LA LATITUDE ET L'HEURE LOCALE

La mécométrie ne donnait qu'un lieu géométrique du navire : la courbe d'égale déclinaison sur laquelle il se trouvait. Pour le situer complètement il fallait un second élément : la latitude. D'autre part dans les déterminations astronomiques de la longitude la latitude était nécessaire soit pour le calcul des observations, soit pour la détermination de l'heure locale. Or latitude et heure locale s'obtinrent par des observations de hauteur. Il faut donc dire quels furent les instruments employés pour mesurer la hauteur ou pour avoir directement les éléments en question.

Car il y eut des tentatives pour les obtenir par une observation directe. Cortes avait déjà décrit une machine compliquée pour avoir la latitude et l'heure. Et voici l' « hémisphère nautique » de Coignet qui date de 1581. On voit sur la figure 10 qu'il réalisait les cercles principaux de la sphère locale : l'horizon, le méridien, l'équateur, le vertical et le cercle horaire — partiellement — de l'astre, au moins du Soleil. Pour l'utiliser, on orientait le méridien de l'instrument au moyen de la boussole encastrée dans le cercle horizontal: puis, ayant dirigé l'alidade, par les pinnules sur le Soleil, on déplaçait l'équateur et le long de l'équateur, l'élément du cercle de déclinaison de manière à faire affleurer l'extrémité de l'alidade à la division correspondant à la valeur de la déclinaison. On lisait alors la latitude et l'heure. C'était aussi peu pratique que possible. Aussi William Burrough n'aimait-il pas l'instrument, pas plus que le P. Fournier qui pensait qu'il n'avait jamais servi, bien qu'il en ait vu, dit-il, entre les mains de matelots. Néanmoins il était d'une conception ingénieuse et nous avons vu un instrument très moderne construit dans une forme semblable.

Nous citerons encore ici le « sea-rings » de Wright sous la forme un peu plus simple que l'on trouve dans l' « universal ring dial » décrit par Seller encore dans l'édition tardive, de 1740, de sa *Practical Navigation* (fig. 11). L'anneau vu de face est double, la partie intérieure pouvant tourner dans la partie

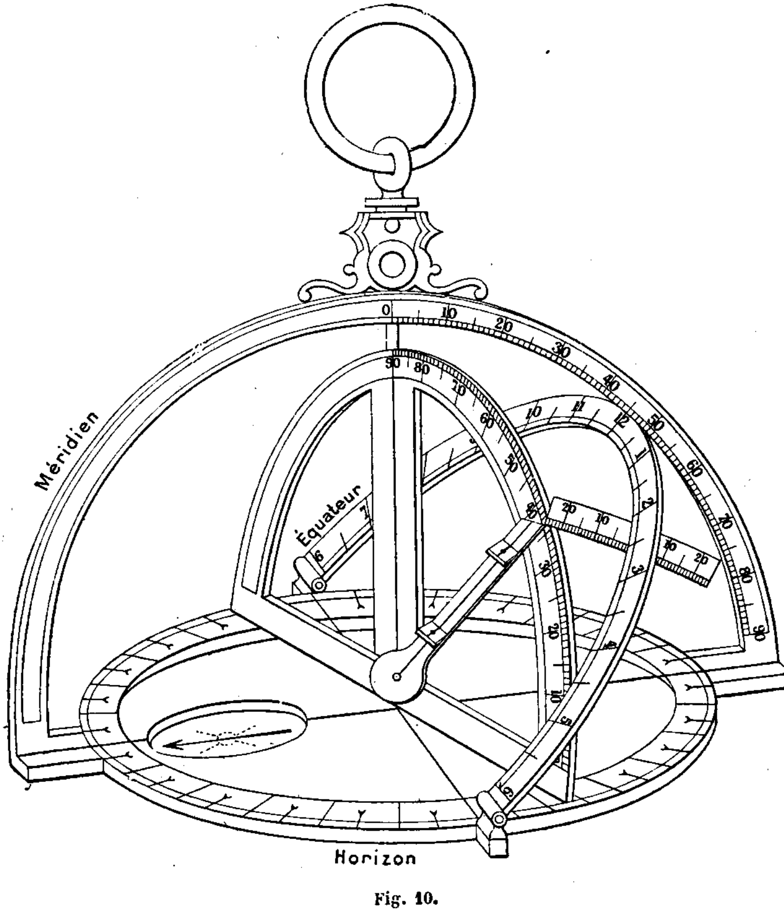

Fig. 10.

extérieure de manière à incliner l'axe AA′ sur la verticale du point de suspension d'un angle égal à la colatitude. La petite boule B, mobile le long d'une échelle graduée, était placée à une distance du centre de l'instrument égale à R tang. D, R étant le rayon de l'équateur, D la déclinaison du Soleil. Dès lors, on faisait tourner le tout autour de la verticale de manière à recevoir l'ombre de la boule sur le cercle QQ′ perpendiculaire à

AA′. Dans ces conditions on peut s'assurer que AA′ se plaçait le long de l'axe du monde et que l'ombre marquait l'heure de l'observation. On avait donc ainsi un cadran solaire original.

Parmi ces instruments qui ne sont que des curiosités, on peut encore ranger le « nocturnal » ou « nocturlabe », dont on trouve quantité de formes. « C'est un instrument, dit encore le Père Fournier, parlequel, à toute heure de la nuit, on peut trouver combien l'étoile du nord est plus haute ou plus basse que le pôle. On s'en peut aussi servir pour savoir quelle heure il est. » La figure 12 montre celui qu'avait conçu Wright; elle est faite d'après sa description. On va voir que le nocturnal permettait simplement de superposer une portion de sphère céleste à une portion de sphère locale, autour

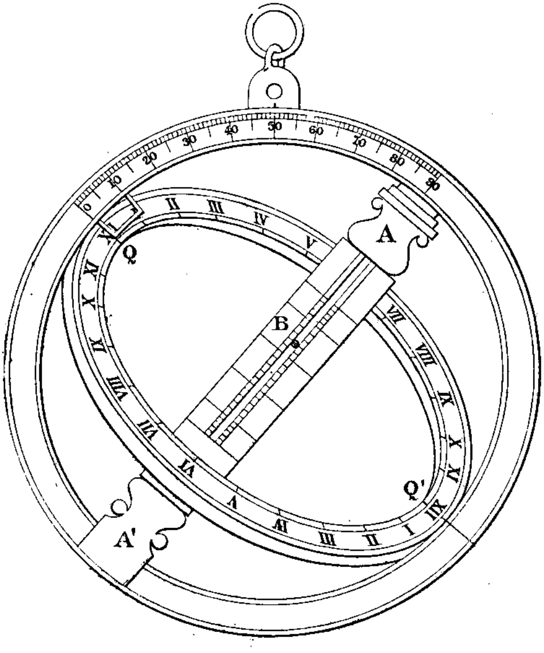

Fig. 11.

