





## Risque volcanique

aléas	enjeux	vulnérabilité	prévention
coulées de lave	habitations	oui	aménagement territoire
explosions	infrastructures		alerte / évacuation
téphras	trafic aérien		paravolcanique ?
nuées ardentes			
lahars			
avalanches de débris			
gaz			

## Risque volcanique

aléas	enjeux	vulnérabilité	prévention
coulées de lave explosions téphras nuées ardentes lahars avalanches de débris gaz	habitations infrastructures trafic aérien	oui	aménagement territoire alerte / évacuation paravolcanique ?

## Risque sismique

aléas	enjeux	vulnérabilité	prévention
mouvements du sol (magnitude, distance, source, effets de site, glissements)	habitations infrastructures	oui/non	aménagement territoire parasismique ! alerte précoce ?

## Risque volcanique

aléas	enjeux	vulnérabilité	prévention
coulées de lave explosions téphras nuées ardentes lahars avalanches de débris gaz	habitations infrastructures trafic aérien	oui	aménagement territoire alerte / évacuation paravolcanique ?

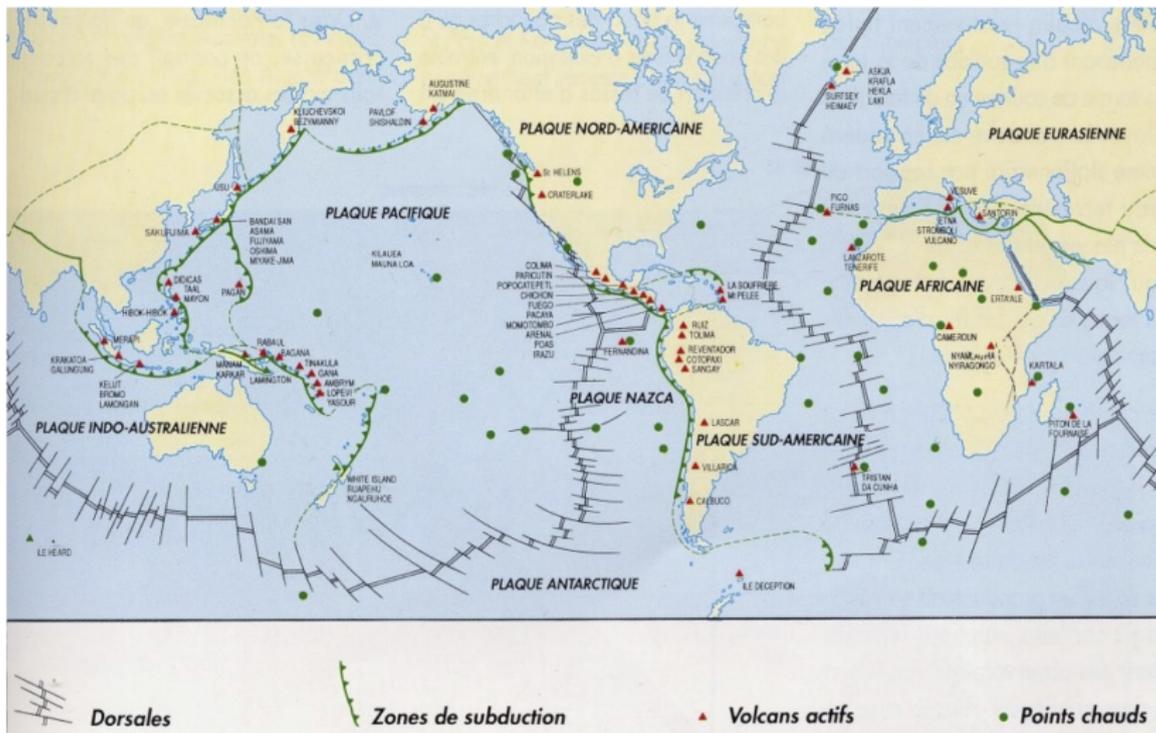
## Risque sismique

aléas	enjeux	vulnérabilité	prévention
mouvements du sol (magnitude, distance, source, effets de site, glissements)	habitations infrastructures	oui/non	aménagement territoire parasismique ! alerte précoce ?

## Risque tsunami

aléas	enjeux	vulnérabilité	prévention
inondation (magnitude, effets de site)	habitations infrastructures	oui	aménagement territoire digues alerte précoce

# Contexte géodynamique

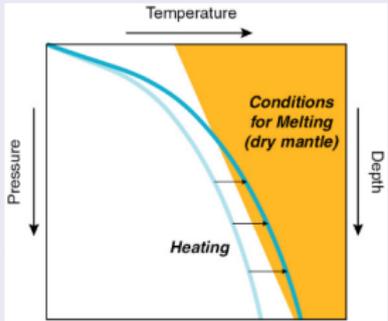




# Production du magma: la fusion partielle

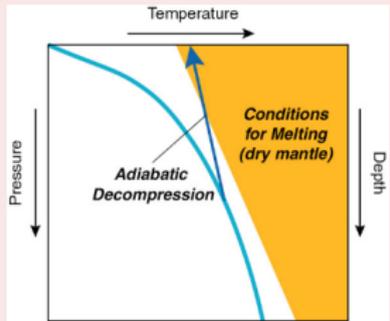
## Zones d'accrétion

- ▶ augmentation de la température par amincissement de la lithosphère
- ▶ manteau supérieur à pression atmosphérique



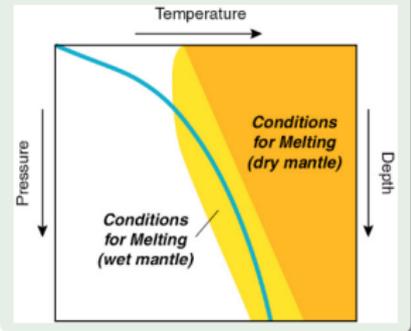
## Points chauds

- ▶ diminution de la pression par remontée "rapide" de roche fondue
- ▶ remontée adiabatique (sans perte de chaleur)



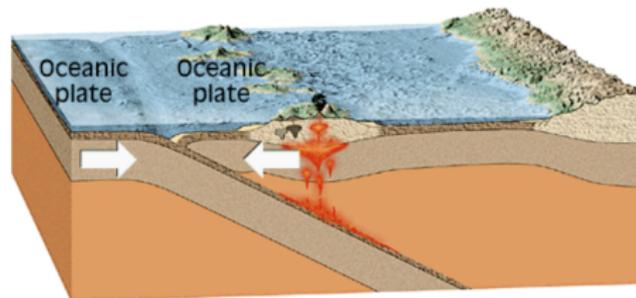
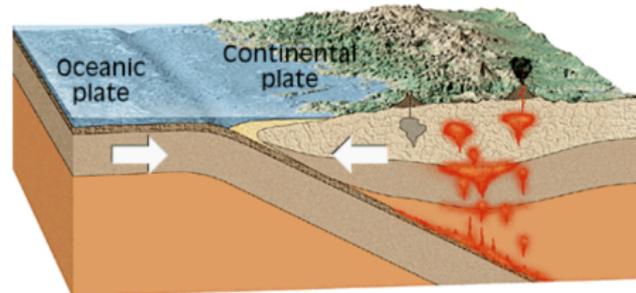
## Zones de subduction

- ▶ apport d'eau dans le système
- ▶ rapprochement liquidus / géotherme
- ▶ liquide magmatique enrichi en volatiles (CO<sub>2</sub>) provenant des sédiments marins carbonatés

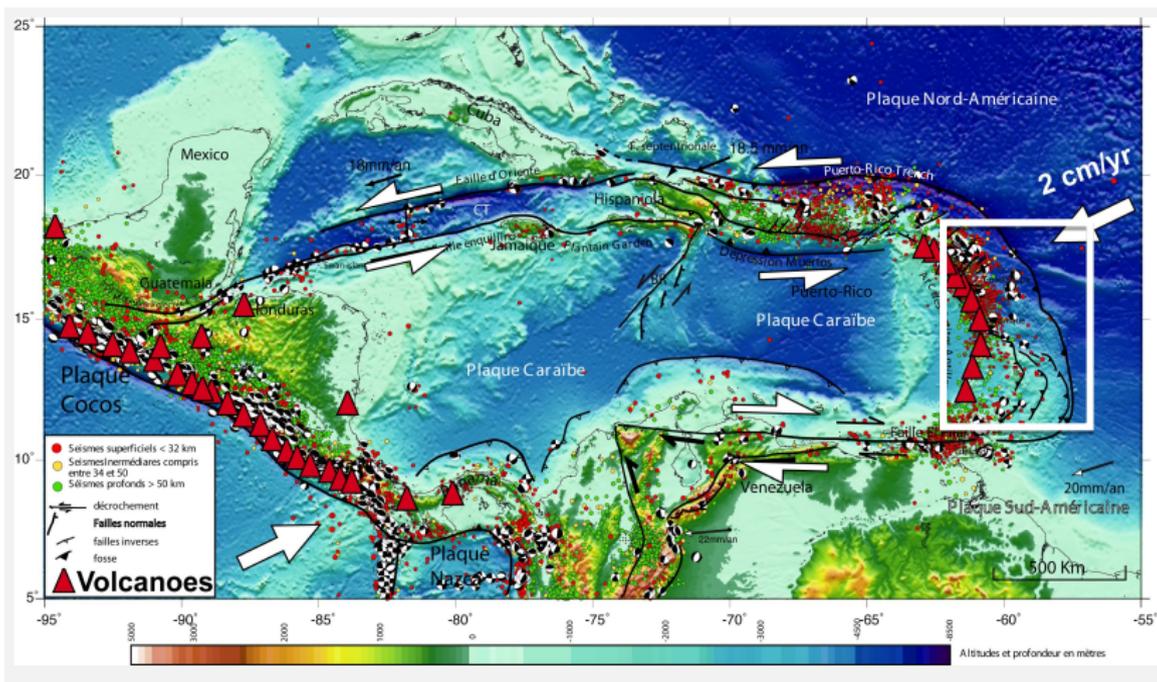


# Zone de convergence: la subduction

- ▶ La plaque la plus lourde et les sédiments du plancher océanique s'enfoncent
- ▶  $> 100$  km = fusion partielle produisant un magma
- ▶ Une partie de ce magma plus léger se fraye un chemin jusqu'à la surface (poussée d'Archimède) et forme une chaîne de volcans
- ▶ *Exemples d'arcs volcaniques continentaux*: Chaîne des Cascades (USA), Cordillère des Andes, Kamchatka, Alaska, ...
- ▶ *Exemples d'arcs volcaniques insulaires*: Petites Antilles, Mariannes, Tonga, Arc de la Sonde (Indonésie), Japon, ...



# Les Antilles: un laboratoire d'exception



► observer les phénomènes à l'échelle de la structure géologique qui les engendre

► collaborer avec les partenaires scientifiques de la Caraïbe



# 8 février 1843: séisme $M > 8$ , $I_{max} = IX$

## TREMBLEMENT DE TERRE DE LA GUADELOUPE.



Un tremblement de terre effrayant causé de plonger dans la construction la célèbre de la Guadeloupe. Les habitants  
 prient et craignent. Cette ville se relève à l'abri, le plan de sa rue, à l'abri plus qu'un morceau de terre - que sa ville  
 est une déesse. Les rues sont dévastées. Les édifices sont à terre. Un jour, le jour, par le tremblement, a été  
 dévasté par l'océan. Une population précipitamment éparpillée dans les rues, les rues et des monts par  
 milliers, le jour sans interruption et sans cesse sur le flanc de cette Guadeloupe dévastée, comme si elle

étaient ébranlés par le séisme, et qui résultent de la destruction des habitations de toute sorte à grande  
 de cet état de ruine, et que la France, les ruines, les ruines et les ruines de la ville, les ruines de  
 grande de ces édifices, et, pendant ce temps, les maisons étaient, les rues et les rues de la ville, les ruines de  
 grande de ces édifices, et, pendant ce temps, les maisons étaient, les rues et les rues de la ville, les ruines de  
 grande de ces édifices, et, pendant ce temps, les maisons étaient, les rues et les rues de la ville, les ruines de

plus sous les arbres. Les arbres en outre avaient été obligés de s'élever, car le feu de la ville avait pu aller  
 de cet état de ruine, et que la France, les ruines, les ruines et les ruines de la ville, les ruines de  
 grande de ces édifices, et, pendant ce temps, les maisons étaient, les rues et les rues de la ville, les ruines de  
 grande de ces édifices, et, pendant ce temps, les maisons étaient, les rues et les rues de la ville, les ruines de

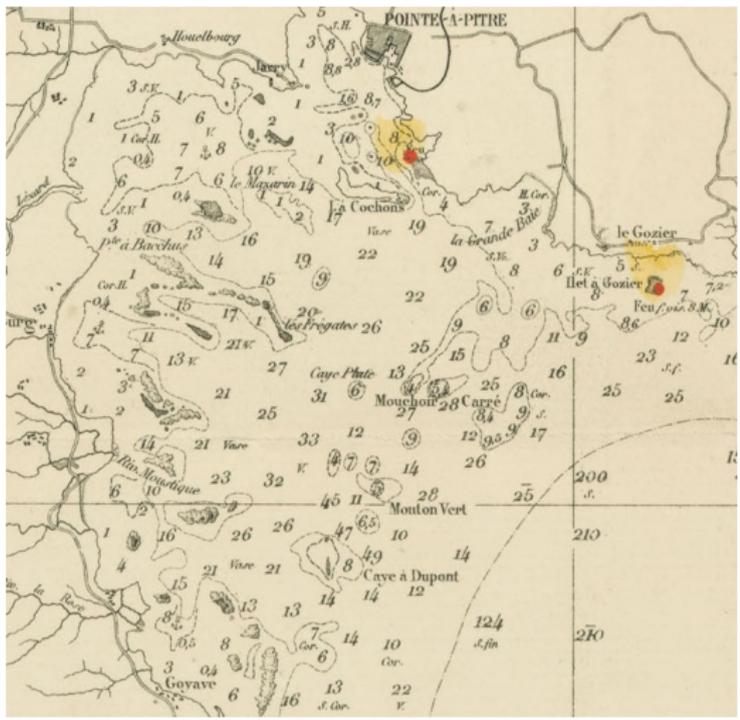






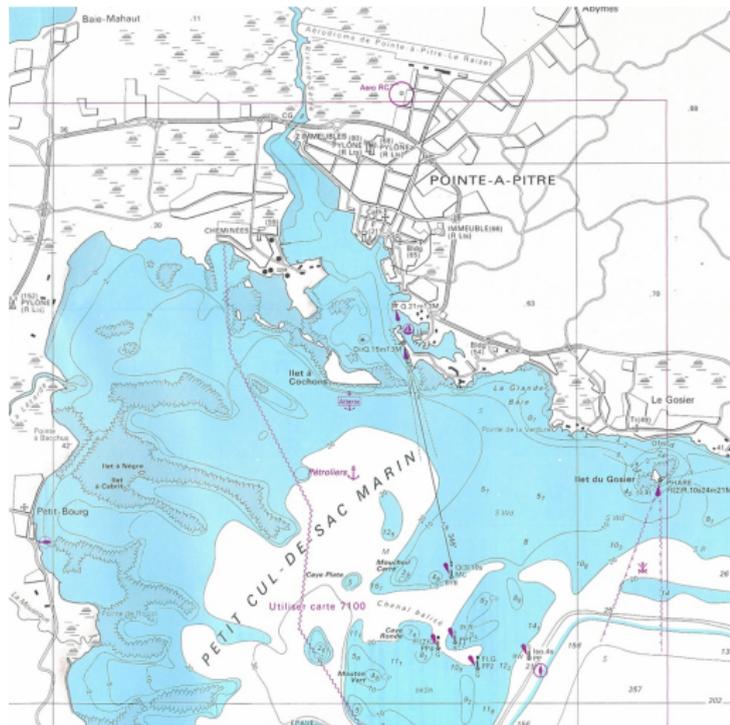
# 1843: les îlets disparus

1867



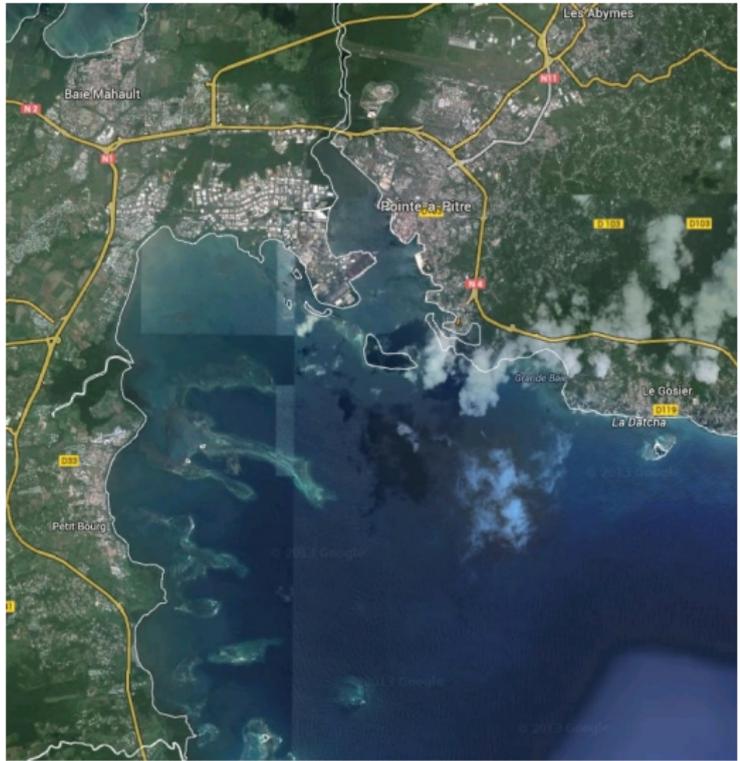
# 1843: les îlets disparus

2007



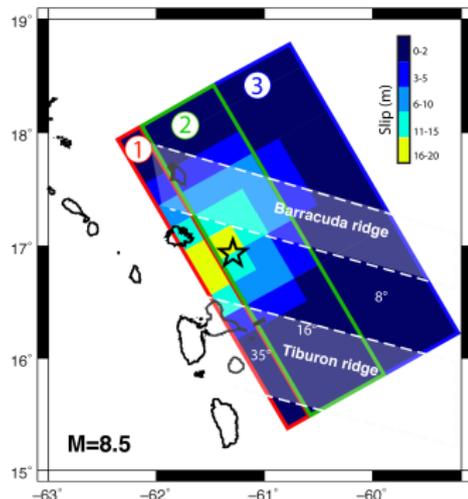
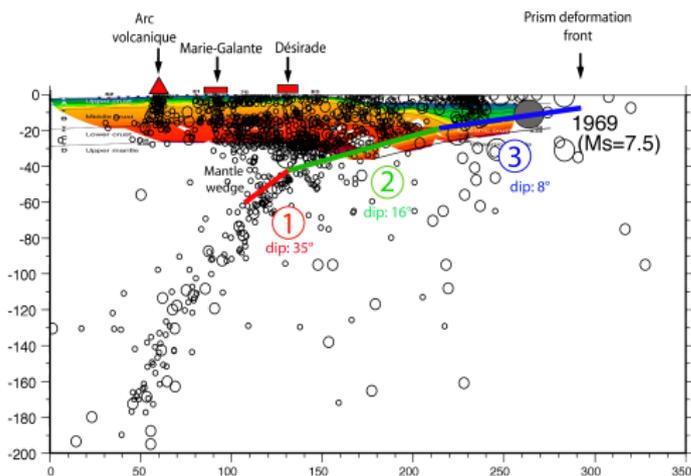
# 1843: les îlets disparus

