

# Určování tvaru a rozměru Země.

Starověk. Středověká určení tvaru a rozměru Země. Stupňová měření.

Tomáš Bayer | bayertom@natur.cuni.cz

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie, Přírodovědecká fakulta UK.

# Obsah přednášky

- 1 Starověk
- 2 První měření rozměrů Země
- 3 Středověká měření rozměru Země
- 4 Stupňová měření
- 5 Pokročilé názory na tvar a rozměry Země
  - Stupňová měření v Laponsku
  - Stupňová měření v Peru
- 6 Další významná stupňová měření

# 1. Prvotní představy o tvaru Země

Závisely na vzdělanosti, vyspělosti matematiky / astronomie.

Doba před-antická: nezachovaly se žádné písemné pozůstatky.

Prvotní zmínky z období antiky (1000 př. n. l.)

*Homér (? , básník, cca. 800 př. n. l.), eposy:*

Země kulatý kotouč plovoucí ve vodě.

Nebe jako půl sféra.

Tento obraz přetrval do 6. stol. př. n. l.

*Thalés z Milétu (624-548? př. n. l.), filosof, astronom*

Předpoklad sférického tvaru (nejsou písemné důkazy).

*Pythagoras (? , 495), filozof, matematik, astronom, Thaletův žák.*

Vše v přírodě dokonalé a harmonické  $\Rightarrow$  koule

Země je dokonalá, tedy kulatá.

Žádné důkazy, nepotvrzeno měření.

## 2. Anaximandros z Miletu (610-546 p.n.l)

Země má tvar válce.

*„Země se volně vznáší nejsouc ničím poutána a udržuje se, poněvadž je odevšad stejně vzdálena. Její tvar je okrouhlý, oblý, podobný kamennému sloupu. Na jedné straně z obou rovin chodíme, druhá pak leží naproti.*

Určil i relativní rozměr: výška je  $\frac{1}{3}$  šíře.

Empirická pozorování:

- Při odplutí lodi zmizel trup, paluba, stěžně, při příplutí naopak.
- Námořníci viděli hory, svahy, pobřeží přístav.

V rozporu s Anaximandrovým názorem, nežijeme na podstavách, ale na plášti.

Tento fakt nebylo možné logicky zdůvodnit: proč voda neodteče a vše z povrchu nepadne?



### 3. Aristoteles: důkazy kulatosti

Aristoteles (384-322 p.n.l.), filozof.

První tvrzení o tvaru Země podpořené důkazy.

Všiml si, že hvězdy viditelné v Egyptě a na Kypru nejsou viditelné v Řecku.

Toto se platí pouze na zakřiveném povrchu

Astronomická/meteorologická pozorování:

- *Zatmění Slunce*

Při zatmění Měsíce (Země mezi Sluncem a měsícem) vrhá Země kruhový stín.  
Platí nezávisle na natočení Země vůči Měsíci.

- *Pozorování Polárky*

Při plavbě z Řecka do Egypta: Polárka klesá směrem k obzoru a naopak.  
Potvrdil Pytheas (380-310): plavba Marseille-Island (směr k Polárce).

- *Řídnutí vzduchu s výškou*

Každá "částice" na Zemi má snahu se shlukovat se k centru Země na základě své hustoty.

Moře, které omývá Řecko, omývá Afriku i Indii  $\Rightarrow$  Kryštof Kolumbus.

Obvod Země odhadl na 300 000 stádií (50 000km).

## 4. Eratosthénés z Kyrény (276-195 p.n.l)

Člen Alexandrijské akademie, správce alexandrijské knihovny.

Zastával teorii kulatosti Země.

Autor první mapy Nilu a známého světa.

Sbíral informace o cizích krajích od vůdců karavan.

V Asuánu zvláštní úkaz, 21. června předměty nevrhají stín, slunce svítí do studní.

Paprsky Slunce v Asuánu totožné se svislicí.

Na sever ani na jih k tomuto jevu nedochází.

Předpoklady:

- Slunce je tak vzdálené, že jeho paprsky jsou rovnoběžné.
- V Alexandrii i Asuánu paprsky dopadají pod jiným úhlem.
- Asuán i Alexandrie leží na stejném poledníku,

Při známé vzdálenosti obou měst lze určit vzdálenost.

Provedl první “astronomické” měření pro určení tvaru Země.

## 5. Princip měření

Úhel  $\alpha = 0$  mezi svislým směrem a poloměrem  $R$  v Asuánu 21. června.  
V Alexandrii  $\alpha$  odpovídá středovému úhlu,

$$R = \frac{s}{\alpha},$$

kde  $s$  vzdálenost mezi oběma městy.

Pro měření úhlu  $\alpha$  použil přístroj *skafé*.

Upravené kamenné sluneční hodiny ( není historicky potvrzeno).

Autorem Aristarchos ze Samu (310?-230 p.n.l, heliocentrická teorie).

Naplněna vodou pro urovnání do vodorovného směru.

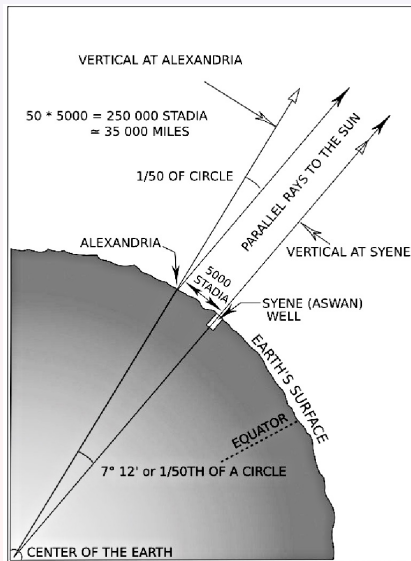
Měření vzdálenosti pomocí délky doby chodu velbloudí karavany.

Údaje se dlouhodobě shromažďovaly v Alexandrii pro obchodní účely.

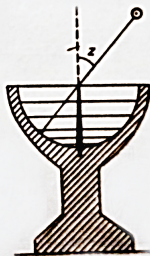
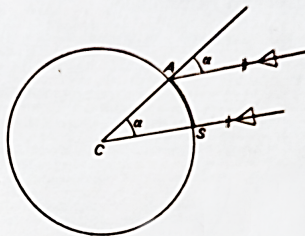
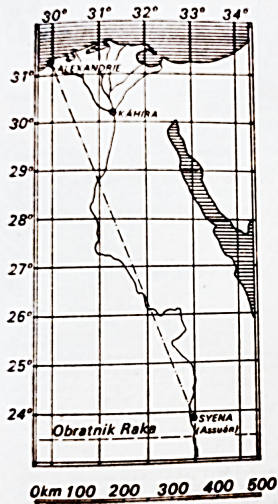
Měření provedeno současně v Asuánu i Alexandrii (datum se nedochovalo).

