



M. ANTOINE D'ABBADIE

Antoine d'Abbadie voyageur et physicien du globe au XIX^e siècle

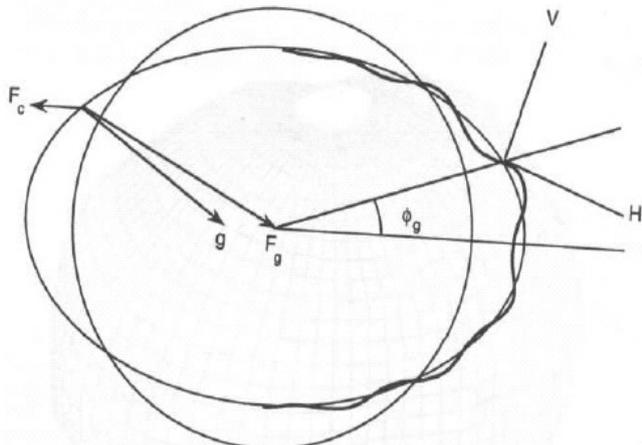
François Beauducel et Jean-Paul Poirier

*Institut de physique du globe de Paris
Sorbonne Paris Cité*

<http://www.ipgp.fr/~beaudu>

Ellipsoïde, géoïde et verticale

La figure de la terre



$$g = 9,78032677(1 + 0,0052789 \sin^2 \varphi + 0,000023295 \sin^4 \varphi) \text{ en ms}^{-2}$$

$$\text{Gal} = 0,01 \text{ m s}^{-2} = 1 \text{ cm s}^{-2}$$

(GRS* 80)

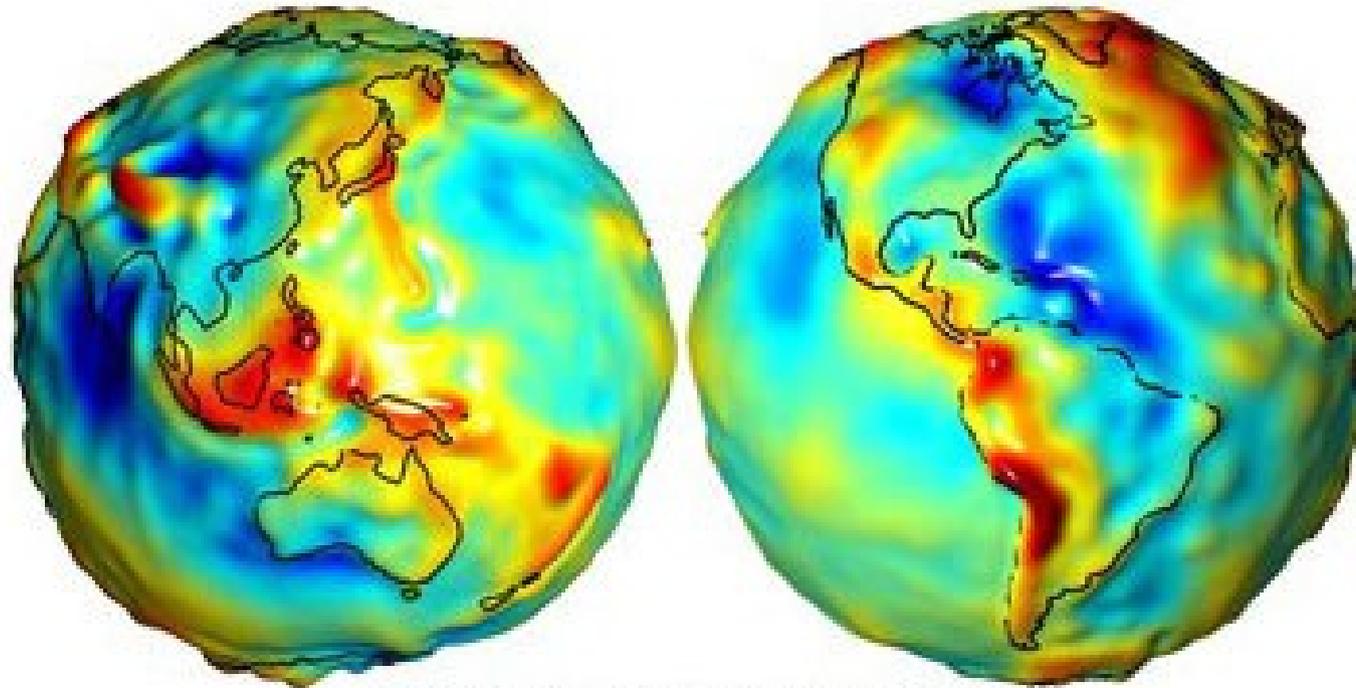
$$\text{milligal} = 10^{-5} \text{ m s}^{-2} = 10^{-2} \text{ mm s}^{-2}$$

V = verticale ; H = horizon ;
 F_c = force centrifuge ; F_g = attraction ;
 g = pesanteur ; Φ_g = latitude

- **Géoïde** = surface équipotentielle proche du niveau moyen des mers
- **Verticale** = direction du fil à plomb pointant vers le *nadir* en bas et le *zénit** en haut = normale au géoïde
- **Horizon** = plan perpendiculaire à la verticale = surface d'un liquide au repos
- **Latitude astronomique** = angle de la verticale avec l'équateur
- **Latitude géodésique** = angle de la normale à l'ellipsoïde avec l'équateur

* selon l'orthographe préconisée par d'Abbadie

Géoïde terrestre : variations spatiales de la verticale

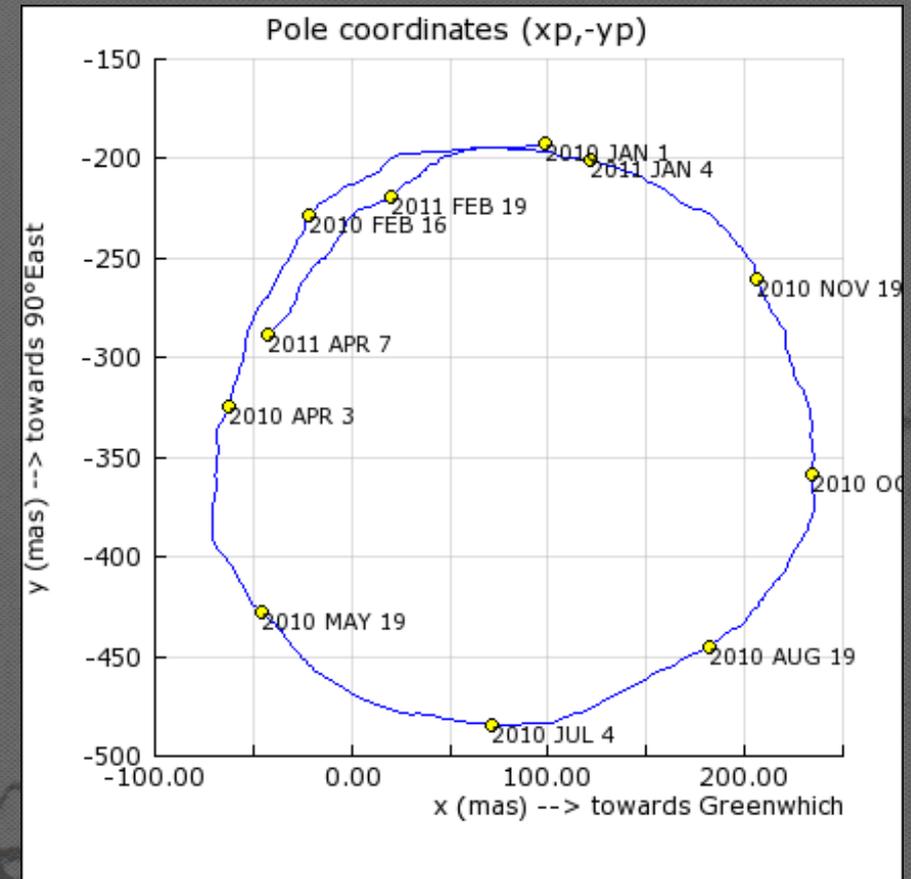


Crédit : NASA

- Anomalie positive sous l'Islande
- Anomalie négative sous l'Inde

Variations temporelles de direction et intensité de la pesanteur

- **Marées océaniques** = charge/décharge et attraction de la masse d'eau
- **Marées terrestres** = déformations élastiques du globe liées à l'attraction de la Lune et du Soleil
- **Mouvements de l'axe des pôles**
- Amplitude des variations angulaires de la verticale = qq mas ~ qq μ rad
- Amplitude des variations d'intensité de la pesanteur = qq μ gal



Earth Orientation Center
<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>

La physique du globe au XVIII^e

- Terre aplatie dans la direction des pôles : missions simultanées à l'équateur [*Bouguer et al.*, 1735-1744] et au Pôle Nord [*Maupertuis et al.*, 1736-1737]
- L'attraction de la Lune et du Soleil sur le bourrelet équatorial entraîne la précession des équinoxes (l'axe des pôles décrit un cône dans l'espace) [*D'Alembert et Euler*, 1749]
- Valeur de l'aplatissement ? Elle dépend de la rigidité de la Terre et donc de sa constitution interne... [*Laplace*, 1799-1825]. Deux thèses s'affrontaient :
 - “Plutoniens” = Terre fluide et chaude, recouverte d'une croûte solide
 - “Neptuniens” = Terre solide et refroidie
- Les mesures de la verticale étaient encore d'actualité au XIX^e et devaient permettre de répondre à ces questions fondamentales



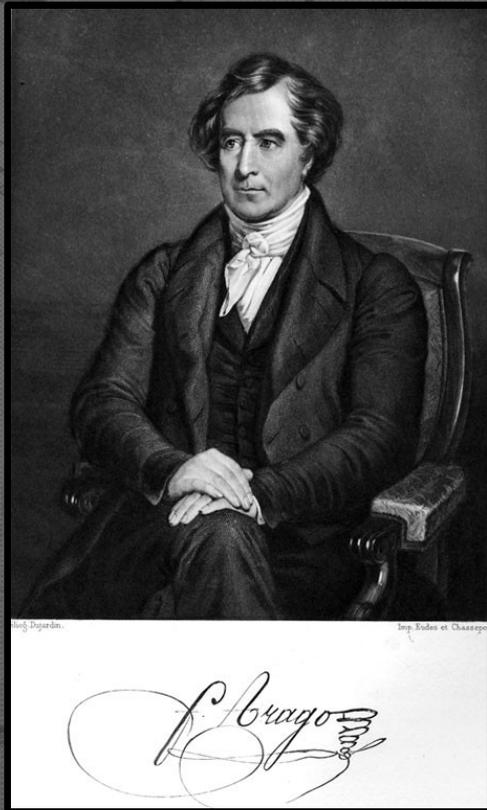
— Voltaire —

« Maupertuis, “l’aplatisseur de terre”. »

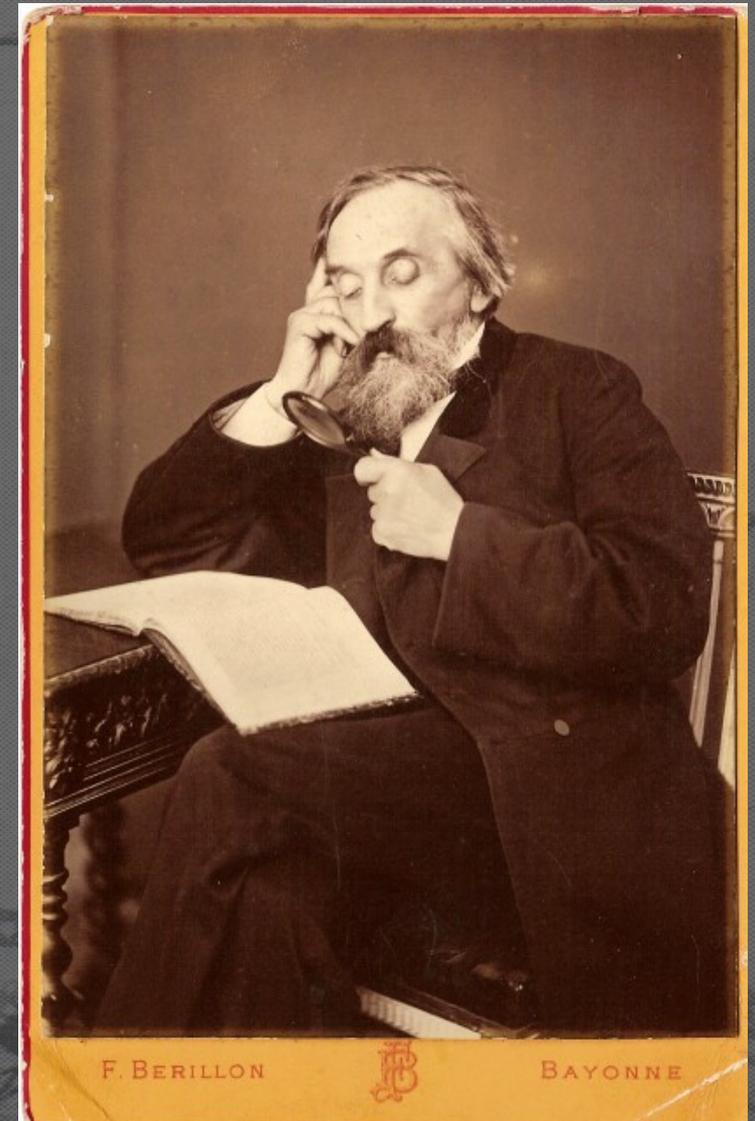
Tentatives de mesures de la verticale

- Antoine d'Abbadie [1810-1897] : niveau à bulle d'air, “nadirane” = bain de mercure réfléchissant $H = 10$ m
- George Darwin [1845-1912] : pendule vertical bifilaire + miroir
- Charles Wolf [1827-1918] : pendule vertical $L = 30$ m + prisme optique
- Anatole Bouquet de la Grye [1827-1909] : double pendule vertical
- Émile Plantamour [1815-1882] : niveau à bulle d'air
- Karl-Friedrich Zöllner [1834-1882] : pendule horizontal
- Ernst von Rebeur-Paschwitz [1861-1895] : pendule horizontal + miroir
- 1907** Oskar Hecker [1864-1938] : 2 pendules horizontaux à 25 m de profondeur (temp. et hum. constantes sur l'année) = premières mesures des marées terrestres dues au Soleil ($\pm 0.0025''$) et à la Lune ($\pm 0.0062''$)

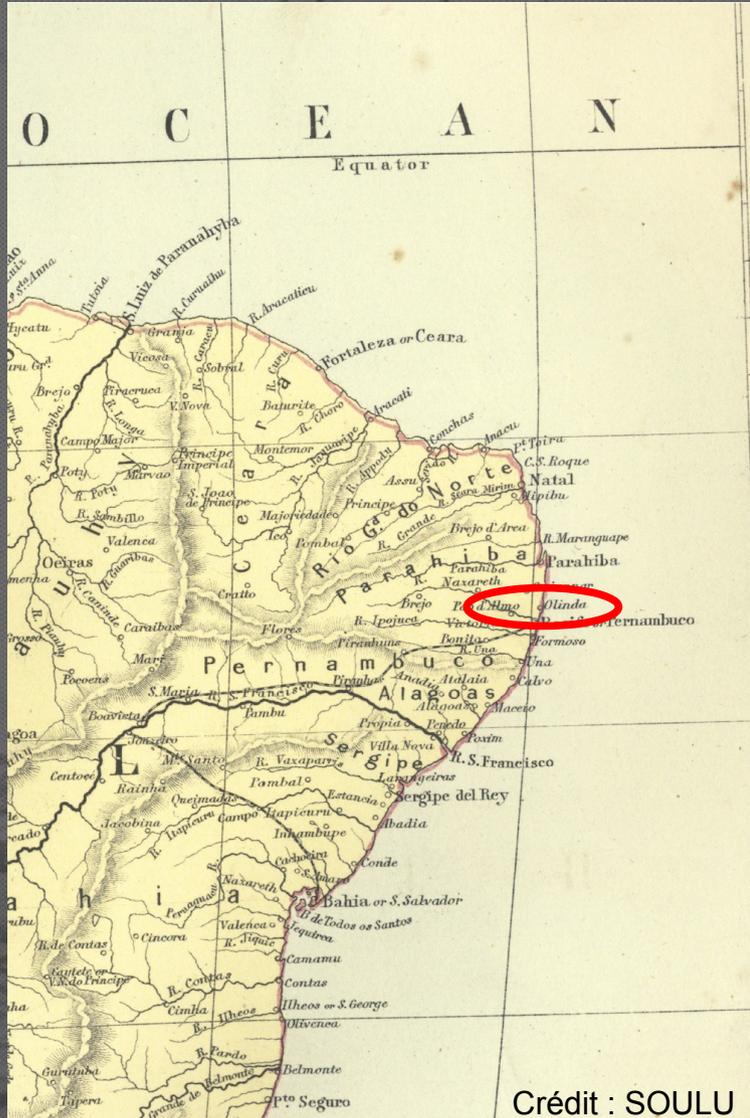
Antoine d'Abbadie : 70 ans à la recherche de la verticale



Antoine d'Abbadie vers 1890
[Archives de l'Académie des sciences]



1836-1837 : Expédition au Brésil



→ François Arago envoie Antoine d'Abbadie et Théophile Lefebvre en mission pour l'Académie des Sciences

→ Objectifs = observations magnétiques, météorologiques, astronomiques, géophysiques, océanographiques

→ Rencontre avec Louis Napoléon Bonaparte (future Napoléon III) avec qui il se lie d'amitié

→ Mesures magnétiques = confirment les "théories" d'Arago sur la variabilité diurne de la déclinaison magnétique à proximité de l'équateur => publication aux CRAS

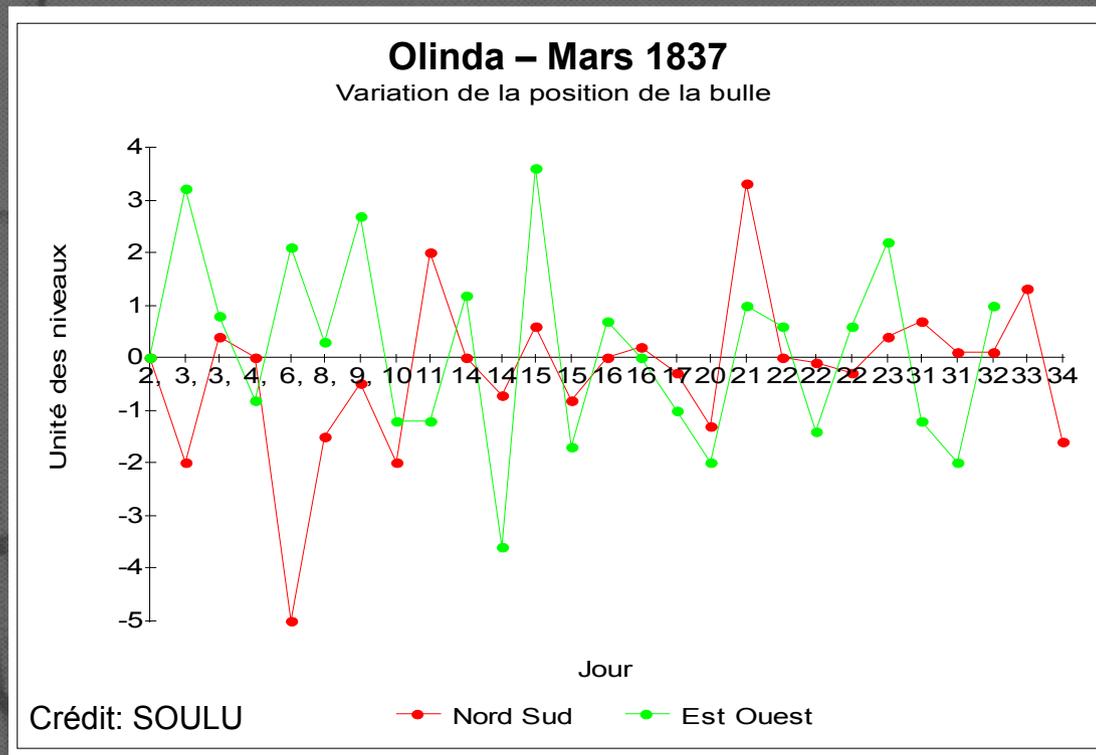
Crédit : SOULU

Mars 1837 : Mesures d'Olinda

*et une fenêtre qui n'était pas toujours ouverte ni fermée au double, tandis que
 les niveaux étaient posés sur un mur très bas & solide; les volets en bois étaient
 toujours fermés (il n'y avait pas de vitrages); le mur était exposé à l'Est.
 deux de ces niveaux étaient dans la direction N. et S. un autre était placé E. et O.
 le 4^e avait été placé diagonalement mais il ne put pas être observé.
 les niveaux N. et S. furent toujours observés de côté tourné vers le pôle Nord de
 la terre. les variations dans la table suivante sont au parties des niveaux
 le niveau E. et O. était observé de côté de l'Est.*