2012



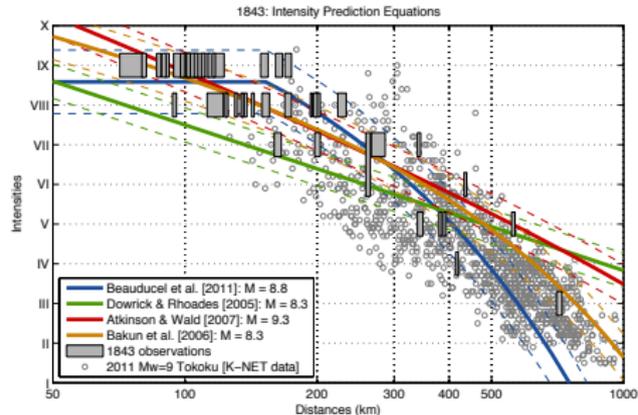
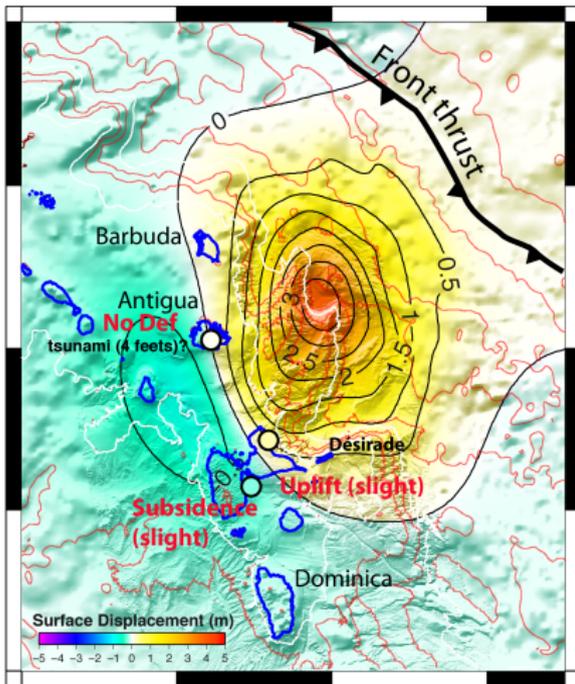


# 1843: un nouveau modèle de rupture sismique



[Beauducel & Feuillet, AGU 2012]

# 1843: un nouveau modèle de rupture sismique



[Beauducel & Feillet, AGU 2012]

- ▶ magnitude  $\approx 8.5$
- ▶ rupture compatible avec toutes les observations: intensités, absence de tsunami, déformations, subduction

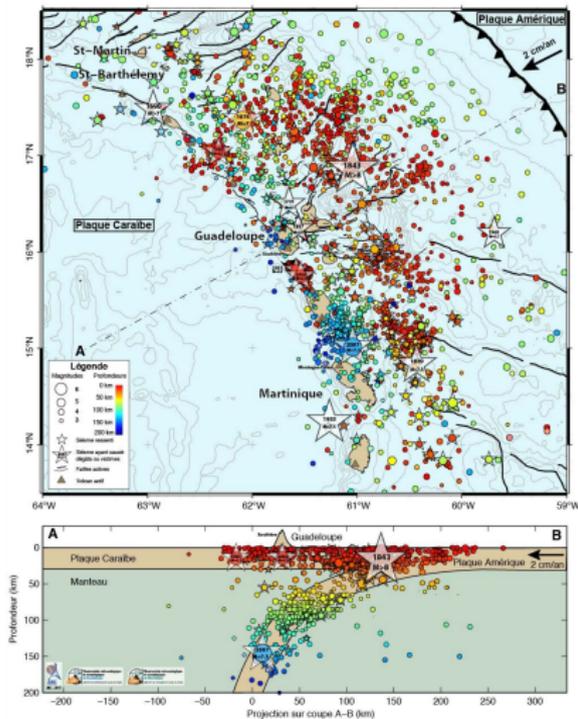




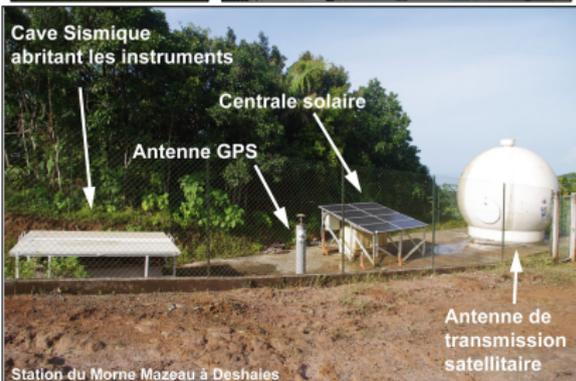
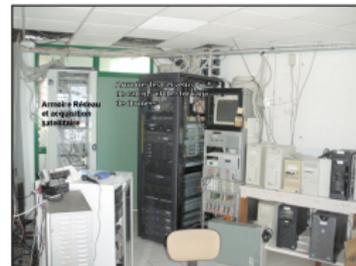
# Activité sismique quotidienne

## ARC DES PETITES ANTILLES

Sismicité 1996-2011 (M>3)  
et séismes historiques majeurs



### ▶ Instrumentation de dernière génération

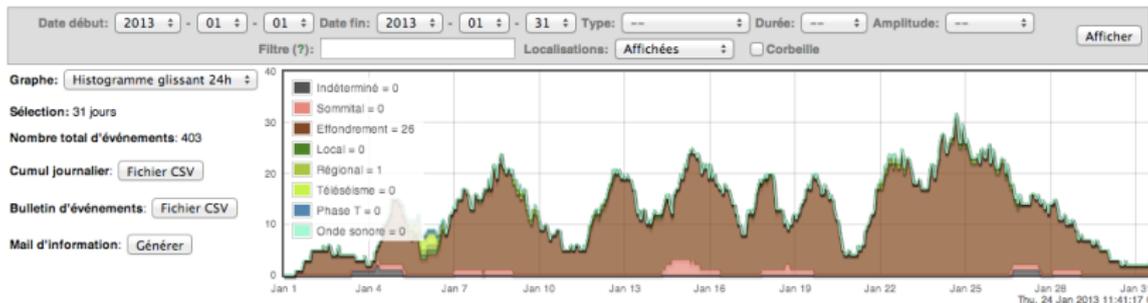






## Main Courante Sismicité OVPF

[ Notes | Sefran3 ]



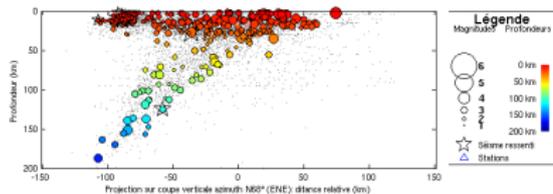
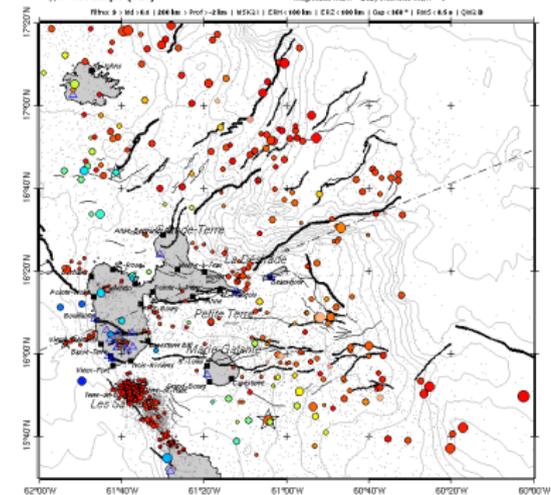
Md	km	Sta1	Date	Heure	#	Type	Amplitude	Dur.	S-P	Signal	Sefran	Op	Commentaire	Épicentre	Prof.	M	EMS	B <sup>3</sup>
?		RVL	2013-01-31	11:49:25.02	1 x	Onde sonore	Faible	11.2 s					THS					
?		BOR	2013-01-30	15:45:01.68	1 x	Effondrement	Moyenne	26.4 s					FL					
?		NSR	2013-01-30	14:58:40.21	1 x	Effondrement	Faible	8.1 s					FL					
?		BOR	2013-01-29	16:33:30.98	1 x	Effondrement	Faible	13.9 s					THS					
?		SNE	2013-01-29	14:19:32.02	1 x	Effondrement	Faible	4.4 s					THS					
?		DSO	2013-01-29	11:40:04.40	1 x	Effondrement	Faible	5.7 s					THS					
?		DSO	2013-01-29	02:44:24.86	1 x	Effondrement	Faible	8.5 s					THS					
?		SNE	2013-01-29	01:05:59.72	1 x	Effondrement	Faible	8.3 s					THS					
?		BOR	2013-01-28	18:36:36.22	1 x	Effondrement	Faible	6.9 s					VF					
?		BOR	2013-01-28	16:32:39.37	1 x	Effondrement	Faible	4.8 s					FL					
?		DSO	2013-01-28	16:00:12.59	1 x	Effondrement	Faible	6.6 s					FL					
?		FLR	2013-01-28	11:28:45.81	1 x	Effondrement	Faible	4.0 s					FL					
?		FOR	2013-01-28	11:15:37.30	1 x	Effondrement	Faible	4.6 s					FL					
?		SNE	2013-01-28	03:12:40.33	1 x	Effondrement	Faible	5.3 s					THS					
?	1.4	3	DSO	2013-01-28	02:15:05.88	1 x	Sommital	Faible	14.1 s	0.4			VF	M 0.3 km				
?		FLR	2013-01-27	23:35:27.58	1 x	Effondrement	Faible	7.6 s					THS					
?		FOR	2013-01-27	23:14:00.04	1 x	Effondrement	Faible	4.2 s					THS					
?		FLR	2013-01-27	21:29:36.06	1 x	Effondrement	Faible	3.6 s					THS					
?		BOR	2013-01-27	20:41:00.76	1 x	Effondrement	Faible	4.5 s					THS					
?		BOR	2013-01-27	17:54:02.08	1 x	Effondrement	Faible	4.7 s					THS					
?		BOR	2013-01-27	16:59:26.94	1 x	Effondrement	Faible	2.7 s					THS					
?		FOR	2013-01-27	13:47:51.65	1 x	Effondrement	Faible	2.8 s					THS					
?		BOR	2013-01-27	13:07:05.72	1 x	Effondrement	Faible	2.1 s					THS					

**2013-01-28T02:15:05.276819Z**  
Md = 1.35  
**21.25°S 55.71°E -0.6 km**  
0.3 km SSW Piton de la Fournaise  
17 phases / manual (confirmed)  
ID = ovpf2013bxnb



### SISMOHYP: Cartes Sismicité Guadeloupe (1 an)

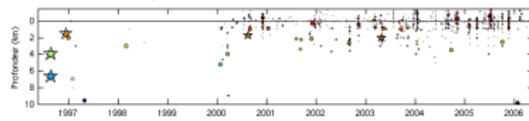
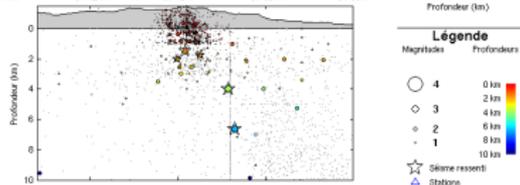
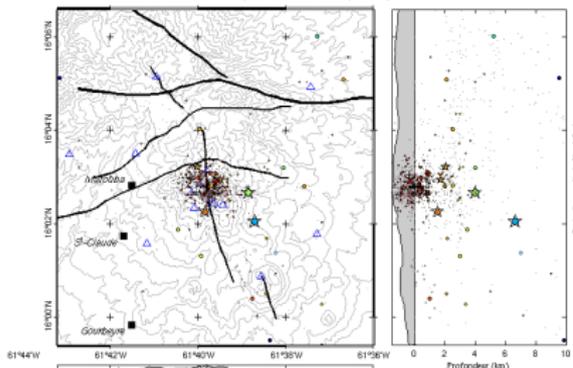
Dernier évènement: Du 22-May-2010 +0 au 22-May-2011 +0  
 Date: 17-May-2011 10:57:43 +0  
 Tectonique = 61Z (dont 10 ressentis)  
 Lat = 19°36'43" N, Lon = 61°24'57" W  
 Soutière = 46  
 Prof = 2.13 km, Md = 1.7  
 Afta = 5  
 Type = Tectonique (TE1)  
 Magnitude max. = 3.9, Intensité max. = V  
 Filtré: 9 à Md < 0.1 | 200 km | Prof: > 2 km | MSK II | CMT: 100 km | C42: 100 km | Gap: 0.0° \* 1 | R05: 4.5 s | Q10 Z



IS OI 50-IPGP - 22 May 2011 08:02:43 - SISMOHYP-GUA\_1an - by m4h4

### SISMOHYP: Cartes Sismicité Soufrière (10 ans)

Dernier évènement: Du 21-May-1996 +0 au 19-May-2006 +0  
 Date: 12-May-2006 05:35:26 +0  
 Sismes Tectoniques = 15 (dont 0 ressentis)  
 Lat = 19°00'27" N, Lon = 61°30'40" W  
 Sismes Soufrière = 1430 (dont 6 ressentis)  
 Prof = 7.17 km, Md = 3.4  
 Sismes Afta = 32  
 Type = Volcano-Tectonique Type A (VA1)  
 Magnitude max. = 2.7, Intensité max. = II  
 Filtré: 9 à Md < 0.1 | 200 km | Prof: > 2 km | MSK II | ERH: 30 km



IS OI 50-IPGP - 19 May 2006 15:53:51 - SISMOHYP-SOU\_10a - by m4h4 on document.org.org.org

## RAP: Accélérométrie

## Localisation OVSG:

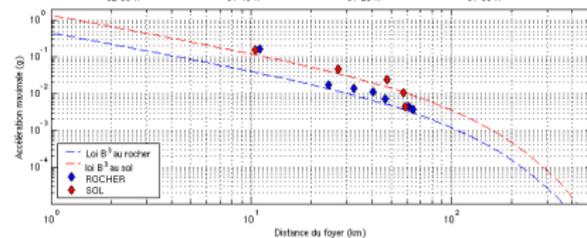
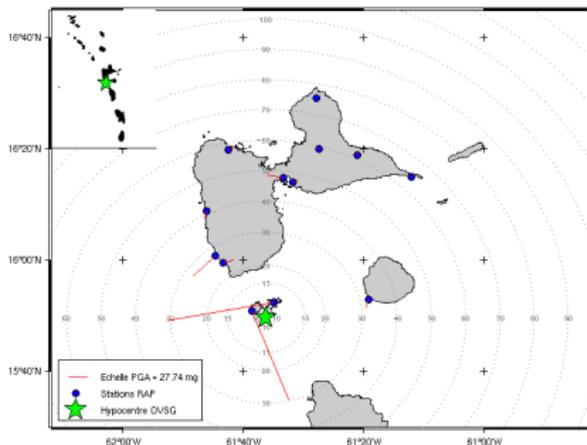
Date: 27-Dec-2004 20:58:14 +G  
 Lat = 15°49'39" N, Lon = 61°36'10" W  
 Prof = 9.57 km, Md = 4.7  
 Code = TESGP

## PGA (mg):

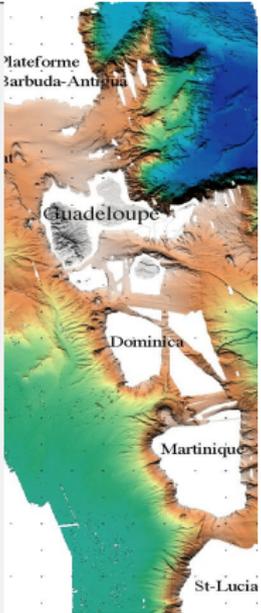
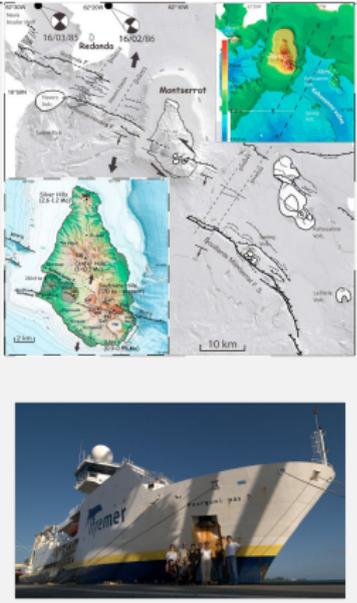
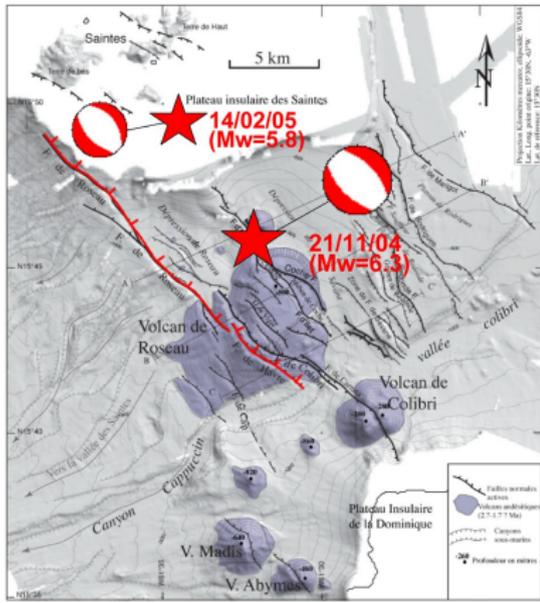
TDHA: 166.437  
 TDBA: 158.585  
 ABFA: 47.299  
 JARA: 23.991  
 PRFA: 16.794  
 GBGA: 14.054

## PIGA 11.106

SROA: 10.438  
 IPTA: 7.166  
 MOLA: 4.470  
 MESA: 4.468  
 SFGA: 3.592



# Campagnes océanographiques

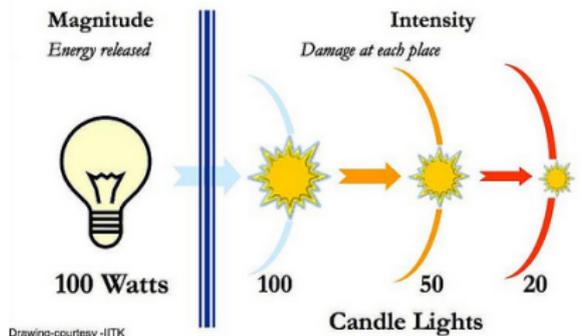


- ▶ Identification des failles actives
- ▶ Conséquence immédiate sur la gestion de crise

- ▶ AGUADOMAR [1998], GWADASEIS [2009], BATHYSAINTES [2010]
- ▶ Premier modèle géodynamique régional: failles en échelon et volcanisme actif

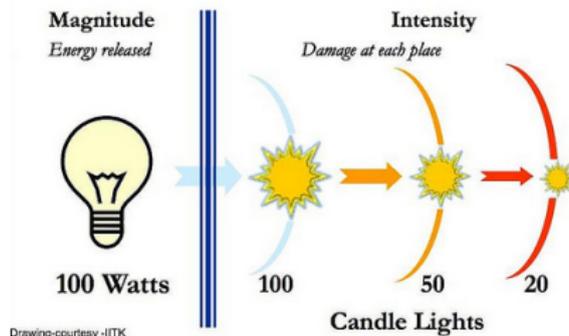
# Relation magnitude/distance/intensité

## Magnitude vs Intensity



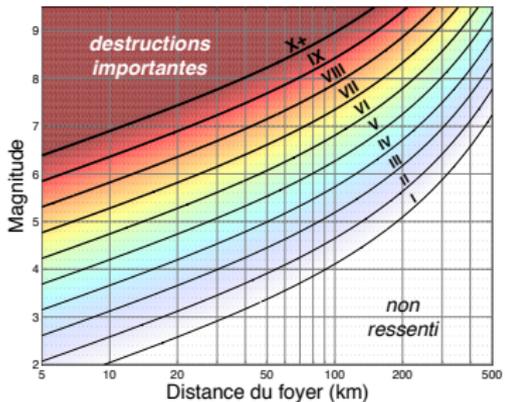
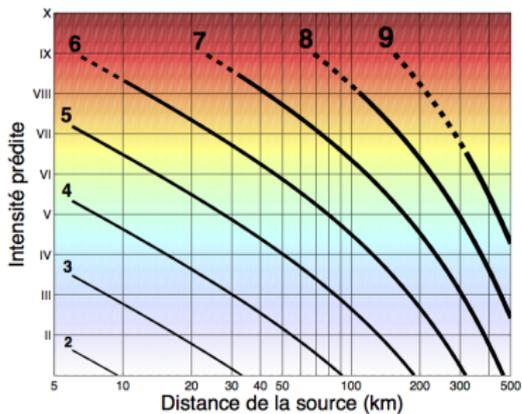
# Relation magnitude/distance/intensité

