

# Olympiades de géosciences 2018

**Métropole**

Épreuve écrite du 29 mars 2018

Durée de l'épreuve : 4 h

Le sujet se compose de trois exercices notés sur dix points chacun. Il comporte de nombreux documents, mais leur exploitation et les réponses attendues sont courtes.

La calculatrice n'est pas autorisée.

## Exercice 1 - Le poignard de Toutankhamon : terrestre ou extraterrestre ?

Toutankhamon est le onzième pharaon de la XVIII<sup>e</sup> dynastie. Il a régné entre 1333 et 1327 av. J.-C. (avant Jésus Christ). Il doit sa célébrité à la découverte de sa sépulture par l'archéologue britannique Howard Carter le 4 novembre 1922 et au fabuleux trésor qu'elle recèle. Ce trésor contient notamment un poignard exposé actuellement au musée égyptien du Caire (Égypte).

La lame de cette arme est composée de fer, rare dans les objets façonnés à cette époque. C'est pourquoi, depuis la découverte du trésor, de nombreuses études ont été réalisées afin de comprendre l'origine de ce poignard royal.

**À partir des documents proposés, déterminer l'origine probable du fer qui compose la lame du poignard de Toutankhamon.**

### Document 1 - Et si le trésor de Toutankhamon était en fer et pas en or !

Le travail du métal a joué un rôle si crucial dans l'évolution de la civilisation humaine que les historiens divisent traditionnellement l'Antiquité en âges « métalliques ». Ainsi on se réfère aux âges de cuivre, de bronze et de fer.

Il n'y a pas de transition bien marquée entre ces périodes. L'Égypte ancienne avait de grandes ressources minérales. Les vastes zones désertiques, en particulier le désert oriental, sont riches en mines et en carrières exploitées depuis l'Antiquité. Le cuivre, le bronze et l'or ont été utilisés depuis le IV<sup>e</sup> millénaire av. J.-C. Ceci étant, malgré l'importante présence de minerais de fer en Égypte ancienne, l'usage utilitaire du fer dans la vallée du Nil est plus tardif que dans les pays voisins. Les premiers usages sont datés du I<sup>er</sup> millénaire av. J.-C.

Le fer était considéré comme un métal extrêmement précieux pendant le règne de Toutankhamon et les Égyptiens n'avaient pas encore des techniques très perfectionnées pour le forger.

Ci-contre le poignard en fer (lame) et en or (manche et fourreau)

*Source : the meteoritical society « The meteoritic origin of Tutankhamun's iron dagger blade » 2016 Daniela Comelli et al.*



### Document 2 - L'origine du « fer terrestre »

Il existe plusieurs catégories de minerais de fer : des oxydes (hématite, magnétite), des hydroxydes (goethite, limonite) et des carbonates (sidérose). Les sulfures, dont les représentants principaux sont la pyrite, la marcassite et la pyrrhotine, ont une teneur élevée en fer (45-60 %) mais ils ne sont jamais utilisés directement pour la production du fer à cause de l'effet fragilisant du soufre sur les alliages ferreux.

Les êtres humains ont exploité en particulier deux types de gisements riches en minerais de fer.

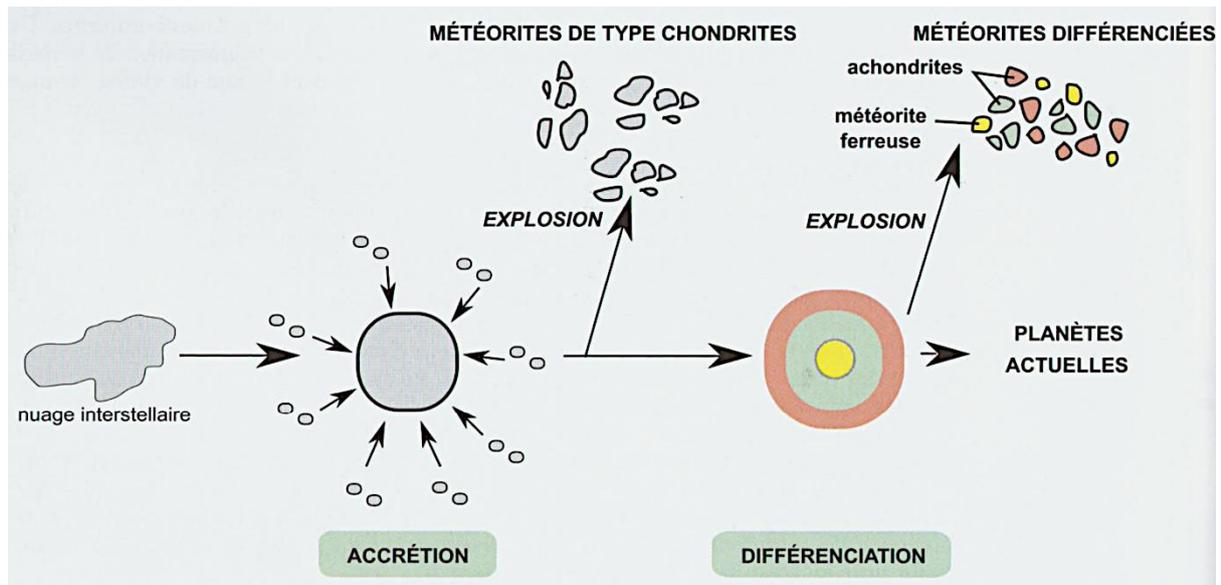
- La minette ou ironstone exploitée à travers l'Europe depuis le début de l'âge du fer, environ il y a 800 ans av. J.-C., dont la concentration typiquement autour de 30 % ne rend plus rentable son exploitation de nos jours.
- Les plus grands gisements de fer au monde se trouvent dans les roches sédimentaires recouvrant les cratons archéens au Brésil, en Australie, au Canada, en Afrique du Sud et en Russie. Les minerais exploités dans ces pays contiennent entre 55-65 % de fer. Ces gisements de fer se sont formés dans un environnement géologique très spécifique, pendant une période particulière de l'histoire de la Terre. Près de 90 % du minerai de fer est extrait des formations de fers rubanés, un type de sédiments formé par précipitation chimique dans l'eau de mer sur les plateformes continentales de faible profondeur, pendant le Protérozoïque âgé de - 2,5 à -1 Ga. Cette période de l'histoire de la Terre est marquée par une forte augmentation de la teneur en dioxygène de l'atmosphère et des océans, phénomène qui a entraîné la précipitation d'oxydes de fer dissous dans l'eau de mer.