du pôle. Il comprenait un « cercle des jours » JJ qui portait une division répondant aux mois et aux jours; un « cercle des heures » HH gradué en heures; un grand bras BC et un index IC. Au moyen du cercle des jours on formait entre le bras et l'index un angle égal à la différence des ascensions droites de β Petite Ourse et du Soleil le jour de l'observation. Dès lors, en orientant le grand bras vers les Gardes de la Petite Ourse l'index se trouvait dirigé vers le Soleil et donnait l'heure par conséquent. A une distance αC du centre C égale à la distance polaire de α Petite Ourse, l'instrument étant supposé adapté à l'extrémité du « sea quadrant » de Wright (fig. 12 *bis*), se trouvait le centre α du « cercle de la Polaire » par lequel on obtenait la projection de la distance polaire indiquée sur le méridien, d'où résultait la latitude. On voit ainsi qu'il fallait viser à l'horizon, à la Polaire, aux Gardes et maintenir le « sea quadrant » vertical ; ce qui devait être bien difficile sur un bâtiment à la mer, sinon impossible. Cependant on trouve déjà le nocturnal dans Medina. Mais il comprenait alors simplement un cercle des jours donnant pour le milieu et la fin de chaque mois la position des Gardes à minuit. En mettant le centre du cercle sur la Polaire et un diamètre origine vertical, on voyait si l'on était avant ou après minuit et de combien d'heures ; au moins lorsqu'on n'était pas difficile sur l'exactitude recherchée. D'autre part Nunes prétendait que la distance polaire de α Petite Ourse variait suivant le « climat », c'est-à-dire alors suivant la latitude, et il condamnait le nocturnal.

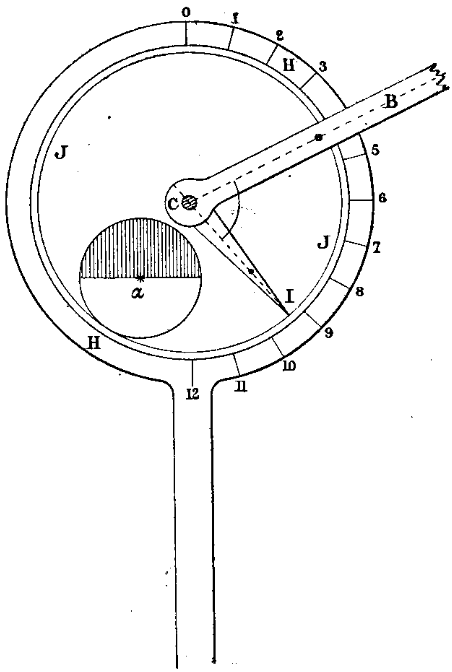

Fig. 12.

Les instruments qui suivent avaient plus de valeur et d'utilité. Nous avons vu l'origine de l'astrolabe. Ce fut parfois un instrument très lourd, jusqu'à peser 10 à 12 livres, afin de mieux résister, disait-on, au vent et à l'agitation du vaisseau. Le musée de Caudebec-en-Caux en possède un daté de 1632 (fig. 13). D'après Anthiaume il a 184 mm. de diamètre et pèse 3.840 grammes. L'observation devait être incommode, même avec deux observateurs, et fati-

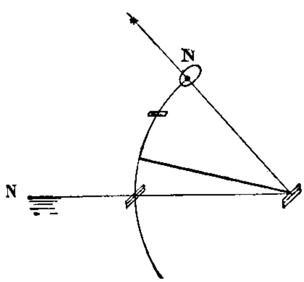

Fig. 12 *bis*.

gante. Medina s'étend longuement sur l'instrument et il agrémente son exposé d'amusantes figures où l'on voit un homme de mer, fort grossier, observant avec son astrolabe dans tous les cas qui peuvent se produire pour l'observation de la latitude. C'est ainsi qu'un incunable antérieur, conservé à Munich, et destiné aux marins, ne contient pas moins de 17 exemples du même problème. Dans ce *Règlement de Munich* et dans d'autres traités analogues, où l'on trouve les déclinaisons du Soleil, il semble, d'après Bensaude, qu'on ait extrait ces dernières de l'*Almanach Perpetuum* dû à un savant juif : Abraham Zacuto, qui enseigna l'astronomie à Salamanque de 1474 à 1492 et qui passa ensuite en Portugal. Il tenait lui même ses connaissances des Arabes donc sans doute des Tables Alphonsines.

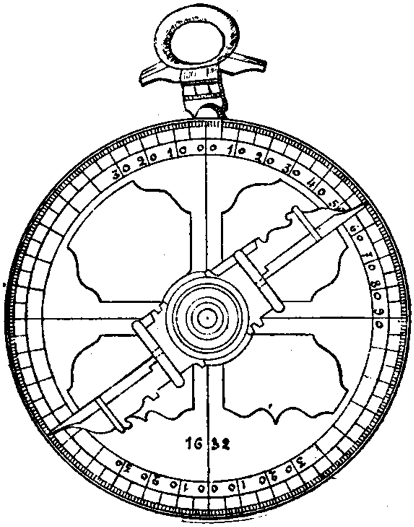

Fig. 13.

On observera sur la figure 13 le rapprochement des pinnules que l'on maintenait très peu éloignées l'une de l'autre pour donner plus de stabilité à l'alidade; mais il n'en était pas toujours ainsi comme l'attestent les figures des traités; elles se trouvaient aussi aux extrémités de l'alidade, ce qui convenait mieux à une orientation précise. C'est ainsi par exemple qu'est représenté l'astrolabe du traité de Wright.

On simplifia l'astrolabe en le réduisant à un simple anneau sans diamètres intérieurs ni alidade pour en faire l' « anneau astronomique ». Il était percé d'une ou deux fenêtres par où le Soleil formait image sur la tranche intérieure opposée. On avait alors des angles inscrits, donc des graduations qui étaient deux fois plus étendues que les graduations correspondantes de l'astrolabe; de sorte que l'anneau avait plus de sensibilité. Cet anneau fut employé très tard puisque, d'après Montucla Chazelles, ingénieur hydrographe, travaillant aux cartes de la

Méditerranée jusqu'aux environs de 1700, on y employa avec assez de succès l'anneau astronomique. Il était d'ailleurs plus commode que l'astrolabe. Mais astrolabe et anneau étaient directement influencés par les mouvements du navire. Il n'en était pas de même pour les instruments qui suivent.

