

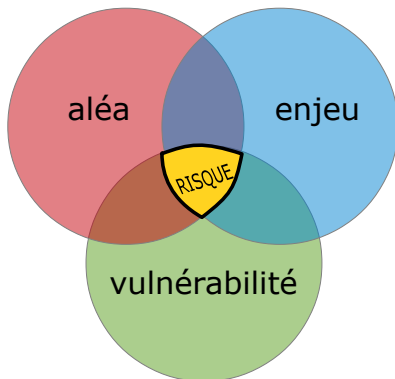
**Observer et mesurer les déformations des systèmes naturels**  
 Contribution à l'évaluation des risques sismiques et volcaniques

Pr. François Beauducel

Institut de physique du globe de Paris (IPGP)  
 Sorbonne Paris Cité, Univ. Paris Diderot, CNRS UMR 7154



# Risque et aléa



## Définition

$$\text{Risque} = \text{Aléa} \times \text{Enjeu} \times \text{Vulnérabilité}$$



## 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 ?

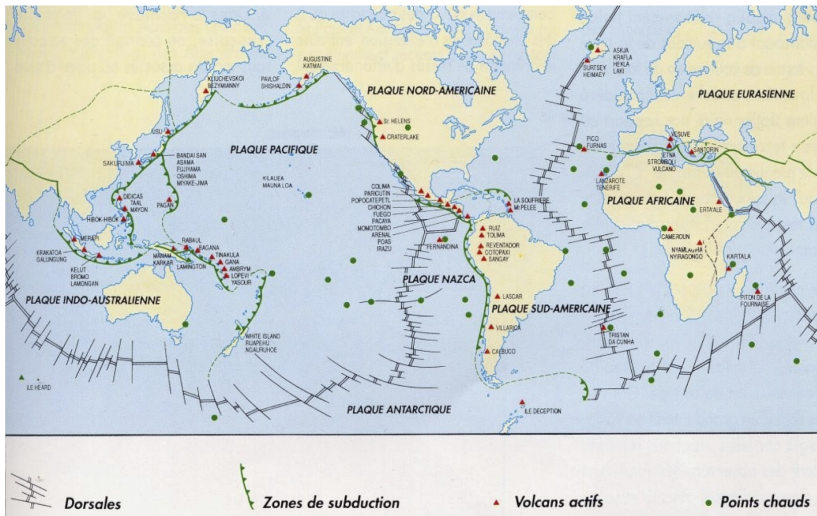
## Risque sismique

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

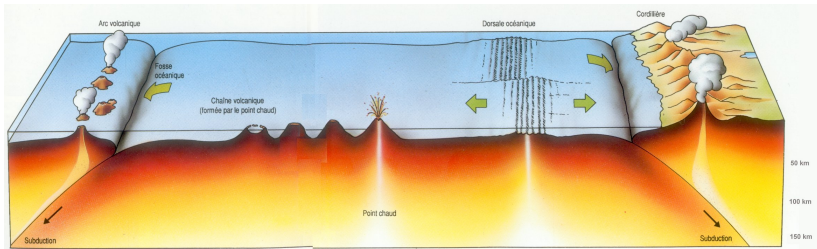
## Risque tsunami

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

# Contexte géodynamique



# Contexte géodynamique



## 3 grandes familles de volcans

- ▶ zones d'accrétion (milieu océanique ou continental)
- ▶ zones de convergence
- ▶ points chauds

## 2 grands types de volcanisme

- ▶ effusif (accrétion et points chauds)
- ▶ explosif (zone de subduction)

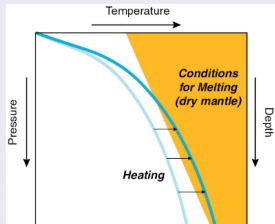
## 2 grands types de séismes

- ▶ subduction
- ▶ crustal

# Production du magma: la fusion partielle

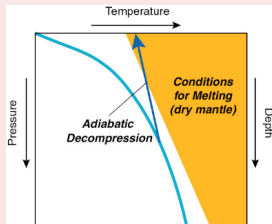
## Zones d'accrétion

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



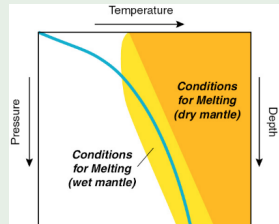
## Points chauds

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



## Zones de subduction

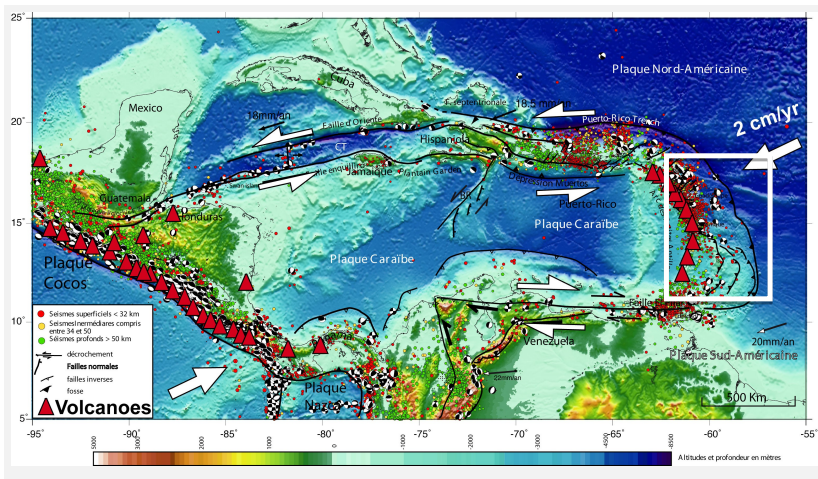
- ▶ apport d'eau dans le système
- ▶ rapprochement liquidus / géotherme
- ▶ liquide magmatique enrichi en volatiles (CO<sub>2</sub>) provenant des sédiments marins carbonatés







# Les Antilles: un laboratoire d'exception



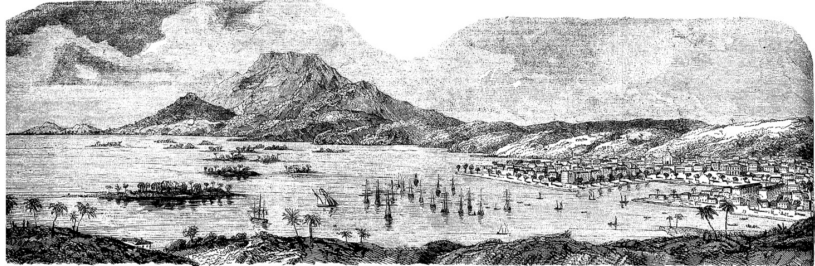
► observer les phénomènes à l'échelle de la structure géologique qui les engendre

► collaborer avec les partenaires scientifiques de la Caraïbe





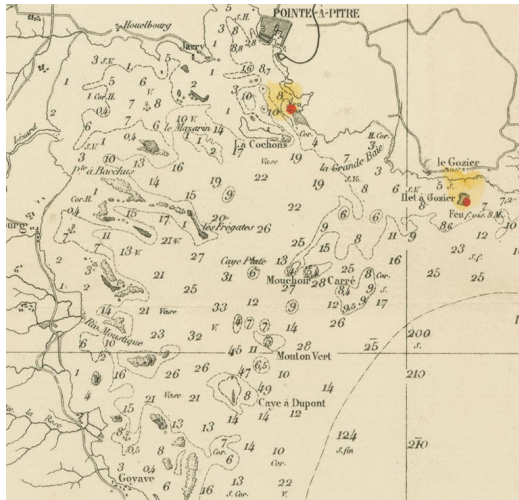
# 8 février 1843: une énigme ?







# 1843: les îlets disparus

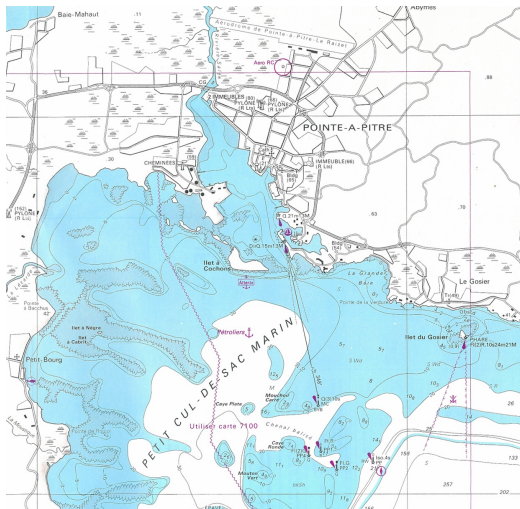


1867



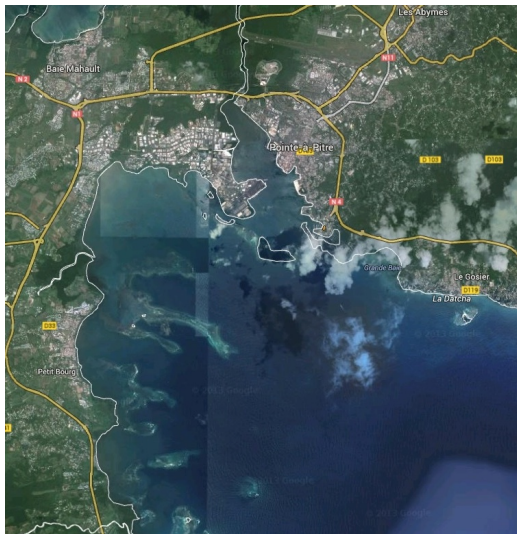
# 1843: les îlets disparus

2007

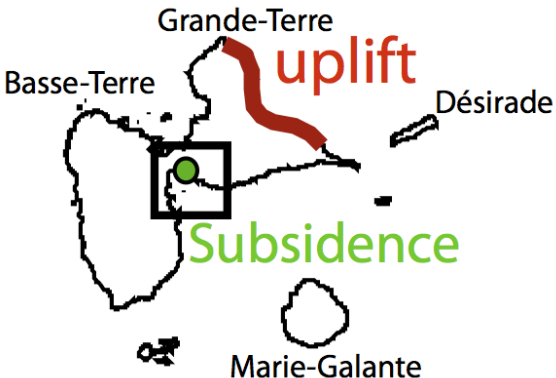


# 1843: les îlets disparus

2012

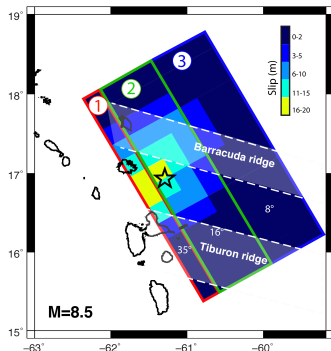
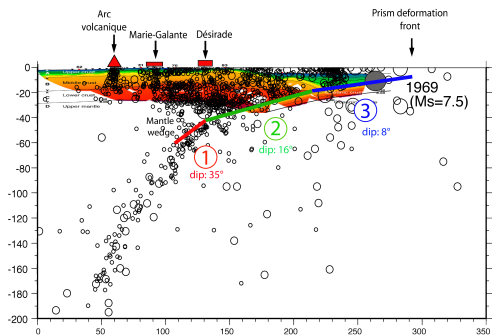


# 1843: un nouveau modèle de rupture sismique



[Beauducel & Feuillet, AGU 2012]

# 1843: un nouveau modèle de rupture sismique



[Beauducel & Feuillet, AGU 2012]

