Figure 1 : Aiguille de la Montagne Pelée en 1902 (gauche) et nuée ardente (droite)

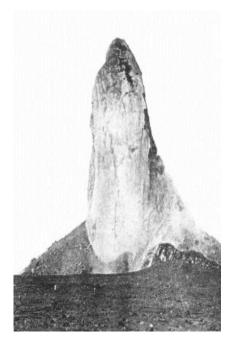




Figure 2 : origine des tsunamis (planet-terre.ens-lyon.fr)

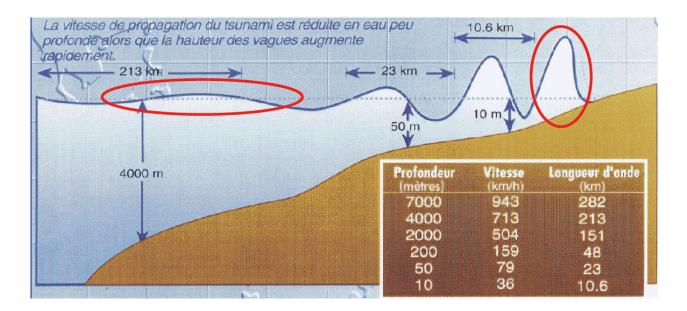


Figure 3 : caractérisation des éruptions volcaniques : échelle VEI

Degrés VEI	Description qualitative	Hauteur de la colonne éruptive en kilomètre	Ordre de grandeur du volume de débris émis en m³	Périodicité	Type d'éruption	Exemple
0	Non explosive	< 0,1	10³	Quotidienne	Hawaïenne	Kilauea (actuel, Hawaï Etat Unis)
1	Faible	0,1 à 1	10 ⁴	Quotidienne	Hawaïenne Strombolienne	Stromboli (actuel, îles Eoliennes Italie
2	Importante	1 à 5	10 ⁶	Hebdomadaire	Strombolienne Vulcanienne	Galeras (1992, Colombie)
3	Très importante	3 à 15	10 ⁷	Annuelle	Vulcanienne Péléenne	Nevado del Ruiz (1985, Colombie)
4	Cataclysmique	10 à 25	10 ⁸	Tous les 10 ans	Péléenne Plinienne	Montagne Pélée (1902, Martinique)
5	Paroxystique	> 25	10 ⁹	Tous les 100 ans	Plinienne	Mont Saint Hélène (1981, Etats Unis)
6	Colossale	> 25	1010	Tous les 100 ans	Plinienne Ultra-Plinienne	Pinatubo (1991, Philippines)
7	Super-colossale	> 25	1011	Tous les 1 000 ans	Ultra-Plinienne	Tambora (1815, Indonésie)
8	Méga-colossale	> 25	1012	Tous les 10 000 ans	Ultra-Plinienne	Yellowstone (2 Ma, Etats Unis)

Figure 4 : bilan sur les aléas liés à la géodynamique externe et interne

Aléa	Exemple	Gestion du risque
ALEAS I	LIES A LA GEODYNAMIQUE EX	KTERNE
Glissement de terrain : une masse de terre ou de boue descend sur une pente	2001 : La clapière (→ figure 7) 2006, Philippines : une coulée de boue traverse un village fragile	Ecrans anti-racines, maîtrise des eaux pluviales, chaînage des structures, stabilisation de talus
Eboulement :	dans l'Est du pays, 1000 morts. Septembre 2008, Le Caire : 119	instables, injection de béton Vice-gouverneur du Caire
désolidarisation soudaine et brutale d'une structure avec chute des matériaux.	,	condamné pour négligence. Grillage, filet pare pierres, murs de protection
Tempête : phénomène météorologique violent caractérisé par des vents rapides et des précipitations intenses.	Tempête Xynthia (2010, Europe de l'Ouest) : montée des eaux exceptionnelle, 59 morts, beaucoup de dégâts matériels	Annonce par une bonne prévision météo pour diffusion d'une alerte et de consignes avant, pendant et après la tempête. Simulations et
Cyclone: phénomène météorologique de rotation de l'air atmosphérique autour d'un centre de basse pression local.	2005, Mississippi, Louisiane : cyclone Katrina. 1800 morts, milliards de dollars de dégâts. Nouvelle-Orléans, les digues ont cédé, 80% de la ville inondée.	exercices d'évacuation dans les zones à fort enjeu. Aménagement adapté du territoire côtier. Réseaux électriques enterrés et isolés de l'eau, restauration de forêts
Tornade : tourbillon de vents violents à la base d'un nuage d'orage sur un corridor (100 m large x km de long)	Pouvoir destructeur supérieur aux cyclones par m², mais étendue limitée. 300 décès par an, dont 150 aux Etats-Unis.	littorales, construction de digues, d'abris souterrains et de zones refuges, abris anti-tornades individuels et collectifs
Inondation: débordement d'un cours d'eau en crue qui submerge les terrains voisins	Un des aléas les plus dangereux et en augmentation à cause du réchauffement climatique, surtout dans les zones très peuplées et de faible altitude exposées à d'autres aléas (tempêtes, subsidence).	Limitation drainage, irrigation, imperméabilisation et dégradation des sols, écluses, certaines pratiques agricoles intensives Non-urbanisation des zones inondables, digues, barrages

ALEAS LIES A LA GEODYNAMIQUE INTERNE

Séisme (tremblement de terre) : ébranlement brutal de la surface du globe, dû à l'arrivée d'ondes élastiques à la surface, issues de la libération brusque d'énergie accumulée suite au mouvement de deux blocs de lithosphère de part et d'autre d'une faille active.

