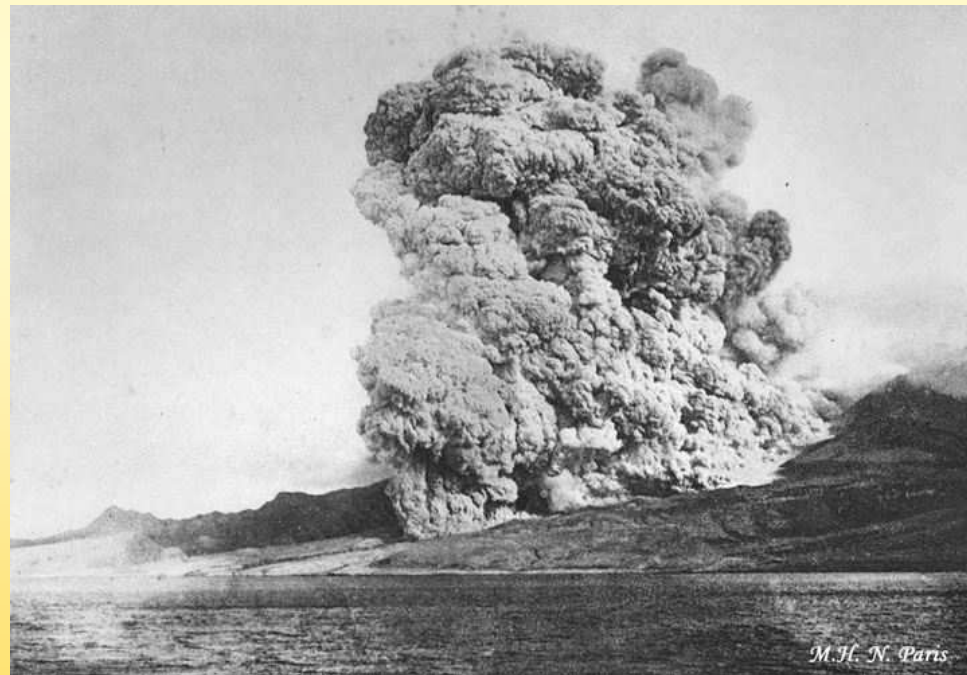


Jean-François Lénat
Laboratoire Magmas et Volcans
Univ. Blaise Pascal-CNRS-OPGC



RISQUES ET SURVEILLANCE DE L'ACTIVITÉ VOLCANIQUE

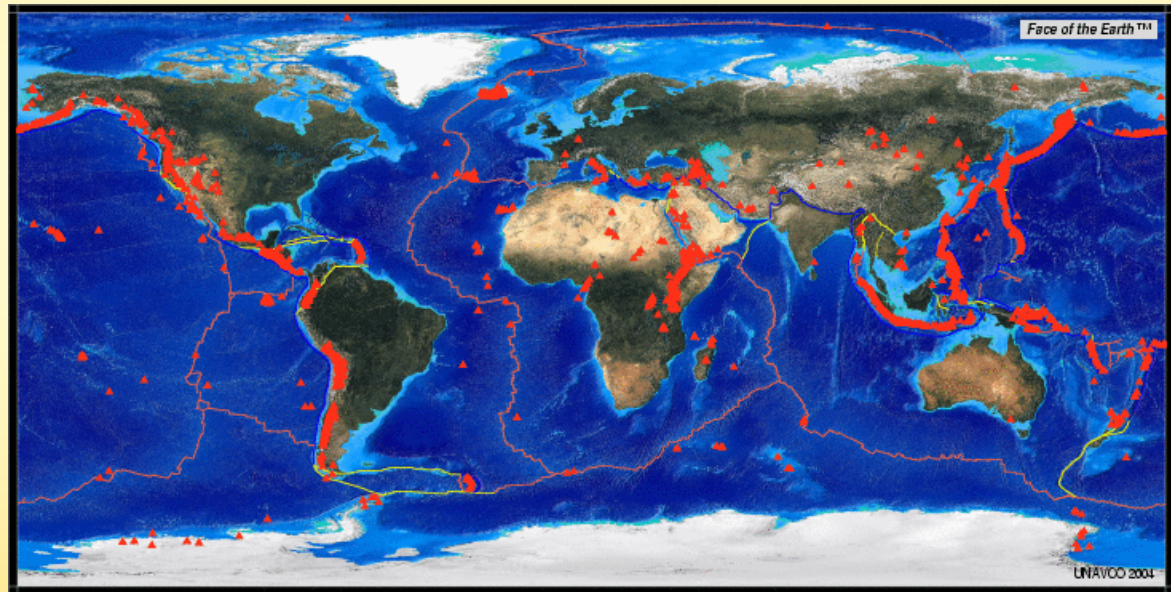


Importance planétaire de l'activité volcanique

✓ Distribution des volcans à la surface de la Terre traduit le **fonctionnement interne de la planète**.

✓ Volcans apparaissent dans les zones de divergence et de convergence de la lithosphère et à l'aplomb des points chauds.

✓ Activité volcanique principale de la planète est localisée le long des quelques 70 000 km de rifts océaniques et se déroule typiquement à des profondeurs entre 1 et 4 km sous le niveau des océans.



- Ainsi, la plus grande part des volcans actifs de la Terre est-elle peu connue
- et les éruptions de ces volcans sous-marins, à quelques exceptions près, ne sont pas répertoriées

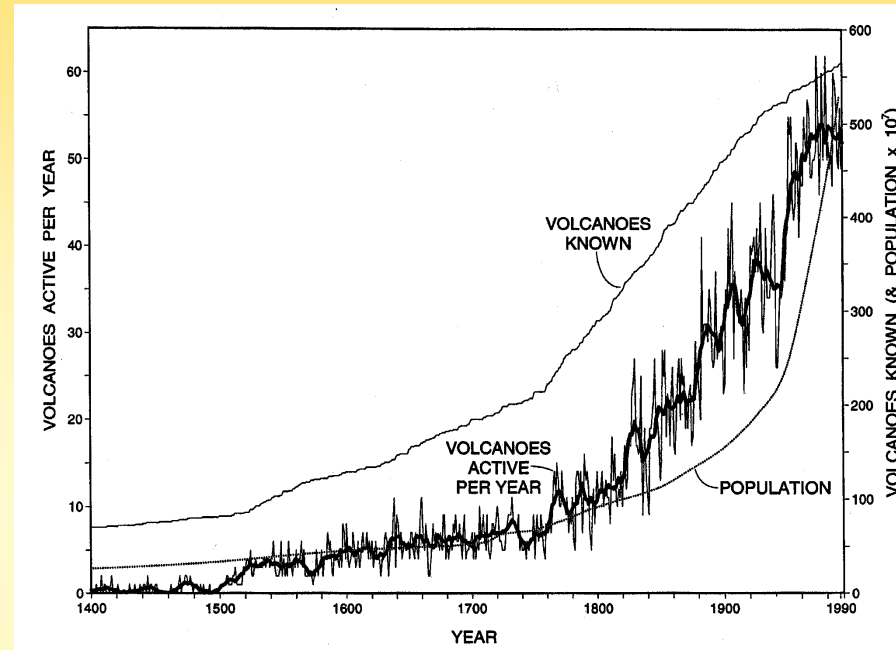
Combien de volcans actifs ?

Reconnaissance des volcans actifs entreprise depuis plusieurs siècles.

Base de données la plus récente publiée en 1994 par le Global Volcanism Program de la Smithsonian Institution (Simkin et Siebert, 1994).

Comportement et fréquence d'activité des volcans => grande variabilité

On considère comme volcan actif tous ceux ayant eu une activité au cours de l'Holocène

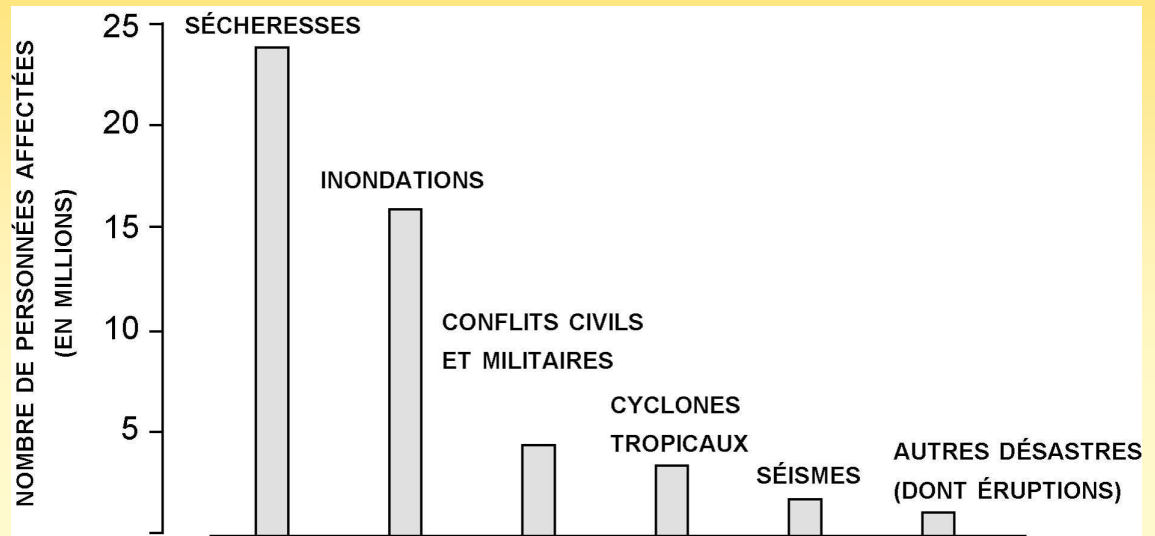


Volcans actifs historiquement

- **1511 volcans actifs**
- **8000 éruptions**
- **entre 50 et 70 éruptions par an**
- **à chaque instant, environ 20 volcans sont en éruption sur la Terre.**

L'impact des catastrophes volcaniques

Par comparaison avec les autres types de catastrophes, naturelles ou associées à l'activité humaine, celles liées au volcanisme sont peu fréquentes et souvent moins graves



✓ plus de 230 000 victimes de l'activité volcanique depuis 1783 et près de 80 000 durant le 20ème siècle

✓ chiffres modestes par rapport à ceux d'autres fléaux (un seul séisme en Chine, en 1556, a fait 830 000 victimes)

Le coût des crises volcaniques

L'impact des éruptions sur l'environnement, les équipements, les infrastructures et la société peut être considérable, bien que difficilement chiffrable.

On a estimé le coût de l'éruption du **Mont Saint Helens** aux USA en 1980 à **2.7 milliards** de dollars et celui de la tragédie du **Nevado del Ruiz** en Colombie en 1985 à **7.7 milliards** de dollars.

Sommes mineures par rapport à d'autres types de catastrophes : **200 milliards** de dollars lors du **séisme de Kôbé** au Japon en 1996 , **15.5 milliards** de dollars du **cyclone Andrew** en 1992.

Cependant, les cataclysmes volcaniques, selon leur localisation, peuvent mettre en péril des sociétés. Par exemple, le coût de l'éruption du Nevado del Ruiz représentait environ **20 % du PNB de la Colombie** en 1985.

Caractérisation de la taille des éruptions volcaniques

Très grande variabilité dans la taille des éruptions volcaniques (volumes et flux de produits émis, violence et capacité destructrice) => Difficile de définir simplement la taille d'une éruption

Comme pour les tremblements de terre, des indices ont été définis pour caractériser les éruptions.