*(In Ressources minérales Arndt et Ganino – Dunod 2010)*

### Document 3 - L'origine du « fer extraterrestre », les météorites ferreuses ou sidérites

La ceinture d'astéroïdes est un ensemble de matériaux d'une taille allant du grain de poussière à l'embryon de planète qui gravite sur une orbite située entre celles de Mars et de Jupiter. Ces matériaux proviennent de la matière non utilisée lors de l'édification des planètes. Les plus gros objets nommés « astéroïdes » ont été suffisamment chauffés pour fondre et se différencier en noyaux de fer et en enveloppes de **minéraux silicatés**\*. Les roches plus petites, agglomérées sans fusion et non différenciées ont conservé une composition voisine de celle des poussières **protosolaires**\*. La gravité très forte de Jupiter perturbe les orbites des roches et des astéroïdes qui entrent ainsi en collision et se fragmentent en débris. La trajectoire des débris éjectés de la ceinture d'astéroïdes peut recouper l'orbite de la Terre où ils s'écrasent : ce sont alors des météorites. Elles sont donc considérées comme des objets extraterrestres.

#### Modèle de formation des différentes météorites



BCPST 1<sup>o</sup> et 2<sup>o</sup> année, Géologie tout en un, P. Peycru et al. Dunod 2015

\***Protosolaire** : se dit de la nébuleuse dont la condensation a donné naissance au Soleil et au Système Solaire (*dictionnaire Larousse*)

\***Minéraux silicatés** : ce sont des minéraux fréquents dans les roches terrestres en particulier dans les croutes.

On recueille ainsi, à la surface de la Terre, trois types de météorites :

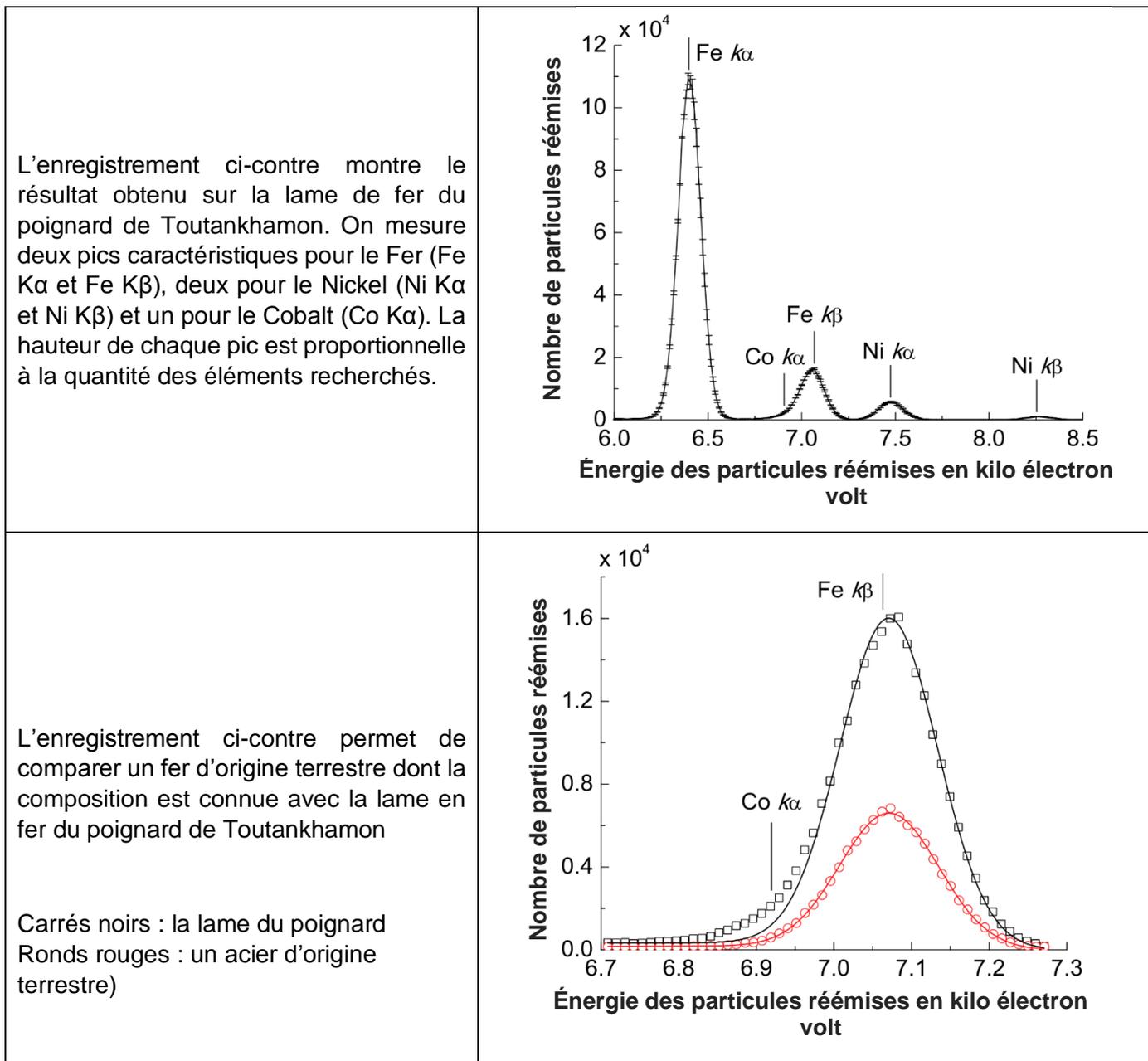
- **des chondrites** : ces météorites pierreuses caractérisées par des granules sphériques, les chondres, sont des fragments de cailloux non différenciés ;
- **des achondrites**, météorites pierreuses, qui sont des fragments de l'enveloppe des astéroïdes différenciés ;
- **des sidérites** ou *achondrites métalliques* ou *météorites ferreuses*, fragments des noyaux des astéroïdes différenciés formés principalement de fer.