L'introduction de l' « arbalète », « arbalestrille », ou « bâton de Jacob » encore appelée « croix géométrique », « verge d'or », « rayon astronomique », fut un événement. Elle semble remonter au début du XIVe siècle. On en trouve la description chez Jean Werner dans ses Commentaires de la *Géographie de Ptolémée* qui sont de 1514; puis dans tous les traités de navigation depuis Medina jusque vers la fin du XVIIIe siècle; car elle était encore couramment employée à cette époque. Vers 1725 Radonay écrit qu'elle est utilisée sur les vaisseaux du roi. En 1745 Daniel Bernouilli ne sait encore si par mer agitée il faut donner la préférence à l'arbalète ou à l'octant et dans l'édition de 1781 de la *Navigation* de Bouguer, il est écrit que l'arbalestrille est *presque* abandonnée depuis quelques années; ce qui indique qu'on s'en servait encore. Comme la « dioptre d'Hipparque », dont elle ne différait pas essentiellement, elle était composée d'une « flèche » de bois sur laquelle glissaient des « marteaux » (fig. 14) de différentes longueurs. On choisissait le marteau à employer dans une mesure déterminée suivant l'estimation de la hauteur et on attribuait une des faces de la flèche aux graduations correspondant aux divers marteaux. Telle fut du moins la pratique courante. La modification proposée par Gemma Frisius pour substituer un unique marteau à curseur (fig. 15) aux marteaux ordinaires ne paraît pas en effet avoir été adoptée. Avec le « bâton astronomique » de ce dernier on devait se servir des deux extrémités du mar-

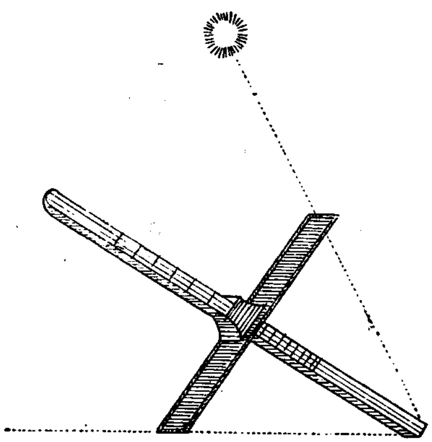

Fig. 14.

teau de 90° à 30° et pour les hauteurs plus petites le curseur ou la moitié entaillée remplaçait le marteau complet. Le nom d'arbalète donné à cet instrument venait simplement du rapport qu'il avait « en sa figure avec les arcs, flèches et arbalestes communes » et parce que « lorsqu'on prenait hauteur » avec lui à quelque astre on se mettait « en la posture que se mettrait quelqu'un qui viserait à un but ». Sur quoi le Père Fournier rapporte le récit d'une méprise à laquelle l'instrument prêtait assez naturellement : « L'un de mes amis qui était aux champs, dit-il, comme il voulut prendre la hauteur de quelque astre... un paysan se persuadant qu'il était fol de vouloir tirer aux astres alla quérir ses voisins pour participer au plaisir qu'il prenait... Ces villageois se tenant coi sans mot dire... comme ils regardaient attentivement tantost le ciel, tantost cet astronome, il s'escheut que vers la partie où il avait dressé son arbaleste, une exhalaison s'enflammant fit paraître l'un de ces météores que nous appelons *stella cadens,* qui paraist à nos yeux comme une étoile ou fusée qui tomberait du ciel en terre; de quoy les pauvres gens se trouvant surpris, l'un d'eux s'écrie : « Par ma foy il en a abattu une », et tous courants après pour la recevoir ou voir de plus près... ». Mais l'arbalète ne donnait pas toujours lieu à des histoires « gracieuses » comme celle qui précède. Comme toutes les nouveautés elle eut ses détracteurs; en particulier chez ces vieux « shipmasters » qui, au dire de Bourne, se moquaient de

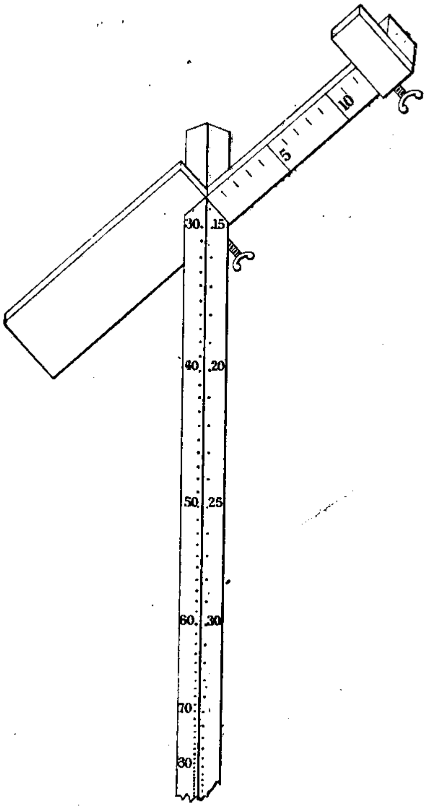

Fig. 15.

ceux qui employaient cartes et bâtons de Jacob. Ils appelaient ceux qui observaient avec cet instrument pour obtenir la latitude « sun shooters » ou « star shooters » et demandaient s'ils les attrapaient. On passa outre, comme on l'a vu. L'instrument fut très discuté, il est vrai, à juste titre et en même temps très étudié. Wright nota ses principales imperfections. L'œil n'était pas placé à un point défini à l'extrémité de la flèche; il y avait

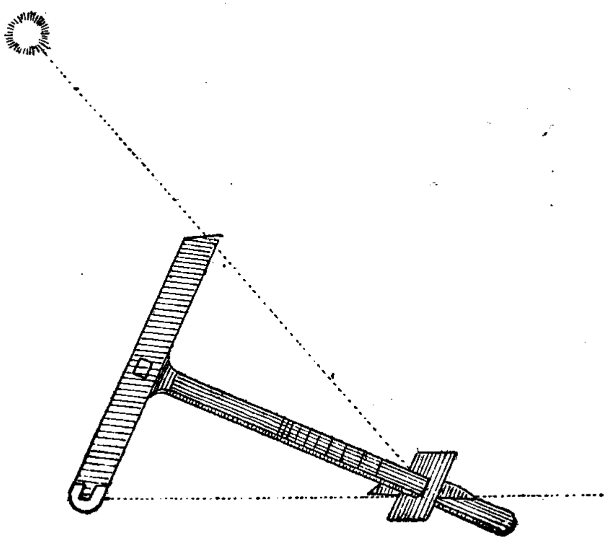

Fig. 16.

excentricité de ce fait et il estime les erreurs qui en résultaient à 10, 20, 30′. Il n'était pas commode, malgré la légèreté de l'instrument, de viser à l'horizon et à l'astre. Les graduations étaient souvent imparfaites, et le Père Fournier pensait au total qu'opérant aux étoiles, au pied du grand mât, quand même le temps était le plus beau du monde, il était impossible de se tromper de moins de 12 à 15′, même sans aucune réfraction à l'horizon et « que ce serait Tycho ou Lansberge qui opérassent ». Mais il faut noter que Joao pilote de Cabral déclarait qu'à la mer, avec l'astrolabe sans doute, on faisait des erreurs de 4 à 5°.

Bouguer le fils, en 1753, indiquait des améliorations. On observait aussi le Soleil, par derrière, sans verre coloré ou enfumé, (fig. 16), en se servant alors d'un petit marteau ou « gabet » sur le bord duquel on recevait l'ombre du Soleil. Mais on ne savait pas bien alors quel était le point du disque dont on prenait la hauteur ; si c'était le centre ou son bord supérieur. Bouguer remarquait qu'on définissait mieux les côtés de l'angle mesuré par l'emploi de pinnules, visières ou traverses mises aux extrémités du marteau ; d'ailleurs en mettant la tranche du gabet sur l'horizon on s'assurait que l'instrument était maintenu dans un plan vertical.

