

Trois cents ans de géodésie française (suite)

par J.-J. LEVALLOIS
Ingénieur Général Géographe

IX — Le nivellement

Les travaux de nivellement remontent certainement à la plus haute antiquité historique. A partir du moment où l'homme a fondé la cité et pratiqué l'art de bâtir, le fil à plomb devenait son auxiliaire indispensable, l'adduction d'eau posait les problèmes du nivellement.

L'aqueduc entièrement souterrain de Siloé, construit en 701 Av. J.C. à Jérusalem, sur une longueur de 512 m, qui suit en planimétrie un trajet en forme d'S, pour une dénivellée totale de 10 mètres, le tunnel de Samos construit en 525 Av. J.C. (cf. XYZ n° 4 de janvier 1980), les aqueducs des Romains, leurs égouts etc. témoignent de l'existence de topographes et de niveleurs expérimentés.

Le niveau qu'employaient les Romains — le *chorobates* — est une poutre de 20 pieds de long, terminée en équerre, munie de fils à plomb aux extrémités et sur les côtés. Dans cette poutre est creusé un canal d'environ 5 pieds de long, large d'un doigt, profond de 6 doigts, qui contient de l'eau. Elle doit affleurer à la surface de la poutre sur toute la longueur du canal pour que l'instrument soit nivelé "... et "si aequaliter aqua canalibus summa labra tanget, scietur esse libratum..." (Vitruve)..." On lisait probablement la différence de niveau sur deux règles graduées appliquées aux deux extrémités (35).

Le R.P. Riccioli (vers 1660) décrit quelques instruments en usage à l'époque, en particulier des niveaux à eau plus ou moins perfectionnés.

Mais de nombreux instruments seront étudiés avant que le niveau d'Egault ne devienne le prototype du niveau moderne. Mariotte imagine plusieurs types de niveau à eau, séduisants par leur ingéniosité théorique : un niveau à réflexion sur la surface d'une couche d'eau, une lunette flottante.

La Hire proposera un niveau à flotteurs où l'objectif de la lunette est porté par un premier flotteur, le réticule par un deuxième identique au premier, etc.

Tout cela ne pouvait guère s'accommoder des conditions dans lesquelles évoluent les opérateurs sur le terrain.

Le niveau à eau restera pendant longtemps l'instrument du niveleur ; il est très probable que le canal de Briare, commencé sous le règne de Henri IV, et le canal du Midi, construit par Riquet, furent nivelés de cette manière.

C'est un instrument très simple : deux courts tubes verticaux transparents, ouverts sur l'atmosphère communiquent par un tube horizontal rigide. On y verse un liquide coloré, la ligne des deux affleurements donne l'horizontale. Puissant (36) indique les précautions à prendre pour son usage.

La mire est une mire graduée à voyant mobile que le porte-mire déplace jusqu'à ce que ce voyant soit dans le prolongement de la ligne de visée. On lit alors sa hauteur sur la tige de mire.

Les visées bien que gênées par les ménisques dont la surface de l'eau prend la forme, permettaient d'après Busson-Descars, à condition de ne pas dépasser des distances mire-niveau de 50 m, une précision de l'ordre de + 10 cm pour 10 kilomètres, ce qui paraît bien correspondre à l'idée que l'on peut s'en faire a priori.

Niveau à bulle - Niveaux automatiques : dès 1666, Thévenot décrit dans le "Journal des Savants" comme "Machine nouvelle pour la conduite des eaux, pour les bâtiments, pour la navigation et pour la plupart des autres arts", le niveau à bulle. Il ne mentionne point la courbure qu'il faut conférer à la fiole, pour laquelle il prend un tube droit, rempli d'esprit de vin emprisonnant une bulle d'eau, ce "niveau d'air" sera "beaucoup plus juste et plus commode que les niveaux ordinaires...". C'est Chézy, qui beaucoup plus tard, au milieu du XVIII^e siècle, indiquera les méthodes de rodage interne conférant la courbure désirée et qui construira un niveau à lunette presque moderne (fig. 29).

Huygens, Picard, Römer préfèrent des niveaux asservis par la pesanteur. La figure 29 reproduit également les niveaux d'Huygens et de Picard. Ce dernier est un niveau à lunette, dont il indique très en détail les réglages pour le corriger de toute erreur de collimation. Le fil à plomb qui mesure 4 pieds, soit environ 1,30 m, se déplace devant une platine portant une graduation permettant d'estimer la minute sexagésimale, donc d'observer des visées très légèrement inclinées, l'appareil repose sur un chevalet de peintre (il ne devait certainement pas être mis facilement en station. Gribbeauval au XVIII^e siècle l'améliora sous cet aspect).

Finalement c'est Egault, ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées qui, dans la ligne des travaux de Chézy et de Borda, mettra au point un niveau à lunette contrôlable et réglable dans toutes ses parties, qui sera le grand instrument de nivellement de précision du XIX^e siècle et de la 1^{re} moitié du XX^e.

Mais parallèlement les travaux topographiques et géodésiques de la carte au 1/80 000 avaient développé et appliqué les méthodes du nivellement indirect.

Il y eut donc deux écoles qui poursuivaient des buts différents, dont l'unification fut lente à s'affirmer.

Les idées et les réalisations de Picard : Dans son "Traité sur la théorie et la pratique du nivelle-

ment (1768), le capitaine de Lespinasse, du Corps Royal de l'Artillerie écrit "... celui qui le premier a pénétré les secrets de cet art difficile est le célèbre Monsieur Picard". Les enseignements théoriques ainsi que les travaux exécutés sur le terrain par l'illustre astronome sont exposés dans (10) par son disciple La Hire, qui participa aussi, on s'en souvient, aux observations de la méridienne de Cassini.

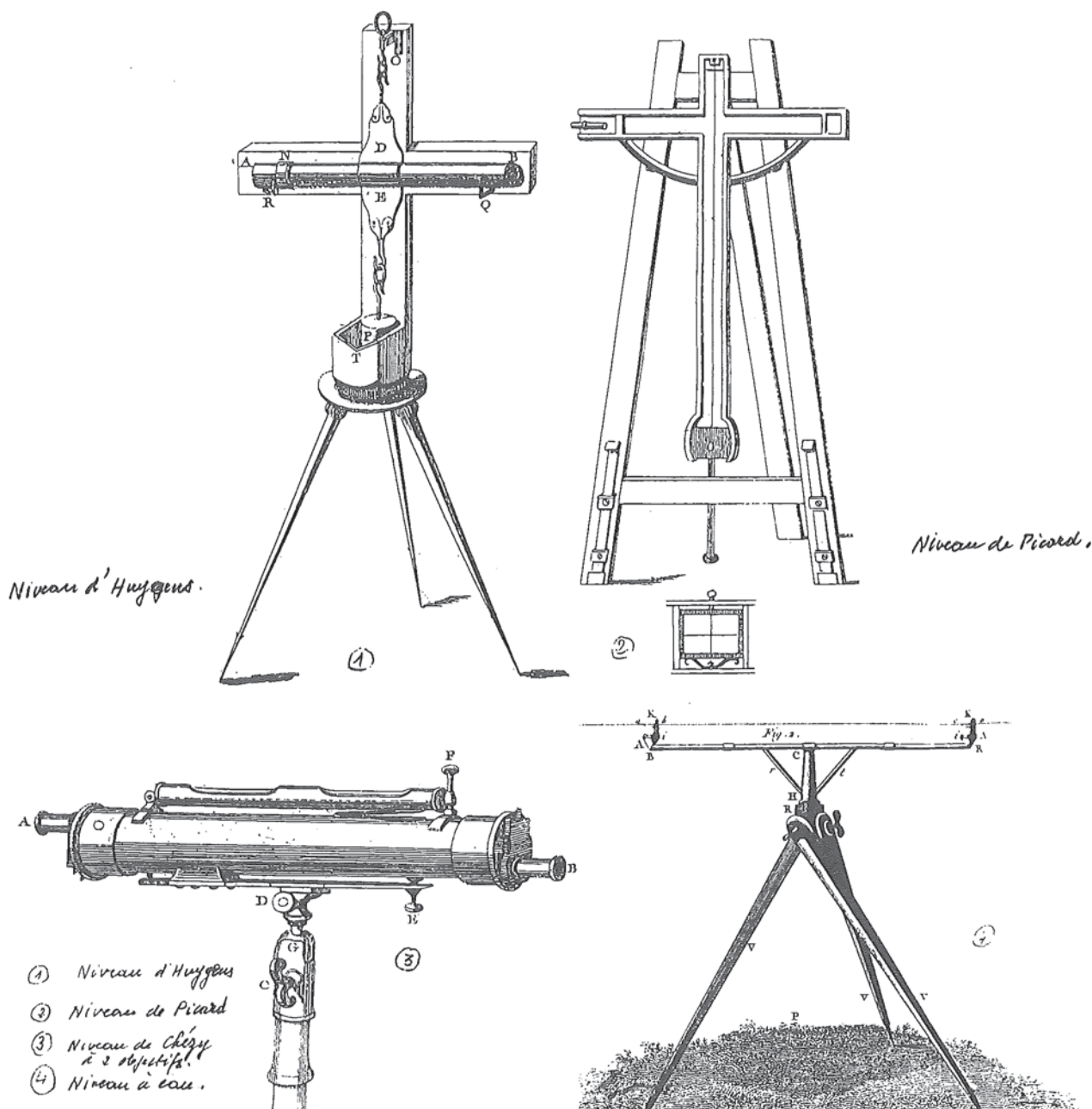


Fig. 29

L'ouvrage est mince et de petit format ; il se termine par un abrégé des résultats de Picard sur la détermination du rayon terrestre, mais contient l'essentiel des conclusions théoriques et pratiques relative au nivellement ainsi qu'un résumé des importants travaux de terrain effectués par Picard, dont La Hire détenait les manuscrits. Il renferme tout l'essentiel de l'art.