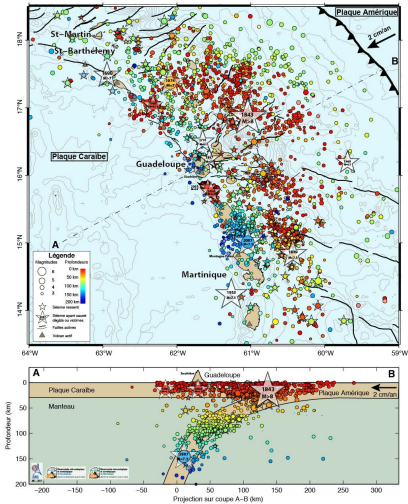




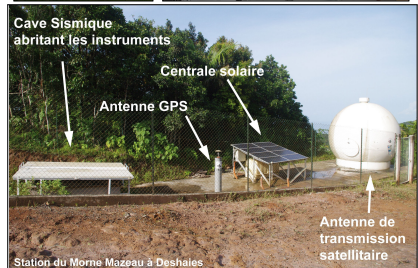


# Activité sismique quotidienne

## ARC DES PETITES ANTILLES Sismicité 1996-2011 (M>3) et séismes historiques majeurs



► Instrumentation de dernière génération





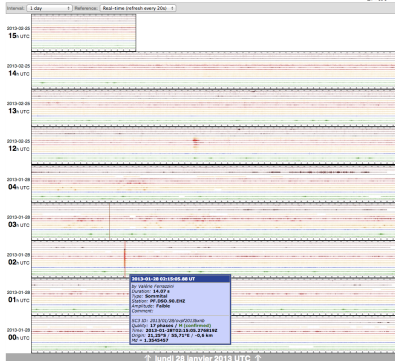


## SEFRANS: Sismologie OVVP SeedLink

2013-02-25  
15:18 UTC

[?] Informations (Mon Courant Séismes OVVP)

- 27 - 00 s

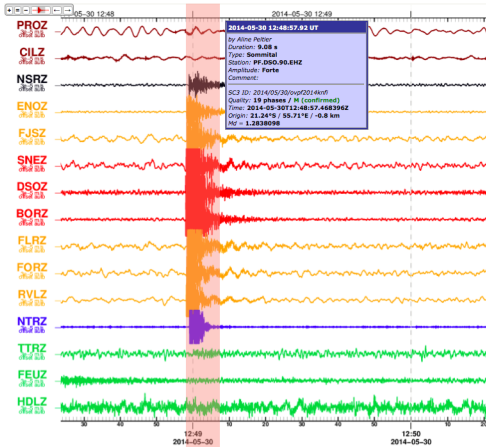


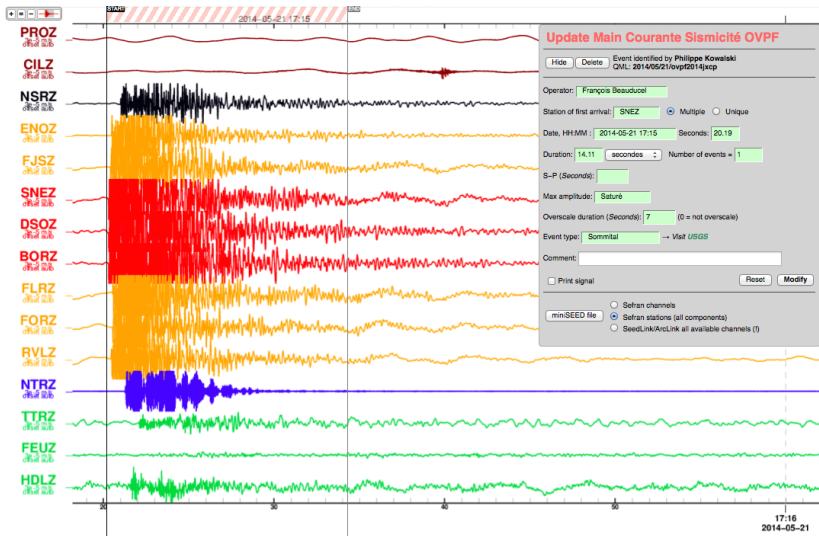
## Informations

#	Axis	Channel	Collection	Offset (mm)	Peak-Peak (mm)	Offset (µm)	Signal statistics	Mean (µm)	Stdev (µm)	Rate (%)	Stdev (%)	Observed data	Last date	Buffer (s)	Status
1	PROZ	PF_090_90-EHZ	0.2000000000	auto	5e-5	0.0001	100%	0%	0.0002	100%	100%	20130205 12:30:30.8000	20130205 15:18:15.8880	311.2	OK
2	PROZ	PF_090_90-EHZ	0.5000000000	auto	5e-5	0.0001	100%	0%	0.0002	100%	100%	20130205 12:30:30.8000	20130205 15:18:15.8880	311.2	OK
3	CILZ	PF_090_90-EHZ	0.2000000000	auto	5e-5	-1.7070	100%	1%	0.1498	100%	100%	20130205 12:30:30.8000	20130205 15:18:15.8880	311.2	OK
4	CILZ	PF_090_90-EHZ	0.5000000000	auto	5e-5	-0.0340	100%	2%	0.0461	100%	100%	20130205 12:30:30.8000	20130205 15:18:15.8880	311.2	OK
5	ENOZ	PF_090_90-EHZ	0.2000000000	auto	5e-5	10.0450	100%	1%	0.0009	100%	100%	20130205 12:30:30.8000	20130205 15:18:15.8880	311.2	OK
6	ENOZ	PF_090_90-EHZ	0.5000000000	auto	5e-5	-0.7100	100%	0%	0.4338	100%	100%	20130205 12:30:30.8000	20130205 15:18:15.8880	311.2	OK
7	FJSZ	PF_090_90-EHZ	0.2000000000	auto	5e-5	0.0000	100%	0%	0.1417	100%	100%	20130205 12:30:30.8000	20130205 15:18:15.8880	311.2	OK
8	FJSZ	PF_090_90-EHZ	0.5000000000	auto	5e-5	-0.0404	100%	1%	0.1493	100%	100%	20130205 12:30:30.8000	20130205 15:18:15.8880	311.2	OK
9	SNEZ	PF_090_90-EHZ	0.2000000000	auto	5e-5	0.3813	100%	0%	0.0007	100%	100%	20130205 12:30:30.8000	20130205 15:18:15.8880	411.4	OK
10	SNEZ	PF_090_90-EHZ	0.5000000000	auto	5e-5	0.0000	100%	1%	0.0007	100%	100%	20130205 12:30:30.8000	20130205 15:18:15.8880	411.4	OK
11	BORZ	PF_090_90-EHZ	0.2000000000	auto	5e-5	-0.0042	100%	2%	0.1143	100%	100%	20130205 12:30:30.8000	20130205 15:18:15.8880	311.2	OK
12	BORZ	PF_090_90-EHZ	0.5000000000	auto	5e-5	-0.8704	100%	0%	0.0009	100%	100%	20130205 12:30:30.8000	20130205 15:18:15.8880	311.2	OK
13	FORZ	PF_090_90-EHZ	0.2000000000	auto	5e-5	10.0700	100%	1%	0.0007	100%	100%	20130205 12:30:30.8000	20130205 15:18:15.8880	711.2	OK
14	FORZ	PF_090_90-EHZ	0.5000000000	auto	5e-5	08.7000	100%	0%	0.2880	100%	100%	20130205 12:30:30.8000	20130205 15:18:15.8880	411.4	OK
15	RVLZ	PF_090_90-EHZ	0.2000000000	auto	5e-5	-0.7090	100%	1%	0.1108	100%	100%	20130205 12:30:30.8000	20130205 15:18:15.8880	311.2	OK
16	RVLZ	PF_090_90-EHZ	0.5000000000	auto	5e-5	-0.7090	100%	1%	0.1108	100%	100%	20130205 12:30:30.8000	20130205 15:18:15.8880	311.2	OK

Selected configuration file: SEFRANS\_OVVP.conf

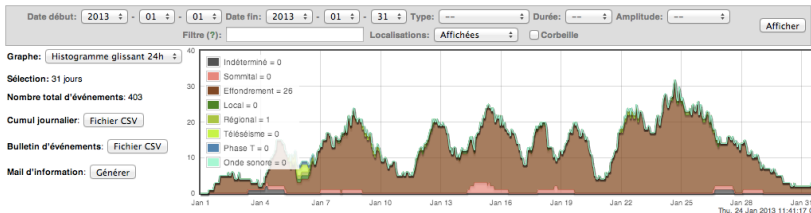
Channels parameters file: SEFRANS\_OVVP\_Channels.conf





## Main Courante Sismicité OVPF

[ Notes | Sefran3 ]



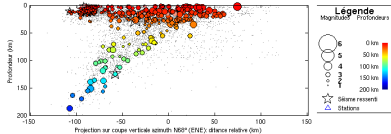
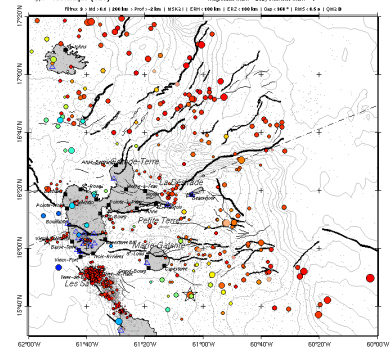
Md	km	Sta1	Date	Heure	#	Type	Amplitude	Dur.	S-P	Signal	Sefran	Op	Commentaire	Épicentre	Prof.	M	EMS	B <sup>3</sup>
<input checked="" type="checkbox"/>		RVL	2013-01-31	11:49:25.02	1 x	Onde sonore	Faible	11.2 s		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	THS					
<input checked="" type="checkbox"/>		BOR	2013-01-30	15:45:01.68	1 x	Effondrement	Moyenne	26.4 s		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	FL					
<input checked="" type="checkbox"/>		NSR	2013-01-30	14:58:40.21	1 x	Effondrement	Faible	8.1 s		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	FL					
<input checked="" type="checkbox"/>		BOR	2013-01-29	16:33:30.98	1 x	Effondrement	Faible	13.9 s		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	THS					
<input checked="" type="checkbox"/>		SNE	2013-01-29	14:19:32.02	1 x	Effondrement	Faible	4.4 s		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	THS					
<input checked="" type="checkbox"/>		DSO	2013-01-29	11:40:04.40	1 x	Effondrement	Faible	5.7 s		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	THS					
<input checked="" type="checkbox"/>		DSO	2013-01-29	02:44:24.86	1 x	Effondrement	Faible	8.5 s		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	THS					
<input checked="" type="checkbox"/>		SNE	2013-01-29	01:05:59.72	1 x	Effondrement	Faible	8.3 s		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	THS					
<input checked="" type="checkbox"/>		BOR	2013-01-28	18:36:36.22	1 x	Effondrement	Faible	6.9 s		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	VF					
<input checked="" type="checkbox"/>		BOR	2013-01-28	16:32:39.37	1 x	Effondrement	Faible	4.8 s		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	FL					
<input checked="" type="checkbox"/>		DSO	2013-01-28	16:00:12.59	1 x	Effondrement	Faible	6.6 s		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	FL					
<input checked="" type="checkbox"/>		FLR	2013-01-28	11:28:45.81	1 x	Effondrement	Faible	4.0 s		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	FL					
<input checked="" type="checkbox"/>		FOR	2013-01-28	11:15:37.30	1 x	Effondrement	Faible	4.6 s		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	THS					
<input checked="" type="checkbox"/>		SNE	2013-01-28	03:12:40.33	1 x	Effondrement	Faible	5.3 s		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	THS					
<input checked="" type="checkbox"/>	1.4	3	DSO	2013-01-28	02:15:05.88	1 x	Sommital	Faible	14.1 s	0.4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	VF	M 0.3 km				Piton de la Fournaise -0.6 1.35 Md I (II)
<input checked="" type="checkbox"/>		FLR	2013-01-27	23:35:27.58	1 x	Effondrement	Faible	7.6 s		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	THS					
<input checked="" type="checkbox"/>		FOR	2013-01-27	23:14:00.04	1 x	Effondrement	Faible	4.2 s		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	THS					
<input checked="" type="checkbox"/>		FLR	2013-01-27	21:29:36.06	1 x	Effondrement	Faible	3.6 s		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	THS					
<input checked="" type="checkbox"/>		BOR	2013-01-27	20:41:00.76	1 x	Effondrement	Faible	4.5 s		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	THS					
<input checked="" type="checkbox"/>		BOR	2013-01-27	17:54:02.08	1 x	Effondrement	Faible	4.7 s		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	THS					
<input checked="" type="checkbox"/>		BOR	2013-01-27	16:59:26.94	1 x	Effondrement	Faible	2.7 s		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	THS					
<input checked="" type="checkbox"/>		FOR	2013-01-27	13:47:51.65	1 x	Effondrement	Faible	2.8 s		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	THS					
<input checked="" type="checkbox"/>		BOR	2013-01-27	13:07:05.72	1 x	Effondrement	Faible	2.1 s		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	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)