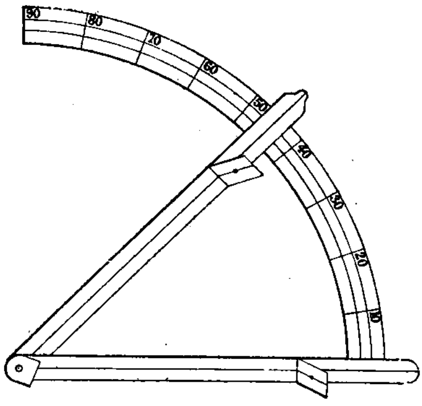

Fig. 17.

Un autre type d'instruments qui eurent une grande vogue comprenait d'abord le « quart nautique » dont parle aussi Medina (fig. 17 et 18). Dérivé encore des astrolabes arabes du Moyen Age il comprenait un arc gradué, des pinnules et une alidade et les figures suffiront pour le faire connaître. Dans la figure 18 on remarquera deux groupes de pinnules pour viser à l'horizon ; le jeu supérieur était le plus commode pour les grandes hauteurs. C'est avec un instrument de ce genre que Diego Gomez de Cintra, dès 1462, observa la latitude, sur la côte de Guinée. On mettait naturellement le Soleil par derrière. Du quart nautique dériva vraisemblablement le « quartier anglais » ou « quartier de Davis » ; plus léger et moins encombrant par suite de la division de l'arc unique en deux autres de dimensions très différentes. « Ce n'est autre

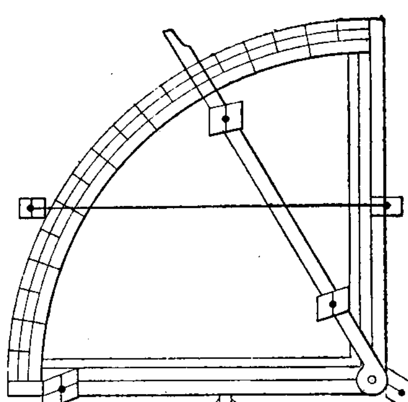
Fig. 18.

qu'un quart de cercle », disait Bouguer, remarquant aussi qu'il n'était propre qu'à « prendre hauteur par derrière ».

La première forme en apparaît en 1594, dans un petit livre du navigateur John Davis, *The seaman's secrets*. Adrien Metius le représente d'après un instrument qu'il vit chez Frédéric Houtman, gouverneur d'Amboine : « vidi apud Ambonæ gubernatorem Fred. Houtman, Radium per quem altitudo Solis accipitur, ex aversa Solis parte... », lit-on dans l'édition de 1631 de son *Primum Mobile*. Et tel est le véritable quartier inventé par Davis. On a plusieurs témoignages de son emploi entre les années 1620 et 1630 environ. Piétro della Valle en 1623 le rencontre sur un vaisseau anglais entre Ormuz et Surate. On l'y pratiquait beaucoup et on lui dit qu'il était d'invention récente. Il est décrit par le capitaine Saltonstall vers la même époque. Enfin Thomas James à la recherche des passages du N. W. en 1631, avait deux « Davis backstaves » (fig. 19). La forme définitive se montre peu après (fig. 20). Il comprit alors deux arcs concentriques. L'un, de petit rayon et de 60° d'étendue portait une pinnule mobile, ou un verre ardent, ajouté plus tard par Flamsteed et Halley, ou même par Hooke, projetant une image du Soleil sur un écu ou marteau placé au centre des arcs et par suite de sa petite distance au centre de l'instrument l'image était nette. Il fallait du reste, remarque Bouguer, bien prendre garde à la situation de ce petit verre ardent qui pouvait « détourner » les rayons du Soleil ; ce qui veut dire qu'il était très grossier. Pinnule ou verre ardent était assujetti à l'avance suivant la hauteur à observer et le grand arc portait une division par transversale, ou un vernier qui donnait aisément la minute étant donné la grandeur du rayon de l'arc. Si on en croit les *Mémoires de l'Académie des Sciences* de 1722 ou les estimations de Chabert

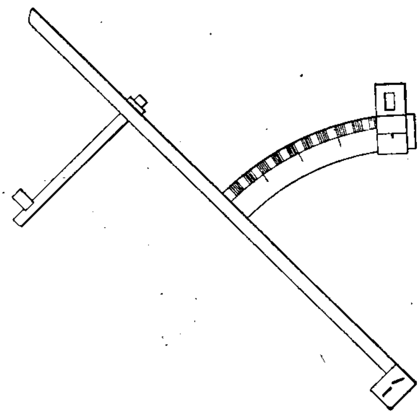

Fig. 19.

en 1753, on pouvait avec l'instrument obtenir les hauteurs à 5 ou 6′ près, malgré la difficulté qu'il y avait à maintenir l'image du Soleil sur la fente du marteau avec des roulis. Il fut en tout cas utilisé jusqu'à la fin du XVIIIe siècle puisqu'en 1781 La Caille recommande de ne pas négliger de s'en pourvoir « car il est moins sujet que l'octant aux accidents qui rendent celui-ci

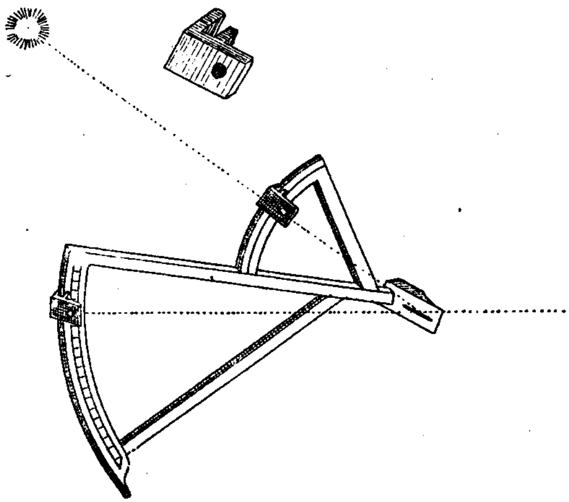

Fig. 20.

inutile pour le reste du voyage ». On ajoute qu'il pouvait, quand il était bien construit — ce qui devait arriver rarement — donner une hauteur à 1 ou 2′.

Comme dans toutes les questions relatives à la navigation, le XVIIIe siècle fut ici encore marqué par de nouvelles tentatives pour doter les marins de bons instruments propres à la mesure des hauteurs. Ces instruments firent le sujet du prix de 1729, décerné à Bouguer. Dans la pièce envoyée, il décrit un quart de cercle suspendu par un anneau fixé à un de ses côtés, de manière que l'autre côté soit vertical, et il donne aussi, avec de grands détails, un projet d'anneau astronomique monté sur une boîte lestée flottant sur l'eau d'un récipient. Les dimensions sont les suivantes : l'anneau a 17 à 18 pouces (46 à 49 cm.) de diamètre ; les côtés de la boîte qui le soutient ont 24 et 8 pouces (65 et 22 cm.) ; son tirant d'eau est de 2 pouces 1/3 (6 cm.). Il tenait beaucoup à ce que le centre de gravité du système flottant soit exactement entre la flottaison et le fond du flotteur, voulant ainsi atténuer les mouvements de l'anneau; et il voulait, en se passant de l'horizon, éviter les erreurs dues aux réfractions horizontales et à la dépression, aux anomalies de laquelle on attribuait alors une valeur très grande. L'astronome anglais Wales faisait en effet monter à 10′ les erreurs moyennes sur la dépression pour lesquelles nous comptons aujourd'hui 1 à 2′.