Při výpočtu inspirován poznatký Pythagora.

## 6. Princip měření



## 7. Znázornění situace



## 8. Dosažené výsledky

Úhel  $\alpha = 1/50$  z obvodu kruhu (tj. z  $2\pi$ )  $\approx 7.2^\circ$ .

Obvod Země 50 x větší než vzdálenost Asuán-Alexandria.

Vzdálenost Asuán-Alexandria 500 stádií.

Celkový obvod Země:  $o = 25000$  stádií.

Poloměr Země

$$R = \frac{1}{2} \frac{o}{3 + \frac{1}{7}},$$

kde  $\pi \doteq 3 + 1/7$  objevil Pythagoras.

Pokud stádíe 172 m, pak  $R = 6844$  km (chyba 7.3%).

Na svou dobu velmi přesný výsledek.

## 9. Interpretace výsledků

Výsledek souhrou náhod:

- Definice stádie se lišila.
- Asuán i Alexandrie neleží na jednom poledníku.
- Země není dokonalou koulí.
- Obě místa mají různou nadmořskou výška.
- Vzdálenost určená z chodu karavany pouze přibližná.
- Zním pouze odhad čísla  $\pi$ .

1 řecká stádie:

*“Vzdálenost, kterou prošel běžným krokem člověk od okamžiku, kdy se na horizontu objevil horní okraj Slunce, do okamžiku, kdy vyšlo celé Slunce.”*

Odhady v literatuře 158-185 m, střední hodnota 172 m.

Eratosthenes = první geodet starověku.

Poté, co oslepl, zvolil smrt hladem.

## 10. Poseidónios z Apemeie (135-51 př. n. l.)

Pokusil se ověřit Eratosthénovy výsledky.

Všiml si, že na ostrově Rhodos hvězda Canopus leží přímo na mořském horizontu.

V Alexandrii se hvězda nacházela nad obzorem.

Vzdálenost obou míst lze snadno určit dle délky plavby obchodní lodi.

Obvod určen podobným způsobem jako v předchozím případě:

*První měření:*

Úhel  $\alpha = 1/48$  obvodu kruhu  $\doteq 7.5^\circ$  (chyba, má být  $5.14^\circ$ ).

Vzdálenost 5000 stádií (chyba, má být 3400 stádií).

Obvod 240000 stádií,  $\approx 6570$  km.

*Druhé měření:*

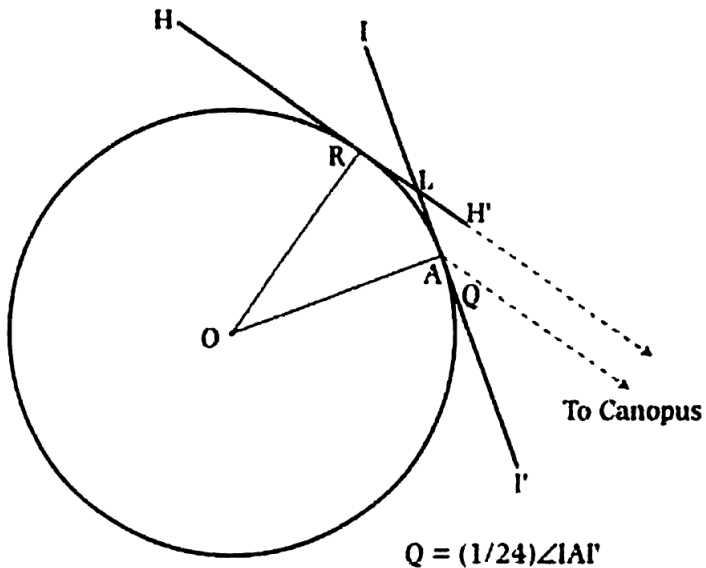
Uvědomil si chybu, “oprava měření”

Obvod 180000 stádií,  $\approx 5300$  km.

Převzato Ptolemaiem, použito i Kolumbem, vydrželo 1700 let!



## 11. Poseidónios: princip měření



## 12. Stav v 1. tisíciletí n. l.

Alexandrijská knihovna: centrum vědění, největší knihovna starověku (>700 000) svitků.

48. n. l. Cesar dobyl Alexandrii: částečný požár.

Další poboření 270 n. l. (Aurelián), 389 n. l. (Theodosius, křesťanství), 642 n. l. (Al Mamun).

Bouřlivé období, rozpad Římské říše:

- *Západořímská říše* (Řím),  
Zánik 476 n. l.: dobytí Říma germánskými kmeny (Odoaker)  $\Rightarrow$  rozpad.
- *Východořímská říše* (Konstantinopol):  
Zánik 1453, dobytí Konstantinopole (Mehmed II).

Jižní Evropa, přední Asie (Španělsko-Pákistán): muslimský chalífát.

Dobytí Alexandrie Araby (642): ukořistění originálů matematických spisů.

Velký rozvoj matematiky a geometrie v arabském světě.

Naopak úpadek v křesťanském světě (Dark Ages).

Vyrovnnání až v období renesance.

## 13. Stupňové měření v Číně

Kolem roku 724, astronomové I-Hsing a Nankung Yueh.

Měření délky poledníku  $\lambda = 114^\circ$  s využitím gnómónu.

Celková délka úseku poledníku  $\Delta\varphi = 34^\circ$ .

Použita rozsáhlá síť gnómónů, pravidelně uspořádány.

Měření prováděno opakovaně v době letního/zimního slunovratu.

Gnómony nebyly uspořádány ve směru poledníku.

Avšak mohly z nich být určeny rozdíly v zeměpisných šířkách.

Přibližná délka  $1^\circ \approx 157$  km.

Měření nebylo příliš přesné, chyba cca 42%.

# 14. Ukázka stupňového měření v Číně

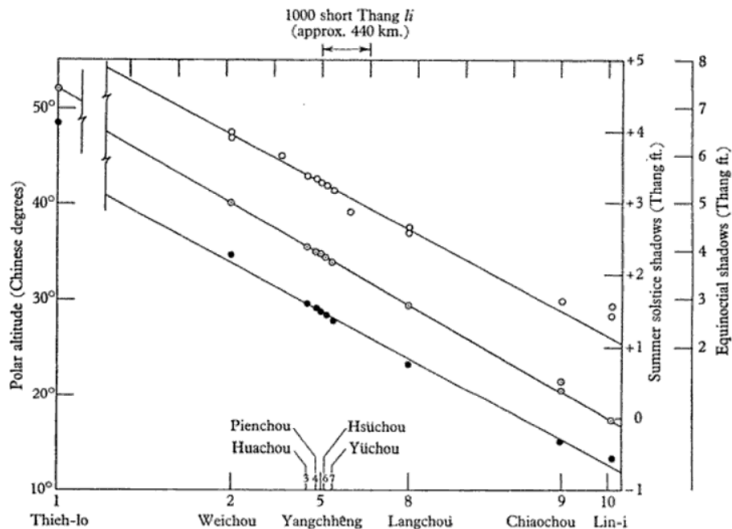


Fig. 289. Data of the meridian arc observations organised by I-Hsing and Nankung Yüeh (+724 to +726), in graphical form. Key: ⊙, polar altitude; ●, summer solstice shadow-length; ○, equinoctial shadow-length.

