

Storia della misurazione del grado di meridiano terrestre

di Maristella Galeazzi

Alcuni filosofi greci presocratici ritenevano che la Terra fosse piatta, ma questa non era certo l'opinione della maggioranza di essi, infatti già Aristotele (384-322 a.C.) sosteneva la sfericità della Terra e confermava la sua ipotesi mediante la circolarità dell'ombra della Terra sulla Luna osservabile durante le eclissi del nostro satellite e tramite il fatto che la configurazione del cielo mutava con la latitudine.

Già Eratostene (275-195 a.C.) calcolò la prima misura del meridiano terrestre, ottenendo un valore di circa 44000 km.

I geografi dell'antichità e del Medioevo non ottennero nuove misure significative, bisogna attendere la fine del XVII secolo per avere una nuova misura.

Il problema della figura e della misura della Terra fu, insieme a quello della misurazione della longitudine, uno dei grandi problemi che preoccupò il mondo scientifico nel XVII e XVIII secolo e fu oggetto di una forte rivalità tra gli scienziati francesi e quelli inglesi.

Tappe fondamentali della cartografia antica

580 a.C.	Talete di Mileto immagina la terra piatta circondata dall'oceano.
570 a.C.	Pitagora pensa che la Terra sia sferica in quanto la sfera è una forma "perfetta".
335 a.C.	Aristotele fornisce le prove della sfericità della Terra.
230 a.C.	Eratostene ad Alessandria misura un arco di meridiano e calcola con una buona approssimazione, per quel tempo, il valore del raggio terrestre. 
400 d.C.	Sant'Agostino rifiuta la sfericità della Terra.
IX – XI sec.	Gli astronomi e i geografi arabi perfezionano gli strumenti di misura e sono dunque in grado di proseguire la tradizione greca.

Prime tappe della cartografia moderna

XV sec.	La rivoluzione copernicana. Copernico (1473-1543) enuncia la teoria eliocentrica: <ul style="list-style-type: none">• la Terra è sferica;• i pianeti, compresa la Terra, ruotano su orbite circolari intorno al Sole. La Terra è il centro dell'orbita lunare.
1520	Jean Fernel (1497-1558) effettua misure di distanza (misurando la distanza Paris-Amiens: 68000 passi) e di latitudine e determina la circonferenza terrestre con un errore dell'1%.
1610	Willebrord Snell Van Royen (Snellius) utilizza la triangolazione.
1650	Picard (1620-1682) ne perfeziona ulteriormente la misura.

Jean Picard

Nel 1666 Jean Baptiste Colbert (1619-1683) creò l'*Academie Royale des sciences*. Uno dei problemi principali da affrontare era proprio la misura della Terra; era convinto che avere delle cartine più precise avrebbe permesso di migliorare la gestione della Francia. Così nel 1667 l'abate Jean Picard fu incaricato di iniziare una grande operazione geodetica. Secondo il suo rapporto all'*Academie* "oultre che par ce moyen on aurait une carte la plus exacte qui ait encore été faite, on en tirerait cet avantage de puouvoir determiner la grandeur de la Terre".

Picard utilizzò il metodo di triangolazione, cioè la misura di punti distanti mediante una rete, metodo già utilizzato dal geodeta olandese Snellius (1580-1626).

La triangolazione è un metodo di rilevamento del terreno che consiste nel collegare i punti scelti sul terreno fino a formare un insieme di triangoli aventi a due a due un lato in comune. Nell'esecuzione del rilievo è opportuno che i triangoli abbiano forma più equilatera possibile perché è più agevole la compensazione e perché si copre una superficie maggiore rispetto a un triangolo qualsiasi.

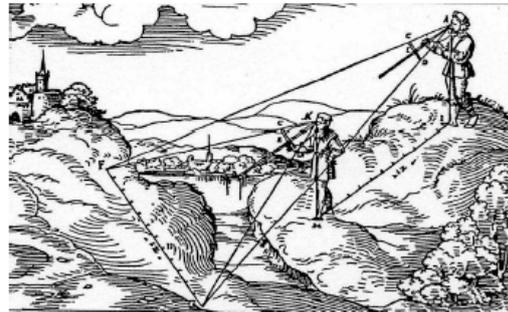
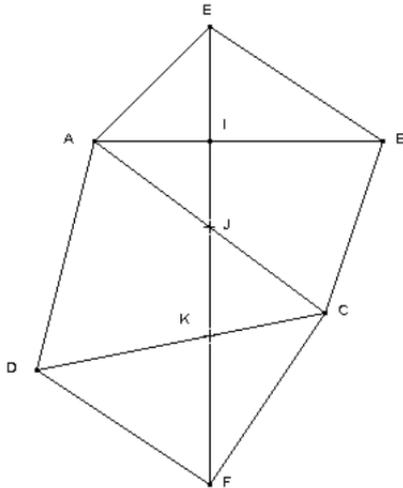
In realtà già nell'edizione stampata ad Anversa nel 1533 del "*Cosmographicus liber Petri Apiani mathematici*", Reinerus Gemma Frisius (1508-1555) per la prima volta formulava il principio della triangolazione come sistema per il corretto posizionamento dei luoghi sulla superficie terrestre e per la loro accurata rappresentazione cartografica. Se i triangoli sono collegati fra loro in modo univoco, cioè da un triangolo si passa al successivo attraverso uno e un solo lato comune, la triangolazione si dice *a catena*; essa è caratterizzata dalla notevole estensione in lunghezza e dalle molteplici forme articolate che può assumere, sempre in dipendenza dal tipo di rilievo da effettuare. Se invece da un triangolo si può accedere agli altri triangoli attraverso più vie, la triangolazione si dice *a rete*.

Principio fondamentale della triangolazione

Conoscendo la misura di due angoli e di un lato di un triangolo è possibile, mediante il teorema dei seni, calcolare il terzo angolo e gli altri due lati.

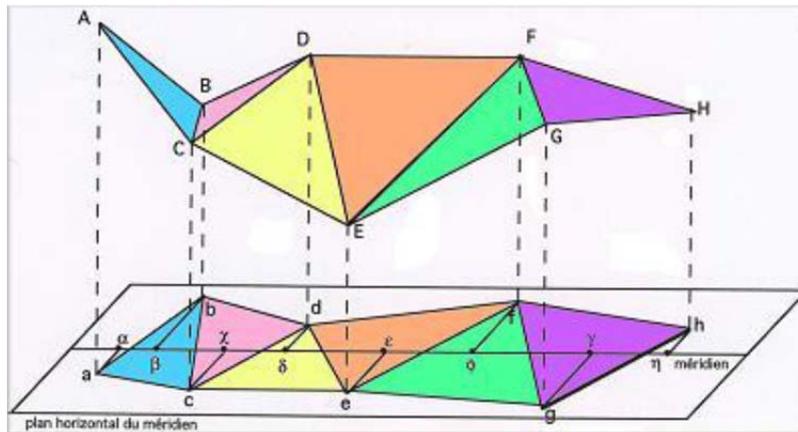
Lo scopo è calcolare la lunghezza di EF. Utilizziamo una triangolazione mediante 4 triangoli: scomponiamo EF come $EI+IJ+JK+KF$.

Cominciamo col misurare AB e i tre angoli del triangolo ABE, in questo modo è possibile risolvere il triangolo ABE. Noto questo triangolo, è possibile risolvere AEI e ricavare EI, che è la prima parte che ci occorre per calcolare EF.

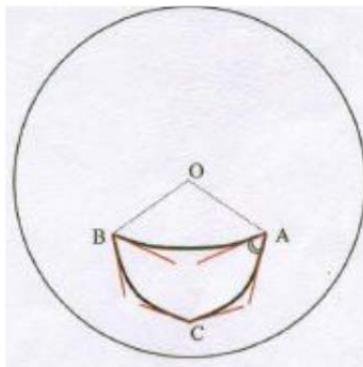


Continuando nello stesso modo sul triangolo ABC e poi di seguito sui triangoli successivi è possibile calcolare la lunghezza di EF.