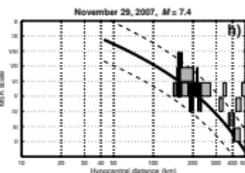
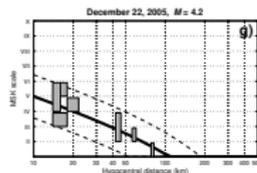
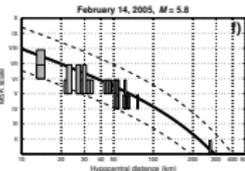
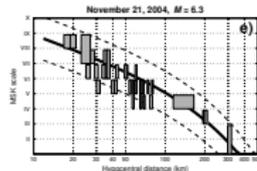
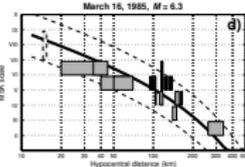
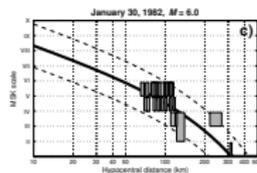
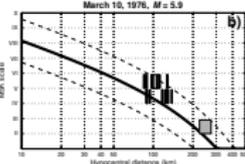
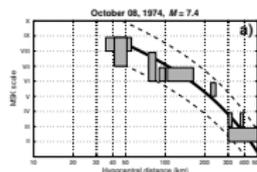
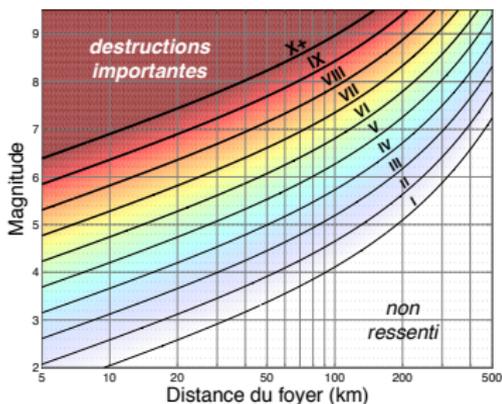
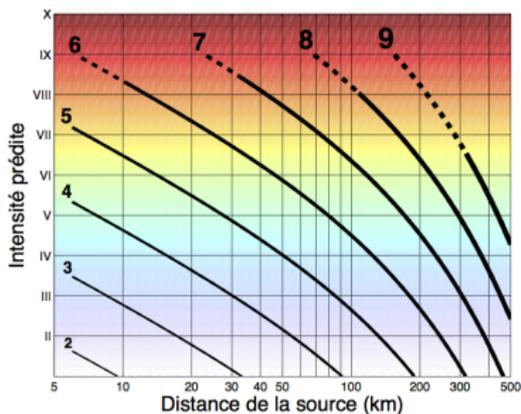
## Magnitude vs Intensity



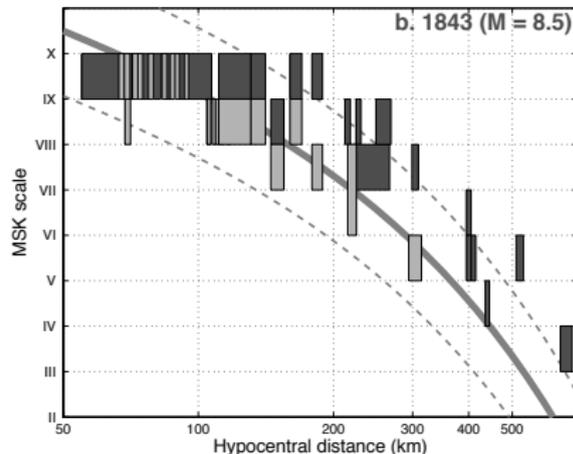
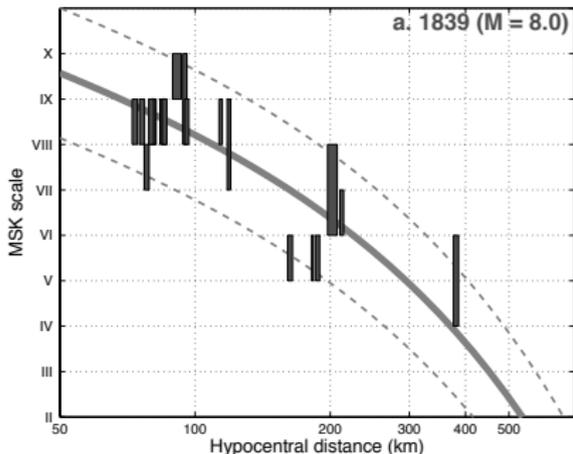
## Modèle empirique de prédiction des intensités ( $B^3$ )

$$\begin{cases} I = 1.85265M - 0.0092238R - 3 \log(R) + 0.3096 \\ R > 10^{\frac{M-4.15}{2}} \end{cases}$$





# Évaluation des magnitudes de séismes anciens



[Feuillet et al., JGR 2011]

# Prédiction rapide des intensités sismiques



## Rapport préliminaire de séisme concernant la Guadeloupe et îles du Nord

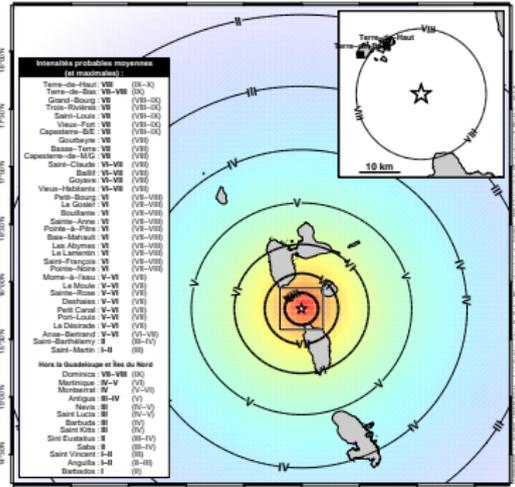


Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe - IPGP  
 Le Plateau - 97113 Goubeaya - Guadeloupe (FR)  
 Tél : +590 (0)590 99 11 33 - Fax : +590 (0)590 99 11 34 - info@obs-uvn-igp.fr - www.igp.fr

Goubeaya, le 21 novembre 2004 10:00 locales

**Magnitude 6.3, 15.76°N, 61.50°W, profondeur 10 km  
 dimanche 21 novembre 2004 11:41:08 TU**

Un séisme fort (magnitude 6.3 sur l'Echelle de Richter) a été enregistré le dimanche 21 novembre 2004 à 07:41 (heure locale) et identifié d'origine Tectonique. L'épicentre a été localisé à 14 km au sud de Terre-de-Haut, à 10 km de profondeur (soit une distance hypocentrale d'environ 18 km). Ce séisme a pu générer, dans les zones concernées les plus proches, une accélération moyenne du sol de 160 mg (\*), correspondant à une intensité macrosismique de VIII (dégâts importants potentiels). Suivant le type de sols, les intensités peuvent cependant avoir atteint localement l'intensité IX-X (destructions potentielles).



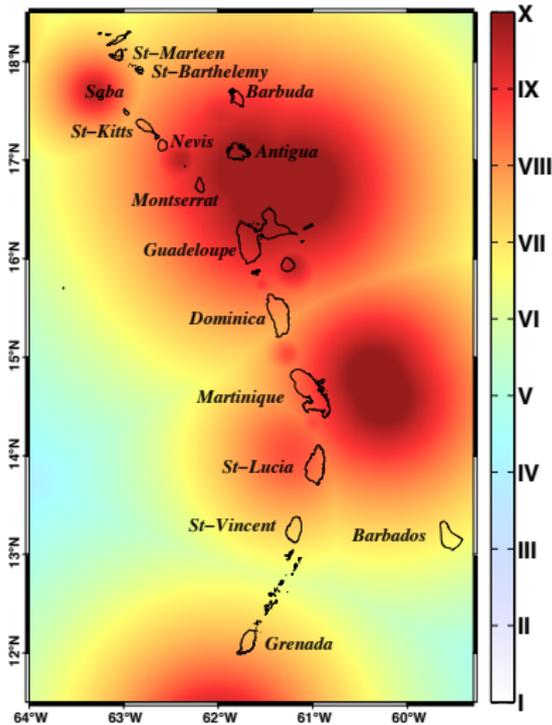
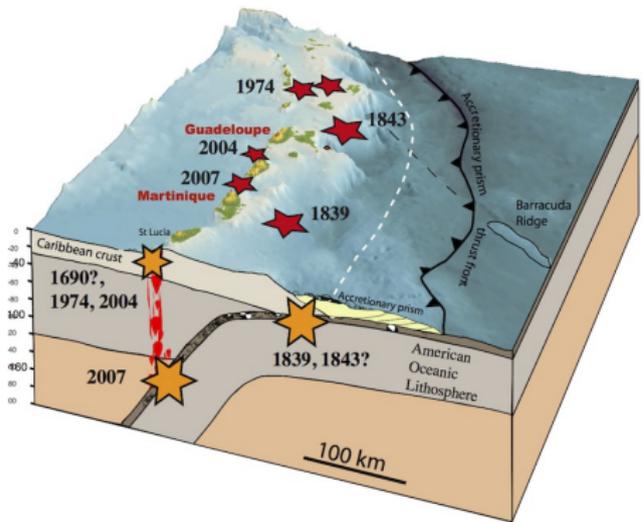
	64°30'W	62°30'W	62°00'W	61°30'W	61°00'W	60°30'W	60°00'W
Perception Humaine	non ressentie	très faible	faible	légère	modérée	forte	très forte
Dégâts Potentiels	aucun	aucun	aucun	très légers	légers	modérés	importants
Accélération (mg)	< 1.5	1.5 - 2.2	2.2 - 6.8	6.8 - 15	15 - 32	32 - 160	160 - 320
Intensité Déclive	I	II	III	IV	V	VI	VII

\* 1 mg = 1000 µg. Une unité d'accélération correspond au double de la pesanteur. La ligne pointillée délimite la zone où le séisme a pu être potentiellement ressenti.

## Communiqués séisme ressenti

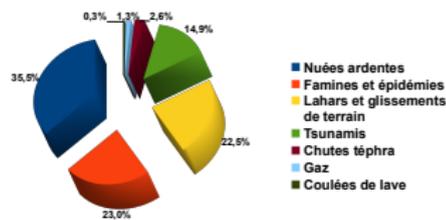
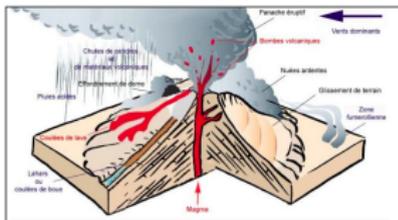
- ▶ calcul « immédiat » après un événement (≈ 10 mn)
- ▶ prédiction des intensités maximales probables dans chaque commune
- ▶ en cas de faible séisme, permet de « rassurer » la population en confirmant leur ressenti
- ▶ en cas de gros dégâts + problèmes de communication, permet d'aider à focaliser l'action des secours

# Sismicité historique: l'autre clef de l'évaluation du risque



- Carte d'aléa sismique**
- ▶ séismes historiques + probables (failles identifiées)
  - ▶ calcul de l'intensité maximale

# Le risque volcanique dans le monde



## Les grandes catastrophes historiques récentes

Tambora, Indonésie	1815	60 000	famine
Krakatau, Indonésie	1883	36 417	nuée ardente + tsunami
Montagne Pelée, Martinique	1902	29 000	nuée ardente
Nevado del Ruiz, Colombie	1985	25 000	lahar
Unzen, Japon	1792	15 118	tsunami
Laki, Islande	1783	9 336	famine
Santa Maria, Guatemala	1902	6 000	nuée ardente
Kelud, Indonésie	1919	5 110	coulée de boue
Galunggung, Indonésie	1822	4 000	coulée de boue
...	...	...	...

Total depuis 1600 A.D.

≈ 300 000 morts





# Soufrière: crise sismo-volcanique 1975-1977

## La crise en chiffres

- ▶ 7 mois d'activité de surface
- ▶ 16 000 séismes
- ▶ 26 éruptions phréatiques
- ▶ 800 000 m<sup>3</sup> de matériaux éjectés + coulées de boue
- ▶ 73 422 personnes évacuées pendant 3 mois  $\frac{1}{2}$

## 2 hypothèses contradictoires...

- A purement phréatique sans risque
- B intrusion magmatique avec risque



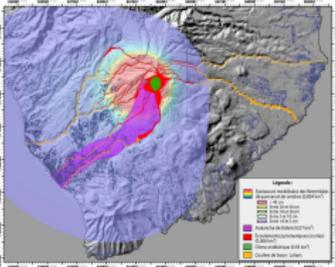
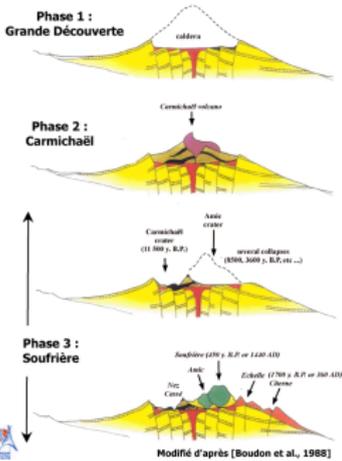
(c) R. Bousssel-Dupré, 1976



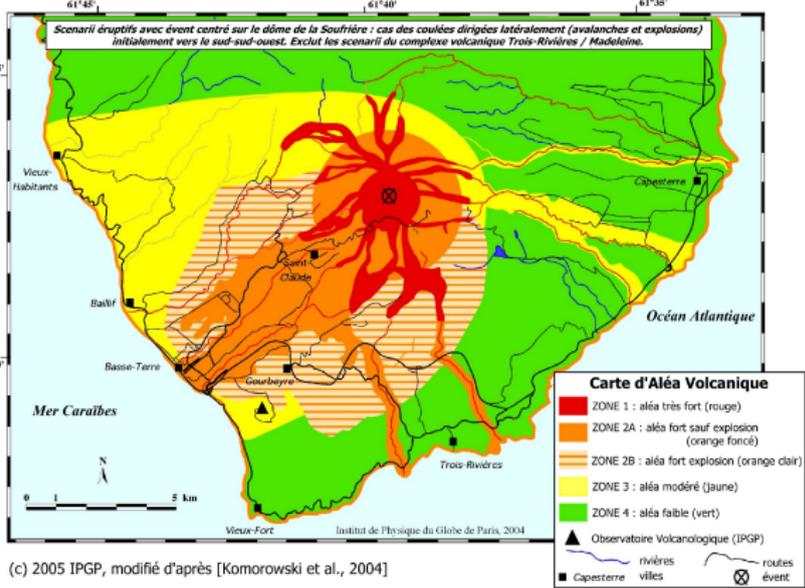
(c) 1976, M. Bof



# Soufrière: la réponse du passé éruptif



## Carte d'aléa volcanique de la Soufrière de Guadeloupe

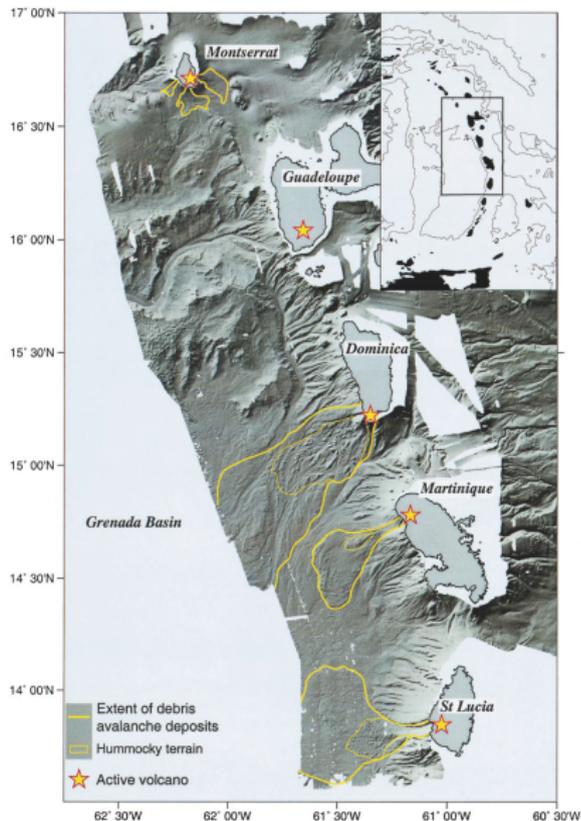
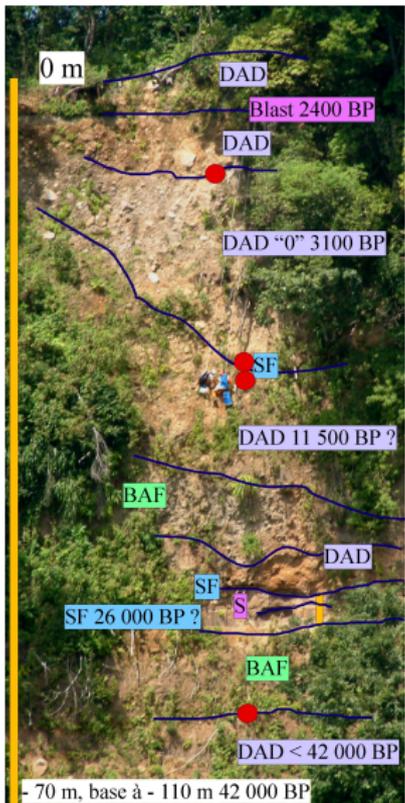


(c) 2005 IPGP, modifié d'après [Komorowski et al., 2004]

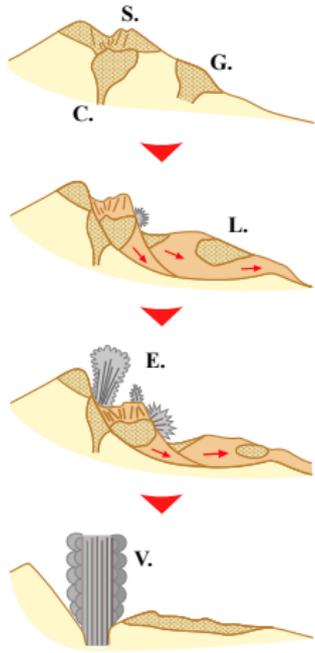
[Boudon et al., 1986; Komorowski et al., 2005,2008]