# 15. První stupňové měření

Kalif Abbasid Al-Mamun (827 n. l.): příkaz k určení rozměru Země.

Zájem o geografii: velikost říše, směr k Mekce.

Provedením pověřen astronom Habash al Hasib.

Určení délky poledníkového oblouku  $1^\circ$ , rozšíření Eratosthénových měření.

2 týmy astronomů a měřičů (Sinjar u Mosulu), poušť.

Měření úhlu na Slunce v poledne.

Následně přesun: 1. tým S, 2. tým J, dokud rozdíl v úhlu nebyl  $1^\circ$ .

Při pochodu umístovány značky, následně přesné měření délky provazci (25m).

Výsledkem průměr z obou měření (dílčí výsledky se zřejmě nedochovaly).

Délka  $1^\circ$ , poledníku:  $56\frac{2}{3}$  arabské míle  $\approx 111.815$  km.

Obvod Země: 40 253 280 km.

Měření svou přesností překonal až Tycho de Brahe.

## 16. Trigonometrická metoda

Autor Abú Rajhán Muhammad ibn Ahmad Bírúní (973-1048).

Nejvýznamnější středověký perský geograf, kartograf, matematik (Buchara).

Autor globulárního zobrazení (dnes známé jako Nicolosiho)

Studoval učení řeckých / arabských předchůdců, kritický k Ptolemaiovi.

Navrhl vlastní metodu založenou na trigonometrii.

Řešení vztahů v trojúhelníku.

Kombinace měření úhlů a vzdáleností.

Astronomická měření: astroláb (zenitové úhly).

Měření vzdáleností: arabská míle, krokováno.

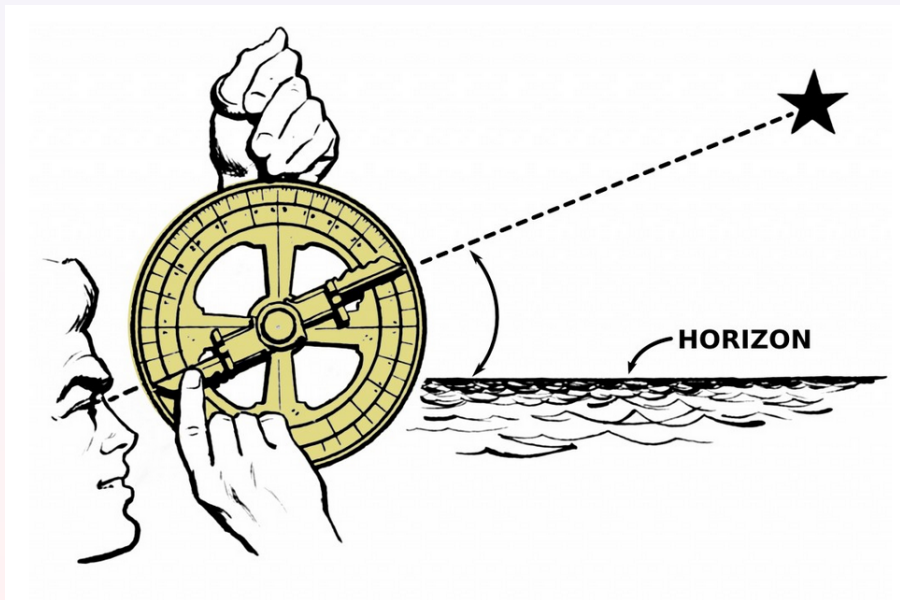
Terén: území dnešního Pákistánu.

Na svou dobu pokročilá metoda, předběhl svět o 800 let.

## 17. Astroláb: ukázka

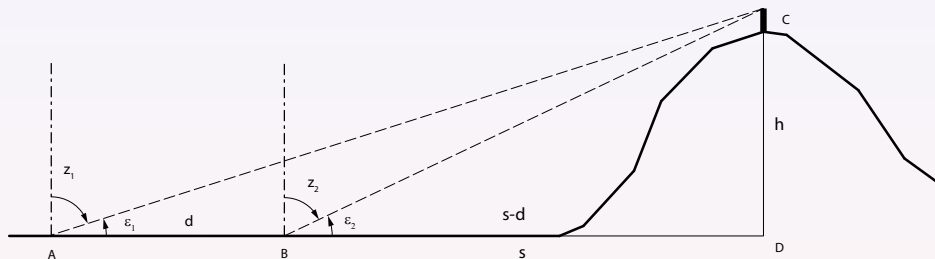


## 18. Astroláb, princip měření





# 19. Princip měření: Fáze 1

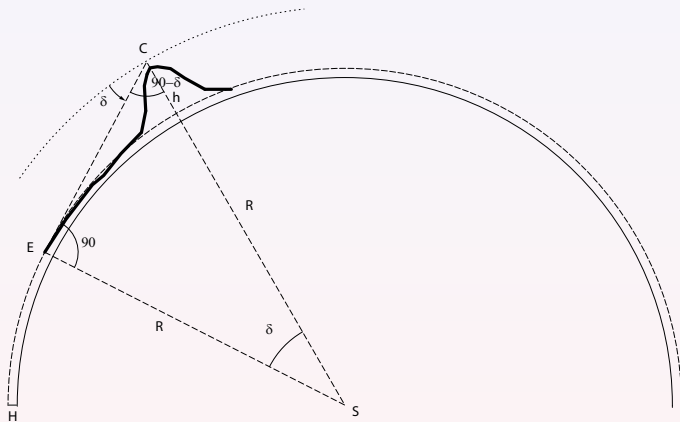


$$\tan \varepsilon_1 = \frac{h}{s}, \quad \tan \varepsilon_2 = \frac{h}{s-d} \Rightarrow s = \frac{h}{\tan \varepsilon_1} \quad s-d = \frac{h}{\tan \varepsilon_2}.$$

Po dosazení

$$\frac{h}{\tan \varepsilon_1} - d = \frac{h}{\tan \varepsilon_2} \Rightarrow h \tan \varepsilon_2 - d \tan \varepsilon_1 \tan \varepsilon_2 = h \tan \varepsilon_1,$$
$$h = \frac{d \tan \varepsilon_1 \tan \varepsilon_2}{\tan \varepsilon_1 - \tan \varepsilon_2}.$$

## 20. Princip měření: Fáze 2



$$\cos \delta = \frac{R + H}{R + H + h}, \Rightarrow R = \frac{h \cos \delta}{1 - \cos \delta}, \quad H = 0.$$

Vztah odvozen Al Biruním, Měření 1027?, Nandana, Pákistán.