Le plus couramment employé est l'Indice d'Explosivité (en anglais, **Volcanic Explosivity Index –VEI**). Comme l'échelle de Richter, le VEI utilise une échelle logarithmique. Il est basé sur deux paramètres :

- ✓ le **volume émis**
- ✓ la **hauteur du panache** éruptif, une mesure de l'intensité de l'éruption

L'échelle s'étend de 1 à 8, le niveau 0 étant attribué aux petites éruptions effusives, pour lesquelles cette échelle s'applique mal.

VEI implique relation entre le volume émis et la hauteur du panache. Il n'en est pas systématiquement ainsi, et d'autres indices sont parfois considérés :

- la **magnitude**, définie en fonction du volume émis
- l'**intensité**, définie en fonction du taux d'émission
- **indice de destruction**, qui est le logarithme de la surface de destruction totale des infrastructures.

Quelques-unes des plus grandes éruptions

Historiques

Nom	Date/Age	volume émis	Formation d'une caldéra	VEI
Pinatubo	1991	3 km ³	Oui	6
Nevado del Ruiz	1985	~0.03 km ³	Non	4
Mont St Helens	1980	~1 km ³	caldéra d'avalanche	5
Dix Mille Fumées	1912	10-15 km ³	Oui	3
Santa Maria	1902	12 km ³	Non	6 ?
Montagne Pelée	1902	< 1 km ³	Non	4
Krakatau	1883	20 km ³	Oui	6
Tambora	1815	50 km ³	Oui	7
Laki	1783	14 km ³	Non	4
Taupo	186	10 km ³	Oui	6
Vésuve	79	3 km ³	Oui	5

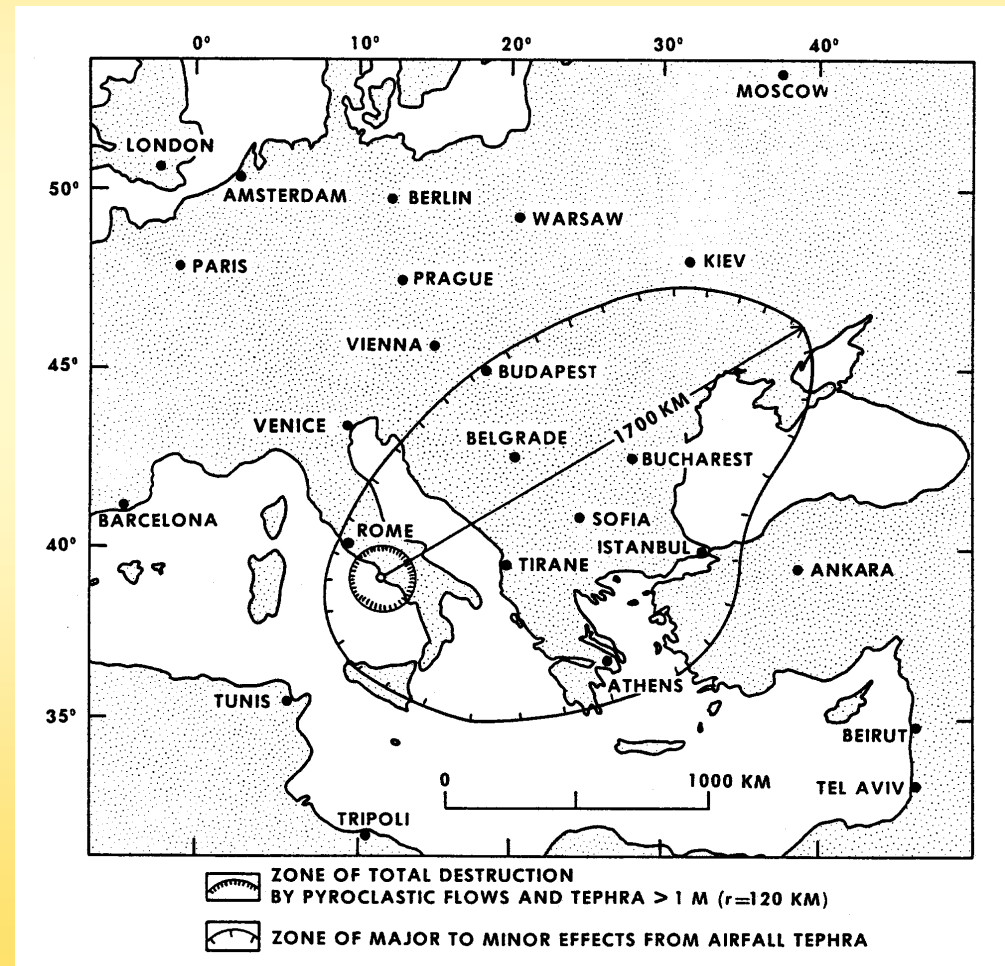
Préhistoriques

Santorin	1650 BC	30 km ³	Oui	6
Crater Lake	7000 ans	50 km ³	Oui	7
Lac Toba	74000	2000 km ³	Oui	8
Yellowstone	0.6 Ma	1000 km ³	Oui	8
Long Valley	0.7 Ma	600 km ³	Oui	7
Yellowstone	2 Ma	2500 km ³	Oui	8

Eruptions gigantesques

Le tableau précédent montre que dans un passé très récent, à l'échelle géologique, des éruptions gigantesques se sont produites, comme celles de Yellowstone ou de Long Valley. Aucune éruption de cette ampleur ne s'est produite dans la période historique.

Si la probabilité de telles éruptions apparaît faible à l'échelle de temps humaine, l'histoire géologique démontre qu'il s'en produit cependant régulièrement. De telles crises dépassent probablement nos capacités actuelles de prévention et créeraient des crises majeures de l'environnement terrestre et de la société humaine.



Stratégie de la prévention



1. **Identification des risques et définition de mesures de protection**
2. **Surveillance de l'activité volcanique**

Aléas et risques

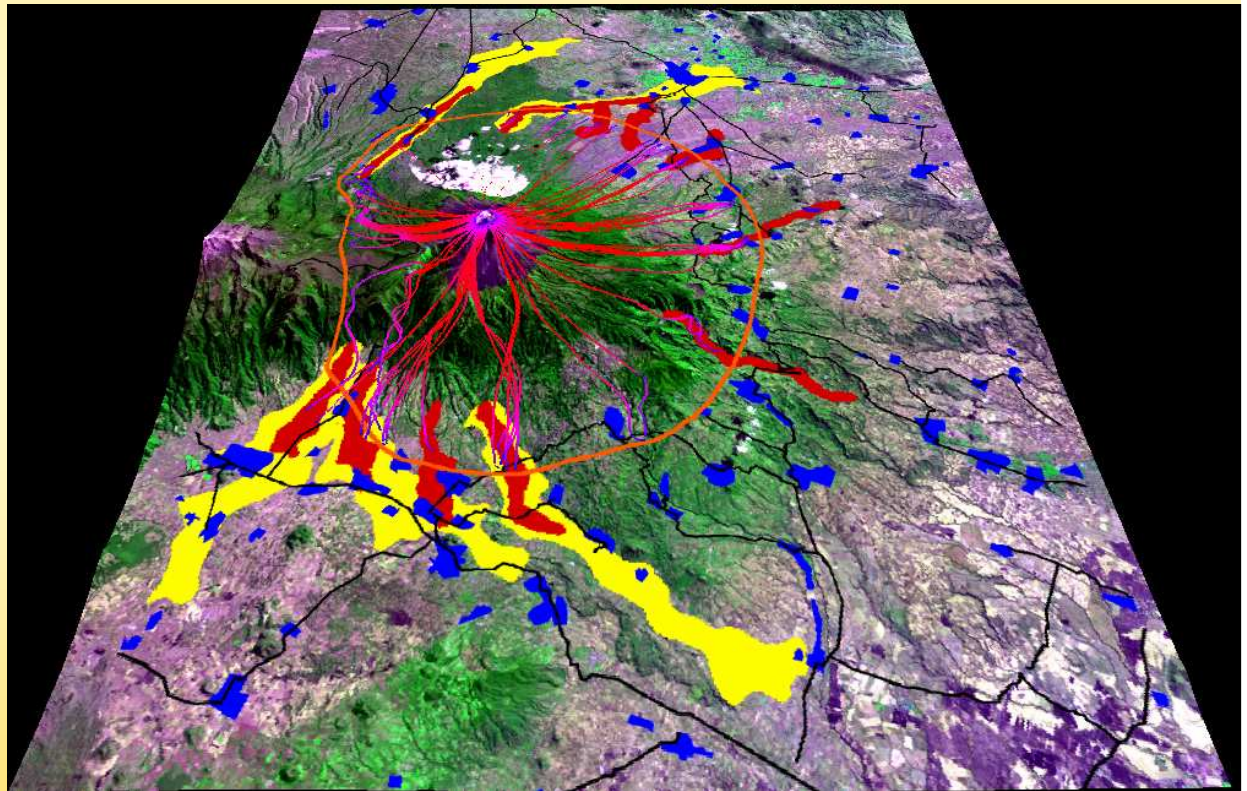
Il convient de distinguer, en volcanologie comme dans d'autres domaines, l'**aléa** (**hazard** en anglais) et le **risque** (**risk** en anglais).

L'aléa se définit par rapport au phénomène volcanique qui engendre une **menace**.

Le risque tient compte des **dommages** potentiels => notion de **vulnérabilité**

Il faut donc qu'il existe une vulnérabilité pour que l'aléa engendre un risque.

Le risque est toujours **l'intersection** entre un **aléa** et une **vulnérabilité**.



En volcanologie, on se borne souvent à établir des cartes d'aléas, mais des cartes de risques sont aussi disponibles pour certains sites.

Les principaux risques volcaniques

Tous les phénomènes volcaniques ne présentent pas la même dangerosité
les phénomènes volcaniques les plus meurtriers

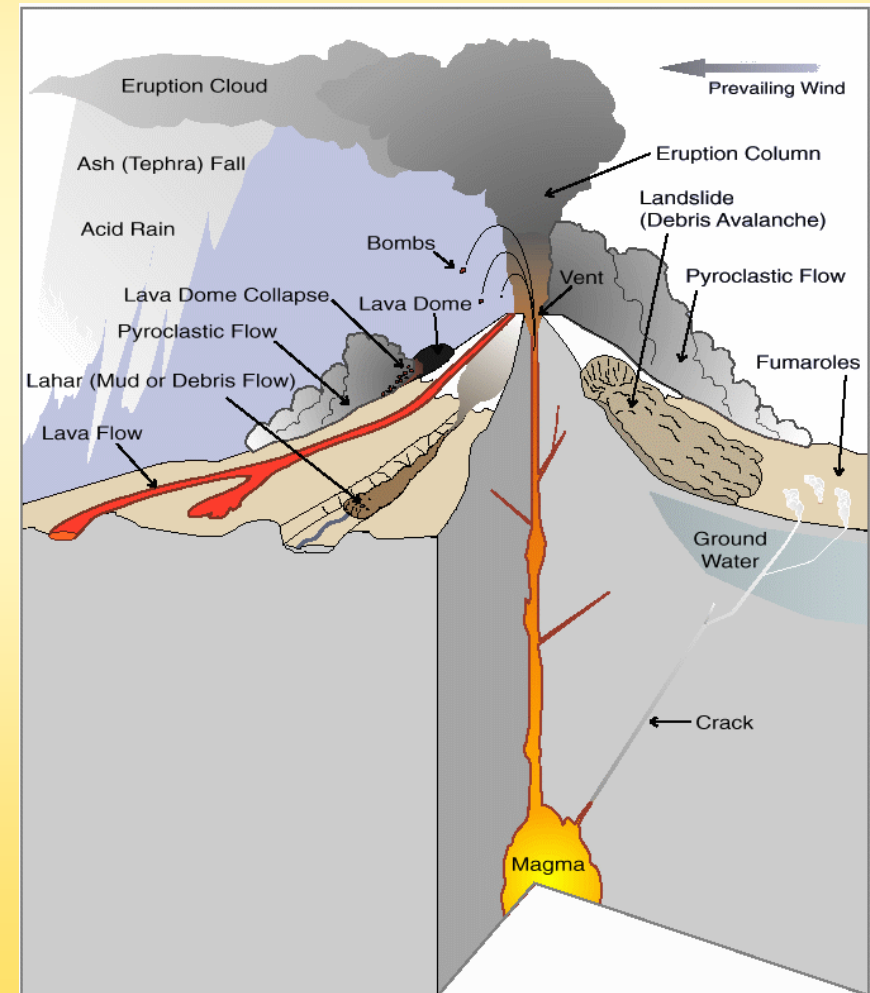
- ✓ **30 %** des morts dans la période historique sont dues aux **famines et épidémies** engendrées par les grands cataclysmes volcaniques
- ✓ écoulements de **pyroclastites (27 %)**
- ✓ **lahars (17 %)**
- ✓ **tsunamis** d'origine volcanique **(17 %)**

Nous allons faire une revue de ces aléas et décrire les principales mesures de prévention possibles.

