



Michel Detay

Traité de

volcanologie physique

*L*avoisier
TEC & DOC



ÉRUPTION DE L'EYJAFJÖLL, Islande, 27 mars 2010.



GÉOMORPHOLOGIE VOLCANIQUE

« Nous avons vu dans l'histoire de la science que le vice de tous ceux qui se sont occupés de géologie était d'avoir recherché les causes avant de connaître les faits. »

Georges Cuvier, Cours au Collège de France, 1808.

Les volcans ont une répartition globale sur la planète (Fig. 1.1). La volcanologie a récemment beaucoup évolué à l'aide de diverses disciplines connexes des sciences de la Terre (géochimie, pétrologie endogène, géophysique), mais aussi grâce aux progrès de l'instrumentation (miniaturisation, fiabilité, analyse satellitaire) et au développement des outils de communication et des techniques de positionnement et d'étude satellitaire (GPS, InSAR, interférométrie...).

L'application de différentes échelles d'observation du local au planétaire, l'utilisation de la physique et de la chimie du solide et des gaz, complétée par l'intégration dans le volcanisme de la physique des fluides ont permis des progrès conceptuels considérables. La volcanologie s'intègre aujourd'hui dans la dynamique des fluides géologiques. Il devient possible d'appréhender la manière dont les roches se forment et comment elles évoluent dans le temps et dans l'espace.

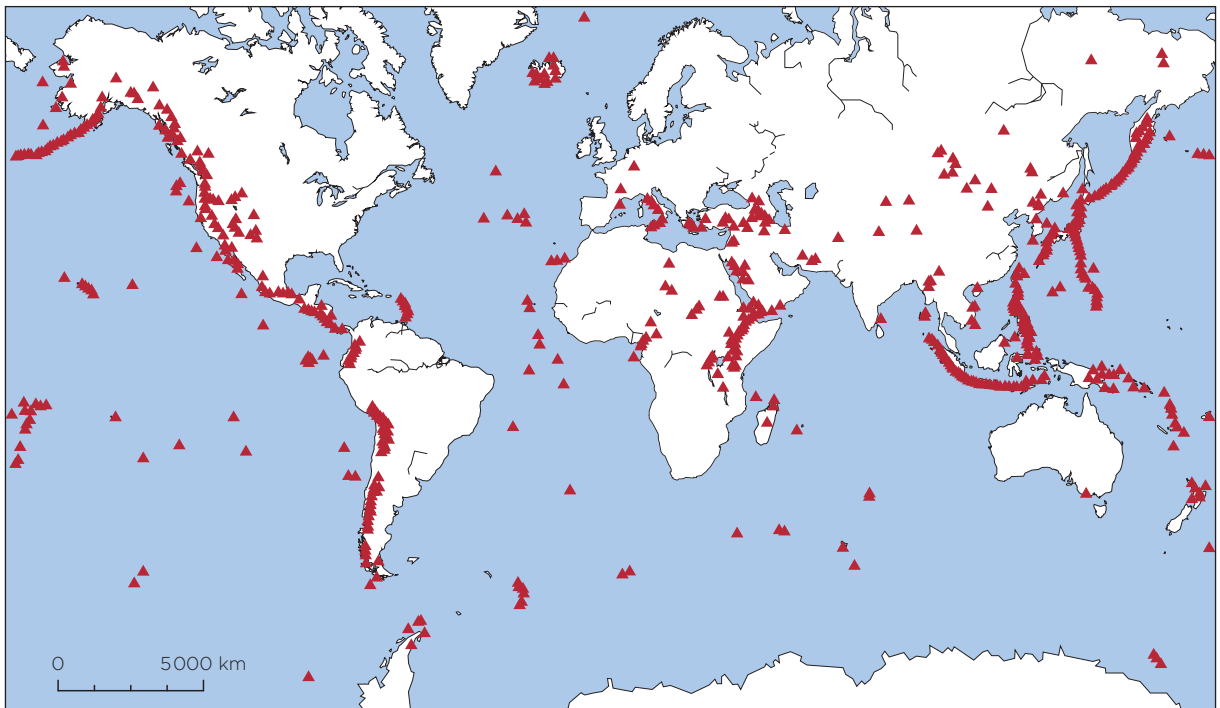


Figure 1.1. Représentation globale des volcans ayant été actifs durant les derniers 10 000 ans (d'après Loughlin *et al.*, 2015).