- ▶ éruption type St-Helens 1530 AD
- ▶ nombreuses déstabilisations de flanc

# Soufrière: Les avalanches de débris



# St-Helens 1980: 2000 évacués, 57 morts

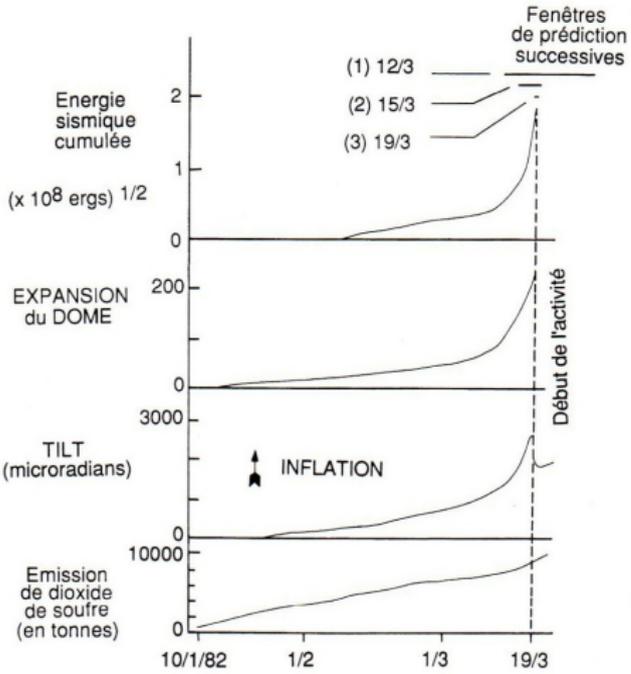


## Éruption du 18 mai 1980

- ▶ précurseurs = éruption phréatique + larges déformations
- ▶ évacuation préventive
- ▶ 3 km<sup>3</sup> de roches éjectées
- ▶ 600 km<sup>2</sup> dévastés (jusqu'à 24 km)
- ▶ naissance de la volcanologie instrumentale : sismique, déformations et gaz

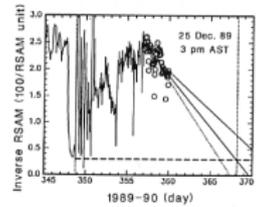
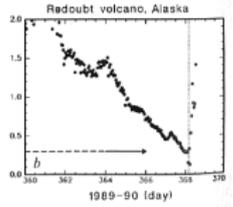
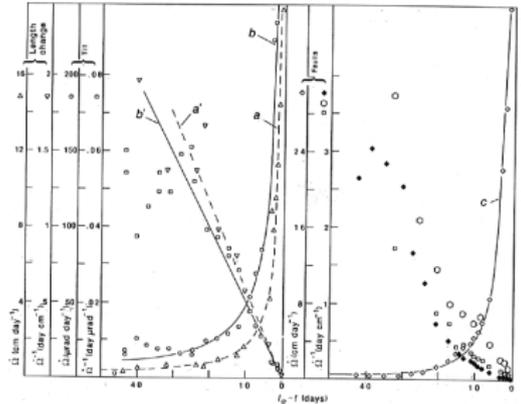


# Prédiction: méthode empirique



[Voigt, 1988]

$$\dot{\Omega} - \alpha \ddot{\Omega} - A = 0$$





# 2007: éruption Piton de la Fournaise







## Définition

**surveiller.** Observer attentivement quelqu'un, quelque chose pour comprendre son comportement ou le contrôler.

## Objectifs de la surveillance des systèmes naturels

- ▶ **acquérir** des données d'observation
- ▶ **comprendre** les phénomènes
- ▶ **améliorer** la prévision/prédiction
- ▶ **protéger** les populations des catastrophes

## Objectifs de la surveillance des systèmes naturels

- ▶ **acquérir** des données d'observation
- ▶ **comprendre** les phénomènes
- ▶ **améliorer** la prévision/prédiction
- ▶ **protéger** les populations des catastrophes

## Caractéristiques requises/souhaitées des observations

- ▶ **continuité** et régularité des mesures (spatiale et temporelle)
- ▶ **long terme** (adapté au phénomène)
- ▶ **temps-réel** ou quasi-réel (surveillance opérationnelle)
- ▶ notion d'**incertitude** (précision, redondance, artéfacts)
- ▶ **méta-données** (conditions d'acquisition)
- ▶ **pérennité** (archivage + documentation)

# Pourquoi des observatoires permanents ?

[1841] Osservatorio Vesuviano



[2003] Montserrat



## Observer / surveiller les phénomènes

- ▶ dans la continuité et sur le long terme
- ▶ anticiper, prévoir, protéger

## Enjeux des observatoires outre-mer

- ▶ Risques telluriques plus importants que dans l'hexagone
- ▶ Contact rapproché avec les autorités / collectivités / population pour la gestion de crise et des risques

# Surveillance opérationnelle

## Missions d'un observatoire volcanologique

- 1 Surveillance du volcan actif:
  - comprendre les phénomènes
  - détecter un changement de comportement
  - l'évaluer en terme de potentiel éruptif
  - informer les autorités responsables
- 2 Recherche fondamentale en géosciences
- 3 Information préventive et divulgation des connaissances en géosciences





# Prévision des éruptions: approche déterministe



## Questions posées

- ▶ Caractéristiques de l'aléa:
  - source magmatique / phréatique / instabilités
  - amplitude, volumes
  - localisation, directions
  - délais temporels
- ▶ Complexité des phénomènes

# Prévision des éruptions: approche déterministe



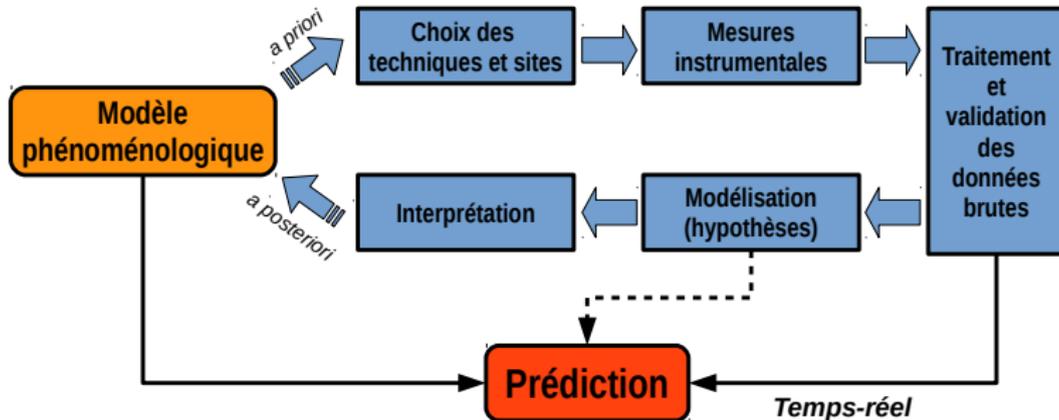
## Questions posées

- ▶ Caractéristiques de l'aléa:
  - source magmatique / phréatique / instabilités
  - amplitude, volumes
  - localisation, directions
  - délais temporels
- ▶ Complexité des phénomènes

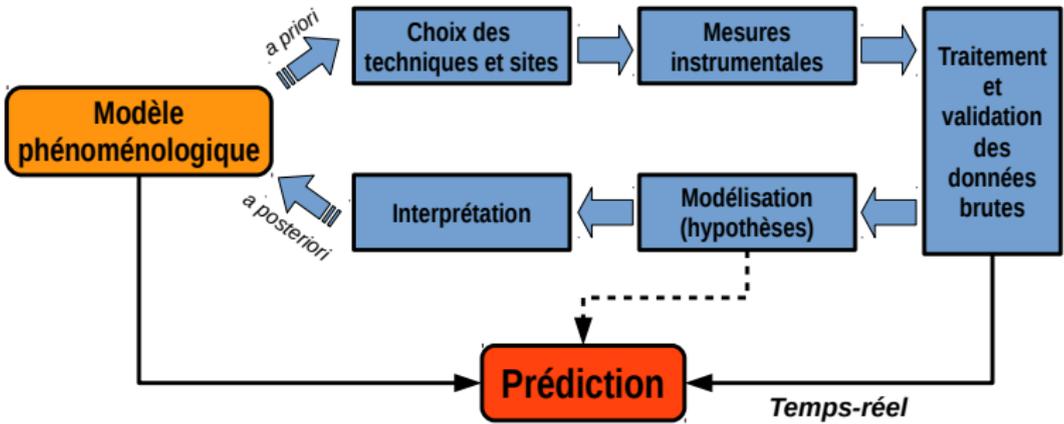
## Les besoins

- ▶ Données physiques et géométriques **quantitatives**
- ▶ Modèle phénoménologique

# Ambivalence recherche/prédiction



# Ambivalence recherche/prédiction



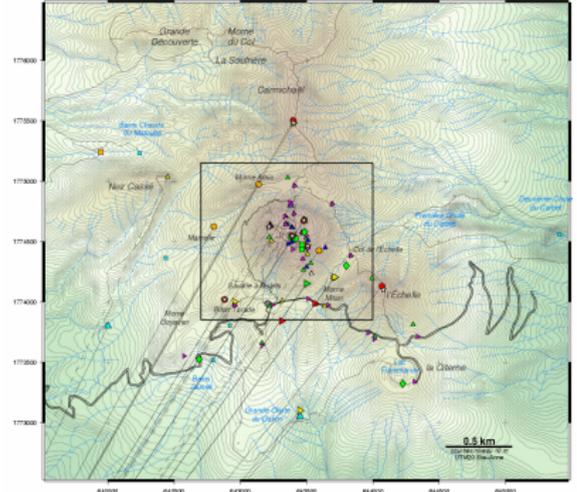
**Axiome**

**Prédiction = données temps-réel + modèle d'interprétation**



# Réseaux instrumentaux

**Réseaux Massif Soufrière**

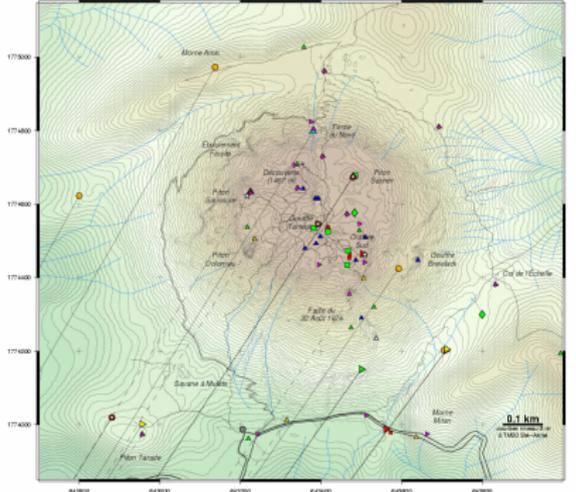


Total 24 réseaux – 126 stations / sites de mesure

- Sismomètre courte-période (305 stations)
- Boîtes algébriques (80 sites)
- Sismomètre large bande sismologique (460 stations)
- Analyse Sismique Théorique (40 stations)
- Sismomètre basse-fréquence (133 stations)
- Analyse Locus Azimut et Contraintes (12 sites)
- Tachéométrie (35 stations)
- Échographie (1115 stations)
- GPS Contrôle (213 stations)
- Température et Flux (67 stations)
- GPS Réseaux (1715 stations)
- Inertie (127 stations)
- GPS Contrôle (213 stations)
- Fluxes (162 stations)
- GPS Réseaux (1715 stations)
- Déformations (120 stations)
- Océanographie (220 stations)
- Pluies (15 stations)
- Réseau Multi-Paramètres (15 stations)
- Déformations (120 stations)
- Océanographie (220 stations)
- Pluies (15 stations)
- Réseau Multi-Paramètres (15 stations)
- Analyse Gaz Fumariennes (617 fumaroles)
- Réseaux sadi (18 stations)
- Réseaux sadi (18 stations)
- Télémétrie laser (9 basses)

Carte des Réseaux Intégrés  
 OVS3-0103-0023  
 02/2011

**Réseaux Dôme Soufrière**

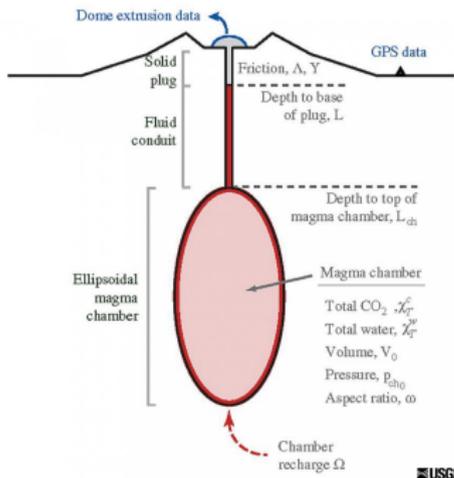


Total 21 réseaux – 94 stations / sites de mesure

- Sismomètre courte-période (136 stations)
- Boîtes algébriques (80 sites)
- Sismomètre large bande sismologique (460 stations)
- Analyse Locus Azimut et Contraintes (12 sites)
- Sismomètre basse-fréquence (133 stations)
- Température et Flux (67 stations)
- Tachéométrie (35 stations)
- Échographie (1115 stations)
- GPS Contrôle (213 stations)
- Fluxes (162 stations)
- GPS Réseaux (1715 stations)
- Inertie (127 stations)
- GPS Contrôle (213 stations)
- Fluxes (162 stations)
- GPS Réseaux (1715 stations)
- Déformations (120 stations)
- Océanographie (220 stations)
- Pluies (15 stations)
- Réseau Multi-Paramètres (15 stations)
- Déformations (120 stations)
- Océanographie (220 stations)
- Pluies (15 stations)
- Réseau Multi-Paramètres (15 stations)
- Analyse Gaz Fumariennes (617 fumaroles)
- Réseaux sadi (18 stations)
- Réseaux sadi (18 stations)
- Télémétrie laser (9 basses)

Carte des Réseaux Intégrés  
 OVS3-0103-0023  
 02/2011

# Causes et effets d'une éruption



## Les 4 causes d'une éruption

- ▶ réalimentation du réservoir
- ▶ cristallisation du magma
- ▶ interaction magma/eau
- ▶ instabilité mécanique de l'édifice

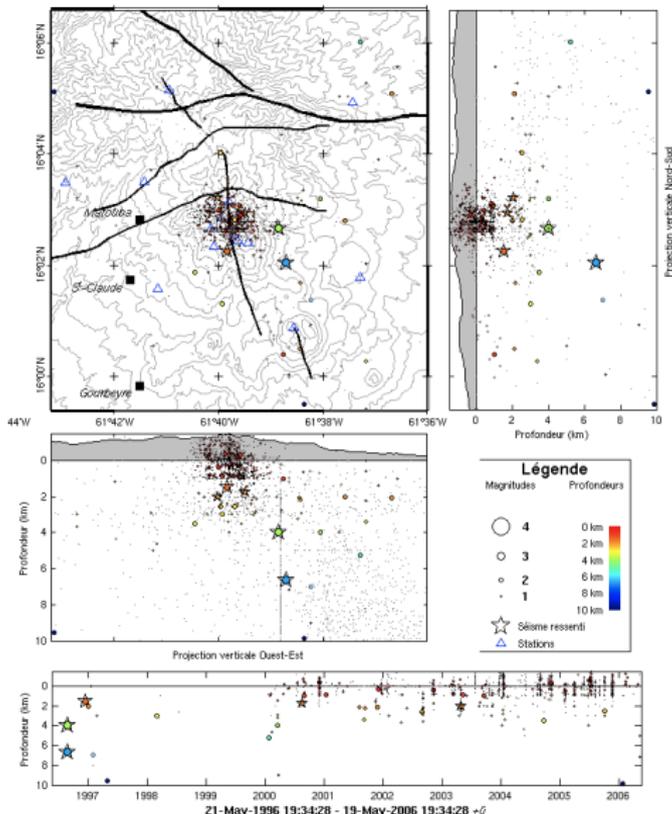
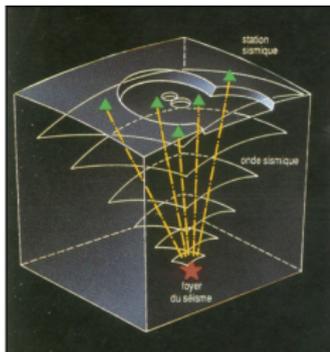
## Signatures physico-chimiques associées

- ▶ séismes
- ▶ déformations
- ▶ modifications de la chimie des fluides
- ▶ variations d'autres paramètres géophysiques

⇒ **Observer et mesurer...**

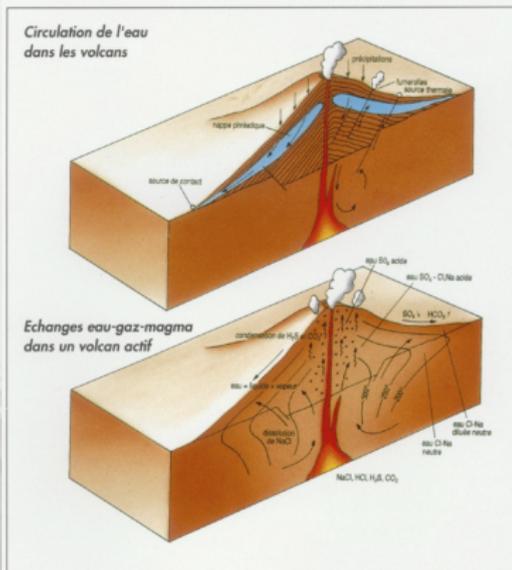
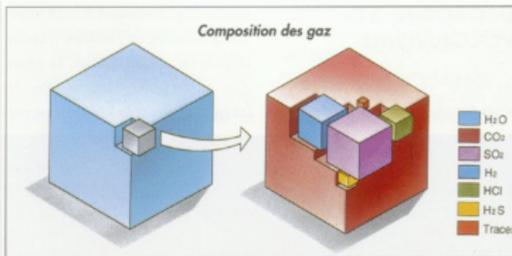
... pour **comprendre, prévoir et prédire.**

# Sismologie: vibrations du sol

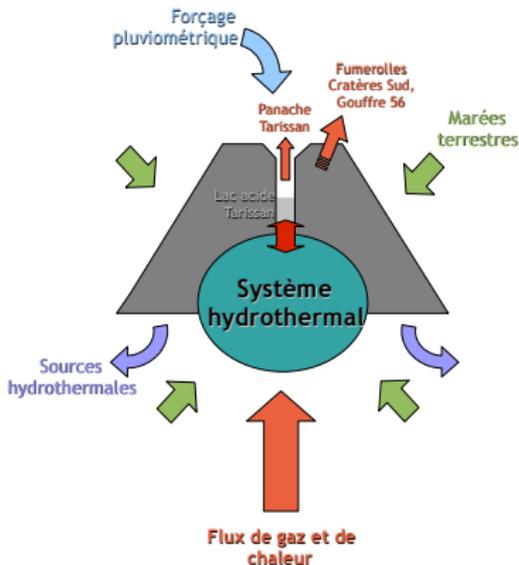




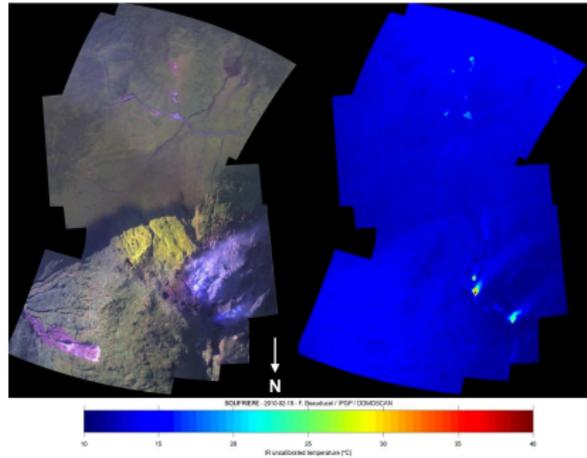
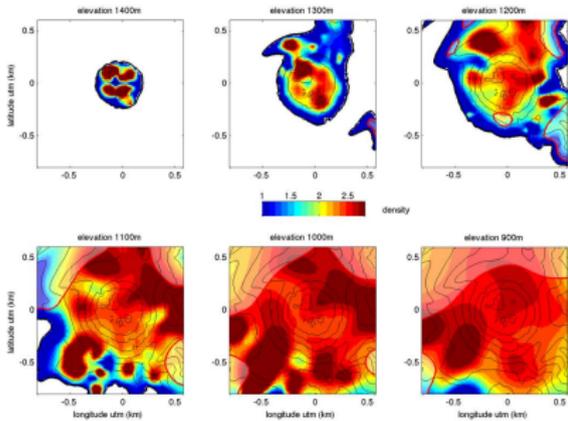
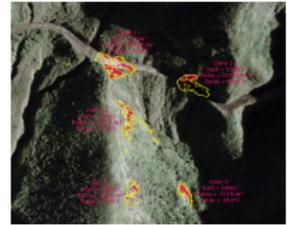
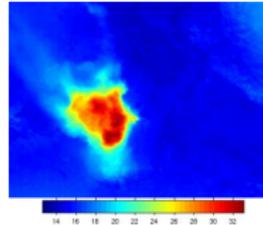
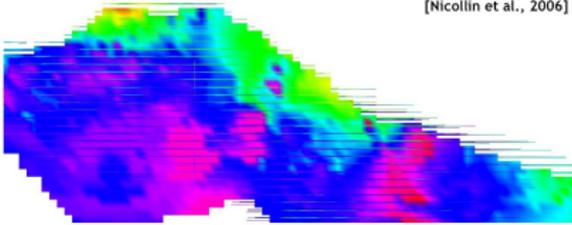
# Chimie des fluides