Le cas des coulées de lave sera développé un peu plus longuement, car il permet de bien cerner les apports de l'approche scientifique sur le phénomène pour évaluer les risques associés.

De plus, il s'agit d'un des rares phénomènes volcaniques sur lequel l'Homme peut intervenir.

Les autres risques seront traités plus synthétiquement



Les coulées de lave

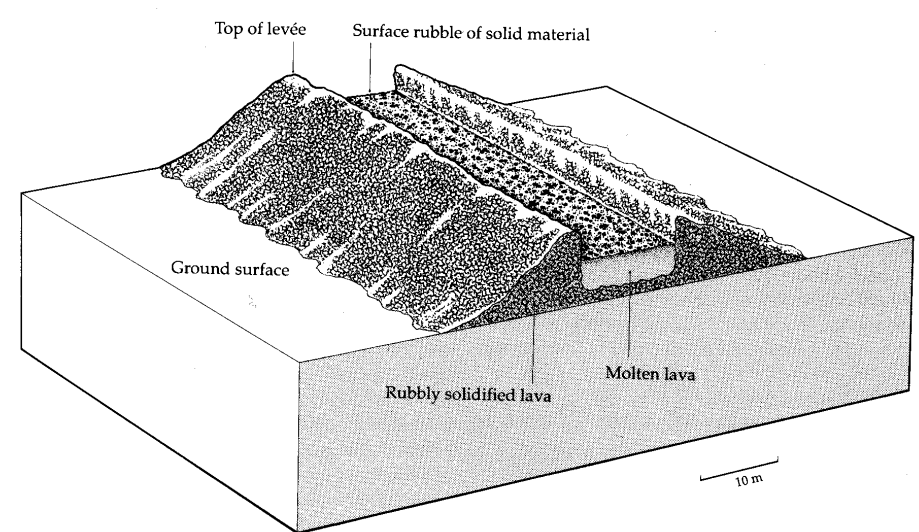
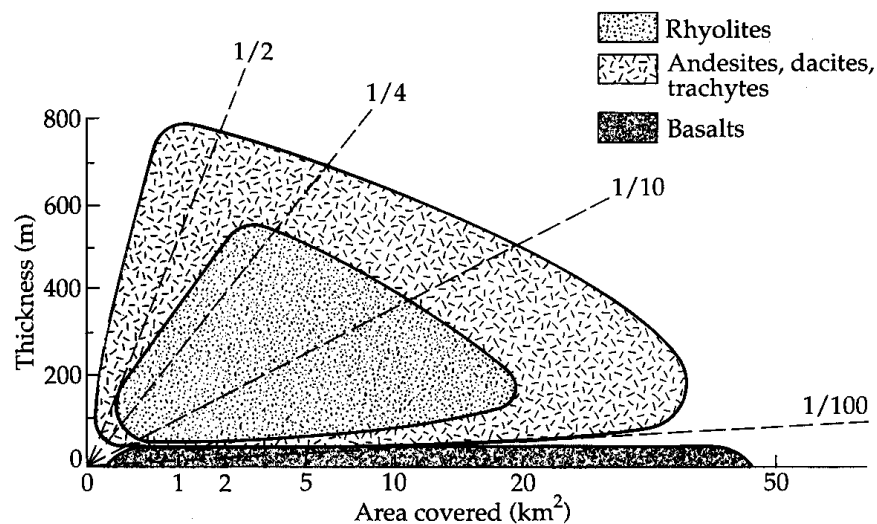
Nature et forme

Les coulées de lave => une grande gamme de compositions, depuis les laves basiques aux laves acides.

Ceci implique des températures et des rhéologies très variables, qui vont influencer la morphologie et la géométrie des coulées.

Leur grande variabilité indique que d'autres facteurs que la simple nature des laves interviennent.

Nous ne nous intéressons, ici, qu'aux principaux critères ayant une relation avec les aléas.

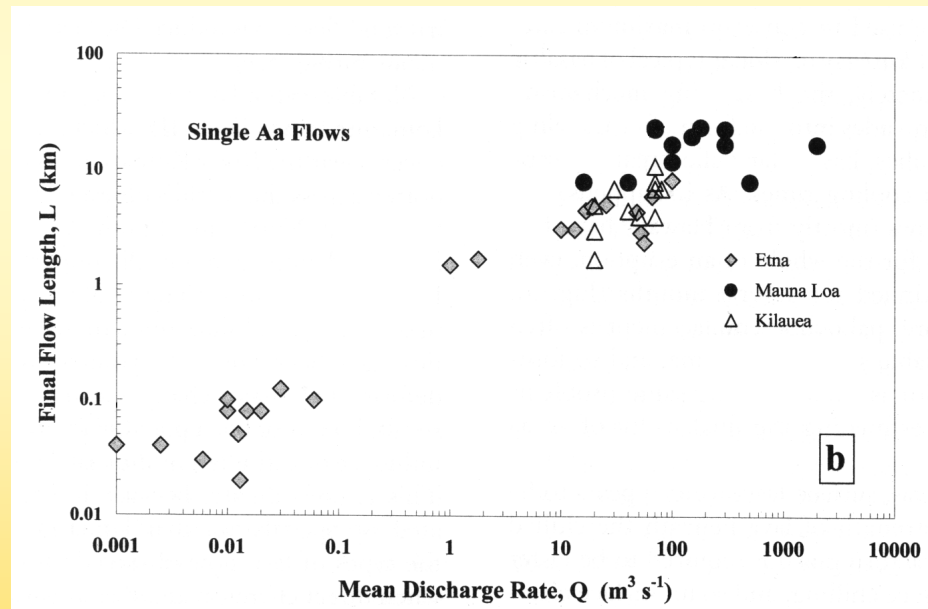


Facteurs influençant la longueur des coulées de lave

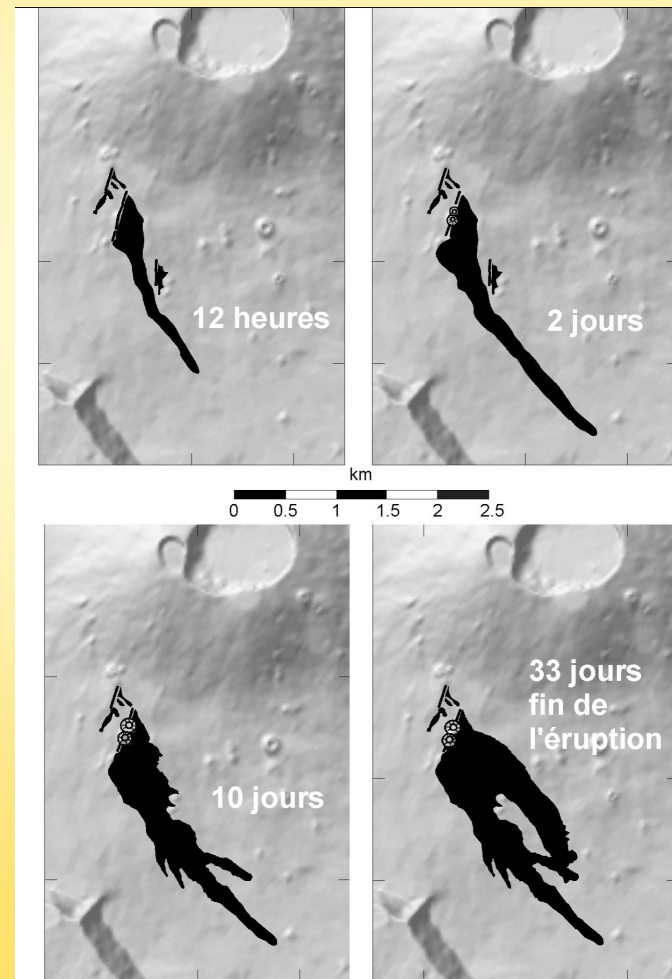
En plus de la nature des coulées, de leur circulation en **chenaux** et **tunnels**, les facteurs majeurs du développement des coulées sont la **pente**, le **taux d'effusion** et la **durée** des éruptions.

Une **pente forte** => **coulées peu épaisses et longues**

Le **taux d'émission** de lave par une éruption => un des facteurs les plus déterminants pour l'extension des coulées.



Avec la durée, la longueur d'une éruption a tendance à croître, mais pas linéairement => champ de lave,



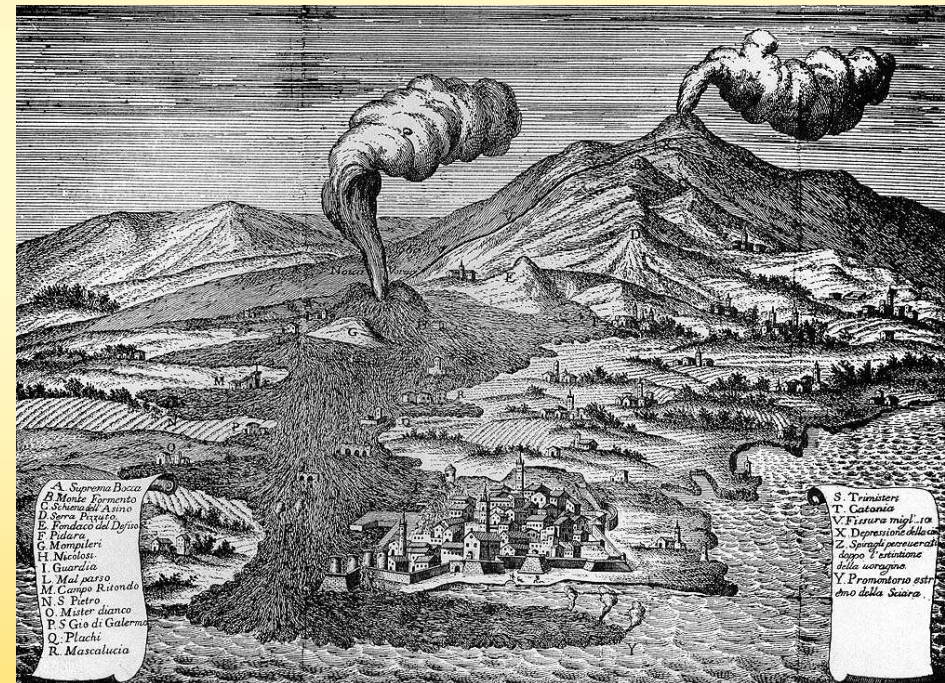
Les risques associés aux coulées de lave

Sauf cas exceptionnel (vidange du lac de lave du Nyiragongo (Zaïre) en 1977), la vitesse d'avancée des coulées de lave ne constitue pas un danger. Un autre danger peut être de se retrouver isolé entre des branches d'une coulée.