## 21. Výsledky měření

Výška hory  $h = 625.05$  arabských loktů.

Úhel  $90 - \delta = 89^\circ 26'$ .

$$h = 625.05$$

$$\text{delta} = 90 - (89 + 26/60);$$

$$\text{deltar} = \text{delta} * \pi / 180;$$

$$Rl = (h * \cos(\text{deltar}) / (1 - \cos(\text{deltar})))$$

1 arabská míle = 4000 arabských loktů.

1 arabský loket: 0.4933m

$$Rm = 0.52 * Rl = 6304\text{km}$$

Přesnost určení 1.2%.

Obdivuhodný výkon na svoji dobu, zanedbání nadmořské výšky  $H$ .

## 22. Další vývoj ve středověku

Z období středověku nejsou informace o dalším měření.

Z antických spisů se zachoval pouze zlomek.

Křesťanství nepřálo přírodním vědám.

Země plochá deska plující v moři (do 15. stol).

Sférický tvar Země (pouze jednotlivci):

*Beda Venerabilis (672-735)*

Spis "De Temporum Ratione".

Jeden z nejdůležitějších astronomických spisů středověku: pohyb Slunce, Měsíce, příliv, odliv.

*Roger Bacon (1214-1294):*

Stanovil přibližné vzdálenosti ke hvězdám.

*Paolo Toscanelli (1397-1482):*

Inspirace Poseidoniem, západní cesta do Indie.

Korespondence s Kolumbem, špatný rozměr Země  $\Rightarrow$  záměna Amerika  $\Leftrightarrow$  Indie.

*Martin Behaim (1459-1507):*

První dochovaný glóbus (Erdapfel), rodák z Českého Krumlova.

## 23. Fernelovo stupňové měření

První měření poloměru Země cca 500 letech.

Autorem Jean Francois Fernel (1497-1558), význačný lékař.

Měřil výšku slunce v Colleege de Sainte-Barbe (1525).

Propočtl jeho pozici o  $1^\circ$  severněji  $\Rightarrow$  Amiens.

Měřena délka  $1^\circ$  poledníku Paříž-Amiens.

Nepoužita žádná geodetická metoda.

Na kolo kočáru namontováno zařízení, po otočce kola rozeznělo zvonek.

Celkem 17 024 zazvonění  $\Rightarrow$  68 italských mil a  $95 + 1/4$  kroku.

Odpovídá 56 746 francouzským sáhům (toises) a 4 stopám.

Pak  $1^\circ \approx 110.69$  km,  $R = 6342$  km (Odchylka 0.6%) .

V literatuře: 57070 toises,  $R = 6373$  km, odchylka 0.1%.

Přesný výsledek v podstatě dílem náhody.

## 24. Colleege de Sainte-Barbe: současný stav



## 25. Gemma Frisius (1508-1555)

Holandský matematik, kartograf filozof.

V kontaktu s významnými osobnostmi tehdejšího světa:

Franciscus Monachus, Tycho de Brahe, Gerardus Mercator (1. žák).

Autor řady glóbů.

Pravděpodobně spoluautor Mercatorova zobrazení.

1533 Stěžejní dílo "*Cosmographica*".

Představuje myšlenku triangulace: měření dlouhých vzdáleností pomocí trojúhelníkových řetězců.

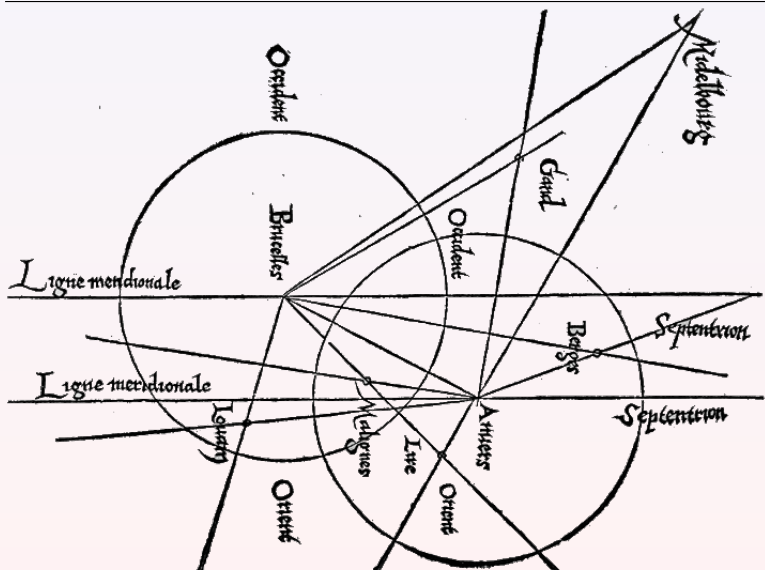
Poprvé použita Brahem (1579) pro měření ostrovu Hven.

Metoda měla obrovský přínos pro geodézii.

Dodnes používána.

Údajně použita Tadeášem Hájkem z Hájku při mapování okolí Prahy.

## 26. Frisiova skica triangulace





## 27. První použití triangulace

Wilebrord Snellius (1580-1626).

Spojení měst Bergen op Zoop a Alkmaar trojúhelníkovými řetězci.

Autor prvního funkčního teodolitu (Quadrant).

Kruh s průměrem 1.1 m.

V trojúhelnících měřeny všechny úhly.

Vzdálenost 327.85 m měřena na jedné základně dřevěnými latěmi.

Následně přidány 4 další.

Délka latě: 3.766m  $\equiv$  1 rýnský rut.

*Výsledky:*

Celková délka oblouku: 127.78 km, rozdíl zem. šířek:  $1^{\circ}11'30''$ .

Délka poledníkového oblouku: 107.338 km.

Poloměr Země:  $R = 6127$  km (překvapivě málo přesné).