La faille décrochante de San Andreas, en Californie, limite des plaques Pacifique et l'Amérique (San Francisco, Los Angeles): séismes dévastateurs. Phénomène géologique le plus étudié du monde: mesure des microdéplacements, prédiction des séismes... Surveillance des failles, normes de constructions parasismiques : étude préalable des sols, constructions symétriques, cahier des charges, renforcement et surveillance des bâtiments, joints d'amortissement... Tokyo Sky Tree, 2ème + grande tour au monde, a très bien résisté en mars 2011 (magnitude 9).

Eruption volcanique:

émission par un volcan de laves, gaz, poussières et projections diverses Aout 79 : destruction de Pompéi au pied du Vésuve. Réunion : éruptions très fréquentes du Piton de la fournaise. Coulée 2003 : 1 mort, qui prenait des photos...

Surveillance, veille, prévision, recherche et alerte. Trémors annonciateurs, prévision des villages à évacuer. Coulée 2007 : dégâts matériels, aucun décès!

Tsunami:

onde océanique, immense vague généralement provoquée par un séisme ou éruption volcanique, qui devient déferlante et destructrice au contact du rivage. Mars 2011, Japon : 23 500 morts, séisme de magnitude 9,0 qui déclenche un tsunami d'une hauteur de 20 m qui ravage des centaines de kilomètres de côtes au nord de Tokyo. Une vague de 14 m frappe la centrale nucléaire de Fukushima.

Surveillance, prévention, alerte.
S'éloigner des côtes, atteindre un promontoire ou un abri. Capteurs de pression et sondes au large.
Centre d'alerte des tsunamis du Pacifique (Hawaï). Sécurisation des habitats, normes de construction côtières, entretien des barrières naturelles et artificielles.
Sensibilisation.

Figure 5: Ouragan Maria, septembre 2017

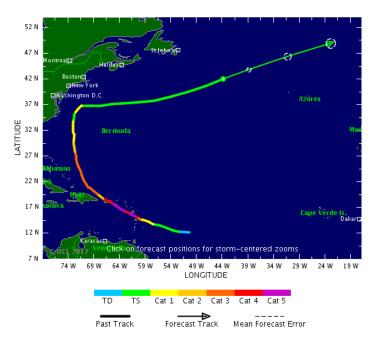
Maria est un ouragan de catégorie 5 : il est passé au niveau de la Martinique, la Dominique et la Guadeloupe avec des vents atteignant 280km/h. Il a poursuivi sa route en passant par les Iles Vierges et Porto Rico (20-21 septembre) avec des vents atteignant 190 km/h.





L'île de Puerto Rico a été ravagée par l'ouragan Maria - 21 septembre 2017 - HECTOR RETAMAL / AFP

Trajet de l'ouragan



Bilan du passage de cet ouragan

(http://www.meteo-paris.com/actualites/bilan-de-l-ouragan-maria-entre-antilles-et-porto-rico-22-septembre-2017.html)

Malgré de fortes pluies ainsi que des rafales dépassant en pointe les 120km/h sur le nord de l'ile, la **Martinique** parvient à rester à l'écart des conditions les plus extrêmes. Une situation bien plus contrastée pour la **Guadeloupe**, et notamment les îles des Saintes passant plus proche du mur de l'oeil, avec des rafales ayant potentiellement dépassé les 200km/h, provoquant de nombreux dégâts, et plongeant 40% de la population dans le noir. Le bilan humain, bien que plus limité qu'en Dominique, fait tout de même état de deux morts, deux disparus et de nombreux blessés.

A Porto Rico, La totalité des 3 millions et demi d'habitants du territoire est coupée d'électricité, le retour à la normale étant envisagé seulement sous « 4 à 6 mois » dans certains secteurs de la ville selon le maire Carmen Yulín. En plus des rafales tempétueuses, les précipitations abondantes ont provoqué de grosses inondations (jusqu'à 962mm relevés à Caguas, soit 2/3 du cumul annuel moyen). Le bilan fait état de 15 morts et de plusieurs disparus.

Les diverses **prévisions** émises à partir des multiples modèles numériques restent toutefois modérées par rapport à Irma, puisque Maria devait atteindre la partie Nord des Antilles en tant qu'ouragan de catégorie 1, voire 2 (rafales autour de 150 à 160km/h). Mais malheureusement, rien ne se passe comme prévu. L'ouragan fini par s'intensifier de façon incroyablement rapide et inattendue, bien au delà de toutes les modélisations précédentes. La pression au niveau de l'oeil chute de manière spectaculaire (-38hPa en une demijournée) et les vents atteignent des valeurs remarquables. En soirée du 18 septembre, alors que Maria n'a pas encore traversé l'arc Antillais, l'ouragan atteint le stade d'ouragan majeur, avant d'être classé officiellement en ouragan de catégorie maximale (5/5) contre toute attente, bien au delà de toutes les prévisions initiales.

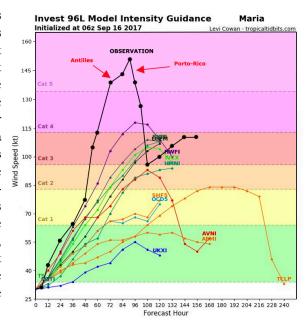


Figure 6 : Répartition des tornades aux Etats-Unis sur la période 1950-1998.

http://fr.wikipedia.org/wiki/Tornado_Alley (source : FEMA, Federal emergency management agency, USA)

