du Roi en 1771 & 1772, en diverses parties de l'Europe, de l'Afrique & de l'Amérique; pour vérifier l'utilité de plusieurs Méthodes & Instrumens, servant à déterminer la Latitude & la Longitude* par Mrs. de Verdun de la Crenne, le Chevalier de Borda & Pingré, Paris, Imprimerie Royale, 1778.

[20] *Opérations faites, tant à bord de la Frégate du Roi la Flore, qu'en différens ports ou rades d'Europe, d'Afrique et d'Amérique; pour la vérification des instumens, et des méthodes relatives à la détermination des longitudes sur mer, et à d'autres objets concernant la navigation,* Histoire et Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, vol. 76, 1773, p. 258.

qui avaient déjà voyagé sur l'*Aurore*, et une pendule de l'horloger Biesta (qui tomba à cause du roulis et se brisa, après quatre jours).
« Nous comparions tous les jours, vers l'heure de midi, les différentes Montres entr'elles, & nous écrivions ces comparaisons sur un registre ; l'acte étoit signé des Officiers présens & de nous. Lorsque dans des ports ou rades, nous voulions vérifier la marche des Montres, nous établissions un observatoire à terre, [...] nous y déterminions la marche d'une pendule astronomique par des hauteurs correspondantes du Soleil ; vers l'heure convenue, on comparoit une des Montres marines avec la Pendule astronomique. [...]»
Lors des principales relâches de la frégate, les longitudes données par les montres étaient comparées aux longitudes mieux connues de ces relâches, qui avaient été déterminées par des observations astronomiques.
Au retour de *la Flore* à Brest, l'erreur sur la longitude de ce port était de 44' 09" après 337 jours, pour une des montres de Leroy. La plus grande erreur avait été de 13' 40" en six semaines, ce qui correspond à peu près à 10 nautiques à la latitude de 45°.
En conclusion, Borda et Pingré écrivent que les montres marines de Berthoud et Leroy « nous ont donné nos longitudes avec une précision presque supérieure à nos espérances. »

C'est pendant la campagne de la *Flore* que Borda aurait imaginé son cercle répétiteur qui, perfectionné par Lenoir, fut si utile à la géodésie.[21]
Borda fut élu sous-directeur de l'Académie en 1776 et directeur en 1777.
A la suite d'un discours de Talleyrand, prononcé le 9 mars 1790, demandant l'uniformisation des poids et mesures, l'Assemblée constituante adopta, le 8 mai, un décret demandant à l'Académie des Sciences de « déterminer l'échelle de division la plus convenable pour les poids et mesures et pour les monnaies. »
L'Académie créa une commission composée de Borda, Lagrange, Lavoisier, Monge et Condorcet, afin de décider de la division du système et de l'unité fondamentale. Terry Quinn, ancien directeur du Bureau international des Poids et Mesures, va en parler.
Enfin, lors de la création de l'Institut, Borda fut nommé dans la section de mathématiques de la 1ère Classe, dont il devint président pour le 1er semestre de l'an V.

[21] J. Mascart, *op.cit.*, p. 366 sqq.

BORDA ET LE SYSTEME METRIQUE

par Terry Quinn, ancien directeur du Bureau international des poids et mesures

En 1790 la Convention demande à l'Académie des sciences d'élaborer un avis sur la création d'un système de mesure universel ; à la suite l'Académie désigne une commission de cinq mathématiciens pour préparer une réponse et celle-ci est présentée le 19 mars 1791[22].

Des extraits de ce texte sont présentés et analysés par M. Quinn :

« Rapport fait à l'académie des sciences, sur le choix d'une unité de mesures par MM. Borda, Lagrange, Laplace, Monge & Condorcet.