## 28. Snellius měření poledníkového oblouku

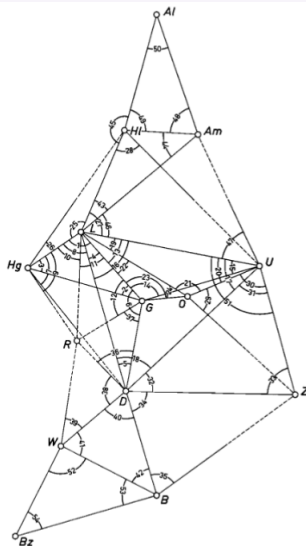


## 29. Ukázka Quadrantu



# 30. Snellius, měřené úhly

|    | °   | '  |    | °   | '  |
|----|-----|----|----|-----|----|
| 1  | 97  | 11 | 28 | 68  | 04 |
| 2  | 32  | 25 | 29 | 65  | 25 |
| 3  | 50  | 23 | 30 | 82  | 31 |
| 4  | 25  | 49 | 31 | 62  | 13 |
| 5  | 25  | 50 | 32 | 44  | 20 |
| 6  | 128 | 22 | 33 | 73  | 29 |
| 7  | 85  | 51 | 34 | 72  | 15 |
| 8  | 71  | 31 | 35 | 70  | 14 |
| 9  | 90  | 18 | 36 | 54  | 12 |
| 10 | 53  | 40 | 37 | 48  | 15 |
| 11 | 43  | 36 | 38 | 86  | 19 |
| 12 | 80  | 00 | 39 | 41  | 10 |
| 13 | 37  | 40 | 40 | 66  | 11 |
| 14 | 114 | 48 | 41 | 67  | 51 |
| 15 | 27  | 32 | 42 | 45  | 59 |
| 16 | 63  | 26 | 43 | 27  | 11 |
| 17 | 54  | 08 | 44 | 43  | 18 |
| 18 | 62  | 28 | 45 | 172 | 11 |
| 19 | 20  | 26 | 46 | 50  | 38 |
| 20 | 33  | 53 | 47 | 54  | 00 |
| 21 | 125 | 43 | 48 | 67  | 45 |
| 22 | 17  | 23 | 49 | 77  | 55 |
| 23 | 125 | 42 | 50 | 34  | 22 |
| 24 | 36  | 53 | 51 | 116 | 23 |
| 25 | 147 | 19 | 52 | 89  | 25 |
| 26 | 20  | 45 | 53 | 43  | 24 |
| 27 | 77  | 50 | 54 | 47  | 15 |



## 31. Druhé Sneliovo měření

Prováděno v roce 1622 mezi městy Leyde a La Haye.

Opět měřeny všechny úhly + 2 vzdálenosti.

V průběhu prací Snellius zemřel (35 let).

Práce dokončil po cca 100 letech Pieter van Musschenbroek.

Zejména výpočetní část.

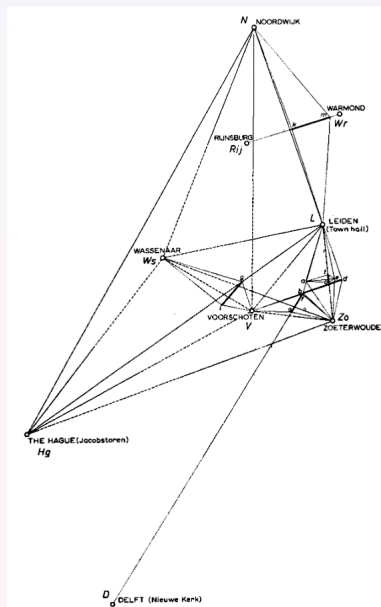
Celková délka oblouku: 111.157 km.

Poloměr Země 6369 km.

Velmi přesný odhad parametrů, chyba 0.14%.

Významné zlepšení oproti předcházející metodě.

## 32. Druhé Snelliovo měření



## 33. Picardovo stupňové měření

Jean Piccard (1620-1682), významný matematik a astronom.

Přeměřil Fernellův oblouk mezi Paříží a Amiens.

Úvaha o jižní větvi.

Poprvé použit Quadrant s dalekohledem a nitkovým křížem.

Měření probíhalo v letech 1668-1670 a stalo se základem tzv. *Pařížského poledníku*.

Celkem měřeny dvě základny o délkách 7.6 km a 11 km.

Vzdálenosti měřeny dřevěnými latěmi.

Celková oblouku: 57 060 sáhů (110.146 km).

Poloměr Země 6328.9 km.

## 34. Picardovo stupňové měření: teodolit







## 36. Úvahy o skutečném tvaru Země

Jean Richer (1630-1696), francouzský astronom.

Prováděl astronomická měření Marsu v blízkosti rovníku (Cayenne, Fr.Guyana).

Pro měření času používal kyvadlové hodiny.

V Paříži fungovaly správně, u rovníku se zpožďují o 2.5 min/den.

Nutno kyvadlo zkrátit o 3 mm.

Po návratu do Paříže se předcházely o 2.5 min.

Nutno prodloužit kyvadlo o 3 mm.

Prvotní úvahy (Christian Huygens + Isaac Newton):

Změna gravitačního pole v důsledku zploštění Země.

Země má zřejmě tvar elipsoidu.

Délka poledníkového oblouku se směrem k pólu prodlužuje.

Ověření přeměření na 2 místech.

## 37. Cassiniho stupňové měření

Jean Dominique Cassini (1625-1712)

Ředitel pařížské hvězdárny, významný astronom.

Odpůrce Newtonovy teorie: Země protažena v ose rotace.

Požádán fr. akademií věd o prodloužení pařížského poledníku S/J.

Cíl: bude  $1^\circ$  na severu delší než na jihu či naopak?

Newtonova vs. Cassiniova teorie.

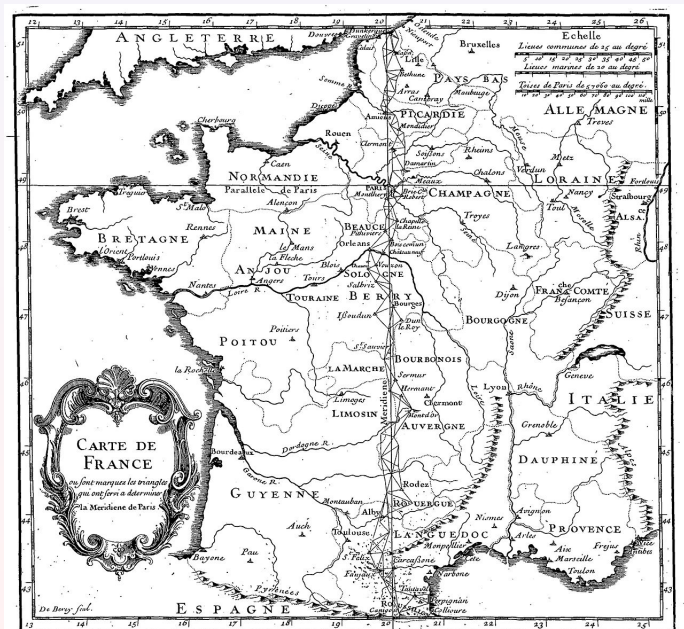
Prodloužení poledníku v S směru: Amiens-Dunkerque.

Prodloužení poledníku v J směru: Paříž-Perpignac (3xdelší).

Měřické práce: J. D. Cassini (S), Filip de La Hire (J).

Prováděny teodolity, stavěly se měřické věže.

## 38. Cassiniho stupňové měření: schéma



## 39. Výsledky

Měření ukončeno v roce 1718 (trvalo 38 let).

Po smrti pokračovali synové: Jaques Cassini, Gabriel de la Hire.