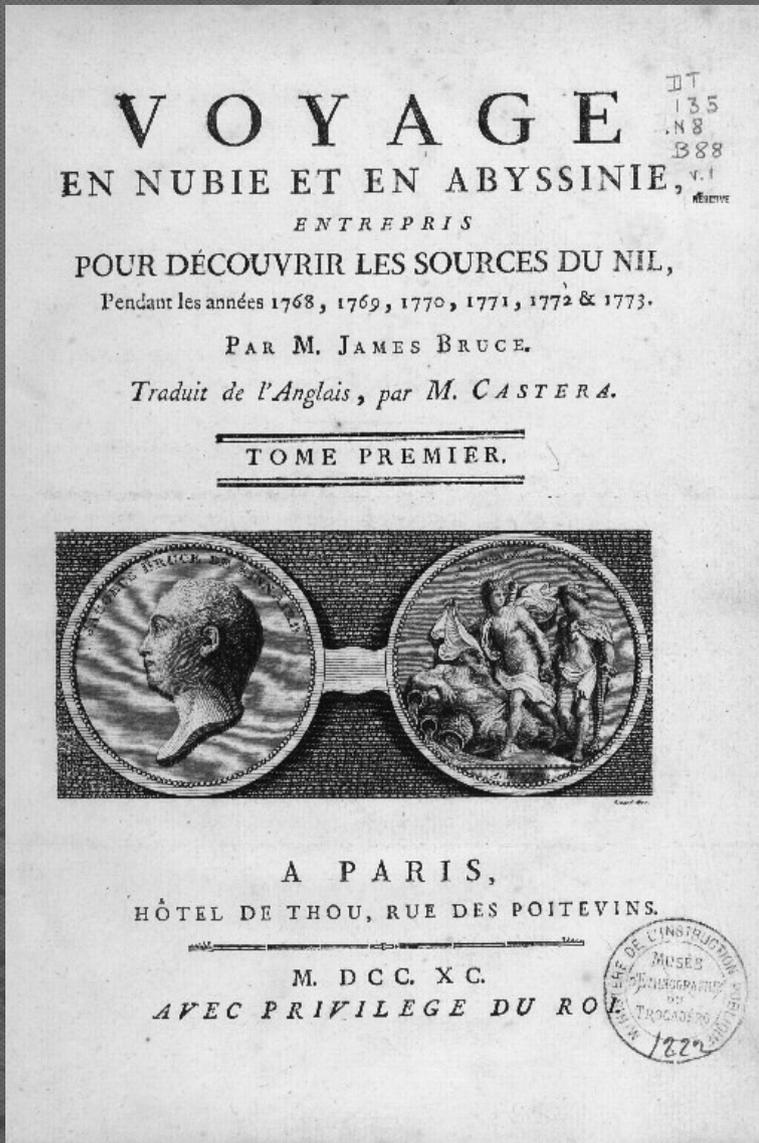
| | | niveau N. et S. | niveau E. et O. |
|--------|----------------------|-----------------|-----------------|
| 2 mars | 8 ^h matin | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 5.8 | -2.0 | +3.2 |
| | 7.8 Soir | +0.4 | +0.8 |
| 4 | 3.0 Matin | 0.0 | -0.8 |
| 6 | 8.0 M | -5.0 | +2.1 |
| 8 | 1.5 Soir | -1.5 | +0.3 |
| 9 | 4.0 M | -0.5 | +2.7 |
| 10 | 11.0 Matin | -2.0 | -1.2 |
| 11 | 5.0 S | +2.0 | -1.2 |
| | 6.0 M | 0.0 | +1.2 |
| 14 | 10.0 M | -0.7 | -3.6 |
| | minuit | +0.6 | +3.6 |
| 15 | 9.5 M | -0.8 | -1.7 |
| | 3.0 S | 0.0 | +0.7 |
| 16 | 6.0 S | +0.2 | 0.0 |
| | | -0.3 | -1.0 |
| 20 | 2.0 S | -1.2 | -2.0 |
| 21 | 3.0 M | +3.3 | +1.0 |

297



→ Conclusions d'Abbadie = mise en évidence de variations journalières de la verticale, possible sensibilité aux tremblements de terre...

1837-1848 : voyages en Éthiopie



→ Projet mûri depuis le collège avec son frère Arnauld-Michel [1815-1893]

→ Objectifs :

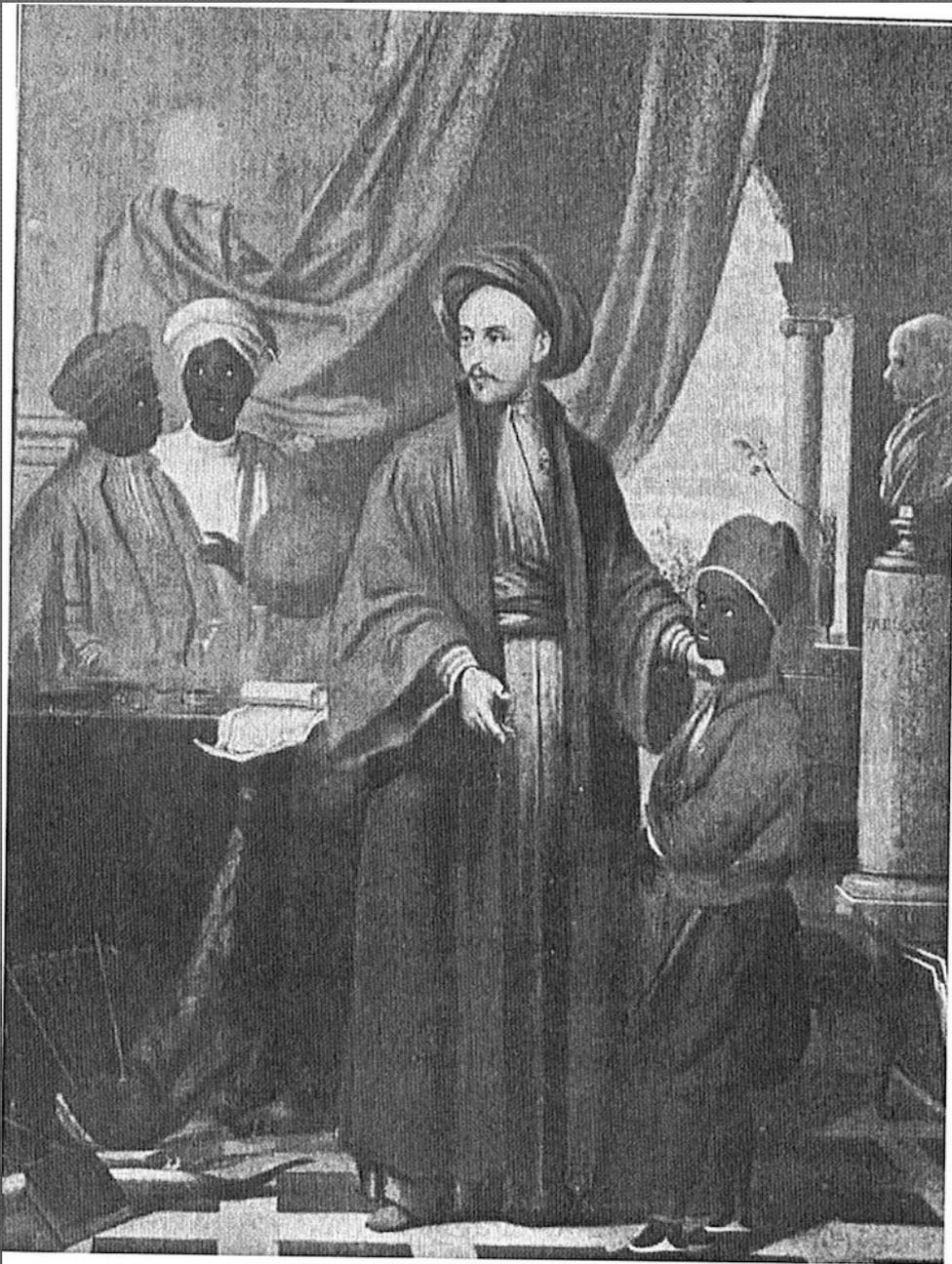
1. éclaircir l'origine des Nègres
2. rétablir la foi chrétienne
3. rechercher les sources du Nil
4. accroître l'influence de la France

→ 1839-1840 : retour à Paris pour se procurer des instruments de mesure adaptés à la géodésie de terrain

→ 300 000 km² explorés (8° lat. x 3° lon.)

→ 11 cartes topographiques

→ Premier dictionnaire d'Amharique (15000 mots)



→ *« Mes vitesses de parcours en Éthiopie »*

— 1.97 à 2.87 mille/h

→ *« Credo d'un vieux voyageur »*

— apprendre la langue du pays

« on ne peut se fier aux interprètes »

— donner des cadeaux

« en évitant les armes de guerre, car le voyageur est un homme de paix »

— voyager sans armes

« un voyageur armé se fera tuer par derrière, préférer le bâton de marche »

— s'abstenir des habitudes de toilette à l'européenne

« ne pas se laver tous les jours, traiter la dysenterie par le jeûne absolu 24 h + alcool chaud »

→ *« Géographie de l'Éthiopie — ce que j'ai entendu, faisant suite à ce que j'ai vu »*

Géodésie de l'Éthiopie

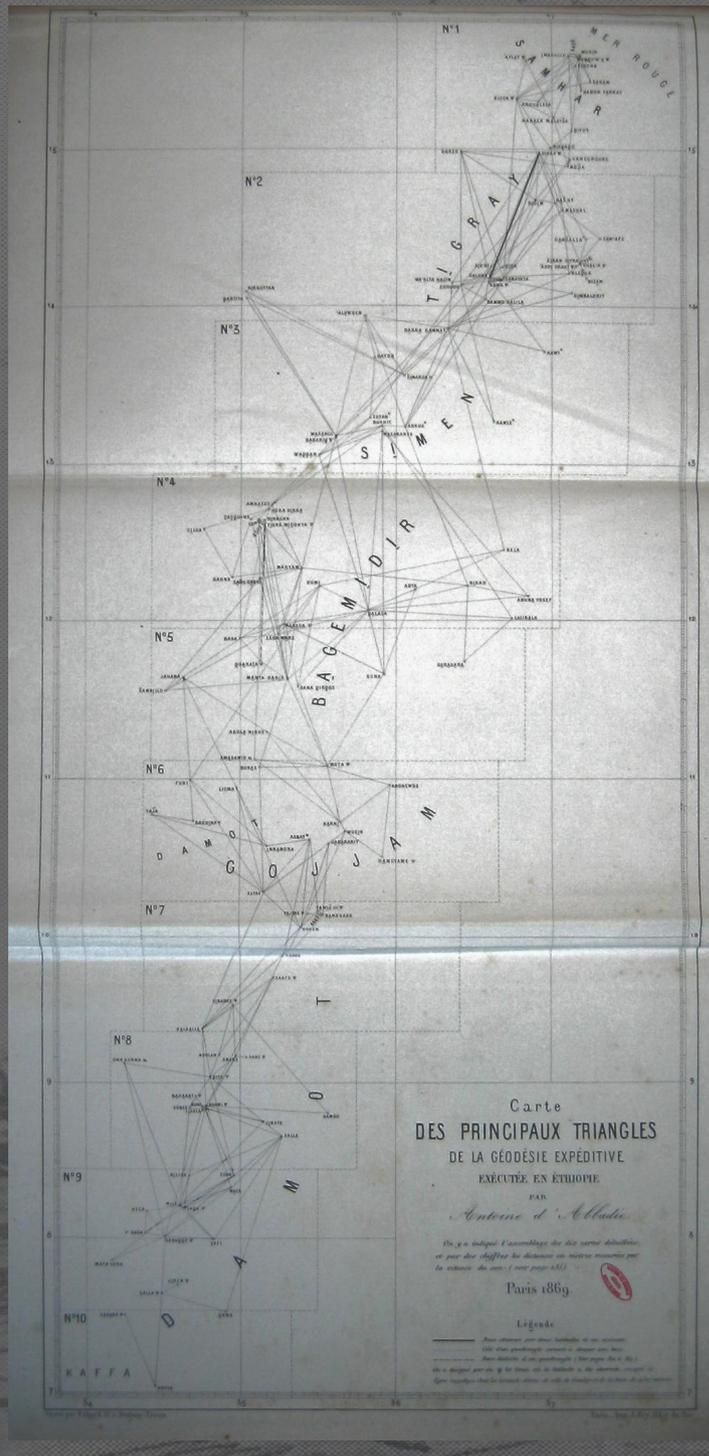
→ Principes de la triangulation :

- choix de points remarquables élevés
- coordonnées (visées astronomiques)
- mesure des angles (théodolite)
- mesure de longueur (au moins un coté)

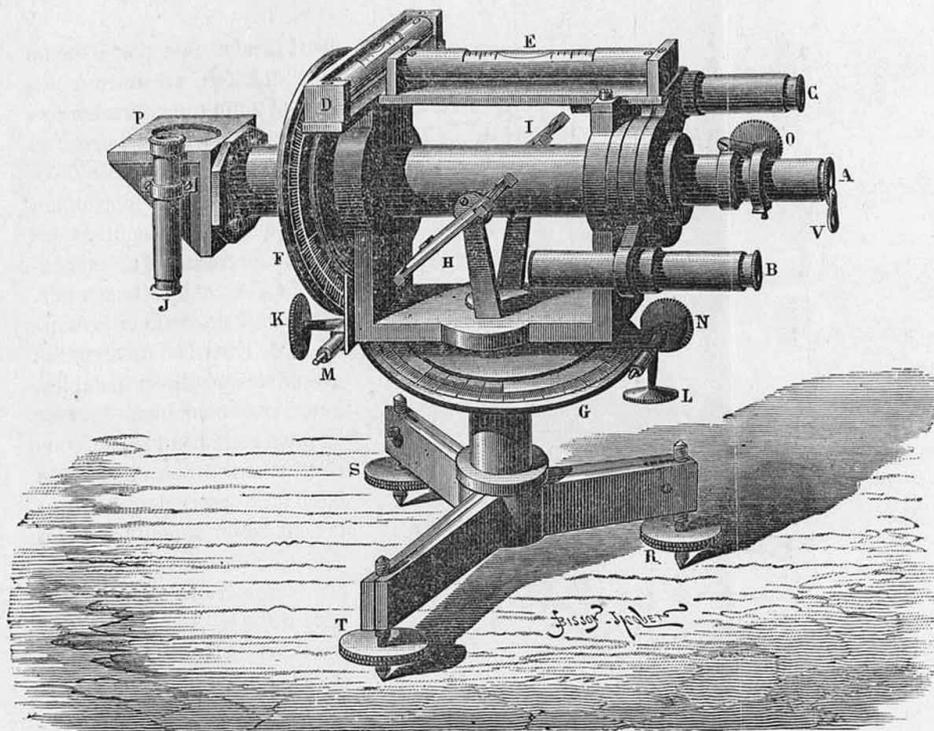
→ Géodésie expéditive :

- théodolite portatif (“Aba”)
 - mesure des bases par vitesse du son
 - mesure des azimuts de tous les points remarquables (“tours d'horizon”)
 - mesure des altitudes par hypsomètre
- « en voyage, il est moins facile de porter un baromètre qu'un enfant à la mamelle »

→ Collaboration avec Rudolf Radau, astronome et mathématicien prussien



Théodolite portatif “Aba”



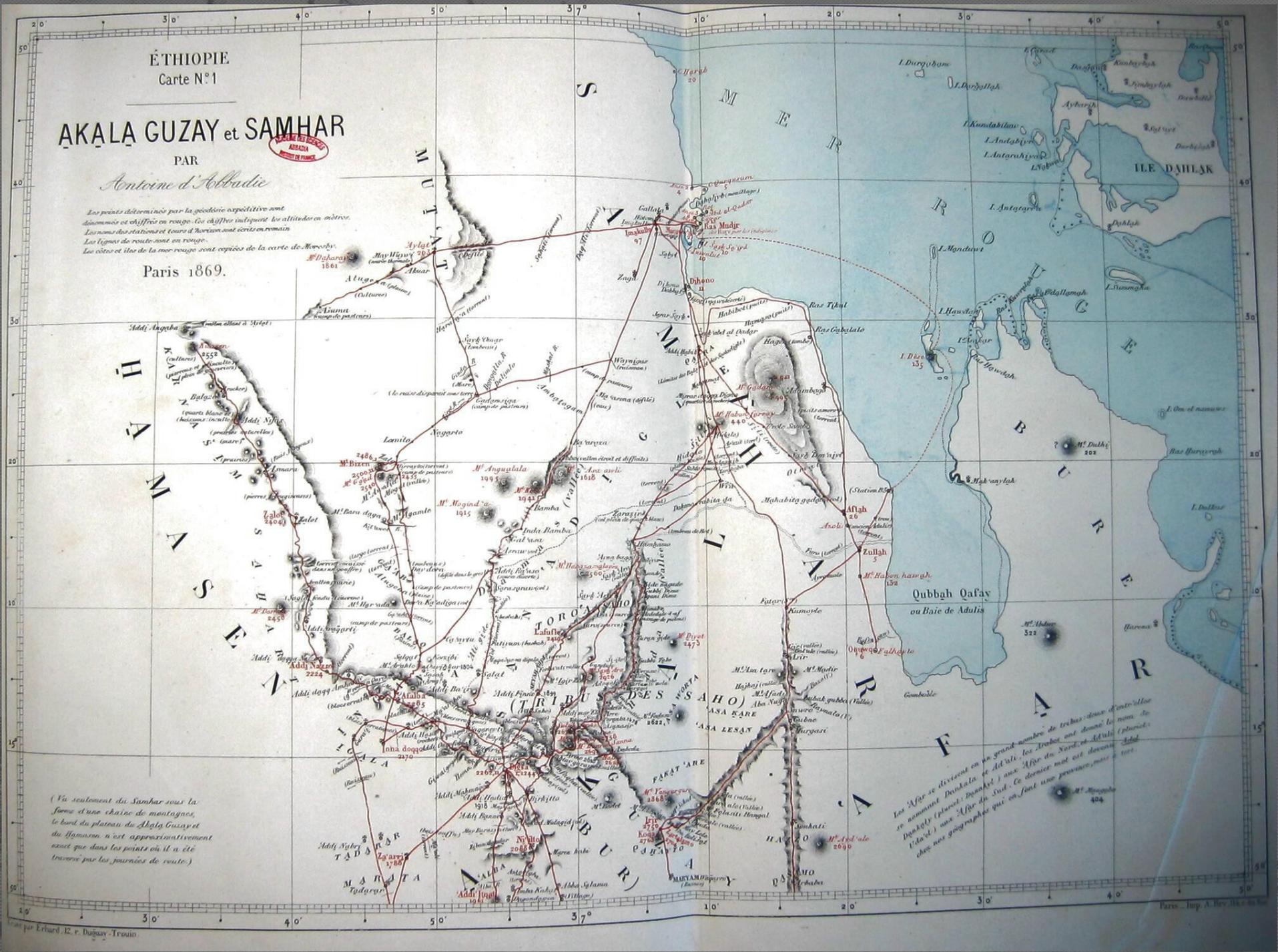
| | | |
|--|---------------------|--------------------------|
| A oculaire porté par un tube à frottement et mobile pour mettre au point sur la croisée des fils | G cercle azimutal. | M, N vis tangentés. |
| V verre obscur et mobile. | H, I miroirs fixes. | O pignon sur crémaillère |
| B, C liseurs. | J chercheur. | pour mettre au point |
| D niveau apozénital. | K, L pinces. | des objets visés. |
| E niveau transversal. | P prisme objectif. | R, S, T vis pédales. |
| F cercle vertical. | | |