**Document 4 - Une nouvelle technique, la spectrométrie de fluorescence des rayons X portable dite « XRF »**

**Document 4a – Principe de la technique**

L'origine de la lame de fer du poignard de Toutankhamon fait débat depuis de très nombreuses années. Est-elle d'origine terrestre ou extraterrestre ? Jusqu'à maintenant il n'y avait pas de technique à la fois suffisamment précise et non destructrice qui permettait d'avoir des analyses assez précises pour trancher.

Une nouvelle technique, la spectrométrie XRF portable, a permis d'obtenir de nouveaux résultats sans endommager la lame de fer et avec une plus grande précision. Elle utilise une propriété physique de la matière, la fluorescence de rayons X. Quand on bombarde de la matière avec des rayons X, les atomes réémettent de l'énergie sous différentes formes que l'on peut analyser. Le spectre de réémission est caractéristique de la composition de l'échantillon. On peut ainsi connaître de façon très précise les concentrations massiques en éléments sans prélèvements de matière sur les objets.



Source : The meteoritical society « The meteoritic origin of Tutankhamun's iron dagger blade" 2016. Daniela Comelli et al.

## Document 4b – Résultats obtenus : comparaison de la composition du poignard de Toutankhamon à des sidérites (météorites ferreuses) et à des aciers terrestres

Des mesures XRF ont été effectuées sur le poignard de Toutankhamon, sur 11 météorites (sidérites) de composition bien connue et 11 matériaux de référence en acier certifiés. Les compositions réelles ont été obtenues par des méthodes qui détruisent partiellement l'échantillon.

La liste complète des échantillons analysés est fournie dans le tableau ci-dessous.

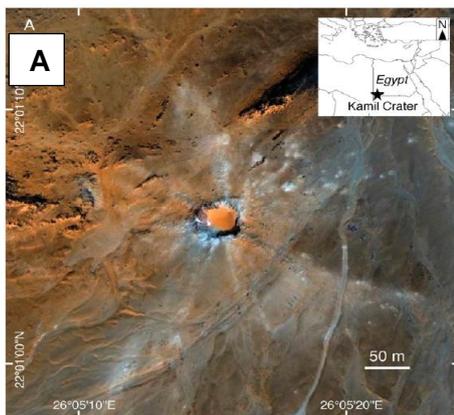
	Nom de l'échantillon	Nombre de points de mesures	% réel en Ni (Nickel)	% réel en Co (Cobalt)	Mesures XRF pour le Ni (Nickel)	Mesures XRF pour le Co (Cobalt)
<b>Météorites ferreuses</b>	Campo del Cielo	21	6,73	0,46	6,82 ± 0,35	0,52 ± 0,03
	Canyon Diabolo	32	6,93	0,47	7,09 ± 0,34	0,55 ± 0,04
	Chinga	20	16,5	0,58	15,17 ± 0,33	0,57 ± 0,04
	Dronino	12	9,81	0,55	9,83 ± 0,30	0,57 ± 0,04
	Gebel Kamil	17	20,60	0,76	20,68 ± 0,46	0,70 ± 0,05
	Gibeon	16	7,99	0,39	7,90 ± 0,33	0,43 ± 0,03
	Hoba	1	16,30	0,78	17,08 ± 0,36	0,69 ± 0,05
	North Chile	1	5,65	0,454	6,16 ± 0,36	0,51 ± 0,03
	NWA 5289	12	9,02	0,40	9,94 ± 0,30	0,41 ± 0,03
	Tambo Quemado	10	10,15	0,56	9,44 ± 0,31	0,50 ± 0,03
	Tres Castillos	7	9,23	0,51	8,57 ± 0,32	0,47 ± 0,03
<b>Aciers terrestres</b>	ARMI AISI 303	1	9,50	0,20	8,65 ± 0,32	0,10 ± 0,03
	NIST SRM 1262b	1	0,60	0,30	1,72 ± 0,48	0,36 ± 0,03
	NIST SRM 1158	1	36,10	0,01	4,57 ± 1,15	0,05 ± 0,04
	SS-CRM 461/1	4	6,12	≈ 0	6,13 ± 0,36	0,04 ± 0,04
	SS-CRM 462/1	4	12,85	≈ 0	12,04 ± 0,30	0,04 ± 0,04
	SS-CRM 463/1	4	10,20	0,12	10,20 ± 0,30	0,07 ± 0,04
	SS-CRM 464/1	4	20,05	0,05	20,78 ± 0,48	- 0,01 ± 0,04
	SS-CRM 465/1	4	9,24	0,05	9,20 ± 0,31	0,04 ± 0,04
	SS-CRM 466/1	4	10,20	0,02	10,02 ± 0,30	0,01 ± 0,04
	SS-CRM 467/1	4	9,21	≈ 0	9,21 ± 0,31	0,02 ± 0,04
	SS-CRM 468/1	4	8,90	0,02	8,89 ± 0,31	0,02 ± 0,04
<b>Lame en fer du poignard de Toutankhamon</b>		2	?	?	10,85 ± 0,30	0,58 ± 0,04