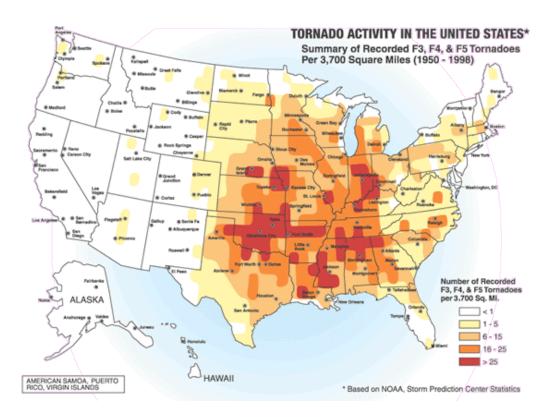
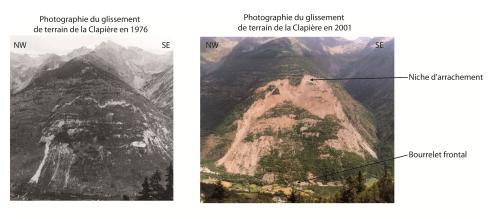
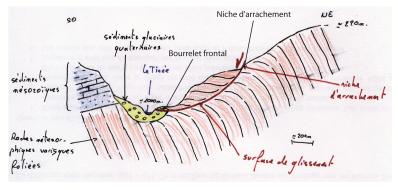


Figure 7a : Glissement de terrain de La Clapière, 2001 Images à voir sur http://patrick.murris.com/articles/la_clapiere.htm



Coupe schématique à travers le glissement de terrain de la Clapière



Clapière : le glissement le plus "rapide" d'Europe

Sa vitesse est montée jusqu'à 10 cm par jour en septembre 87 et à plus de 20 cm en septembre dernier en certains points

La montagne de la Clapière, à Saint-Etienne-de-Tinée, est assurément la plus surveillée d'Europe. Des milliers de mesures sont effectuées quotidiennement par les géologues du laboratoire des Ponts et Chaussées de Nice (voir Nice-Matin du 12 janvier). On connaît les raisons d'une telle attention : la masse rocheuse est affectée, depuis plusieurs années, d'un inquiétant mouvement de glissement. Et 30 à 50 millions de m³ de roches menacent de barrer le fond de la vallée. Un phénomène géologique qui, par rapport à des incidents similaires en d'autres points de la planète, se distingue par les pointes de vitesse enregistrées.

se enregistrées. Une des explications étant que ce mouvement de grande ampleur est l'un des plus anciens: «Il est arrivé à maturité. En comparaison, le processus identique qui affecte le massif de la Séchilienne, à proximité de Grenoble, est rela-

Séchilienne, à proximité de Grenoble, est rela-tivement jeune».

Cette vitesse varie à la fois dans le temps et l'espace. Dans l'espace : la chute est plus rapi-de dans la partie haute que dans la partie basse.

Dans le temps : la célérité fluctue en fonction de la pluviosité et des circulations d'eau sou-terraine alimentées par les pluies et la fonte des neiges.

Des pointes au printemps et à l'automne

et à l'automne
C'est ainsi que l'on constate tous les ans des spointes» au printemps et à l'automne. Quelques exemples de ces variations saisonnières parfois spectaculaires: durant tout le mois de septembre 1987, la montagne a avancé de 10 cm par jour, dans la partie haute. Une durée assez exceptionnelle à un tel rythme, qui s'explique notamment par des cassures survenues à l'intérieur du glissoment. Après ce spic», on a assisté à une très nette décélération. Mais un nouveau sommet est atteint en septembre 94, où, en certains points, on enregistre une vitesse de glissement de 20

attent en septembre 94, ou en certains points, on enregistre une vitesse de glissement de 20 cm par jour ! Un record. Nouveile alerte en novembre dernier, après les pluies diluviennes qui se sont abattues sur la région au début du mois.

région au début du mois.
«Aujourd'hui, nous sommes à la fin d'une accé-lération saisonnière, sur une voie descendan-te, avec 5,5 cm par jour dans la partie haute», soulignent les géologues des Ponts et Chaussées. Au total, la vitesse moyenne jour-nalière s'est élevée, pour l'année 94, à 3,8cm dans la partie haute, à 2,2 cm dans la partie moyenne et à 1,5 cm dans la partie basse L'évolution est-elle lourde de menaces? «Les chiffres de vitesse peuvent paraître impres-sionnants et donner le sentiment que le péril est imminent. Mais il faut savoir que même si la montagne se mettait à avancer de 10 cm

la montagne se mettait à avancer de 10 cm par... heure, il n'y aurait pas de catastrophe. Le vrai danger réside dans un éboulement sou-



sont analysées au labo des Ponts et Chaussées de Nice (Photo Richard Ray)

Toujours un mystère

Pour les spécialistes, le scénario le plus pro-bable est le suivant: pas de «big bang» mais un affaissement progressif. Et au stade ultime de l'évolution : un énorme tas de cailloux finide l'évolution : un énorme tas de cailloux fini-rait par combler le lit de la Tinée. En douceur, La galerie de déviation de la rivière qui a été aménagée pour faire face à cette éventualité serait alors mise en fonction afin d'éviter la for-mation d'un barrage. Scénario rassurant. Si tel n'était pas le cas, si la Clapière s'écrou-lait en quelques minutes voire secondes, les spécialistes assurent avoir mis en place un sys-tème de contrôle suffisamment fiable pour déceler tout prémice d'un glissement brutal, Et disposer d'un délai pour avertir la popula-tion.

tion. Mais en dépit d'investigations savantes, la montagne de la Tinée garde toujours son mystère et les scientifiques reconnaissent ne pas pouvoir prédire l'avenir: «C'est un phénomène géologique relativement rare sur notre planète. Nous manquons de référence pour raisonne par analogie et établir une doctrine définitive». C'est pour tenter de mieux percer l'énigme de ces mouvements naturels qu'un programme de recherche franco-italien a été récemment lancé. Avec l'étude de quatre cas d'école : Rosone dans le Grand Paradis et le Val de Suza our l'Italie, la Séchilienne et la Clapière pour la France.