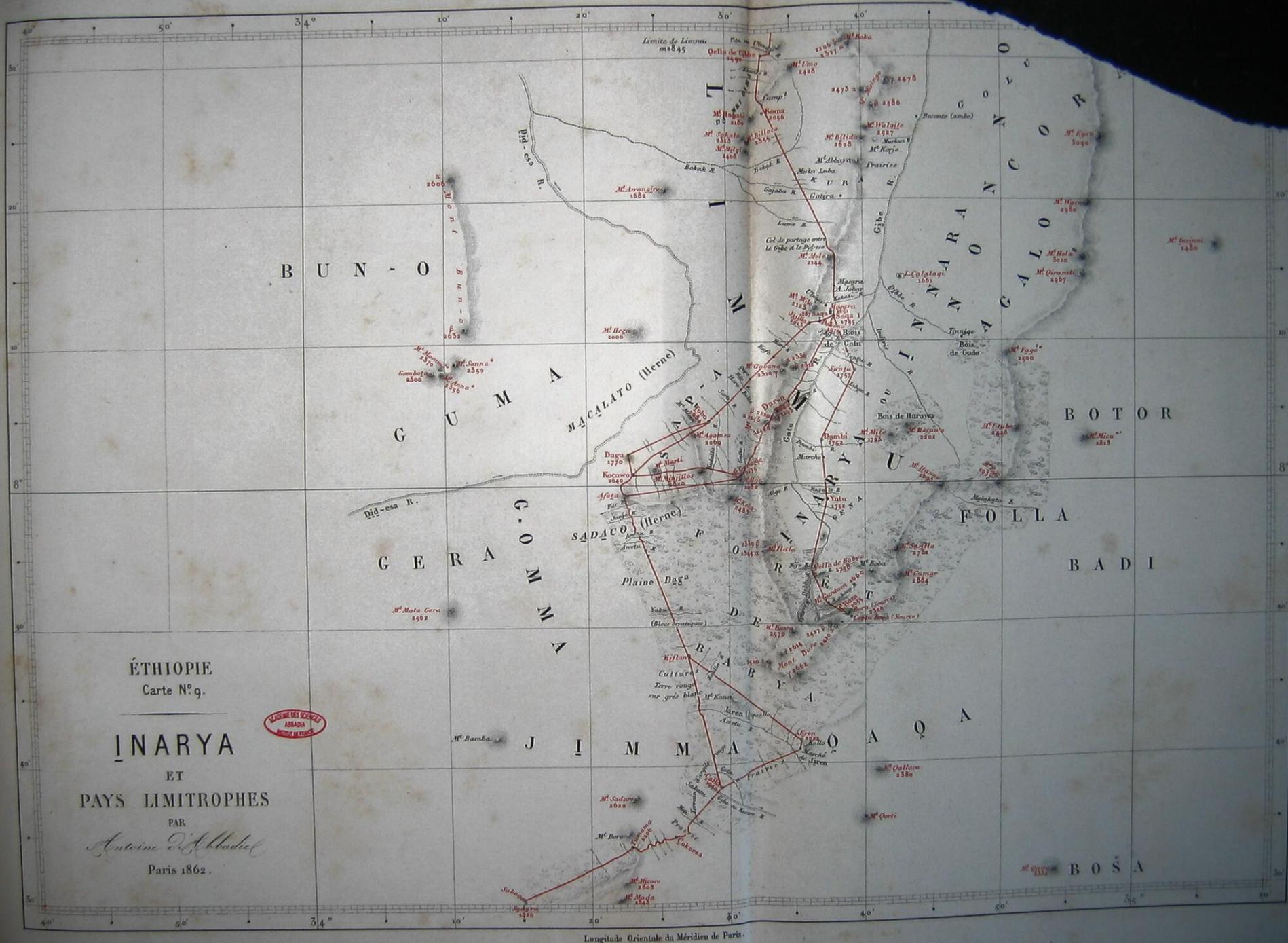
→ Nivellement sans retournement de la lunette

« Si l'on est scrupuleux, on est forcé de consacrer parfois jusqu'à 20 mn pendant lesquelles l'attention se fatigue, le cercle des curieux indigènes s'épaissit et se rapproche au point de masquer les signaux qu'on veut relever ; enfin, un nuage peut couvrir le soleil et les nécessités de la caravane peuvent précipiter le départ ; après avoir longuement préparé l'observation on est souvent obligé d'y renoncer avant de l'avoir commencée. »

→ Prisme pour faciliter la visée

« C'est une vérité reconnue que pour bien observer il faut être à son aise. J'ai donc rendu la lunette constamment horizontale [...] Ainsi l'oeil de l'observateur est toujours à la même hauteur. »





ACTES DE LA SOCIÉTÉ PHILOLOGIQUE.

TOME 10.



DICTIONNAIRE
DE
LA LANGUE AMARĪŃŃA

PAR

ANTOINE D'ABBADIE

MEMBRE DE L'INSTITUT (ACADÉMIE DES SCIENCES) ET DU BUREAU
DES LONGITUDES, PRÉSIDENT DE LA SOCIÉTÉ PHILOLOGIQUE.



PARIS,
F. VIEWEG, LIBRAIRE-ÉDITEUR,
67, RUE DE RICHELIEU, 67.
1881

— D'Abbadie —

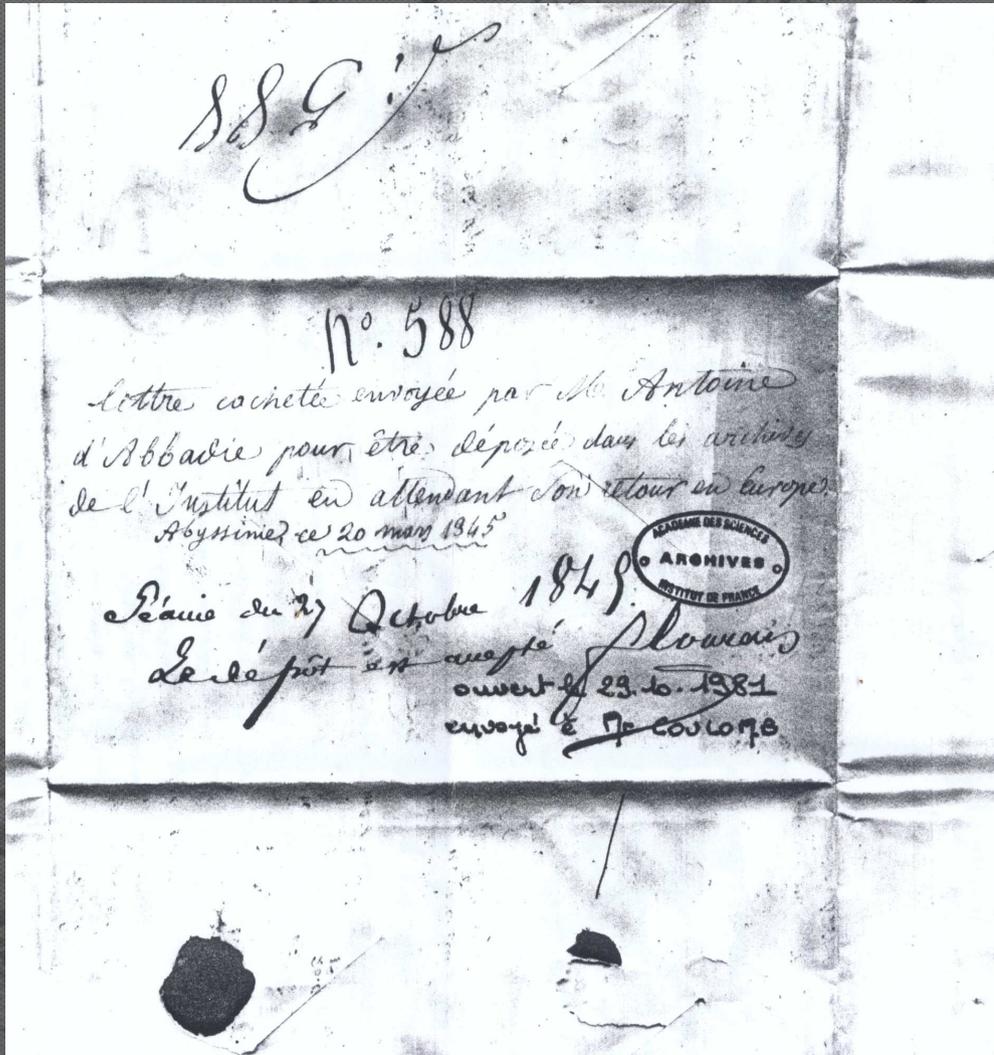
« *Le présent ouvrage est dédié aux vaillants missionnaires Lazaristes et Capucins qui travaillent avec tant d'abnégation à la régénération de l'Éthiopie. C'est sur ma demande qu'ils ont consacré leur vie à ce peuple qui a été mien pendant tant d'années ; je leur devais donc ce souvenir d'affectueuse reconnaissance. Bien mieux que d'autres, ils sauront indiquer mes erreurs et combler mes lacunes.* »

— Rimbaud —

« *Je ne puis me passer de l'ouvrage pour apprendre la langue du pays...* »

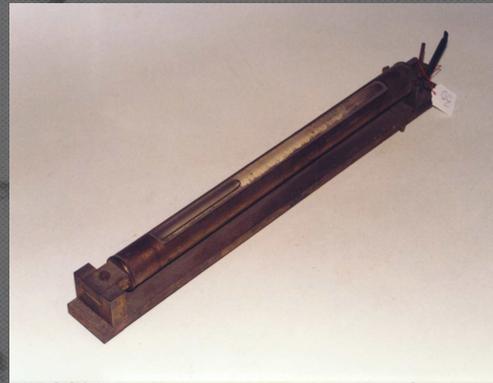
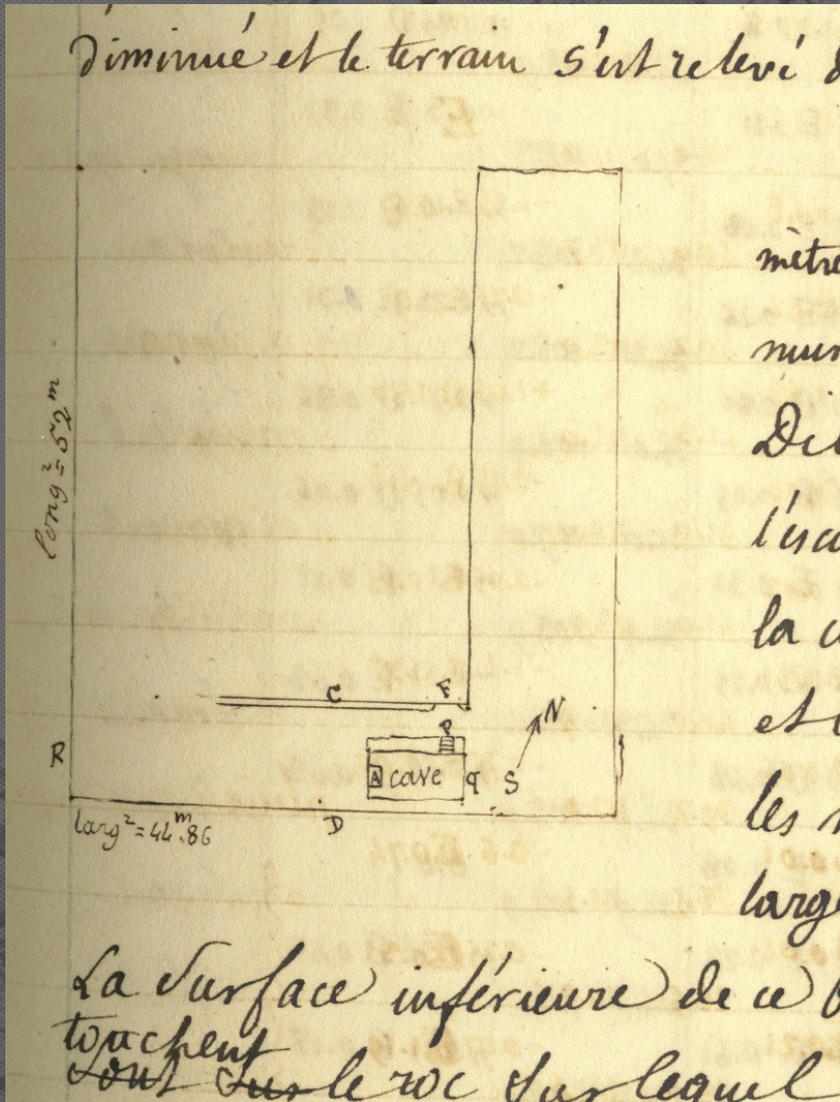
A. Rimbaud a passé 11 ans en Éthiopie, était voyageur, marcheur, doué pour les langues et ami des sciences (“philomathe” [Verlaine])...

1845: Le pli cacheté



- Nouvelles mesures au niveau à bulles à Gondar (1842) et Saka (1843) : résultats similaires aux observations faites à Olinda
- La verticale, utilisée pour régler les instruments d'astronomie et de géodésie, n'est pas stable !
- Envoi d'un pli cacheté à l'Académie des Sciences

1849 : château d'Audaux

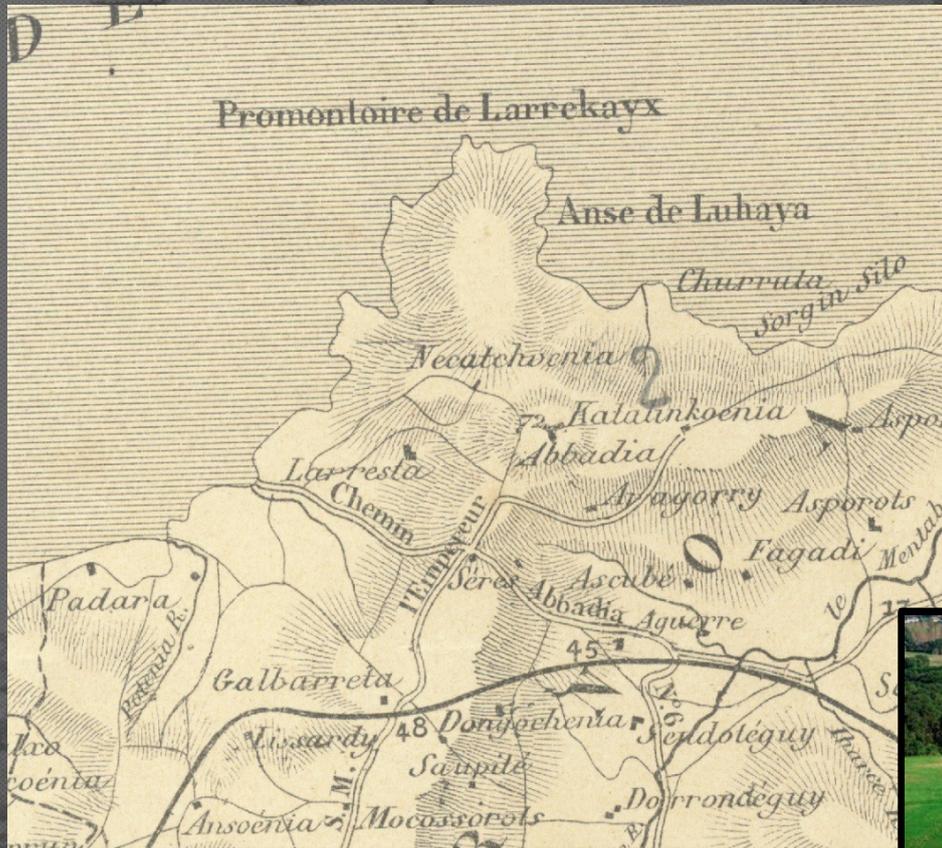


Crédit : SOULU

1849-1856 : mesures à Audaux

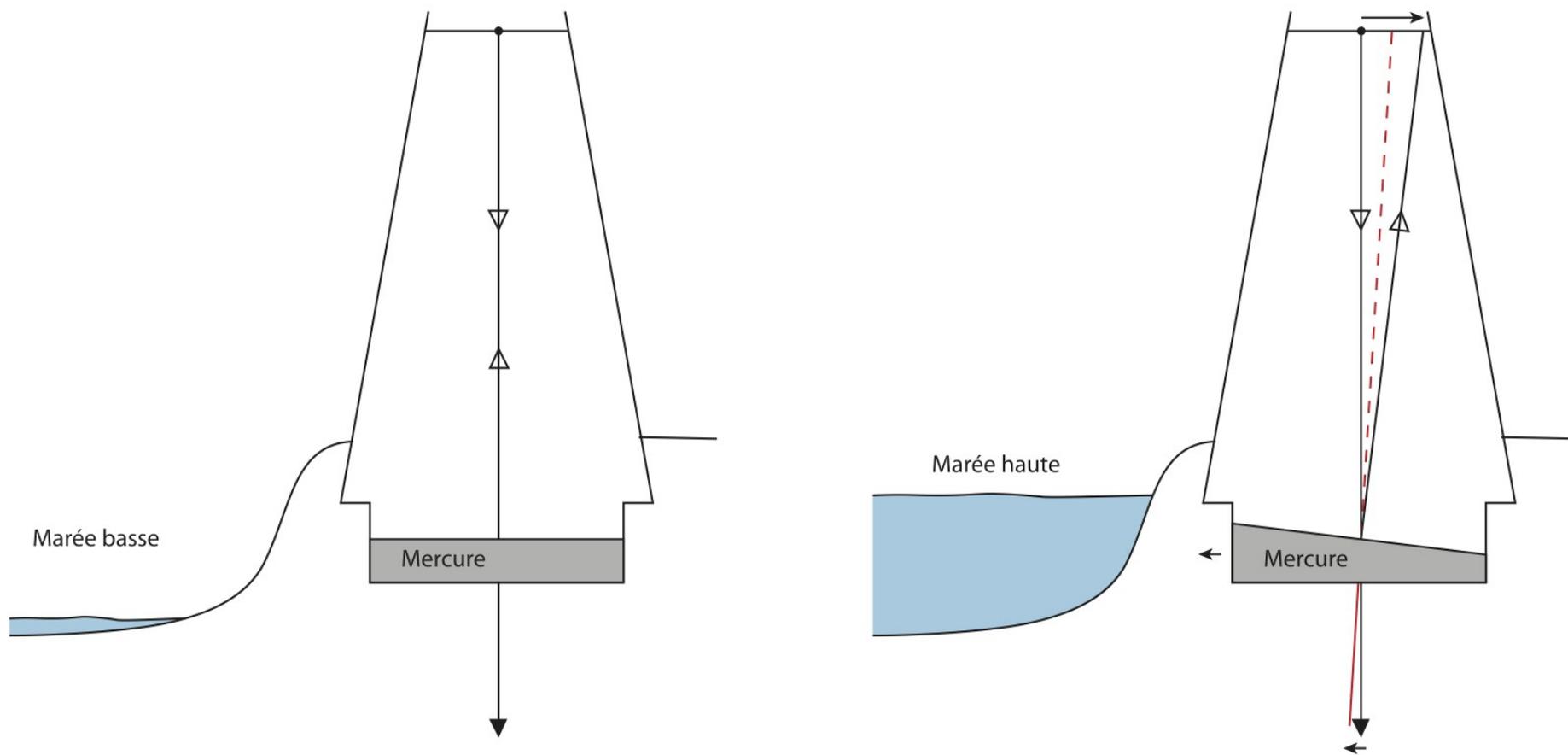
- Cave 30 m², 2 niveaux orientés N-S + 2 niveaux E-W
- Protection thermique : isolation par des cloches de verre
- 1849-1850 : 4 observations quotidiennes, sans résultat probant...
- Décembre 1850 : révision complète de l'installation
 - encastrement des niveaux dans des plaques de grès
 - scellement aux fondations rocheuses du château
 - remplacement des niveaux
 - lecture à distance
- Mai 1852 [CRAS] : 3000 mesures, pas de variations claires car mouvements erratiques des bulles (< 5 as/mois)
- Poursuite des mesures jusqu'en janvier 1856