Source: The meteoritical society « The meteoritic origin of Tutankhamun's iron dagger blade" 2016. Daniela Comelli et al.

## Document 5 - Une zone de récolte possible, le cratère Gebel Kamil, au sud de l'Égypte.

Le petit cratère Kamil de 45 mètres de diamètre a été découvert grâce à Google Earth par Vincenzo de Michèle, conservateur au Musée d'Histoire naturelle de Milan (photographie A). Une expédition scientifique dirigée par Luigi Folco a été organisée en 2009 pour l'étudier (photographies B et C). Cette structure a un âge inférieur à 5 000 ans. Autour du cratère Kamil, Luigi Folco et son équipe ont récolté près de 6 000 morceaux de météorites ferreuses (sidérites) pour un poids total de 1,7 tonne. Le plus gros pèse 83 kg (photographie D).

D'après leurs estimations, le bolide qui a creusé Kamil devait peser entre 5 et 10 tonnes ; c'était un bloc d'un peu plus d'un mètre de diamètre qui aurait heurté le sol à plus de 3 kilomètres par seconde.



*Falco et al., 2011. Kamil crater (Egypt) : Ground truth for small-scale meteorite impacts on Earth. Geology 39:179-182*

Les météorites sont une source possible de fer dans les artefacts archéologiques de l'Égypte pharaonique, le « fer du ciel » des anciens. L'apparition d'un mot pour les météorites (« fer du ciel ») en langue égyptienne suggère qu'une chute significative doit avoir été vue : peut-être Gebel Kamil, bien qu'il serait bon d'avoir une date précise pour la chute, probablement dans les 5 000 ans.

*Johnson et Tyldsley, 2013, Sighinolfi et al, 2015*

## Exercice 2 - Quand les volcans se mêlent du climat...

Le risque d'éruption d'un supervolcan fait fréquemment les gros titres des journaux, quand bien même les scientifiques estiment qu'il est très peu probable qu'une telle éruption ait lieu au cours du prochain millénaire.

### Le super-volcan du Yellowstone menace-t-il l'avenir de l'humanité ?

D'après "National Geographic", ce super-volcan pourrait se réveiller plus tôt que prévu et provoquer un "hiver volcanique" sur toute la planète.

PAR 6MEDIAS

Publié le 14/10/2017 par LePoint.fr

### North Sumatra's Mount Toba may erupt again, at any time

Apriadi Gunawan  
The Jakarta Post

Medan | Mon, November 4, 2013 | 03:41 pm

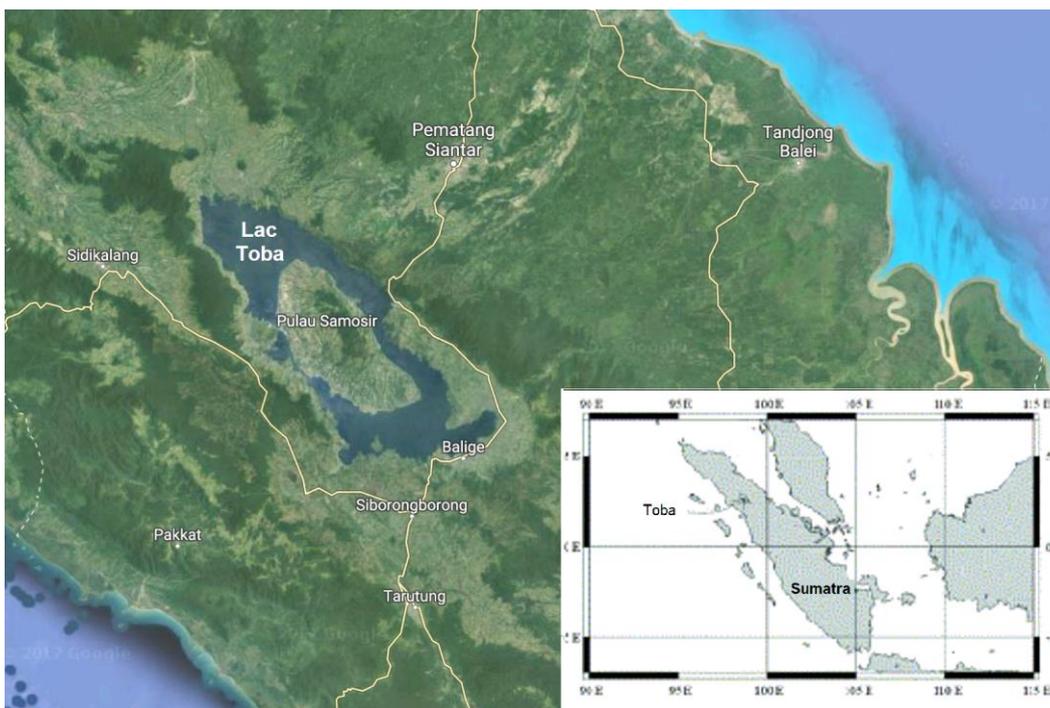
**Votre mission est de montrer, à partir de l'exemple du volcan Toba, comment une éruption volcanique majeure peut impacter le climat.**