Ovviamente lo stesso principio si può applicare anche se i triangoli non sono tracciati su un piano, ma il numero di calcoli, in tal caso, aumenta notevolmente.



Inoltre se i triangoli proiezione non sono su un piano ma su una sfera è necessario ricorrere a nozioni di trigonometria sferica.



La Terra fino al 1700 circa era considerata perfettamente sferica. Fu proprio Picard, in seguito ad alcune sue misurazioni, nel 1671, ad avanzare per primo l'idea che la Terra non fosse perfettamente sferica. Misurò il tratto di meridiano passante per l'Osservatorio di Parigi, da Parigi ad Amiens, costruendo una catena di tredici triangoli, partendo da una base misurata a terra e misurando gli angoli a partire da punti visibili gli uni dagli altri (torri, campanili, ...). Dopo aver calcolato la lunghezza totale di un arco di meridiano bastava poi calcolare la latitudine dei due punti alle estremità per sapere di che frazione di meridiano (circonferenza polare) si trattava per risalire poi alla lunghezza totale del meridiano.

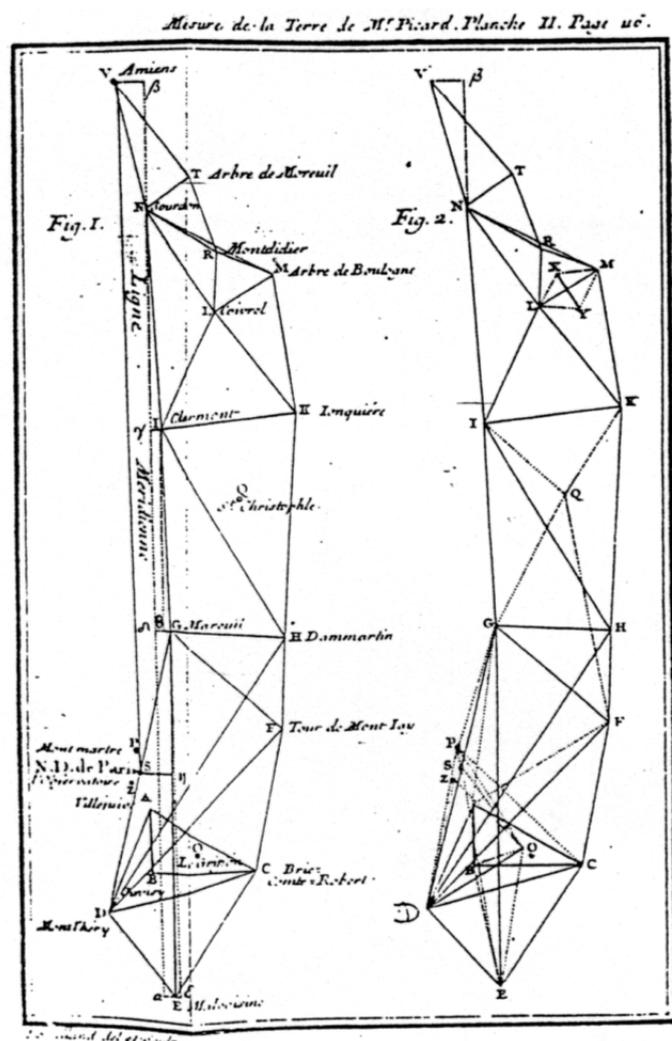
La lunghezza di un grado di meridiano a latitudine 49,5° nord calcolata da Picard fu di 57060 tese (111,210 km). La lunghezza standard era stata definita confrontando la tesa francese pari a 6 piedi parigini (1,949 m) con la lunghezza di un pendolo semplice battente i secondi di 440,5 linee (144 linea a piede). Nel 1671 Picard comunicava i risultati della sua rilevazione nel libro "Mesure de la Terre". Determinò così il meridiano con una precisione mai raggiunta prima: 40033 km.

Jean-Felix Picard (1620-1682)

abate e astronomo francese.



Fu la prima persona a misurare la lunghezza della Terra con una ragionevole accuratezza, in un'indagine condotta tra il 1669 e il 1670, con l'aiuto del libro *Cosmographia* di Francesco Maurolico, nel quale il matematico italiano descrive un metodo per misurare la Terra, e delle misurazioni di Willebrord Snell, Picard riuscì nell'impresa misurando un grado di latitudine lungo il Meridiano di Parigi.



34 *Mesure de la Terre,*
 qui ne donnoient les minutes que de six
 en six, ils n'ont pas laissé d'approcher de
 la justesse autant qu'il étoit nécessaire,
 pour faire voir qu'on ne s'étoit pas trompé
 aux conclusions.

I. TRIANGLE ABC.
 Pour connoître le côté AC.

CAB..... $54^{\circ}4'35''$.
 ABC..... $95^{\circ}6'55''$.
 ACB..... $30^{\circ}48'30''$.
 AB..... 5663 Toises de mesure actuelle.
 Donc AC..... 11012 Toises 5 pieds.
 Et BC..... 8954 Toises.

II. TRIANGLE ADC.
 Pour DC & AD.

DAC..... $77^{\circ}25'50''$.
 ADC..... $55^{\circ}0'10''$.
 ACD..... $47^{\circ}34'0''$.
 AC..... 11012 Toises 5 pieds.
 Donc DC..... 13121 Toises 3 pieds.
 Et AD..... 9922 Toises 2 pieds.

III. TRIANGLE DEC.
 Pour DE & CE.

DEC..... $74^{\circ}9'30''$.
 DCE..... $40^{\circ}34'0''$.
 CDE..... $65^{\circ}16'30''$.
 DC..... 13121 Toises 3 pieds.
 Donc DE..... 8870 Toises 3 pieds.
 Et CE..... 12389 Toises 3 pieds.

par M. l'Abbé Picard. 35

IV. TRIANGLE DCF.
 Pour DF.

DCF..... $113^{\circ}47'40''$.
 DFC..... $33^{\circ}40'0''$.
 FDC..... $32^{\circ}32'20''$.
 DC..... 13121 Toises 3 pieds.
 Donc DF..... 21658 Toises.

Notez que dans ce quatrième triangle,
 l'angle DFC a été augmenté de
 $10''$, qui manquoient à la somme des
 trois angles.

V. TRIANGLE DFG.
 Pour DG & FG.

DFG..... $92^{\circ}5'20''$.
 DGF..... $57^{\circ}34'0''$.
 GDF..... $30^{\circ}20'40''$.
 DF..... 21658 Toises.
 Donc DG..... 25643 Toises.
 Et FG..... 12963 Toises 3 pieds.

Ensuite de ces cinq triangles, il a été
 facile de conclure la distance GE entre
 Malvoisine & Marcueil, sans supposer
 aucune nouvelle Observation.