1701: Paris-Coullioure:  $1^\circ = 57292$  sáhů (přeměření).

1713: Paris-Coullioure:  $1^\circ = 57097$  sáhů  $\approx 111.280$  km.

1718: Paris-Dunkirk:  $1^\circ = 56960$  sáhů  $\approx 111.017$  km.

*28. září 1718: Zasedání francouzské akademie věd:*

Cassini oznamuje, že se Newton mýlil.

Údajně potvrzena jeho teorie - Země protažena v S-J směru.

Faktory ovlivňující naměřené výsledky:

- Doba měření, nepřesnost přístrojů.
- Měřické chyby (viz přeměřování).
- Malý rozdíl zeměpisné šířky.

## 40. Důsledky Cassiniho chybných měření

Výsledky Cassiniho měření zpochybněny:

- 1) Změna gravitačního pole při přesouvání kyvadla.
- 2) Zploštění Jupitera (1666 Cassini, odmítal akceptovat u Země).
- 3) Provedeny fyzikální výpočty (Clairaut, Bouguer).

Rozdělení odborné veřejnosti na 2 tábory (geometrie vs. fyzika).

1735 fr. akademie věd rozhodla vykonat dvě kontrolní měření:

- Laponsko (severní polární kruh), navrhl Celsius.
- Peru (v blízkosti rovníku).

Měření celkem trvala 10 let.

Účastnili se jich nejvýznamnější vědci své doby.

## 41. Stupňová měření v Laponsku (1736-1737)

Pierre Louis Maupertuis (1698-1759), matematik, přírodovědec.

Alexis Claude Clairaut (1713-1765), matematik, geometr.

Charles Étienne Louis Camus (1699-1768), matematik, architekt.

Pierre Charles Le Monnier (1675-1757), astronom.

Reginald Outhier (1694-1774), geograf, benediktinský kněz.

M.de Herbelot, malíř.

20.dubna 1736: odjezd z Paříže do Stockholmu

Anders Celius (1701-1744), fyzik, astronom.

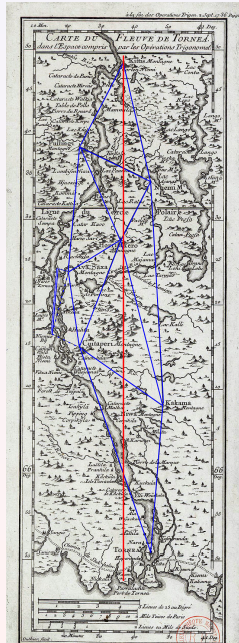
2. května 1736: příjezd do Laponska, záliv Bothnia.

Švédská vláda poskytla kontingent vojáků.

Postup po zamrzlé řece, podél ledovce, vodopádů.

Teploty  $-30^{\circ}\text{C}$ ,  $30^{\circ}\text{C}$ , vánice, obtížný hmyz.

## 42. Schéma triangulační sítě





## 43. Vlastní postup prací

Měření probíhala mezi horami Tornea a Kittisvara.

Vzdálenosti na základně měřeny dřevěnými tyčemi (20 stop).

Úhly měřeny teodolity (kvadranty), průměr kruhu 4 stopy.

1. *Stabilizační práce*: signální věže na vrcholech (ukončeno 18. července).
2. *Triangulační měření*: 9 stanovisek, 11 trojúhelníků (6. července - 6. září).
3. *Astronomická měření na koncových bodech*: teleskop, 9 stop, noc, Delta Draconis. Rozdíl v zem. šířkách Tornea-Kittisvár:  $\Delta\varphi_1 = 0^\circ 57' 26.93''$  (dokončeno 10. října).
4. *Měření základny*: zamrzlá řeka, celkem 7046 sáhů (14 435m)  
Měřeno 2x, rozdíl 11 cm. (období 21.-28. prosinec).
5. *Zpracování výsledků*: výpočet délky poledníkového oblouku 54 942.5 sáhů.  
Maupertuis- pochybnosti o astronomických měřeních (leden - březen)
6. *Astronomická měření*: opakované určení zeměpisné šířky.  
 $\Delta\varphi_2 = 0^\circ 57' 30.42''$  Odchylka  $3.49''$ , odpovídá cca 106 m.  
Průměr  $\Delta\varphi = 0^\circ 57' 28.70''$ .

Délka poledníkového oblouku: 57 437.9 sáhů (104.4 km) vs. 111.28 km (Paříž).

## 44. Maupertuis, památník



## 45. Stupňová měření v Peru (1735-1744)

Francouzská část výpravy:

- Louis Godin (1704-1760), astronom.
- Pierre Bouguer (1698-1758), geofyzik, astronom, matematik.
- Charles Marie de La Condamine (1701-1774), geograf, 1. mapa Amazonky.

Peru španělskou kolonií, podpora španělského krále:

- Antonio de Ulloa y de la Torre-Giral, astronom, poručík, jednání s Indiány).
- Jorge Juan y Santacilia (1713-1773), matematik, poručík.

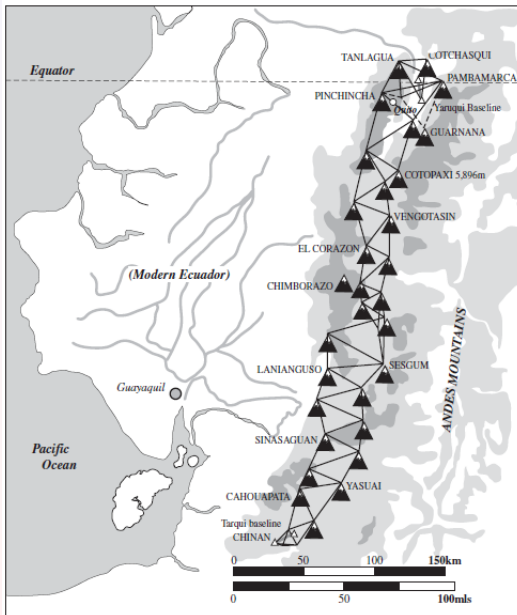
Výběr Peru:

- Blízkost rovníku, relativně stabilní politická situace.
- Dva hřebeny Kordiller, na každém z nich vrcholy trojúhelníku (>4000m).

Celkem měření trvalo 9 let.

Velmi složitá měření, drsné klimatické podmínky.

## 46. Trojúhelníkové řetězce: ukázka



## 47. Cesta na místo měření...

Detaily díky podrobnému deníku Bouguera.

Příjezd do Cartageny (listopad 1735) , aklimatizace.

Cíl Villa de San Francisco de Quito (900km), plavba lodí + pěší pochod.

Guayaquil (pobřeží) dosažen 25. března 1736.

Rozdělení skupiny na dvě části, podpora, každá šla samostatně.

Příchod do údolí Quita, spojení obou částí. (10. červenec 1736).