1. GRANDES CLASSIFICATIONS GÉOMORPHOLOGIQUES

La volcanologie est, comme la plupart des sciences naturelles, née de l'observation. Les sciences de la Terre sont restées pendant les deux premiers tiers du xx^e siècle essentiellement descriptives et qualitatives.

Nous faisons aujourd'hui encore un distinguo, un peu manichéen, entre le *volcanisme* et le *plutonisme* qui sont les deux expressions d'un seul

et même mécanisme : le *magmatisme*. Cette frontière est artificielle. Le volcanisme s'exprime en surface alors que le terme plutonisme est réservé à tout ce qui ne se voit pas, tout ce qui n'atteint pas la surface. Quand le magma atteint la surface, la roche prend d'abord le nom générique de *lave* dès que le magma est dégazé (Fig. 1.2). Quand cette roche aura refroidi, il deviendra possible de lui donner un nom dédié, en fonction de sa composition chimique. Il faut retenir qu'il y a continuité entre le plutonisme et le volcanisme. Il s'agit du

même magma qui formera des roches de noms différents, mais de même composition chimique. Il y a également une solution de continuité entre le *métamorphisme* et le *magmatisme*. En effet, les roches métamorphiques sont soumises à des conditions de pression et de température qui amènent à des modifications (déshydratation, recristallisation, changement de texture...), qui peuvent déclencher une fusion partielle des roches crustales. Ces changements de température et de pression sont liés à la dynamique globale de la Terre sous l'effet de la tectonique des plaques. Plusieurs mécanismes contrôlent ainsi la cristallisation du magma et la fusion partielle des roches. La *pression* et la *température* sont les principaux agents de ces changements. Les fluides géologiques, l'eau et le gaz carbonique en particulier, participent à tous ces phénomènes.

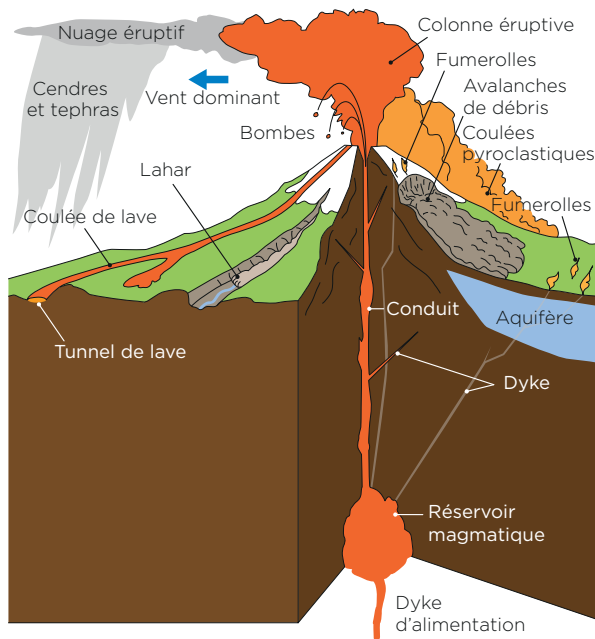


Figure 1.2. Bloc diagramme d'un stratovolcan dans son environnement (d'après Myers B. *et al.*, 1997).

1.1 Selon la géométrie des volcans

L'analyse géomorphologique est la science des formes du terrain. Son nom provient des trois mots grecs *gê* (la Terre), *morphê* (la forme), *logos* (l'étude). Essentiellement descriptive, elle fournit des indications

précieuses sur la nature des édifices volcaniques. Distinguons en particulier :

- les *volcans-boucliers* qui ont un diamètre nettement supérieur à leur hauteur. Cela provient de la nature des laves (fluides) et donne donc une indication sur le type de manifestation éruptive (essentiellement effusive). L'Erta Ale (Éthiopie), le Piton de la Fournaise (île de La Réunion), le Hierro (Canaries), le Kilauea (Hawaii), sont des volcans-boucliers ;