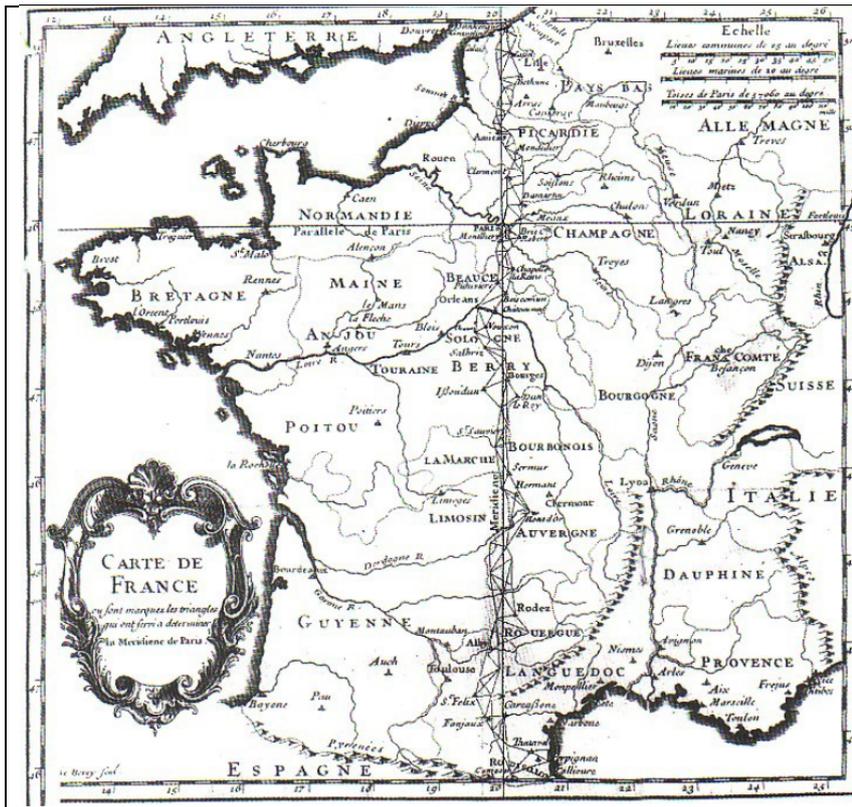
Picard, *Mésure de la Terre*

Il Meridiano di Parigi fu definito il 21 giugno 1667 dai matematici dell'Académie Royale des Sciences. In questo giorno di solstizio d'estate essi tracciarono sul pavimento il meridiano e successivamente le altre direzioni necessarie alla corretta installazione del futuro Osservatorio di Parigi. Due obiettivi servivano a puntare gli strumenti dell'osservatorio:

- L'obiettivo Nord, eretto nel 1736 nel parco (privato) del Moulin de la Galette a Montmartre;
- L'obiettivo Sud, terminato nel 1806 da Antoine Vaudoyer e posto all'inizio del giardino dell'Osservatorio, e in seguito spostato nel Parc Montsouris



La "mire du Sud"



Meridiano. Cerchio massimo della superficie terrestre passante per i poli. Il meridiano utilizzato dalla marina francese per dare la posizione geografica in Francia era il meridiano di Parigi.

I Cassini

Pochi mesi prima, il 22 dicembre del 1666, l'Académie Royale des Sciences aveva tenuto la sua prima seduta. Sia l'Académie che l'Observatoire erano stati creati da Luigi XIV e da Colbert, suo ministro, che avevano voluto accogliere le richieste avanzate dalla comunità scientifica francese nel quadro di un unico progetto culturale. L'Osservatorio non divenne però, come era nei piani di Colbert, un centro di ricerca nazionale, ma fu consacrato fin dalla sua origine alla sola attività astronomica.

Nel 1668, mentre i lavori erano ancora in corso, Colbert chiamò in Francia l'astronomo bolognese Gian Domenico Cassini (1625-1712), all'epoca corrispondente dell'Académie Royale des Sciences, che doveva la sua fama alla meridiana di San Petronio a Bologna.

L'italiano giunse a Parigi nel 1669: il suo soggiorno avrebbe dovuto essere solo temporaneo; viceversa, nonostante gli appelli del papa, nel 1671 Cassini si insediava negli appartamenti a lui destinati nell'Osservatorio e, nel 1673, otteneva la naturalizzazione francese. Cassini ebbe a disposizione i mezzi necessari per dotare l'Osservatorio dei migliori strumenti possibili, tra cui grandi telescopi di Eustachio Divini (1610-1685) e di Giuseppe Campani (1635-1715).

Da quel momento e fino al 1793 quattro generazioni di Cassini si alternarono alla guida dell'Osservatorio di Parigi.

Impossibile riassumere in questa sede il contributo di Cassini al progresso delle conoscenze astronomiche. A lui si devono tra l'altro la scoperta dei quattro satelliti di Saturno e la divisione dell'anello che porta il suo nome. Fondamentali

furono i suoi studi sulle comete, sulle macchie solari e sulle eclissi dei satelliti di Giove.



Gian Domenico Cassini (1625-1712)

La pubblicazione delle effemeridi calcolate dall'Osservatorio di Parigi era già iniziata nel 1679 a opera di Picard.

L'incontro di Cassini con Picard aprì nuove prospettive e Cassini si impegnò in un progetto ben più vasto: tracciare una linea meridiana attraverso tutta la Francia da Dunkerque ai Pirenei. Durante un breve ritorno in Italia, accompagnato dal figlio Jacques, ebbe l'opportunità di correggere gli errori che il tempo aveva recato alla sua meridiana in San Petronio. L'opera pubblicata nel 1695 è la relazione dei lavori eseguiti dallo scienziato, che fu coadiuvato dal matematico Domenico Guglielmini (1655-1710), autore della *“Memoria delle operazioni fatte, e delli strumenti adoptrati nell'ultima ristorazione della meridiana”*.

“La fin que l'Académie s'est proposée s'en appliquant aux observations astronomiques – scrive Cassini – à toujours été de les rapporter à l'avancement de la Géographie et de la Navigation; et dans ce dessein rien n'étoit plus utile que de déterminer quelle partie de la circonférence de la Terre répond précisément à un degré du Ciel”.

Tutte le misurazioni dell'arco di meridiano, a partire da quella di Picard si inquadrano in questo unico programma. E così pure tutti i viaggi, a cominciare da quelli di Picard a Uraniborg e di Jean Richer nell'isola di Cayenne, verranno compiuti per stabilire le differenze di longitudine dei luoghi, differenza calcolata attraverso le osservazioni delle eclissi dei satelliti di Giove.

“Le Roy – continua Cassini – ayant été informé de l'utilité qu'on avoit tirée de l'observation des Eclipses des Satellites de Jupiter pour établir les longitudes, ordonna que l'on fit par cette méthode de nouvelles Cartes de la France”.

Già nel 1659 Huygens aveva scoperto l'esistenza della forza centrifuga dovuta alla rotazione terrestre e aveva notato che agiva diversamente a seconda della latitudine: massima all'equatore e nulla ai poli. Come poteva non sortire un

effetto sulla forma della Terra? Sicuramente sotto l'azione di questa forza la forma della Terra sarebbe non una sfera ma un ellissoide.

Ne risultavano così due conseguenze che alimentarono le controversie tra gli scienziati dell'epoca:

- innanzitutto il meridiano non sarebbe stato una circonferenza ma un'ellisse e la verticale per un punto, perpendicolare all'ellisse non sarebbe passata per il centro della Terra, inoltre essendo la curvatura dell'ellisse diversa ai poli e all'equatore l'arco di meridiano corrispondente a un grado tra le due verticali sarebbe stato più piccolo all'equatore che ai poli.
- L'accelerazione di gravità g sarebbe dovuta essere più debole all'equatore che ai poli. Siccome la lunghezza di un pendolo che batte il secondo è proporzionale a g , il pendolo che batte il secondo deve essere più corto alle basse latitudini che alle alte.

Newton (1643-1727) aveva formulato la legge di gravitazione universale. Appena ebbe conoscenza della misura di Picard, nel 1682, riprese i suoi calcoli e pare sia rimasto stupito dell'accordo impressionante tra le osservazioni e la sua teoria. Sulla base dei dati sperimentali disponibili, tra i quali latitudine, lunghezza del pendolo in rapporto alla latitudine e misura del grado di meridiano, dimostrò che la figura della Terra è quella di uno sferoide schiacciato ai poli e rigonfio all'equatore, a causa del movimento di rotazione e della sua massa.