Nous reproduisons ci-après, quelques-uns des passages les plus significatifs... "on appelle points de niveau, ceux qui sont également éloignés du centre de la terre..." autrement dit, ce qui est tout à fait dans la ligne des travaux de Picard, les verticales concourent au centre de la terre. La Hire explique alors la distinction entre niveau réel et "niveau apparent" et annonce que pour passer de l'un à l'autre

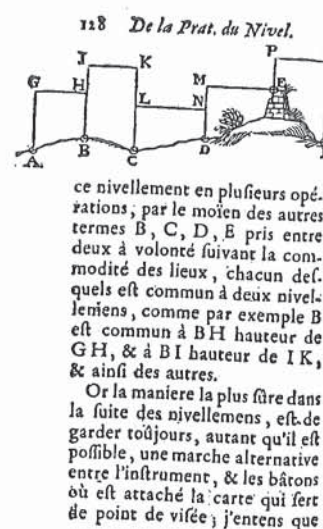
il faut " ...diviser le carré de la distance par le diamètre de la terre... il faut placer l'instrument à égale distance des termes où l'on veut marquer des points de niveau... c'est pourquoi ils seront tous de niveau entre eux, mais ils ne seront pas pour cela de niveau avec la station, c'est-à-dire avec l'œil de l'observateur dans cette station : il faut encore supposer que s'il y a de la réfraction, elle soit égale dans toutes ses distances égales..."*. Il préconise également le double nivellement réciproque des deux stations lorsqu'on ne peut stationner au milieu de l'intervalle, bref, tout ce qui par la suite fera partie du manuel du parfait niveleur se trouve en germe dans l'opuscule de La Hire.

La méthode de travail est le cheminement (cf. la reproduction des pages 128 et 129 du traité de La Hire) ; la mire est une mire à coulisse, dont le voyant, fixé sur la partie coulissante peut être amené au niveau apparent de la lunette par le porte-mire, suivant les ordres de l'opérateur. En fait elle est fixée autant que de besoin au bout d'une perche constituée de "3 ou 4 bâtons, chacun de 6 pieds" formant rallonges qui peuvent s'assembler bout à bout. Seul celui qui repose au sol est gradué ce qui permet à la fois de connaître l'altitude du voyant et de pousser jusqu'à 8 mètres la hauteur de mire. "Pour la marque ou carton qui sert de point de visée et que l'on met au bout de l'un des bâtons, il suffit de prendre deux cartes à jouer, que l'on coud l'une sur l'autre, en sorte que l'on peut les enfiler dans le bout des bâtons ; on en fait une noire et on laisse l'autre blanche..." pour permettre les effets de contraste à l'observation et comme "...il arrive souvent que la distance entre les stations que l'on nivelle est si grande que l'on ne peut pas s'entendre aisément... il faudra convenir de quelques signes que l'on fera avec le chapeau, soit pour faire hausser ou baisser la carte...". Des conseils judicieux et très actuels encore, sont prodigués pour la tenue du carnet.

Etudes d'adduction d'eau : "Sa Majesté ayant résolu de faire conduire à Versailles la meilleure eau pour boire que l'on pouvait trouver dans les lieux circonvoisins..." tout le monde s'empresse. On sonde les puits, compare les possibilités d'adduction des rivières voisines sans trouver de solution évidente.

C'est alors que Riquet, le glorieux ingénieur qui vient de finir les travaux du canal du Midi, ayant constaté que la vitesse du courant de la Loire est très supérieure à celle de la Seine, en déduit que les différences d'altitude permettraient d'amener l'eau de Loire à Versailles par un aqueduc - le projet de captation des eaux de Loire on le voit n'est pas nouveau. Picard, est chargé d'en étudier les possibilités de réalisation. Ses nivellements s'étendent sur plusieurs années, les travaux ayant été parfois mis en sommeil. La figure 30 en donne le schéma général dont La Hire (10) publie les dénivelées principales que nous avons reportées, parfois en les

cumulant pour sauter des stations intermédiaires, et transformant en pieds celles qu'il exprime en toises, ainsi que les erreurs de fermeture (en pieds).



Chapitre III. 129
si au premier coup de niveau le bâton est demeuré derrière, & que l'instrument ait été porté devant, l'instrument demeurera à la même place, & le bâton prendra le devant pour le second nivellement ; & ainsi toujours de suite par stations, qui soient de deux en deux à distances à peu près égales, je dis à peu près, ce qui sera assez juste, soit par la simple estimation, soit par le moyen de la lunette dans laquelle un même objet occupe certaine partie de l'ouverture, plus ou moins grande, à proportion qu'il est plus ou moins éloigné.
Mais parce que l'on ne pourra toujours garder la marche alternative entre l'instrument & les bâtons, on aura soin de récompenser en-arrière les coups qui auront été faits en avant ; j'entens que si, par exemple, les bâ-

Ces fermetures qui correspondent bien aux discordances qu'annonce Picard (1 toise et demie) sont tout à fait satisfaisantes et tout à l'honneur de l'opérateur.

On peut, mais c'est beaucoup plus conjectural, confronter les altitudes que l'on peut calculer sur les points vraisemblables cotés par Picard au cours de ses travaux.

Partant de l'altitude 142 m pour le rez-de-chaussée de Versailles, son origine, on trouve sur la carte au 1/50 000 les cotes suivantes à comparer aux altitudes de Picard, exprimées en mètres, aux "mêmes" points**.

	Carte	Picard
Versailles	142	142
Etang de Trappes	?	155.7
Les Essars	177-176-174	174.6
Sainville (Orme)	150 (?)	145.7
Angerville	136	135.3
Toury	130-135	132.0
La Monjoie (route)	122 *	128.7
Saint-Lyé	126-127	124.8
Laas	117	115.0
Courcy	121 (?)	120.9
Point Haut (forêt sur la route)	139-140* (?)	146.3
Orléans (Loire)	91.3	90.7

Les comparaisons sont les plus sûres, là où le terrain peut avoir été le moins remanié (villages de la Beauce), mais la concordance serait certainement meilleure aux points réels.

* Mariotte exprime les mêmes idées dans son Traité de Nivellement en 1667.

** Certainement remanié depuis Picard (sommet sur une route).

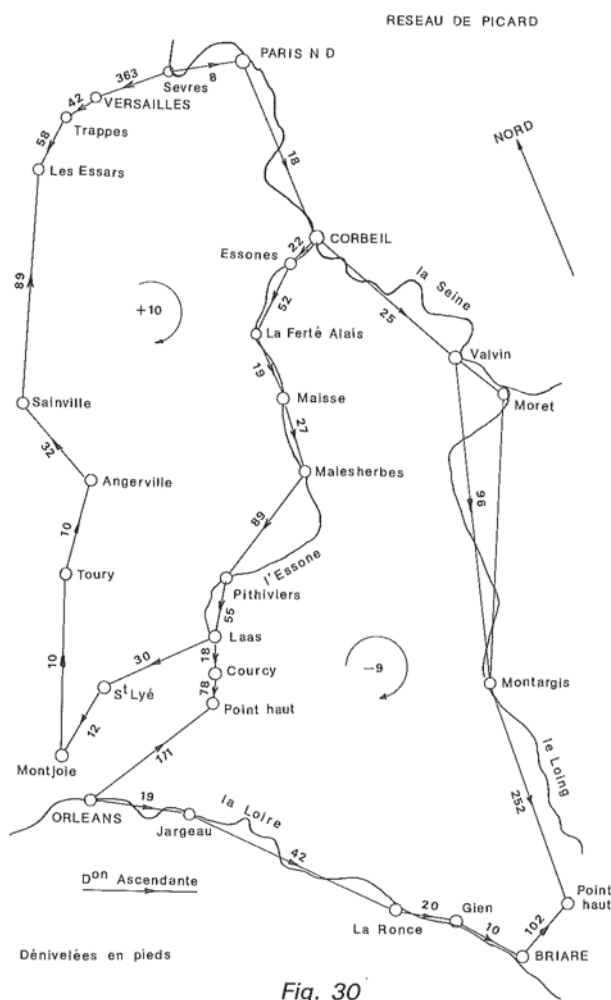


Fig. 30

Le projet de captation des eaux de Loire ne fut pas poursuivi, Riquet qui de son côté avait envoyé ses propres niveleurs confirma les résultats de Picard qui montraient que pour pouvoir amener les eaux à Versailles, il fallait franchir la ligne de partage des eaux, et remonter par conséquent jusqu'à Pouilly-sur-Loire ou même La Charité. Il fallut donc songer à des solutions moins onéreuses, Picard fit merveille et sa Majesté en fut fort satisfaite.