1852 : Acquisition du terrain à Aragorry (Urrugne)



Crédit : SOULU

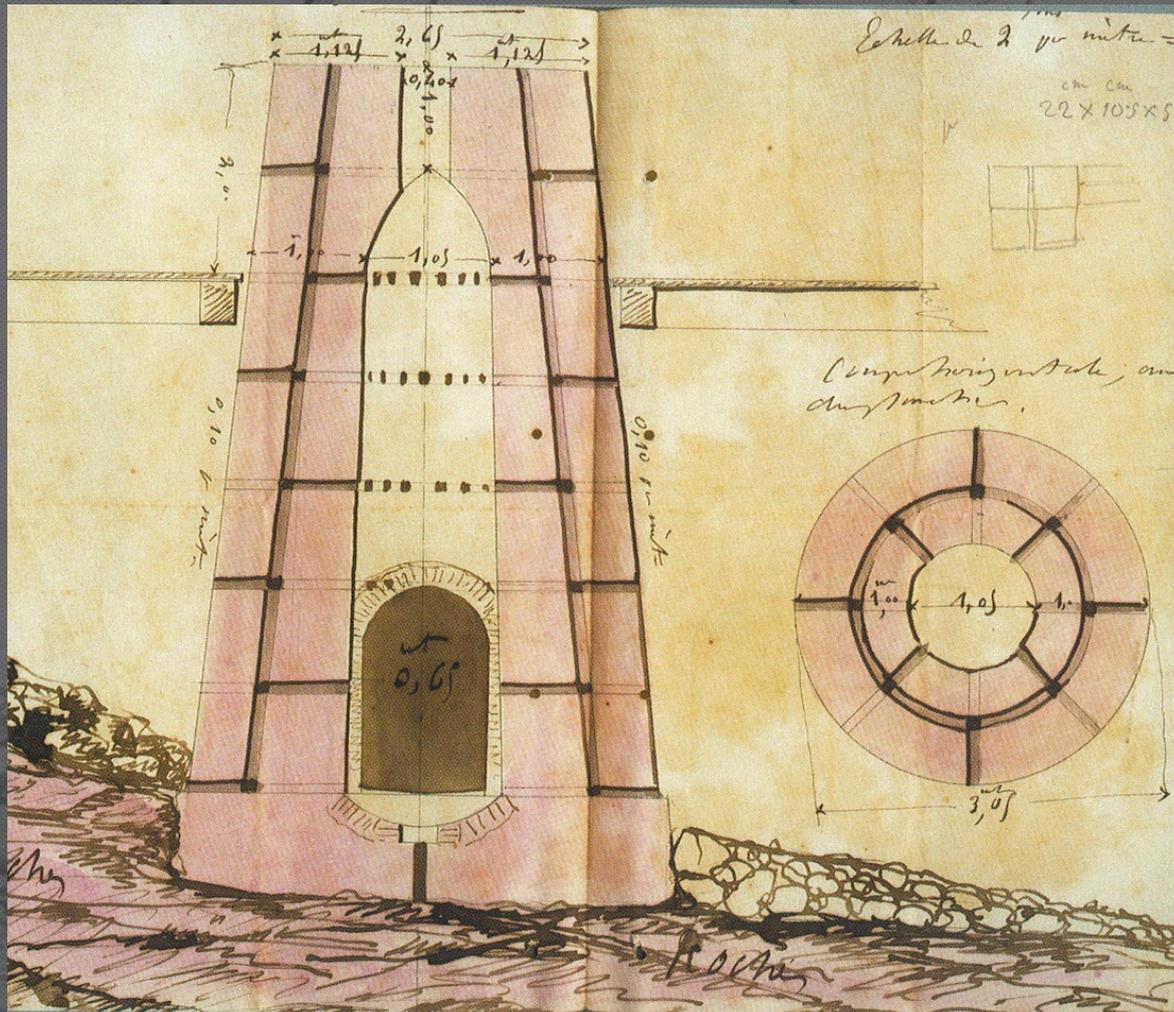
Le principe de la Nadirane



À marée haute, la masse d'eau attire le mercure, déviant ainsi la verticale.
La figure de tient pas compte de la déformation du sol due à la charge océanique.

Crédit : IPGP

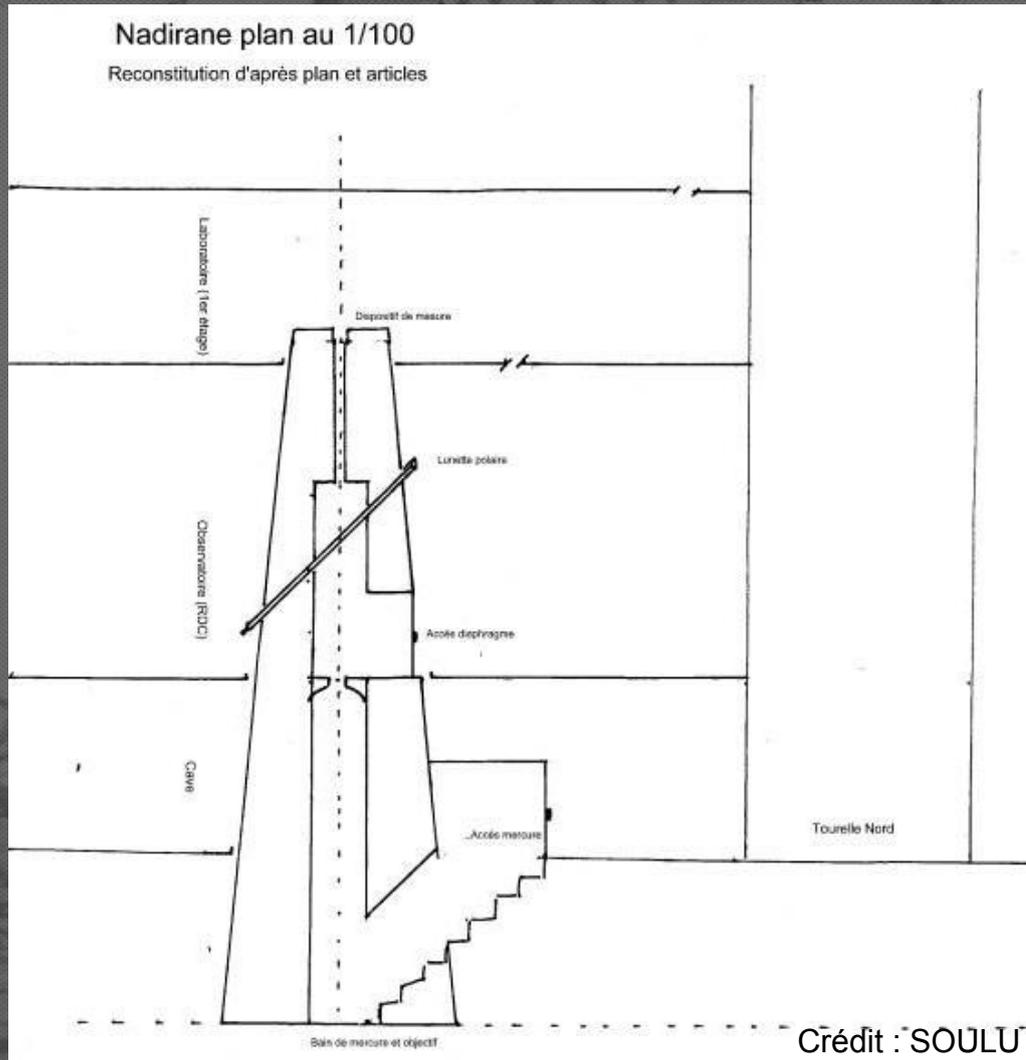
1863 : seconde Nadirane



- Tronc de cône H = 10 m
- 4 à 5 d'attente de stabilisation du béton
- Plaque de laiton avec croisée de fils de platine
- Premières mesures en octobre 1967



1867-1872 : premiers résultats...



- Mercure agité : amélioration par un bassin avec fond rainuré (idem Obs. Paris)
- Malgré cela : *ombres fuyantes, trémoussements, frêtillements de l'image...*
- 1872 : « *Le résultat n'a pas répondu à mes espérances. [...] si l'élévation des eaux de la haute mer attire le pied du fil à plomb, cette attraction est souvent masquée par une ou peut-être plusieurs autres causes.* »
- Précision obtenue par d'Abbadie = 0.2" ~ 1 μ rad...

ASSOCIATION
FRANÇAISE

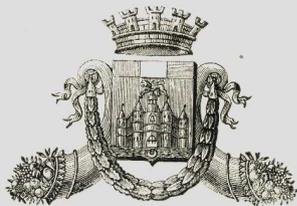
POUR

L'AVANCEMENT DES SCIENCES

COMPTES-RENDUS DE LA 1^{re} SESSION

1872

BORDEAUX



D'ABBADIE. — ÉTUDES SUR LA VERTICALE.

159

M. D'ABBADIE,

Membre de l'Institut.

Études sur la verticale.

(Séance du 11 Septembre 1872.)

La plupart des grandes lignes qui servent comme points de départ aux mesures de l'astronomie et de la géodésie sont reconnues sujettes à des variations périodiques. Le lieu de l'équinoxe, la situation du grand axe de l'orbite terrestre qui en règle la précession et d'autres grandes lignes ont été étudiés depuis longtemps. M. Peters, directeur de l'Observatoire d'Altona, a signalé de légères oscillations dans la position du pôle terrestre et montré que son axe est sujet à de faibles changements. En envisageant l'ensemble des phénomènes, on est porté à dire que, pour la matière inerte comme pour les êtres vivants, l'existence c'est le mouvement.

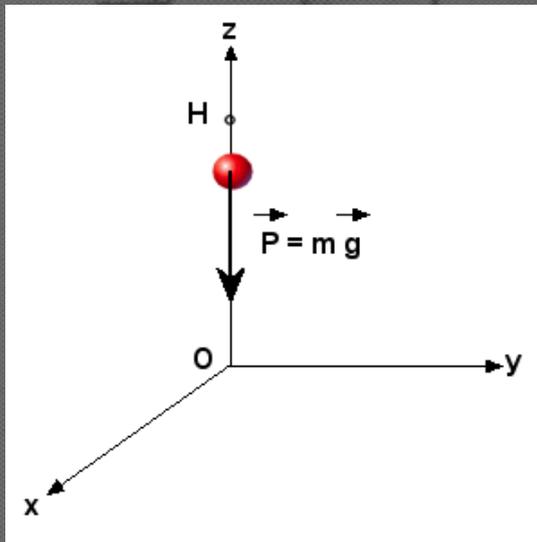
Triste fin de la Nadirane... ?



Crédit : SOULU

- 1879-1880 : nouvelle série de mesures... sans résultats
- 1881 : « *Il est à désirer qu'en étudiant ces mouvements quelque savant, plus heureux que nous, parvienne à démêler toutes les causes de variation dans le lieu de la verticale. Jusqu'à présent en effet, ces causes semblent multiples et leur exposition reste enveloppée de mystère.* »
- 1902 : destruction quasi totale de la Nadirane par l'abbé Aloys Verschaffel [1850-1933]

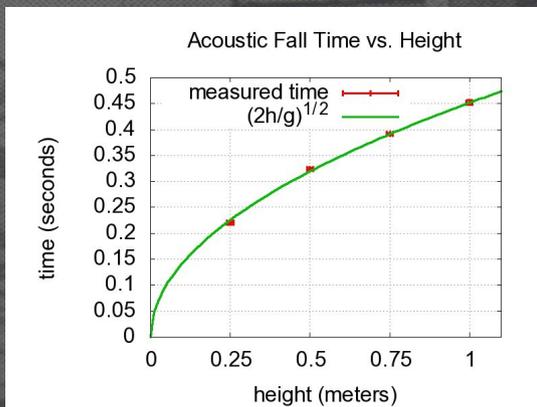
1876: mesures des variations d'intensité de la pesanteur



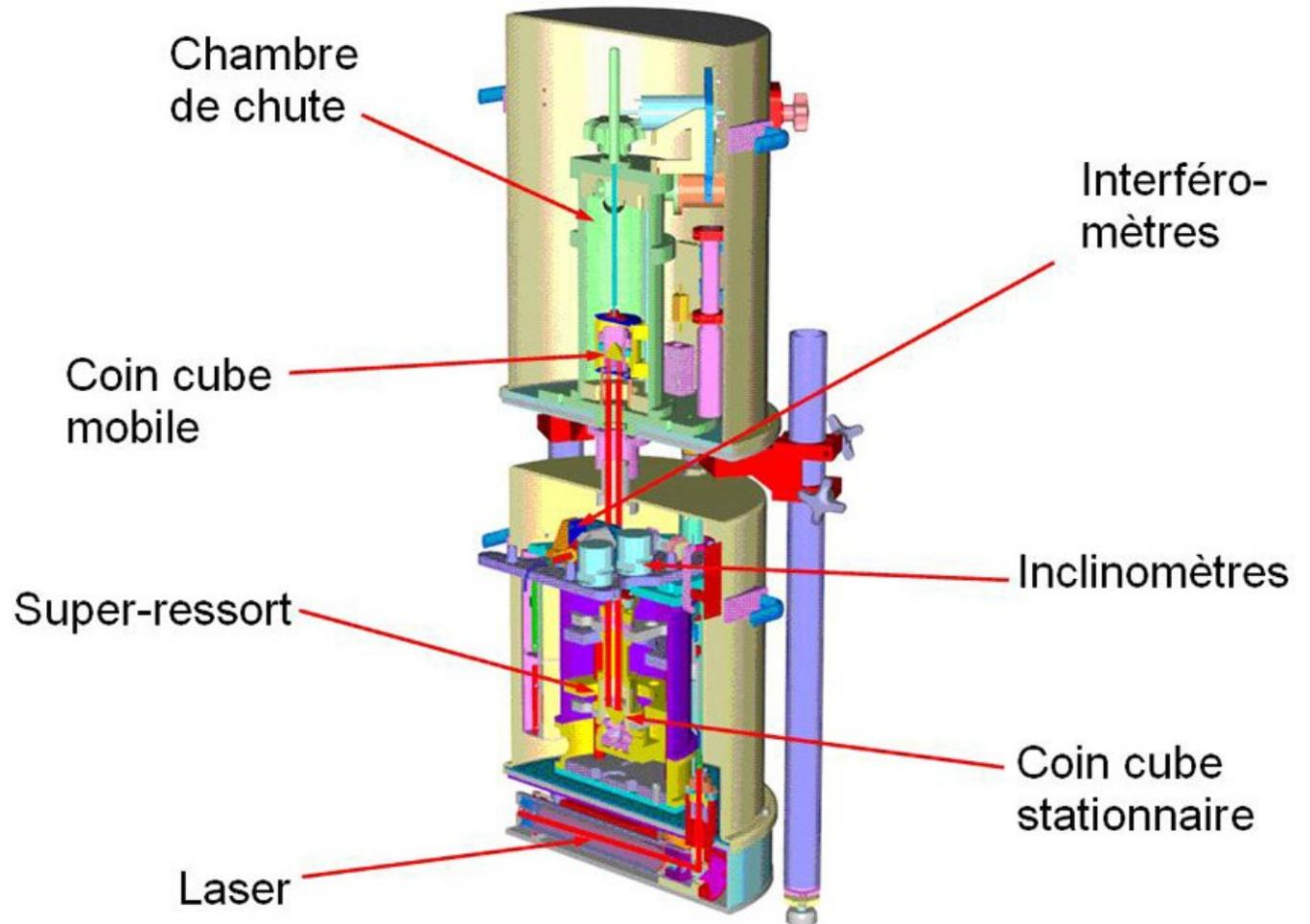
- Mesure du temps de chute d'un corps
- Balle de fusil, $H = 18$ m, comptage des vibrations d'un diapason
- 1883, scepticisme de George Darwin : influence certaine des vibrations du bâtiment
- 1892, Eleuthère Mascart [1837-1908] : calcul d'erreur sur la mesure du temps ($< 1/10000$ s)

...

- 1970 : A. Sakuma réalise le premier gravimètre absolu basé sur la chute des corps



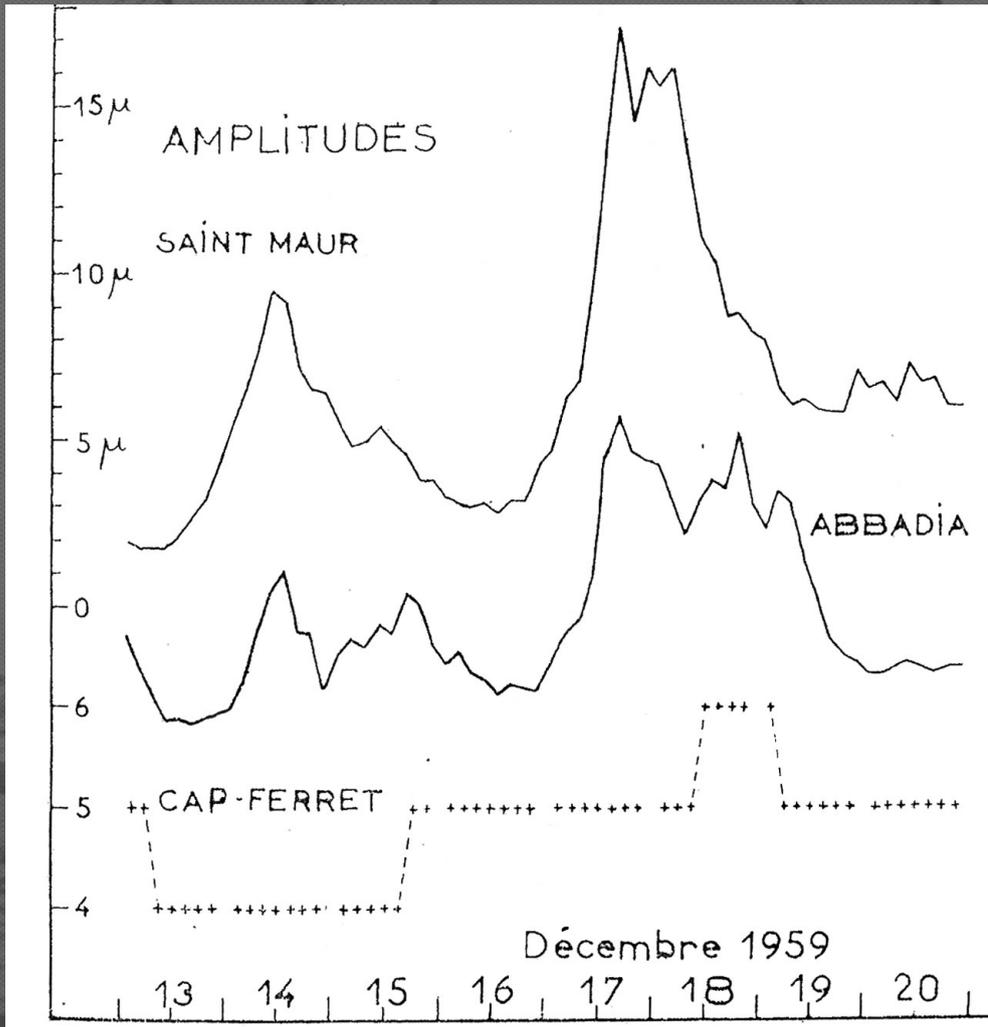
Gravimètre absolu aujourd'hui



Tremblements de terre

- 1852 : « *Mes 3000 observations de niveaux, faites à des heures déterminées, ont permis de noter des tremblements de terre qui n'ont pas été enregistrés ailleurs à cause de leur peu d'intensité.* »
- 11-16 octobre 1852 : détection à Audaux des ondes du séisme de Valone (IX) et de Nerat (VIII)
 - 1877 : détection du séisme du Chili par Nyrèn
 - 1889 : premier enregistrement du séisme de Tokyo par le pendule horizontal de von Rebeur-Paschwitz
- 1854 : « *Idées pour l'observation des tremblements de terre* » (Soc. Météo.)