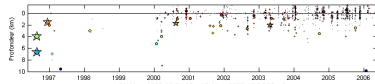
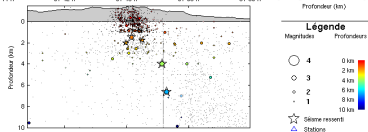
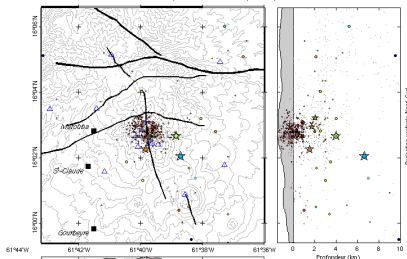
Dernier évènement: Du 22-May-2010 +0 au 22-May-2011 +0  
 Date: 17-May-2011 10:57:43 +0 Tectonique = 61Z (dont 10 ressentis)  
 Lat = 19°36'43" N, Lon = 61°24'57" W Soutière = 46  
 Prof = 2.13 km, Md = 1.7 Ache = 5  
 Type = Tectonique (TE1) Magnitude max. = 3.9, Intensité max. = V  
 Filtré: 9 à Md < 0.1 | 200 km | Prof. < 2 km | MSK II | CMI: 100 km | C42: 100 km | Gap: 0.0° \* | 0.05: 6.5 s | 0.02 s



IS 0155-IPGP - 22-May-2011 08:02:43 - SISMOHYP-GUA\_1an - by mshb

### 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 Autres = 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 0155-IPGP - 19-May-2006 15:53:51 - SISMOHYP-SOU\_10a - by mshb on document.org.org.org

## RAP: Accélérométrie

## Localisation OVSG:

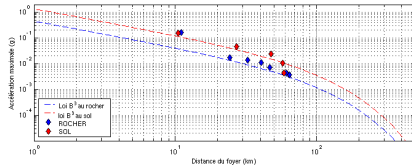
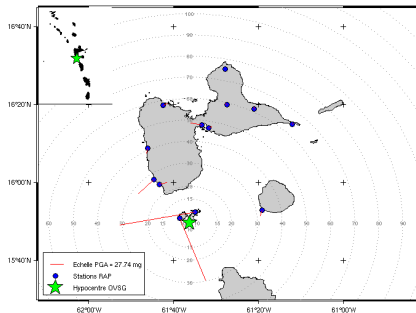
Date: 27-Dec-2004 20:58:14 +G  
 Lat = 15°49'39" N, Lon = 61°36'10" W  
 Prof = 9.57 km, Md = 4.7  
 Code = TESGP

## 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

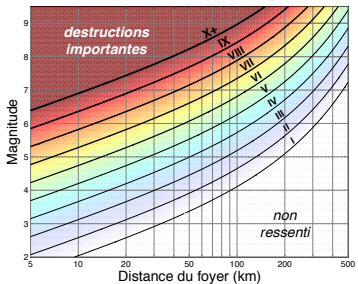
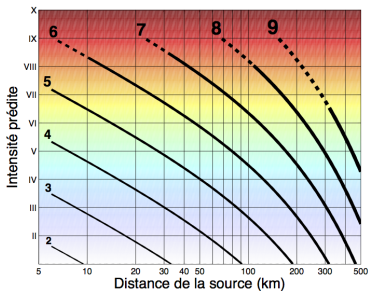


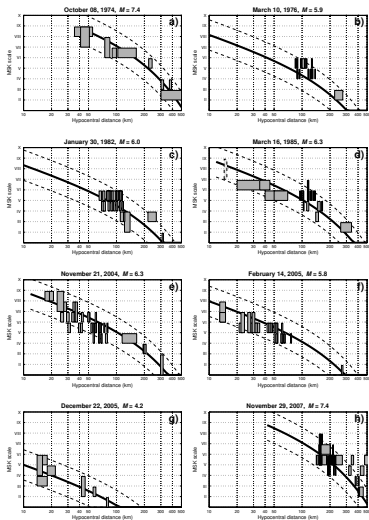
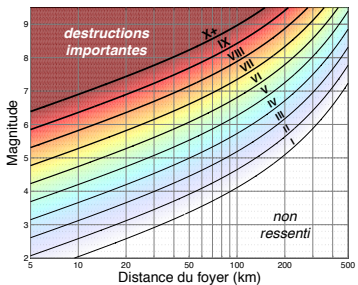
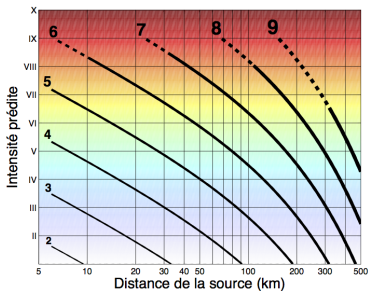




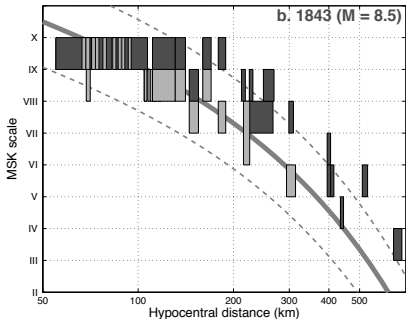
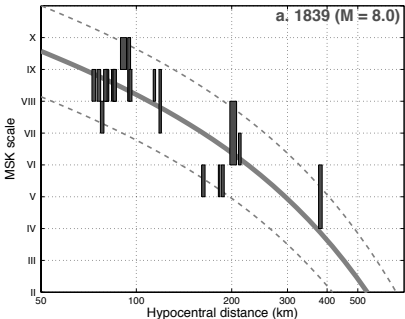








# Évaluation des magnitudes de séismes anciens



[Feuillet et al., JGR 2011]

# Prédiction rapide des intensités sismiques



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

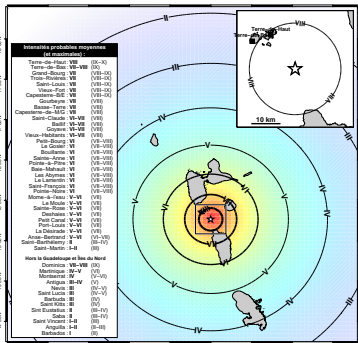
Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe - IPGP  
 Le Plateau - 97113 Goubeaya - Guadeloupe (FR)  
 Tél : +590 (0)590 99 11 33 - Fax : +590 (0)590 99 11 34 - info@obs-uvn-igp.fr - www.igp.fr



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 15 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).



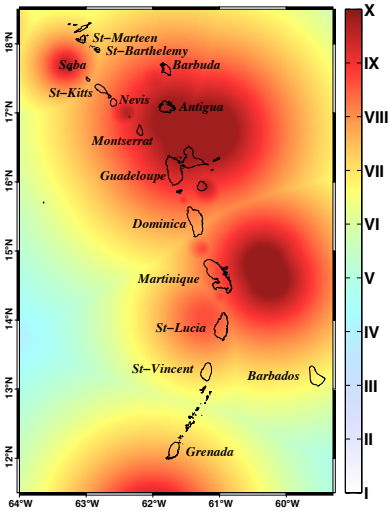
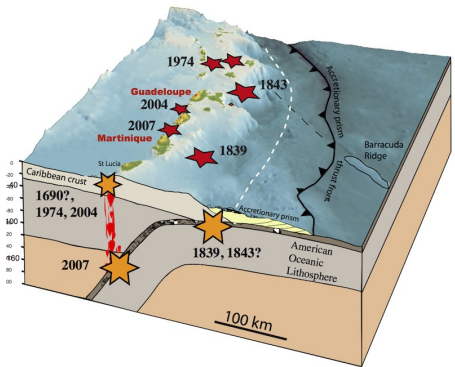
	64°30'W	62°30'W	62°00'W	61°30'W	61°00'W	60°30'W	60°00'W
Perception Humaine	très ressentie	très forte	forte	modérée	forte	très forte	très forte
Dégâts Potentiels	aucun	aucun	aucun	très légers	légers	modérés	importants
Accélération (mg)	< 1.5	1.5 - 2.2	2.2 - 6.8	6.8 - 15	15 - 32	32 - 160	160 - 320
Intensité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

(\* mg = 1000 g) \*1000 g est une unité d'accélération correspondante au double de la pesanteur. La ligne pointillée délimite la zone où le séisme a pu être potentiellement ressenti.

## Communiqués séisme ressenti

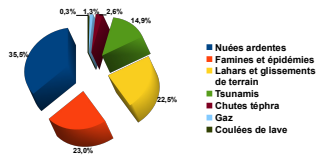
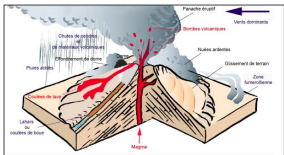
- ▶ calcul « immédiat » après un événement (≈ 10 mn)
- ▶ prédiction des intensités maximales probables dans chaque commune
- ▶ en cas de faible séisme, permet de « rassurer » la population en confirmant leur ressenti
- ▶ en cas de gros dégâts + problèmes de communication, permet d'aider à focaliser l'action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



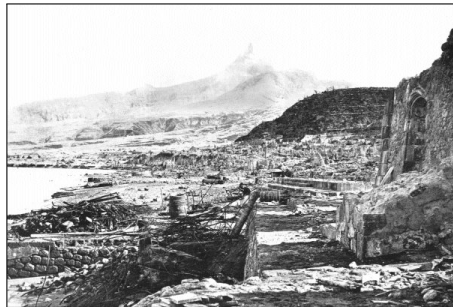
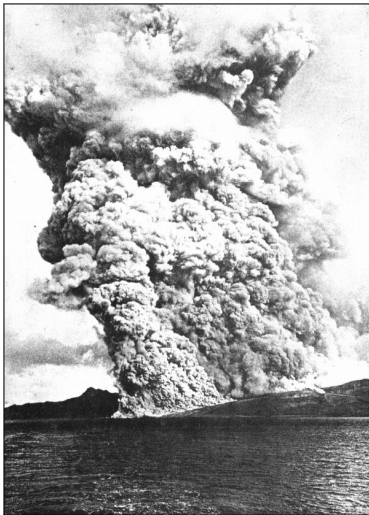
## Les grandes catastrophes historiques récentes

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

# 8 mai 1902: éruption Montagne Pelée, 29 000 morts



- ▶ nombreux précurseurs: séismes, explosions, cendres incandescentes, ...
- ▶ pas d'évacuation pour raisons politiques

# 1976-1977: crise de la Soufrière, 72 000 évacués





# 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  $\frac{1}{2}$

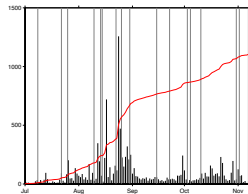
## 2 hypothèses contradictoires...