Les principaux risques associés aux coulées de lave sont la destruction par recouvrement, écrasement et le feu.

Si une coulée rencontre de la neige ou de la glace, leur fonte peut engendrer des débâcles boueuses. Ceci se produit régulièrement en Islande où les débâcles portent le nom de **Jökulhlaups**.

Des éruptions de volume exceptionnel peuvent engendrer des risques majeurs pour l'environnement et le climat. Ce fut le cas historiquement, en **1783**, lors de l'éruption des 14 km³ de lave du **Laki** (Islande) qui ont recouvert 565 km².



Dans le passé géologique, de gigantesques coulées de lave ont été émises, comme par exemple une coulée de **300 km** de long et **700 km³** dans les **trapps de la Columbia River**, il y a 14 millions d'années.

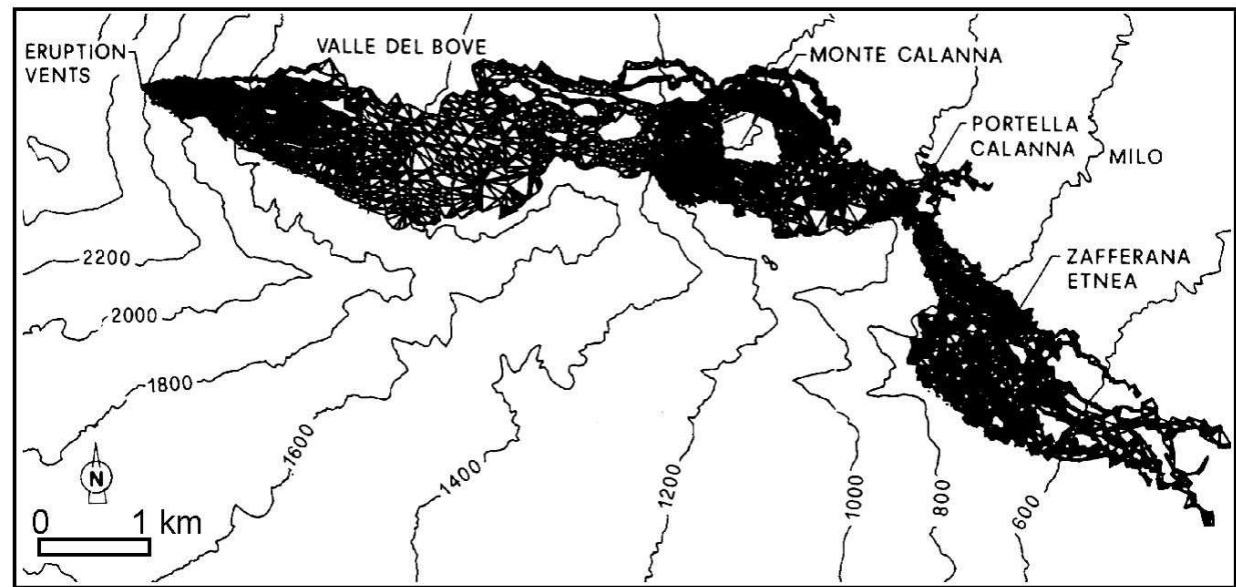
Prévention et protection

Comme pour l'ensemble des autres risques volcaniques, la **prévention à long terme** passe par la **reconstitution de l'activité** passé du volcan.

Cette étude géologique permet de déterminer les zones sources les plus fréquentes des coulées, leur nature et leur extension minimale et maximale. Ainsi, les **zones potentiellement exposées** à cet aléa peuvent-elles être déterminées et les aménagements conçus en fonction du risque.

Lorsqu'une éruption commence, la reconnaissance du site et du débit sont les éléments majeurs permettant d'anticiper le trajet et l'extension probable d'une coulée de lave

**Simulations
numériques**
relativement
satisfaisantes du
développement des
coulées dans un
objectif de protection.

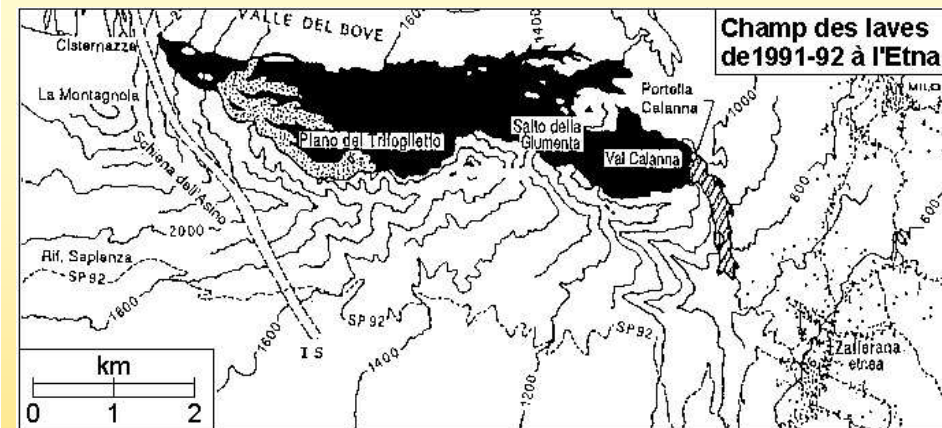
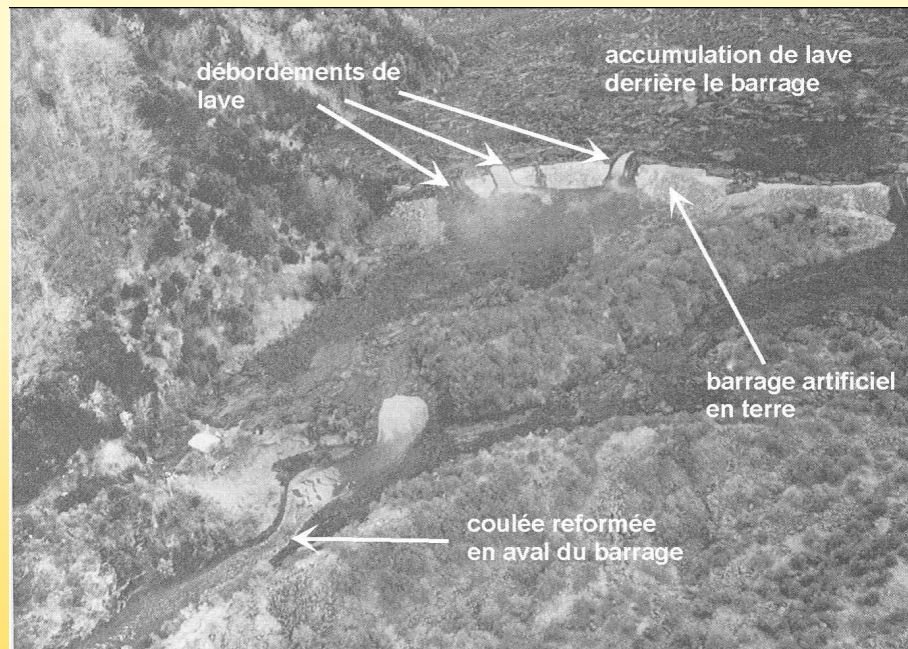


Contrôle artificiel du trajet des coulées de lave

Les coulées de lave sont l'un des rares phénomènes volcaniques sur lequel l'Homme peut intervenir. Trois types d'intervention ont été tentés :

- ✓ la **construction d'obstacles** pour contenir ou détourner les coulées
- ✓ le **refroidissement par arrosage** avec de l'eau
- ✓ l'**utilisation d'explosifs** pour briser les levées ou obstruer les tunnels

Durant l'éruption de 1991-93 de l'Etna, la construction de barrages de terre et des explosifs ont été utilisés.



Durant l'éruption de 1991-93 de l'Etna, la construction de barrages de terre et des explosifs ont été utilisés

Les dômes de lave

Description-caractéristiques	Les dômes de lave se forment lorsqu'une lave visqueuse est émise lentement. La lave s'accumule au-dessus de l'évent en formant un relief plus ou moins hémisphérique, avec des pentes fortes et instables, recouvertes de blocs. Selon la pente locale et la viscosité, le dôme peut évoluer en dôme-coulée.
Risques	Explosions ou à des effondrements de parties d'un dôme La rupture du dôme s'accompagne de la formation d'écoulements de pyroclastites

Prévention	Les mêmes types de prévention que pour les écoulements de pyroclastites
Exemples	Montagne Pelée, Mérapî, Soufrière Hills de Montserrat, Unzen



Les écoulements de pyroclastites

Description-caractéristiques	Mélanges chauds de gaz et de fragments de lave et de roches Leurs origines les plus courantes sont l'effondrement d'un panache éruptif et les effondrements de dôme.
Risques	impact, enfouissement, incendies, lahars, asphyxie et brûlures

Prévention	Identification des zones exposées, évacuation
-------------------	---



Exemples	Montagne Pelée, Mérapî, Unzen, Soufriere Hills de Montserrat, El Chichon
-----------------	--

Événements volcano-tectoniques



Effondrement de calderas Glissements de flancs Avalanches de débris

Calderas des volcans
basaltiques et des volcans
andésitiques et acides

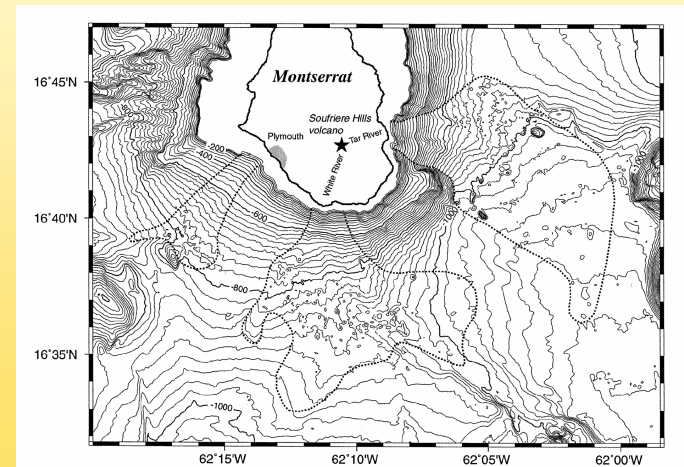
Effondrement calderas basaltiques : fortes activités
phréatiques ou phréatomagmatiques, séismes.

Effondrement des calderas andésitiques et acides :
éruptions cataclysmales, grands volumes de
pyroclastites

La masse et la vitesse des glissements de terrain constituent les
principaux facteurs de risque de ces phénomènes
Les effondrements, en décompressant les systèmes hydrothermaux
ou magmatiques, peuvent être à l'origine de phénomènes explosifs
violents



Glissement en bloc ou avalanche de débris.
Volume de quelques centaines de m³ à plusieurs
dizaines de km³



Les lahars ou coulées de boue

Description- caractéristiques

Mélange, chaud ou froid, de matériaux d'un édifice volcanique et d'eau
(consistance comparable à de mortiers de ciment)
Lahars primaires et secondaires

Risques

destruction par impact
destruction par
enfouissement
barrage instable de rivières

Prévention

identification des zones exposées
surveillance de la pluviométrie
systèmes de détection de lahars
dans les vallées
drainage des lacs de cratère
constructions d'ouvrages

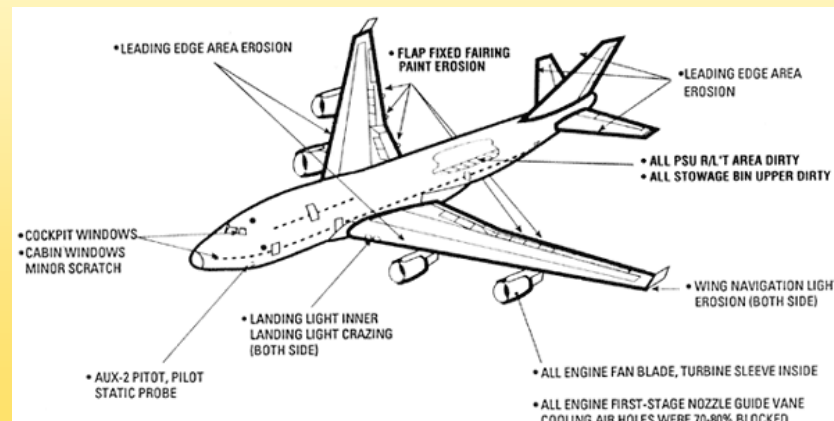


Les tephras

Retombées balistiques et panaches.