Toutefois Bouguer donnait la préférence, en fin de compte, au quatier anglais de Davis, dont il proposait seulement de simplifier la construction en donnant la même dimension aux deux arcs et en fixant le verre ardent à une des extrémités de l'arc unique, de 55 à 58 centimètres de rayon, les réunissant.

Tout cela n'avait pas grande valeur, mais ce mémoire de Bouguer lui fournit l'occasion d'étudier la réfraction atmosphérique dans l'hypothèse de couches sphériques et de donner une théorie correcte de la « solaire », nom qu'il donne à la courbe décrite par un rayon lumineux arrivant d'un astre à un observateur. Il n'était pas, en réalité, comme il le croyait, le premier à avoir tenu compte de la sphéricité des couches dans cette question; mais il fut bien le premier à aboutir à des formules pratiquement utilisables.

Le prix de 1745 eut pour sujet « la meilleure manière de trouver l'heure en mer, le jour, au crépuscule et la nuit, surtout quand on ne voit point l'horizon ». Les pièces envoyées étant jugées insuffisantes, le prix fut reproposé pour 1747 et doublé. On le partagea entre Daniel Bernouilli, professeur en médecine à Bâle, qui renvoya, avec un supplément, sa pièce de 1745, et un autre auteur resté anonyme. L'Académie, toutefois, rappelait qu'elle ne déclarait pas adopter toutes les propositions contenues dans les pièces qu'elle couronnait. Bernouilli (pièce de 1745) propose d'abord de rapporter la hauteur à un fanal placé sur un esquif : idée impraticable qui a pourtant été reprise par Faye il y a une cinquantaine d'années. Mais voici un appareil plus compliqué. Bernouilli suppose que le bâtiment sur houle oscille comme un pendule simple autour d'un axe A. Soit alors B (fig. 21) un point du navire; le mouvement de B est mouvement pendulaire. En B, mettons trois pendules 1, 2, 3 d'inégales longueurs.

Ces pendules vont osciller et il admet que la détermination simultanée des angles $\widehat{1B2}$ et $\widehat{2B3}$ permettra de trouver l'angle $\widehat{2BV}$ de l'un des pendules avec la verticale vraie BV. Dès lors, supposons un demi-cercle gradué, fixé à AB et une lunette LL tournant autour de B et appliquée contre le secteur. On peut, dit Bernouilli, imaginer un mécanisme quelconque qui immobilise à la fois les pendules et la lunette sur le limbe au moment où on vise un astre — quoi de plus simple, en effet? — et on en conclura la hauteur. Mais, même en admettant que le problème soit déterminé et possible, dans les conditions où le pose Daniel Bernouilli, sa solution ne serait d'aucune utilité à la mer, parce que le bâtiment en roulis sur houle est très éloigné d'avoir un mouvement conforme à celui qui lui est attribué par les hypothèses faites. Il faudrait tenir compte, dans ce cas, du mouvement circulaire de translation, totalement négligé par l'auteur. Et enfin, si le bâtiment oscillait autour d'un axe fixe A, il suffirait, pour avoir la verticale, de suspendre un pendule en un point de cet axe. Voilà pour la première pièce. Celle de 1747 ne contient que des exercices de trigonométrie sphérique où Bernouilli montre qu'on peut calculer l'angle horaire local si on se donne deux hauteurs d'un même astre et l'intervalle de temps qui les sépare; deux hauteurs de deux astres, simultanées ou non; la latitude et le moment où deux astres sont dans le même vertical; problèmes qu'il est aisé de résoudre, mais qui ne sont pas pratiques. Quant à l'observation de deux astres dans le même vertical, on pourrait la faire, dit-il, au moyen d'un fil à plomb, moyen si imparfait que Bouguer déclarait qu'il en résulterait une erreur de 15 à 20 minutes sur l'heure conclue.

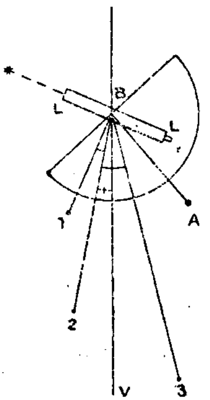

Fig. 21.

L'autre pièce envoyée au concours varie ces exercices en déduisant l'angle horaire de la connaissance de l'azimut, de la déclinaison et de la hauteur ou de la latitude; ou encore de la latitude des déclinaisons et des ascensions droites de deux astres et du temps écoulé entre leurs passages par la même hauteur, ce qu'on exprimait en disant au même almicantarat; un almicantarat était un petit cercle dont le centre est au zénith. Mais tout cela n'était pas marin. Enfin, on trouve d'autres projets aussi peu satisfaisants, comme celui qui consistait à monter une astrolabe sur une suspension à la cardan, afin de la rendre insensible aux mouvements du navire; et cet autre, dans lequel on imaginait d'articuler un secteur immense au sommet d'un mât ajouté au navire à cet effet.

Nous devons au jésuite Pèzenas, professeur d'hydrographie

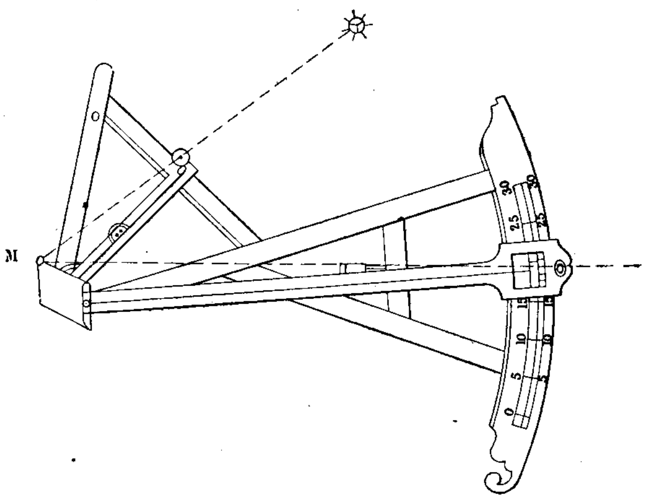

Fig. 22.

de 1728 à 1749, et directeur de l'observatoire de Marseille, un grand nombre d'articles et d'ouvrages sur la longitude. Des études qu'il a publiées dans les *Mémoires de Mathématiques*, rédigés à l'observatoire de Marseille en 1755, contiennent la description d'instruments destinés à mesurer la hauteur ou à calculer l'angle horaire. Vers 1730, Elton construisit un quartier à niveaux dérivé du quartier de Davis. Il s'en distinguait (fig. 22) en ce que la pinnule oculaire était montée sur une alidade portant un niveau à bulle d'air permettant d'observer sans horizon. L'écu portait un second niveau destiné à mettre l'instrument vertical et il y en avait encore un troisième sur le bras solidaire du verre ardent, avec lequel on pouvait mettre ce bras horizontal, afin d'observer par devant en regardant l'astre le long de l'alidade. Le verre ardent n'occupait d'ailleurs que trois positions, aux extrémités et au milieu de la petite traverse. Deux capitaines anglais nous ont laissé leur opinion sur cet instrument. En 1730, l'un d'eux, le capitaine Walter Hoxton, du *Baltimore,* allant de la Tamise en Amérique du Nord, compare ses résultats à ceux qu'il obtient avec le quartier de Davis et il trouve qu'avec des vents forts et de grosses vagues, la différence va à 5 ou 6′ ordinairement, mais quelquefois elle atteint 16′ ; une fois 21′. Le second déclare simplement qu'il a pu observer avec le quartier d'Elton, par « des vents piquants et brume épaisse ».