- les *stratovolcans* dont la relation hauteur-diamètre est plus équilibrée. Leur géomorphologie correspond à l'image d'Épinal du volcan. Les laves sont moins fluides, les éruptions sont explosives. Également appelé volcan composite, il correspond à un édifice volcanique constitué de l'accumulation de coulées de lave, de téphras et/ou de pyroclastites au cours des différents stades éruptifs (ces différentes couches successives sont assimilées à des strates, d'où son nom de « strato » volcan). La plupart des stratovolcans présentent des cônes adventifs résultant de la sortie latérale du magma dans l'histoire de l'édifice. Les stratovolcans sont parfois sujets à des éboulis de grande extension voire des éboulements sectoriels gigantesques qui laissent des traces topographiques appelées *hummocks* (dépôts d'avalanches). Ces objets géologiques sont composés d'une masse de débris généralement hétéroclites, reflétant la structure partielle de l'ancien édifice dont ils sont originaires. Ils se présentent parfois en groupe de centaines de collines (Saint Helens en 1980 ; les dix mille collines de Tasikmalaya en Indonésie nées d'une éruption du Galunggung il y a environ 4 200 ans, s'étendent sur 250 km²). Le Merapi (Indonésie), le Vésuve et le Stromboli (Italie), le Mont Saint Helens (États-Unis), le mont Fuji (Japon), le Pinatubo (Philippines), le Kilimandjaro (Tanzanie), le Nyiragongo (République Démocratique du Congo – RDC) sont des stratovolcans ;

- les *volcans fissuraux*, localisés dans des contextes extensifs. Ils sont associés à des grandes fractures de l'écorce terrestre. Les volcans d'Islande sont généralement des volcans fissuraux comme le Krafla, l'Eldgjá ou la chaîne du Laki. De même, la plupart des volcans du rift est-africain sont fissuraux. Récemment, en août 2014, le Bárðarbunga-Veiðivötn (Islande) a commencé par une fissure (un dyke de 45 km de longueur) pour terminer en caldeira.

Le volcanisme ayant un caractère évolutif dans le temps, il existe une solution de continuité entre ces trois grands types géomorphologiques. Ils répondent alors à l'appellation de *volcans complexes*. L'Etna (Italie) ressemble à un stratovolcan posé sur un volcan-bouclier, l'Hekla (Islande) est à la fois un stratovolcan et un volcan fissural, les éruptions des volcans-boucliers d'Hawaï démarrent souvent par l'ouverture d'une fissure.

Certains édifices se présentent sous la forme d'un *cône monogénique* lorsqu'ils résultent d'une seule éruption volcanique. Ils s'opposent aux *cônes polygéniques*, les plus fréquents. Leur volume (v) est facilement calculé, il répond à celui d'un cône :

$$v = \frac{\pi r^2 h}{3} \quad [1.1]$$

avec :

v : volume du cône ;

π : nombre pi ;

h : hauteur du cône ;

r : rayon du cône.

Il existe un grand nombre de classifications géomorphologiques (Fig. 1.3 et 1.4) ; les spécialistes en distinguent au moins 26 (Smithonian) voire 32 pour certains géomorphologues.

Sans entrer dans le détail, il est raisonnable de compléter les trois formes génériques précédentes par :

– *les volcans en table*, formant les massifs tabulaires. Comme leur nom l'indique, ils ressemblent à une table avec un sommet plat et des flancs abrupts. Ils ont été formés lors d'éruptions sous-glaciaires. Ils sont continués par une succession de laves qui témoignent de leur mise en place : *pillow-lava* (lave en coussins) à la base, hyaloclastites et laves.

Les laves en coussins témoignent d'une première phase au contact de l'eau ou de la glace fondue dans le cas des volcans sous-glaciaires d'Islande. Le volcan ayant fait son chemin à travers le glacier, il peut alors s'exprimer sans contamination aqueuse et émet alors des laves « normales » non modifiées par le contact avec l'eau. Au fil du temps et des réchauffements, le glacier va disparaître pour laisser ce massif caractéristique en place. Le Herðubreið en Islande est un représentant de ce type d'édifice ;

– *les cônes de tufs et les cônes de scories*, caractéristiques de l'activité hydrovolcanique (voir section 1, cha-

pitre 8). Parmi les exemples représentatifs : le Bromo (Indonésie), l'île de Surtsey et le Hverfjall (Islande), le *Diamond Head* à Honolulu (Hawaï) ;

– *les dômes de lave*, caractérisés par l'accumulation de lave visqueuse. Un dôme de lave se forme lorsque de la lave acide, riche en silice, ne parvient pas à s'écouler. Il se forme alors un dôme de lave pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres de hauteur et de diamètre. Les dômes de lave représentent un réel danger, car le magma n'a pas eu le temps de dégazer et ils sont susceptibles de donner naissance à une éruption explosive (nuage pyroclastique, nuées ardentes). El Chichón (Mexique), l'Augustine (Alaska), le Tarawera (Nouvelle-Zélande), le Paluweh (Petites îles de la Sonde, Indonésie) hébergent régulièrement des dômes de laves ;