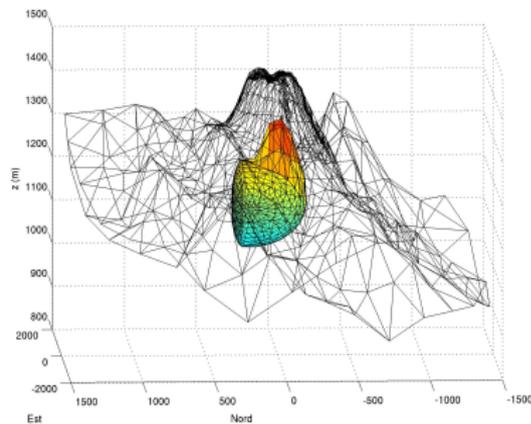
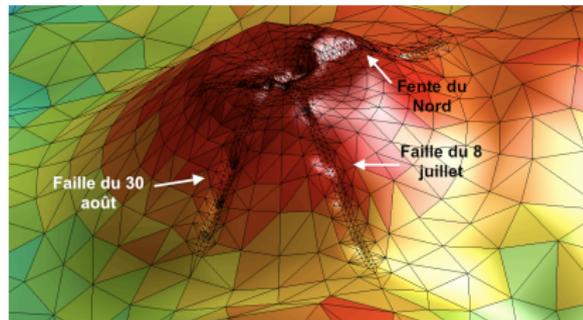
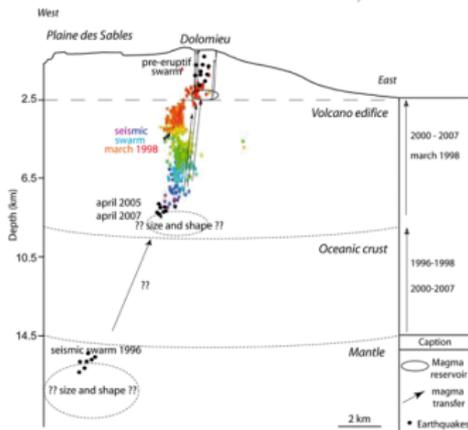
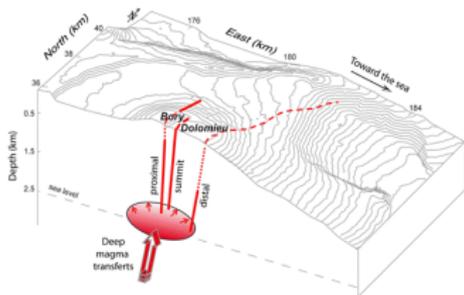
# Comprendre les entrées/sortie du système volcanique



# Déterminer la plomberie interne: tomographies

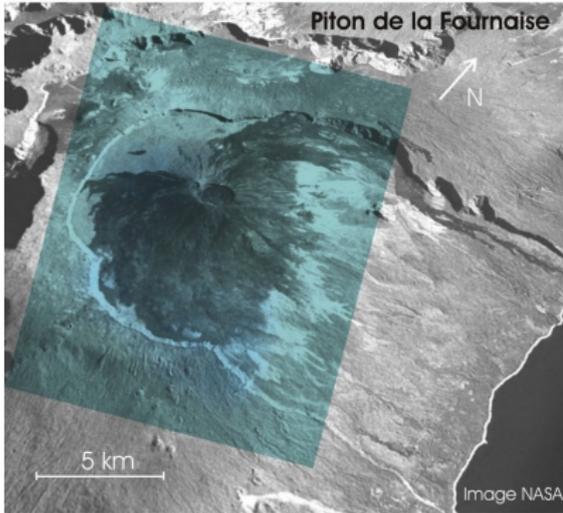


# Sources de déformations

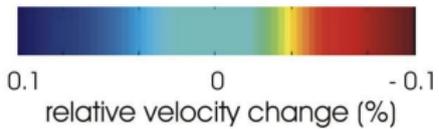
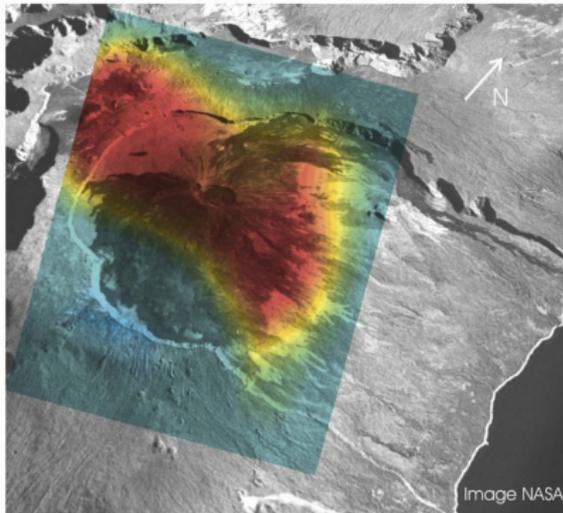


# Déterminer l'état des contraintes

9 days before eruption of June 2000



3 days before eruption



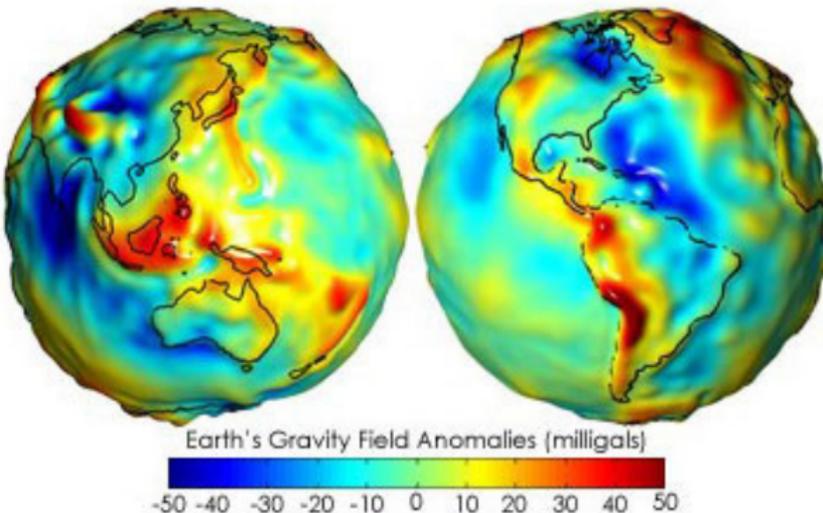
[Brenugier et al., 2008]

# Niveaux de surveillance et d'alerte volcanique

NIVEAUX D'ALERTE	ACTIVITÉ VOLCANIQUE OBSERVÉE	Délai prévisionnel avant déclenchement d'une éruption		ACTIONS OPÉRATIONNELLES	
		SOUFRÈRE / MONTAGNE PELÉE	PITON DE LA FOURNAISE	par les scientifiques	par les autorités
<b>vert PAS D'ALERTE</b>	<b>Minimale</b> Niveau de base de l'ensemble des paramètres	Siècle(s) ↓ Années	Année(s) ↓ Mois	<ul style="list-style-type: none"> <li>surveillance instrumentale (veille scientifique)</li> <li>recherche fondamentale</li> <li>information préventive</li> <li>maintien / mise à jour du plan de gestion scientifique d'une crise IPGP</li> <li>intégration de retour d'expérience (crises éruptives analogues)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>maintien / mise à jour des plans de secours</li> <li>exercices de gestion de crise (simulation)</li> <li>information préventive</li> </ul>
<b>Jaune VIGILANCE</b>	<b>En augmentation</b> Apparition de signaux et/ou variations de quelques paramètres au dessus du niveau de base, tels que : <ul style="list-style-type: none"> <li>activité sismique (généralement non ressentie)</li> <li>activité fumerolienne et sources thermales (flux, températures, composition chimique)</li> <li>légères déformations du sol</li> <li>instabilités de terrain (petits éboulements)</li> </ul>	Année(s) ↓ Mois	Mois ↓ Semaine(s)	<ul style="list-style-type: none"> <li>surveillance renforcée</li> <li>recherches ciblées</li> <li>informations à la cellule de gestion de crise IPGP et aux autorités</li> <li>bulletins d'information périodiques</li> <li>information préventive renforcée (public, scolaires, milieux professionnels)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>veille des services de l'état et collectivités</li> <li>éventuellement fermeture partielle de l'accès au volcan</li> </ul>
<b>orange PRÉ-ALERTE</b>	<b>Fortement augmentée</b> Augmentation importante d'un ou plusieurs paramètres pouvant être des précurseurs d'éruption, tels que : <ul style="list-style-type: none"> <li>activité sismique (séismes fréquemment ressentis)</li> <li>déformations du sol</li> <li>activité fumerolienne et hydrothermale (température, flux et chimie des gaz et sources thermales)</li> <li>instabilités de terrain (glissements, coulées de boue)</li> <li>exurgence d'aquifers superficiels</li> </ul>	Mois ↓ Semaines	Semaine(s) ↓ Jour(s)	<ul style="list-style-type: none"> <li>surveillance active (astreintes 7/7)</li> <li>renforcement des moyens scientifiques de surveillance</li> <li>activation de la cellule de gestion de crise IPGP</li> <li>augmentation des bulletins d'information</li> <li>maintien de l'information préventive renforcée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>constitution d'une cellule de suivi à la Préfecture</li> <li>information à destination des services de l'état et des mairies (des zones concernées)</li> <li>fermeture de l'accès aux zones exposées du volcan et/ou de l'espace aérien</li> </ul>
<b>rouge ALERTE</b>	<b>Maximale</b> Niveau d'activité extrêmement élevé associé à plusieurs scénarios possibles : <ul style="list-style-type: none"> <li>sismicité volcanique intense (séismes ressentis, dégâts potentiels)</li> <li>déformations majeures du sol (ouverture de fractures, effondrements)</li> <li>activité fumerolienne et hydrothermale intense (flux et températures élevés des gaz et sources thermales)</li> <li>explosions et projection de blocs, retombées de ponces/scories, panache de cendres</li> <li>intrusion et croissance d'un dôme</li> <li>écoulement pyroclastique turbulents et/ou canalisés</li> <li>panache de gaz et pluies acides</li> <li>coulée de boue</li> <li>fontaine/coulée de lave</li> </ul>	Imminente ↓ En cours		<ul style="list-style-type: none"> <li>surveillance active renforcée (astreintes 24/24)</li> <li>renforcement des moyens opérationnels de surveillance</li> <li>bulletins d'information pluriquotidiens</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>constitution d'un PC fixe de crise</li> <li>constitution d'un PC opérationnel</li> <li>préparation de la population concernée à l'évacuation</li> </ul> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <b>En cas d'évacuation :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>transfert et transformation éventuelle du PCO en PC arrière</li> <li>transfert et accueil des populations dans les centres d'hébergement</li> </ul> </div>



# Géoïde terrestre: variations spatiales de la verticale

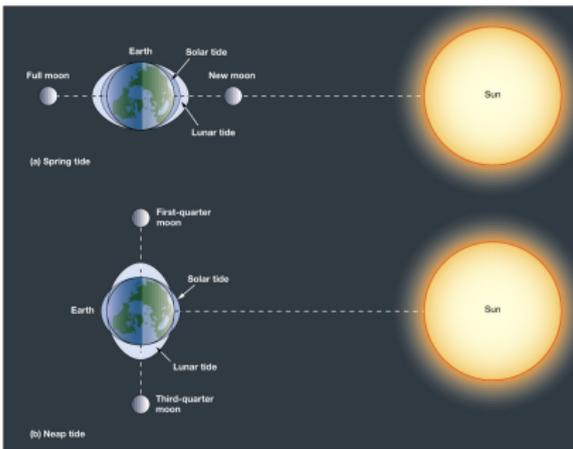


- ▶ anomalie positive sous l'Islande
- ▶ anomalie négative sous l'Inde

# Variations temporelles de la pesanteur

## Les marées terrestres

- ▶ **Terre solide** = déformations élastiques du globe liées à l'attraction Lune et Soleil
- ▶ **Charge océanique** = effet de charge/décharge et attraction de la masse d'eau



Copyright © 2004 Pearson Prentice Hall, Inc.

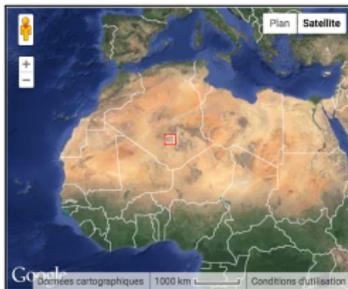
## Conséquences

- ▶ Variations angulaires de la verticale =  $qq \text{ mas} \approx qq \mu\text{rad}$
- ▶ Variations d'intensité de la verticale =  $qq \mu\text{gal}$
- ▶ Variations du rayon terrestre = jusqu'à 50 cm !
- ▶ Mouvements de l'axe des pôles

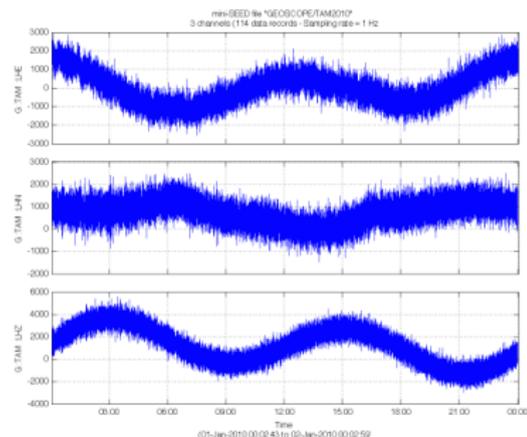
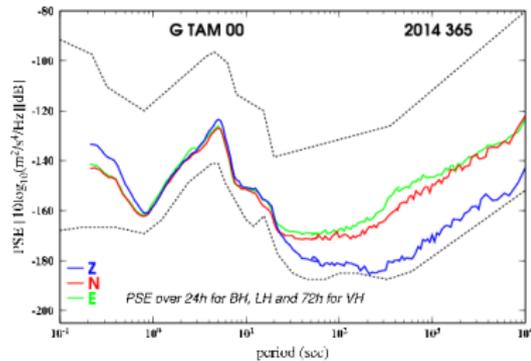
# Bruit microsismique

## Origine

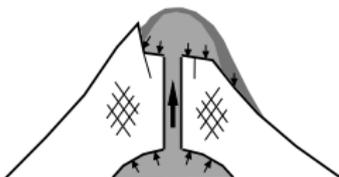
Houle océanique créant des ondes sismiques se déplaçant à 1-3 km/s dans la croûte terrestre



<http://geoscope.ipgp.fr>



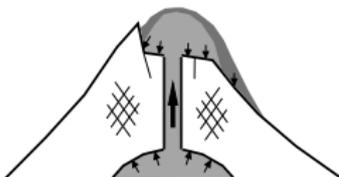
# Objectifs des études de déformations



## Pourquoi un volcan se déforme-t-il ?

- ▶ Mouvements de fluides (magma, gaz)
- ▶ Modèles = **conditions aux frontières** dynamique des fluides magmatiques / mécanique édifice:
  - géométrie des substructures internes (chambre et conduit magmatique, fractures)
  - paramètres des sources ( $\Delta V$ ,  $\Delta P$ ,  $\Delta \sigma$ ,  $\Delta \rho$ )

# Objectifs des études de déformations



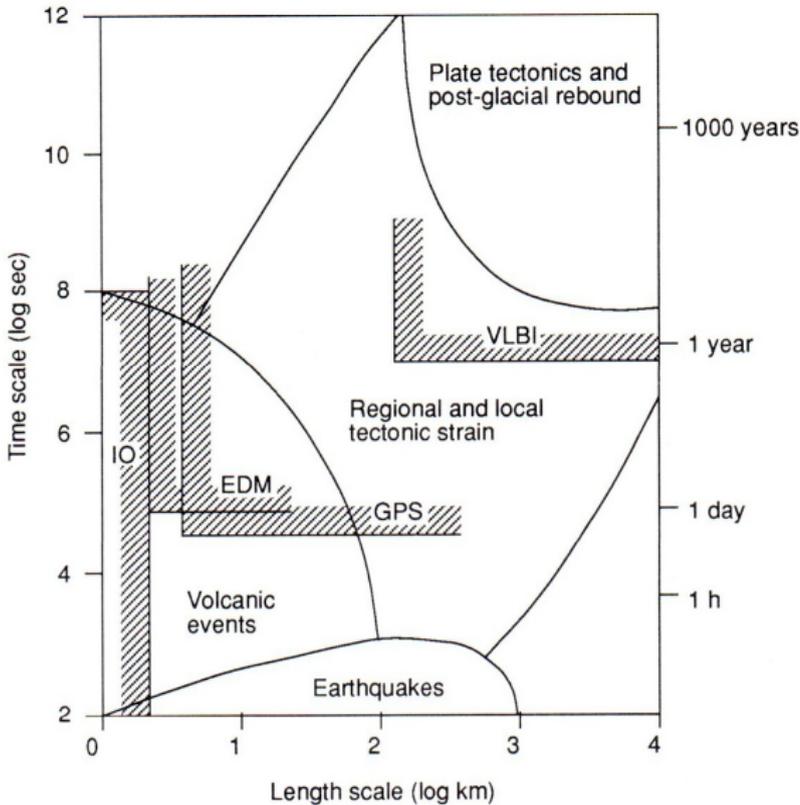
## Pourquoi un volcan se déforme-t-il ?

- ▶ Mouvements de fluides (magma, gaz)
- ▶ Modèles = **conditions aux frontières**  
dynamique des fluides magmatiques /  
mécanique édifice:
  - géométrie des substructures internes  
(chambre et conduit magmatique, fractures)
  - paramètres des sources ( $\Delta V$ ,  $\Delta P$ ,  $\Delta\sigma$ ,  $\Delta\rho$ )

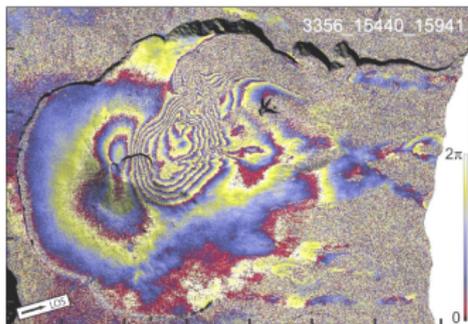
## Géodésie + modélisation mécanique

- ▶ Aide à contraindre les sources et les structures  
à partir des déformations de surface
- ▶ Non-unicité des solutions: intégration d'autres  
observations (information a priori)
- ▶ Nécessité d'une méthodologie

# Caractéristiques spatio-temporelles des phénomènes

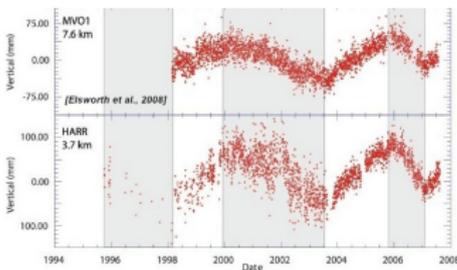


# Mesures du champ de déformation

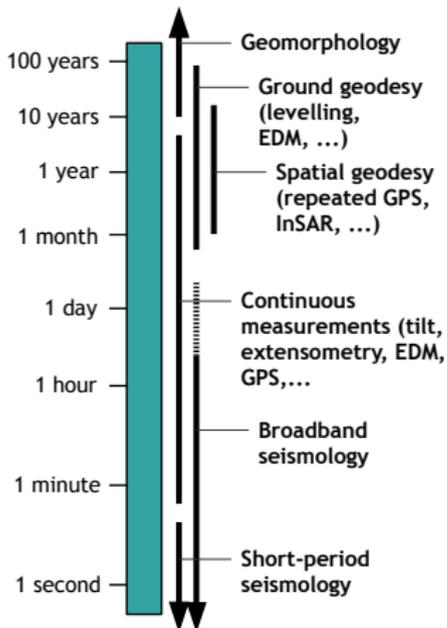


## Techniques complémentaires

- ▶ Besoin d'observations **spatiales et temporelles** “continues”
- ▶ Classification des méthodes:
  - **Échantillonnage spatial** = ponctuel / réseau / imagerie
  - **Échantillonnage temporel** = périodique / continu / bande passante
  - **Couplage** = sol / télédétection
  - **Paramètre mesuré** = déplacement (1D/3D), angle, déformation
- ▶ Chaque méthode a ses avantages et artéfacts propres...