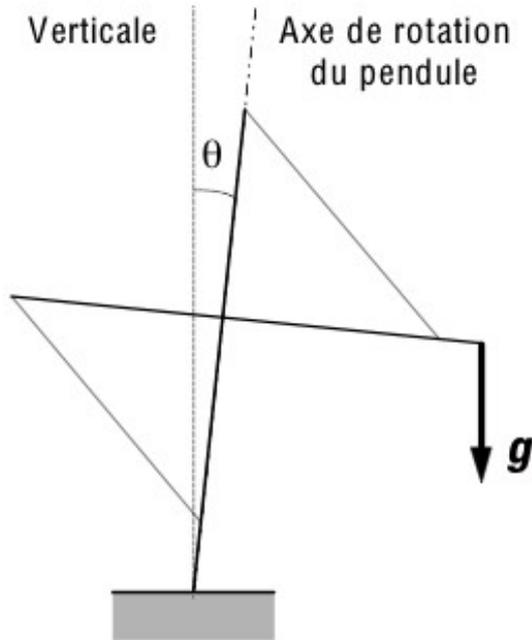
Microsismicité



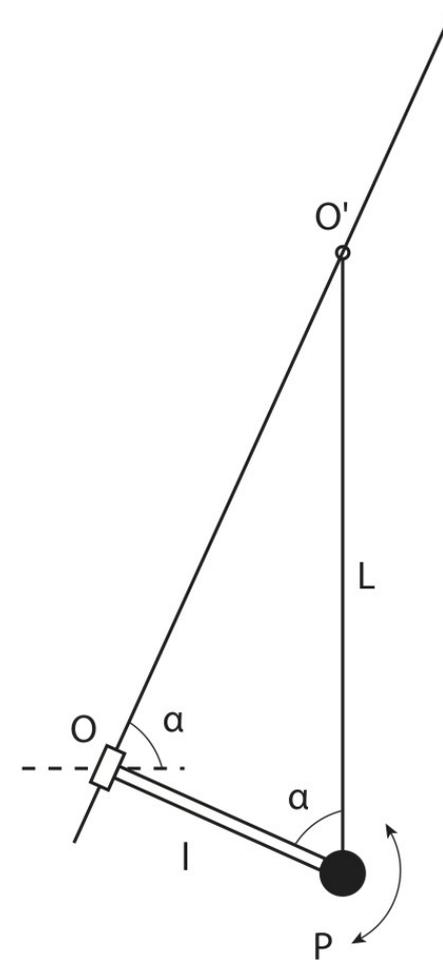
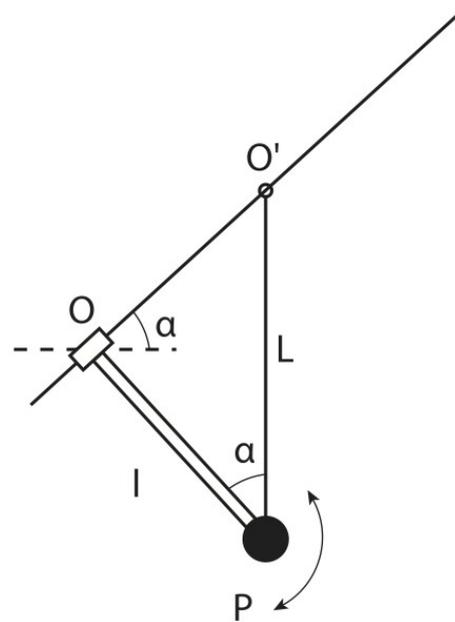
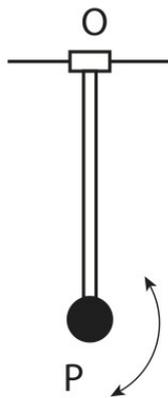
- Microsismicité = houle océanique créant des ondes sismiques se déplaçant à 1-3 km/s dans la croûte terrestre
- 1959 : forte dépression au SE de l'Islande... enregistrée simultanément à Saint-Maur et à Abbadia

[Poirier et al., 2009]

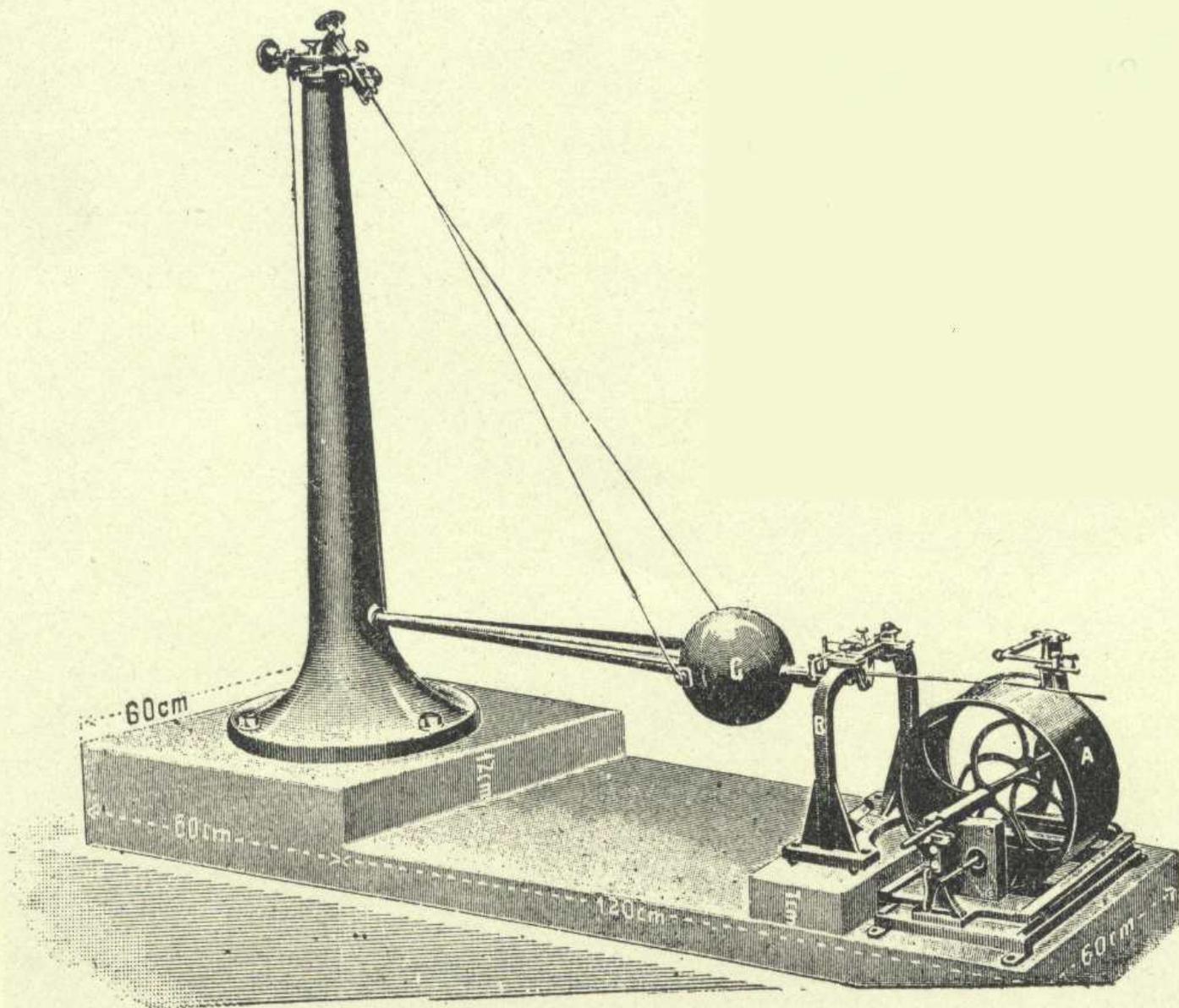
Le pendule de Zöllner



$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{g}{4\pi^2 l} T^2 = KT^2$$

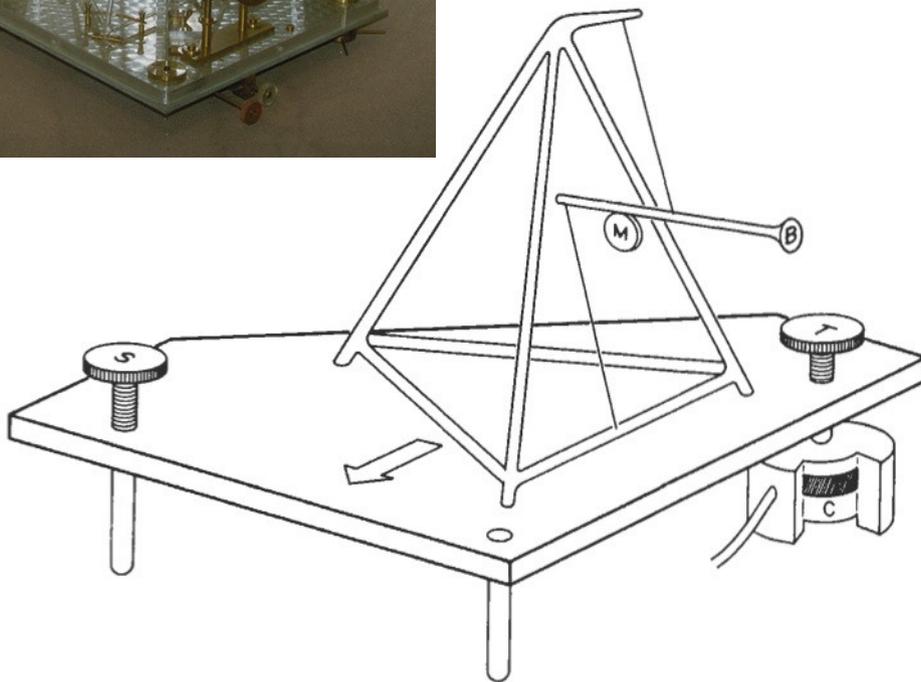
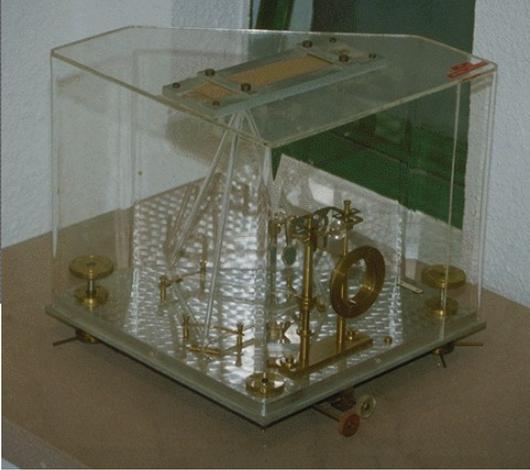


Crédit : IPGP



Péndulo horizontal de Estrasburgo

Réalisations modernes du pendule de Zöllner



Paul Melchior - 1960

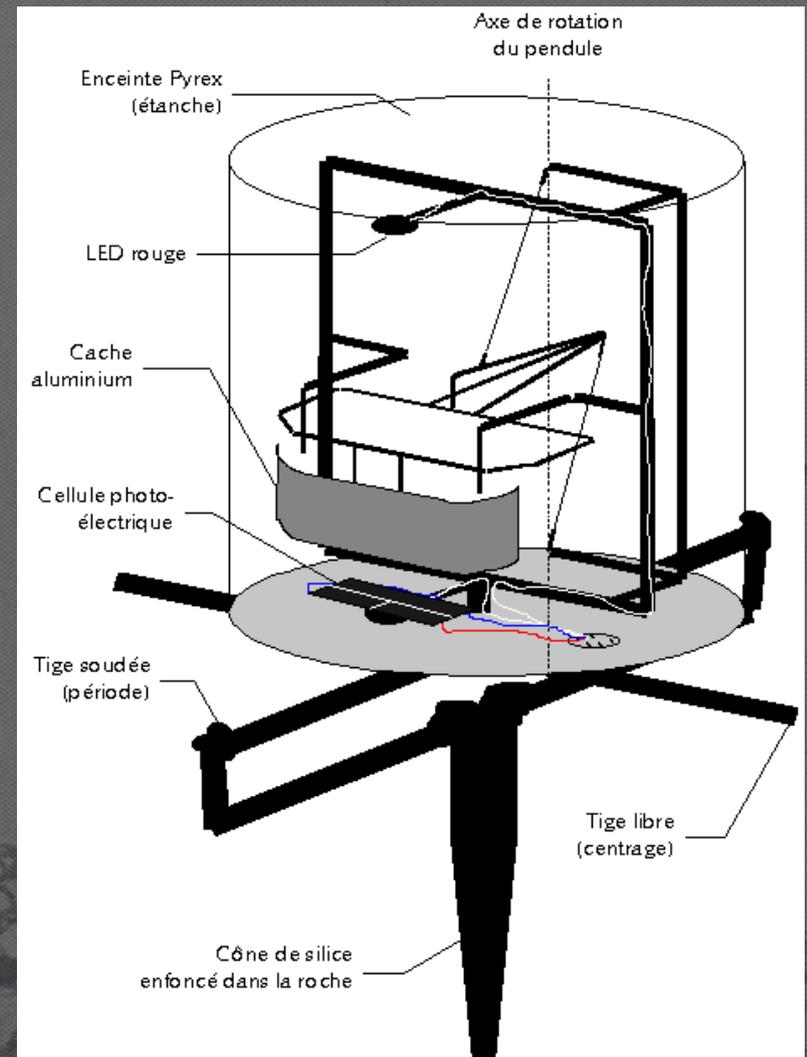


Pierre-Antoine Blum 1963-2010

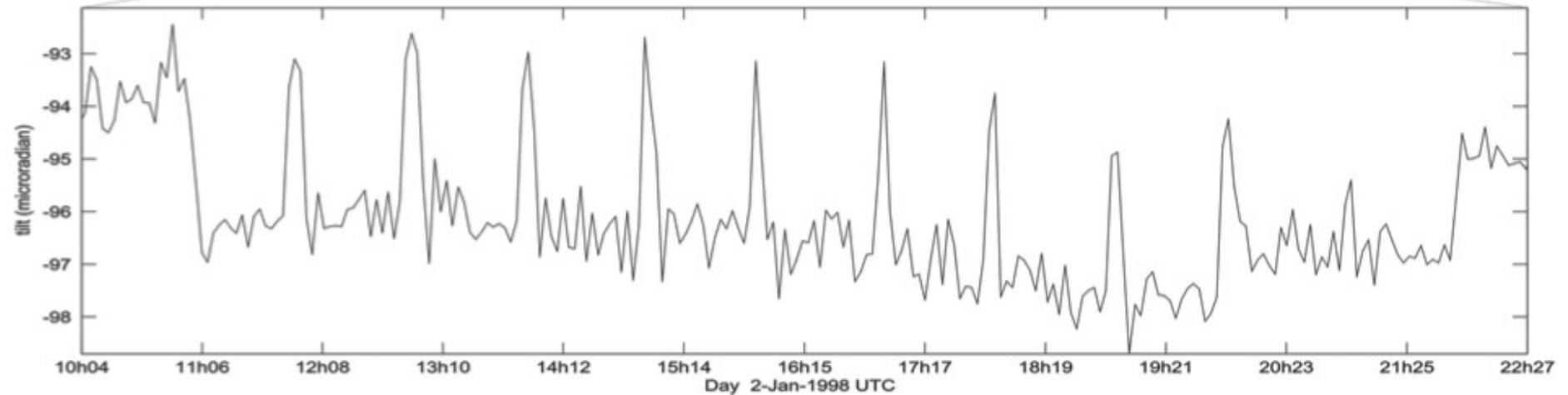
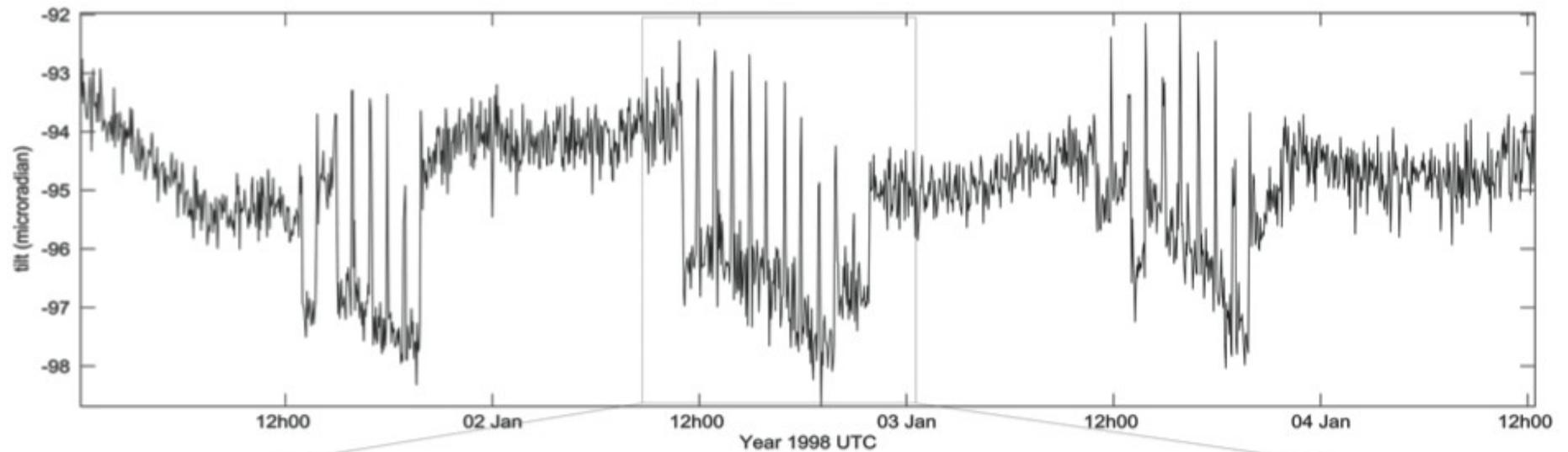
Pendule de Blum

- Entièrement réalisé en silice (fils de suspension $\varnothing = 15 \mu\text{m}$)
- Résolution = 10^{-10} rad [Blum, 1963]
- Dérive long terme $< 10^{-7}$ rad
- Coeff. Thermique = $0.54 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- Taux de fluage = $2 \cdot 10^{-7}$ /an
- Couplage mécanique “parfait”

[Beauducel et al., 1998]