« L'idée de rapporter toutes les mesures à une unité de longueur prise dans la nature, s'est présentée aux mathématiciens dès l'instant où ils ont connu l'existence d'une telle unité & la possibilité de la déterminer. Ils ont vu que c'était le seul moyen d'exclure tout arbitraire du système des mesures, & d'être sûr de le conserver toujours le même, sans qu'aucun autre évènement qu'une révolution dans l'ordre du monde put y jeter de l'incertitude. Ils ont senti qu'un tel système n'appartenant exclusivement à aucune nation, on pouvait se flatter de le voir adopter par toutes ...

« On peut réduire à trois les unités qui paraissent les plus propres à servir de base ; la longueur du pendule, un quart du cercle de l'équateur, enfin un quart du méridien terrestre.

« La longueur du pendule a paru en général mériter la préférence. Elle présente l'avantage d'être plus facile à déterminer & par conséquent à vérifier, si quelques accidents arrivés aux étalons en amenaient la nécessité. De plus, ceux qui voudraient adopter cette mesure déjà établie chez un autre peuple, ou qui après l'avoir adoptée auraient besoin de la vérifier, ne seraient pas obligés d'envoyer des observateurs à l'endroit où la première opération aurait été faite.

« En effet, la loi des longueurs du pendule est assez certaine, assez confirmée par l'expérience pour être employée dans les opérations sans avoir à craindre que des erreurs imperceptibles. Quand même d'ailleurs on ne voudrait pas avoir égard à cette loi, on sent qu'une comparaison de la différence de longueur entre les pendules une fois exécutée, pourrait toujours être vérifiée, & qu'ainsi l'unité de mesure deviendrait invariable pour tous les lieux où cette comparaison aurait été faite ; ainsi l'on y pourrait réparer immédiatement l'altération accidentelle des étalons, ou y déterminer la même unité de mesure à quel qu'époque que l'on prît la résolution de l'adopter ...

---

[22] T. J. Quinn, *The Metre Convention of 1875. A commentary and new English edition. La Revista del Nuovo Cimento Vol 42, No.6, 2019, pp 261 – 300 et A1 – A11.*

« Cependant nous devons observer que cette unité ainsi déterminée, renferme en elle quelque chose d'arbitraire. La seconde du temps est la quatre-vingt-six mille quatre centième partie du jour, & par conséquent une division arbitraire de cette unité naturelle. Ainsi, pour fixer l'unité de longueur, on emploie non-seulement un élément hétérogène (le temps), mais un élément arbitraire ...

« S'il est possible d'avoir une unité de longueur qui ne dépende d'aucune autre quantité, il parait naturel de la préférer. D'ailleurs une unité de mesure prise sur la terre même, a un autre avantage, celui d'être parfaitement analogue à toutes les mesures réelles, que dans les usages communs à la vie, on prend aussi sur la terre, telles que les distances entre des points de sa surface, ou l'étendue de portions de cette même surface. Il est bien plus naturel en effet de rapporter la distance d'un lieu à un autre, au quart d'un des cercles terrestres, que de la rapporter à la longueur d'un pendule.

« Nous avons donc cru devoir nous déterminer pour ce genre d'unité de mesure, & préférer ensuite le quart du méridien au quart de l'équateur ...

« Le quart du méridien terrestre deviendrait donc l'unité réelle de mesure, & la dix- millionième partie de cette longueur en ferait l'unité usuelle. On voit ici que nous renonçons à la division ordinaire du quart du méridien en degrés, du degré en minutes, de la minute en secondes ; mais on ne pourrait conserver cette ancienne division, sans nuire à l'unité du système de mesure, puisque la division décimale qui répond à l'échelle arithmétique, doit être préférée pour les mesures d'usage ...

« En adoptant ces principes, on n'introduira rien d'arbitraire dans les mesures que l'échelle arithmétique sur laquelle leurs divisions doivent nécessairement se régler. De même il n'y aura rien d'arbitraire dans les poids que le choix de sa substance homogène, & facile à retrouver toujours dans le même degré de pureté et de densité, à laquelle il faut rapporter la mesure de toutes les autres, comme, par exemple, si on choisit pour base l'eau distillée, pesée dans le vide, ou rappelée au poids qu'elle y aurait, & prise au degré de température où elle passe de l'état de solide à celui de liquide ...