# Mesures du champ de déformation

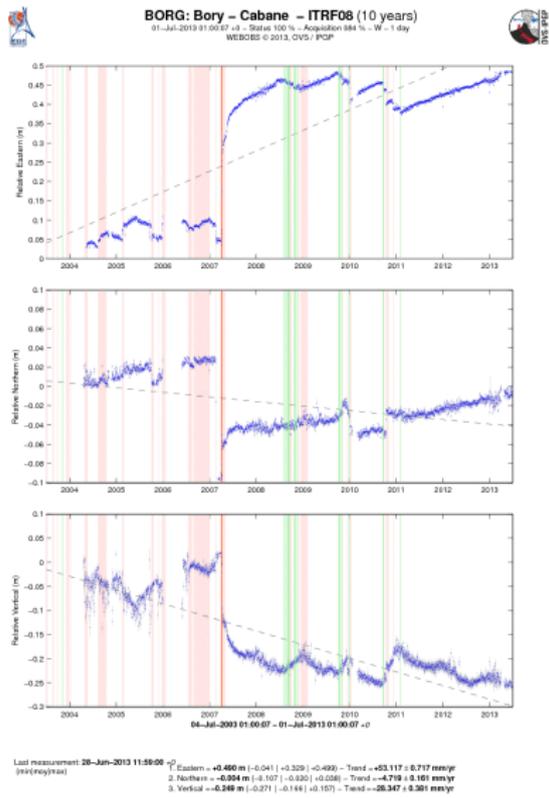
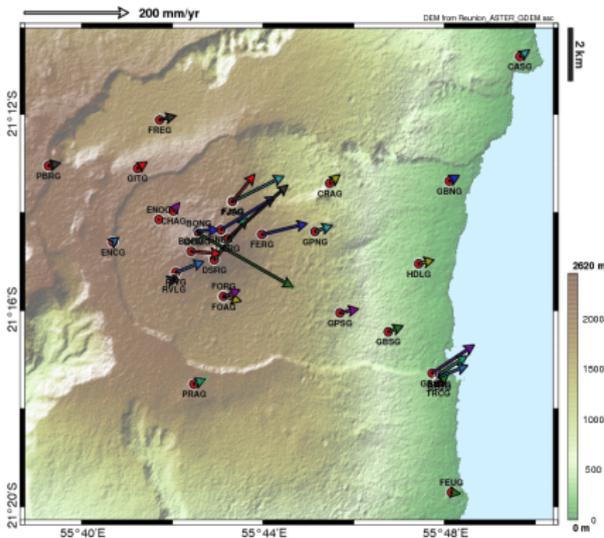


## Techniques complémentaires

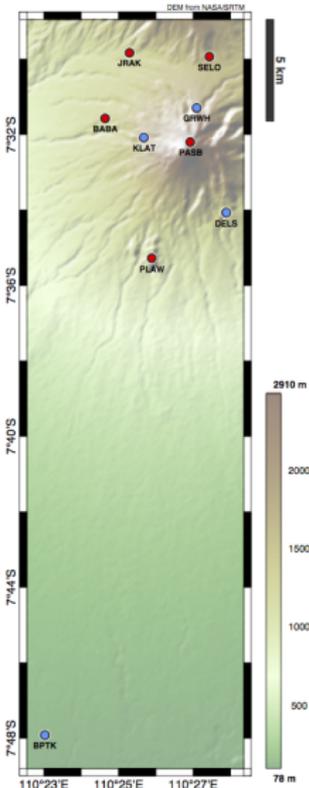
- ▶ Besoin d'observations **spatiales et temporelles** "continues"
- ▶ Classification des méthodes:
  - **Échantillonnage spatial** = ponctuel / réseau / imagerie
  - **Échantillonnage temporel** = périodique / continu / bande passante
  - **Couplage** = sol / télédétection
  - **Paramètre mesuré** = déplacement (1D/3D), angle, déformation
- ▶ Chaque méthode a ses avantages et artefacts propres...

# GPS/GNSS: déplacements 3-D “absolus”

- ▶ GIPSY-OASIS (JPL/Caltech)
- ▶ Precise Point Positioning
- ▶ référencement ITRF



# GPS/GNSS: réseau étendu au Merapi



- ▶ nouveau réseau de surveillance installé en 2011 (Japon)
- ▶ étendu par 5 stations en 2013 (France), localisées entre 500 m et 6 km du sommet
- ▶ géométrie adaptée à la localisation de sources profondes et superficielles

# GPS/GNSS: réseau étendu au Merapi



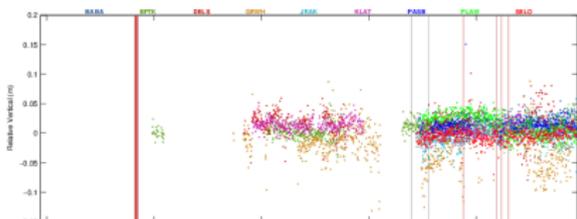
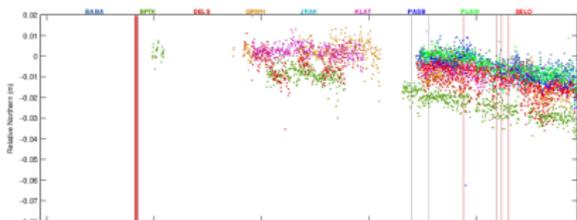
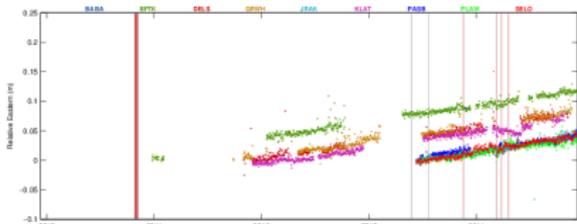
Merapi GNSS Permanent Network – ITRF08 (5 years)

10-Dec-2014 09:37:46 +0  
© DOMERAPI, 2014 + © BPP/TKG, 2014

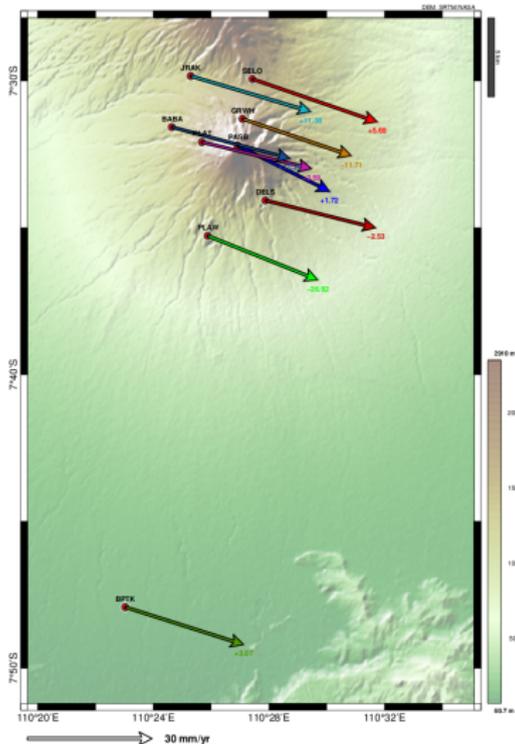


Merapi GNSS Permanent Network – ITRF08 (5 years)

10-Dec-2014 09:37:46 +0  
© DOMERAPI, 2014 + © BPP/TKG, 2014

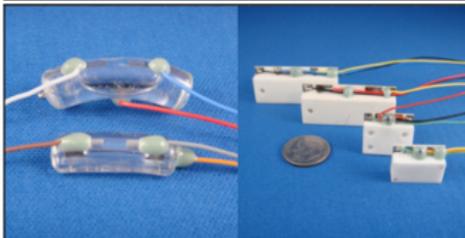
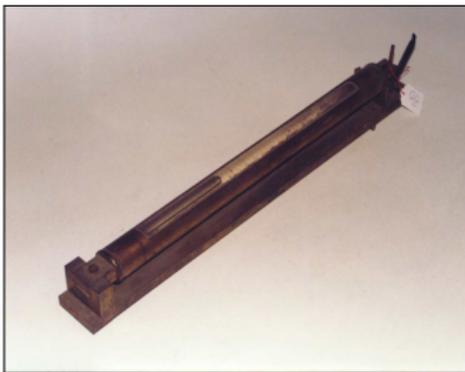


10-Dec-2009 03:37:46 - 10-Dec-2014 09:37:46 +0

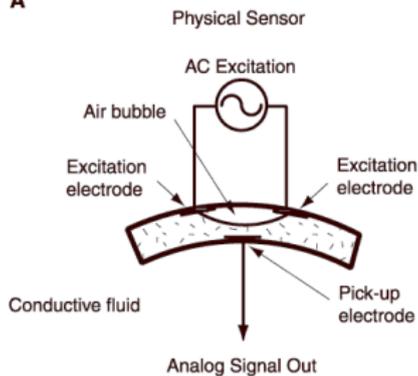


Network mean velocity (ITRF08):

# Inclinométrie: niveaux à bulle

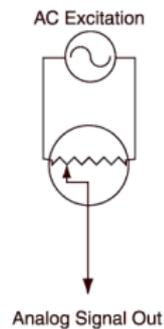


**A**

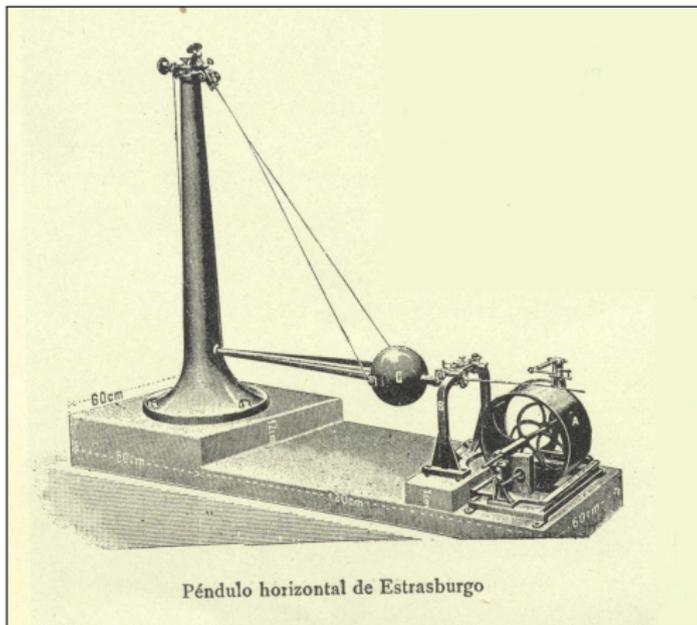


**B**

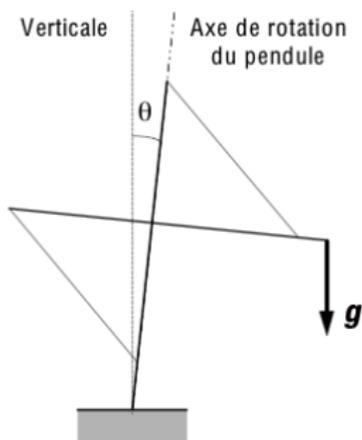
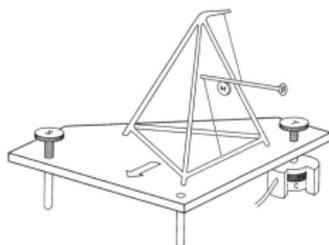
Electrical Equivalent



# Inclinométrie: pendules horizontaux



# Inclinométrie: pendules horizontaux



## Principe du pendule de Zöllner

- ▶ amplification angulaire:
  - $\alpha$  = rotation du sol
  - $\beta$  = rotation du pendule
- ▶ gain  $\propto$  période au carré

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

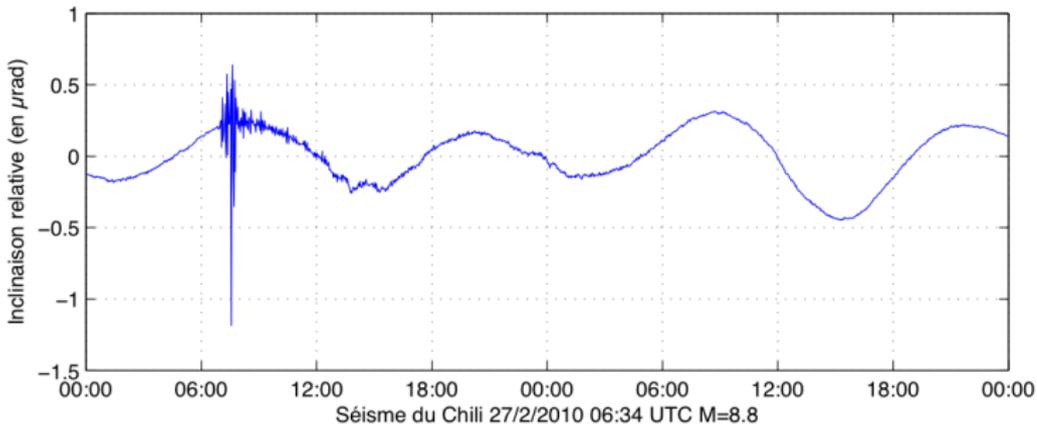
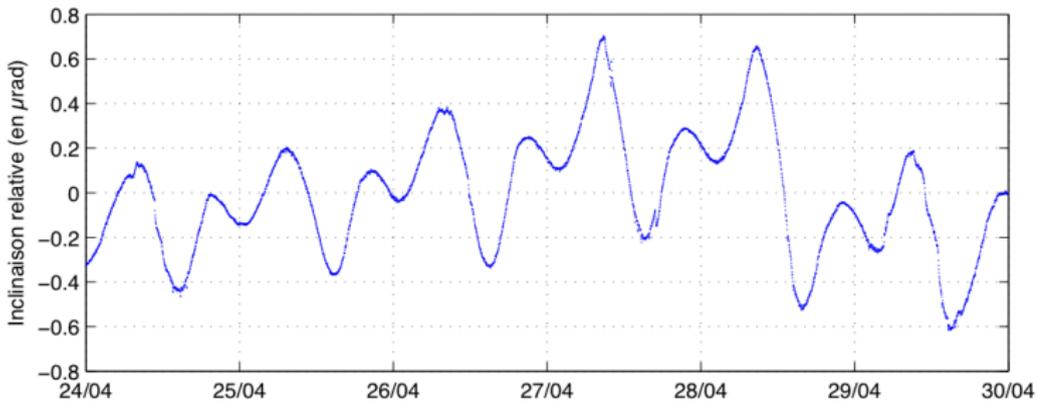
# Nadirane: 140 ans plus tard



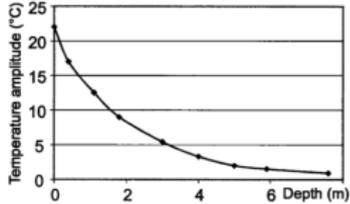
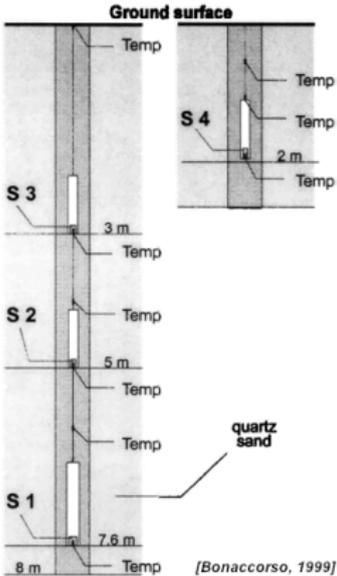
## Projet Académie des Sciences

- ▶ partenariat IPGP
- ▶ J. Dercourt, J.-L. Le Mouél, J.-P. Poirier, M.-F. Esnout, C. Brunet, F. Beauducel (2010)

# Nadirane: 140 ans plus tard

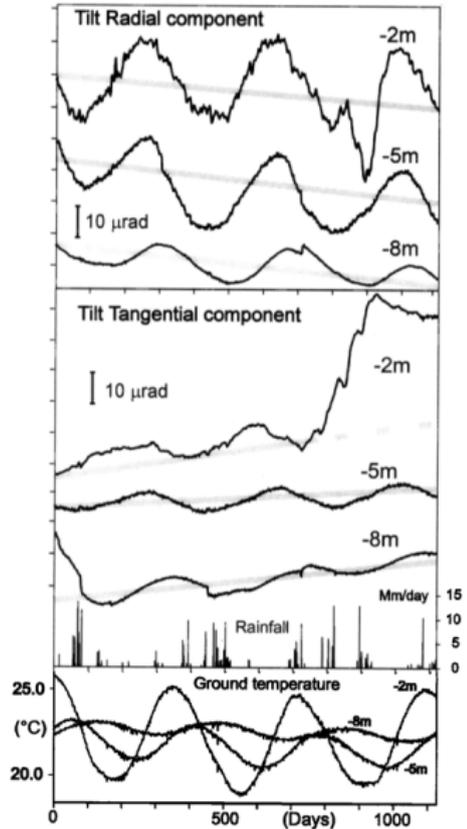


# Inclinométrie: couplage et effets thermiques



[Bonaccorso et al., 1999]

- ▶ expérimentation sur 3 ans
- ▶ gradient thermique vertical
- ▶ effets de la pluie

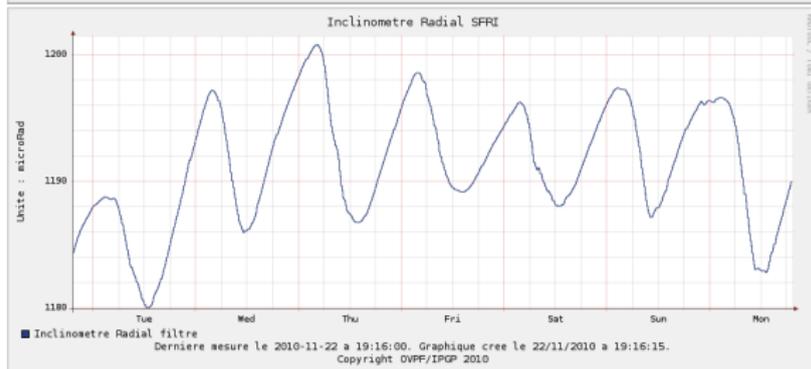
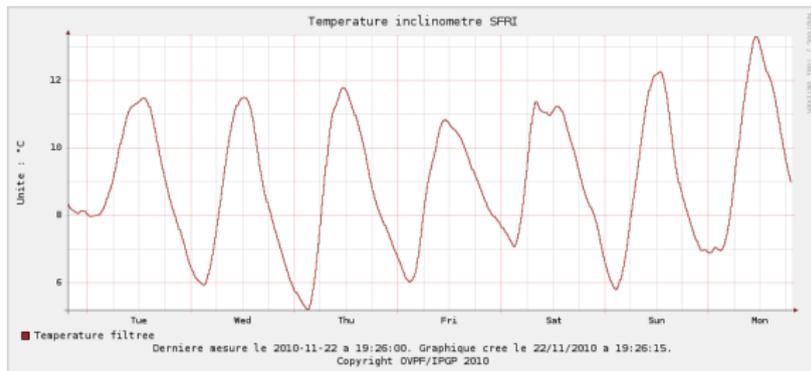