Pendule de Blum: La Géode

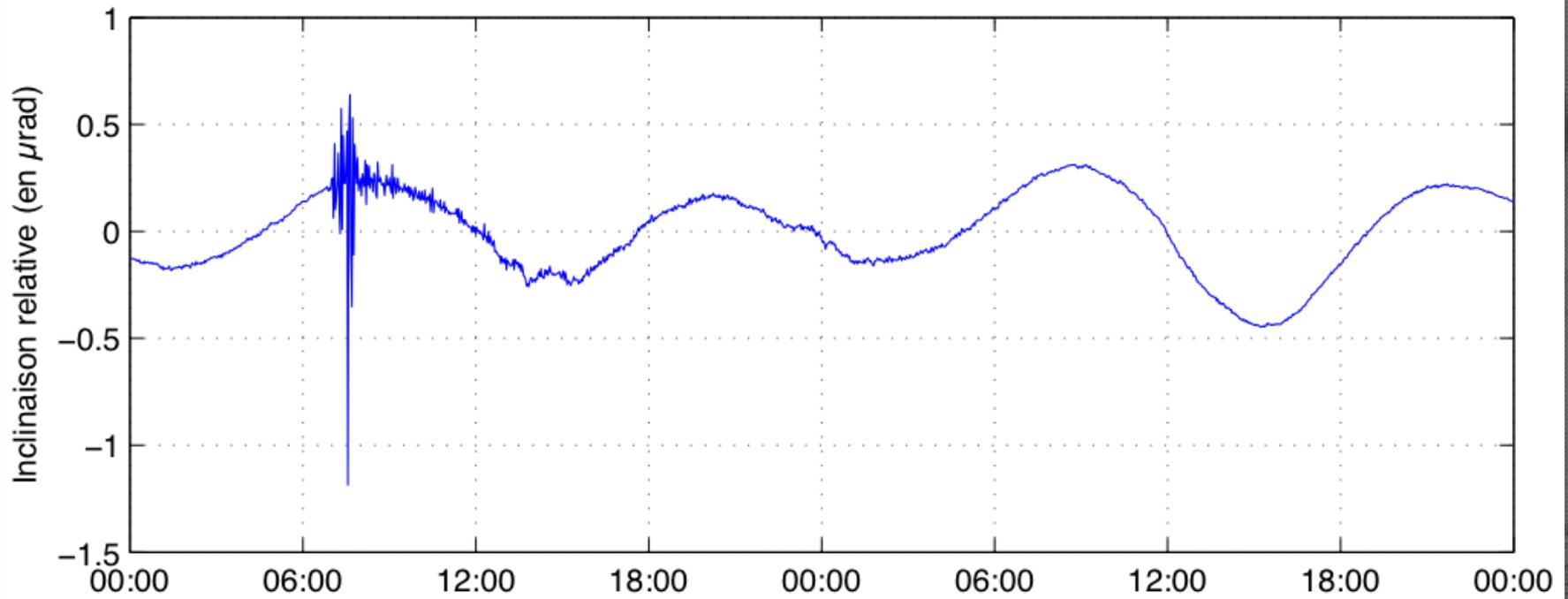
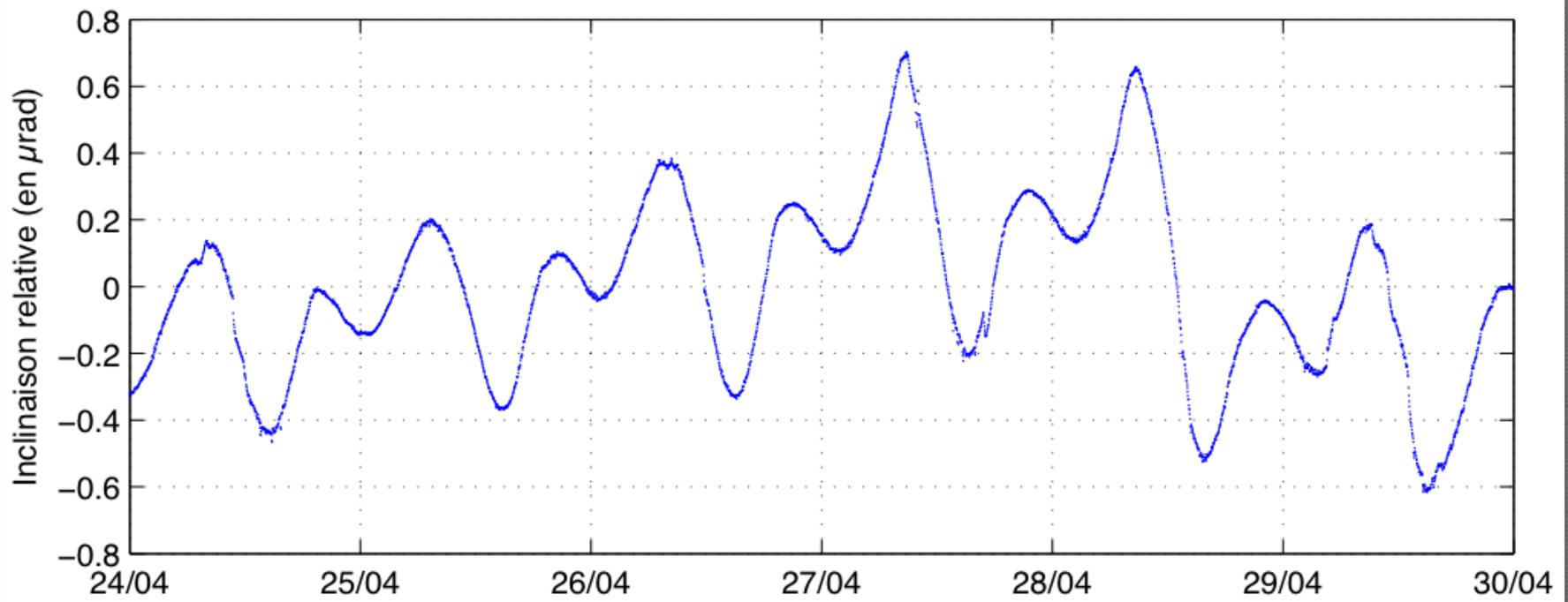


[Esnoult, 1998]

La Nadirane 140 ans plus tard...

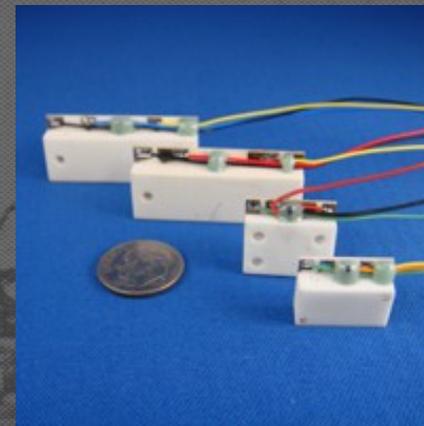
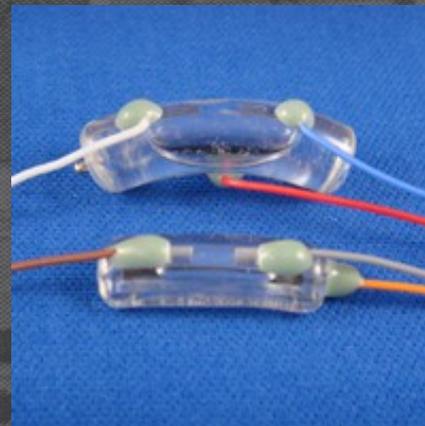
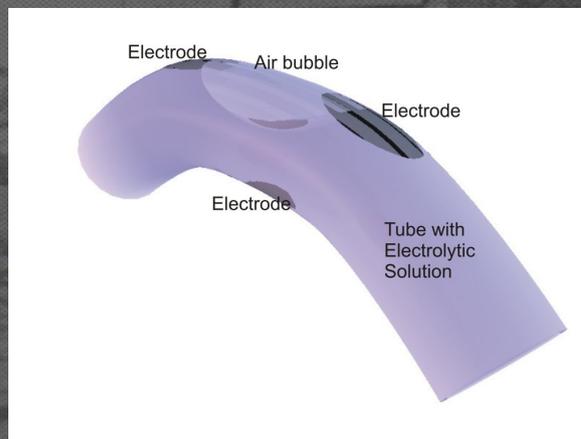
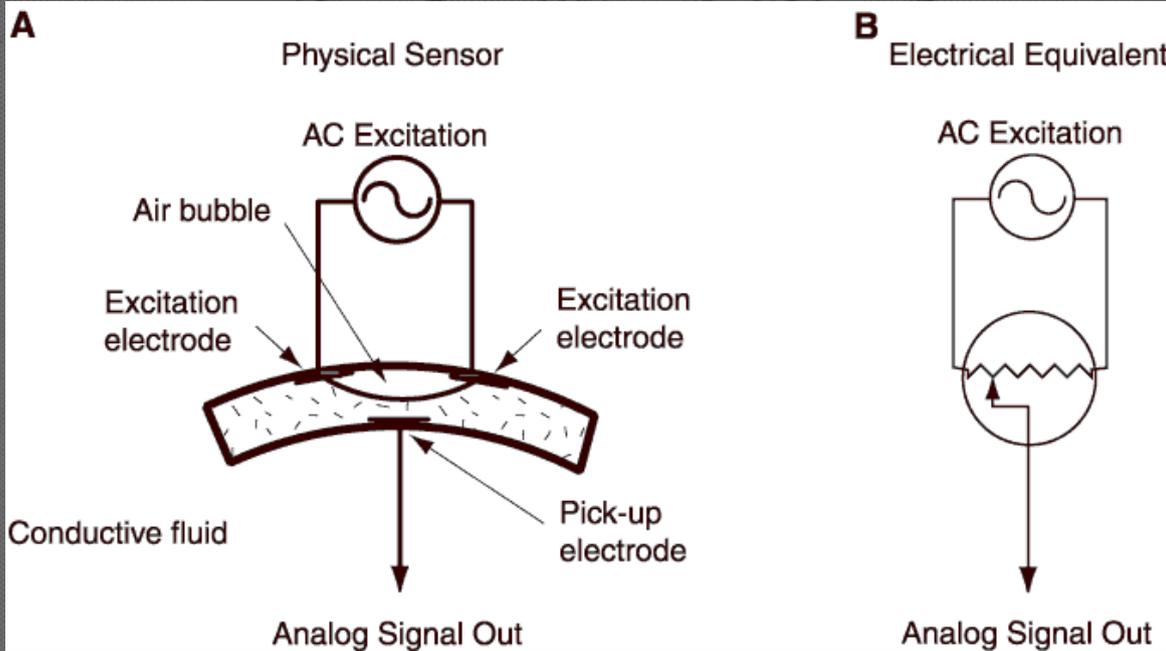


Projet Académie des Sciences/IPGP:
Jean-Louis Le Mouël, Jean-Paul Poirier,
Marie-France Esnout, Christophe
Brunet, François Beauducel (2010)



Séisme du Chili 27/2/2010 06:34 UTC M=8.8

Inclinomètres à bulle moderne



Couplage instrumental: forages peu profonds au Piton de la Fournaise

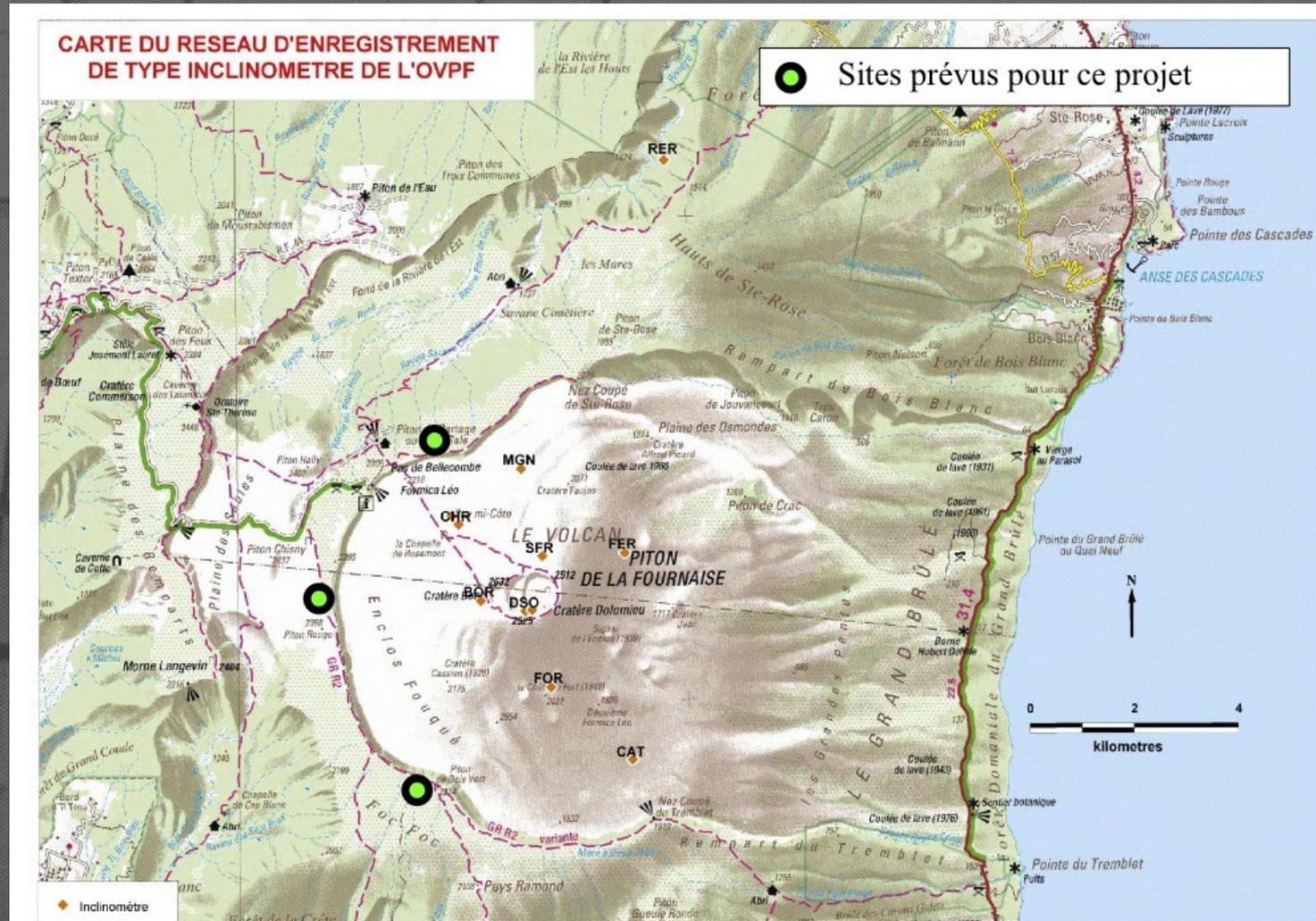
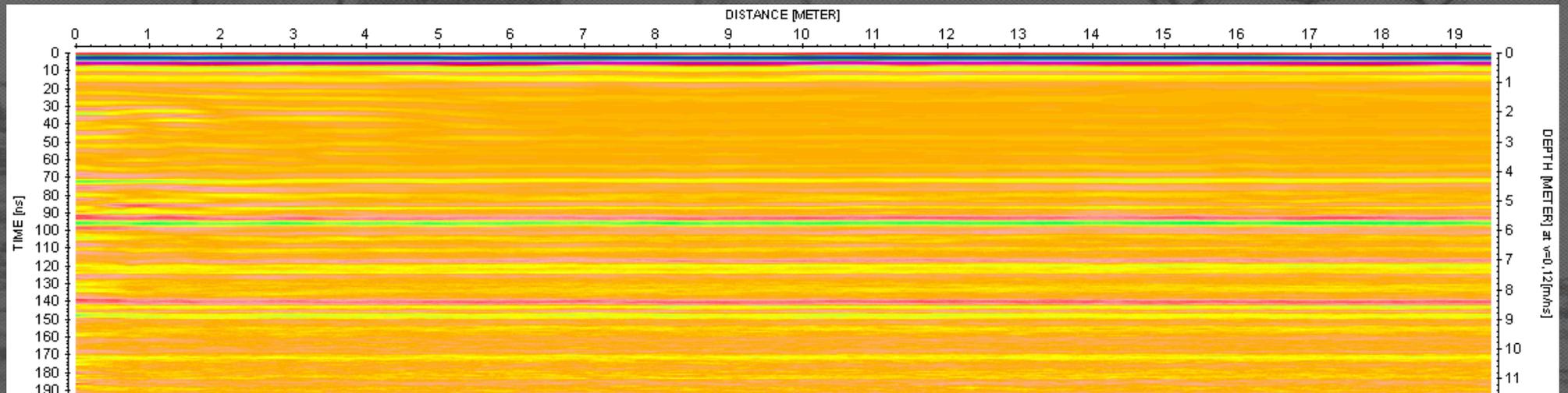
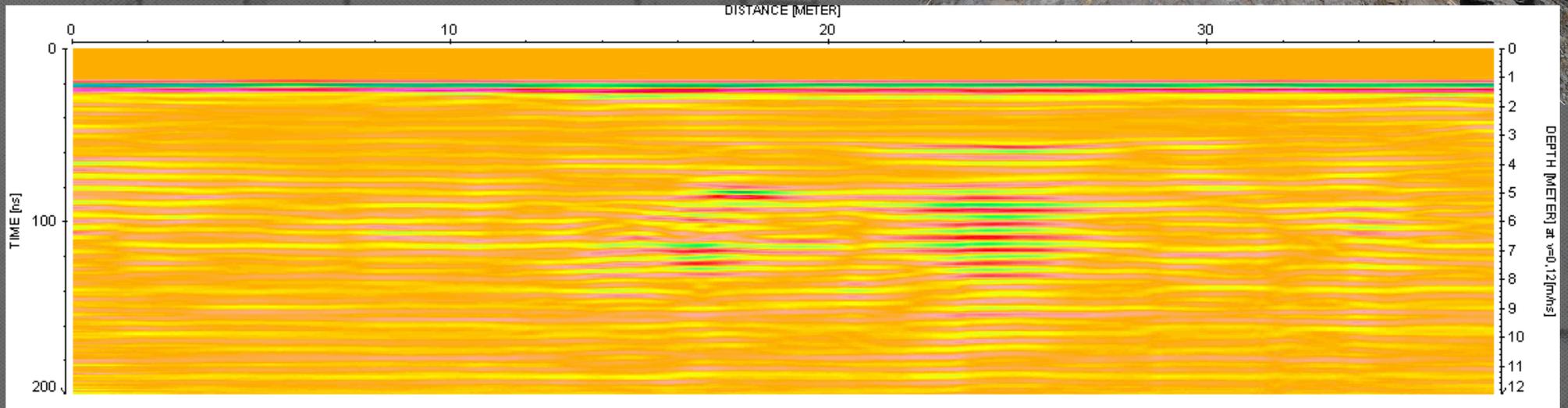
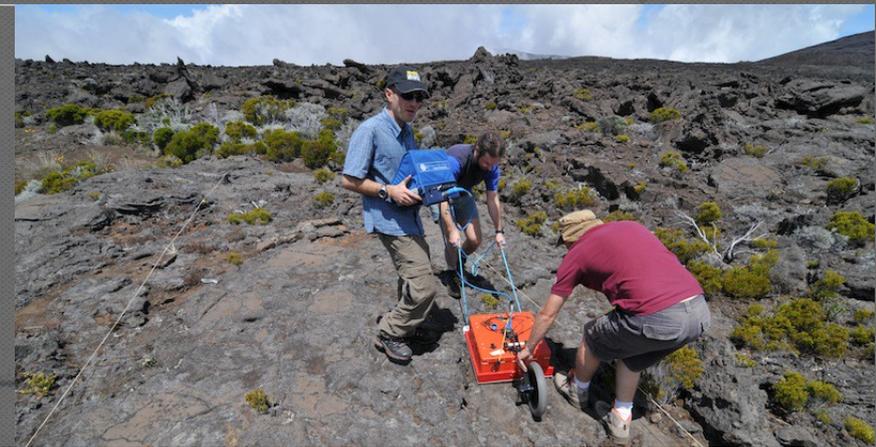


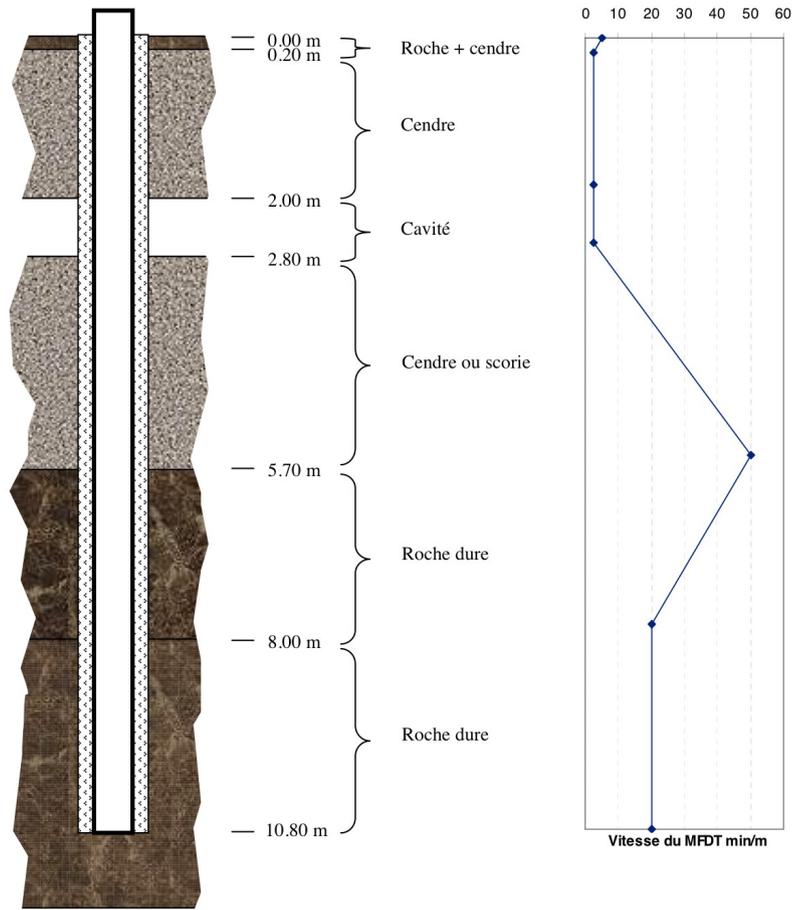
Illustration 1: Carte du réseau actuel d'inclinomètres au Piton de la Fournaise, et emplacement des sites envisagés pour les nouvelles stations en forage.