- 1) Justifier, à partir des informations tirées des documents 1, 2 et 3, que le volcan Toba est un volcan à dynamique majoritairement explosive qui appartient à la catégorie des supervolcans.**
- 2) Justifier, à partir des informations tirées des documents 4 et 5, que l'éruption du volcan Toba, d'il y a 74 000 ans, est associée à des modifications du climat mondial.**
- 3) Expliquer, à partir des informations extraites de l'ensemble des documents, comment une éruption volcanique majeure, telle que celle de Toba il y a 74 000 ans, peut fortement impacter le climat mondial.**

### Document 1 - Le volcan Toba

#### Document 1a - Le lac Toba (vue satellitaire)

Le lac Toba actuel se situe en Indonésie, sur l'île de Sumatra. Au centre du lac se trouve une île constituée par un dôme de roches volcaniques. Sa profondeur moyenne est d'environ 500 m.



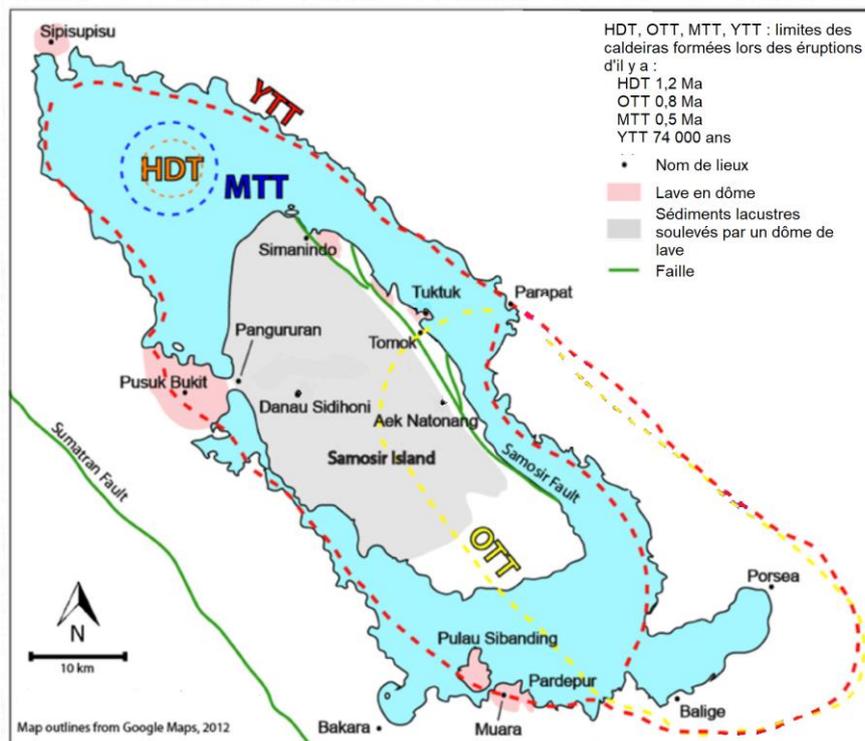
<https://forums.infoclimat.fr/> - GoogleEarth

## Document 1b - Les caldeiras du lac Toba

Une caldeira est un vaste cratère volcanique d'effondrement qui résulte de l'émission rapide d'un important volume de lave.

Le volcan Toba montre des traces de caldeiras successives (limites marquées par un trait en pointillés sur la carte ci-à-droite).