« Nous proposerons donc de mesurer immédiatement un arc du méridien, depuis Dunkerque jusqu'à Barcelone, ce qui comprend un peu plus de neuf degrés & demi. Cet arc serait d'une étendue très suffisante, & il y en aurait environ six degrés au nord, & trois et demi au midi du parallèle moyen. A ces avantages se joint celui d'avoir les deux points extrêmes également au niveau de la mer ; c'est pour satisfaire à cette dernière condition qui donne l'avantage d'avoir des points de niveau invariables & déterminés par la nature, pour augmenter la grandeur de l'arc mesuré, pour qu'il soit partagé d'une manière plus égale, enfin pour s'étendre au-delà des Pyrénées, & se soustraire aux incertitudes que leur effet sur les instruments peut produire dans les observations, que nous proposons de prolonger la mesure jusqu'à Barcelone ...

« Les opérations nécessaires pour ce travail seraient : 1° de déterminer la différence de latitude entre Dunkerque & Barcelone, & en général de faire sur cette ligne toutes les observations astronomiques qui seraient jugées utiles ; 2° de mesurer les anciennes bases qui ont servi à la mesure du degré de Paris, &

aux travaux de la carte de France ; 3° de vérifier par de nouvelles observations la suite des triangles qui ont été employés pour mesurer la méridienne ; & de les prolonger jusqu'à Barcelone ; 4° de faire au 45e degré des observations qui constatent le nombre des vibrations qui seraient en un jour dans le vide au bord de la mer, à la température de la glace fondante, un pendule simple, égal à la dix millionième partie de l'arc du méridien, afin que ce nombre étant une fois connu, on puisse retrouver cette mesure par les observations du pendule. On réunit par ce moyen les avantages du système que nous avons préféré, & de celui où l'on aurait pris pour unité la longueur du pendule. Ces observations peuvent se faire avant que cette dix-millionième partie soit connue. Connaissant en effet le nombre il suffira de connaître dans la suite le rapport de cette longueur à cette dix millionième partie, pour en déduire d'une manière certaine le nombre recherché ; 5° Vérifier par des expériences nouvelles, & faites avec soin, la pesanteur, dans le vide, d'un volume donné d'eau distillé, prise au terme de la glace ; 6° Enfin, réduire aux mesures actuelles de longueur les différentes mesures de longueur, de surface ou de capacité usées dans le commerce, & les différents poids qui y sont en usage, afin de pouvoir ensuite par de simples règles de trois les évaluer en mesures nouvelles lorsqu'elles seront déterminées ...

Nous nous sommes bornés dans ce premier rapport à ce qui regarde l'unité de mesures ; nous nous proposons de présenter dans un autre plan, le plan du système général qui doit être établi d'après cette unité. En effet, cette première détermination exige des opérations préliminaires qui demandent du temps, & qui doivent être préalablement ordonnée par l'Assemblée Nationale. Nous nous sommes cependant déjà assez occupé de ce plan, & les résultats des opérations tant pour la mesure de l'arc du méridien que pour le poids d'un volume d'eau donné, peuvent être prévus d'une manière assez approchée pour que nous puissions assurer dès aujourd'hui qu'en prenant l'unité de mesure que nous venons de proposer, on peut former un système général où toutes les divisions suivent l'échelle arithmétique, & dont aucune partie ne renferme rien qui puisse gêner dans les usages habituels.

Nous nous bornerons à dire ici, que cette dix-millionième partie du quart du méridien terrestre qui serait notre unité usuelle de mesure, ne différerait du pendule simple, que d'un cent quarante – cinquième environ, & qu'ainsi l'une et l'autre unité conduisent à des systèmes de mesurer absolument semblables dans leurs dispositions. »

La grande triangulation de Mechain et Delambre est bien connue. Moins connu est le travail de Borda et Cassini en vue d'accomplir la tache N° 4 – le pendule[23].