Philippe FIAMMETTI

Figure 7b : Glissement de terrain en Sierra Leone 2017

http://www.lemonde.fr/afrique/article/2017/08/16/en-deuil-la-sierra-leone-a-la-recherche-



Image satellite de la coulée de boue, à Freetown.

Dans la nuit de dimanche à lundi 14 août 2017, la Sierra Leone a connu l'une des pires catastrophes de son histoire. Plus de 400 personnes sont mortes à Freetown, la capitale, dans les inondations et les glissements de terrain causés par trois jours de pluies torrentielles.



Figure 7c : Glissement de terrain au Japon suite à un séisme : lien entre géodynamiques externe et interne (septembre 2018)

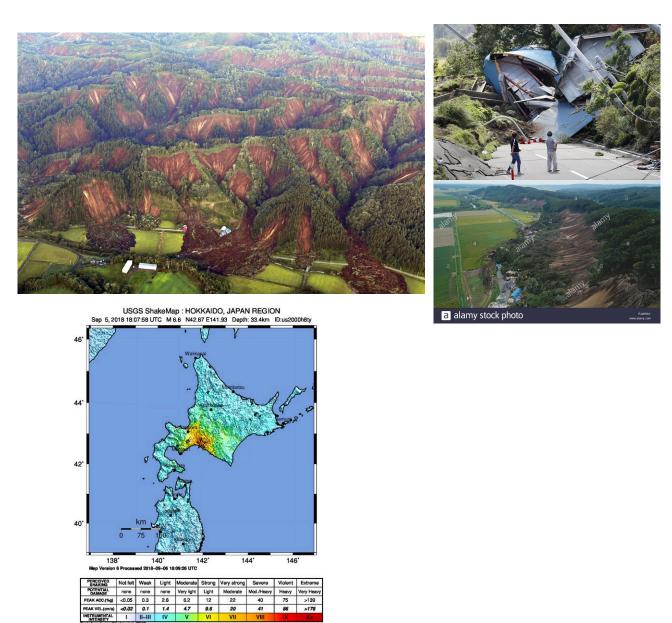
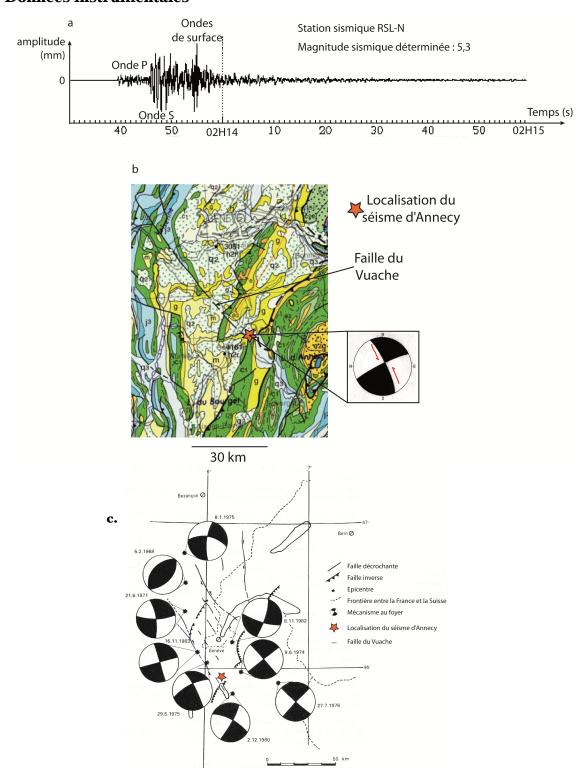


Figure 8 : éboulement en suisse (août 2017)



Figure 9a: séisme d'Annecy du 15-07-1996

a. Données instrumentales



En a exemple de sismogramme enregistré à la station RSL (Roselend Beaufort sur Doron, en Savoie, Rhône Alpes) par le sismomètre horizontal orienté Nord – Sud.

En b localisation du séisme d'Annecy sur un extrait de la carte géologique de France et mécanisme au foyer associé.

En c, sismicité instrumentale enregistrée dans la région d'Annecy entre 1968 et 1983. (Source BRGM)

Figure 9b: séisme d'Annecy du 15-07-1996

b. Données historiques

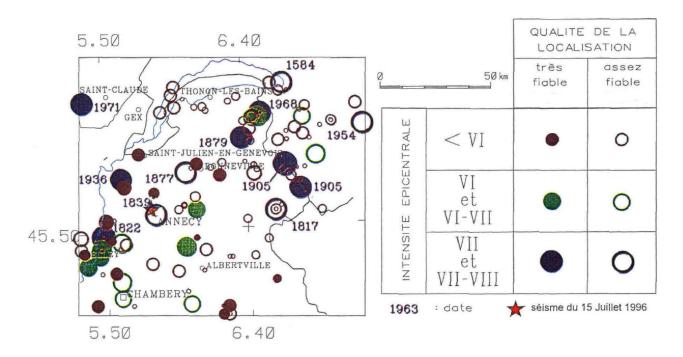


Figure 10 : Sismicité historique et instrumentale, récurrence et prévision d'un séisme sur la faille de Parkfield (Californie).

Les traits noirs indiquent les déplacements mesurés ou déduits pour les séismes ayant eu lieu. A partir de ces données la récurrence (ligne pointillée bleue) peut être déterminée. Ici, le séisme type revient environ tous les 20 ans. A partir de ces données un séisme a été prévu pour 1998. Il n'a pas encore eu lieu ce qui signifie que le prochain séisme aura une magnitude supérieure à celle du séisme type.