L'idée d'employer un niveau pour se passer de l'horizon, ce que cherchait Elton, avait déjà été réalisée quelques années, auparavant par Radouay, qui avait imaginé de construire un cadre carré (fig. 23) portant deux arcs gradués, décrits du centre du carré et s'appuyant sur deux côtés opposés. Sur ces arcs se déplaçaient des pinnules qui n'étaient même pas liées à une alidade et qu'il fallait placer symétriquement par rapport au centre de l'instrument. Le niveau s'ajustait à un des côtés situés entre les limbes, pour les hauteurs plus petites que 45°; à un des côtés soutenant un arc pour les hauteurs plus grandes que 45°. Hadley enfin, toujours dans le même but de se passer de l'horizon, montait un quart de cercle sur un axe vertical fixé au navire. Pour mesurer l'inclinaison de l'axe au moment où on prenait la hauteur, il adaptait un niveau d'eau au bas du quartier. Ce niveau (fig. 24) était constitué par un tube sans fin formé en haut et en bas de deux arcs concentriques. Le liquide ne remplissait pas l'arc inférieur qui était gradué. Il se déplaçait dans ce tube avec les mouvements du navire, mais un robinet R, fermé au moment où on effectuait une visée, permettait d'arrêter le liquide dans la position qu'il avait à cet instant, et, par suite, d'avoir l'inclinaison de l'instrument. Or cette idée a été récemment reprise en aviation. On voit qu'on se donnait beaucoup de mal pour n'aboutir qu'à des résultats médiocres. Les niveaux ne pouvaient que courir après leur position d'équilibre sans cesse variable, parce

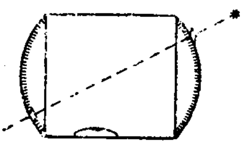

Fig. 23.

Fig. 24.

qu'elle dépendait à chaque instant de la verticale apparente et non de la verticale vraie.

En 1751, l'un de ces inventeurs, l'anglais Serson, fut mieux inspiré en pensant à utiliser le mouvement gyroscopique d'une toupie en rotation rapide, pour conserver à bord la direction de la verticale. Short, dans les *Philosophical Transactions* de 1751-52, dit que l'instrument de Serson a été perdu à bord du *Victory*. Il dit aussi que la toupie tournait 35 minutes dans l'air et 2 heures 16 minutes dans le vide. Mais Smeaton améliora cet instrument de Serson, notamment en rapprochant le centre de gravité de la toupie de la pointe de l'axe de rotation. Bouguer décrit cet instrument de Smeaton. C'était une toupie au-dessus de laquelle était fixé un miroir horizontal. Elle était de métal, avait 3 pouces (8 cm.) de diamètre et était très plate, ayant la forme du couvercle d'une boîte cylindrique. « Sous le miroir, dit Bouguer, il y a un petit creux en agate qui reçoit l'extrémité d'une pointe d'acier. » Pour lancer le gyroscope, on le fixait au moyen du pivot et d'une barre de bois contre laquelle s'appuyait son axe et qui était liée à la partie supérieure de la boîte contenant l'appareil. Le mouvement de rotation était donné par un ruban enroulé autour de l'axe. Les difficultés étaient de faire la machine et de faire le lancement, l'axe étant vertical. C'était toutefois le germe d'une heureuse idée, puisque, c'est en mettant le point de suspension au-dessus du centre de gravité, que l'amiral Fleuriais a réalisé récemment un précieux appareil, donnant, à un très petit nombre de minutes près, la direction de l'horizon, par une mer moyennement agitée au moins.

Cette toupie de Smeaton coûtait, d'après Delambre, 3 guinées et elle tournait pendant 12 à 15 minutes. La recherche d'un horizon artificiel donna d'ailleurs lieu à des idées étranges. C'est ainsi que Medina et Fournier après lui, proposaient de remplacer l'horizon invisible par l'extrémité d'une perche d'une hauteur égale à celle de l'œil de l'observateur et tenue verticalement par un aide à quelque distance. La nuit, ajoutait-on, on pouvait éclairer cette extrémité. Robertson, lui, décrit un niveau formé d'une cuvette de mercure sur lequel flottait un miroir de métal ou de verre. Le tout, devant être employé à bord, à la mer, était suspendu à la cardan. Il ajoute que par temps calme, la mer elle-même peut servir d'horizon artificiel en réfléchissant le Soleil; observant, il est vrai, que ce dernier moyen n'était généralement pas employé. On n'a pas de peine à le croire.

La hauteur obtenue, il fallait y apporter les corrections nécessaires. Ici intervenaient la dépression de l'horizon, la réfraction, la parallaxe, le demi-diamètre de l'astre quand c'était le Soleil. Nous avons vu que l'idée de la dépression était très nette chez Wright. Il n'en est pas de même, bien plus tard, chez le P. Fournier qui semble la confondre avec une variation de la parallaxe, due à une augmentation du rayon de la Terre égale à l'altitude, et qui conclut qu'elle est négligeable. Il ajoute qu'il dit cela « contre un certain qui a imprimé depuis peu d'années... qu'il faut avoir égard à la hauteur de l'œil qui opère »; d'où on voit que les idées les plus élémentaires pour nous ont quelquefois eu de la peine à se faire accepter des esprits les plus prévenus. On pensait aussi que la réfraction n'était pas la même pour le Soleil et la Lune d'une part, pour les étoiles d'autre part. Les tables que donne le P. Fournier attribuent, d'après Tycho Brahé, à l'horizon, une réfraction de 34′ au Soleil et à la Lune; de 30′ seulement aux étoiles. A 45° elle est de 5″ pour les deux premiers astres, puis nulle; tandis qu'elle devient nulle pour les étoiles à partir de 20°. Et Wright fait exactement de même. D'un autre côté on croyait à la possibilité de réfractions énormes. Ainsi Barentz hivernant à terre par 76° de latitude, au nord de la Nouvelle Zemble, vit le Soleil réapparaître après la nuit polaire, avec une avance de 15 jours. On disait quelquefois que ce retour prématuré était le fait d'une réfraction de 4°. On ne sait d'ailleurs que penser de cette anomalie qui a beaucoup occupé le monde savant au XVII^e siècle.

Quant à la parallaxe solaire, Fournier la fait, d'après Lansberge, qui l'avait déterminée en mesurant les dimensions de l'ombre de la Terre sur la Lune pendant une éclipse de Lune de 2′18″. On sait qu'il a fallu attendre les mesures de 1672 à Paris et Cayenne pour approcher de la vérité, en la fixant alors à 9″5. Enfin le même recueil fait varier le diamètre du Soleil de 29′50″ à 34′9″ et va, comme Ptolémée, jusqu'à attribuer un diamètre de 36′ à la Lune. Un siècle plus tard environ, ces diverses corrections, telles qu'on les trouve dans Bouguer, sont correctes ; mais par contre la troisième édition du livre de Wright, qui est de 1657, donne encore 3′ à la parallaxe solaire.