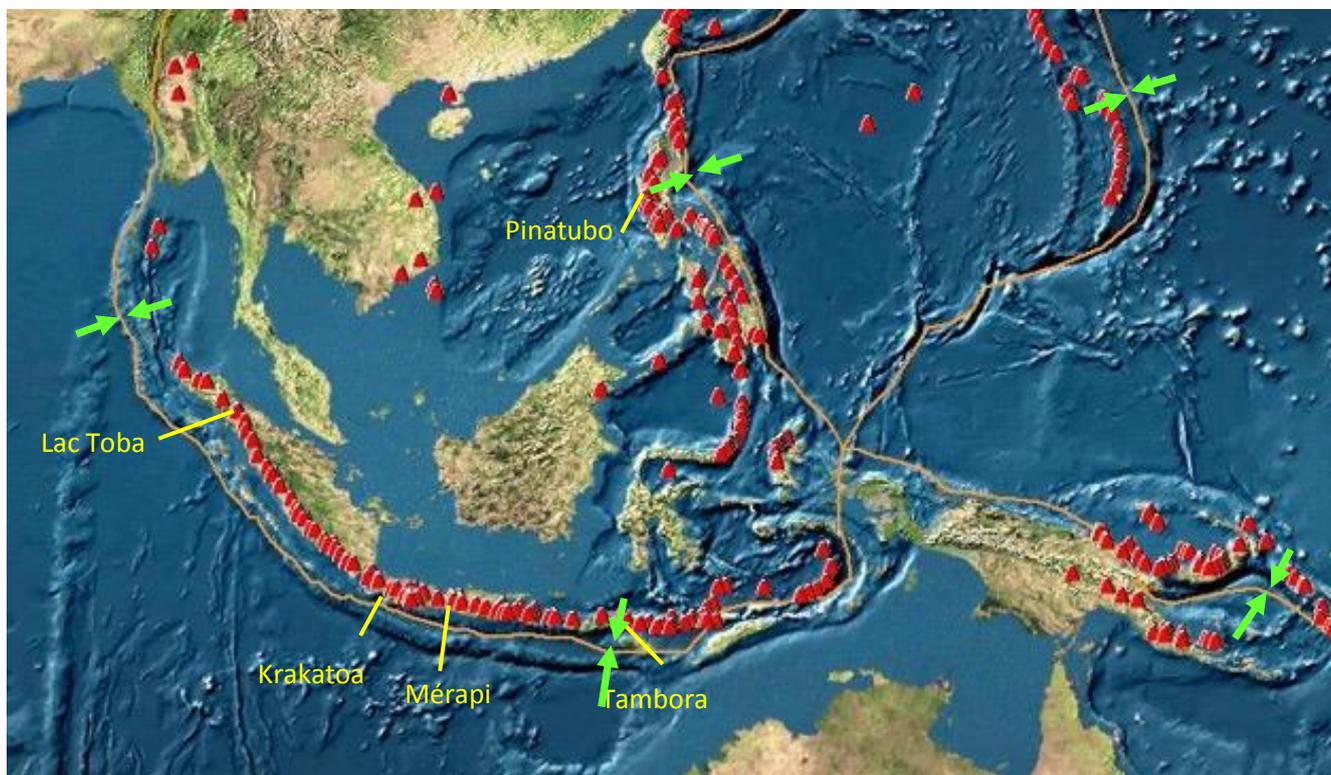
La dernière éruption a eu lieu il y a 74 000 ans. On estime la production de matériel pyroclastique\* laissé par cette dernière à près 3 fois le volume de la caldeira formée lors cette éruption, soit environ 2 800 km<sup>3</sup>.



\* fragments de roches solides expulsés dans l'air ou dans l'eau pendant l'éruption d'un volcan, provenant du magma lui-même ou de la roche encaissante.

*D'après Chesner et Rose (1991) et Chesner (2012)*

## Document 1c - Le contexte géologique



*Conçu avec le logiciel Sismolog*

▲ Volcan

↔ Mouvement relatif de convergence

↔ Limite de plaques tectoniques

↔ Mouvement relatif de divergence

## Document 2 - L'éruption du volcan Tambora (autre volcan indonésien) et ses conséquences

« Considéré comme un volcan éteint par les habitants de la région, le Tambora s'est réveillé lentement à partir de 1812. Le 5 avril 1815, une éruption débute et forme une colonne de cendres de plus de 30 km de hauteur. Cette activité persiste de façon intermittente jusqu'au soir du 10 avril. À 19 h ce jour-là, l'éruption majeure débute. Une seconde colonne se forme jusqu'à une altitude de 43 km, envoyant des quantités gigantesques de cendres dans l'atmosphère. Très rapidement, le conduit par lequel le magma est éjecté s'élargit, la teneur en eau du magma diminue et la colonne de cendres s'effondre sur elle-même, générant des coulées pyroclastiques qui recouvrent toute la région. La quantité de magma qui sort du volcan est tellement importante que le volcan s'effondre sur lui-même, perdant plus de 1 400 m d'altitude et laissant une caldeira de 6,5 km de diamètre et 1 000 m de profondeur. Cette phase paroxysmale de l'éruption dure à peine plus de 24 heures. L'arrivée des coulées pyroclastiques à la mer provoque des tsunamis qui déferlent sur les côtes des îles voisines et parcourent plusieurs centaines de kilomètres, affectant jusqu'à l'île de Java. D'immenses radeaux de ponces (roches volcaniques très légères) et de nombreux troncs d'arbres flottent sur l'océan.

[...]