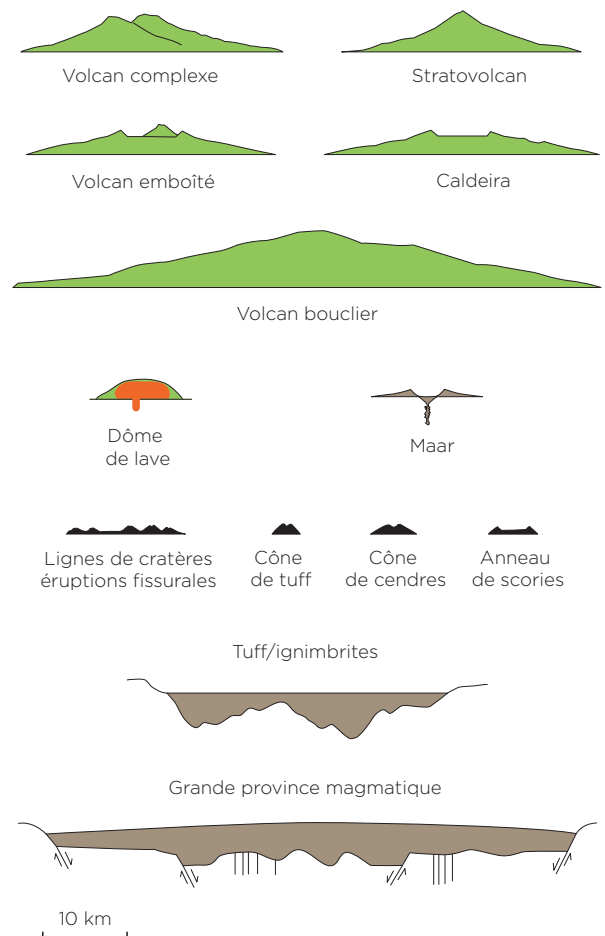


Figure 1.3. Typologie géomorphologique des principales structures volcaniques.

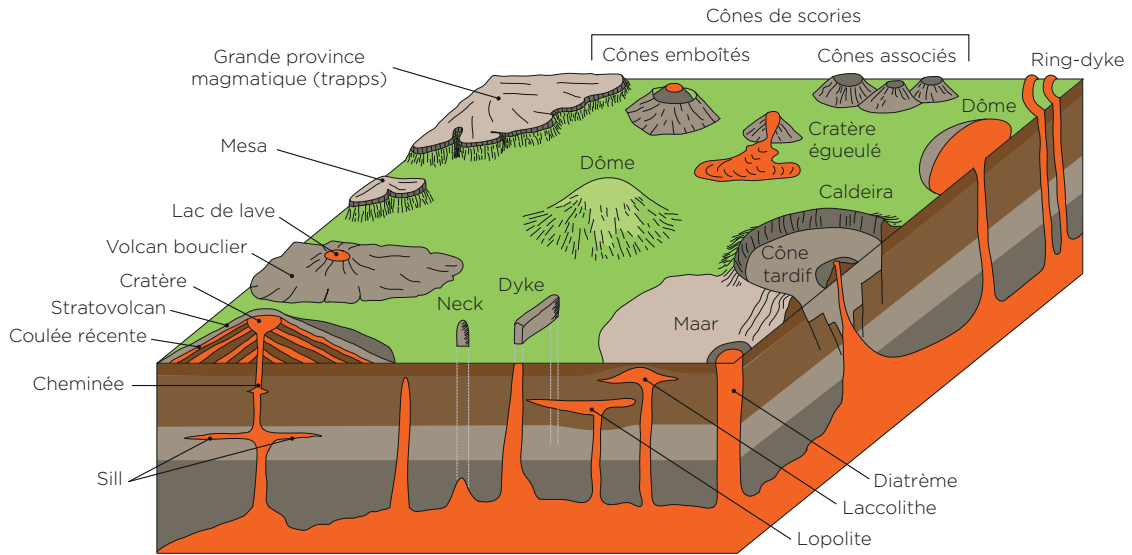


Figure 1.4. Représentation schématique des principales unités géomorphologiques (d'après Caron J.M. *et al.*, 1995).