Osservò che se la Terra non avesse il suo movimento giornaliero, sarebbe perfettamente sferica a causa dell'uguale gravità in ogni sua parte. Proprio per la sua rotazione essa prende, a suo parere, una forma ellissoidale, inoltre anche la soluzione matematica delle equazioni della gravitazione universale portava a un ellissoide: solido ottenuto dalla rotazione completa di un'ellisse intorno a uno degli assi.

Newton cercò di calcolare l'appiattimento della Terra supponendola fluida e omogenea, trovando un appiattimento di circa $1/230$, mentre Huygens nel 1690 eseguì un nuovo calcolo dell'appiattimento e ottenne un valore di $1/578$. Huygens infatti non accettava l'idea di attrazione universale; pensava che la gravità non consistesse in una attrazione fra masse, ma in una reazione al movimento centrifugo. A grandi distanze dalla Terra, le due leggi di attrazione risultano pressoché identiche ma, avvicinandosi alla superficie terrestre, la differenza acquista importanza e lo si riscontra nei risultati del calcolo dell'appiattimento. Fu comunque merito di questi due scienziati la scoperta che la Terra fosse appiattita.



Christiaan Huygens

Si poneva ora il problema di verificare sperimentalmente le loro affermazioni. Nel 1672 Jean Richer, inviato dall'Académie a Cayenne, per effettuare delle osservazioni astronomiche scoprì che il suo orologio a pendolo, che batteva il secondo a Parigi, ritardava in vicinanza dell'equatore, egli scrisse: *“L'une des plus considérables observations que j'ay faites, est celle de la longueur du pendule à secondes de temps, laquelle s'est trouvée plus courte à Caienne qu'à Paris, car la mesme mesure qui avait esté marquée en ce lieu-là sur une verge de fer, suivant la longueur qui s'estoit trouvée nécessaire pour faire un pendule à secondes de temps, ayant été apportée en France, et comparée avec celle de Paris, leur différence a esté trouvée d'une ligne et un quart (2. 82mm), dont celle de Caienne est moindre que celle de Paris, laquelle est de 3 pieds 8 lignes 3/5 (116,85 cm). Cette observation a esté réitérée pendant dix mois entiers, où il ne s'est point passé de semaine qu'elle n'ait esté faite plusieurs fois avec beaucoup de soin”*.

Questo risultato avrebbe dovuto essere confermato dalla misura del grado alle estremità di un meridiano, ma l'arco misurato da Picard, era troppo corto per poter con esso stabilire l'appiattimento ai poli.

Colbert aveva incaricato l'Académie di tracciare una cartina della Francia, ma per fare ciò bisognava misurare l'arco di meridiano che attraversa la Francia intera da nord a sud, tra Dunkerque e Perpignan.

A questa grande opera si dedicarono i Cassini, tutti e tre membri dell'Académie: Jean-Dominique Cassini I, suo figlio Jacques Cassini II e suo nipote César-François Cassini de Thury (Cassini III). Le polemiche scoppiate in Francia tra newtoniani e cartesiani sulla figura della Terra portarono Cassini a fare varie misurazioni. L'idea fu quella di utilizzare misure di triangolazione geodetica effettuate a diverse latitudini. Tali lavori di triangolazione, intrapresi a partire dal 1683 verso nord da Gian Domenico Cassini e verso sud da La Hire (1640-1718) e interrotti nel 1683 alla morte di Colbert, ripresero nel 1700. Cassini, nel frattempo, aveva scritto un libro che aveva raggiunto una certa celebrità: *“Diatribes de figura telluris ellipticosphæroide”*, pubblicato a Strasbourg nel 1691.

Nel 1701, con l'aiuto del figlio Jacques (1677-1756), Cassini calcolò che la lunghezza di un arco di meridiano a distanza di un grado, cioè un grado medio tra Parigi e Bourges, era più piccola al nord che nel sud: la Terra sarebbe dunque allungata nel verso dell'asse di rotazione, anziché appiattita. Tra 1700 e il 1718 Cassini, Maraldi e La Hire prolungarono i lavori di triangolazione da Dunkerque a Collioure, ai piedi dei Pirenei. A partire dalle loro misure, che confermarono la diminuzione di lunghezza di un grado d'arco verso nord, Cassini confermò l'allungamento della Terra e si oppose tenacemente alle idee dei teorici: aveva inizio la disputa sulla forma della Terra.

Morto Gian Domenico nel 1712, Cassini figlio, detto Cassini II, succeduto al padre nella guida dell'Osservatorio, portando nel 1718 a termine le misurazioni dell'arco di meridiano fatte da Parigi fino ai Pirenei e da Parigi fino all'estremità

settentrionale della Francia, trovò che il grado medio di latitudine era di 57097 tese (111,282 km) a sud di Parigi e di 56960 tese (111,015) a nord. Se l'arco di meridiano diventava più corto andando a nord, Jacques Cassini vedeva confermata l'ipotesi che la figura della Terra non era quella di un ellissoide appiattito ai poli, come sostenuto da Newton e da Huygens, bensì era quella di un ellissoide allungato.



Carte de France corrigée par ordre du Roy sur les observations de M.rs de l'Académie des Sciences

La carta geografica mostra, rimarcandole con un tratto più scuro e ombreggiato, le correzioni effettuate, dopo le osservazioni astronomiche compiute tra il 1671 e il 1681 da Jean Picard, Gabriel Philippe de La Hire e Gian Domenico Cassini alla carta del *Royaume de France* del geografo Guillaume Sanson (1633-1703), pubblicata nel 1672. Alle pagine 429-430 del tomo dei *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* in cui è edita la carta, è stampata una nota che guida nella lettura della carta stessa. Il primo meridiano è fissato nel meridiano che passa per l'Osservatorio di Parigi, anziché nel meridiano dell'Isola di Ferro, come in uso nella cartografia dell'epoca.

Le nuove misurazioni, definite osservando per calcolare la differenza di longitudine dei luoghi i satelliti di Giove, comportarono la riduzione di circa un quinto della superficie totale fino a quel momento attribuita al regno di Francia, tanto che il re aveva commentato dicendo che gli erano costati più terre gli astronomi che la guerra dei 100 anni.

I Cassini, come tutta la comunità scientifica francese, erano cartesiani e sarebbero stati molto contenti di trovare un errore nei calcoli di Newton, errore che avrebbe gettato dubbi su tutta la sua teoria.

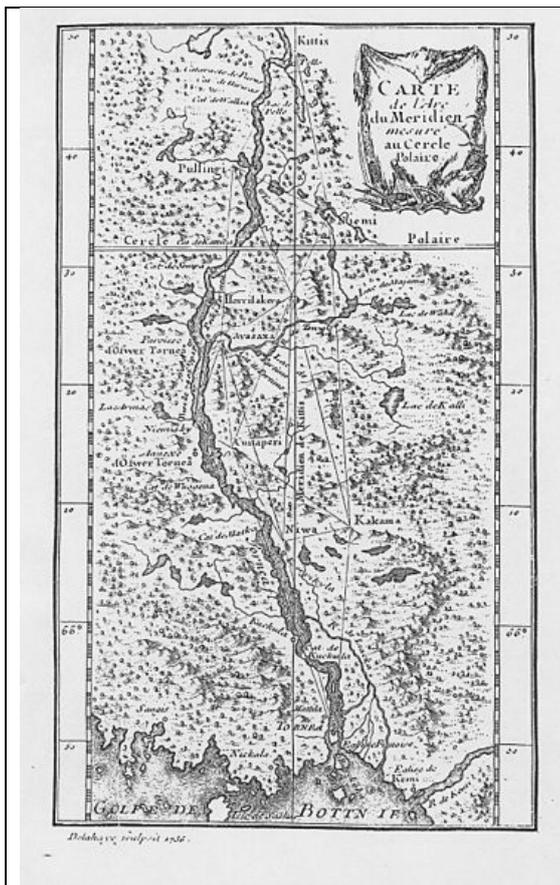
Per togliere i dubbi e far cessare la disputa, nel 1733, l'Académie Royale des Sciences decise di inviare, su ordine del re, due missioni geodetiche per misurare gli archi di meridiano a latitudini molto differenti, cosa che avrebbe dovuto

facilitare il confronto: una al Circolo Polare Artico nel 1736, l'altra all'Equatore, nel 1735 in Perù allo scopo di misurare l'arco di meridiano nei due paesi.