Nivellement indirect : Dès la fin du XVI^e siècle existaient des graphomètres, appareils propres à mesurer (grossièrement) les angles horizontaux, obliques, verticaux, ils seront employés en topographie.

Les quarts de cercle de Picard, des Cassini, de La Caille en sont des adaptations géodésiques. Les observations angulaires s'accompagnaient de mesures de distances zénithales, indispensables parce que, les angles étant observés dans leur plan, le calcul des coordonnées géographiques des sommets exigeait de les ramener au plan horizontal. Il est facile de voir que le problème revient à appliquer la formule fondamentale de la trigonométrie sphérique ; ces réductions étaient loin d'être négligeables comme on peut aisément s'en assurer ; (2) cite pour certains angles de la méridienne du Pérou des corrections de plusieurs minutes d'arc dont certaines atteignent 25', 35' (minutes !) et ajoute que celles de 5 à 6 minutes ne sont pas rares.

— L'idée d'utiliser la mesure des distances zénithales pour calculer des différences d'altitude sur des côtés d'ordre géodésique revient comme de juste à Picard, qui au cours de ses travaux de nivellement mesure la dénivelée de la Seine entre Sèvres et le pied de Notre-Dame en partant des distances zénithales réciproques, observées entre la Tour Sud de N. D. et un point du Clos des Capucins à Sèvres, situé à 64,5 toises au-dessus du niveau du fleuve ; cet essai lui paraît décevant et il ne tient pas compte du résultat, préférant à juste titre son nivellement direct.

— J. Cassini (12) sur sa méridienne procède à "l'Observation de la hauteur de diverses montagnes d'Auvergne, du Languedoc et des Pyrénées, avec quelques observations de la hauteur du baromètre et de la bassesse (sic) apparente de la mer sur quelques-unes de ces montagnes", il explique la nécessité de réduire les bases au niveau zéro.

Il n'applique aucune correction de réfraction à ses mesures, il ne semble pas faire de visées réciproques mais tient compte du niveau apparent. Ses mesures portent parfois sur des distances considérables. Voici quelques-uns de ses résultats : en toises, rapportées au niveau de la mer dans la région de Perpignan, transformées en mètres (1 toise = 1,946 m) et comparées aux valeurs des cartes actuelles.

	J. CASSINI		CARTE
Canigou	1441 T 1442	2803 M 2805	2786 M
Bugarach	650.5	1265	1231
St-Barthélémy	1184.5 1195.0	2304 2324	2348
Montredon	301 *	585 *	565 *
Rieupeyroux	407.5	793	804
Plomb du Cantal	993	1931	1855
Puy Mary	956	1859	1787
Puy Violent	860	1673	1592
Puy de Dôme	817	1589	1464
* En supposant une erreur d'ailleurs peu probable, de 100 toises (301/201) sur les valeurs imprimées et de même au point voisin de Puy-Laurens (197/97) !			

Les résultats sont, on le voit, des plus médiocres. On s'explique assez bien les altitudes surévaluées dans la région d'Auvergne par omission de la réfraction qui élève les visées zénithales ce qui correspondrait à un terme parabolique de dénivelée de $K^2/12,8$ au lieu de $K^2/15$, soit une différence de l'ordre de $K^2/100$ par portée et si on admet des portées moyennes de 40-50 km, on tombe bien sur des discordances de l'ordre de la centaine de mètres

dans le Massif Central. Il est d'ailleurs probable qu'à l'époque on se souciait peu des altitudes des montagnes.

— La mission du Pérou semble avoir ignoré l'influence de la réfraction pour calculer les dénivelées, cela ressort des formules exposées par Juan et Ulloa, les deux officiers Espagnols désignés pour accompagner l'expédition, dans leurs "Observaciones astronomicas y fisicas hechas de Orden de S. Maj. en los Reynos del Perú" paru en 1748, dont nous reparlerons un peu plus loin.

La Caille et Cassini de Thury, (13), (14) ne se préoccupent pas davantage des altitudes des montagnes, mais effectuent quelques expériences dans la région de la Sainte Victoire, des "Houpies"*, d'Aigues Mortes, qui auraient pu les amener à la notion de coefficient de la réfraction : ils mesurent des distances zénithales réciproques d'où ils déduisent par considération de la théorie classique du nivellement indirect, la valeur de la réfraction totale entre les deux stations A et B (fig. 31).

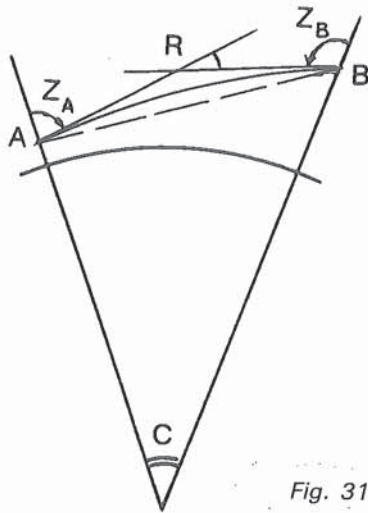


Fig. 31

$$R = 180^\circ + C - (Z_A + Z_B)$$

Ils trouvent ainsi :

C : Longueur d'arc		Réfraction R
35'36''	2136''	297''
28'16''	1695''	200''
12'52''	772''	82''
9'	540''	43''

Que le lecteur trace un graphique ; il se rendra compte qu'en dépit de la dispersion des mesures, une conjecture immédiate et fort naturelle invite l'observateur à considérer en première approximation la réfraction totale comme proportionnelle à l'angle au centre C ou à la longueur du côté géodé-

* C'est le plus haut sommet des Alpilles. Ce nom est polymorphe, on le trouve sous les formes : Les Opiès, les Houpies, Les Aupies, très probablement les Alpilles, prononcées en patois provençal.

sique - avec un coefficient moyen de l'ordre de 0.12 fort acceptable. Cassini de Thury se borne à expliquer que pour les altitudes, "la réfraction empêche que ce calcul soit exact, mais on peut y avoir égard en quelque façon, en ôtant 2' ou 3' de l'arc de la distance itinéraire, s'il excède 20 minutes... sinon on peut le négliger..."

Delambre par contre sera une fois de plus le grand régulateur (2), (24,2) ; son raisonnement est le suivant "... les distances (zénithales) sont diminuées par la réfraction terrestre ; on la suppose égale pour les deux stations, ce qui pourrait être vrai si les observations... étaient simultanées...". Il déduit (fig. 31), la valeur de R de l'équation générale d'où $n = R/C$ et arrive à la conclusion que l'angle de réfraction en une station — donc le demi-angle R de notre notation — donne $n = 0.079$ - au lieu de 0.06 ou 0.07 trouvé par Cassini de Thury. Il ajoute du reste "mais ce rapport est trop variable... les plus petites valeurs positives ont été obtenues en été et les plus fortes en hiver". Il donne enfin l'équation de la dénivelée non réciproque sous la forme :

$$dN = K \cotg Z + 0.0000001284 K^2$$

pour dN et K exprimés en toises, ce qui en transformant en mètre redonne l'expression classique

$$dN = K \cotg Z + (10^{-6}/15) K^2$$

Delambre et Méchain, mesureront les distances zénithales, tout au long de la méridienne et, se basant sur les niveaux de la Mer du Nord à Dunkerque et de la Méditerranée près de Perpignan, calculent les altitudes de leurs sommets, en se rejoignant à Rodez. Delambre écrit à ce sujet : "Nous avons trouvé la même hauteur pour Rodez, au-dessus des deux mers ; ce ne peut être qu'un hasard heureux. Chaque hauteur en particulier a été conclue de plusieurs comparaisons dont les résultats diffèrent quelquefois de 1, 2, 3 et 4 toises et même de 6 : ces deux derniers sont excessivement rares et même celles de 3 toises ; les autres sont plus fréquentes" (2).