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



# Soufrière: quel retour d'expérience ?

Arguments supporting purely phreatic eruption	Arguments supporting still-born magmatic eruption	
Nothing happened...	✓	-
Surface observations (gas content, temperatures, ash) only phreatic	✓	-
Lack of any violent historical eruption at La Soufrière, small proportion of pyroclastic flows deposits... [Tazieff, 1976]	✗	Recent geological evidences [Boudon et al., 1987; 2008, Komarowski et al., 2005; 2008] ✓
Frequent seismic crisis in the Caribbean without any eventual eruption (e.g. Montserrat)... [Tazieff, 1976]	✗	Posterior facts: St-Vincent 1979; Soufrière Hills 1995-present ✓
No migration of seismic events during crisis [Tazieff, 1976]	✗	Evidence for migration of seismic events [Hirn and Michel, 1979] ✓
-		Seismicity energy and magnetic anomaly [Feuillard et al., 1983] ✓
-		Hot springs chemical modeling (degassing pulses of Cl) [Villemant et al., 2005] ✓
Phreatic surface phenomena usually not followed by magmatic stage	✗	Posterior facts: St-Helens, Pinatubo, Unzen, Soufrière Hills ✓

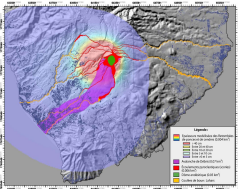
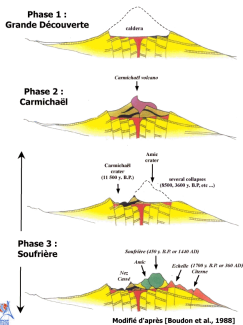


## Déficits de connaissance...

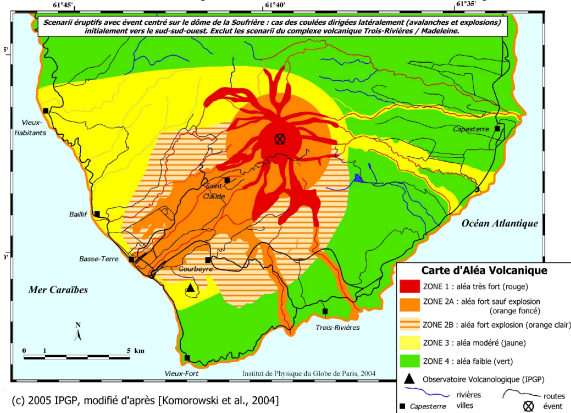
- ▶ rien sur le passé géologique
- ▶ méconnaissance des scénarios éruptifs
- ▶ peu d'expérience de suivi instrumental
- ▶ pas de modèle physique quantitatif



# Soufrière: la réponse du passé éruptif



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

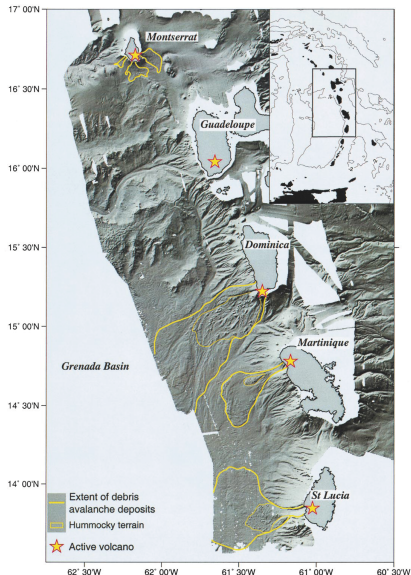
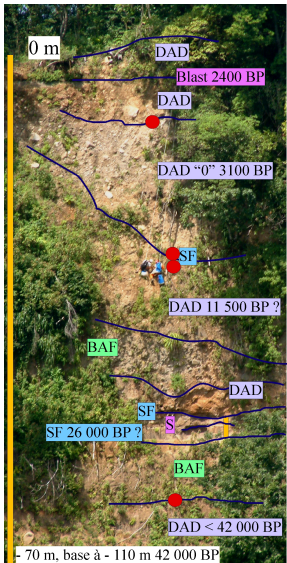


(c) 2005 IPGP, modifié d'après [Komorowski et al., 2004]

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

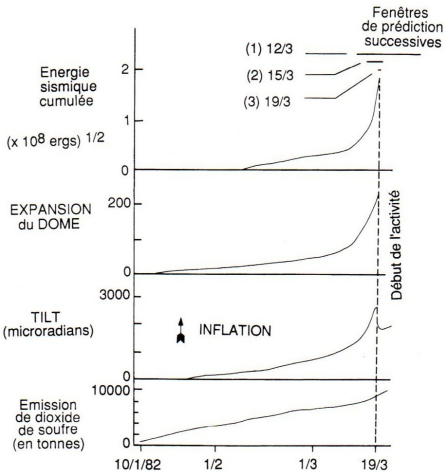
- ▶ éruption type St-Helens 1530 AD
- ▶ nombreuses déstabilisations de flanc

# Soufrière: Les avalanches de débris



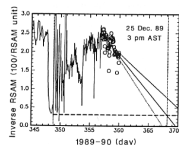
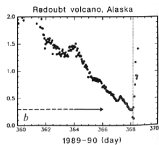
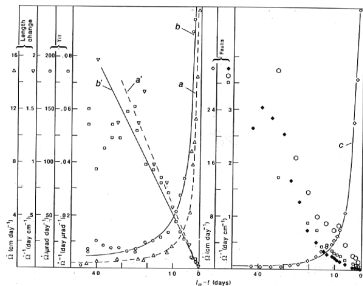


# Prédiction: méthode empirique



[Voigt, 1988]

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

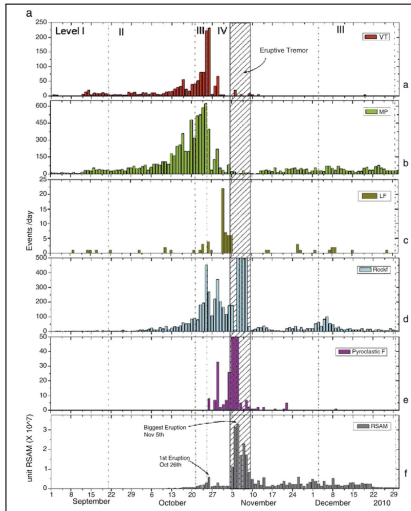




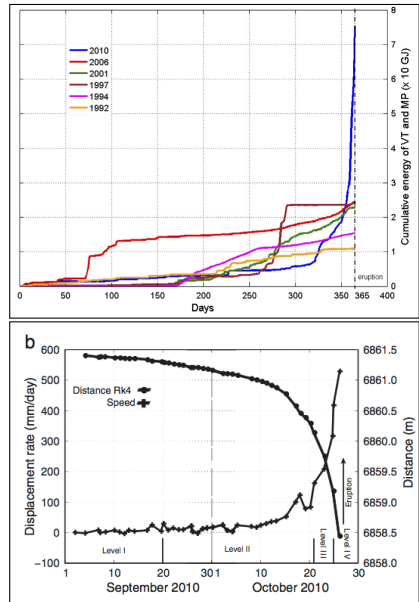








[Budi et al., JVGR 2010; Surono et al., JVGR 2012]



## 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



## 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

[2003] Montserrat



# 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

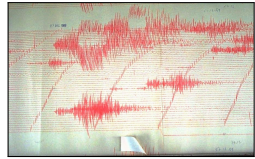


# Surveillance opérationnelle: quels outils ?



## Objectifs

- ▶ **Temps-réel** : accès instantané à l'ensemble des données, toutes disciplines, dans une optique d'aide à la gestion de crise
- ▶ **Archivage** : centralisation des données et méta-données
- ▶ **Partage** : accès à un niveau d'information unique, télé-surveillance, support aux collaborations





# Prévision des éruptions: approche déterministe

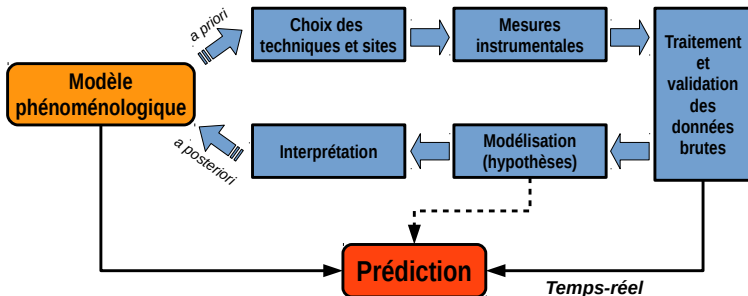


## Questions posées

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



# Ambivalence recherche/prédiction



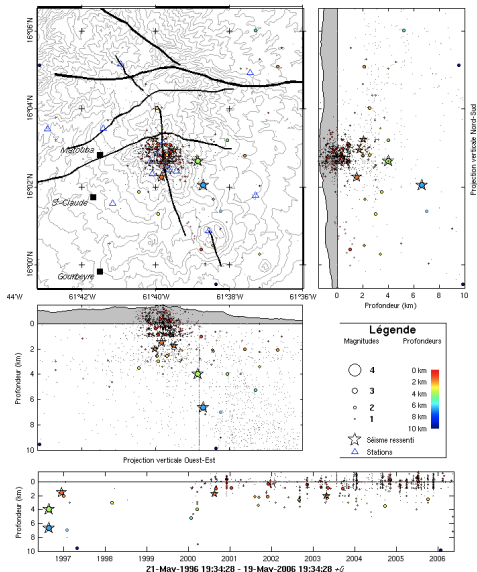
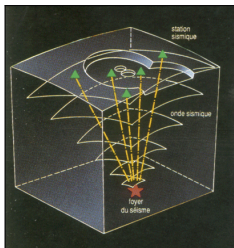






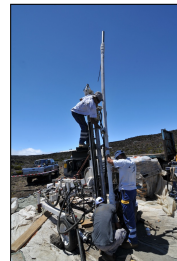
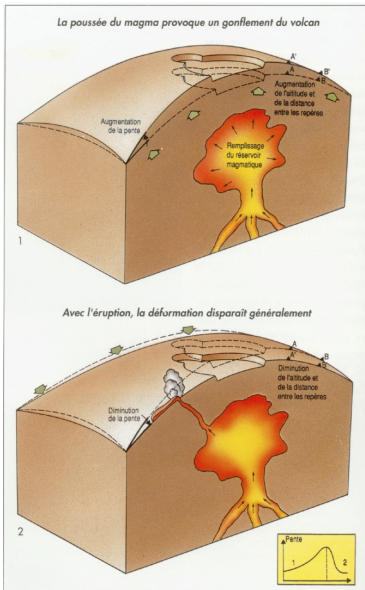