Scrive Biot: *“L'Académie ne se rebuta point: elle sentit que la question ne pouvait être nettement décidée qu'en mesurant deux arcs du méridien dans les régions de la terre où l'aplatissement doit produire entre les degrés des différences plus sensibles, c'est à dire près de l'équateur et près du pôle. Elle trouva parmi ses membres des hommes assez dévoués pour entreprendre ces pénibles voyages”*.

Maupertuis e La Condamine

La spedizione polare fu guidata da Pierre Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759). Matematico, astronomo, biologo, Maupertuis era un convinto sostenitore di Newton. Nel 1737 rientrava a Parigi dalla spedizione in Lapponia: le misurazioni effettuate dimostravano in maniera inequivocabile l'appiattimento polare del globo. Nel 1735 Maupertuis poté proclamare al ritorno dalla Lapponia che la Terra era effettivamente schiacciata ai poli e lo fece con tanto entusiasmo che Voltaire lo soprannominò “lo schiacciato della Terra”.



Carta della Lapponia



Pierre Louis Moreau de Maupertuis intraprese nel 1736 in Lapponia una spedizione che gli consentì di stabilire con esattezza lo schiacciamento della Terra ai poli, fatto che lo scienziato evidenzia col gesto della mano sinistra sul mappamondo (Museo di St. Malo).

Oltre a Maupertuis avevano partecipato all'impresa gli astronomi Alexis-Claude Clairault (1713-1765), Charles-Étienne-Louis Camus (1699-1768) e Pierre-Charles Le Monnier (1715-1799), tutti membri dell'Académie. Al loro arrivo in Svezia gli scienziati francesi furono affiancati dall'astronomo e fisico Anders

Celsius (1701-1744) – il celebre inventore del termometro centigrado – professore all'università di Uppsala. Curiosamente Maupertuis portò con sé anche due ragazze finlandesi. Riferì all'Accademia nel 1737. Con la spedizione e con l'avventuroso resoconto esposto in *Sur la figure de la Terre* (1738), ottenne grande fama, ma ne approfittò per attaccare pesantemente i suoi oppositori, in particolare Jacques Cassini, lasciando sorpresi persino i suoi amici.

L'appiattimento trovato, inteso come il rapporto tra la differenza tra i semiassi e il semiasse equatoriale, corrispondeva a $1/178$. Era evidente che le misure del meridiano francese dovevano essere errate. La missione in Lapponia non chiuse però il dibattito e i sostenitori dell'idea di una Terra allungata non vollero sentire ragioni. Nel 1740 Cassini, de Thury e La Caille effettuarono una nuova misurazione della meridiana francese e confermarono che la lunghezza di un arco di meridiano aumentava spostandosi verso nord.

Purtroppo però l'esattezza delle misurazioni pervenute dalla Lapponia non era ancora sufficiente per poter dare un valore corretto per l'appiattimento ($1/179$ oppure $1/298$). *“La faute n'en était à personne; on ne pouvait faire mieux alors”* scriveva Biot.

Nel 1735, dieci uomini si imbarcarono per il Perù: la spedizione, guidata da Louis Godin (1704-1760) astronomo, da Charles-Marie de la Condamine (1701-1774) matematico e da Pierre Bouguer astronomo, era partita da La Rochelle il 16 maggio per giungere il 29 maggio del 1736 a Quito, località all'epoca compresa nel territorio peruviano, scelta per l'inizio delle operazioni. L'impresa si rivelò subito difficilissima per le enormi difficoltà poste dal terreno montuoso: spesso le basi di rilevamento delle triangolazioni furono misurate tra scarpate, mentre gli strumenti usati per le rilevazioni furono smontati e rimontati in continuazione, cosa che rischiò di comprometterne il funzionamento, rendendo incerti i dati ottenuti. Bouguer inoltre si mostrò preoccupato dei possibili effetti determinati dall'attrazione gravitazionale delle montagne. A tutto ciò si aggiunse il fatto che i tre scienziati furono ben presto in disaccordo sui procedimenti rispettivamente usati e i loro rapporti personali si deteriorarono fino alla rottura. Rientrato per primo in patria nel giugno del 1744, Bouguer rese conto delle sue operazioni all'Académie Royale e cinque anni più tardi pubblicò i suoi risultati. Anche La Condamine rese pubblici i suoi rilevamenti e tra i due iniziò una penosa polemica, mentre Godin rientrato per ultimo, non scrisse nessuna relazione ufficiale. In ogni caso pur essendo le misure di grado prese all'equatore da ciascuno dei tre scienziati diverse di loro, esse presentano limiti di oscillazione entro un intervallo massimo di 60 tese, cioè di circa 117 metri. I risultati scientifici della spedizione erano comunque chiari: la Terra è un sferoide appiattito ai poli, come aveva ipotizzato Newton. La morte di Bouguer nel 1758 e di Godin nel 1760 mise fine alla diatriba tra di loro e la Condamine, grazie alle sue notevoli capacità di scrittore, beneficiò del credito della spedizione,

nonostante fosse meno dotato di Godin per l'astronomia e di Bouguer per la matematica.

Voltaire scriverà di loro: *“Héros de la physique, argonautes nouveaux, qui franchissez les monts, qui traversez les eaux, dont le travail immense et l'exacte mesure de la Terre étonné ont fixé la figure”*.

La storia di questa impresa è descritta nel libro di Robert Whitaker “La moglie del cartografo”, in cui viene descritto come i dieci componenti, guidati da tre dei più illustri scienziati dell'Accademia di Francia, scalarono montagne e vulcani, catalogarono piante e animali, navigarono lungo torrenti andini e fiumi amazzonici, scoprirono le virtù del caucciù e del platino, incontrarono tribù sperdute, tremarono, disperarono e purtroppo spesso morirono nel corso di dieci lunghissimi anni.



Charles-Marie de la Condamine nacque a Parigi nel 1701, studiò matematica e materie umanistiche al collegio Luis le Grand, fu nominato chimico aggiunto all'Academie des sciences nel 1730. Fu grande amico di Maupertuis. Morì a Parigi nel 1774.

Scrive la Condamine: *“Je me sentis effrayé à la vue des longs calculs qu'il me fallait entreprendre. J'avais une extreme répugnance pour un travail que le peu d'habitude rend pénible et rebutant quand on n'y est pas rompu”* (La Condamine, *Mésure de la méridienne au Pérou*, 1740).

I risultati riportati dalla spedizione in Perù, rientrata nel 1744, tolsero gli ultimi dubbi. Anche le misure geodetiche davano dunque ragione ai teorici: la Terra è appiattita. Apportarono anche un secondo risultato, ancora più fondamentale: l'appiattimento determinato, circa di 1/200, era più vicino al valore calcolato da Newton che a quello trovato da Huygens, confermando così la concezione di attrazione universale del primo a discapito della teoria del secondo. Il sistema di Newton era doppiamente vincitore: sia rispetto a chi parteggiava per l'allungamento terrestre, sia rispetto alle tesi di Huygens.