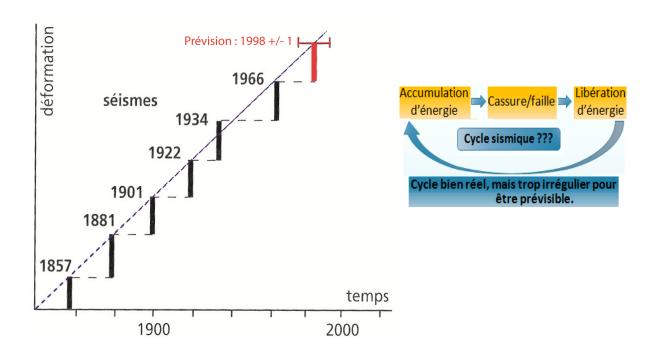


Figure 11 : carte de l'aléa sismique en France

Carte établie à partir des données de sismicité historique, instrumentale et tectonique. Elle représente la probabilité qu'un séisme de magnitude donné ait lieu à un endroit donné sur une période de 475 ans.

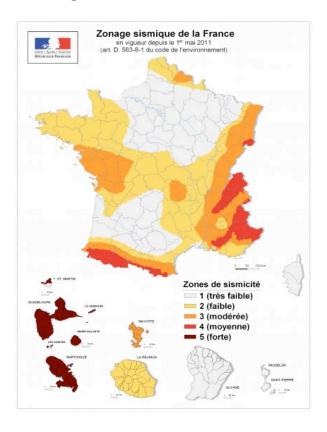


Figure 12 : Probabilité d'occurrence d'un séisme aux alentours de la faille de San Andreas en Californie

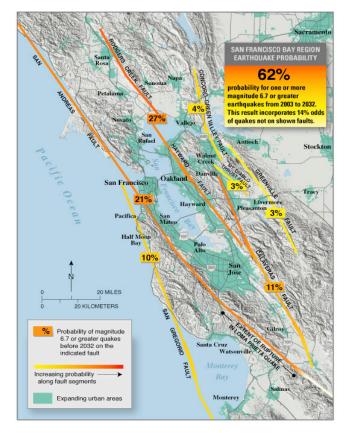


Figure 13 : Surveillance du Mont Agung (Bali, Indonésie)

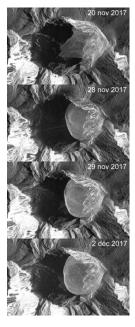
http://www.ipgp.fr/fr/eruption-volcan-agung-indonesie

Le volcan Agung est un <u>stratovolcan situé au nord-est de l'île de Bali</u>, dans l'ouest de l'arc volcanique des Petites Iles de la Sonde en Indonésie, dans un contexte tectonique résultant de la subduction vers le nord de la plaque Indo-Australienne sous la plaque Eurasienne avec un taux de convergence d'environ 7 cm par an. Les flancs escarpés et symétriques de l'Agung culminent à 3142 m au cœur d'une <u>région densément peuplée</u> et intensément cultivée.

Au cours des <u>derniers 10 000</u>, ans son activité est largement dominée par des **éruptions explosives** qui produisent des retombées de cendres et de scories, ainsi que des coulées de boues. L'<u>éruption de 1963</u> (0,4 km3 de magma érupté) a été une des éruptions les plus significatives du 20ème siècle de part son explosivité (indice d'explosivité $VEI \ge 4$) et de par l'impact climatique à court-terme qu'elle a engendré (baisse globale entre 0,1 et 0,4 °C) suite à l'émission d'environ 6,5 Mt de SO_2 dans la stratosphère. Les écoulements pyroclastiques et les coulées de boue de l'éruption de 1963 ont fait 1100 morts.

Ayant enregistré une nette <u>augmentation</u> de la sismicité volcanique au dessus du niveau de base à partir du 10 août 2017, le CVGHM (Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation) a augmenté le niveau d'alerte au stade 2 sur une échelle de 4 et recommandé une zone d'exclusion de 3 km autour du sommet. En septembre, l'augmentation de l'activité sismique et l'apparition de nouvelles fumerolles dans le cratère ont engendré une augmentation du niveau d'alerte au stade 3 puis 4 et l'extension de la zone d'exclusion à une distance de 6 à 7,5 km selon les directions. Au cours du mois d'octobre le CVGHM a également enregistré une anomalie thermique ainsi que des déformations des flancs du volcan indiquant la probable intrusion à faible profondeur de magma dans l'édifice de l'Agung. Après la baisse significative de l'activité sismique fin octobre, le CVGHM a redescendu le niveau d'alerte à 3 le 29 octobre. Une première explosion phréatique a eu lieu le 21 novembre. Depuis le 25 novembre l'Agung émet un panache continu de cendres et une quantité importante de dioxide de soufre (SO2) qui atteignent plusieurs kilomètres d'altitude et perturbent le trafic aérien engendrant des fermetures temporaires d'aéroports. Une <u>incandescence</u> visible la nuit au sommet depuis le 25 novembre suggère la présence probable de magma à très faible profondeur voire à l'intérieur du cratère sous forme de coulée(s) de lave. Les pluies engendrent les premières coulées de boue. Fin octobre, près de 134 000 personnes avaient été évacuées préventivement (rapport CVGHM). Depuis le 25 novembre, l'alerte est passée au niveau 4.

Images radar haute résolution du sommet de l'Agung obtenues par le satellite italien COSMO-SkyMed : les images d'amplitude du 28 novembre au 2 décembre 2017 montrent clairement un écoulement visqueux de lave qui progresse et remplit partiellement le cratère sommital





Information/ prévention sur le site de l'ambassade française



Figure 14: Mine de cuivre Kennecott, Utah, USA. La plus grande mine au monde



Figure 15 : les matériaux : des ressources locales diversifiées

Figure 15.a : le Comblanchien, un exemple de calcaire de lagon

Faciès du Bathonien supérieur (étage du Dogger = Jurassique moyen) décrit en **Bourgogne** (la ville de Comblanchien se situe près de Beaunes).