V průběhu pochodu experimenty s teplotou varu vody, kaučukovníkem, změnou tlaku a výšky...

Bouguer cestou odvodil vztah mezi tlakem a nadmořskou výškou.

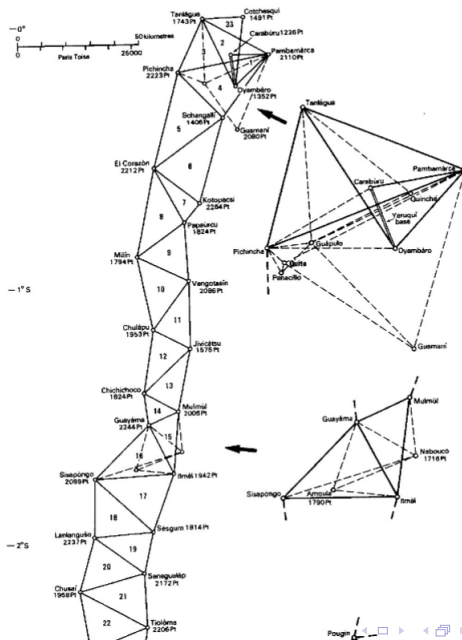
Použití pro barometrickou nivelaci.

Podmínky: nejnižší bod (2390), nejvyšší bod (4555).

Sopečné kužely, velmi strmé, na vrcholcích sních.

V pralese neexistovaly cesty.

# 48. Schéma triangulační sítě



## 49. Měření základen

Měření probíhalo od severu k jihu (od r. 1737), délka území > 350 km.  
Měřeno 2x nezávisle.

### 1. základna: Quito

Vzdálenosti na základnách měřeny 3 dřevěnými tyčemi (20 stop).  
Barevně označeny, aby byly použity ve stejném pořadí.  
Každodenní kalibraci vůči měřidlu dovezeném z Francie.  
Měřena vodorovná délka (olovnice), zarovnání do směru provazem.  
Délka 6273 sáhů (12 226 m), odchylka 3 palce.  
Redukovány na šikmé délky, oprava z komparace: chyba 23 mm.

### 2. základna: Tarqui

Podobná metodika, v místech močálů tyče vedeny po vorech z prutů.  
Celková délka: 5259 sáhů (10250 m).

Měření trvalo 2 roky.

## 50. Úhlová měření

Prováděna kvadranty doplněnými teleskopy s nitkovým křížem.

Poloměr kruhu 0.91 m.

Velmi těžké, vynášeny do výšek přes 4 km pomocí soumarů.

Na vrcholu vybudován tábor, čekalo se na dobrou viditelnost.

Stroje nebyly horizontovány, převod měřených úhlů do vodorovné roviny.

Úhly měřeny opakovaně, výsledky průměrovány.

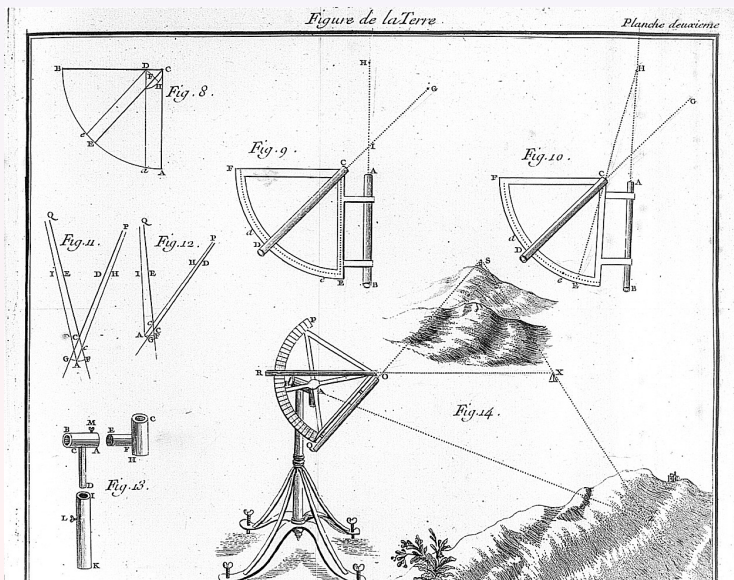
Korekce úhlů v trojúhelnících na sférické (oprava o exces).

Průměrná doba měření 1 úhlu: 1 měsíc.

Řada kontrol (součty vnitřních úhlů).



# 51. Zákresy triangulačních měření



## 52. Astronomická a výšková měření

### *Astronomická měření:*

Přístroje s poloměrem kruhu 3.7 m (velmi přesná měření).

Transport po částech, skládal se až na místě.

Stroje vybaveny mikrometrickými šrouby, schopnost odečítat vteřiny.

Pro přístroje postaveny improvizované observatoře.

### *Výšková měření:*

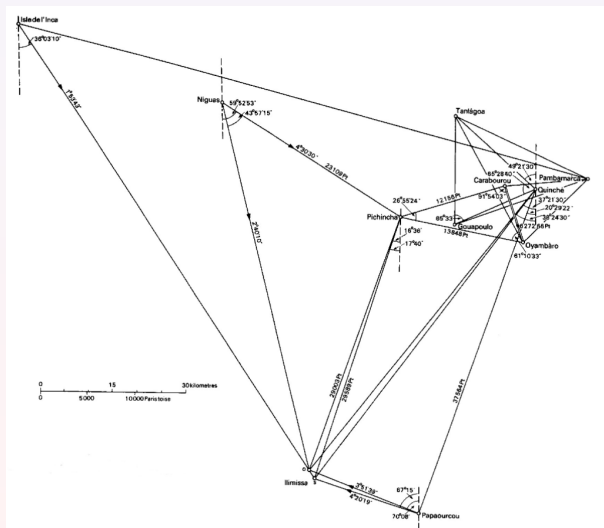
Trigonometrické připojení výšek k hladině oceánu.

Realizováno k ostrovu Isle d' Inca.

Provedl Bouguer.

Celková doba měření: 7 let.

# 53. Výškové připojení trigonometrické sítě



## 54. Výpočty

Dvojí výpočty:

- Bouguer, Condamine: úsek oblouku Cochesqui - Taqwui.
- Godin, Ulloa a Santacilia: úsek oblouku: Mira - Cuenca.

Dvě různé délky základen: celkem 4 varianty řešení.

Každý samostatně spočetl délky stran trojúhelníků.

Godin: 2 varianty lišící se o 20 sáhů.

Bouguer vs. Condamine: 3 sáhy (použily se).