D'ailleurs, au dire de Radouay, les pilotes négligeaient toutes ces corrections ; aussi bien que les erreurs systématiques de leurs instruments avec lesquels ils visaient au-dessus ou au-dessous de l'horizon, à vue ; comme on fait d'un mauvais fusil en visant à côté du but, ajoutait-il.

Pour déterminer la latitude par la hauteur, on s'est servi de tout temps des hauteurs de la Polaire et des hauteurs méridiennes. Médina attribuait à la distance polaire de α Petite Ourse une valeur de 3°5 qui était excessive pour le milieu du XVI^e siècle. Pour en tenir compte son traité indique la méthode suivante : De petites figures représentent diverses positions par rapport à l'horizon des Gardes et de la Polaire. Elles sont accompagnées d'une explication telle que celle qui suit, relative à la figure 25.

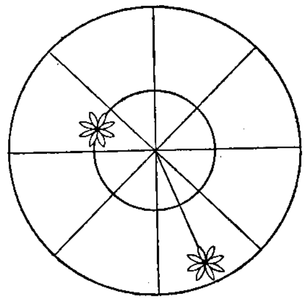

Fig. 25.

Les Gardes se trouvant dans le S. S. E. (nel ostro siroco), la Tramontane est à 2° au-dessus du pôle. Ce procédé était général et fut longtemps employé, avec ou sans figure. Mais on doit remarquer que la correction qui permet de passer de la hauteur de la Polaire à la latitude dépend de la hauteur observée. Aussi Wright construisit vers 1610 des tables donnant cette correction en fonction de la hauteur, dans différents cas d'orientation de la ligne α Petite Ourse-Brillante des Gardes (β Petite Ourse). Dans l'hémisphère sud, on remplaçait la Polaire, comme l'indique Wright, par α Croix. Celui-ci recommandait de l'observer quand la ligne αγ était N.-S. et il attribuait à α une distance au Pôle Sud égale à 30°, ce qui était trop aussi en son temps. Quant aux passages au méridien, il suffisait pour les utiliser de joindre aux traités de pilotage ou de navigation des tables des déclinaisons du Soleil et de quelques belles étoiles, 32 étoiles chez Bourne, par exemple. C'est ce dont on se contenta pendant longtemps.

Mais dans cette question de la latitude, bien des voies différentes de celles qui précèdent furent tentées. Là aussi on essaya des rapprochements, on imagina des idées qui nous paraissent étranges, lorsque nous ne prenons pas garde, encore une fois, que nous ne cherchons pas autrement. C'est ainsi par exemple que quelques-uns imaginèrent que la latitude était égale en chaque lieu à l'inclinaison de l'aiguille aimantée. Et voici une idée plus singulière, qui prit corps pour un temps, chez certains autres. On la relève chez le P. Fournier. D'après le P. Cabens, dit-il, « les veines, lits ou couches des montagnes escarpées du côté d'orient ou d'occident font avec l'horizon un angle qui précisément est égal à l'élévation du pôle en leur lieu. Il a cela très véritable après l'avoir plusieurs fois observé en Lombardie et dans l'Apennin; et de même a fait le P. Kircher en Allemagne, Hongrie, France, quantité d'îles et côtes maritimes ».

La question de l'angle horaire fut beaucoup plus longue à résoudre, en dehors des levers et couchers. Le calcul de la formule donnant l'angle horaire par la hauteur, jusqu'au XVIIIe siècle, était hors de portée des navigateurs; et elle exigeait la connaissance de la latitude et de la déclinaison. Dans ce dernier siècle Graham construisit une machine pour déterminer la latitude et l'angle horaire par deux observations de hauteur, connaissant le temps écoulé entre les observations. C'était (fig. 26) une calotte sphérique d'un peu plus d'une demi-sphère portant un arc concentrique qui pivotait autour d'un axe radial. Un second arc gradué tournait autour d'un curseur qui glissait sur le premier arc et il portait un style mobile avec lequel on pouvait tracer un trait sur la calotte sphérique. Cette machine permettrait de figurer la sphère locale, ainsi qu'on le voit aisément (fig. 26 *bis*). Le premier arc pouvait en effet se placer successivement suivant PA et PB et le deuxième permettait alors de décrire les circonférences de centres A et B et de rayons AZ et BZ. C'est un instrument que l'on peut rapprocher de la récente sphère trigonométrique de Nuschak.

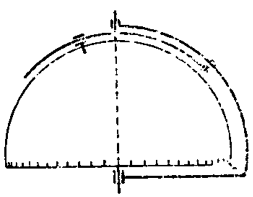

Fig. 26.

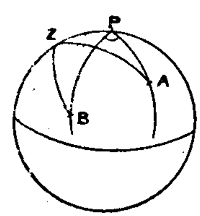

Fig. 26 *bis*.

Les méthodes graphiques furent très en honneur. On les croyait plus que les calculs à la portée du commun des navigateurs et suffisamment précises. Lalande, dans son *Abrégé de Navigation* de 1793 les rappelle. Voici d'abord la méthode qu'on employait d'ordinaire. Dans le triangle ZPE (fig. 27), on connaît les trois côtés, il faut trouver l'angle en P. Traçons le petit cercle CED, de centre P. L'angle en P est égal à l'angle FGE. Soit AEB le petit cercle de centre Z. AB et CD déterminent le point F.

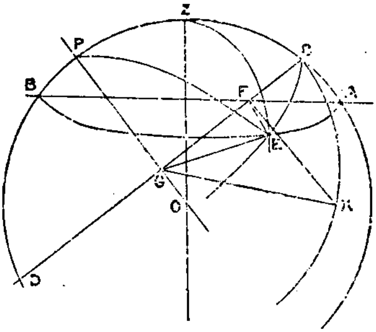

Fig. 27.

Rabattons CED autour de CD; FE se rabat en FK perpendiculaire à CD et FGK est l'angle cherché. La Caille imagina la construction suivante (fig. 28) : FI étant parallèle à OP, dans la circonférence OPZ, OI est le cosinus de l'angle horaire. En effet, FG est ce cosinus dans la circonférence DC et $\frac{FG}{OI} = \frac{GD}{DO}$; donc OI est aussi le sinus du complément de l'angle horaire, et, par suite 2OI est la corde du double de ce complément. Si donc on mesure sur la circonférence extérieure l'arc qui sous-tend, de part et d'autre de son milieu, deux cordes égales à 2OI, cet arc sera égal à quatre fois le complément de l'angle cherché. De telles méthodes étaient évidemment applicables au calcul de l'azimut et elles sont déjà proposées dans le traité de Wright.

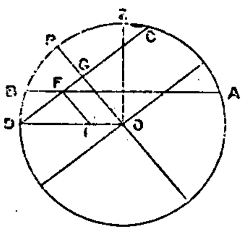

Fig. 28.