La roche est un calcaire fin (micrite) contenant des terriers, des fossiles comme des Polypiers, Mollusques et Brachiopodes, des fentes de dessiccation indiquant des émersions épisodiques.

Le comblanchien est entouré d'un faciès à oolithes.



Carrières de Comblanchien, vue du ciel à gauche et montrant les niveaux exploités à la base à droite. Le Comblanchien fracturé au dessus (blanc), la pierre de Corton (brune) et les marnes bleues calloviennes



Pont de Tolbiac à Paris en Comblanchien.

Figure 15.b : diversité des matériaux utilisés











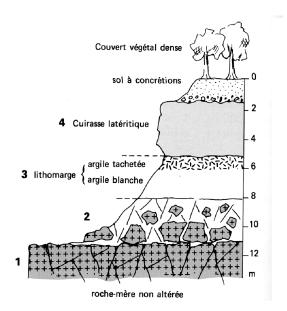


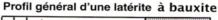
© Véronique CHABIN

Figure 16 : exploitation de la latérite

De bas en haut, on trouve:

- 1) le granite **sain** non altéré.
- 2) Un granite dissocié, peu cohérent proche du faciès **arénitique** (arène à blocs). L'hydrolyse est restreinte, seule la désagrégation mécanique est importante.
- 3) Des horizons à dominante **argileuse** (lithomarge) conservant l'architecture originelle du granite. Les feldspaths moyennement altérés ont donné des minéraux argileux tels que la kaolinite. Leur sommet argileux est **tacheté** par des hydroxydes de fer (= goethite),
- 4) Une **argile rouge** caractérisée par l'absence complète de Na₂O, CaO et K₂O, par un peu de kaolinite et une augmentation importante de Al(OH)₃ et Fe(OH)₃. Cet horizon forme la **cuirasse latéritique** et se caractérise par une **hydrolyse intense** des silicates. Au dessus de la cuirasse, le sol renferme des concrétions siliceuses.



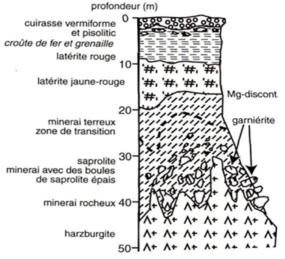


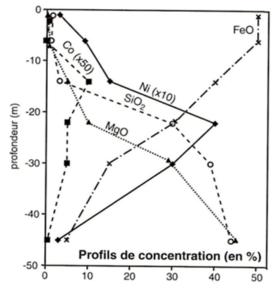
		_		
	he	sol grenaille de latérite de Fer cuirasse latéritique résiduelle		ation
9		(matrice de kaolinite)		ment
Régolithe Pédolithe	lional	zone de transition principalement kaolinite et goethite (fabrique primaire détruite)		front de cimentation
	Sapionie	> 20 % des minéraux solubles altérés (fabrique primaire préservée)		ront d'altération
		< 20 % des minéraux solubles altérés		front d'a
ro	ct	ne mère non altérée	******	

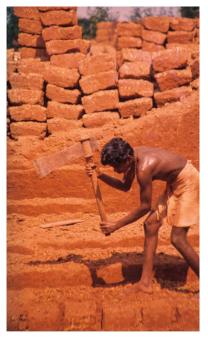
composition chimique, répertoriée en oxydes, est exprimée en grammes pour 100 cm³. La composition minéralogique est exprimée en pourcentage.

Niveaux	1	2	3	4
SiO ₂	184,5	159,9	148,6	140,6
Al ₂ O ₃	43,9	55,6	61,3	67,1
Fe ₂ O ₃	6,3	5,0	5,0	9,5
MgO	2,5	0,2	0	0
CaO	2,5	0,9	0,3	0
Na ₂ O	9,6	3,4	1,0	0
K ₂ O	14,6	10,1	6,9	5,6
H ₂ O	2,3	12,2	17,2	22,0
Kaolinite Al ₄ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈	-	28,8	44,4	46,4
Gibbsite Al(OH) ₃	-	-	-	4,0
Goethite FeO OH	_	2,0	2.3	4.3

Profil d'une latérite de Nickel







Fabrication de briques à partir de latérite (Inde) wikipedia



Latérite à Madagascar



Minerai de Nickel en Nouvelle Calédonie (30% du Nickel mondial)



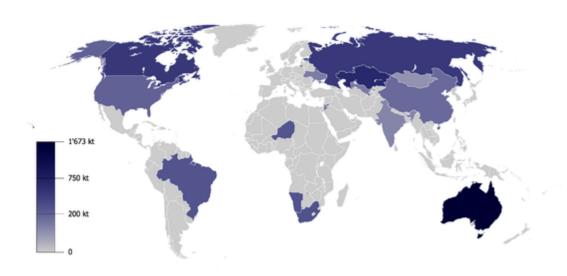
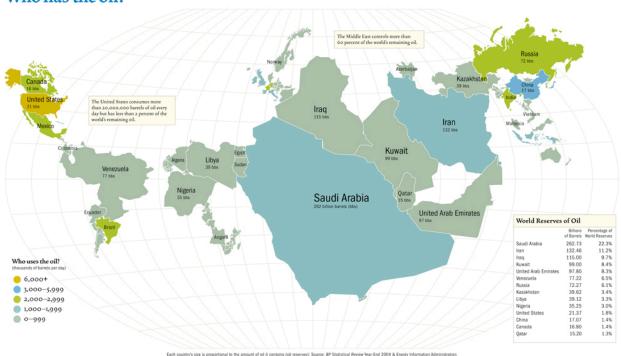