En fait, à l'époque des mesures de la méridienne de France, on ne disposait pas assez d'éléments pour pouvoir mener une discussion scientifique correcte de la question.

Dire que le coefficient de la réfraction est constant revient à dire que la courbure de la trajectoire lumineuse est un cercle : écrire qu'il y a proportionnalité entre la réfraction totale R et l'angle au centre, c'est exprimer le rapport du rayon de courbure de cette trajectoire au rayon de courbure terrestre.

Or la connaissance des lois physiques dans l'atmosphère en équilibre

— équation d'état des gaz parfaits p.v. = R.T.
(p pression, v volume, T température)

— équation barométrique : $dP = -g.D.dz$
(d P variation de pression en fonction de l'altitude, g pesanteur, D densité du gaz à l'altitude z sous la pression P et la température T) n'étaient que partiellement dégagées : on connaissait bien la loi de Mariotte, $p.v = K$, constante dans une atmosphère isotherme, mais c'est Gay-Lussac qui vers 1800 étudiera la dilatation des gaz parfaits et aboutira à $p.v = RT$.

Ces deux lois sont indispensables si on veut rattacher la réfraction terrestre à l'état physique de l'atmosphère le long de la trajectoire lumineuse en y ajoutant une loi de variation de l'indice de réfraction N en fonction de la densité atmosphérique. Dans ces conditions, on obtient (21,1)

$$R = A \left(34,15 - \frac{dT}{dz} \right)$$

où A est une constante parfaitement définie en fonction des constantes physiques.

Si on peut admettre — à condition de n'être pas trop pointilleux — que le facteur p/T^2 varie peu le long du rayon lumineux presque horizontal, le terme $(- 34,15 - dT/dz)$ ou dT/dz est le gradient local de température (en degrés par kilomètre) reste insaisissable, parce que trop variable d'un point à un autre.

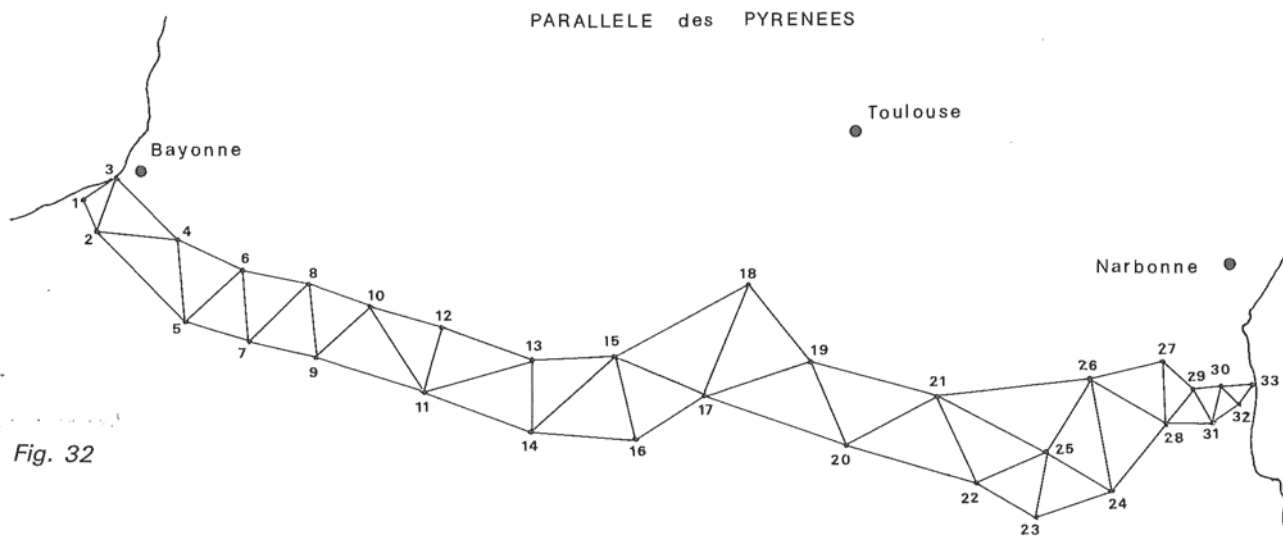


Fig. 32

Au cours d'une ascension en ballon (1804) Gay-Lussac établira que sa valeur moyenne est de l'ordre de $- 6^\circ$ par kilomètre, mais le long de la trajectoire lumineuse il varie en fonction de la nature du sol, du temps, des circonstances atmosphériques. L'expression théorique de la réfraction ne peut donc être intégrée correctement et ne donne et ne peut donner que des résultats approximatifs, insuffisants ; du moins indique-t-elle les facteurs sensibles.

Lorsque les Ingénieurs Géographes exécuteront à partir de 1818 la description géométrique du pays, ils observeront tant sur le réseau de 1^{er} ordre que sur les triangulations secondaires les distances zénithales constituant canevas des altitudes de la carte au 1/80 000, "... les distances zénithales... seront elles-mêmes le résultat de trois séries au moins, prises à des heures différentes et surtout vers le milieu du jour, afin qu'elles puissent donner les différences de niveau avec toute l'exactitude désirable, et, autant qu'il sera possible par le parcours d'observations simultanées... accompagnées d'observations barométriques".

Ce canevas d'altitudes ne pouvait évidemment que procéder du 1^{er} ordre aux ordres inférieurs et l'on espérait qu'il suffirait : "... des bornes seront plantées au centre des stations du 1^{er} ordre... elles serviront de repères et de point de départ pour les nivellements particuliers que pourront entreprendre les ingénieurs des ponts et chaussées, dans la vue de former une carte hydrographique de la France". Cet espoir devait être déçu.

Le parallèle des Pyrénées : L'opération de nivellement géodésique la plus soignée de la triangulation des Ingénieurs géographes est le parallèle des Pyrénées, observé par Corabœuf et Testu (Section Est), Peytier et Hossard (Section Ouest).

Cette opération, dont nous avons plus haut évoqué les difficultés, fut entreprise avec un grand luxe de précautions : on pensait certainement qu'aux altitudes des travaux, les perturbations de réfraction seraient diminuées parce que les visées étaient largement affranchies des rayonnements du sol, et l'on espérait qu'elle permettrait d'évaluer correctement une dénivelée éventuelle entre les eaux de la Méditerranée et celles de l'Océan. Un soin particulier fut donc apporté à la mesure des distances zénithales, aux réductions au centre, etc... (fig. 32).

Les résultats sont publiés en détail dans (30,6). Une importante communication de Corabœuf complète les résultats et conclut à une dénivelée de 0,70 m entre les deux mers, l'Océan étant plus élevé que la Méditerranée. Une lecture attentive du texte suggère des doutes : Corabœuf calcule la dénivelée de 3 ou 4 manières différentes : par l'enchaînement des stations Nord, par celui des stations Sud, par les diagonales, par les altitudes successives résultant d'une moyenne obtenue à partir des stations précédentes et obtient des résultats sensiblement différents dont il écarte certains. Par curiosité, nous avons repris un calcul général plus homogène par moindres carrés, faisant intervenir simultanément toutes les dénivelées, celles que publie Corabœuf, en leur attribuant uniquement le poids unité. Les solutions, partant de l'altitude de Socca (8,43 m) pour aboutir au Fort St-Ange en Méditerranée, ont été calculées selon deux hypothèses :

- 1) En négligeant la station de Gardan de Montaigu, comme le fit Corabœuf qui la considère comme douteuse, parce qu'elle disperse.
- 2) En introduisant cette station (actuellement Ausseing, point de 1^{er} ordre).

Les résultats sont résumés dans le tableau général ci-après, dans lequel sont indiquées les altitudes des sommets. En fait Corabœuf avait effectué la jonction entre Peytiet et lui au Crabère pour lequel il obtient l'altitude 2634,31 m par la Méditerranée, et 2632,64 par l'Océan. Pour rétablir la continuité des altitudes, nous avons retranché la différence, 1,67 m, à toutes ses altitudes Est, pour aboutir en Méditerranée à la vigie du Fort St-Ange dont l'altitude fixée directement, par rapport au niveau marin est de 17,11 m, soit une différence de 1,67 m comme constaté plus haut - ce chiffre est d'ailleurs envisagé par Corabœuf comme une solution possible.