Sélection du site par prospection radar

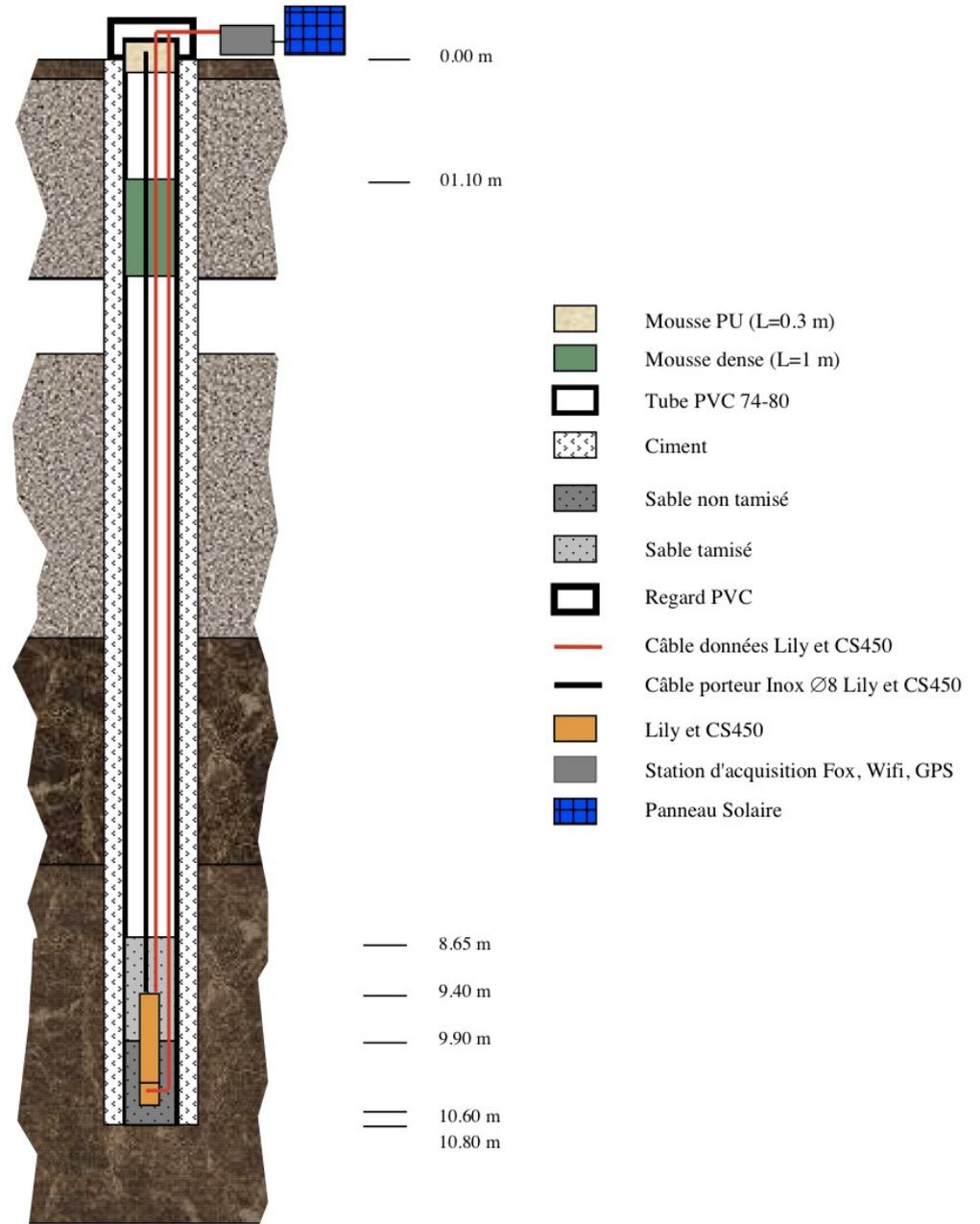


Forage Enclos

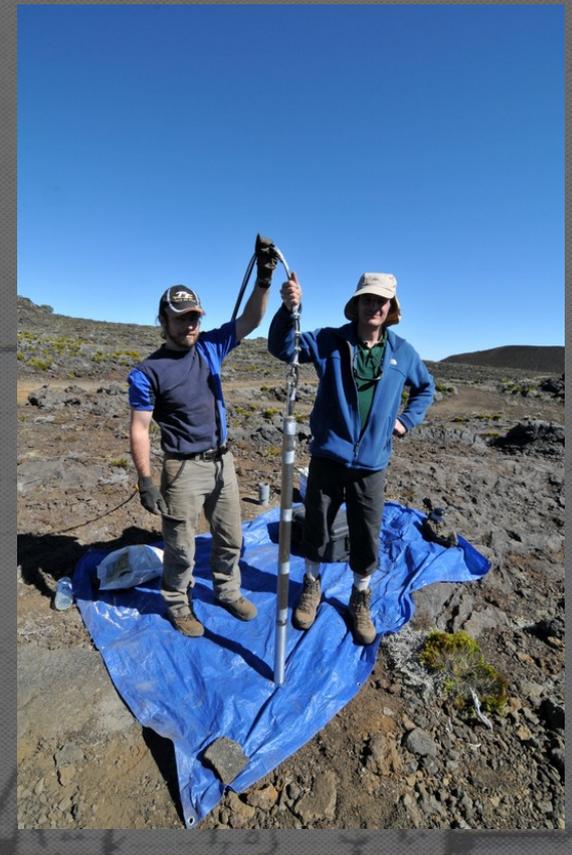
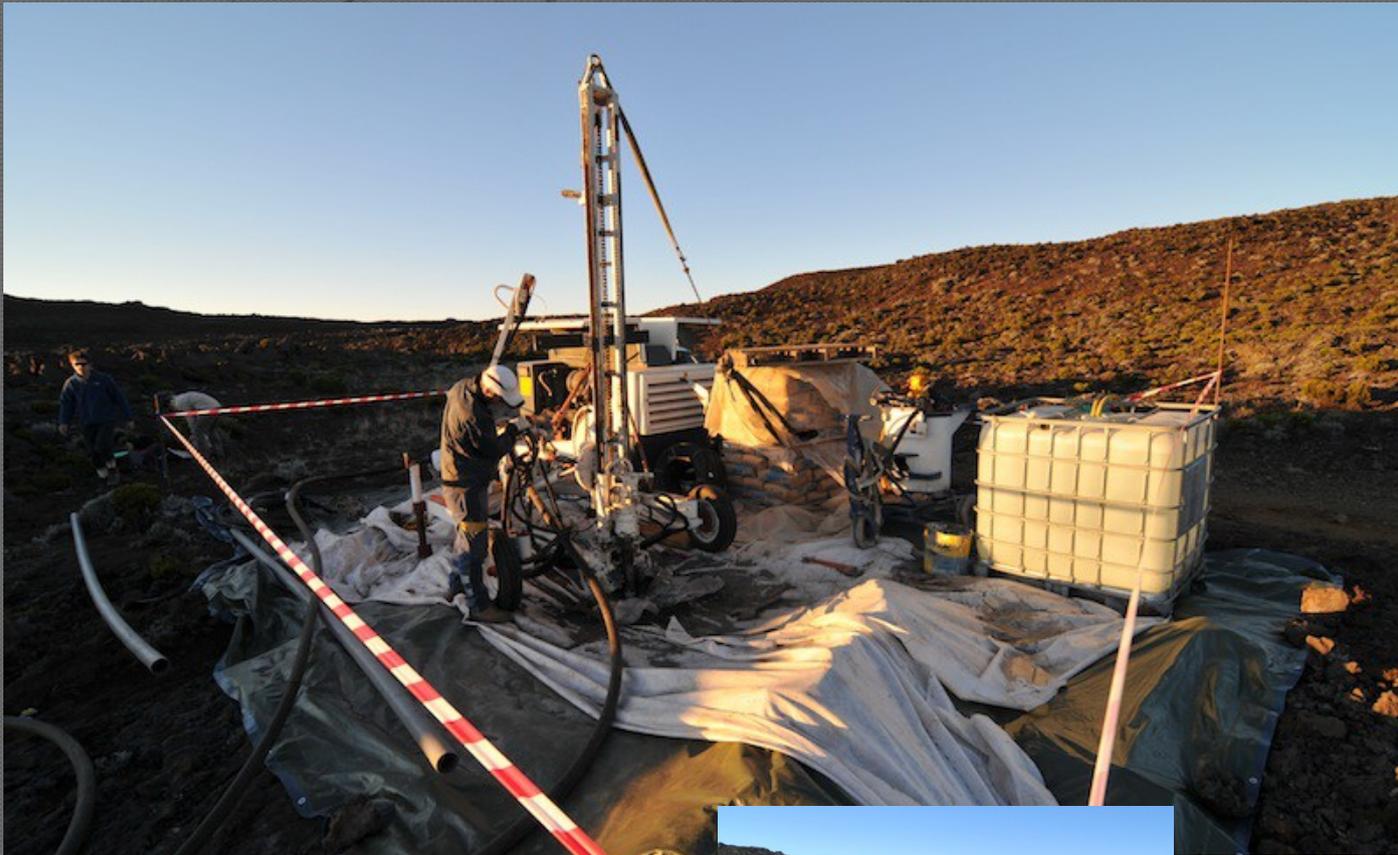
La Réunion, novembre 2010

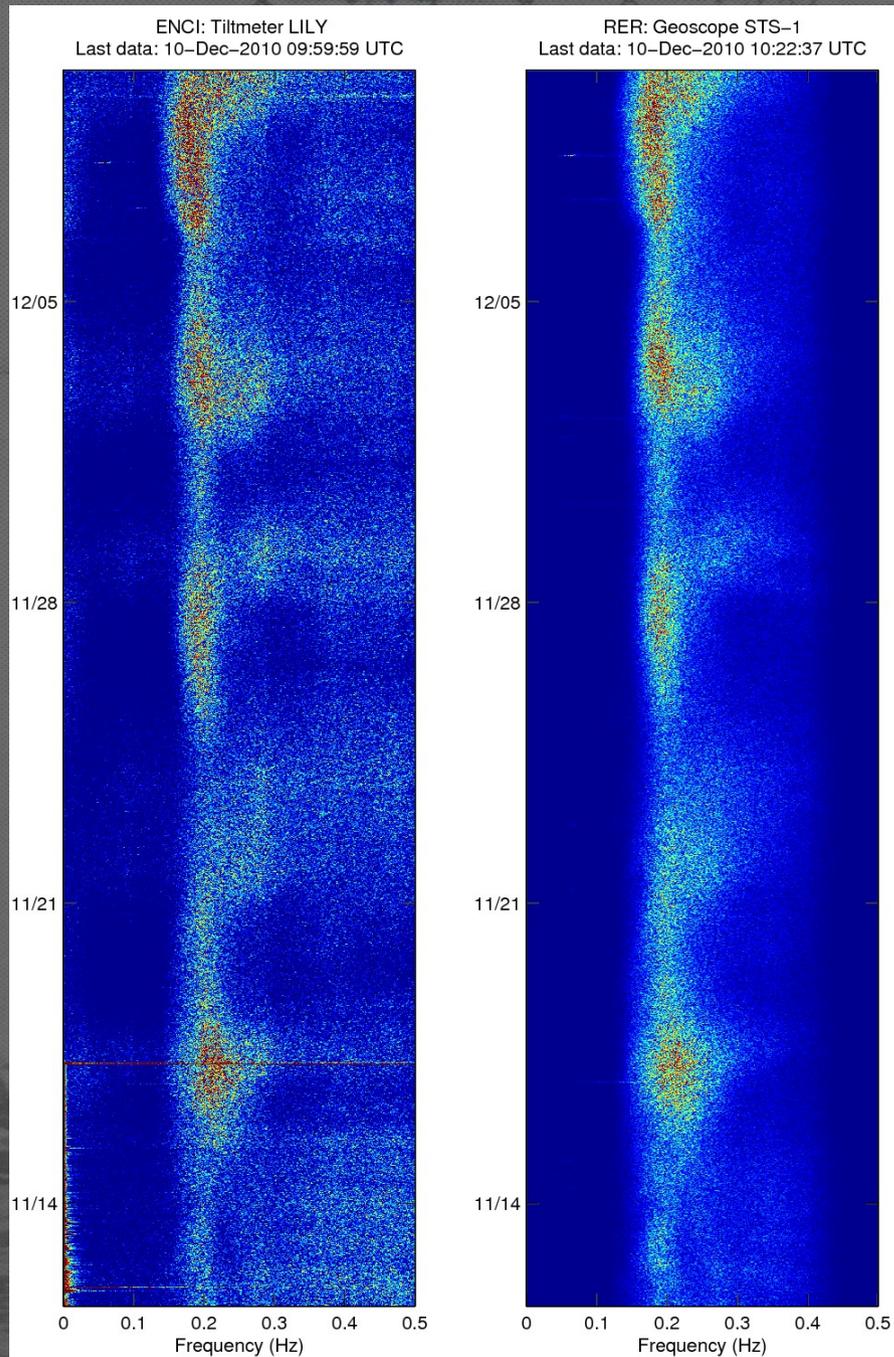


ciment Ø 105
 tube PVC 74-80

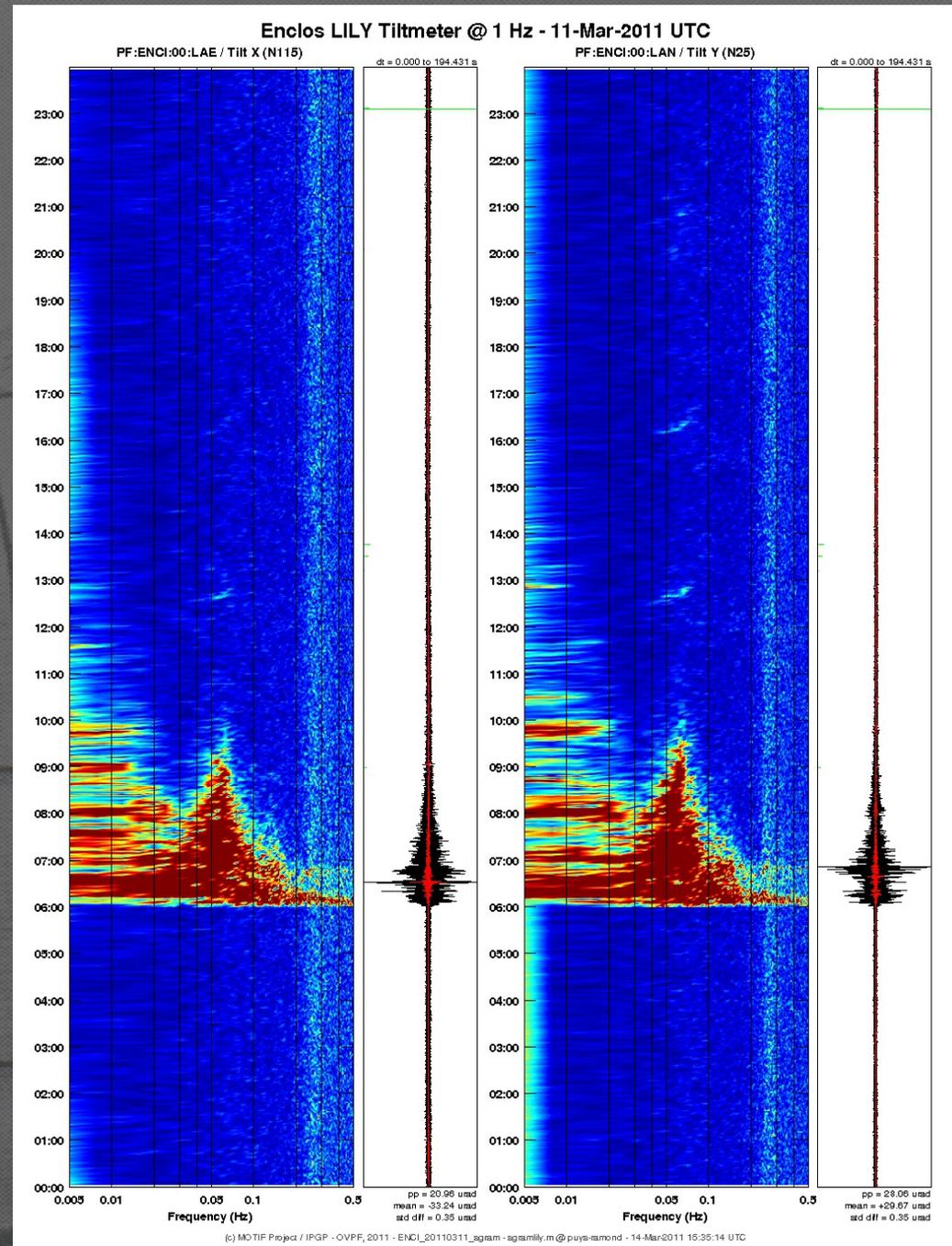


- Mousse PU (L=0.3 m)
- Mousse dense (L=1 m)
- Tube PVC 74-80
- Ciment
- Sable non tamisé
- Sable tamisé
- REGARD PVC
- Câble données Lily et CS450
- Câble porteur Inox Ø8 Lily et CS450
- Lily et CS450
- Station d'acquisition Fox, Wifi, GPS
- Panneau Solaire