Figure 18 : Qui a le pétrole ? La superficie des pays est ici proportionnelle à leurs réserves avérées (2004)





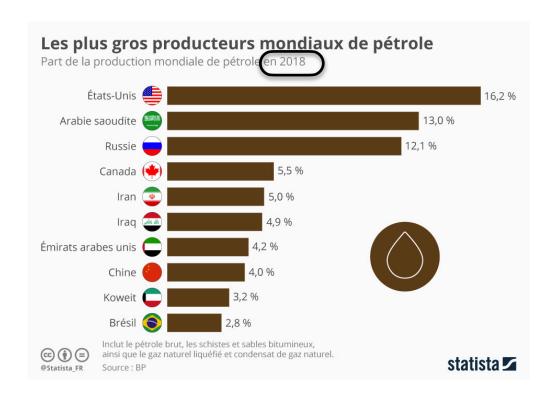


Figure 19 : Le gaz de schiste (shale gas) en 4 questions

(d'après planet-terre.ens-lyon.fr)

1. Qu'est-ce que le gaz de schiste?

Le gaz de schiste est du **méthane** contenu dans des roches sédimentaires argileuses (roche mère) très compactes et très **imperméables** comme les *black shale* ou marnes noires. Le méthane est contenu dans des pores qui ne communiquent pas entre eux d'où l'absence de migration du gaz et sa présence dans la roche mère qui est aussi une roche magasin. La roche peut contenir jusqu'à 20m³ de gaz par m³ de roche (à 1 atmo et à 20°C). Cette imperméabilité ne permet cependant pas une exploitation avec les modes de production classiques : ce gaz fait partie des **gaz non conventionnels** (comme le gaz de charbon par ex).

Remarque: le gaz conventionnel résulte de la dégradation de la matière organique présente dans une roche mère perméable. Le gaz migre vers le haut jusqu'à la surface ou jusqu'à un piège (couche imperméable située au dessus d'une couche perméable = roche magasin). L'exploitation dans ce cas nécessite uniquement forage vertical, al roche magasin étant perméable.

2. Comment ce gaz est-il exploité?

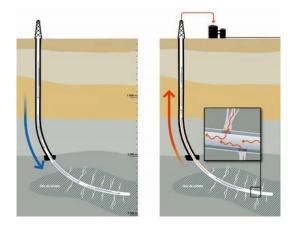
L'exploitation repose sur une **fracturation hydraulique** de la roche couplée à des **forages horizontaux**. Les forages se font en général entre **1,5 et 3 km de profondeur**. Ils sont **verticaux** jusqu'à la roche mère puis se poursuivent **horizontalement** de manière à suivre la couche. Au niveau du forage sont injectés :

- de **l'eau** à haute pression (>P lithostatique) qui permet de fracturer la roche de façon à libérer l gaz
- du sable qui s'insinue dans les fractures formées et les maintient ouvertes
- des **additifs** (gomme de guar, Méthanol, Isopropanol, Monohydrate de nitrilotriacetate de trisoleum, Hypochlorite de sodium, Isopropanol, Polyacrylamide, Trimethyl-octadecylammonium Sodium, Xylene Suphonate par ex) qui permettent une bonne mobilisation du sable dans l'eau, évitent la précipitation d'oxydes, de carbonates etc... **Quantité maximale autorisée <1%**

Une fois la roche fracturée, et après sous tirage d'une partie de l'eau injectée, le gaz remonte le long du puit et est stocké ou évacué par gazoduc.

Le tubage de la partie verticale est renforcé pour éviter les fuites (d'eau et de gaz) vers les terrains et aquifères de surface (= nappes phréatiques).

Pour optimiser l'exploitation, deux forages dans les deux sens d'une même direction peuvent être réalisés à partir d'un même puit vertical.



3. Quels en sont les avantages et inconvénients?

A. Les avantages

- Moins de CO2 produit : à kilowatts-heures produits égaux, le gaz naturel produit moins de CO₂ que le charbon (2 fois moins) ou le pétrole (15% en moins). D'autre part, les gaz de schistes permettent une production locale, évitant un transport coûteux en énergie (et donc en CO₂).
- Indépendance énergétique : cette exploitation pourrait participer à l'indépendance énergétique des pays producteurs, dont potentiellement la France (à ce jour, 98% du gaz consommé en France est importé). En France, les réserves locales équivaudraient à plusieurs dizaines d'années de consommation, ce qui permettrait de contrebalancer la diminution des réserves en pétrole.

2. Les inconvénients

• Dégradation des écosystèmes et des paysages

La technique des puits verticaux suivis de forages horizontaux ne permettra d'exploiter ce gaz de schiste que sur quelques km2 au maximum autour de chaque puits. Typiquement, pour exploiter complètement une couche horizontale, il faudrait un puits tous les 0,5 à 4 km.

Après la période de forage et pendant toute la période d'exploitation, chaque tête de puits occupe plusieurs dizaines de m2 (l'équivalent d'une grange) au centre d'une surface « réservée » d'environ 1/3 d'hectare. Tout un réseau de pistes devra relier entre eux tous ces puits pendant la période de forage pour permettre le passages d'engins et camions, et après, pendant la phase d'exploitation, si le gaz est évacué par citernes. Si le gaz est évacué par gazoduc, c'est tout un réseau de gazoducs à construire pour relier tous ces puits d'abord entre eux puis et à un centre d'évacuation sur le réseau national.