Risques	retombées balistiques : impact (quelques kilomètres au maximum autour de l'événement) retombées de cendres : effondrement des toits, pollution, gêne respiratoire, équipements mécaniques et électriques, transports terrestres et aériens.
----------------	---

Prévention	✓ évacuation de la zone proche ✓ suivi, prévision et modélisation de la dispersion des panaches de cendres ✓ alerte aux avions ✓ balayage des toits
-------------------	---



Les gaz volcaniques

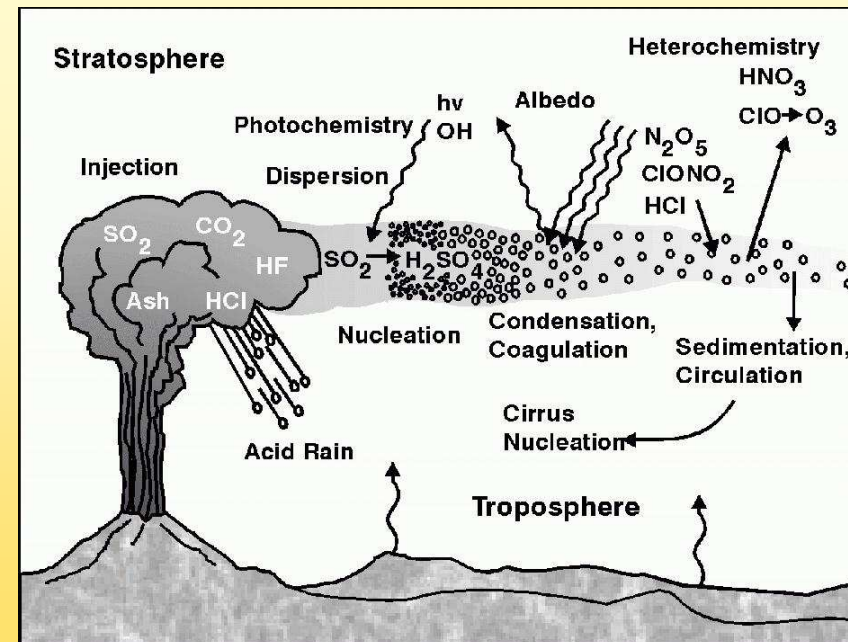
Emis dans l'atmosphère lors des éruptions ou par les systèmes hydrothermaux. Ce sont principalement H_2O , CO_2 , SO_2 , H_2 , CO et, en plus faible quantité, H_2S , HCl , HF , He , ... Dispersés sous forme d'aérosols acides, en composés attachés aux tephres, en particules de sels

Risques

A courte distance des sources :

- effets liés à la toxicité des gaz
- brouillard et pluies acides
- pollution des réservoirs d'eau et empoisonnement des pâturages

Il existe aussi des effets plus globaux sur la chimie et l'absorption du rayonnement solaire dans la stratosphère et sur l'effet de serre dans la troposphère



Autres risques

Risques associés aux séismes volcaniques

Causés par : **intrusions** de magma et **fracturation** associée, **explosions** et phénomènes **volcano-tectoniques**.

En général, magnitude modeste, inférieure à 3 ou 4 (car superficiels, milieu qui ne peut pas accumuler de grandes contraintes). Exceptionnellement de très forte magnitude (phénomènes volcano-tectoniques majeurs)

Ondes de pression atmosphériques

Causées par la détente des gaz magmatiques et projection des éjectas lors des explosions.

Pas de danger pour des explosions modestes. Pour des grandes éruptions, peuvent présenter un danger (vitres ont été brisées à 400 km lors de l'éruption du Tambora en 1815)

Tsunamis d'origine volcanique

Plusieurs phénomènes volcaniques sont susceptibles d'induire des tsunamis : l'entrée dans la mer d'écoulements de pyroclastites, de lahars, d'avalanches de débris ou de blocs glissés, des éruptions sous-marines, l'effondrement de calderas sous-marines.

Surveillance de l'activité volcanique

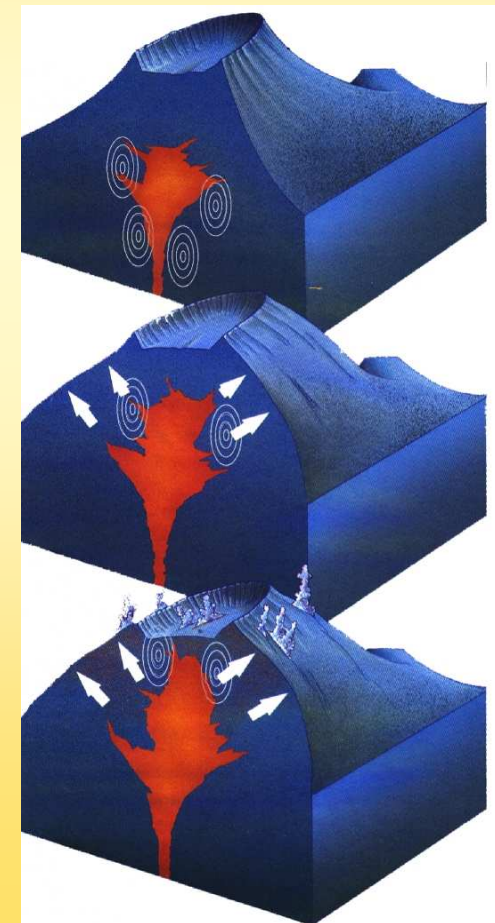
Eruption volcanique : arrivée de magma et de gaz en surface.

Ces transferts de matière et de chaleur génèrent des signaux physiques et chimiques dont certains sont répercutés et perceptibles en surface. C'est ce qui permet la surveillance de l'activité volcanique interne.

Toutes les éruptions sont précédées et accompagnées de signaux détectables en surface si la densité et la qualité des observations est suffisante. La plupart des signaux ne sont cependant détectables qu'avec des instruments présentant une sensibilité adaptée.

Plus globalement, le terme de surveillance volcanique s'applique à l'ensemble des observations, des mesures et des analyses sur les changements d'état d'un volcan et de son environnement.

C'est avec la création d'observatoires volcanologiques, en 1845 au Vésuve, 1911 au Japon et 1912 à Hawaii que des instruments ont commencé à être développés et utilisés pour la première fois dans l'histoire.



Surveillance non-instrumentale

Certains signaux volcaniques sont suffisamment forts pour être détectés sans l'aide d'instruments : **séismes** de magnitude supérieure à 2, environ, **forte déformation** ou **fracturation** du sol, modifications (débit, couleur ou odeur) de fumerolles ou de sources, modifications de la végétation ...

De plus, lorsqu'une éruption est en cours, on peut aussi observer les mêmes paramètres, mais aussi les **variations de l'activité** en surface.

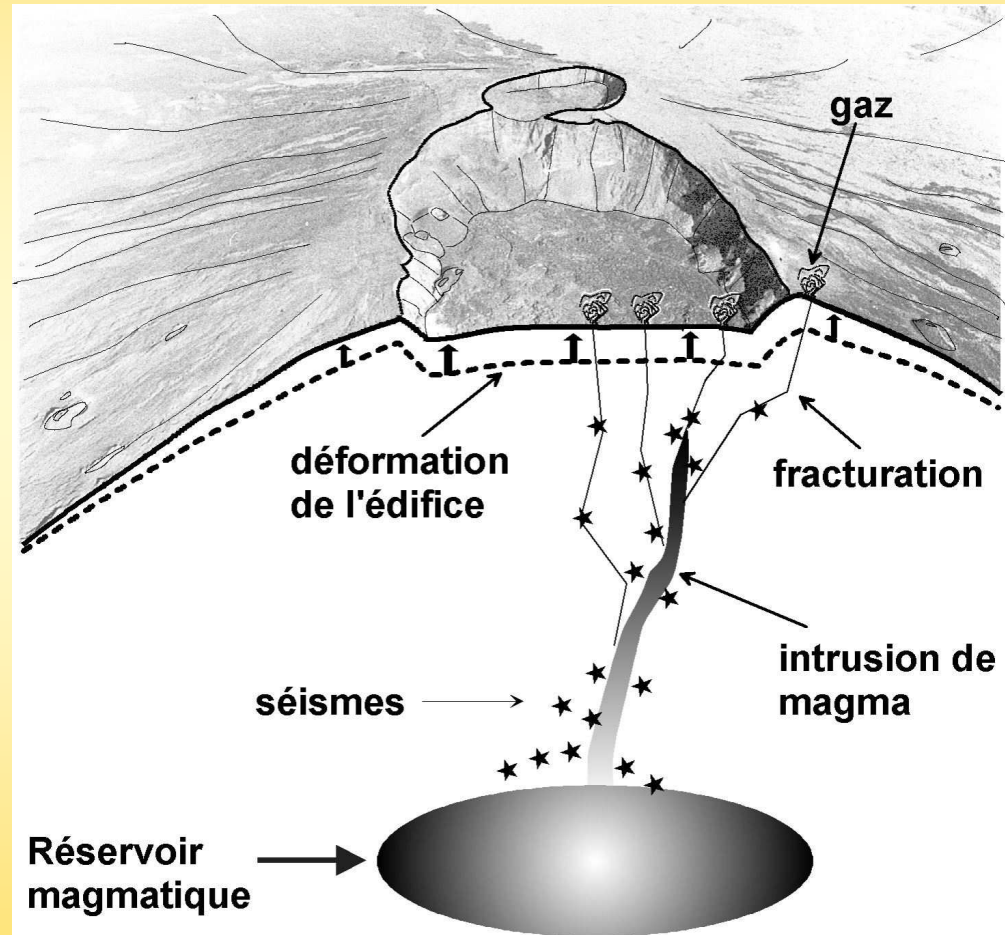
Ces observations "**sensorielles**", bien qu'elles ne fournissent que des informations qualitatives, sont importantes si elles sont conduites de façon rigoureuse et régulière, et elles sont **complémentaires des observations instrumentales**.

Surveillance instrumentale

Un siècle d'expérience en surveillance instrumentale des volcans.

Deux types de méthodes donnent, en général, les informations les plus claires en terme d'activité volcanique interne : la **surveillance sismique** et la **surveillance de la déformation**.