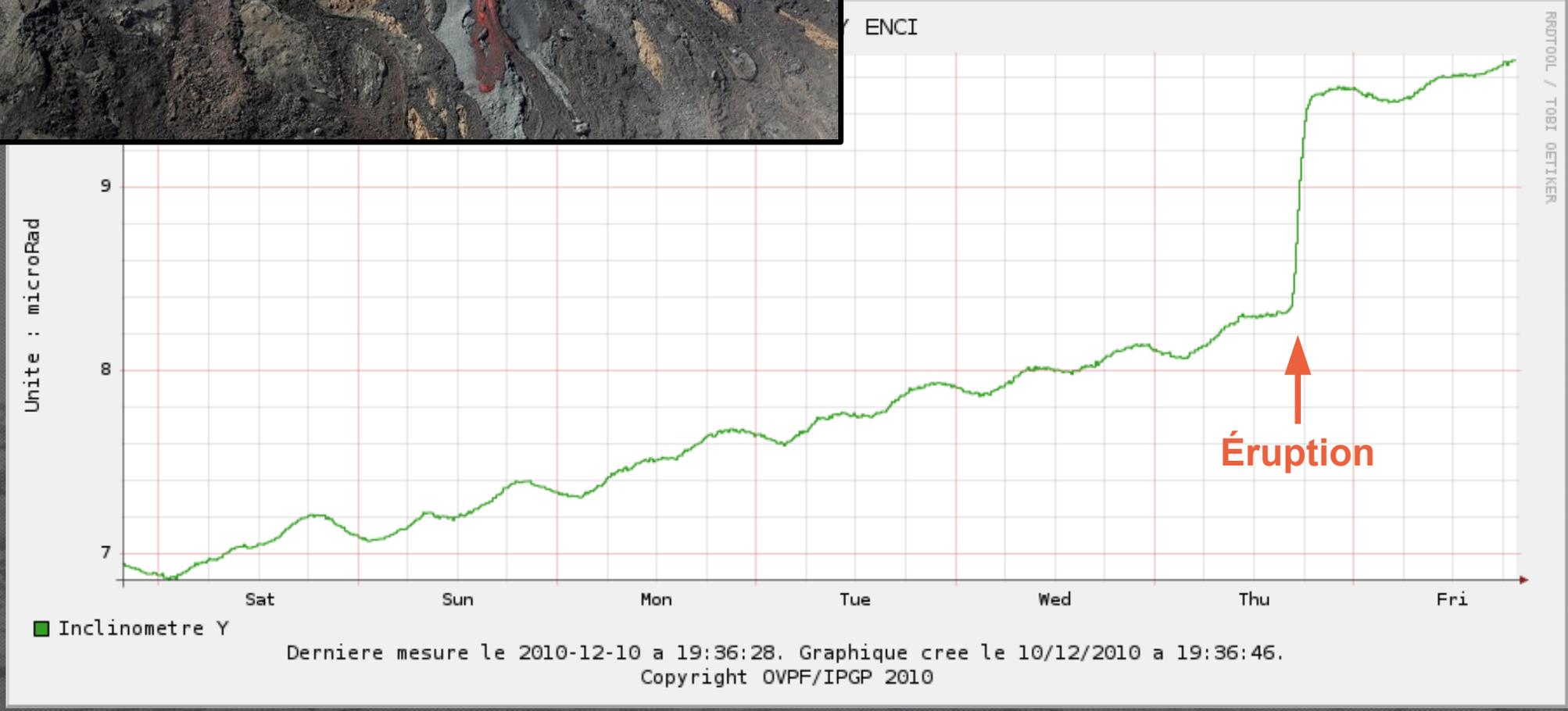
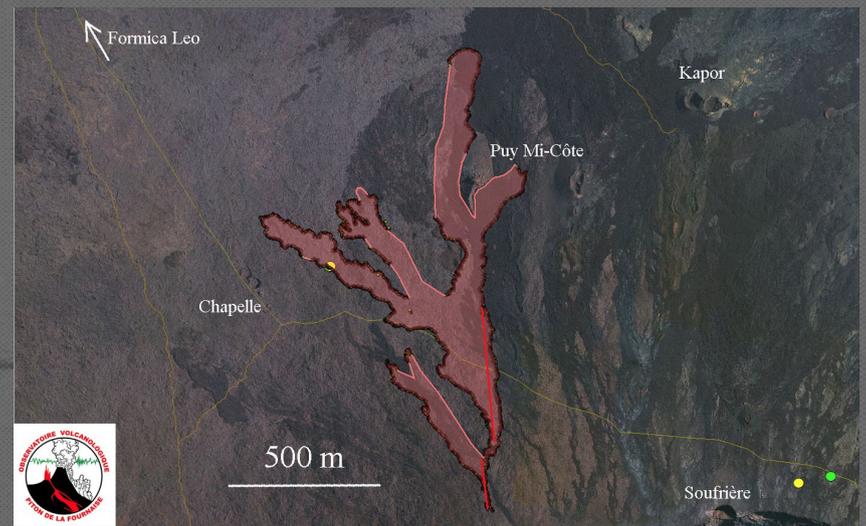




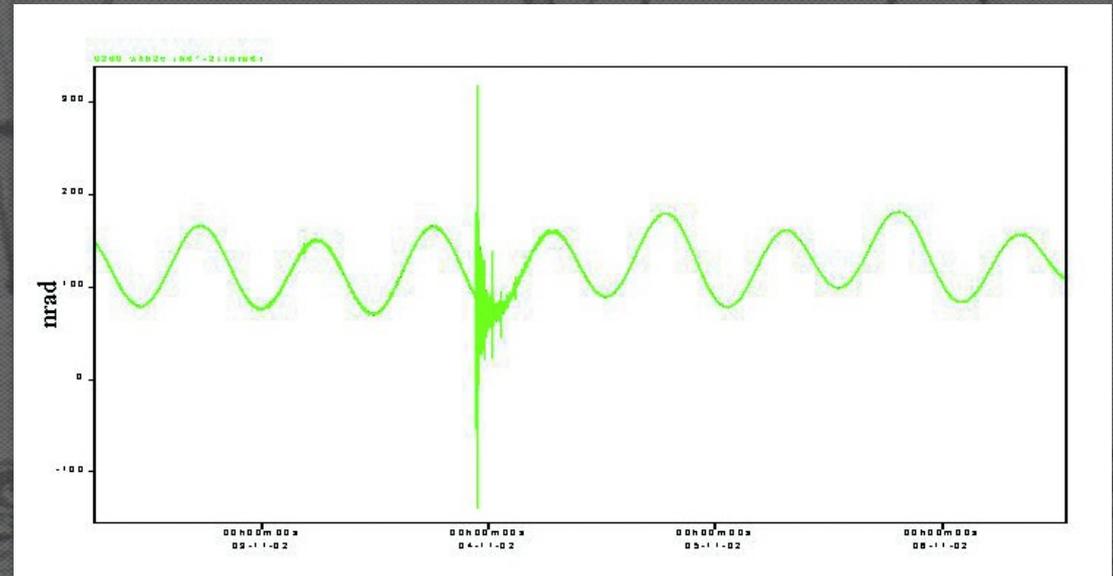
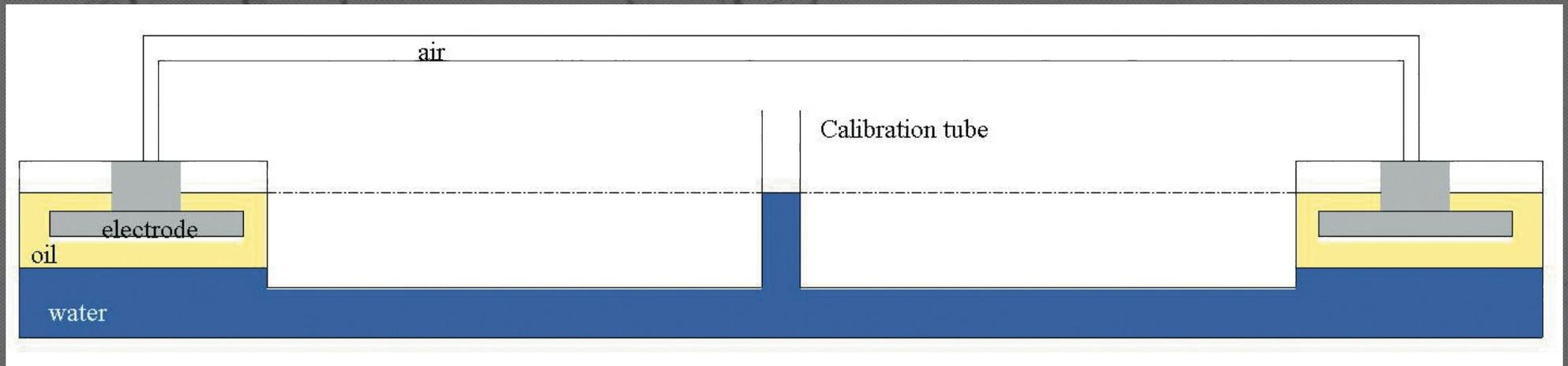
Variations de la houle océanique



Séisme du Japon (11 février 2011)



Inclinomètres longues bases (water tube)



Chili: inclinomètre longue base [Boudin et al., 2008]

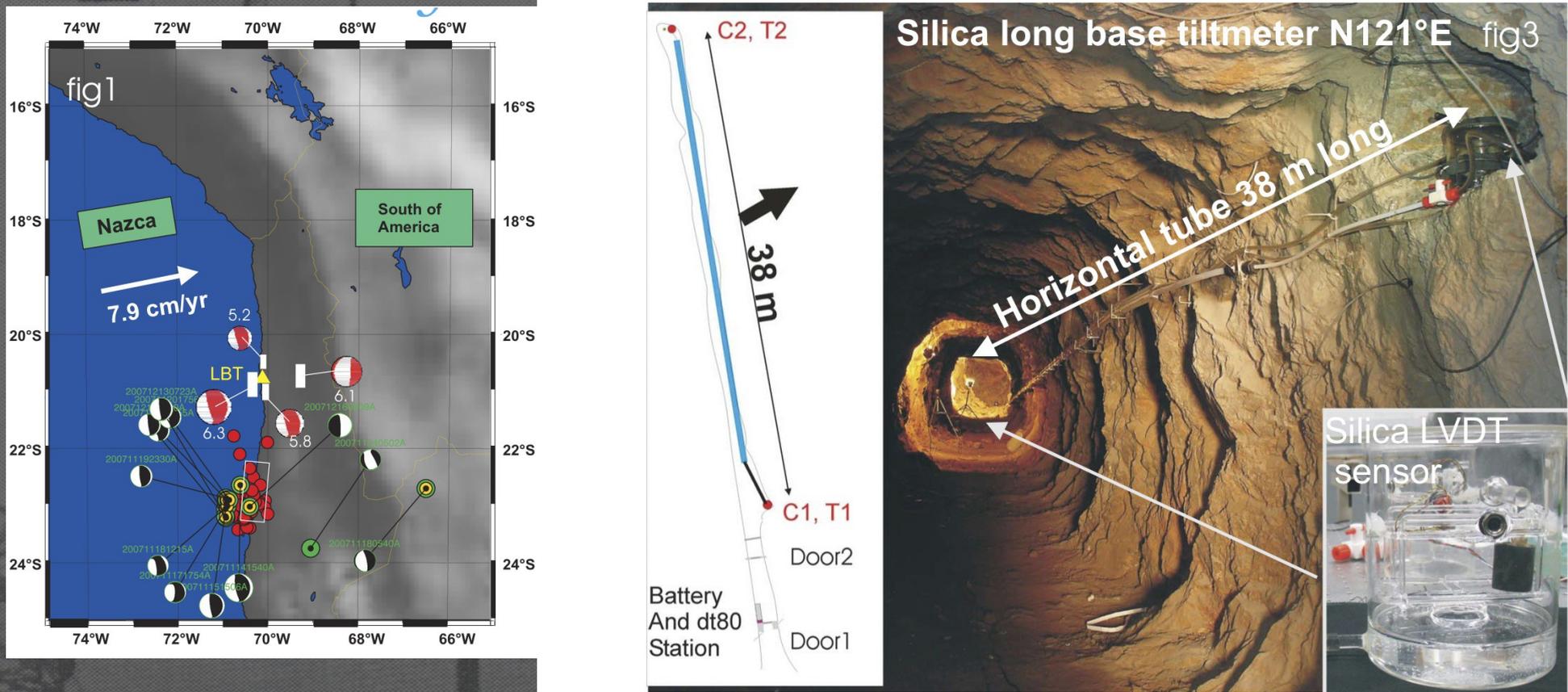
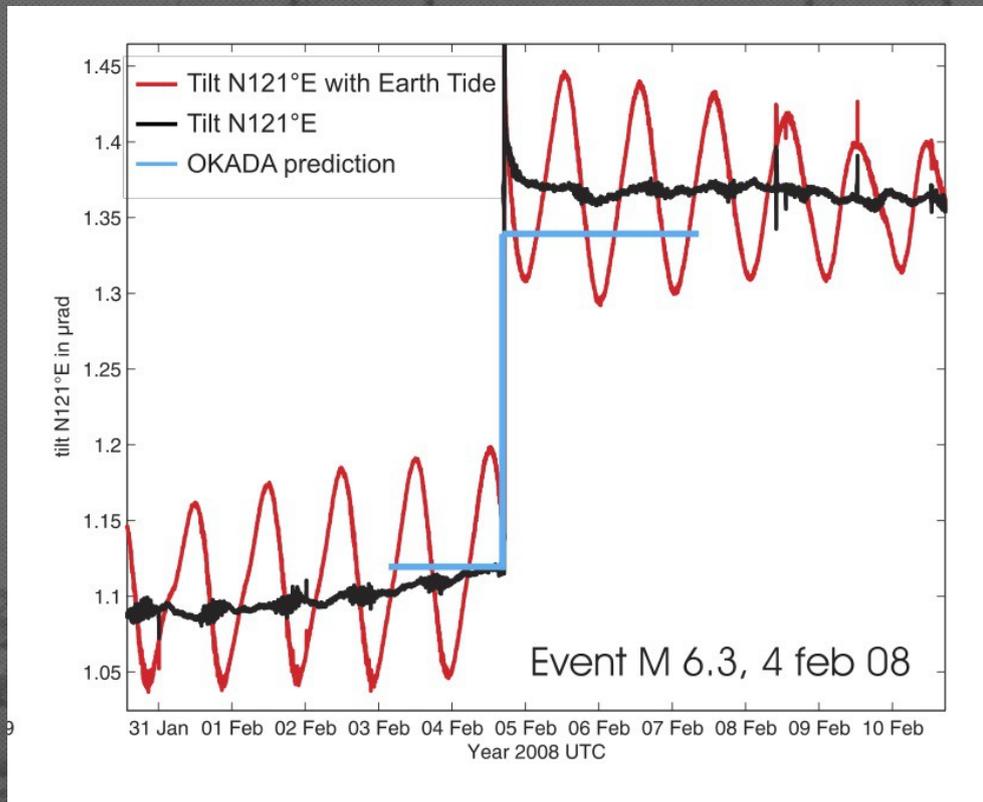
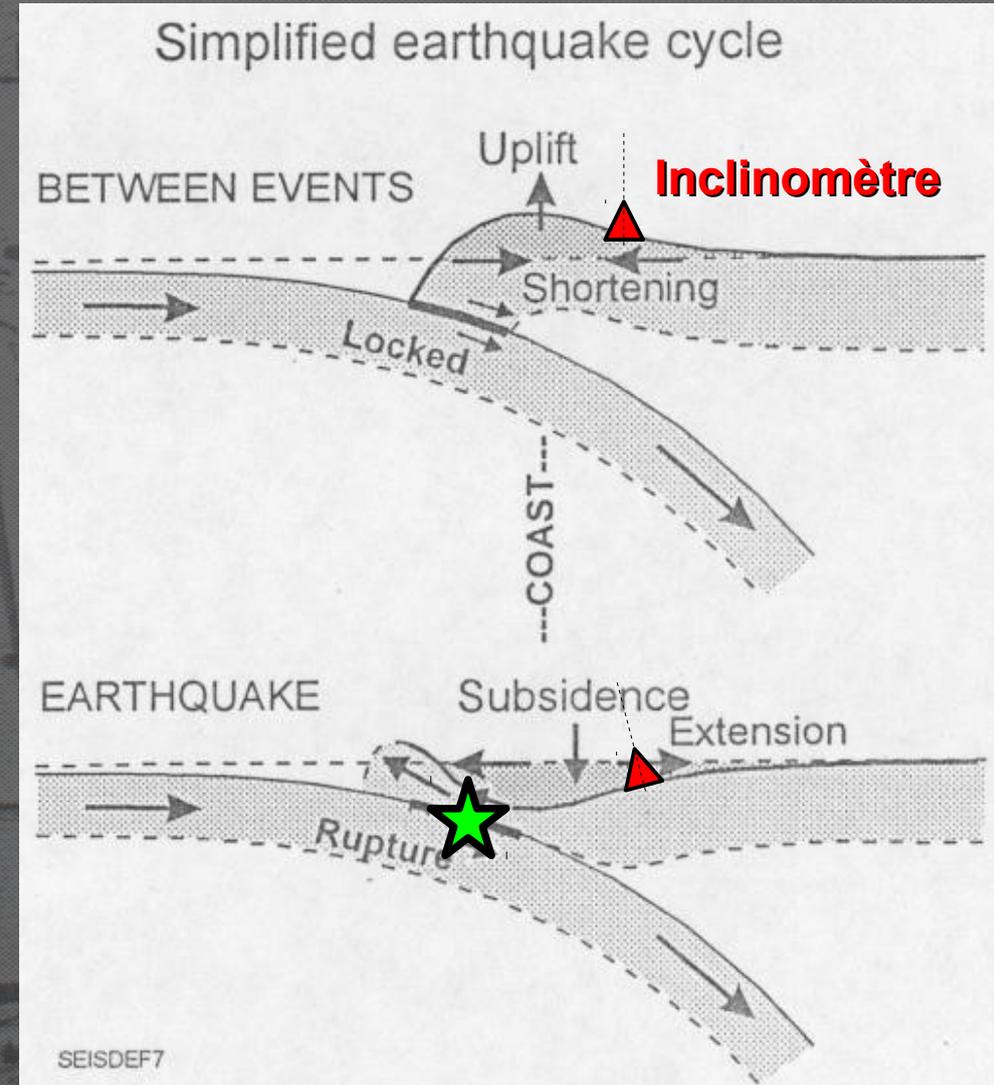


Fig 3: The instrument is installed on a 38 m long base in a Mine tunnel . It is perfectly horizontal to minimize the thermal impact on the signal.

Mesure des déformations tectoniques liées aux séismes



[Boudin et al., 2008]



Conclusions

- Grand explorateur, dans ses voyages mais aussi en physique du globe
- Observateur, il aimait la mesure et les instruments, et les pousser à leurs limites
- d'Abbadie philanthrope : il aurait sûrement été séduit par les applications actuelles du champ de ses recherches à la réduction des risques naturels

- ✓ Poirier J.-P., A. Turner (2002). Antoine d'Abbadie. *Académie des Sciences, coll. « Mémoire de la science 2 »*, pp 127.
- ✓ Poirier J.-P. (2009). Antoine d'Abbadie - Voyageur et physicien du globe au XIXe siècle. *Éditions Hermann*, pp 128.
- ✓ Sources documents Abbadia : Céline DAVADAN et Frédéric SOULU (Fondation A. d'Abbadie, Académie des Sciences).