Altitudes du parallèle des Pyrénées

	Nom	Corabœuf	Solution I	Solution II
1	Fort de Socoa	8.43 m	8.43 m	8.43 m
2	La Rhune	904.24 m	904.24 m	904.24 m
3	Biarritz	87.57 m	87.89 m	87.89 m
4	Baigoura	900.95 m	901.60 m	901.60 m
5	Lissératèca	1412.50 m	1412.06 m	1412.06 m
6	Méhalcu	651.74 m	652.61 m	652.61 m
7	Pic d'Ohri	2020.48 m	2019.57 m	2019.57 m
8	Cambeillon	665.10 m	665.67 m	665.67 m
9	Pic d'Anie	2508.25 m	2507.31 m	2507.31 m
10	Escuretz	1444.03 m	1444.36 m	1444.36 m
11	Balaïtous	3149.27 m	3148.72 m	3148.73 m
12	Lestibète	1854.89 m	1854.79 m	1854.80 m
13	Pic du Midi	2881.61 m	2879.96 m	2879.99 m
14	Troumouse	3084.77 m	3089.05 m	3089.09 m
15	Montaspè	1852.16 m	1852.27 m	1852.46 m
16	Maupas	3113.95 m	3113.53 m	3113.61 m
17	Crabère	2632.64 m	2632.02 m	2632.26 m
18	G. de Montaigu			635.79 m
19	Tuc de la Courate	1425.64 m	1424.72 m	1425.29 m
20	Montcalm	3080.34 m	3080.11 m	3080.23 m
21	Pic St-Barthélémy	2349.07 m	2348.29 m	2348.36 m
22	Col Rouge	2807.21 m	2806.81 m	2806.83 m
23	Liouzes	2831.53 m	2830.13 m	2830.12 m
24	Canigou	2785.77 m	2785.20 m	2785.19 m
25	Madres	2472.98 m	2472.04 m	2471.99 m
26	Bugarach	1231.80 m	1230.88 m	1230.89 m
27	Tauch	880.98 m	880.36 m	880.36 m
28	Forceral	510.91 m	509.47 m	509.46 m
29	Espira	458.35 m	457.15 m	457.15 m
30	T.S. Base	38.45 m	37.07 m	37.07 m
31	T.N. Base	19.66 m	19.23 m	19.23 m
32	St-Laurent-de-S.	28.44 m	27.05 m	27.05 m
33	Vigie Fort St-Ange	15.44 m	14.91 m	14.91 m
	(d° mesure directe)	17.11 m	17.11 m	17.11 m
	Différence	1.67 m	2.20 m	2.20 m

La dénivelée telle qu'elle ressort des solutions I ou II est de 2,20 m, le niveau de l'Océan étant plus élevé que celui de la Méditerranée. C'est peu différent du premier résultat de Corabœuf. On sait aujourd'hui que cette dénivelée est de l'ordre d'une trentaine de centimètres, ce qui montre bien le degré d'incertitude qui pèse sur la détermination par voie trigonométrique à longs côtés, même dans des conditions apparemment favorables, avec des

mesures particulièrement soignées ; l'écart type d'une dénivelée de la chaîne des Pyrénées (côtés de 30 à 40 kilomètres ou plus) ressort à ± 1 m environ.

Concluons que ce nivellement, quels que soient les mérites et les peines des opérateurs ne pouvait pas résoudre le problème des niveaux respectifs des deux mers.

Il a du moins l'avantage de montrer quelles sont les limitations des méthodes géodésiques de détermination des altitudes : on ne pouvait à l'époque déduire le canevas de détail des altitudes que du réseau de premier ordre et l'étendre ensuite aux 2^e et 3^e ordres, donc augmenter les erreurs accidentelles au fur et à mesure de la démultiplication des ordres. Un tel canevas, admissible pour coter des points topographiques plus ou moins précis (mamelons, carrefours, sommets montagneux, etc...), ne pouvait donc convenir à l'exécution des travaux d'art de l'Ingénieur.

Nivellement barométrique : On connaît l'histoire de l'expérience de Torricelli - disciple de Galilée, "professeur aux mathématiques" du Duc de Toscane - : les puisatiers du Duc avaient constaté que l'eau aspirée dans un tuyau vertical ne pouvait s'y élever à une hauteur supérieure à 31 pieds. Torricelli eut l'idée de faire l'expérience avec du mercure (densité 13.6) au lieu d'eau et constata que le mercure ne pouvait monter à une hauteur supérieure à 2 pieds 2 pouces. L'expérience fut connue à Paris vers 1644 (37). Pascal venait d'inventer sa machine arithmétique (1642). Il répéta en 1646 cette expérience, et peut-être guidé par une intuition de Torricelli, conçut toute une suite d'expériences qu'il publie en 1647 sous le titre "Expériences nouvelles touchant le vide", il arrive à la certitude que la colonne barométrique dans le vide équilibre le poids de l'atmosphère. Il conçoit alors (novembre 1647) la célèbre expérience du Puy de Dôme et propose à son beau-frère Périer de l'exécuter. Il s'agissait de vérifier que l'épaisseur d'air y étant moindre la colonne de mercure montait moins haut dans le tube, au sommet de la montagne, qu'à son pied à Clermont-Ferrand. L'expérience est tentée le 19 septembre 1648, avec toutes les garanties scientifiques possibles et le résultat donne :

à Clermont..... 26 pouces 3 lignes 1/2..... 71,2 cm
au sommet..... 23 pouces 2 lignes..... 62,7 cm
à mi-chemin..... 25 pouces..... 67,7 cm
la dénivelée est estimée à 500 toises.

Ce résultat, qui bouleversait la philosophie de "l'horreur du vide" était également fondamental pour la physique et son interprétation. Au point de vue du nivellement, Pascal écrit son Traité de l'équilibre des liqueurs et de la pesanteur de la masse de l'air "... comme nous voyons qu'en tous lieux qui sont à même niveau, l'eau s'élève à pareille hauteur et qu'elle s'élève moins en ceux qui sont plus élevés... on peut juger par cette différence combien l'un est plus élevé que l'autre, ce qui est un moyen de niveler les lieux, quelque éloignés qu'ils soient..., il ne faut que prendre un tuyau de trois à quatre pieds, plein de vif argent... et voir à quelle hauteur il demeure suspendu..." nous sommes malheureusement obligés d'arrêter les citations de ce texte

admirable ; ajoutons seulement que "... toute la mer est précisément du même niveau, c'est-à-dire également distante du centre de la terre en tous points..." c'est bien la définition adoptée par Picard 20 ans plus tard.

Lors des observations de la Méridienne J. Cassini (13) et ses aides font des observations barométriques sur les montagnes qu'ils cherchent à niveler, "pour connaître la pesanteur de l'air à diverses hauteurs sur la surface de la mer".

Ces mesures sont accompagnées de mesures à poste fixe dont la série est observée à Paris dont l'altitude est évaluée à 44 toises au-dessus de la mer. On ne voit pas très bien le but précis poursuivi ; sinon que l'on se rend compte que la différence d'altitude DH n'est pas reliée à la différence de pression DP par une loi linéaire, d'autant plus que les altitudes géométriques sont en elles-mêmes mal connues comme nous l'avons vu : voici ses résultats en pouces, lignes, toises.

Lieu	DP	DH
Bugarach	3 ^p 6 ^l 5	606,5
Rieupeyroux	2 ^p 6 ^l	363
Rodez	2 ^p	247.5
Rodez	20 ^l	239 ^t

	DP	DH
	9.59 cm	1180 m
	6.77 cm	706 m
soit en	5.41 cm	481 m
unités	4.52 cm	465 m
actuelles		

Cassini de Thury entreprend également des expériences barométriques, il a la curiosité de reprendre l'expérience de Pascal et Périer "in situ". Il est amusant de comparer ses résultats avec ceux-là (pouces, lignes).

	Clermont	Font de l'Arbre	Puy de Dôme
Périer	26 ^p 3 ^l ,5	25.0	23 ^p 2,0
Cassini de Thury	27.0,0		23.8,3
		25.7,8	23.9,5
	27.0,5	25.6,7	23.8,9

On notera que la comparaison entre les deux expériences est excellente, Cassini de Thury la complète en observant la dénivelée entre Clermont et le sommet du Puy de Dôme (560 toises au lieu de 500).

Il procède également à des mesures barométriques au Canigou et y fait une expérience d'hypso-

métrie : il constate, avec un thermomètre dont il vérifie par l'épreuve de la glace et de la neige fondante que le zéro n'a pas varié entre Le Canet (plage de Perpignan) et le Canigou, que le point d'ébullition de l'eau au Canigou est à 15° Delille (Réaumur ?) au-dessous de sa valeur au niveau de la mer... mais on ne voit pas qu'il ait cherché à utiliser ces propriétés pour une évaluation des altitudes.