# Couplage: installation de surface

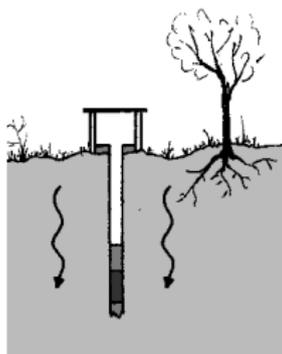


[OVSG-IPGP, 2010]

- ▶ ex: Fournaise
- ▶ effets thermo-mécaniques
- ▶ fractures = non linéaire

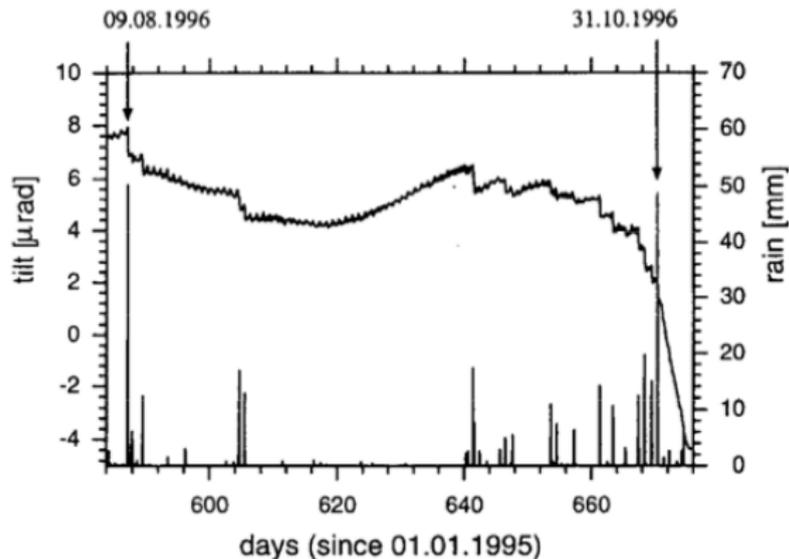


# Couplage: puits dans sol poreux



[Rebscher et al., 2000]

- ▶ ex: Merapi
- ▶ circulation de fluides

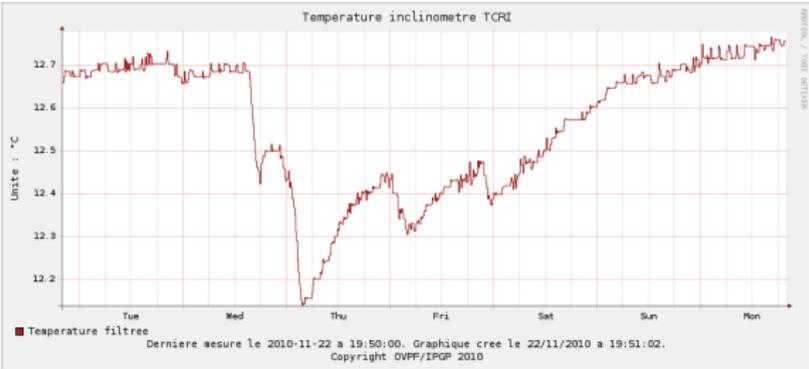


# Couplage: cavité naturelle



[OVSG-IPGP, 2010]

- ▶ ex: Fournaise
- ▶ effets de cavité
- ▶ non linéaire



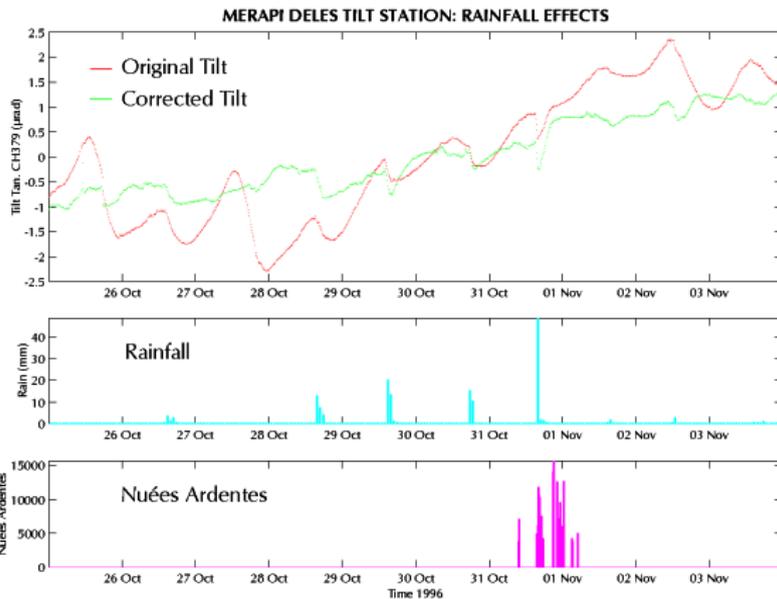


# Couplage: solution "Merapi"



[Beauducel & Cornet, 1999]

- ▶ Ex: Merapi
- ▶ dépôts cendreux sur lave massive = isolant naturel



[Beauducel, 1998]



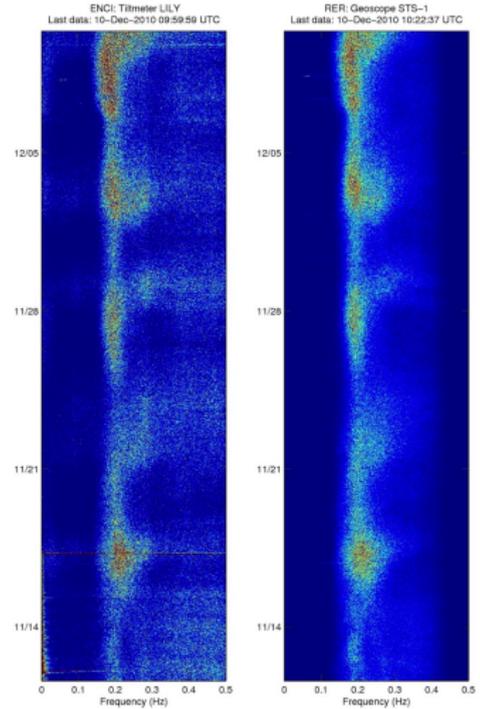


# Piton de la Fournaise: forages peu profonds

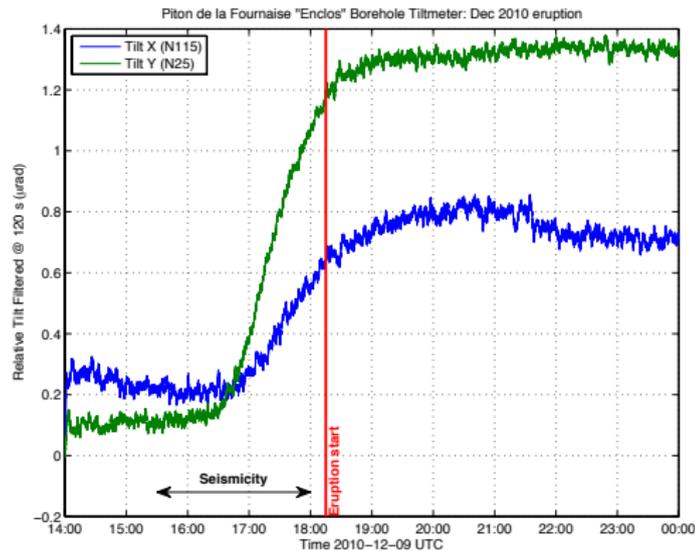


[Beauducel et al., 2010]

- Piton de la Fournaise: forages 10 m
- ▶ variations diurnes = 0.002 °C
  - ▶ marées terrestres
  - ▶ bruit microsismique
  - ▶ éruptions et pluies > 200 mm/h

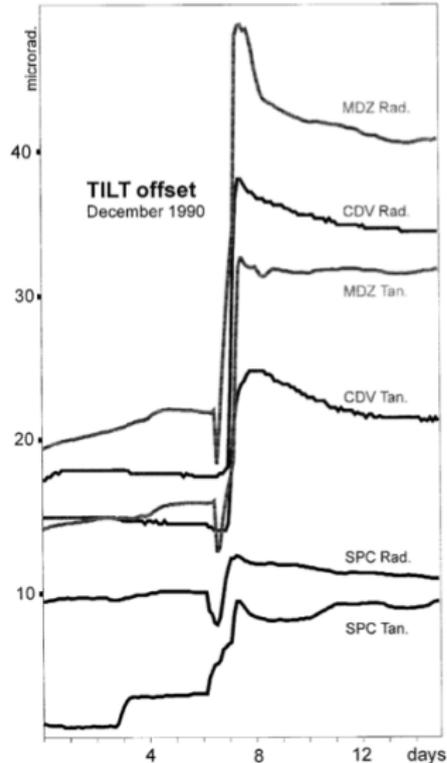
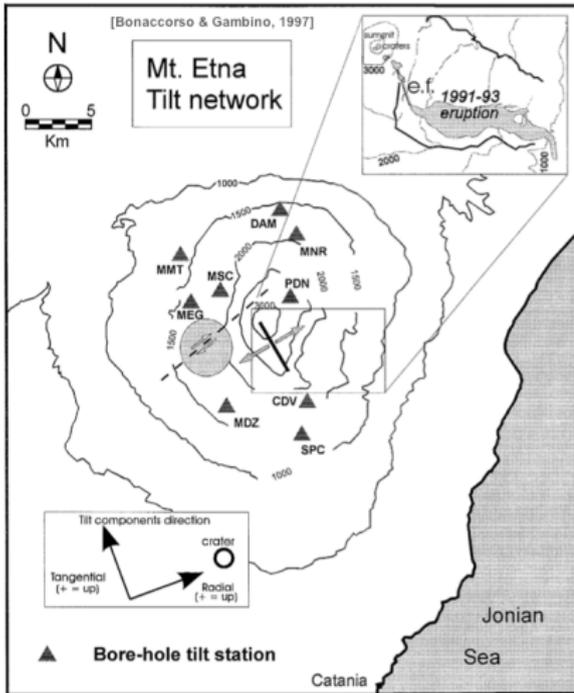


# Piton de la Fournaise: forages peu profonds



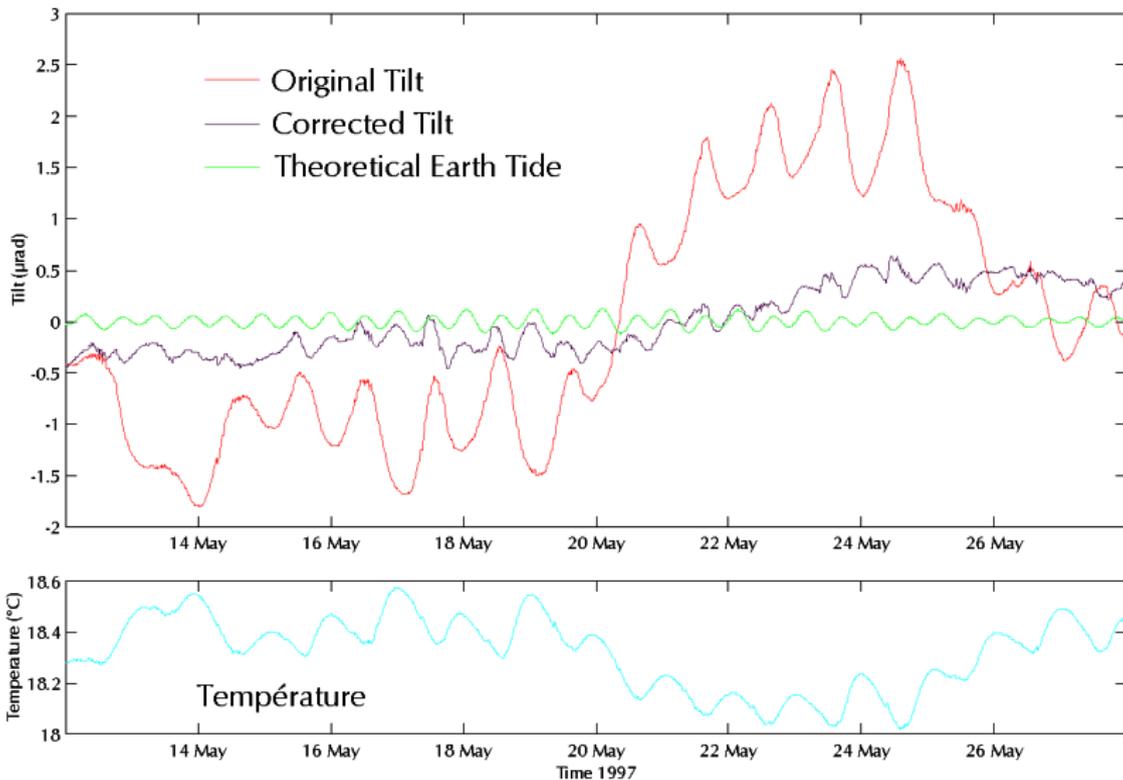


# Inclinométrie: signaux associés aux éruptions

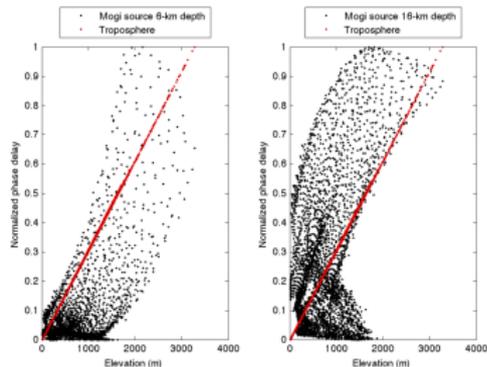
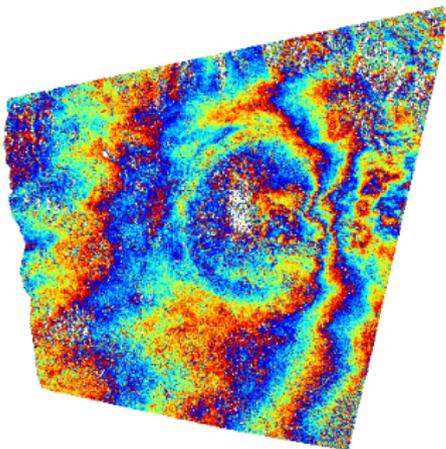
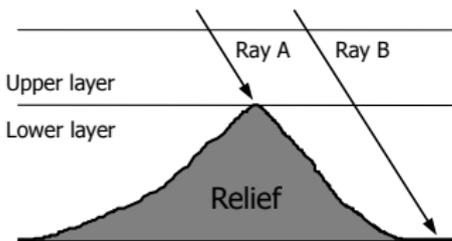


# Traitements a posteriori

## MERAPI DELES TILT: TIDES EFFECTS



# InSAR: artéfacts troposphériques

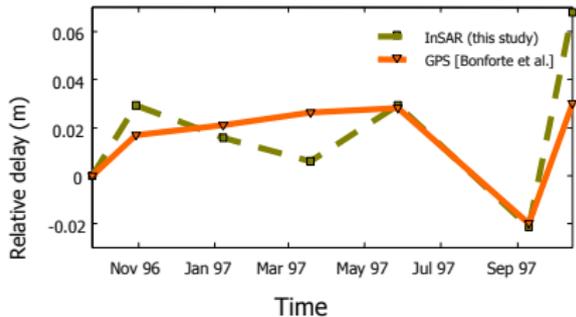
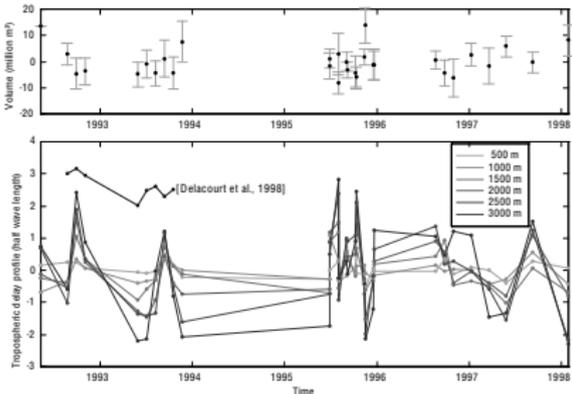


## Corrélation avec la topographie ?

- ▶ angle du rayon d'incidence + asymétrie:
- ▶ phase troposphère  $\neq$  phase déformations
- ▶ modèle conjoint possible



# InSAR: modélisation conjointe



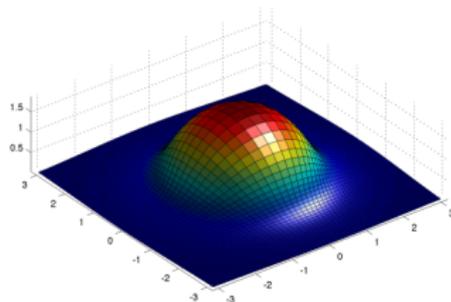
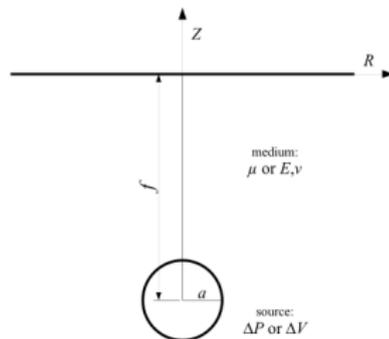
- [Beauducel et al., 2000]
- ▶ inversion conjointe troposphère + déformations
  - ▶ délais troposphériques compatibles avec autres méthodes indépendantes



# Modèles: quelle complexité?

## “Top 2” des modèles analogiques

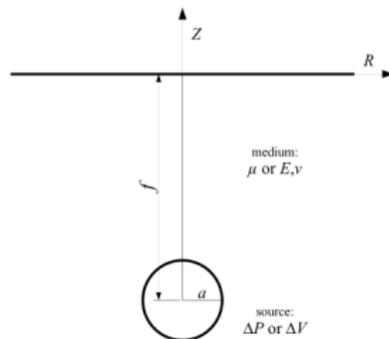
- ▶ Point source (pression isotrope) en semi-espace élastique homogène [Anderson, 1936; Mogi, 1958]
- ▶ Discontinuité plane (faille) en semi-espace élastique homogène [Okada, 1985]



# Modèles: quelle complexité?

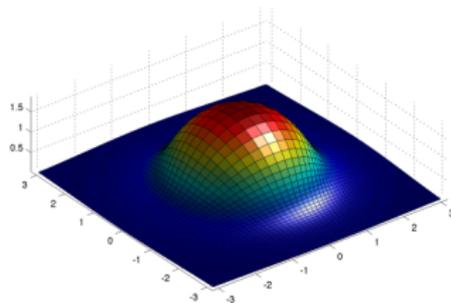
## “Top 2” des modèles analogiques

- ▶ Point source (pression isotrope) en semi-espace élastique homogène [Anderson, 1936; Mogi, 1958]
- ▶ Discontinuité plane (faille) en semi-espace élastique homogène [Okada, 1985]

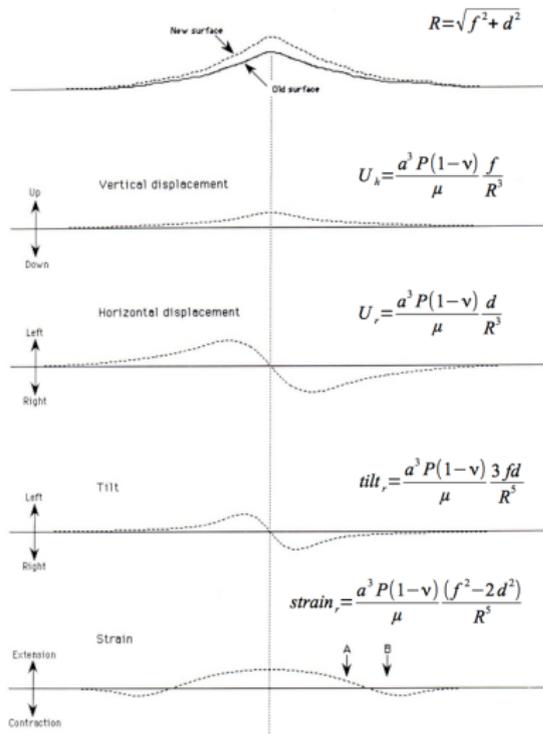
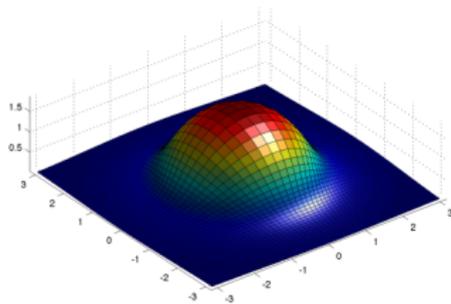
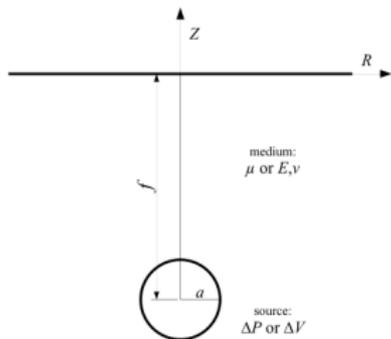


## Complexités requises

- ▶ sources et géométries multiples
- ▶ 3-D: topographie et structures
- ▶ Discontinuités du milieu (fractures)
- ▶ Rhéologies du milieu: anisotropie élastique, visco-élasticité, poro-élasto-plasticité...