# Sismologie: vibrations du sol

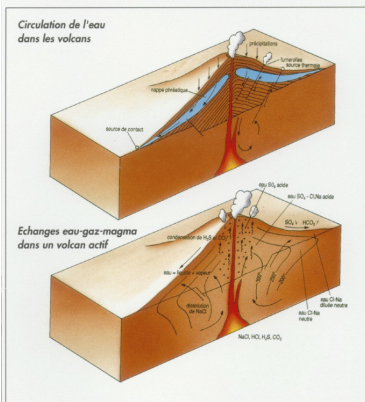
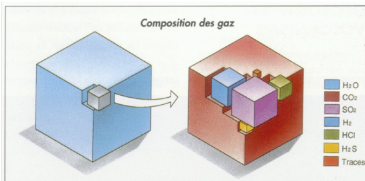




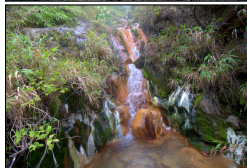
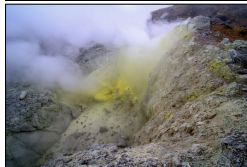
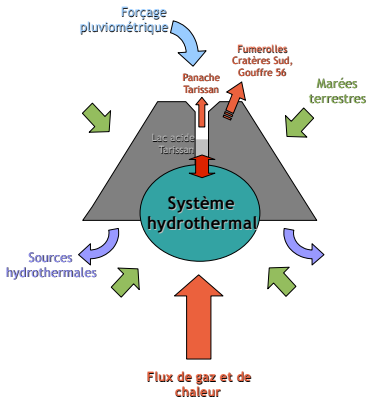
# Déformations du sol



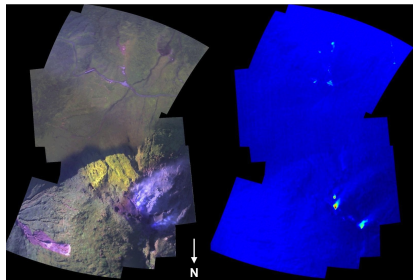
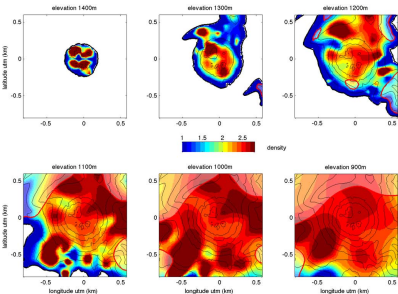
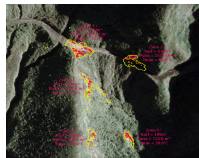
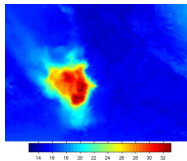
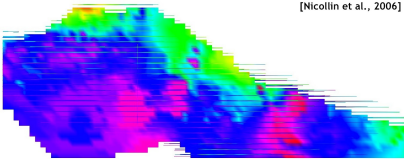
# Chimie des fluides



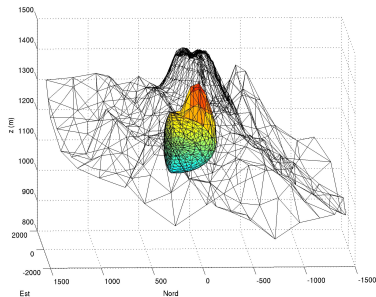
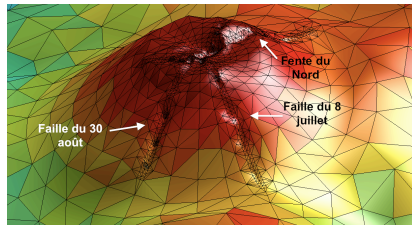
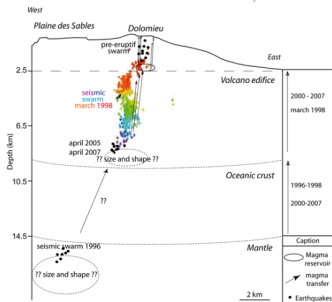
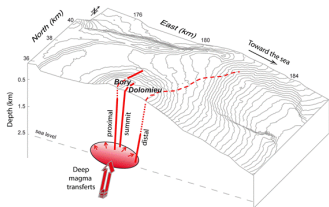
# Comprendre les entrées/sortie du système volcanique



# Déterminer la plomberie interne: tomographies

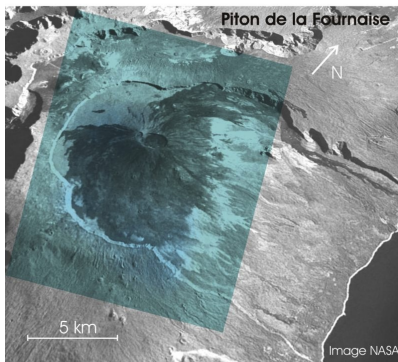


# Sources de déformations

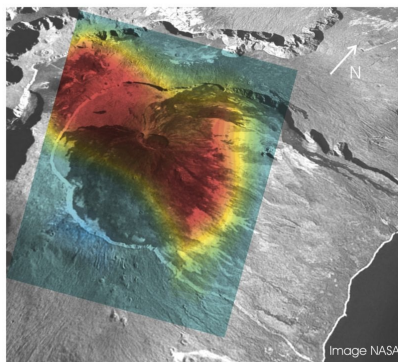


# Déterminer l'état des contraintes

9 days before eruption of June 2000



3 days before eruption



0.1                      0                      -0.1  
relative velocity change (%)

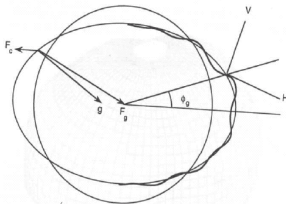
[Brenugier et al., 2008]

# Niveaux de surveillance et d'alerte volcanique

NIVEAUX D'ALERTE	ACTIVITÉ VOLCANIQUE OBSERVÉE	Délai prévisionnel avant déclenchement d'une éruption		ACTIONS OPÉRATIONNELLES	
		SOUFFRÈRE / MONTAGNE PELÉE	PITON DE LA FOURNAISE	par les scientifiques	par les autorités
vert PAS D'ALERTE	<b>Minimale</b> Niveau de base de l'ensemble des paramètres	Ssiècle(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>maintenance / 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>maintenance / mise à jour des plans de secours</li> <li>exercices de gestion de crise (simulation)</li> <li>information préventive</li> </ul>
Jaune VIGILANCE	<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>
orange PRÉ-ALERTE	<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>maintenance 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>
rouge ALERTE	<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>

# 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)

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

## Définitions

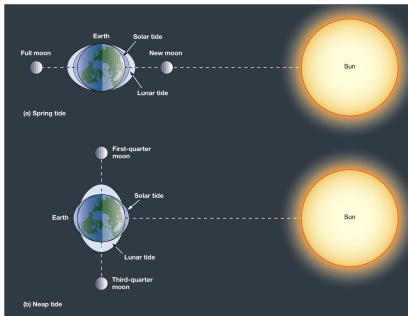
- ▶ **Géoïde** = surface équipotentielle proche du niveau moyen des mers
- ▶ **Verticale** = direction du fil à plomb pointant vers le nadir en bas et le *zénit*\* en haut = normale au géoïde
- ▶ **Horizon** = plan perpendiculaire à la verticale = surface d'un liquide au repos
- ▶ **Latitude astronomique**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

\* selon l'orthographe préconisée par A. d'Abbadie





# Variations temporelles de la pesanteur



Copyright © 2004 Pearson Prentice Hall, Inc.

## 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

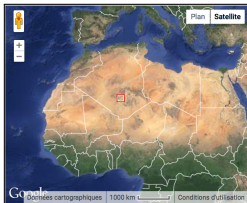
## Conséquences

- ▶ 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

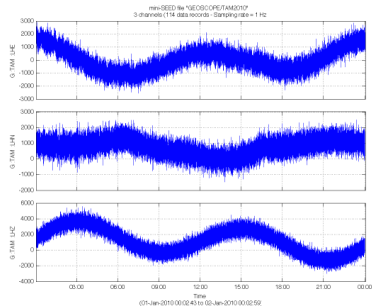
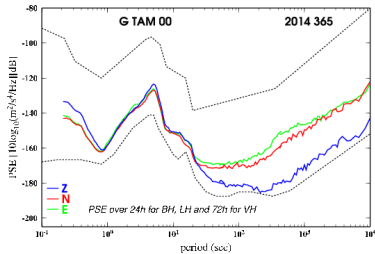
# Bruit microsismique

## Origine

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

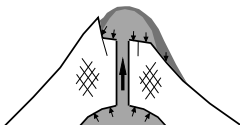


<http://geoscope.ipgp.fr>





# Objectifs des études de déformations



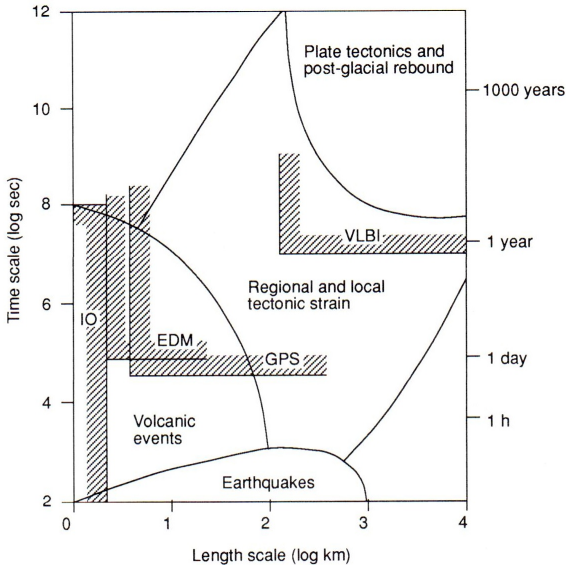
## Pourquoi un volcan se déforme-t-il ?