Bien sûr, ceci ne signifie pas que l'apport **d'autres méthodes** ne puisse pas être déterminant dans le diagnostic d'une crise. Par exemple, les approches géochimiques permettent souvent de déterminer si une crise en cours a une composante magmatique



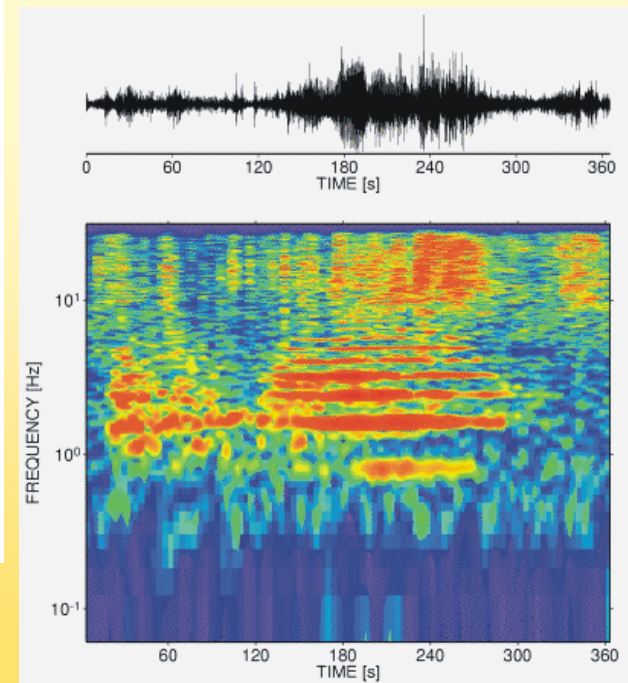
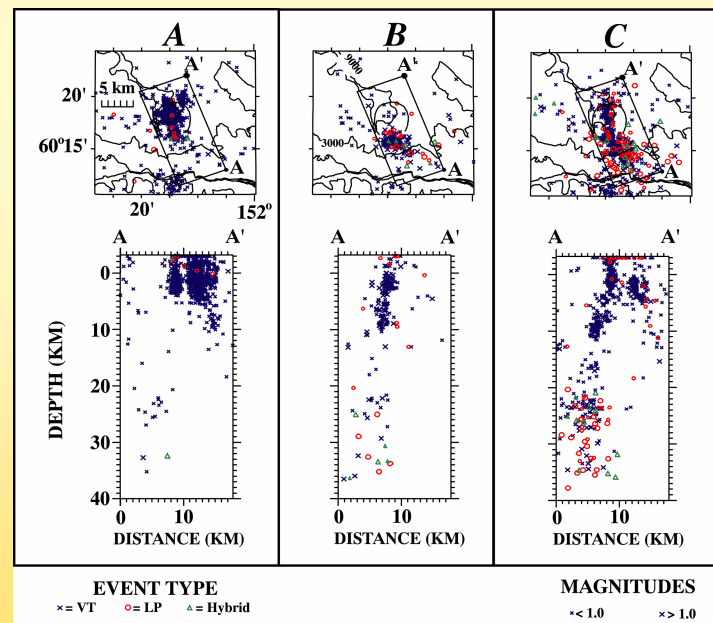
Surveillance sismique

- (1) des séismes associés à de la fracturation ou au jeu de failles (volcano-tectoniques)
- (2) des signaux générés par les mouvements de fluides (magma et gaz) dans les conduits

Localisation des sources et détermination des mécanismes au foyer, permet de suivre dans l'espace et le temps la localisation des fractures activées et les variations de contraintes

Signaux associés aux mouvements de fluides sont spécifiques à l'activité volcanique. L'observation des signaux associés aux mouvements de fluides est extrêmement importante dans le diagnostic des crises volcaniques.

La surveillance de l'activité sismique implique la mise en place de réseaux de stations sur les flancs des volcans.

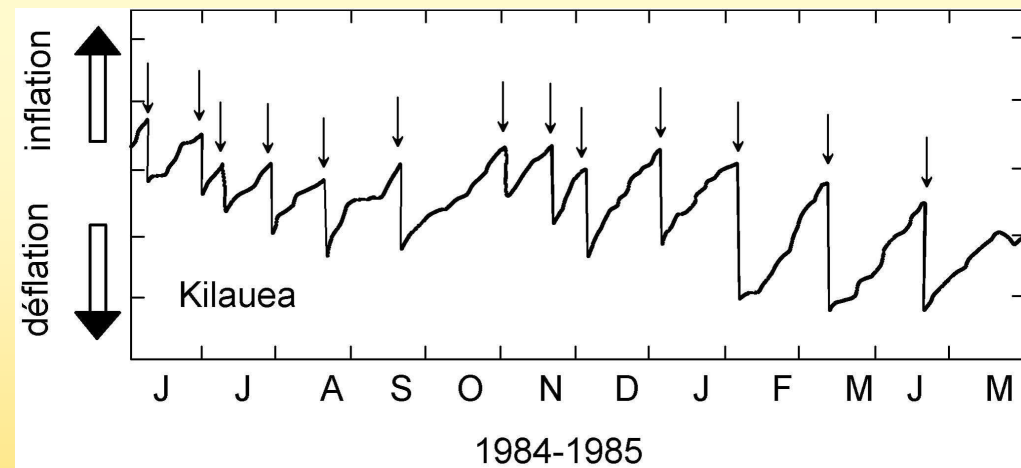
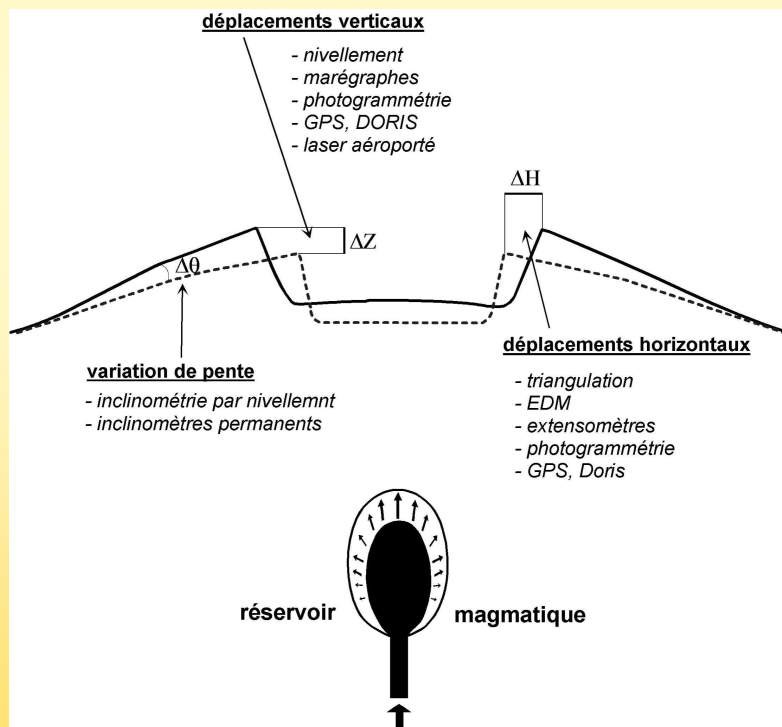


Surveillance de la déformation

On comprend que les volumes importants de magmas qui migrent dans les édifices avant les éruptions doivent provoquer des déplacements du sol.

Dans de rares cas, cette déformation est visible à l'œil nu (Mont St Helens, Champs Phlégréens) Cependant, dans la plupart des cas les mouvements ne sont détectables qu'avec des mesures instrumentales.

Typiquement, on observe une inflation d'un volcan avant une éruption



Les méthodes de mesure de la déformation des volcans sont nombreuses

Surveillance de la déformation des volcans

Méthode	Précision
Nivellement de précision	Jusqu'à ~0.5 mm/km. Selon la procédure
Nivellement géodésique	Dépend de la longueur de visée : 2 à 10 mm/km
Surveillance des nappes d'eau (lacs, mer,...)	Variable suivant méthodes
Inclinométrie par nivellement hydraulique (wet tilt)	Dépend du dispositif et de sa longueur. ~ < mrd à > 10 mrd
Inclinométrie par nivellement optique (dry-tilt)	3-5 mrd
Inclinomètres permanents (tiltmeters)	Variable; en général autour du mrd ou moins
Mesures de distances (EDM)	3 à 5 mm + 2 à 5 ppm de la distance
Extensomètres, strainmeters	Variable selon dispositif de 1/10 mm à bcp moins
Mesures "simples" de déplacements	1/100 mm à cm
Méthodes photogrammétriques	Variable
Géodésie spatiale: GPS, DORIS	centimétrique
Interférométrie différentielle radar	Infra-centimétrique
Laser aéroporté ou satellitaire	

Quelques autres méthodes de surveillance

Méthode	Principe
Surveillance micro-gravimétrique	Détection des transferts de masse dans un édifice par surveillance de la gravité
Surveillance magnétique	Détection des variations magnétiques associées à différents phénomènes : piezomagnétisme, thermo-magnétisme, électrofiltration
Surveillance électrique	Mesure des variations de résistivité, variations des phénomènes électrocinétiques
Surveillance thermique	Surveillance et détection des anomalies thermiques depuis le sol ou à partir d'avion ou de satellites
Surveillance géochimique	Surveillance de la composition et des flux de fumerolles, sources et événements

Une révolution en cours : l'utilisation des méthodes de télédétection

Méthode	Principe-objectif
Méthodes au sol	
COSPEC	Mesure des flux de SO ₂ dans les panaches volcaniques
FTIR	Mesure de la concentration de divers gaz dans les panaches volcaniques
Radar Doppler	Mesure de la vitesse et du flux relatif des éjectas dans les jets et les panaches éruptifs
Méthodes satellitales ou aéroportées	
GPS, DORIS	Mesure des déplacements.
Interférométrie radar	Mesure de la déformation et de la topographie des volcans
Modifications de la surface	Nouveaux produits, modifications majeurs de la topographie.
Panaches de cendres	Identification, suivis et quantification
Gaz volcaniques	Suivi et quantification du SO ₂
Anomalies thermiques	Nouveaux capteurs, par exemple ETM+, ASTER, ...

Les Observatoires volcanologiques

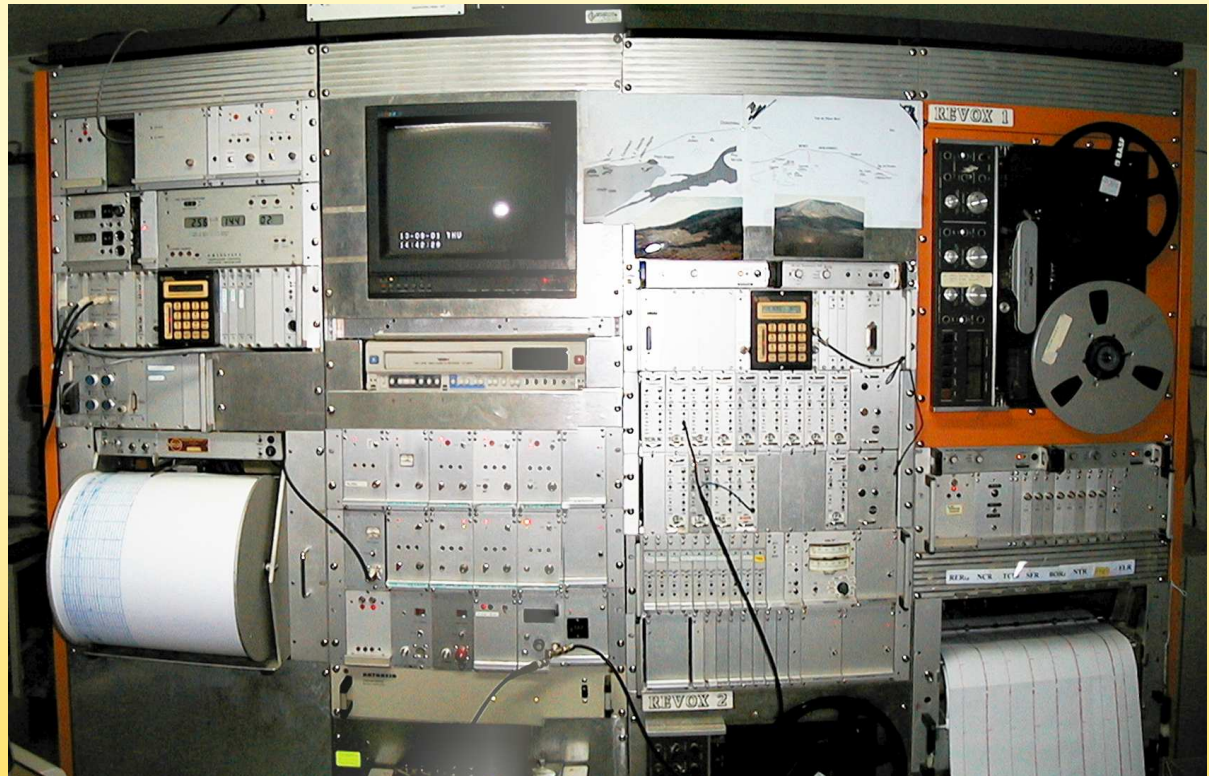
Sur les centaines de volcans actifs, seules quelques dizaines font l'objet d'une surveillance instrumentale.