Cassini de Thury, che aveva continuato il lavoro del padre e del nonno riconobbe, nel 1740, che *“les degrés vont en diminuant en s'approchant de l'équateur, ce qui est favorable à l'hypothèse de l'aplatissement de la Terre vers les Pôles.”*

Alla scuola francese si deve sicuramente il merito del definitivo passaggio ad una cartografia scientifica ed ufficiale, non più realizzata da singoli studiosi, ma dagli stati. Dal 1625 al 1845 i Cassini portarono a termine la cartografia della Francia compilando 182 fogli in scala 1:86400.

Situazione prima della rivoluzione francese:

1550	Jean Fernel (1485/1558): 56746 tese.
1617	Willebrord van Royen Snellius (1580/1626): 55021 tese mediante triangolazione.
1634	Richard Norwood (1590/1675): 57300 tese.
1644	Jean-Baptiste Riccioli(1598/1671): 62900 tese.
1669	Abate Jean Picard (1620/1682): 57060 tese .
1683-1718	Cassini e Philippe de La Hire: 56960 tese.
1740	Le Monnier: 57183 tese.

Méchain e Delambre

L'ultima misurazione settecentesca dell'arco di meridiano di Parigi, da Dunkerque a Barcellona fu compiuta nel pieno della Rivoluzione francese da Pierre-François-André Méchain (1744-1804) e Jean-Baptiste-Joseph Delambre (1749-1822). Essa servì come base per determinare di un nuovo sistema di misurazione, quello metrico decimale.

La creazione di un sistema di misurazione standardizzato e condiviso da tutti era da tempo negli auspici della comunità scientifica. La Rivoluzione lo concretizzò.

L'idea che l'unità di misura universale fosse legata alla terra si faceva strada. L'8 maggio 1790, su proposta di Talleyrand, l'Assemblea costituente decretò che il re di Francia doveva invitare il governo inglese a far scegliere alla Royal Society di Londra il nome di alcuni scienziati inglesi che si sarebbero uniti a quelli scelti dall'Académie nello scopo comune di determinare un'unità di misura comune. La politica però decise in altro modo e i francesi lavorarono soli.

Nel 1791 l'Assemblea accordò 100000 livres all'Académie Royale des Sciences per finanziare il progetto, l'Académie nominò una *Commission des poids et des mesures*, composta da Jean-Charles Borda (1733-1799), Marie-Jean-Antoine-Nicolas de Caritat de Condorcet (1743-1794), Joseph Louis Lagrange (1736 - 1813), Pierre-Simon de Laplace (1749 - 1827) e Gaspard Monge (1746-1818).

Nel mese di agosto del 1793, i verbali dell'Académie riportano:

“Extrait du procès-verbal de la Convention nationale du 1er août 1793, l'an II de la République française: La Convention nationale convaincue que l'uniformité des poids et mesures est un des plus grands bienfaits qu'elle puisse offrir à tous les citoyens français. Après avoir entendu le rapport de son comité d'instruction publique sur les opérations qui ont été faites par l'Académie des sciences, d'après le décret du 8 mai 1790, déclare qu'elle est satisfaite du travail qui a déjà été effectué par l'Académie, sur le système des poids et mesures et qu'elle en adopte les résultats pour établir ce système dans toute la République sous la nomenclature du tableau annexé à la présente loi et pour l'offrir à toutes les nations.

En conséquence, la Convention nationale décrète ce qui suit.

Article 1er

Le nouveau système des poids et mesures fondé sur la mesure du méridien de la terre et la division décimale servira uniformément dans toute la République [...]”.

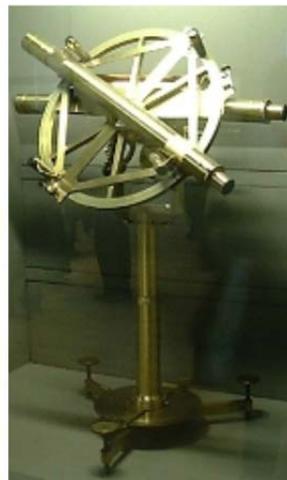
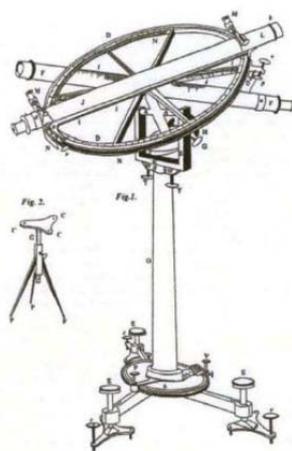
Il 28 Germinale 1795 la *Convenzione* della Francia rivoluzionaria, introducendo il sistema metrico decimale, stabilì quale unità di lunghezza e base di un nuovo sistema di unità di misura - detta *metro* - la decimilionesima parte del quadrante meridiano della Terra. Si decide dunque di ripetere le misure dell'arco di meridiano, vista la poca precisione delle misure precedenti e visto che gli strumenti nel frattempo erano stati perfezionati. L'introduzione del sistema metrico decimale fu decretata mentre erano in corso grandi operazioni di triangolazione, condotte in gran parte da Méchain e Delambre, che collegavano la Francia continentale con l'Inghilterra, la Spagna, le Baleari, la Corsica, la Toscana: queste operazioni giunsero a conclusione nei primi anni dell'800, ma la pazienza degli uomini della rivoluzione non poté sopportare l'attesa.

Infatti il valore provvisoriamente accettato fu poi leggermente modificato in base alle successive misure del grado di meridiano (fino ad allora misurato in tese) e nel 1799 la *Commission des poids et des mesures* in base ai calcoli elaborati sui risultati dell'impresa, fece costruire il regolo in platino denominato successivamente metro legale con decreto del 24 aprile 1799 in due esemplari, uno per l'Archivio ed uno per l'Osservatorio.



I due astronomi Pierre Méchain e Jean-Baptiste Delambre che condussero la spedizione, disponevano di:

- un metodo di misura: la triangolazione;
- un nuovo apparecchio per calcolare gli angoli: il cerchio ripetitore;
- il tracciato noto di un meridiano già studiato dai Cassini (Dunkerque-Perpignan-Barcelone).



Il cerchio ripetitore di Borda, con esso un angolo veniva misurato due volte

La loro missione era di percorrere il vecchio meridiano trovare lungo il suo percorso dei riferimenti geografici elevati, tramite essi tracciare dei triangoli utili per il calcolo della lunghezza del meridiano.

Méchain si occupò della parte sud del meridiano, da Rodez Barcellona, Delambre della parte nord, tra Dunkerque et Rodez. Una avventura che durerà 7 anni in mezzo alla rivoluzione francese.

Date fondamentali dell'impresa di Méchain e Delambre:

30 marzo 1791	L'Assemblea Nazionale decide la misurazione del meridiano come nascita del sistema metrico decimale.
Inizio 1792	Jean-Baptiste Delambre e Pierre Méchain sono incaricati di effettuare tale misura, Delambre parte verso nord il 24 giugno e Méchain verso la Catalogna.
1793	Malgrado il cambiamento di regime (Luigi XVI viene ghigliottinato il 21 gennaio), Delambre e Méchain. Continuano le loro misurazioni.
1794	Méchain finisce i suoi calcoli in Spagna e parte per l'Italia. Delambre porta il resoconto del suo lavoro a Orleans. Il metro provvisorio viene depositato negli Archivi nazionali il 17 marzo.
1795	Delambre effettua alcune misure a Bourges, poi a Dunkerque. Méchain si reca a Marsiglia e alla frontiera franco-spagnola. Il 25 giugno viene creato il "bureau des longitudes".
1796	Continuano le misurazioni, il 20 febbraio viene creato il "bureau des poids et mesures".
1797	Méchain si rifiuta di rientrare a Parigi e Delambre raggiunge Rodez per le ultime misurazioni.
1798	Fine delle misurazioni: i due astronomi si incontrano a Carcassonne. Il 28 novembre si riunisce la Commissione Internazionale incaricata di verificare i calcoli effettuati.
1799	Il 20 giugno vengono depositati Etalons negli archivi di Francia.