# Modèle de Mogi

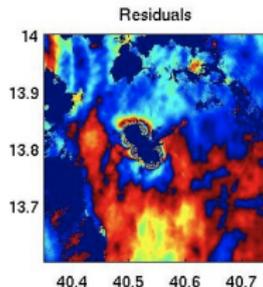
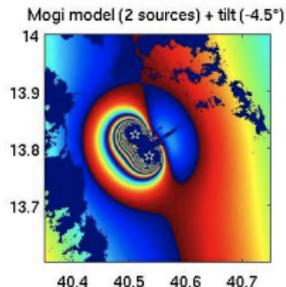
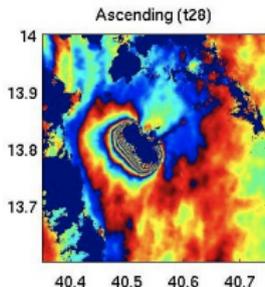
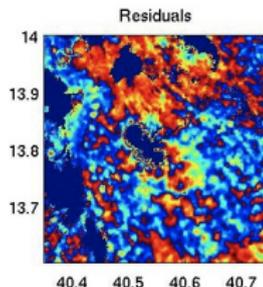
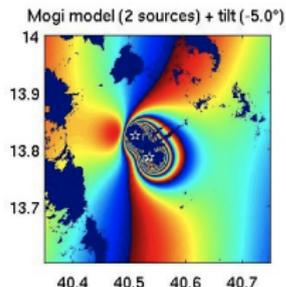
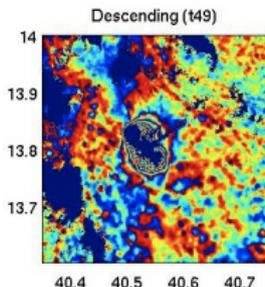
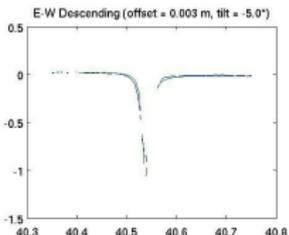
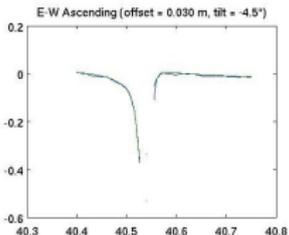




# Alu-Dala Filla: modèle de sources ponctuelles (InSAR)

[Le Mevel, 2010]

- ▶ orbites A/D
- ▶  $\Delta V$  et profondeur



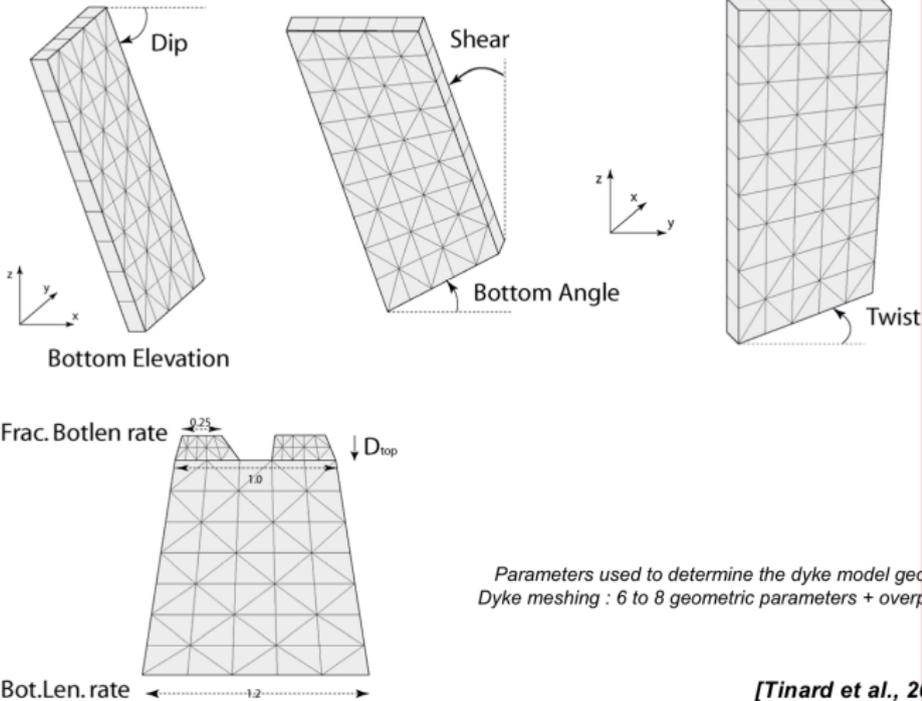






# InSAR: déformations co-éruptives

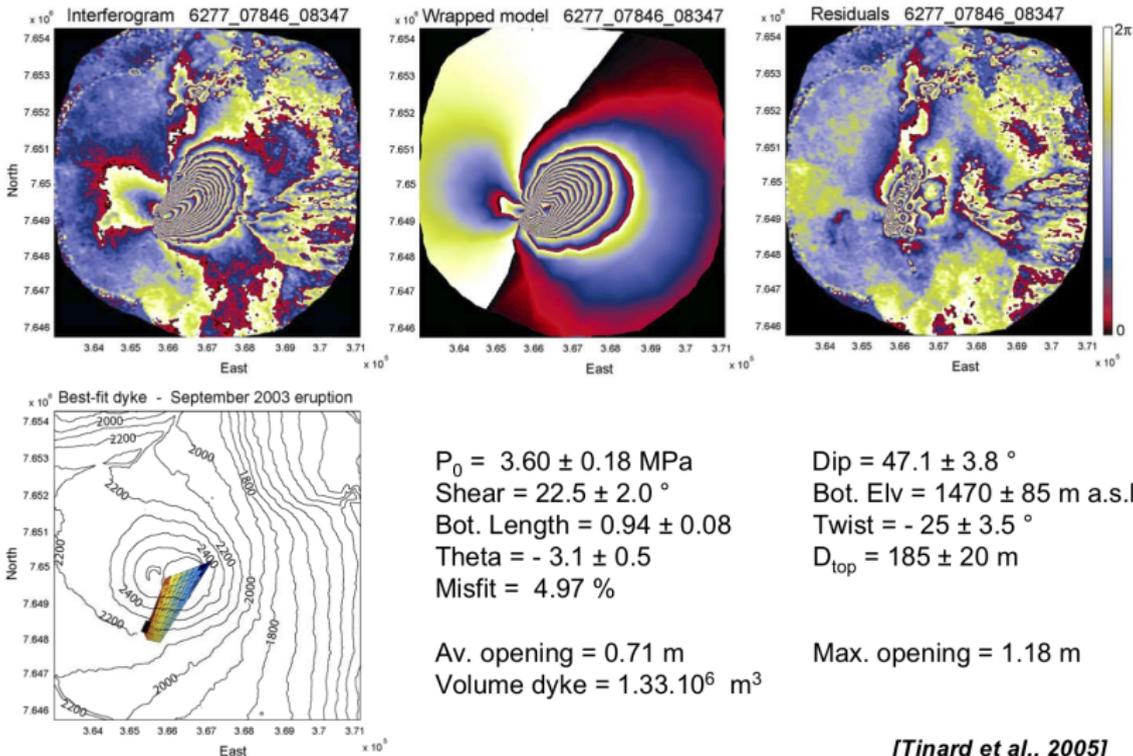
## Meshydyke and 3D-MBEM (Cayol and Cornet)





# InSAR: déformations co-éruptives

September 2003



$P_0 = 3.60 \pm 0.18 \text{ MPa}$   
 Shear =  $22.5 \pm 2.0^\circ$   
 Bot. Length =  $0.94 \pm 0.08$   
 Theta =  $-3.1 \pm 0.5$   
 Misfit = 4.97 %

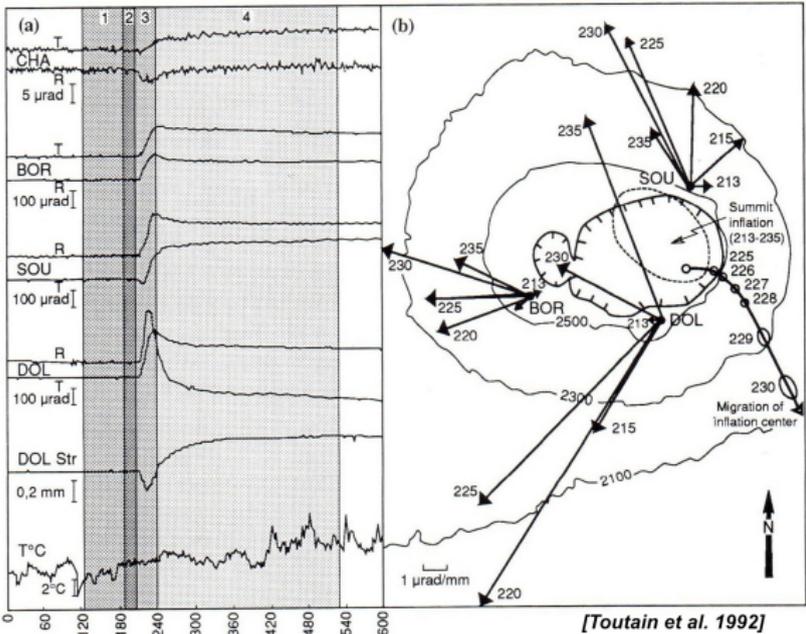
Dip =  $47.1 \pm 3.8^\circ$   
 Bot. Elv =  $1470 \pm 85 \text{ m a.s.l.}$   
 Twist =  $-25 \pm 3.5^\circ$   
 $D_{\text{top}} = 185 \pm 20 \text{ m}$

Av. opening = 0.71 m  
 Volume dyke =  $1.33 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

Max. opening = 1.18 m

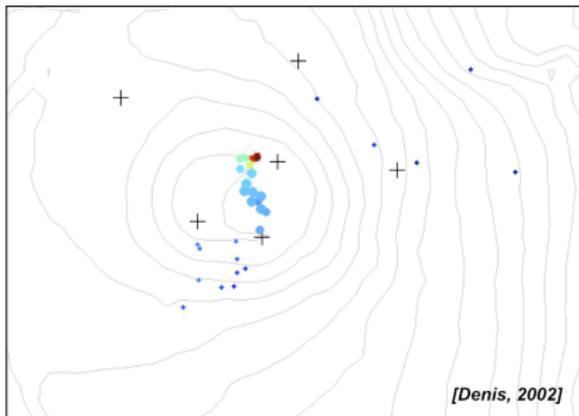
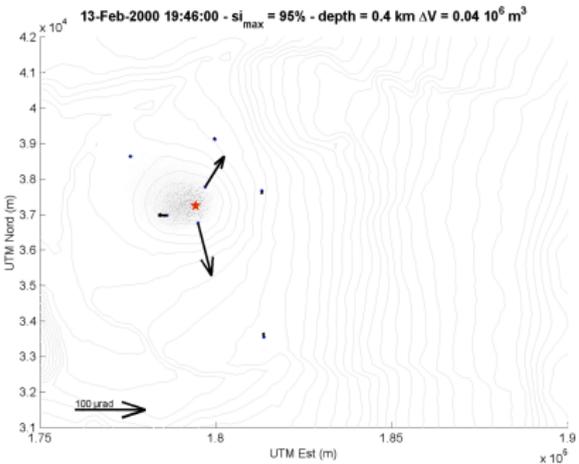
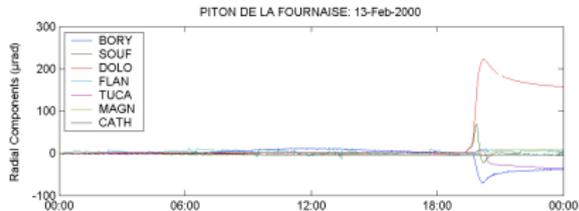
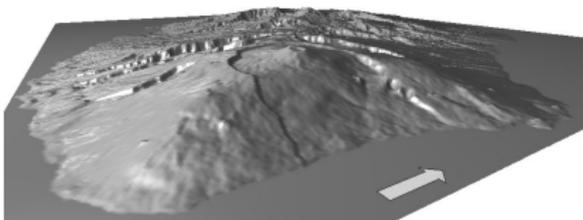
[Tinard et al., 2005]

# Piton de la Fournaise: suivi temporel des intrusions

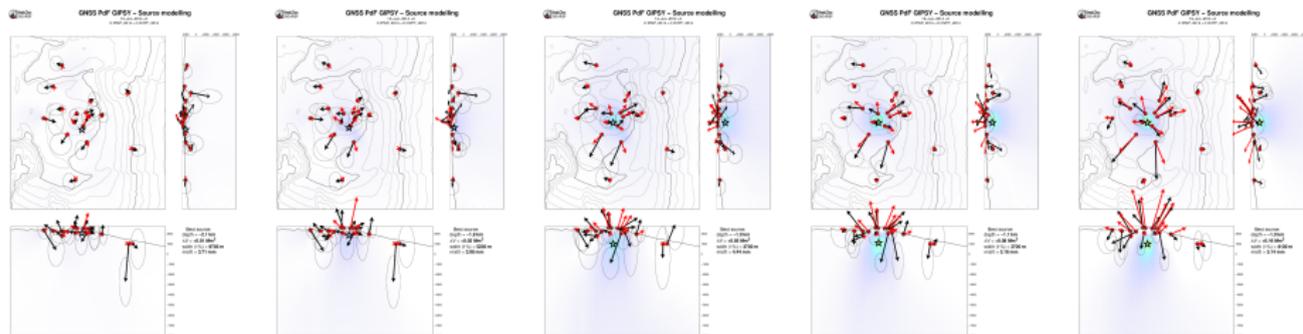


- [Toutain et al., 1992]
- ▶ réseau inclinomètres
  - ▶ localisation du centre d'inflation
  - ▶ point de sortie de l'éruption
  - ▶ pas d'estimation de volume

# Piton de la Fournaise: suivi temporel des intrusions



# Piton de la Fournaise: suivi temporel des intrusions



12/6/2014  
+10 000 m<sup>3</sup>

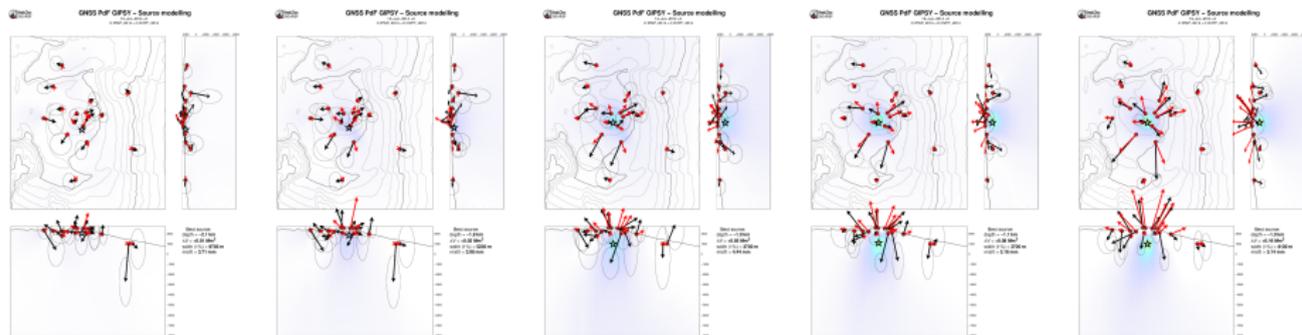
13/6/2014  
+20 000 m<sup>3</sup>

14/6/2014  
+50 000 m<sup>3</sup>

16/6/2014  
+80 000 m<sup>3</sup>

19/6/2014  
+160 000 m<sup>3</sup>

# Piton de la Fournaise: suivi temporel des intrusions



12/6/2014  
+10 000 m<sup>3</sup>

13/6/2014  
+20 000 m<sup>3</sup>

14/6/2014  
+50 000 m<sup>3</sup>

16/6/2014  
+80 000 m<sup>3</sup>

19/6/2014  
+160 000 m<sup>3</sup>

## Éruption du 20 juin 2014

- ▶ données GPS modélisées en temps-réel
- ▶ 5 jours de précurseurs de déformations
- ▶ volume de lave réellement = 300 000 m<sup>3</sup> non compactée



# Les capteurs

## Définitions

- ▶ **capteur:** élément permettant de traduire une grandeur physique (*le mesurande*) en un signal utilisable, généralement électrique
- ▶ **étendue/plage de mesure:** valeurs extrêmes pouvant être mesurées par le capteur
- ▶ **résolution:** plus petite variation de grandeur mesurable
- ▶ **sensibilité:** rapport de variation des signaux d'entrée/sortie
- ▶ **précision:** aptitude du capteur à donner une mesure proche de la valeur vraie (cf. sources d'erreurs)
  - **fidélité/répétabilité:** dispersion des mesures autour de la valeur moyenne (écart-type)
  - **justesse:** proximité de la moyenne à la valeur vraie
- ▶ **réponse:** rapidité, temps de réaction du capteur















# Format des données

## Sismologie

- ▶ formats propriétaires: presque autant que de numériseurs...
- ▶ plusieurs formats standards de traitement: SAC, SEGy, SUDS, AH, GSE, ...
- ▶ un format d'échange et d'archivage: SEED
  - permet d'intégrer tout type de série temporelle ( $T_0 + S.F$ )
  - web-services, outils de requêtes, archivage (**arclink**)
  - protocole de flux temps-réel (**seedlink**)
- ▶ un site communautaire: [www.orfeus-eu.org](http://www.orfeus-eu.org)

## GPS

- ▶ formats propriétaires: *Trimble, Leica, Ashtech, Topcon, ...* autant que de récepteurs!
- ▶ un unique format standard: RINEX
- ▶ un outil de conversion / traitements: **teqc** (UNAVCO - libre)

