---

[23] Delambre J-B, *Base du système métrique décimal, ou mesure de l'arc de méridien compris entre les parallèles de dunkerque et Barcelone, exécute en 1792 et années suivantes par Méchain P. and Delambre, J-B* , 3 tomes, Baudoin, Paris 1806 -1810. voir Vol III pp361-398 pour le pendule de Borda et Cassini).

Durant la suite des opérations, entre juin et août 1792, Borda et Cassini procèdent en vingt points à des relevés des mouvements du pendule avec l'instrument ci-dessous en prenant soin de conserver le même poids du balancier et la même longueur de la tige, Fig 1. L'écart standard de l'ensemble de leurs résultats sur les deux mois était d'environ 5 ppm, ce qui est remarquable!

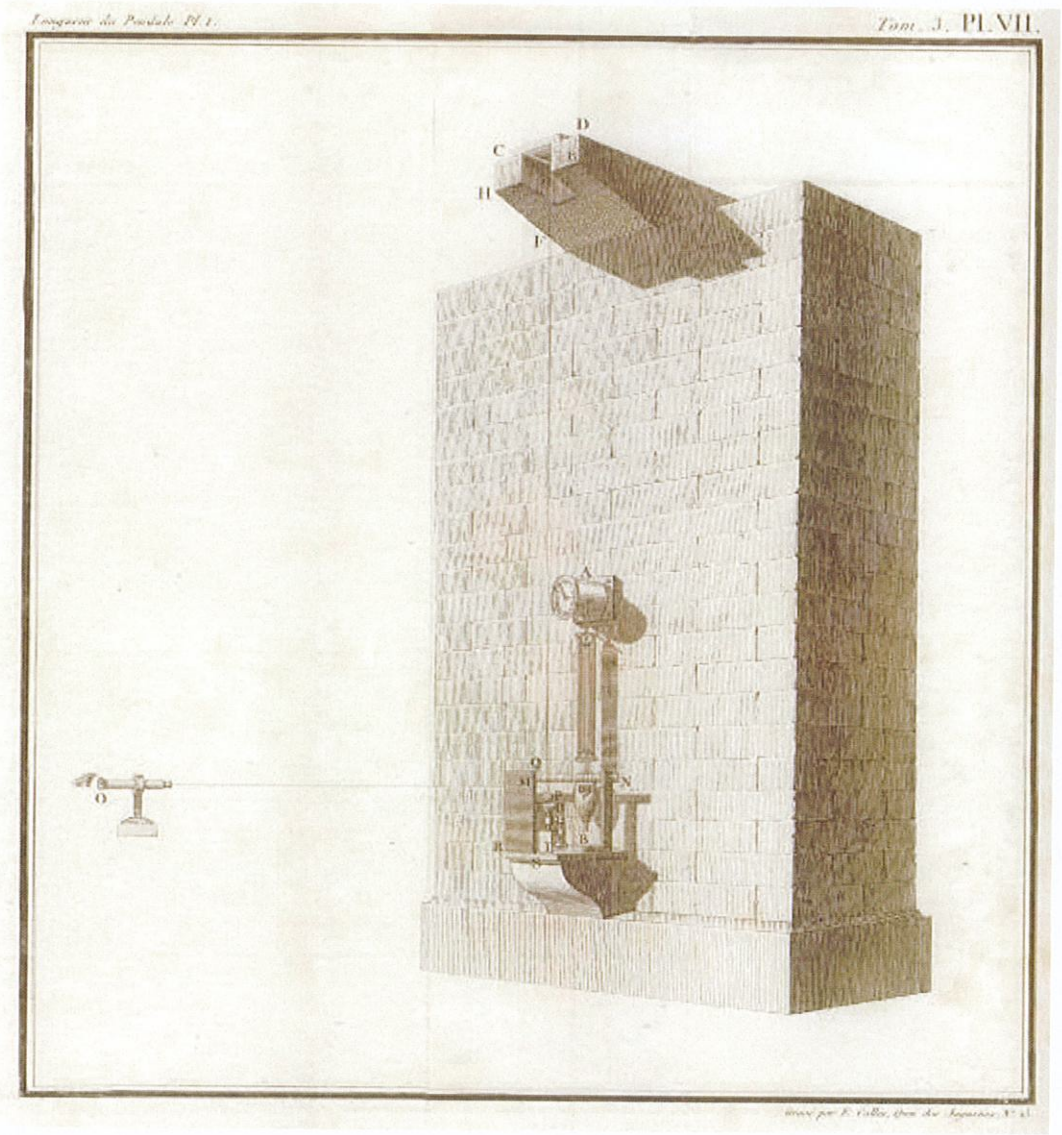


Figure 1 Le pendule de deux-toises (quatre-mètres) réalisé à l'Observatoire de Paris par Borda et Cassini en 1795 [23] permétait de déterminer la longueur d'un pendule battant la seconde. Il était destiné à être conservé, dans l'éventualité où quelque chose arriverait au Mètre, afin que sa longueur puisse être reproduite sans qu'il y ait besoin de recommencer la triangulation. A l'origine, il était prévu de l'installer à Bordeaux à une latitude de 45°, mais il a finalement été décidé que cela n'était pas nécessaire. Malheureusement, ce pendule a été abandonné par la suite et il n'en reste aucune trace à l'Observatoire. Le pendule lui-même était un fil de fer auquel était suspendue une sphère de platine de 4 cm de diamètre. La période était mesurée par comparaison avec le balancier de l'horloge par la méthode des coïncidences, grace à la visée dans une lunette, tel que l'on peut le voir sur l'image. Il faut noter que le but de l'ouvrage était de déterminer la longueur d'un pendule qui bat les secondes, et non de déterminer la période d'un pendule dont la longueur était d'un dix millionième de l'arc du méridien, comme indiqué à l'origine dans le rapport de 1791 au point N° 4.