L'impresa si concluse solo nel 1799, dopo mille vicissitudini quali appunto la rivoluzione francese, dunque un contesto sociale e politico in movimento, la posta che non esisteva più, Delambre et Méchain spesso venivano presi per spie o per seguaci del re, visto che inizialmente avevano delle autorizzazioni firmate dal re, Méchain poi era stato vittima di un grave incidente, la maggior parte degli edifici utilizzati precedentemente per le misurazioni erano andati distrutti, le costruzioni provvisorie per effettuare le misure venivano per essere ben visibili dipinte in bianco, ma il bianco era anche il colore del drappello reale...

Delambre scriveva in Auvergne:

“On s'en prenait à notre signal. On lui attribuait les pluies continuelles qui, pendant près de deux mois, suspendirent toute culture dans ces montagnes. Plus d'une fois on voulut l'arracher. La place de celui d'Aubassin fut choisie par un temps horrible. La pluie et le brouillard empechaient de voir à trois pas. On ne put trouver aucun vestige de l'ancien signal. Il n'y avait pas beaucoup à choisir à Violent, tant la crete de la montagne est étroite.

De la ville de Salers, où nous étions arrivés par un temps pluvieux, le 20 prairial, nous vîmes Violent se couvrir deneige en un instant. Elle fondit le lendemain et rendit

l'accès de la montagne plus désagréable encore que difficile.

D'Aurillac à Montsalvy nous fumes accompagnés d'un orage des plus affreux. Nous cheminions dans le nuage même, à la lueur des éclairs et au bruit d'un tonnerre continu. (...) Le signal était une pyramide composée de quatre arbres de 3,667 toises de hauteur. La base n'avait que 0,333 toise de côté. La moitié supérieure était couverte de paille, la moitié inférieure était restée à jour, quoique j'eusse ordonné de la couvrir. C'est ce qui a rendu ce signal si difficile à apercevoir des stations de Bort, Aubassin et la Bastide... Dans l'impossibilité de placer l'instrument au centre, je l'en ai approché autant qu'il a été possible. (...) Au Puy Violent, la station la plus élevée, (1592m), la plus étroite, la plus difficilement accessible, et donc la plus inconfortable, l'angle entre Aubassin et Labastide est mesuré 84 fois. Entre Labastide et Montsalvy, 38 fois. A Labastide, l'angle entre Montsalvy et Aubassin l'est 58 fois. Et ce qui est plus remarquable encore, c'est que les diverses séries, mesurées en grades et converties en degrés différent assez peu".

Entre le signal de la Bastide et le clocher de Saint-Jean de Rieupeiroux.

20	1949378	9754689	=	87° 43' 19"24
D. et B. n° 1. 24 thermidor. Objets passables; vent très-incommode, qui nous a forcés d'interrompre pendant 3 ^h après le 4 ^e angle. Fini à 6 ^h $\frac{1}{2}$.				
20	19493955	975469775	=	87° 43' 22"07
D. et B. n° 1. 25 thermidor, 1 ^h . Objets passables d'abord, foibles vers la fin; beaucoup moins de vent.				
20	194938875	9754694375	=	87° 43' 20"98
26 thermidor, 3 ^h $\frac{1}{2}$. Objets beaux; ni vent ni soleil.				
On feroit mieux de s'en tenir au milieu entre les deux dernières séries; l'angle augmenteroit de 0"86.				
Les 60				87° 43' 20"76
				+ 2"44
Horizon				87° 43' 23"20

Entre Saint-Jean de Rieupeiroux et Rodez.

40	1520542725	385010678125	=	34° 12' 34"6
D. et B n° 1. 26 thermidor, 2 ^h $\frac{1}{2}$. Ni vent ni soleil. Objets bien visibles pendant les 20 premiers angles; un peu foibles pendant le reste de la série.				
Les 20 premiers	3850109		=	34° 12' 35"3
20	76052175	385010875	=	34° 12' 35"2
D. et B n° 1. Ni vent ni soleil. Saint-Jean beau, Rodez passable.				
Les 60	2280564475	385010745833	=	34° 12' 34"82
				+ 0"75
Horizon				34° 12' 36"05
Je m'en tiens aux 20 premiers angles, confirmés par les 20 derniers.				

La storia di tale impresa è narrata nel libro "Il meridiano - ovvero come due astronomi stabilirono la misura di tutte le cose" di Denis Guedj.

La misura ottenuta da Delambre et Méchain era di 551584.7 tese, quella stabilita nel 1980 era l'equivalente di 551589.3 tese, dunque con uno scarto di $5 \cdot 10^{-6}$. Una volta creato il metro, costruito in platino, per familiarizzare la popolazione con la nuova unità di misura a Parigi fu tracciato il metro su alcuni edifici in marmo.



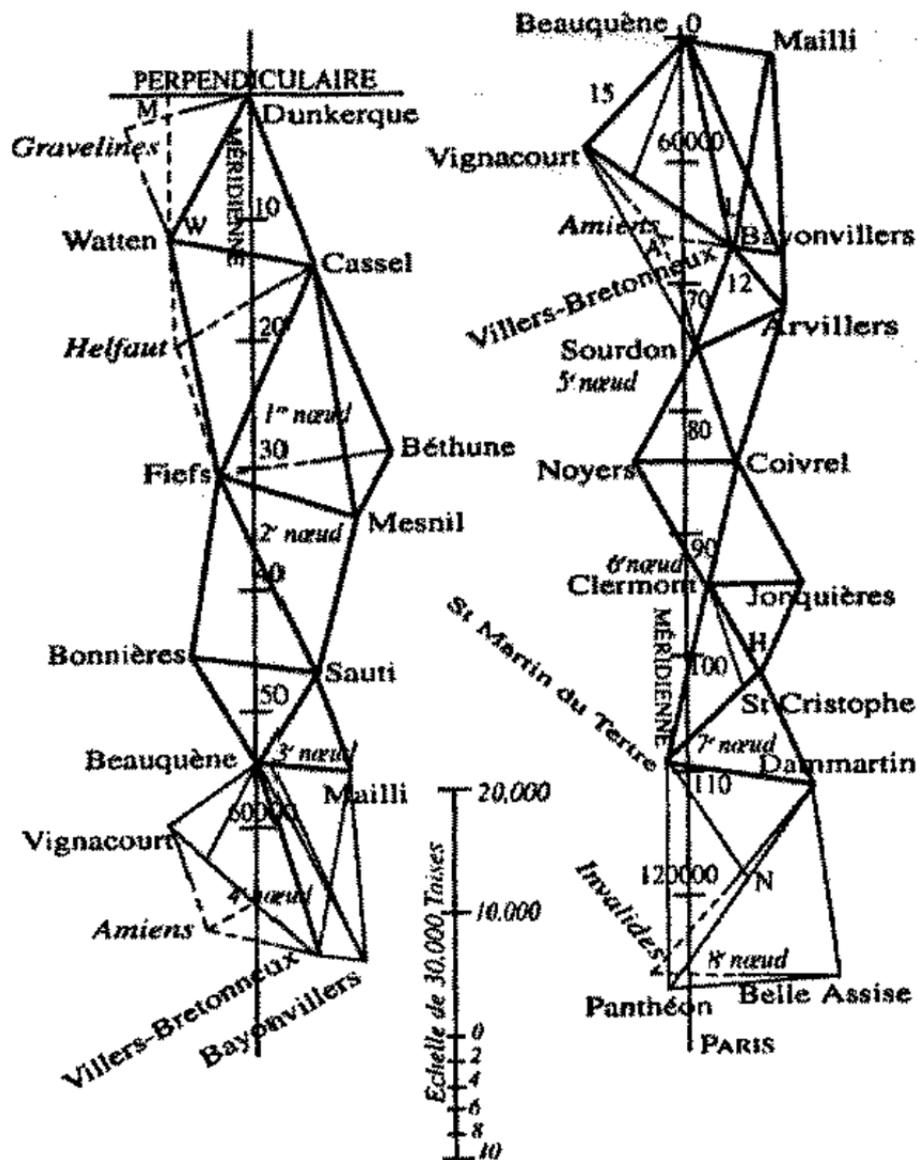
Le altre unità di misura facevano riferimento al metro:

1 litro	Capacità di un cubo di un decimetro di lato.
1 kilogrammo	Peso di un decimetro cubo di acqua distillata.
1 franco	5 grammi di argento pesato nel suo stato di massima densità.