C'est ici le lieu de parler du problème ou plutôt de la solution de Douwes. Ce navigateur hollandais indiqua sa méthode vers 1740 et elle a été connue en Angleterre, sans démonstration, en 1749. Le problème était célèbre au XVIIIe siècle, mais il n'est pas tout à fait celui qu'on a appelé communément de ce nom au XIXe siècle. Il consistait dans la détermination de la latitude par l'observation de deux hauteurs et de l'intervalle de temps qui séparait les observations. C'est que l'angle horaire en 1740, était considéré comme une donnée à laquelle suffisaient les observations simples des levers et couchers; et il n'était pas question alors d'en conclure la longitude. Il y avait donc à résoudre par rapport à φ le système

$$\begin{aligned}\sin h &= \sin\varphi \sin \mathrm{D} + \cos\varphi \cos \mathrm{D} \cos \mathrm{P}\\ \sin h' &= \sin\varphi \sin \mathrm{D} + \cos\varphi \cos \mathrm{D} \cos (\mathrm{P} + \mathrm{I}).\end{aligned}$$

On sait la méthode simple qui a été employée depuis la fin du XVIII^e siècle jusqu'au moment du triomphe définitif des lieux géométriques, qui ne remonte guère qu'à une cinquantaine d'années. On calculait l'angle horaire au moyen de la latitude estimée par l'observation la plus éloignée du méridien; puis la latitude au moyen de l'angle horaire obtenu par l'observation la plus rapprochée du méridien. Bien entendu cette pratique ne s'est pas présentée du premier coup; elle n'a été acquise que par étapes. La solution de Douwes est la première solution approchée qui ait été proposée. En retranchant membre à membre les équations ci-dessus et employant la latitude estimée, Douwes obtenait d'abord des valeurs approchées P_1 et P'_1 des angles horaires par

$$\sin\left(\mathrm{P}_1 + \frac{\mathrm{I}}{2}\right) = \sin\left(\mathrm{P}'_1 - \frac{\mathrm{I}}{2}\right) = \frac{\cos\dfrac{h'+h}{2}\sin\dfrac{h'-h}{2}}{\cos\varphi_e \cos \mathrm{D} \sin\dfrac{\mathrm{I}}{2}}$$

puis, par P_1 par exemple, il calculait la latitude par

$$\cos(\varphi_1 - \mathrm{D}) = \sin h + 2\cos\varphi_e \cos \mathrm{D} \sin^2\frac{\mathrm{P}_1}{2},$$

employant encore φ_e dans le calcul. On voit par quel détour singulier il parvenait au résultat. Il avait d'ailleurs publié des tables pour faciliter les calculs et, en 1760, Pemberton fut assez séduit par la méthode pour étudier les limites de son application. Or, supposons qu'au lieu de φ_1 on ait cherché la latitude φ' par :

$$\sin h = \sin\varphi' \sin \mathrm{D} + \cos\varphi' \cos \mathrm{D} \cos \mathrm{P}_1$$

puis que, prenant φ' comme latitude estimée, on ait calculé, en supposant les azimuts invariables, une nouvelle latitude φ'' à

partir de φ' de la même manière qu'on avait obtenu φ_1 en partant de φ_e et ainsi de suite avec φ'', etc. En poursuivant l'opération un nombre suffisant de fois — théoriquement, une infinité de fois — on aurait trouvé une latitude identique à celle de Rossel dans le voyage de Dentrecasteaux, sur lequel nous reviendrons, latitude donnée par : $\varphi - \varphi_e = m \dfrac{\operatorname{tg} A \operatorname{tg} A'}{\operatorname{tg} A' - \operatorname{tg} A}$
où m est la différence des angles horaires estimés calculés avec φ_e et A et A' les azimuts. Et c'est la deuxième étape de la solution, avant la solution classique rappelée plus haut.

On rencontre en fait la solution de Douwes dans tous les traités de Navigation et d'Astronomie de la fin du XVIII[e] siècle et du commencement du XIX[e] et le problème en question est en outre l'objet de très longs développements, en particulier dans Robertson qui examine quantité de cas particuliers, suivant une habitude chère aux écrivains d'autrefois, lesquels ignoraient les solutions générales. La solution rigoureuse par les formules des triangles sphériques était d'ailleurs également indiquée; par exemple, on la trouve dans une *Navigation* de Fournier en 1826; elle était longue et, quelques années plus tard, Pagel ne craignait pas de dire qu'elle n'était jamais employée. Près d'un siècle auparavant Bouguer ne jugeait pas autrement ce problème. Il est pourtant encore résolu rigoureusement en 1868 dans Caillet : *Traité de Navigation*.

Pour éviter l'emploi des tables de logarithmes, on utilisa, aussitôt qu'elles furent inventées, les échelles logarithmiques de Gunter, sur lesquelles étaient tracés les logarithmes des nombres, des sinus et des tangentes. On en trouva communément, gravées sur buis ou ivoire, dès l'invention des logarithmes par Napier, en 1614. En 1765, un sieur Baradelle les grava sur cuivre « avec des soins qu'on ne peut attendre que des artistes qui savent porter la précision et la finesse des divisions à un point qu'il serait difficile d'exprimer ». La règle de Baradelle avait deux pieds (64 cm.) de longueur.

Il valait mieux construire des tables. C'est ce que fit Cassini, qui calcula 24 pages de tables, insérées dans sa relation du voyage de l'*Enjouée*. Les hauteurs y variaient de 5 en 5°; les latitudes, de degré en degré, de 34 à 51° et les déclinaisons, de degré en degré également entre $\pm$ 23°29′. Il n'y donne pas de parties proportionnelles et il fallait attendre que la hauteur ait atteint une des valeurs de la table pour pouvoir s'en servir. Lalande, à la fin du siècle, fit beaucoup mieux. Dans ses tables, la déclinaison varie de degré en degré, de — 24° à + 24°. La latitude va de 2° en 2° jusqu'à 40°; puis de degré en degré jusqu'à 60. Les hauteurs sont comprises entre 0 et 48° à l'équateur, entre 0 et 30° à la latitude de 60°. Il y a des parties proportionnelles pour les variations de la déclinaison, de la hauteur et de la latitude. Elles furent calculées en grande partie par sa nièce, Mme Lefrançais, aussi habile à manier l'aiguille que prompte à aider son oncle dans ses calculs. Citons enfin les graphiques par lesquels Margetts figura de semblables tables. Ils donnaient très simplement l'angle horaire en ne nécessitant que l'usage d'un compas.

Pour terminer, ajoutons que la méthode des hauteurs correspondantes *à la mer* était également signalée. Bouguer, qui l'a employée en allant en Amérique, en parle dans son *Traité de Navigation* et la *Connaissance des Temps* donnait, depuis le début du siècle, une table des corrections nécessaires par suite de la variation de la déclinaison du Soleil. Elle est également exposée dans Robertson, qui indique que l'on peut observer à 3, 4, 5 heures de part et d'autre du méridien et qu'il n'y a pas à se préoccuper de la variation de la déclinaison du Soleil si l'on est à plus de « six semaines ou deux mois » des équinoxes.