Ils concluent : *« On voit par ces comparaisons que nos vingt expériences s'accordent singulièrement bien entre elles ; d'après cela nous avons cru qu'il était inutile de les multiplier davantage, et nous pensons que leur résultat général déterminera avec beaucoup de précision la longueur du pendule à seconde ...* [cependant] *la longueur du pendule à secondes présente une idée trop complexe pour qu'on puisse s'y arrêter pour l'unité de longueur. Une force et le temps seraient alors les véritables unités fondamentales, et il serait nécessaire de connaître ces unités avant celle de la longueur. La longueur du pendule simple a cependant le mérite d'être, pour un lieu déterminé, dans un rapport constant avec une dimension choisie de la terre. »*

Dernier commentaire : s'ils avaient choisi la longueur d'un pendule qui bat la seconde comme définition du Mètre en 1791, ils auraient immédiatement concrétisé la grande idée exposée dans les premiers paragraphes de leur rapport. Au lieu de cela, nous avons dû attendre 2018 pour que la 26ème Conférence Générale des Poids et Mesures adopte un système qui *"n'appartenant exclusivement à aucune nation, on pouvait se flatter de le voir adopter par toutes ... De plus, ceux qui voudraient adopter cette mesure déjà établie chez un autre peuple, ou qui après l'avoir adoptée auraient besoin de la vérifier, ne seraient pas obligés d'envoyer des observateurs à l'endroit où la première opération aurait été faite ».* Une occasion ratée?

Achevé d'imprimer en décembre 2019 sur les presses de l'Imprimerie Peau - 61340 Berd'huis

Dépôt légal : décembre 2019

ISBN : 978-2-491688-00-4