Dès le premier été qui a suivi l'éruption du Tambora, des phénomènes étranges sont observés en Europe de l'Ouest. De nombreuses observations écrites font état, notamment dans le sud de l'Angleterre, d'une atmosphère brumeuse en permanence, filtrant une partie du rayonnement solaire, et ceci indépendamment des vents qui soufflaient au niveau du sol. La présence de produits volcaniques dans la haute atmosphère est bien sûr à l'origine de ce phénomène, immortalisé par le peintre anglais William Turner. L'année 1816 a été la plus froide depuis les 600 dernières années en Europe et en Amérique du Nord. L'histoire retient surtout la tempête qui a eu lieu, dans l'est des États-Unis, du 5 au 11 juin, avec des températures en dessous de zéro durant plusieurs nuits, et d'abondantes chutes de neige qui ont fortement affecté les cultures. En Europe de l'Ouest, la famine s'étend rapidement, en lien avec l'augmentation du prix des céréales devenues beaucoup plus rares. »

*Extrait de Volcanologie, Chazot, Lénat, Maury, Agranier, Roche, éditions Deboeck, 2017, p 175*

## Document 3 - Quelques caractéristiques d'éruptions volcaniques majeures de type explosif

On distingue les éruptions explosives de supervolcans explosifs par leur production pyroclastique\* hors norme ; l'US Geological Survey (USGS) l'applique à toute éruption qui rejette plus de 1 000 km<sup>3</sup> de ponces et de cendres en une seule explosion.

Volcan et localisation	Date ou âge des éruptions	Volume de matériel pyroclastique émis (en km <sup>3</sup> )*
Fish Canyon, Colorado, USA	- 28 millions d'années	3 000
Yellowstone, Wyoming, USA	- 2,2 millions d'années	2 500
Taupo, Nouvelle-Zélande	- 26 500 ans	1 170
Yellowstone, Wyoming, USA	- 640 000 ans	1 000
Tambora, île de Sumbawa, Indonésie	1 815	150
Méropi	2 010	130
Krakatoa, île au sud de Sumatra, Indonésie	1 883	21
Pinatubo, Philippines	1 991	4
Vésuve	79	3,3
Mont Saint Hélène, Washington, USA	1 980	<1

\*Le volume de matériel pyroclastique est le volume de matière émise par le volcan, il est à distinguer du volume de magma (ainsi, pour l'éruption du Tambora, les 150 km<sup>3</sup> de matériel pyroclastique correspondraient à 41 km<sup>3</sup> de magma).

*Données dispersées*

## Document 4 - Des informations apportées par le thermomètre isotopique

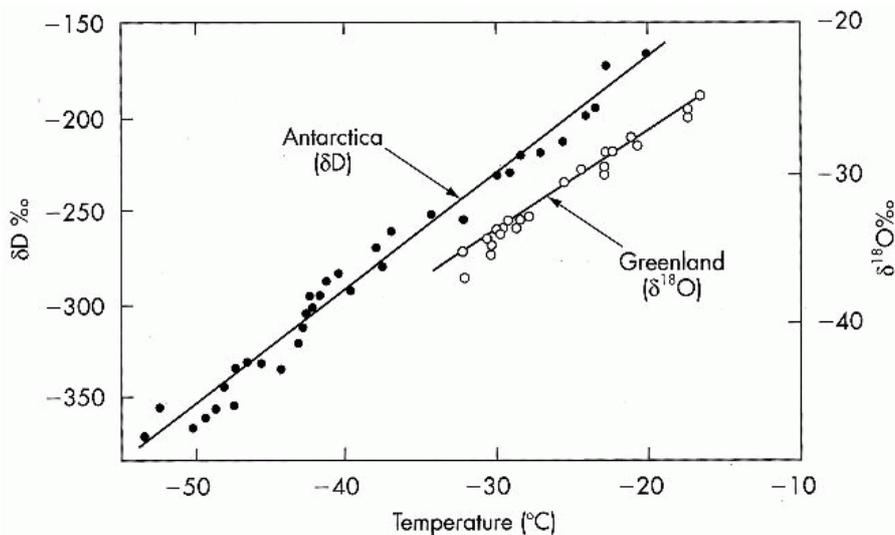
### Document 4a - Le principe des thermomètres isotopiques

L'eau ( $H_2O$ ) est constituée d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène. L'atome d'oxygène existe sous la forme de deux isotopes stables : l'oxygène 16,  $^{16}O$ , et l'oxygène 18,  $^{18}O$ . Dans l'eau de pluie ou dans la neige, on trouve donc de l'eau avec des atomes d'oxygène 16 et de l'eau avec des atomes d'oxygène 18. L' $H_2^{16}O$  est beaucoup plus fréquente que l' $H_2^{18}O$ .

On peut mesurer les variations du rapport  $H_2^{18}O / H_2^{16}O$  noté «  $\delta^{18}O$  » dans les précipitations en fonction de la température moyenne. Le graphique ci-dessous montre les résultats obtenus pour le Groenland noté « Greenland ».