• Dégradation et pollution des écosystèmes superficiels

Le forage et la fracturation hydraulique en particulier, nécessitent d'énormes quantités d'eau (on cite classiquement les chiffres de 10 000 à 15 000 m³ par forage). Cette eau est injectée dans le forage. L'eau soutirée est salée et boueuse. Elle peut être réinjectée dans des puits très profonds ou au contraire traitée et recyclée en surface. Elle est alors débarrassée de ses particules, puis ré-injectée dans les puits. Cette eau peut également renfermer certains des produits indésirables contenus initialement dans les **additifs** utilisés pour la fracturation (détergents etc...). Désormais la plupart des états aux Etats-Unis et beaucoup de pays exigent de connaître la composition des additifs.

• Pollution des aquifères profonds

Le principe même de la fracturation hydraulique est d'injecter de l'eau sous très haute pression, pression très largement supérieure à la pression lithostatique. Cette surpression est normalement accommodée par le tubage multiple et la cimentation du puits. Cependant, à la moindre fuite dans le tubage du puits entre le compresseur et la couche imperméable cible, de l'eau et ses additifs se dispersera irréversiblement dans les roches environnantes, avec tous les risques de pollutions des nappes phréatiques profondes que cela comporte. D'autre part, si une fracture provoquée sort de la roche imperméable, ou rejoint une faille qui avait échappé à la vigilance des géologues, d'énormes quantités d'eau polluée par les additifs se disperseront irréversiblement dans les roches environnantes, avec tous les risques de pollutions des nappes phréatiques profondes que cela comporte.

• Risques potentiels et accidents réels

Les risques de pollution, sont théoriquement évitables si toutes les précautions sont prises et respectées à 100%, si la technique de la fracturation hydraulique est parfaitement maîtrisée... Si ces risques sont évitables en théorie, le passé montre qu'ils ne sont pas virtuels et n'ont pas toujours été évités (pollutions de nappes phréatiques, des fuites de gaz vers les nappes phréatiques qui font que, parfois, l'eau du robinet s'enflamme chez des particuliers...)

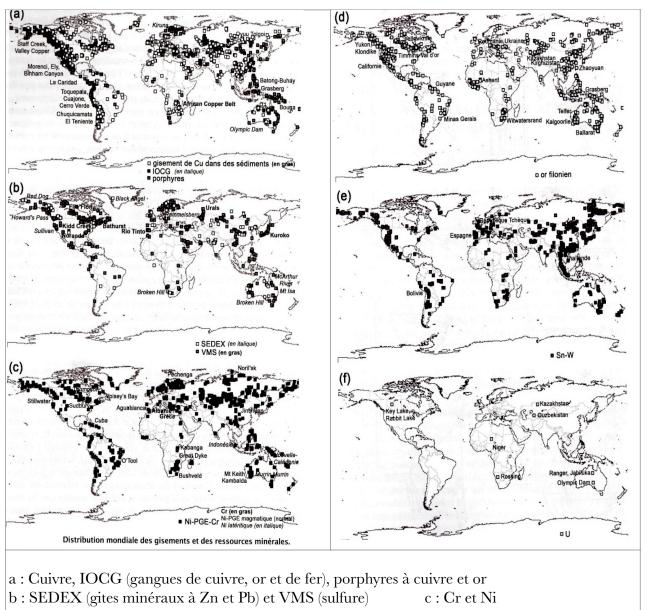
4. Quelles sont les exploitations actuelles ?

Les réserves mondiales seraient du même ordre de grandeur que les réserves de gaz conventionnel.

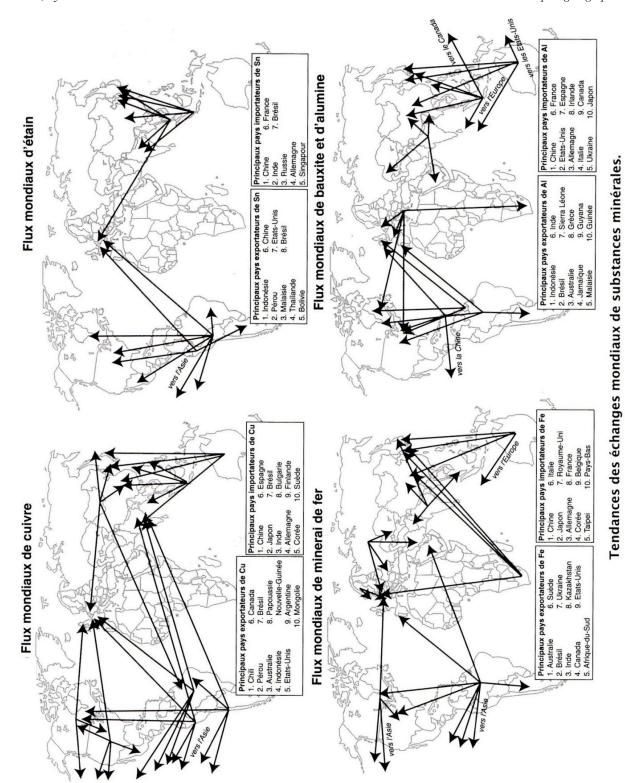
Ils sont aujourd'hui produits en grande quantité aux États-Unis où ils représentent 67 % de la production de gaz en 2017 contre seulement 1 % en 2000.

En France, en juin 2011, le Parlement votait une loi interdisant l'utilisation de la fracturation hydraulique pour l'exploitation du gaz de schiste. Loi validée par le Conseil constitutionnel en juillet 2013. En septembre 2017, la France interdit la recherche et l'exploitation des hydrocarbures conventionnels et non conventionnels (gaz de schistes, sables bitumineux).

Figure 20 : Diversité des ressources (liste non exhaustive) et inégalités locales dans les disponibilités



d : or filonien e : étain et tungstène f : uranium



22