Avviso del 4 novembre 1800: *“le système décimal des poids et mesures sera définitivement mis à exécution pour toute la République, à compter du 1er vendémiaire an X (23 septembre 1801)”*.

È noto tuttavia l'errore compiuto da Méchain nelle sue rilevazioni, un errore di 3'' sulla latitudine di Barcellona. Più tardi il 26 aprile del 1803 Méchain riuscì a ripartire per una nuova missione finalizzata al prolungamento dell'arco di meridiano da Barcellona fino alle Baleari, ma morì di febbre gialla nel 1804.

La triangolazione tra Dunkerque e Barcellona ha comportato la risoluzione di 90 triangoli; sono state effettuate 500000 misure di angoli; la stima fatta nel 1980 (misura effettuata da satelliti) della distance Dunkerque-Barcelone differisce dal valore ottenuto da Delambre e Méchain di 10 metri cioè con un errore inferiore allo 0,001%.



Ultima fase di questa impresa fu appunto la decisione di prolungare le misurazioni del meridiano di Francia fino alle Baleari, Méchain si dichiarò disponibile ma fu colpito dalla febbre gialla, vennero pertanto incaricati due giovani astronomi: Arago e Biot.

Scrive Biot: *“Mais pour connaître la configuration réelle du sphéroïde terrestre, il faut mesurer sa courbure non-seulement dans la direction de ses méridiens, mais aussi dans le sens des arcs parallèles à l'équateur qui croisent ces premiers à angle droit”*.

Così alla fine del 1823 era stato misurato l'arco di parallelo da Bordeaux a Fiume, e nel 1824, il Bureau des longitudes incaricò Biot di misurare il valore di g su quell'arco.

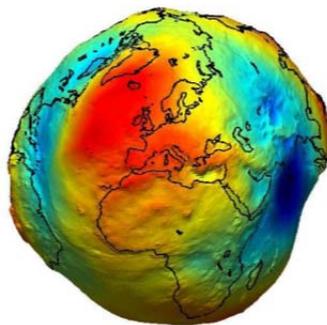
Egli trovò delle irregolarità notevoli: *“dont la réalité est incontestable, puisqu'elles excèdent de beaucoup les erreurs que l'on pourrait attribuer aux observations”*.

Le sue osservazioni mostrarono inequivocabilmente *“que la figure de la Terre est beaucoup plus compliquée qu'on ne l'avait cru d'abord.”*

Fu tuttavia solo verso la metà dell'Ottocento che il sistema metrico decimale venne adottato prima in Francia e poi nelle altre nazioni. Negli ultimi decenni del Settecento gli strumenti, le tecniche di misurazione e la caratteristica passione dell'età dei lumi per la raccolta dei dati resero disponibile una grande quantità d'informazioni sistematiche sul mondo, che i geografi iniziarono a integrare in una descrizione organica del globo terrestre.

Il 14 ottobre 1960 l'XI Conférence Générale des Poids et des Mesures ha stabilito come campione operativo la lunghezza d'onda nel vuoto della riga rossa del kripton 86, cioè dell'isotopo del kripton avente numero di massa 86, il metro viene definito come 1.650.763,73 volte tale lunghezza. Siccome le misure di massima precisione sono quelle interferenziali, basate sull'interferenza delle onde elettromagnetiche, si è ritenuto infatti opportuno assumere come campione una lunghezza d'onda. In pratica il valore del metro non cambia, però il nuovo campione può essere trasferito, interferometricamente, con la precisione di un milionesimo di milionesimo di millimetro.

Nel 1799 Pierre Simon Laplace (1749-1827) dimostrò nel "Traité de mécanique céleste" che l'ellissoide non corrisponde esattamente alla forma reale della terra, che ha invece una forma irregolare. Tale scoperta fu sviluppata in seguito definendo una superficie di riferimento costituita dalla superficie libera dei mari e dal suo prolungamento ideale sotto i continenti. Nel 1849 George Gabriel Stokes (1819-1903) dimostrò la possibilità di determinare la forma di tale superficie a partire da sole misurazioni di gravità. Essa fu chiamata geode nel 1873 da Johann Benedict Listing (1808-1882) e da allora l'ellissoide di rotazione che meglio vi si adatta per parametri dimensionali e per orientamento fu considerata solo una superficie di riferimento.



Un modello di geode.

Nel 1841 Federico Bessel (1784-1846), concludendo l'elaborazione di tutte le misure del grado effettuate fino ad allora, fissò l'ellissoide di rotazione terrestre dando i valori 6376,83 km per il semiasse maggiore e 6355,10 per quello minore. Nonostante le successive determinazioni della lunghezza della circonferenza terrestre, il valore del metro è stato lasciato invariato, restando definito come la lunghezza del campione conservato a Parigi.



Fiedrich Wilhelm Bessel

Quanto all'appiattimento Bessel, nel 1840, e Faye, nel 1880, trovarono rispettivamente i valori di $1/299$ e di $1/292$. Altre misurazioni furono effettuate in seguito e portarono alla determinazione sempre più precisa dell'indice di appiattimento terrestre e della lunghezza del meridiano terrestre, ma solo con l'impiego di sonde spaziali si è potuto affinare ancora queste misure. Oggi, il meridiano "medio" è lungo 40.009,152 km, il semiasse maggiore (Nord) 6.378,388 km e quello minore (Sud) 6.356,912 km. Il valore di appiattimento ritenuto attualmente valido è $1/298,25$.

Bibliografia e sitografia

C. B. Boyer, *Storia della matematica*, Mondadori, Milano, 2001

A. Schiavi, *Vademecum cartografico*, V&P Università, Milano, 2002

<http://www.academie-sciences.fr/activite/lettres/lettres16.pdf>

<http://www.geometrie.tuwien.ac.at/karto/index.html#14>

http://www.leganavale.it/portale/cultnaut_lez5.asp

<http://www2.unibo.it/musei-universitari/PercorsoNS/indice1.htm>

<http://www-gap.dcs.st-and.ac.uk/~history/>

[\[lyon.fr/LesCours/physique/AppPhysique/approphys/9Math&Phys/metro/EU_a_ppro_Besson_Beyerle_Bodin_metrologie/Delambre_Mechain.html\]\(http://eurinsa.insa-lyon.fr/LesCours/physique/AppPhysique/approphys/9Math&Phys/metro/EU_a_ppro_Besson_Beyerle_Bodin_metrologie/Delambre_Mechain.html\)](http://eurinsa.insa-</p></div><div data-bbox=)

<http://www.iesperemaria.com/Valencia/Organitzacio/Depts/FisQuim/Astrofisica/astro/index.htm>

<http://www.isima.fr/vbarra/fr/adasta/meridien/>

<http://www.isima.fr/~vbarra/IMG/pdf/presentation.pdf>

http://www.nauticoartiglio.lu.it/SA_CD2002/stelle/eratostene/gloss/index.html

<http://digilander.libero.it/diogenes99/Cartografia/Cartografia01.htm>

<http://web.unife.it/progetti/matematicainsieme/matcart/appiat.htm>