- ▶ 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 ( $\Delta V$ ,  $\Delta P$ ,  $\Delta \sigma$ ,  $\Delta \rho$ )

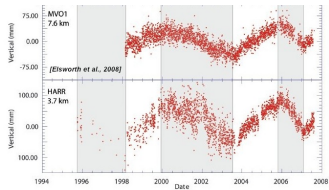
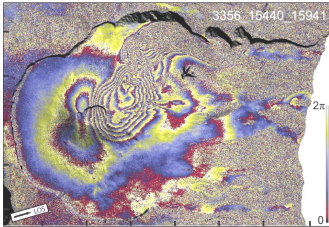
## Géodésie + modélisation mécanique

- ▶ 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



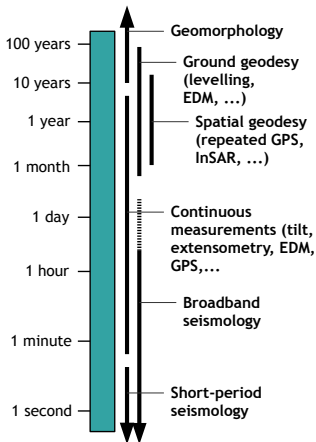
# Mesures du champ de déformation



## 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 artefacts 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: réseau étendu au Merapi



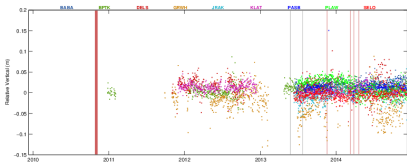
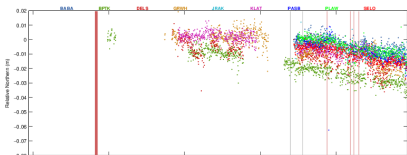
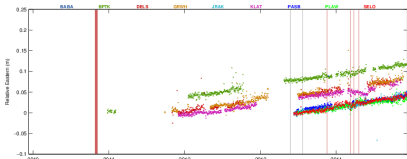
Merapi GNSS Permanent Network – ITRF08 (5 years)

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

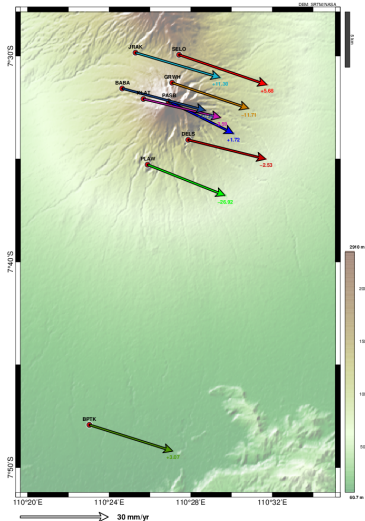


Merapi GNSS Permanent Network – ITRF08 (5 years)

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

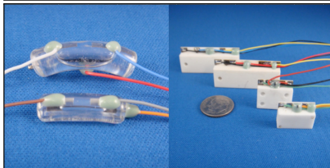
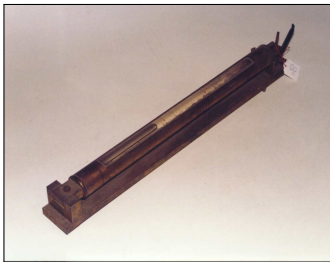


10-Dec-2009 09:37:46 - 10-Dec-2014 09:37:46 +0

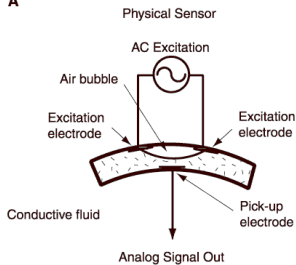


Network mean velocity (ITRF08):

# Inclinométrie: niveaux à bulle

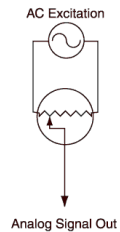


**A**

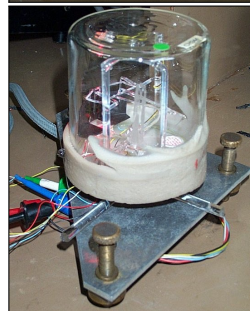
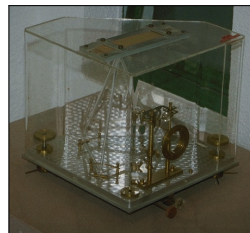
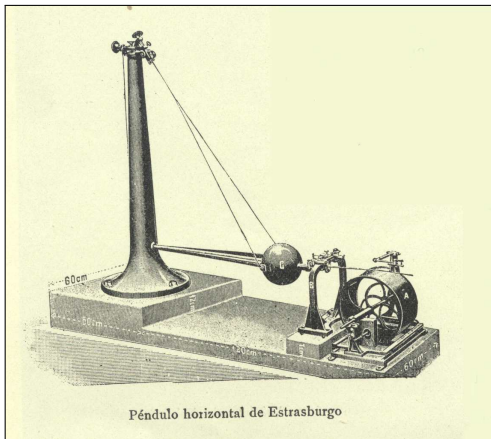


**B**

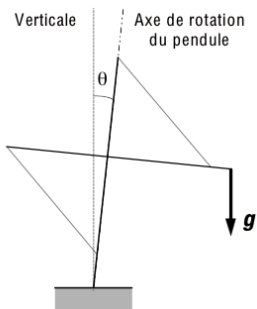
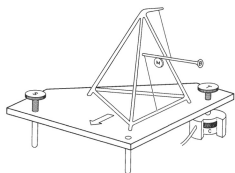
Electrical Equivalent



# 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

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

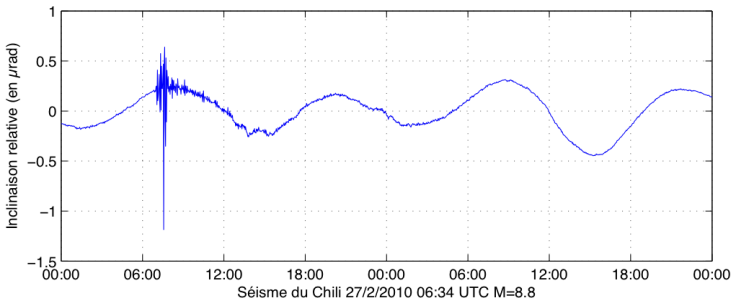
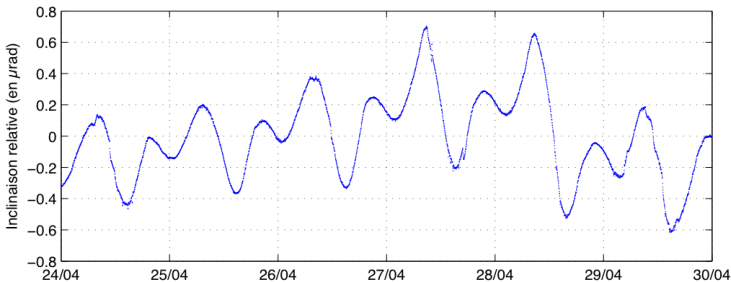
# Nadirane: 140 ans plus tard



## Projet Académie des Sciences

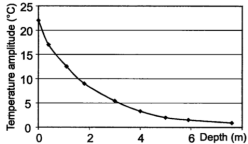
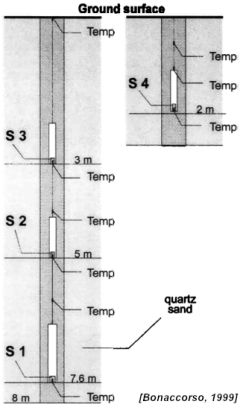
- ▶ partenariat IPGP
- ▶ J. Dercourt, J.-L. Le Mouél, J.-P. Poirier, M.-F. Esnout, C. Brunet, F. Beauducel (2010)

# Nadirane: 140 ans plus tard



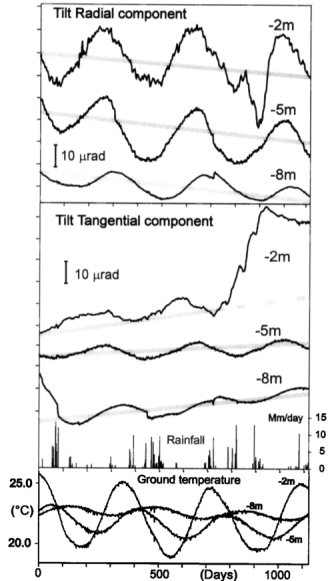


# Inclinométrie: couplage et effets thermiques

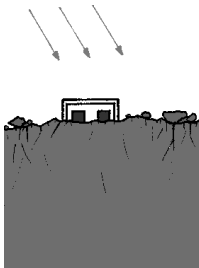


[Bonaccorso et al., 1999]

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

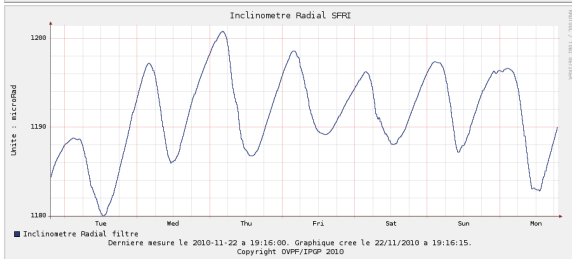
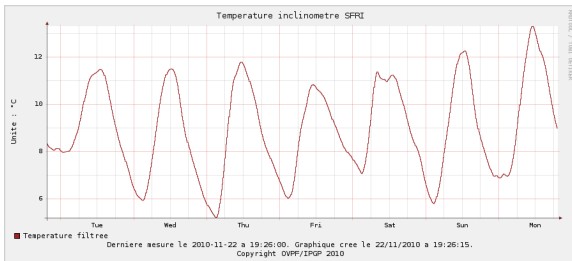


# Couplage: installation de surface

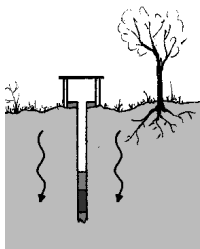


[OVSG-IPGP, 2010]

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

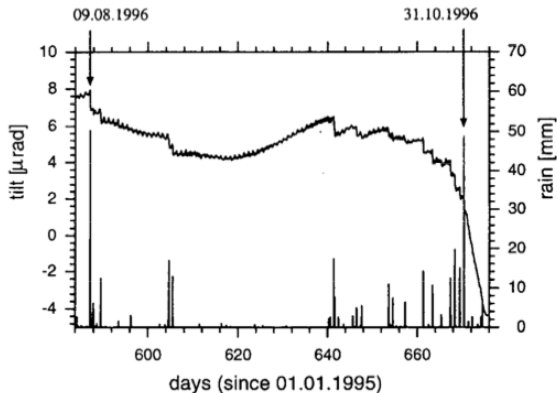


# Couplage: puits dans sol poreux

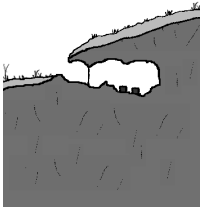


[Rebscher et al., 2000]

- ▶ ex: Merapi
- ▶ circulation de fluides

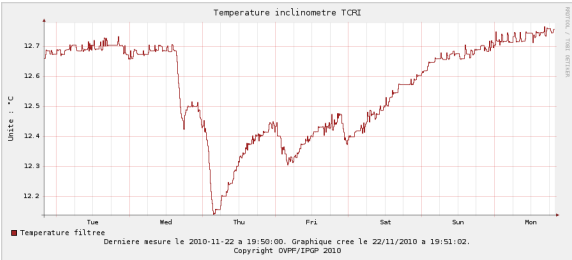


# Couplage: cavité naturelle



[OVSG-IPGP, 2010]

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



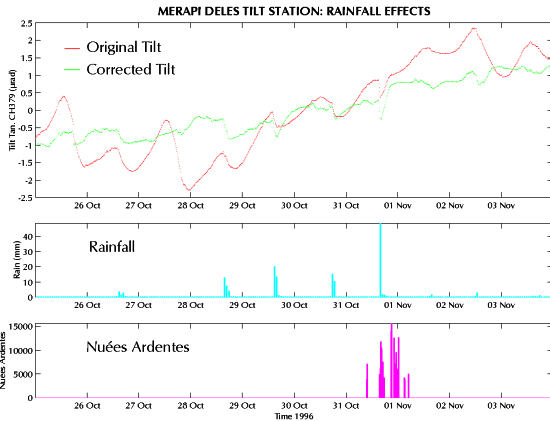


# Couplage: solution "Merapi"



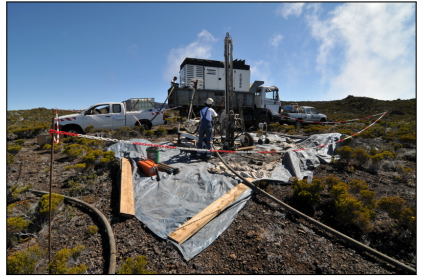
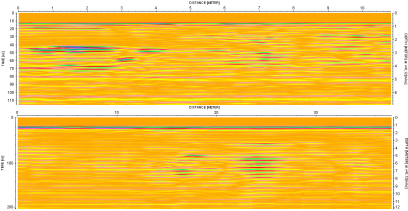
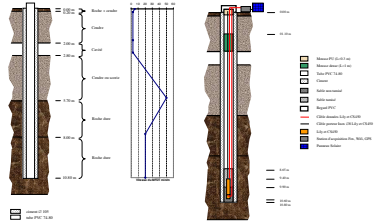
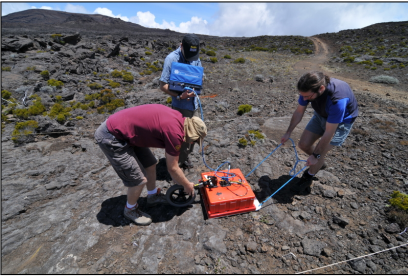
[Beauducel & Cornet, 1999]