Le problème de surveillance se pose différemment pour chaque site en fonction de la fréquence et de la nature de l'activité, de l'environnement humain, des problèmes de logistiques, des compétences et des moyens disponibles.

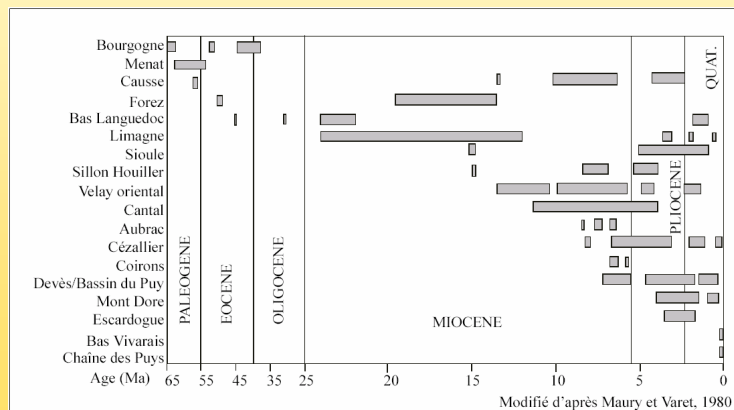
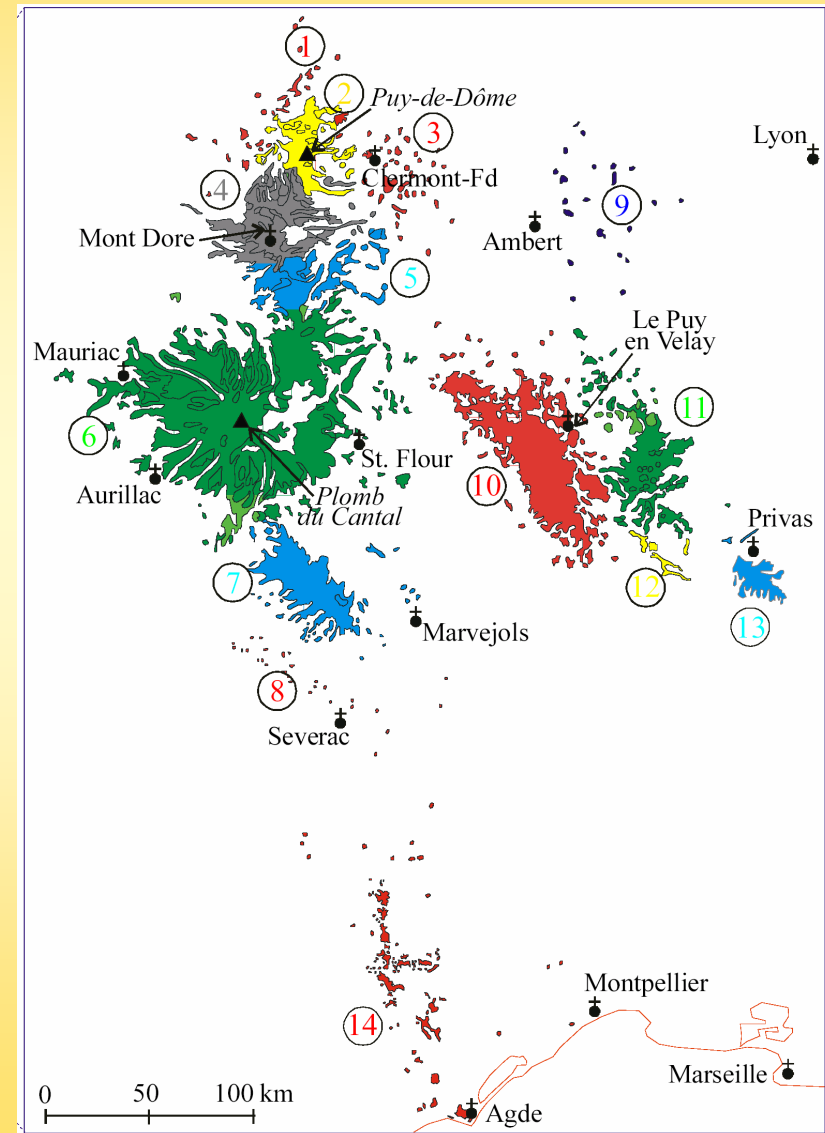
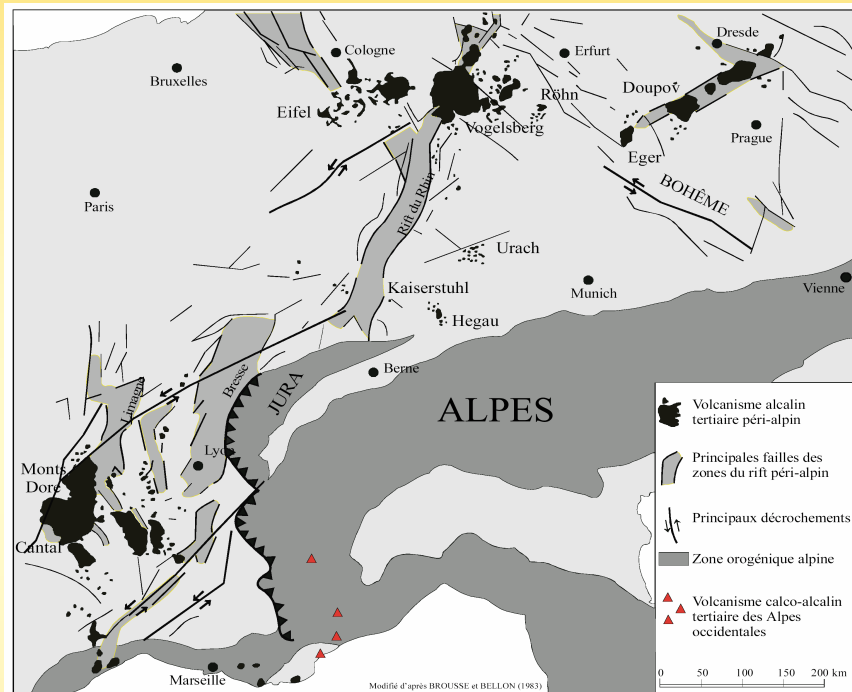
Certains ont une orientation plus marquée vers la recherche

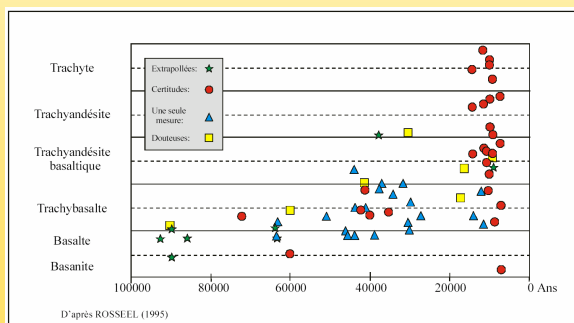
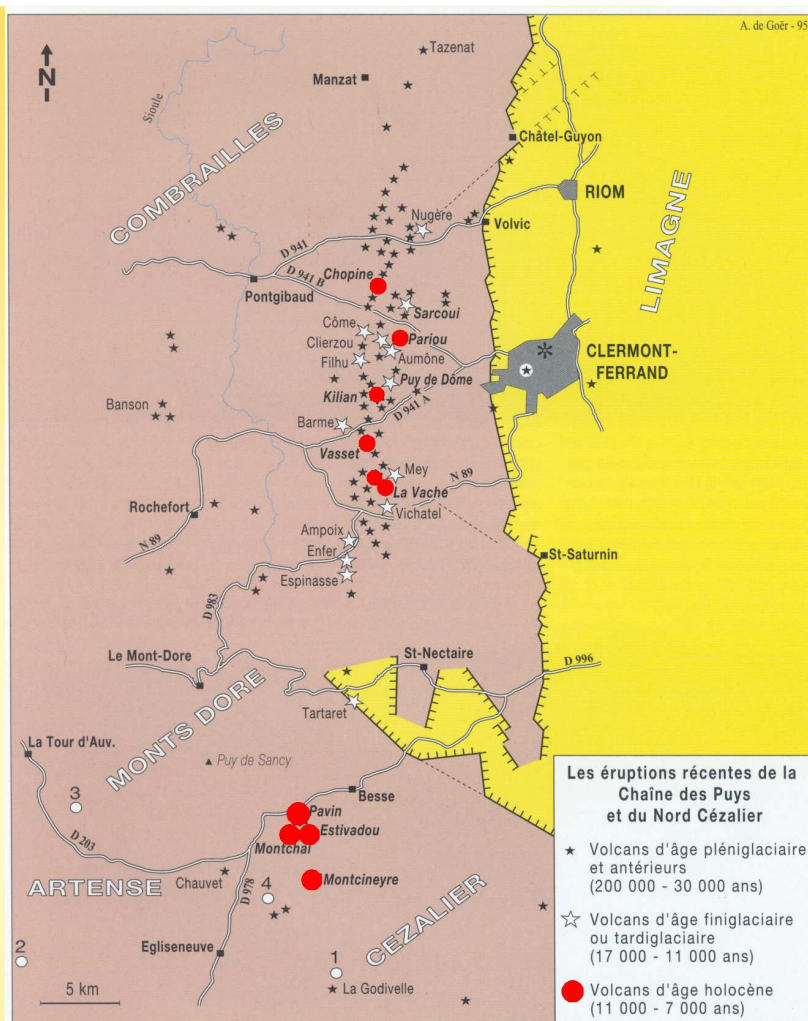
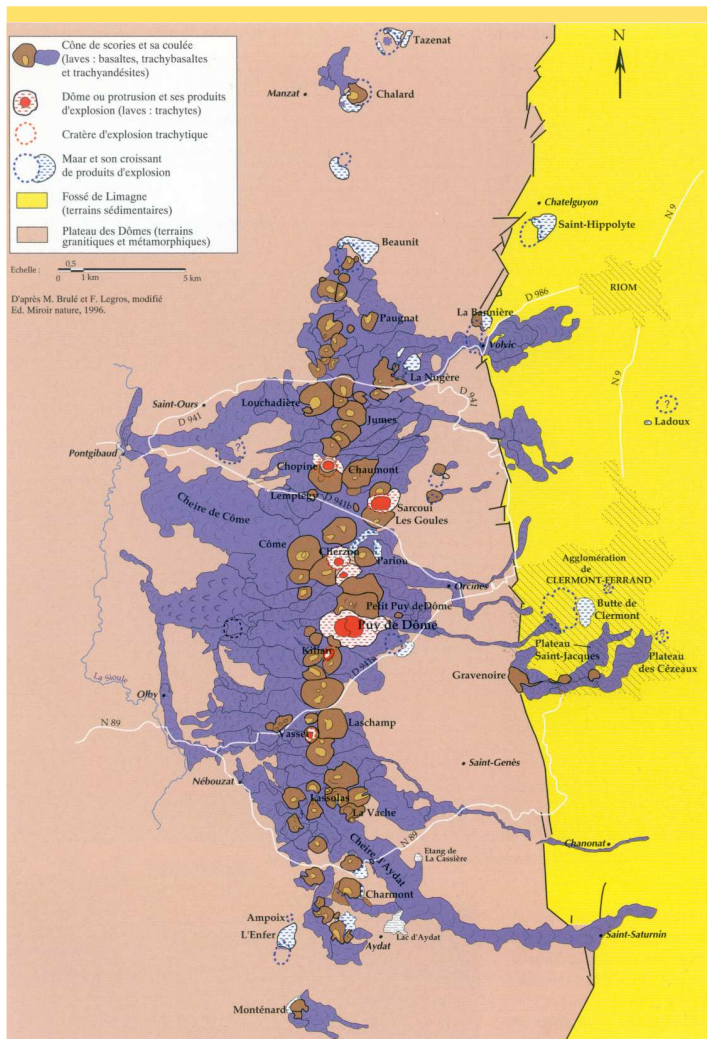
Equipes et matériel d'intervention (Pinatubo)

Notion classique d'observatoire est en train d'être complétée avec les techniques spatiales. Les perspectives sont considérables.