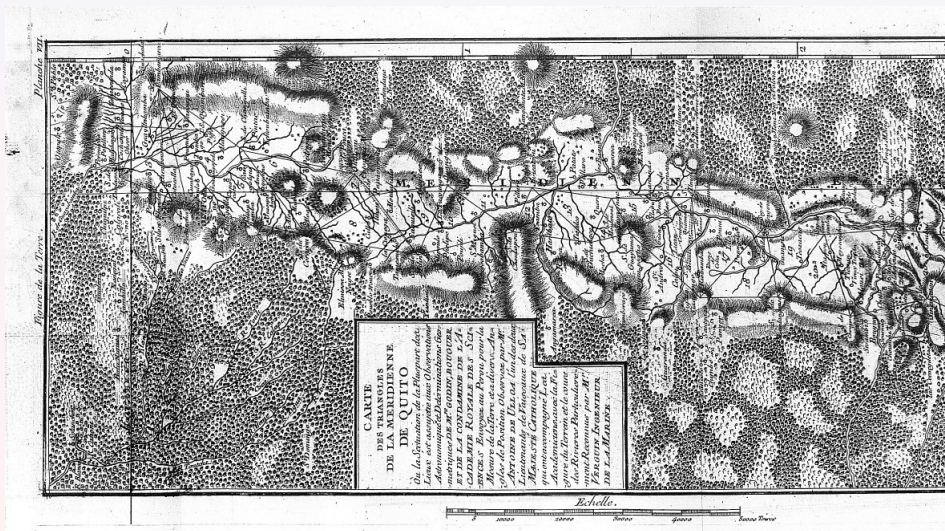
*Výsledky:*

Délka oblouku: 176 950 sáhů.

Úhlová difference:  $3^{\circ}7'1''$ .

$1^{\circ} \approx 56\,749$  sáhů: 110 577 m.

# 55. Mapa se zákresem řetězců



## 56. Důsledky expedice

Potvrzení Newtonovy teorie, vyvrácení Cassiniho názoru.

Velký význam pro aproximaci tvaru Země, kartografii, zobrazení.  
Téměř definitivní určení rozměrů Země.

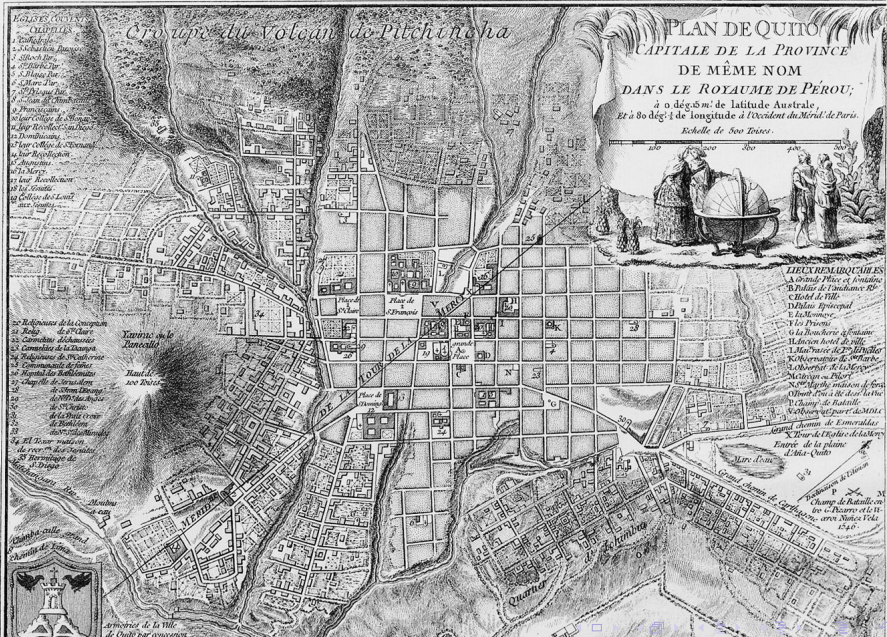
Kombinace s měřením v Laponsku vedlo k definici parametrů elipsoidu.

Zploštění  $f = (a - b)/a = 1:301$

Započtením výsledků 10 dalších oblouků vedlo k definici *Besselova elipsoidu*.

- 1) Analýza rychlosti zvuku v různých nadmořských výškách.
- 2) Vliv zemské masy na tíhové zrychlení (Quito, Chimborazo).
- 3) Vznik barymetrické metody měření výškových rozdílů.
- 4) Objev kaučuku a chininu.
- 5) Jedna z nejvýznamnějších vědeckých expedic všech dob.

# 57. La Condamine, mapa Quita



## 58. Osudy účastníků

*Louis Godin:*

1741: se oženil s 13 letou dcerou španělského guvernéra.

Od této doby pracuje samostatně.

Do Francie se nikdy nevrátil - ředitel námořní akademie v Cadixu.

*Charles Marie de La Condamine:*

1744-1745: projel, popsal a zmapoval amazonku od And až k ústí.

1745: Návrat do Paříže. *Pierre Bouguer:*

Fyzikální experimenty týkající se tíhového pole.

1744: návrat do Paříže.

1745: Bouguer a la Condamine jmenování členy královské vědecké společnosti v Londýně.

*Antonio de Ulloa:*

1745: Jeho loď přepadena Brity, do roku 1746 v britském vězení.

*Jorge Juan y Santacilla:*

Informace o měření a navigaci uplatnil ve španělském námořnictvu.



# 59. La Condamine, mapa Amazonky

## CARTE DU COURS DU MARAGNON OU DE LA GRANDE RIVIERE DES AMAZONES

Dans sa partie navigable depuis Jam de Bracamorze jusqu'à son Embouchure et qui comprend la Province de QUITO, et la Côte de la GULANE depuis le Cap de Nord jusqu'à Essequébé.

Levée en 1743 et 1744, et assujettie aux Observations Astronomiques par M. de la Condamine, de l'Ac. R<sup>de</sup> de Sc.  
Augmentée du Cours de la Rivière Noire, et d'autres détails tirés de divers Mémoires et Renseignemens de Voyageurs modernes.

### PARTIE DE L'AMÉRIQUE MÉRIDIONALE.



## 60. Další významná stupňová měření

*Stupňová měření mezi Anglií/Francii (1783)*

Vznik teodolitů (Ramsden) s vodorovným/výškovým kruhem.

*Stupňová měření pro definici metru (1792-1798)*

Prodloužení pařížského poledníku až k Barceloně.

1 m = 1 / 10 000 000 délky kvadrantu zemského (1/2 poledníku).

Vznik nových měřických metod, vyrovnání.

*Topografická měření ve Francii (1750-1815)*

Výsledkem první topografická mapa Francie (Cassini).

*Stupňová měření v Hannoveru (1821-1827)*

Řídil Carl Friedrich Gauss, poprvé použito MNČ.

*Stupňová měření v Rusku (1816-1852)*

Poledníkový oblouk od Dunaje k severnímu moři (3000 km).

Vedl J. V. Struve (ředitel petrohradské hvězdárny).

1839: vznik Vojenského zeměpisného ústavu ve Vídni.