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



[Beauducel, 1998]

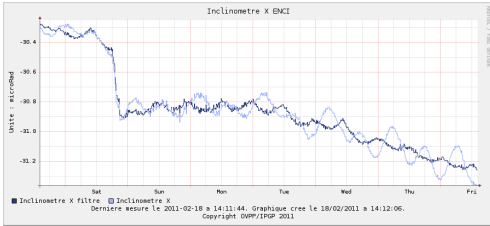
# Piton de la Fournaise: forages peu profonds





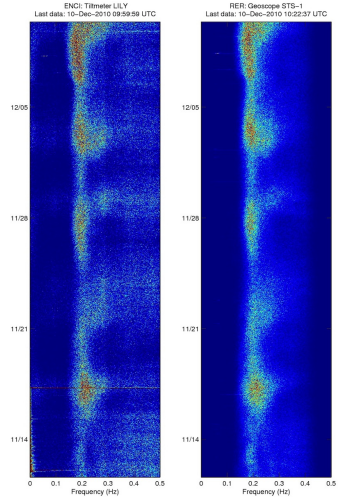


# Piton de la Fournaise: forages peu profonds

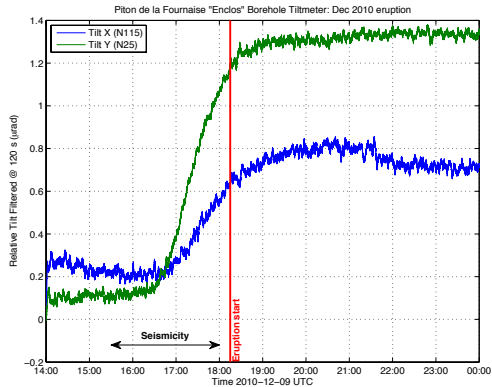
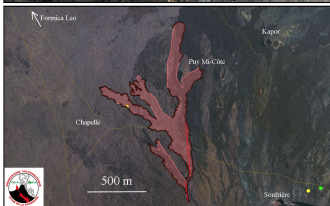


[Beauducel et al., 2010]

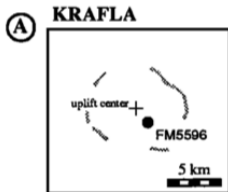
- Piton de la Fournaise: forages 10 m
- ▶ variations diurnes = 0.002 °C
  - ▶ marées terrestres
  - ▶ bruit microsismique
  - ▶ éruptions et pluies > 200 mm/h



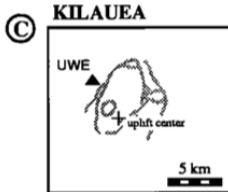
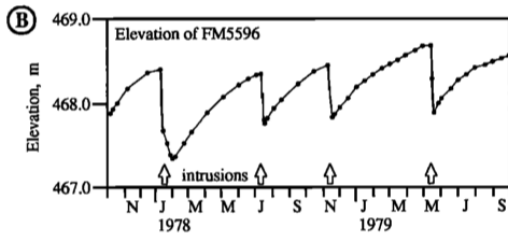
# Piton de la Fournaise: forages peu profonds



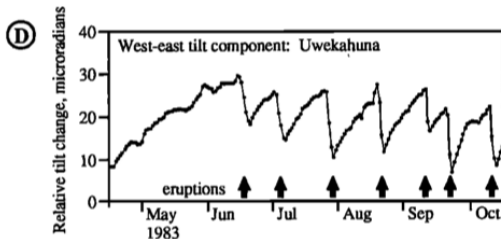
# Inclinométrie: signaux associés aux éruptions



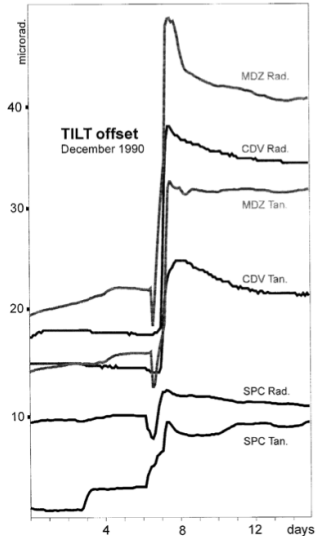
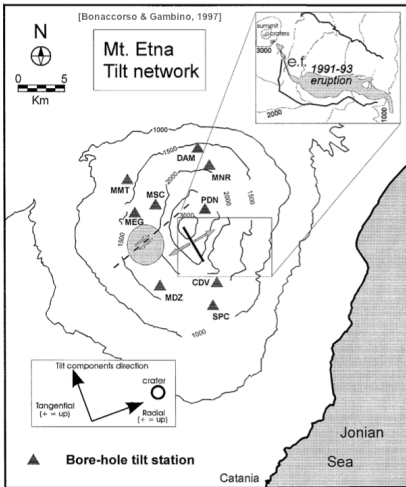
[Hauksson 1983]



[Dvorak & Dzurisin, 1997]

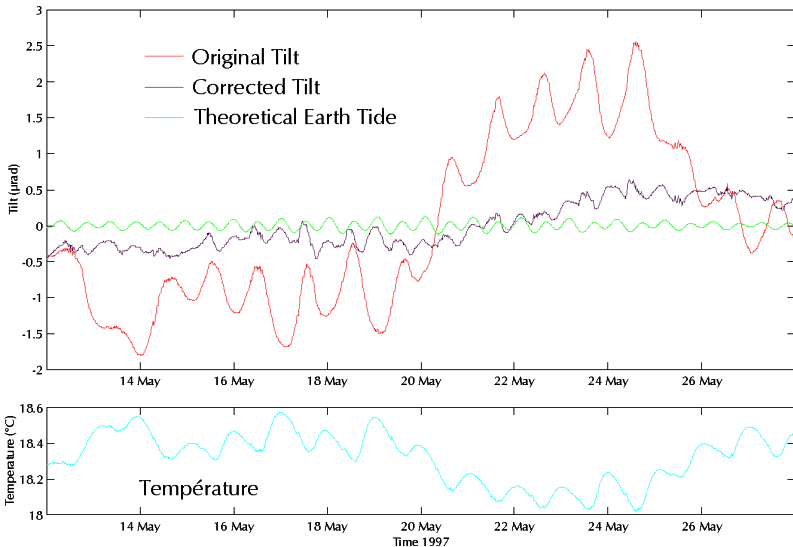


# Inclinométrie: signaux associés aux éruptions

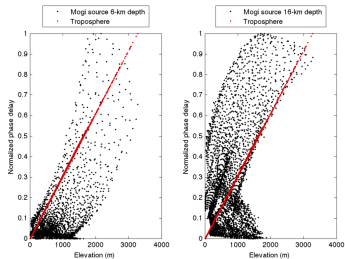
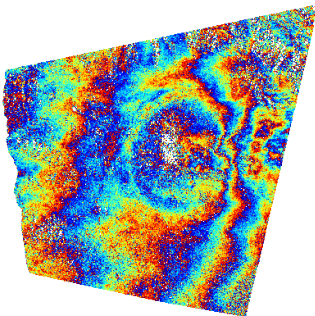
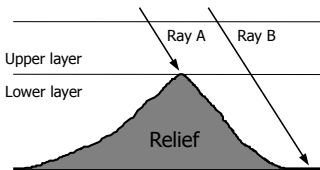


# Traitements a posteriori

## MERAPI DELES TILT: TIDES EFFECTS



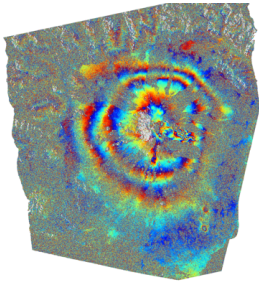
# InSAR: artéfacts troposphériques



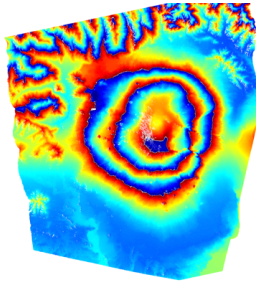
## Corrélation avec la topographie ?

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

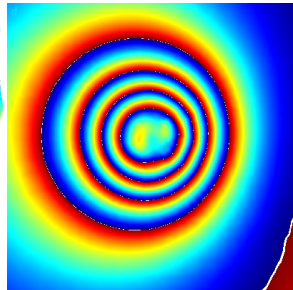
# InSAR: modélisation conjointe



[*Massonnet et al., 1995*]

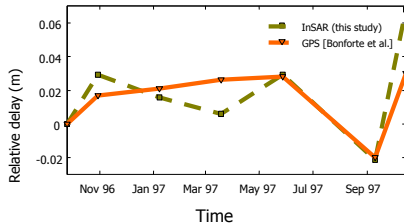
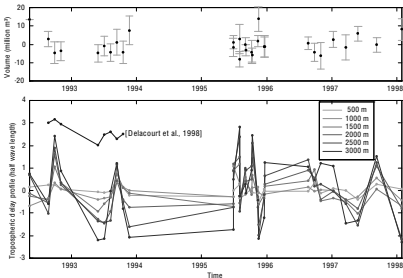


[*Beauducel et al., 2000*]



[*Cayol & Cornet, 1998*]

# InSAR: modélisation conjointe



[Beauducel et al., 2000]

- inversion conjointe troposphère + déformations
- délais troposphériques compatibles avec autres méthodes indépendantes

[Massonnet et al., Nature 1995]

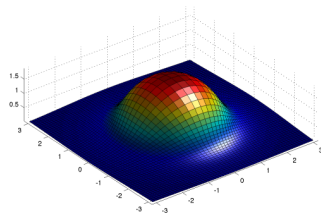
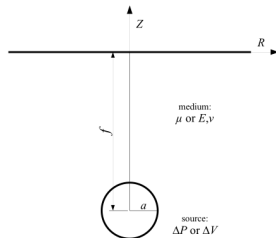




# Modèles: quelle complexité?

## “Top 2” des modèles analogiques

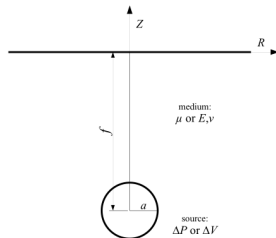
- ▶ Point source (pression isotrope) en semi-espace élastique homogène [Anderson, 1936; Mogi, 1958]
- ▶ Discontinuité plane (faille) en semi-espace élastique homogène [Okada, 1985]