Et pourtant à cette époque d'autres sont sur la bonne piste : les académiciens du Pérou. En 1729 Bouguer a publié un "Essai sur la graduation de la lumière" dans lequel il crée la photométrie. Etudiant l'absorption progressive de la lumière à la traversée des corps transparents, il explique sur une analogie que la loi de Mariotte "fait les condensations de l'air exactement proportionnelles aux pesanteurs" et en déduit que la courbe donnant les différences d'altitude en fonction de la pression est une "logarithmique". Ceci est facile à voir par un raisonnement très simple : considérons une atmosphère constituée de strates de même poids P.

Il s'exerce sur la dernière strate (en bas) une pression nP, (n - 1) P sur la (n - 1)^e, etc.

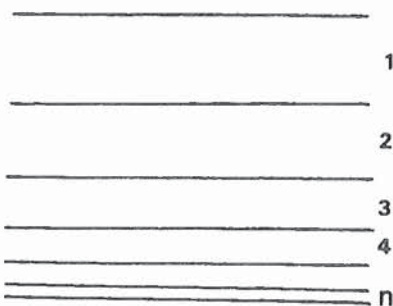


Fig. 33

Si H est l'épaisseur de la strate initiale, en vertu de la loi de Mariotte, la dernière strate aura pour épaisseur H/n et l'altitude totale du système sur la somme des épaisseurs des strates, soit $(1 + 1/2 + 1/3 + \dots + 1/n)$ et on sait que la somme de la série harmonique a pour partie principale Logn (H très petit, n très grand) or la pression est de la forme

$$Z - Z_0 = K \log P$$

Godin et avec lui Juan et Ulloa feront usage du nivellement barométrique, après avoir étalonné la formule dans la région de Quito. Ils ne sont pas très enthousiasmés par les résultats qui leur paraissent cependant suffisants pour leur but (réductions des observations). Bouguer avait donné la règle suivante (2) "... cherchez dans les tables ordinaires les logarithmes des hauteurs du mercure dans le baromètre, exprimées en lignes ; retranchez 1/30 de la différence de ces logarithmes : en prenant la caractéristique suivie de 4 décimales, vous aurez en toises, la hauteur relative des lieux" ce qui revient à dire que la dénivelée, exprimée en toises est égale à $10\,000 \frac{29}{30} \log (P_2/P_1)$.

Appliquée à l'expérience du Puy de Dôme, elle donnerait $H_2 - H_1 = 532$ toises et à l'altitude du

Canigou : 1412 toises au lieu de 1441 annoncées par J. Cassini, qui se ramèneraient à 1432 toises environ après correction de réfraction.

Ce qui manquait essentiellement à Bouguer, c'était la loi de Gay-Lussac. C'est Laplace* qui donnera dans sa Mécanique Céleste une théorie plus satisfaisante en partant de l'équation barométrique, et tenant compte de la température.

L'équation barométrique reprend sous une forme plus précise, le raisonnement précédent ; elle exprime que la variation de pression sur une petite surface découpée dans une couche mince d'atmosphère est égale au poids de cette couche,

$(P + dP - P) ds = - g D ds$ d'où $dP = - g D dz$ (g pesanteur, D densité, dz épaisseur de la couche) et tenant compte de la loi de Mariotte Gay-Lussac, $pV = RT$ en déduisant par intégration la formule classique plus précise :

$$z_2 - z_1 = 18400 \left(1 + \alpha \frac{t_1 + t_2}{2} \right) \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \frac{g_0}{g_m} \left[1 + 0,188 \left(\frac{f_1}{P_1} + \frac{f_2}{P_2} \right) \right]$$

où f_1 et f_2 sont les tensions de vapeur d'eau exprimées dans le même système d'unité que P .

On sait par ailleurs que, quelles que soient les précautions et les corrections expérimentales, la précision d'une altitude barométrique soignée est de l'ordre de ± 5 m et que les erreurs d'une dizaine de mètres sont possibles. Le nivellement barométrique est donc essentiellement un nivellement de reconnaissance.

Le nivellement géométrique de précision

Le système d'altitudes de la carte 1/80 000, rapporté au niveau de la mer couvrait le pays d'un canevas homogène, dont la précision était de l'ordre de un à deux mètres.

Mais il était insuffisant pour les travaux d'art : routes, ponts, canaux, voies ferrées, on rappelle que la première voie ferrée construite en France, de Lyon à Saint-Etienne, fut mise en service en 1832, que c'est en 1842 sous le ministère Guizot que fut votée la loi décidant la construction de neuf lignes de chemin de fer, reliant Paris aux principales villes de province.

Il fallait donc, si on voulait en faire un raccord correct, homogénéiser tout cet ensemble à la précision requise, étudier un autre système et le mettre en œuvre. Bourdalouë appuyé par le service des Ponts et Chaussées en fut le grand moteur.

En 1853 Peytier alors chef de la géodésie au Dépôt de la Guerre écrit (30,9) "... Les Ingénieurs des Ponts et Chaussées exécutent, au moyen d'un niveau à lunette susceptible de toutes les vérifications nécessaires et d'une mire, d'excellents nivellements dont quelques personnes exagèrent un peu le degré de précision. Ils placent leur niveau à peu près au milieu de la distance des deux points dont ils veulent déterminer la différence de niveau et

pointent successivement deux mires placées à ces points ; de cette manière, le résultat est indépendant de toutes les erreurs constantes dont pourrait être affecté chaque coup de niveau. M. Breton de Champ, dans son traité de Nivellement (35) dit que dans les grands nivellements on adopte 120 mètres et quelquefois plus pour la distance entre le niveau et les mires, mais qu'il serait préférable d'adopter 100 mètres et même 75 mètres. M. Breton dit encore que dans un bon nivellement, l'erreur ne doit pas dépasser 0,015 m pour 50 kilomètres. Cette estimation nous paraît fort au-dessous de la réalité et l'erreur probable doit être au moins le triple de cette quantité... Nous pensons qu'un nivellement géodésique effectué avec de petits côtés de 10 000 mètres par exemple, en ayant pour signaux des mires carrées de 0,30 m qui offriraient un excellent pointé, et en prenant des distances zénithales réciproques et simultanées, donnerait des résultats dont le degré d'exactitude pourrait être comparé à celui qu'obtiennent les Ingénieurs des Ponts et Chaussées...". Ce texte montre les cloisons étanches qui existaient alors entre services dont les besoins différents n'avaient pas encore trouvé leur dénominateur commun, et les doutes et illusions d'un géodésien de profession qui avait consacré aux mesures de distances zénithales la meilleure partie de sa jeunesse et de ses travaux d'opérateur sur le terrain.

Le Traité de Nivellement de Breton de Champ (35) auquel Peytier fait allusion parut en 1848 (1^{re} édition). C'est un ouvrage excellent, il est même tout à fait curieux que le nom de l'auteur soit pratiquement inconnu de nos jours, éclipsé sans doute par ceux de Bourdalouë, de Goulier, de Lallemant, alors qu'il semble bien que Breton de Champ ait été, sans le crier sur les toits, un des principaux instigateurs du réseau national de nivellement dont l'exécution matérielle fut confiée à Bourdalouë (1798-1868). Bourdalouë était conducteur des Ponts et Chaussées, et à ce titre exécutait les travaux de nivellement nécessaires aux projets. Vers 1840, il est en service dans le midi, où il nivelle les voies ferrées de Nîmes aux mines des Cévennes, sous les ordres de l'Ingénieur en chef Paulin Talabot — que nous retrouverons plus loin. Les premières conclusions de Bourdalouë sont publiées en 1844 dans une brochure intitulée "Notice - Amélioration du niveau cercle Egault et construction de nouvelles mires — par M. Bourdalouë Ingénieur Résident des chemins de fer du Gard, conducteur des Ponts et Chaussées. Il s'exprime en ces termes : "Les grands nivellements qui nous ont été confiés depuis 28 ans pour études de canaux, routes, chemins de fer, dessèchement de marais, nous ont mis à même de pouvoir améliorer, simplifier les instruments employés dans les nivellements, afin d'économiser le temps et de diminuer par conséquent les frais énormes que les grandes opérations entraînent...". Il explique sa préférence pour le niveau cercle de Lenoir construit sur les indications de l'Ingénieur en chef Egault, et surtout il remplace les mires coulissantes, très longues à manœuvrer, causes de fautes ou d'incertitudes, par des mires parlantes - innovation capitale. Quelques années plus tard, il ajoutera à l'attirail du porte-mire une fiche d'acier implantée dans le sol

* Euler avait fait un calcul très analogue en 1755.