- les *caldeiras*, qui correspondent à une grande dépression liée à l'effondrement du cratère dans sa propre chambre magmatique. Krakatau et Toba (Indonésie), Askja et Bárðarbunga-Veiðivötn (Islande), le Santorin (Grèce) ;
- les *volcans emboîtés*, où un second cratère apparaît dans le cratère initial. Le Vésuve (Italie), le Cotopaxi (Équateur), le Rinjani (Indonésie) présentent ces caractéristiques.

■ Caldeiras

Les grandes caldeiras sont généralement classées en fonction de critères géométriques (Fig. 1.5). La profondeur de la chambre magmatique impliquée, sa forme, sa taille et le volume de produits volcaniques éjectés lors de la formation de la caldeira ont une influence sur la morphologie de la dépression résultante. Les caldeiras sont intimement liées à l'évolution de la chambre magmatique en période de volcanisme actif et au complexe plutonique sous-jacent (intrusions en feuillets, batholites ou complexe annulaire) en période post-volcanique. Quatre cas extrêmes sont généralement admis dans la littérature pour décrire le mécanisme de subsidence :

- *effondrement de type piston*, où une faille annulaire délimite la zone d'effondrement central (intracalderique) qui sera complétée par un effondrement

secondaire (zone de brèche). Les caldeiras de Crater lake et de Vales City (Colorado) et Long Valley aux États-Unis, Ishizuchi (Japon), Suswa caldeira (Kenya), Rabaul (Papouasie-Nouvelle-Guinée) sont du type piston ;

- *effondrement chaotique non cohérent (piecemeal)* où le bloc subsidant va être découpé par de nombreuses failles donnant un aspect chaotique. C'est le cas des Champs Phlégréens en Italie, du Krakatau (Indonésie), du Pinatubo (Philippines) ;

– *affaissement par flexure (downsag)* où on ne trouve que peu de failles, c'est la flexure du toit de la chambre magmatique qui provoque la naissance de la caldeira. Par exemple Taupo et Rotorua en Nouvelle-Zélande, ou de Bolsena en Italie ;

- *effondrement en entonnoir (funnel caldera)* pour lequel différentes origines ont été proposées suite à des reconnaissances géophysiques. Par exemple : Krakatau (Indonésie) et Aso (Japon).

Toutes les caldeiras se forment par effondrement et il est fréquent de retrouver les éléments d'un ou plusieurs des mécanismes sus-décrits au sein d'une seule et même caldeira. La subsidence des caldeiras de type asymétrique (*trapdoor*) est, par exemple, un intermédiaire entre l'effondrement piston et l'affaissement par flexure (cas du Guayabo au Costa Rica). Ces caldeiras pour-

raient être liées à des éruptions de faible volume, à une chambre magmatique asymétrique ou à l'influence de la tectonique régionale (Fig. 1.5). D'autres types ont également été décrits tentant de rendre compte de la dynamique d'effondrement dans le temps (effondrement concentrique par palier).

De nombreuses caldeiras ont une géométrie qui reflète l'évolution dans le temps de leur position géostructurale (Toba en Indonésie, Vulcano en Italie, par exemple).

Comme tout objet géologique, la caldeira évolue en fonction des contraintes géodynamiques, mais aussi de son état d'altération. Les fluides hydrothermaux jouant un rôle très important dans l'altération de l'édifice et son évolution géomorphologique. Ces circulations hydrothermales sont à l'origine de dépôts de matières premières (or, cuivre, dépôts soufrés notamment) qui peuvent présenter un intérêt industriel.

■ Le volcan agent de changements topographiques

Les volcans peuvent être des acteurs de changements topographiques importants. Le plus souvent en modifiant le système de drainage (cours d'eau, rivières, fleuves). Ils peuvent créer des barrages qui vont héberger des lacs voire provoquer, en deuxième détente, des inondations majeures lorsque ces barrages cèdent. De même, les très grandes avalanches sont susceptibles de modifier substantiellement la topographie locale, mais parfois aussi lointaine lorsque les avalanches provoquent des tsunamis.

– Au Pérou, les produits éruptifs du volcan Sabancaya ont barré le canyon Majes (2 000 m de profondeur). Un lac s'est mis en place avant que le barrage ne finisse par lâcher...

– Au Chili, les débris d'avalanche du Parinacota ont créé, il y a environ 13 000 ans, le lac Chungará (21,5 km²).