# Modèles: quelle complexité?

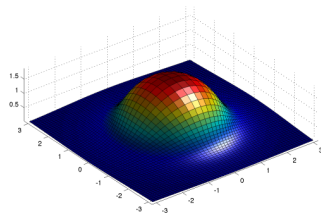
## “Top 2” des modèles analogiques

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

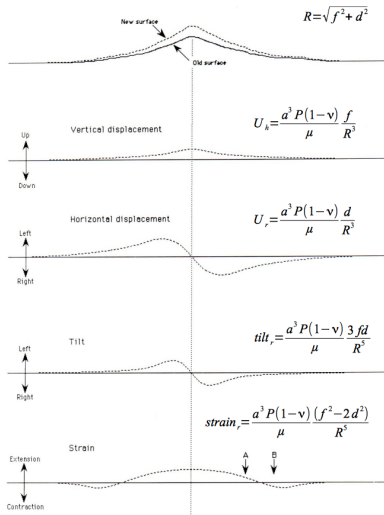
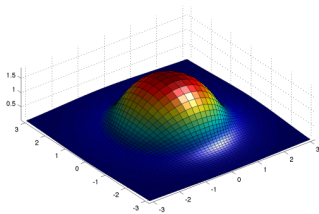
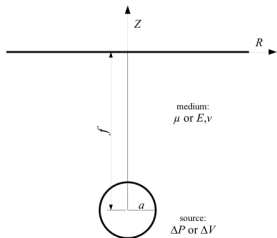


## Complexités requises

- ▶ 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

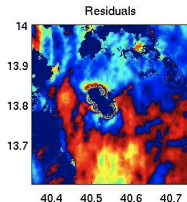
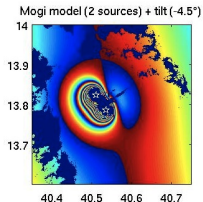
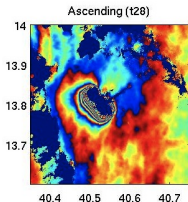
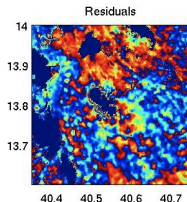
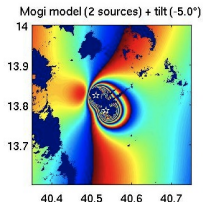
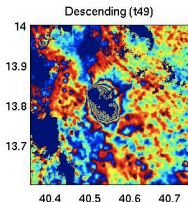
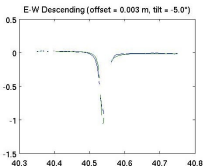
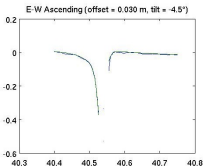




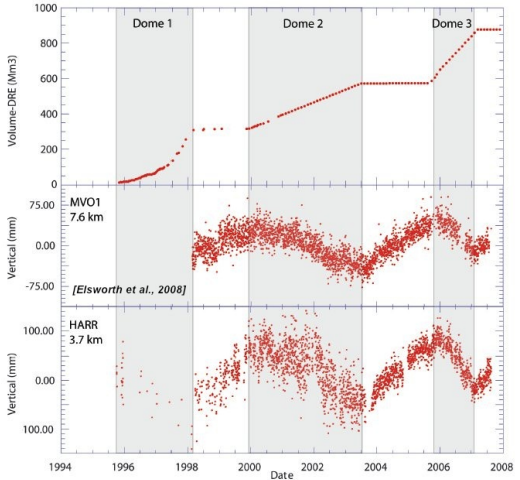
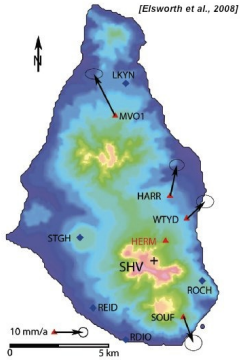
# Alu-Dala Filla: modèle de sources ponctuelles (InSAR)

[Le Mevel, 2010]

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



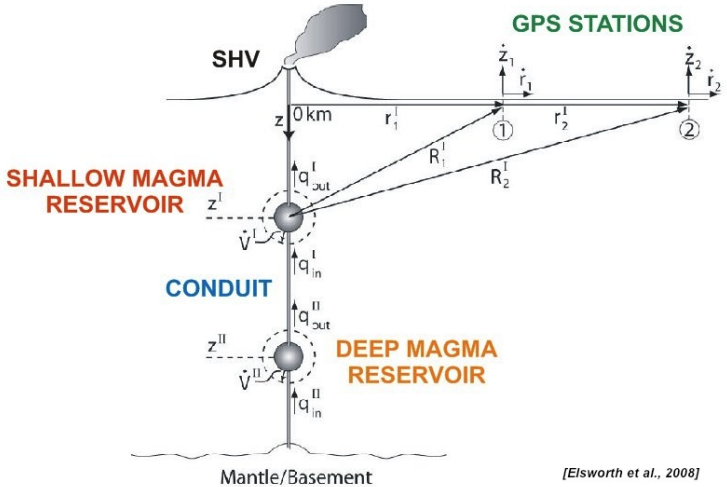
# Soufriere Hills Montserrat: modèle de chambres (cGPS)



[Elsworth et al., 2008]

- cycles  
inflations/déflations

# Soufriere Hills Montserrat: modèle de chambres (cGPS)



[Elsworth et al., 2008]



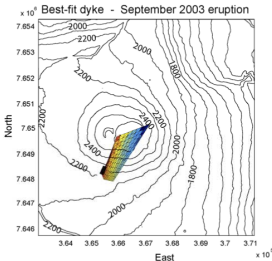
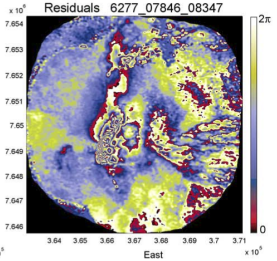
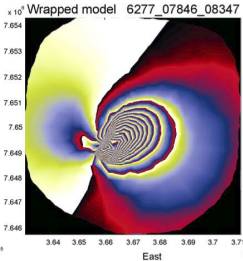
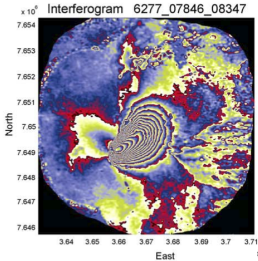






# InSAR: déformations co-éruptives

September 2003



$P_0 = 3.60 \pm 0.18$  MPa  
 Shear =  $22.5 \pm 2.0$  °  
 Bot. Length =  $0.94 \pm 0.08$   
 Theta =  $-3.1 \pm 0.5$   
 Misfit = 4.97 %

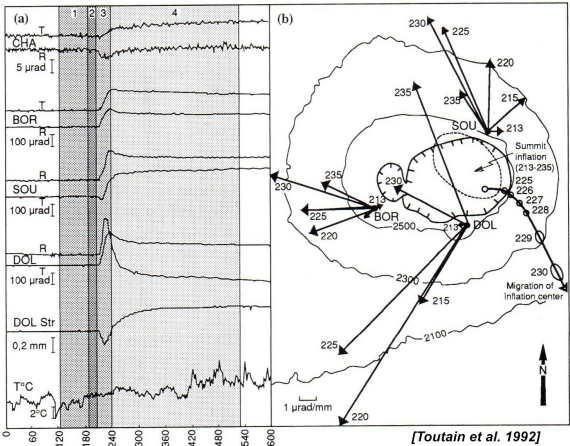
Dip =  $47.1 \pm 3.8$  °  
 Bot. Elv =  $1470 \pm 85$  m a.s.l.  
 Twist =  $-25 \pm 3.5$  °  
 $D_{top} = 185 \pm 20$  m

Av. opening = 0.71 m  
 Volume dyke =  $1.33 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>

Max. opening = 1.18 m

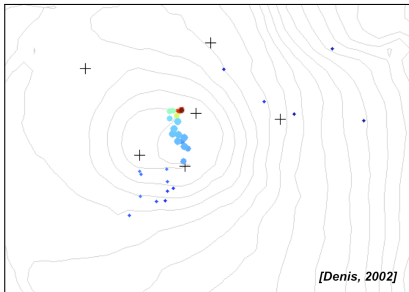
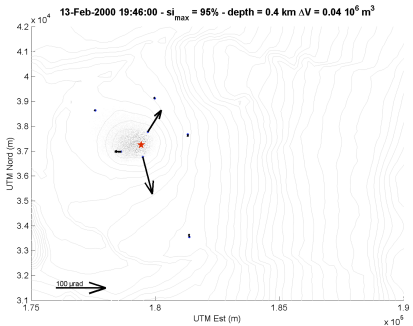
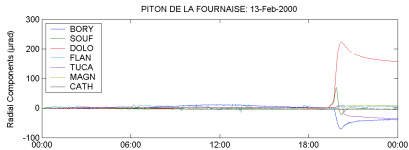
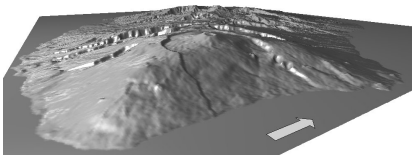
[Tinard et al., 2005]

# Piton de la Fournaise: suivi temporel des intrusions

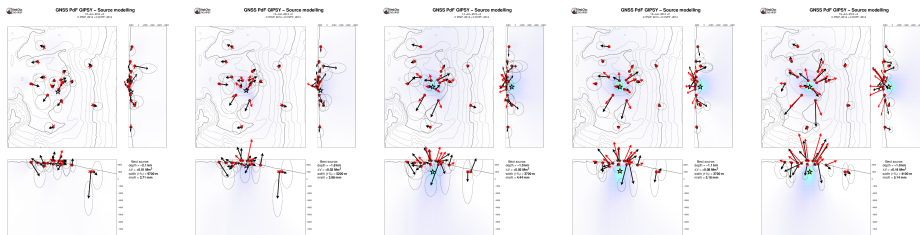


- [Toutain et al., 1992]
- ▶ réseau inclinomètres
  - ▶ localisation du centre d'inflation
  - ▶ point de sortie de l'éruption
  - ▶ pas d'estimation de volume

# 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>

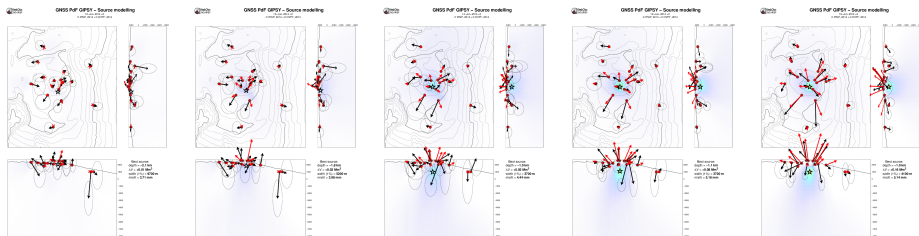
13/6/2014  
+20 000 m<sup>3</sup>

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



























# Transposition fréquentielle

## Principe

- ▶ transposer les fréquences d'un signal dans le domaine audible (20 Hz - 16 kHz)
- ▶ principales applications:
  - appareils auditifs
  - télécommunications

## Sismicité volcanique

- ▶ fréquences: 1 à 10 Hz
- ▶ infrasons (inaudible)
- ▶ vitesse de lecture  $\times 200$   
 $\Rightarrow$  200 Hz à 2 kHz  
 = bande téléphonique!