à coups de marteau, pour stabiliser le support de mire (ancêtre du crapaud). Les résultats ne se firent pas attendre, dans sa "Nouvelle notice sur les nivellements" (1847) il cite les fermetures aller-retour de quelques lignes de nivellement observées par lui :

En 1830	Alès - Beaucaire	72 km - 0,020 m
En 1836	La Teste - Bayonne	120 km - 0,080 m
En 1843	Beaucaire - Marseille	90 km - 0,100 m
En 1846	Lyon - Avignon	220 km - 0,017 m

La précision des nivellements observés selon les méthodes de Bourdalouë était essentielle pour les avant-projets des lignes de chemin de fer qui se développaient à l'époque : on sait que la traction à vapeur admet au plus des rampes de 2 à 3 % et les résultats obtenus justifiaient les espoirs les plus audacieux.

Dans son enthousiasme, Bourdalouë écrit (35) : "Enfin si l'on poussait une seule ligne de nivellement à travers la France, passant par Paris, soit environ 750 kilomètres, nous certifions que le premier niveleur venu, pourvu qu'il soit calme, fera avec nos instruments et nos méthodes, cette opération en 45 jours*, et n'ayant pour toute tolérance que 0,03 m..."

La notice initiale de 1844 est certifiée par Paulin Talabot, qui fut un des grands ingénieurs du siècle, et finira comme Directeur général des chemins de fer Paris, Lyon, Méditerranée.

Son activité ne se borna pas au développement des réseaux ferrés ; il fut désigné pour faire partie des brigades d'études (internationales) chargées d'explorer les possibilités du creusement du canal de l'isthme de Suez ; il y emmena Bourdalouë.

On sait que ce canal remonte à une haute antiquité : Hérodote (L'Enquête - II - 158 - Edition de la Pléiade) dit "... Psammétique eut pour fils et successeur Nécos (Nechao de 609 à 594 Av. J.C.) qui entreprit le percement du canal qui conduit à la mer Erythrée... En longueur ce canal représente quatre jours de navigation, et on le fit assez large pour permettre le passage de deux trières de front ; son eau vient du Nil : il s'en détache un peu au-dessus de Bubastis, passe près de la ville arabe de Patoumos et aboutit à la mer Erythrée (mer Rouge)..." Lors de l'expédition d'Egypte, Bonaparte fit reconnaître l'isthme de Suez, et fit exécuter un nivellement entre Méditerranée et Mer Rouge. Pressés par les circonstances, assaillis par les tribus Arabes hostiles, interrompus à diverses reprises, les ingénieurs niveleurs avaient trouvé une dénivelée de l'ordre de 8 à 9 mètres.

Les travaux de 1847 ont fait l'objet d'un compte-rendu de P. Talabot dans "Société d'Etudes de l'Isthme de Suez - Travaux de la brigade française" qui discute les résultats. La fermeture des mailles qui s'étendent sur l'isthme est de l'ordre du décimètre et Talabot affirme "... le résultat de ce nivellement est que la mer moyenne est un peu plus élevée dans la mer Rouge que dans la Méditerranée, mais que la différence est au maximum de 80 centimètres..."

Il discute les résultats extrêmes (morte eau en Méditerranée - vive eau à Suez) et les compare à ceux de 1799.

* Admirez, opérateurs !

	1799	1847
Basse mer (Méditerranée)	0.00	0.00
Haute mer de vive eau (Mer Rouge)	9.90	2.27 m
Basses eaux du Nil	5.29	13.27 m

Le projet était donc viable sous cet aspect, aucune écluse n'étant à prévoir.

De Lesseps, ancien Consul de France en Egypte obtiendra du Khédive l'autorisation de construction, et le canal sera terminé en 1869.

Le nivellement de Suez établit - à bien juste titre - la gloire de Bourdalouë dont les conclusions étaient sans appel. A son retour, il deviendra pratiquement l'entrepreneur officiel des travaux de nivellement des Ponts et Chaussées, comme en témoigne cette convention passée entre lui et Collin, Ingénieur en chef du Service spécial de la Loire (20/03/1855) : "Je soussigné P.A. Bourdalouë, me charge de faire exécuter le nivellement de précision de la Loire (partie comprise entre la mer et Briare). La précision sera telle qu'une différence dépassant 5 centimètres ne pourra exister d'un point extrême à l'autre. La tolérance pour chaque kilomètre ne pourra excéder cinq millimètres, sans qu'ils viennent s'ajouter... Trois lignes se vérifiant entre elles seront faites avec le plus grand soin : deux remonteront le fleuve en partant de Saint-Nazaire... pour suivre chaque rive... une troisième servant de contrôle aux deux autres sera faite en sens inverse, c'est-à-dire, de Briare à Saint-Nazaire... ces trois lignes devront comme vérification avoir au moins un point commun tous les vingt kilomètres... Tous les frais occasionnés pour les opérations de terrain, la fourniture des instruments et des carnets, la reliure des volumes, l'impression et la brochure des tables, seront à la charge de M. Bourdalouë... L'unité pour le paiement des opérateurs sera le kilomètre de nivellement de chaque ligne, lequel sera payé neuf francs (!!!)... Le niveau moyen de la mer qui doit servir de plan de comparaison... sera fixé à la cote 3.00 m de l'échelle de Saint-Nazaire..."

Prévu pour durer quatre mois, le travail en demanda le double, pour trois opérateurs, Bourdalouë d'ailleurs estime que c'est dû à une confusion entre nivellement principal et travaux de détails.

Le Nivellement général de la France : L'adoption de la cote 3.00 m de l'échelle de Saint-Nazaire, montre bien qu'il n'existait pas encore de système unifié des altitudes pour coordonner les projets généraux.

Le problème avait pourtant été évoqué à diverses reprises. En 1802 une commission spéciale de coordination des travaux topographiques des différents services publics avait siégé au Dépôt de la Guerre, sous la présidence du Général Sanson. Elle était d'avis "en ce qui concerne les nivellements, que les services publics qui ne rapportent pas encore leurs nivellements au niveau général de la mer, comme le font ordinairement les géographes et les ingénieurs des mines, soient invités à suivre cet usage et à rattacher autant que possible à ce niveau les plans par-

tiels de comparaison des nivellements qu'ils ont faits ou qu'ils feront à l'avenir" (6).

Dans leur projet de 1816, Brossier et Denaix avaient fait valoir que "si les observations de hauteur étaient faites avec plus de soin... elles procureraient de proche en proche un nivellement exact de toute la France... "et qu'une nouvelle description géométrique de la France aurait entre autres avantages, celui de ... fixer des points de repère assez multipliés en tous lieux, pour y rattacher les innombrables nivellements, faits et à faire, si nécessaire à la connaissance plus exacte de notre sol".

L'idée est également émise par P.S. Girard, dans un "Mémoire sur le nivellement général de la France, et les moyens de l'exécuter" (1805, 1825) qui propose de faire exécuter le profil en long des thalwegs et de relier les cotes par des courbes de niveau, de manière à dessiner les bassins des différents cours d'eau qui irriguent le sol français. Ce travail devait être exécuté au niveau à lunette (35).

La proposition n'avait pas alors rencontré beaucoup d'échos puisque les travaux géodésiques et topographiques entrepris à l'échelle nationale depuis 1817 pour l'élaboration de la carte du pays avaient l'ambition de fournir ce canevas. Mais, on s'aperçut vite que les cotes obtenues par nivellement trigonométrique étaient insuffisamment précises pour satisfaire les besoins des Travaux Publics, comme nous l'avons dit plus haut.

Le triomphe des travaux de Suez ouvrait d'autres perspectives. On songea à doter le pays d'un vrai réseau de Nivellement de précision et Bourdalouë, à titre expérimental procéda, à ses frais, au nivellement du département du Cher. Le succès de l'opération le persuada de la viabilité d'un projet plus général dont il proposa la mise en route. Sur avis du Conseil Général des Ponts et Chaussées, le Ministre des travaux publics conclut à l'utilité de l'entreprise, et décida qu'un réseau de base serait établi et observé par Bourdalouë, sur les crédits publics, avec participation des compagnies de chemin de fer.

Le concours des départements serait prévu pour les travaux ultérieurs (juillet 1857). Au point de vue technique, ce réseau se développe sur 15 000 kilomètres environ, formant trente-huit polygones.

Les résultats en ont été publiés en 1864 (trois volumes) mais on ne sait pas très bien comment en ont été effectués les calculs, qui sont très probablement la partie la plus discutable de l'œuvre. Lorsqu'en 1970 l'Institut Géographique National reprit les registres d'observations du réseau de Bourdalouë, précisément pour refaire un calcul aussi correct que possible par la méthode des moindres carrés, on constata que la moyenne de certaines dénivelées était fautive, soit par erreur de calcul de la moyenne, soit parce que l'une des trois ou quatre dénivelées composantes était elle-même erronée. La compensation donna des résultats différant souvent localement de plusieurs décimètres de ceux qu'annonçait Bourdalouë ; elle attribua à son réseau un écart-type inférieur à 0.5 cm par kilomètre, ce qui est fort honorable.