– Sur le tracé du rift est-africain, le lac Kivu qui alimentait le Nil a été barré lors d'une éruption des volcans du Virunga. Il est maintenant connecté au réseau hydrographique du Congo. L'éruption a ainsi fait passer un tributaire du Nil et donc de la Méditerranée au fleuve Congo et à l'océan Atlantique.

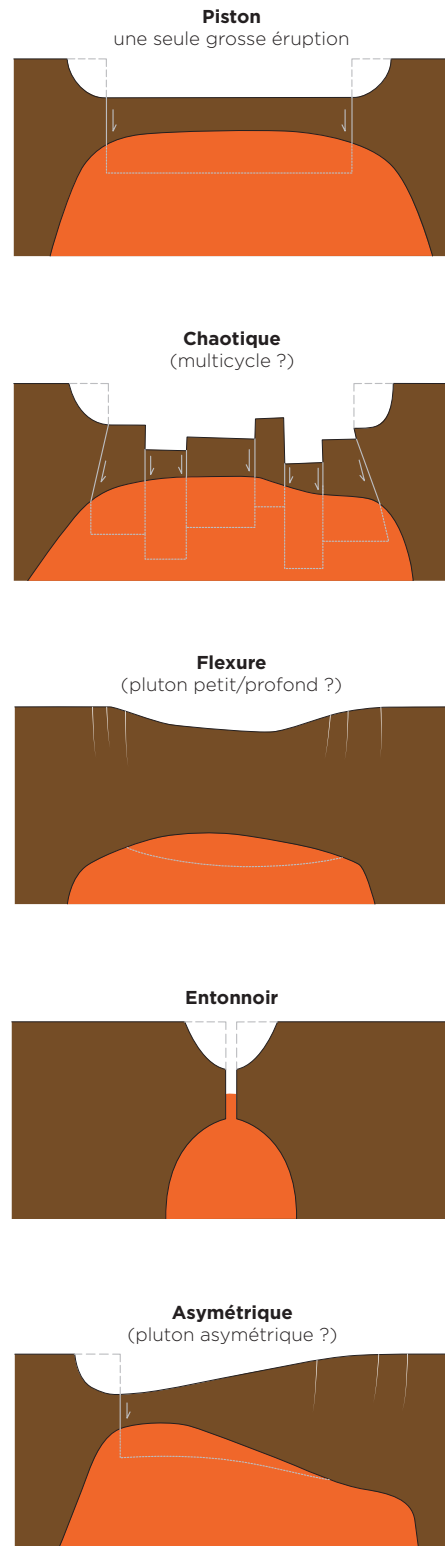


Figure 1.5. Différentes géométries de subsidence caldérique en relation avec la profondeur et la géométrie de la chambre magmatique sous-jacente (d'après Lipman P., 1997).



Les volcans sont terre de paradoxes. Manifestation quasiment négligeable de l'activité terrestre d'un point de vue thermodynamique, ils n'en représentent pas moins un des **phénomènes naturels les plus fascinants**, pouvant être tour à tour majestueux, silencieux, instables, meurtriers, pourvoyeurs de terrains fertiles ou perturbateurs du climat mondial. De tels objets naturels ne peuvent être cernés que par une **approche scientifique multidisciplinaire** qui combine physique, chimie et géologie de terrain.

Traité de volcanologie physique propose une synthèse actualisée, recadrant l'objet géologique « volcan » dans son contexte géodynamique, mais aussi dans les problématiques contemporaines en fournissant des éléments de quantification techniques, financiers (ou économiques) et sociétaux. Sont tour à tour abordées des **problématiques volcanologiques essentielles** telles que la plomberie magmatique, l'impact du volcanisme sur le climat, l'hydrovolcanologie, les phénomènes para-volcaniques, la notion de risque volcanique ainsi que le volcanisme paroxysmal, responsable des extinctions de masse à l'origine de nombreuses ères géologiques, et le volcanisme extraterrestre.

C'est un corpus de connaissances complet, richement illustré, que propose Michel Detay aux étudiants en STU et SVT ainsi qu'aux candidats au CAPES et à l'Agrégation de SVT. Il apporte également un éclairage scientifique et technique aux enseignants de SVT et plus généralement à tout public intéressé par un aspect particulier du volcanisme, ou par le sujet dans sa globalité.

Michel Detay présente la double compétence d'être à la fois un universitaire (géologue, docteur d'État) et un industriel (au sein du secteur privé - tant en France qu'à l'international), ce qui lui permet une mise en perspective novatrice et pratique de la volcanologie physique.