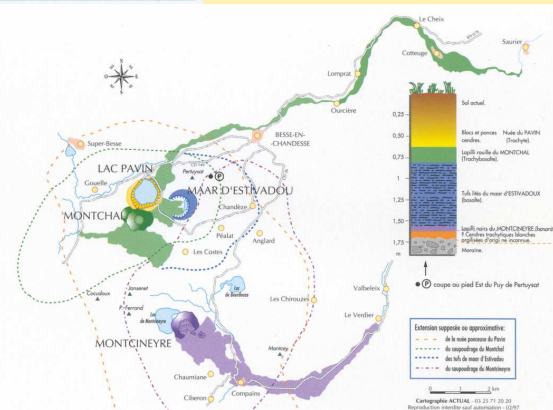
Le volcanisme du Massif Central





LES DERNIERS VOLCANS D'Auvergne (7 000 ans), DANS LA RÉGION DE BESSE-EN-CHANDESSE («GROUPE PAVIN»)

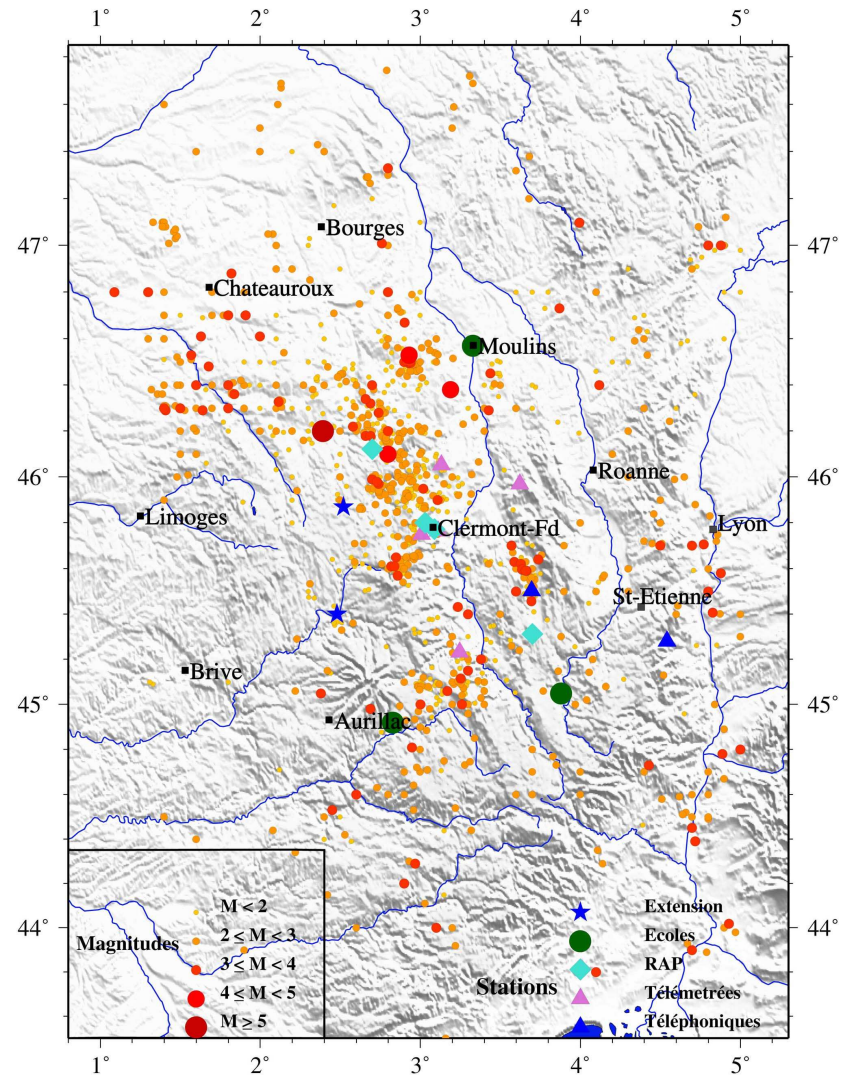
Ces quatre éruptions se sont succédé en moins de deux siècles.



La volcanologie à l'Université Blaise Pascal



Sismicité dans le Massif-Central de 1962 à 2000 - Document OPGC

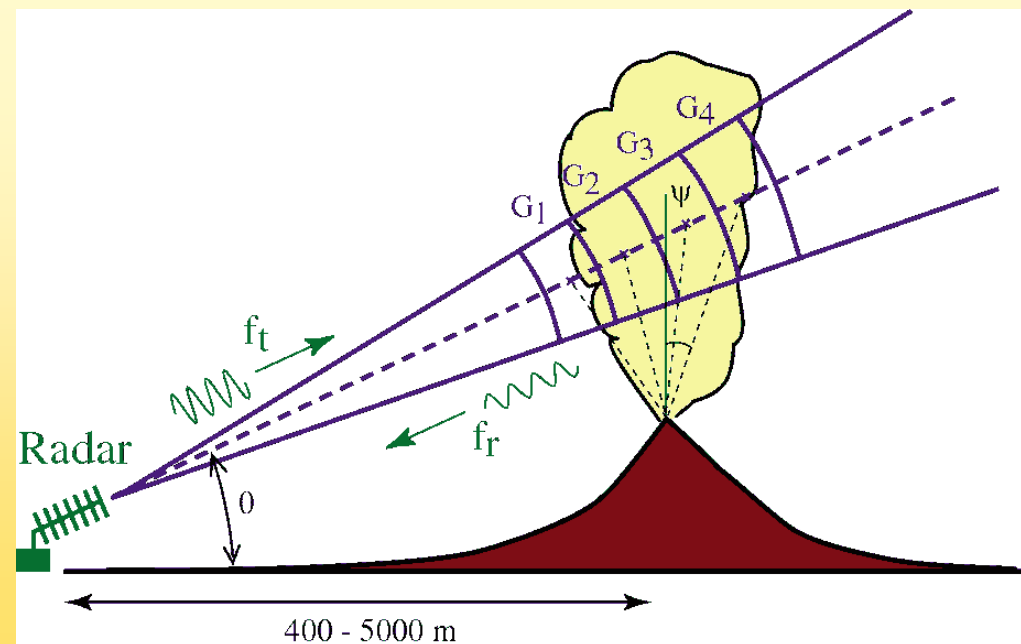


✓ radar Doppler

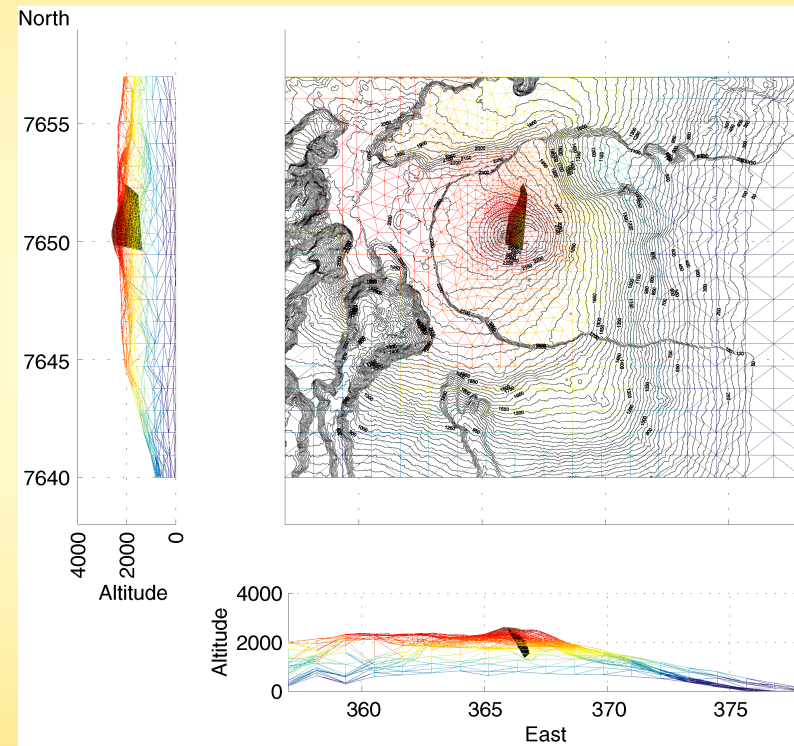
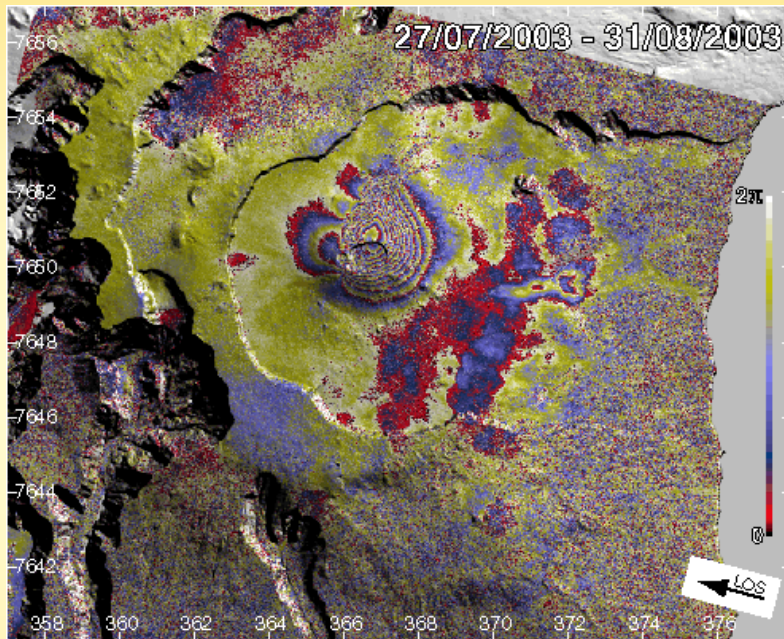


Voldorad (Volcano Doppler Radar)

Réflectivité et vitesse des
particules dans les panaches
volcaniques



✓ Interférométrie radar et modélisation complexe de la déformation



Mais aussi :

- autres méthodes géophysiques
- Géochimie
- Pétrologie
- ...

Conclusion

La surveillance de l'activité volcanique est indispensable à l'étude des processus du volcanisme et à la prévision des éruptions.

Si la prévention des risques pour les populations et les biens justifie à elle seule la surveillance des volcans, l'objectif de recherche scientifique ne peut pas être dissocié de cette démarche, puisque la qualité d'une prévision dépend directement du niveau des connaissances sur le site et sur les processus volcaniques en général