Origine des altitudes : Picard au cours de ses études avait choisi le rez-de-chaussée du Château de Versailles, ce qui était de bonne cour et de logique.

J. Cassini adoptera le niveau de la mer dans la région de Perpignan imité en cela par Cassini de Thury. Ce choix est intuitif et correspond à une généralisation de la définition de Pascal : les points de même altitude sont équidistants du centre de la terre, autrement dit le relief dont on calcule la hauteur coiffe une terre de forme géométrique précise, et on ramène les mesures, les bases en particulier, au niveau de la mer, origine des altitudes. C'est ce que feront les Ingénieurs géographes. En ce qui concerne les travaux d'ingénierie, on se fixait pour chacun, une origine particulière des altitudes — cf. le choix de cette origine pour le profil de la Loire par Bourdalouë — mais peu à peu, un besoin d'unification se fit sentir, c'est ainsi que l'Ingénieur en Chef Collin, déjà cité, proposait "de rattacher toutes les opérations d'altitude à un plan unique de comparaison qui passerait à 100.0 m au-dessous d'un repère central à établir dans la cour de l'Observatoire de Paris"... Finalement une décision ministérielle fixa en 1860 l'origine des altitudes du réseau Bourdalouë au niveau moyen de la Méditerranée à Marseille, défini par le trait 0.40 m de l'échelle de marée de Fort Saint-Jean. Le zéro actuel du N.G.F. en diffère très peu.

Les grands nivellements qui ont été exécutés depuis 28 ans pour états de Canaux, Routes, Chemins de fer, des chemins de fer, ont mis à même de perfectionner les instruments employés dans les nivellements, afin d'économiser le temps et de diminuer par conséquent les frais énormes que les grandes opérations entraînent.

Pour atteindre ce but, nous avons d'abord cherché à reconnaître quel était le niveau le plus prompt, le plus sûr, le moins

coûteux, et le plus facile à manier.

C'est le niveau à bulle que nous avons cherché à perfectionner.

1° En quadruplant la portée de sa lunette.

2° En augmentant un peu le diamètre de son plateau vertical.

3° En faisant plus commodément la bulle sur sa règle où elle est retenue solidement.

4° En mettant à l'extérieur le pignon P qui permet de le faire tourner promptement avant les besoins de l'opérateur.

5° Enfin en mettant pour marquer le retournement de la lunette et de la bulle des gros chiffres 11 et 22 qui devant toujours se succéder.

Les nouveaux niveaux qui ont été exécutés par Tachette, on n'a presque pas de rectifications de bulle et de lunette à faire, et les mises qui n'étaient bien lues qu'à 100 mètres peuvent être jusqu'à 600 et 700 lorsqu'il n'y a pas de follet.

Mires

Les mires à section Figure 3 qui ont généralement employées orientent les

elles sont très longues à

On n'est qu'après leur

Composées en sections jointes de bois elles sont sujettes à de fréquents

fig. 3.

Echelle 0 05.

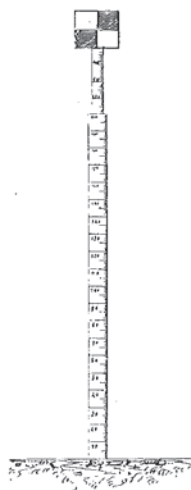


fig. 4.



Les parties de ces mires qui ont été exécutées par Tachette, on n'a presque pas de rectifications de bulle et de lunette à faire, et les mises qui n'étaient bien lues qu'à 100 mètres peuvent être jusqu'à 600 et 700 lorsqu'il n'y a pas de follet.

On n'est qu'après leur

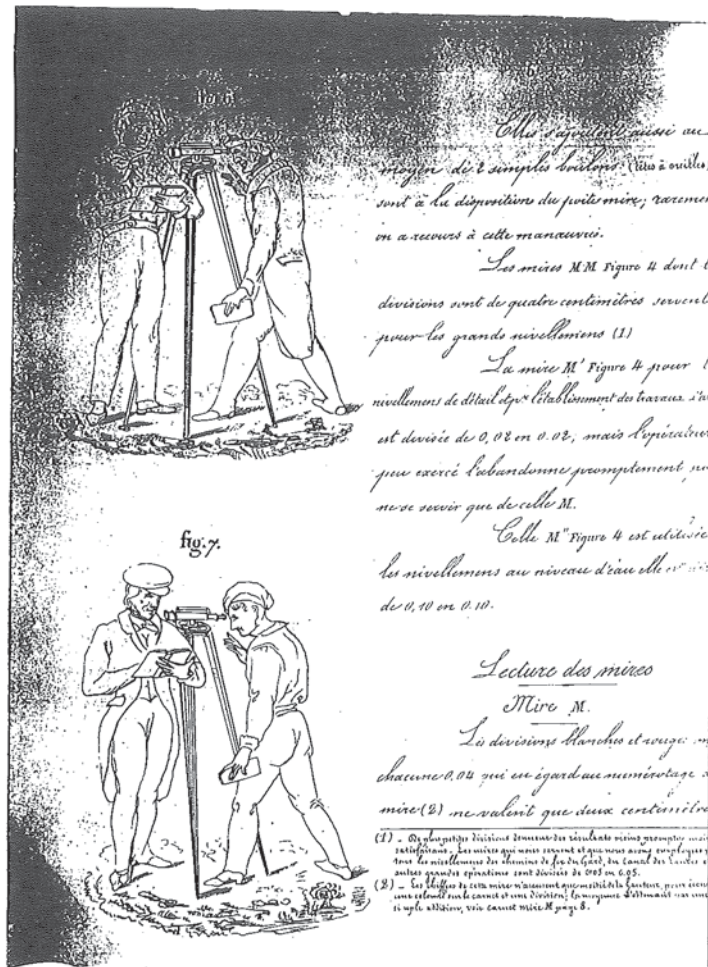
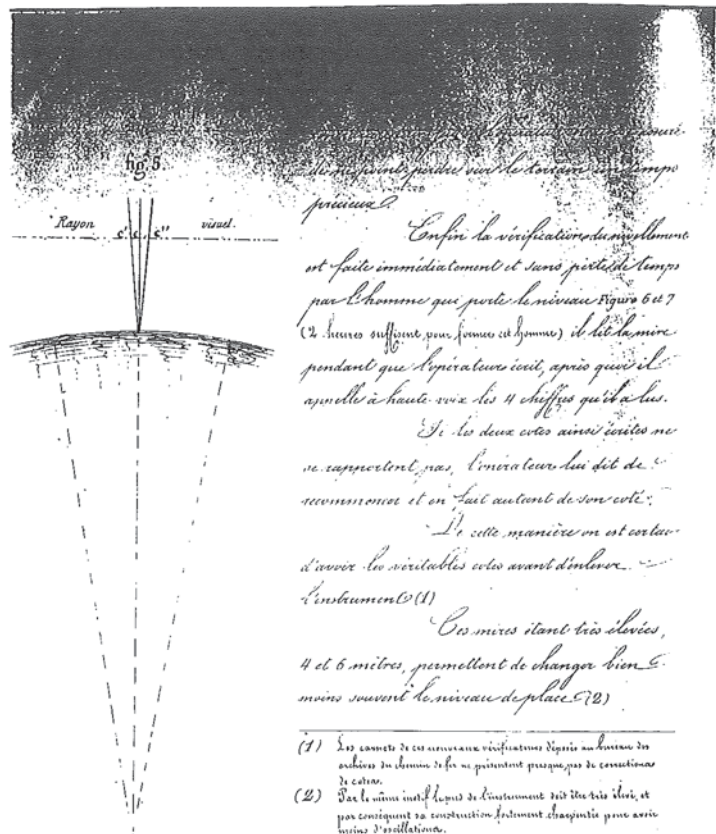
Composées en sections jointes de bois elles sont sujettes à de fréquents

elles sont très longues à

On n'est qu'après leur

Composées en sections jointes de bois elles sont sujettes à de fréquents

elles sont très longues à



REPRODUCTION PHOTOGRAPHIQUE

- agrandissements
- réductions
- remises à l'échelle en tous formats
- réductions/assemblages de plans à échelle imposée
- confection
- reproduction
- travaux spéciaux sur mosaïques topographiques
- travaux sur supports polyester
- typons offset
- tramés ou trait

HAUTE PRECISION

LART

PHOTO-REPROGRAPHIE PHOTO-CARTOGRAPHIE

LES APPLICATIONS DE LA REPRODUCTION TECHNIQUE

5, rue de la Véga
75012 PARIS

☎ 347.15.92