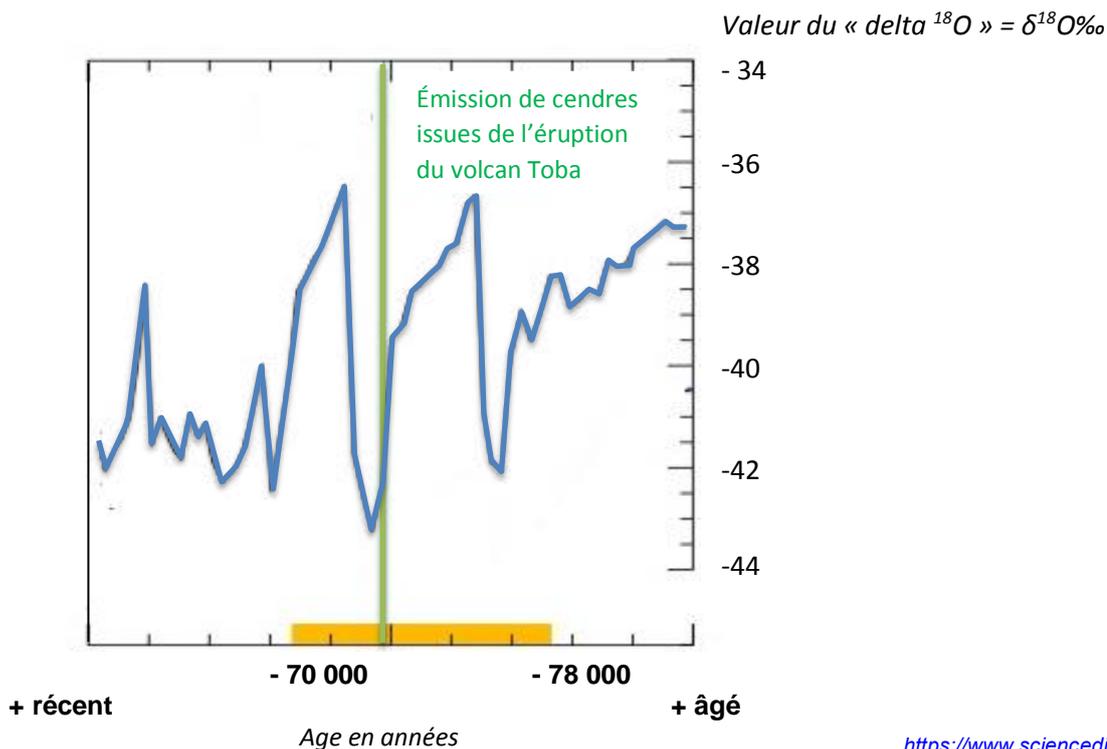
(Remarque : un calcul permet de comparer ce rapport à une valeur de référence).

Il existe également deux isotopes stables pour l'hydrogène : l'hydrogène 1,  $^1H$ , et le deutérium,  $^2H$ . De la même façon, on peut mesurer les variations du rapport  $^2H_2O / ^1H_2O$  noté «  $\delta D$  » en fonction de la température moyenne. Le graphique ci-dessous montre les résultats obtenus en Antarctique noté « Antarctica ».



D'après Jouzel et al, 1994, dans Planet-Terre

### Document 4b - Les variations du delta $^{18}O$ dans les glaces du Groenland



<https://www.sciencedirect.com>

## Document 5 - Les informations apportées par l'étude des pollens

L'étude des pollens des végétaux permet de reconstituer la diversité des espèces végétales qui sont notamment dépendantes des conditions climatiques

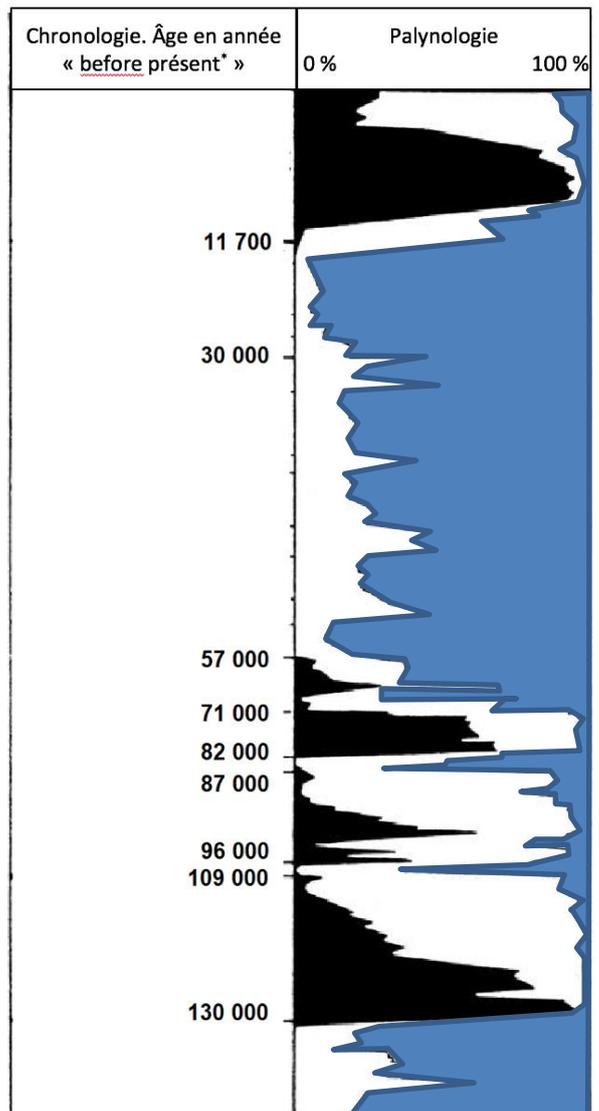
- une dominante de pollens de plantes herbacées traduit un climat froid et sec ;
- une dominante de pollens d'arbres traduit un climat plus tempéré, en particulier les chênaies.

Le graphe ci-à-droite présente la composition en pollens d'une colonne de sédiments âgés de -140 000 ans à nos jours (tourbière de la Grande Pile, France).

\* Before présent = Avant 1950

### Légende

-  Chêne
-  Autres arbres
-  Herbes

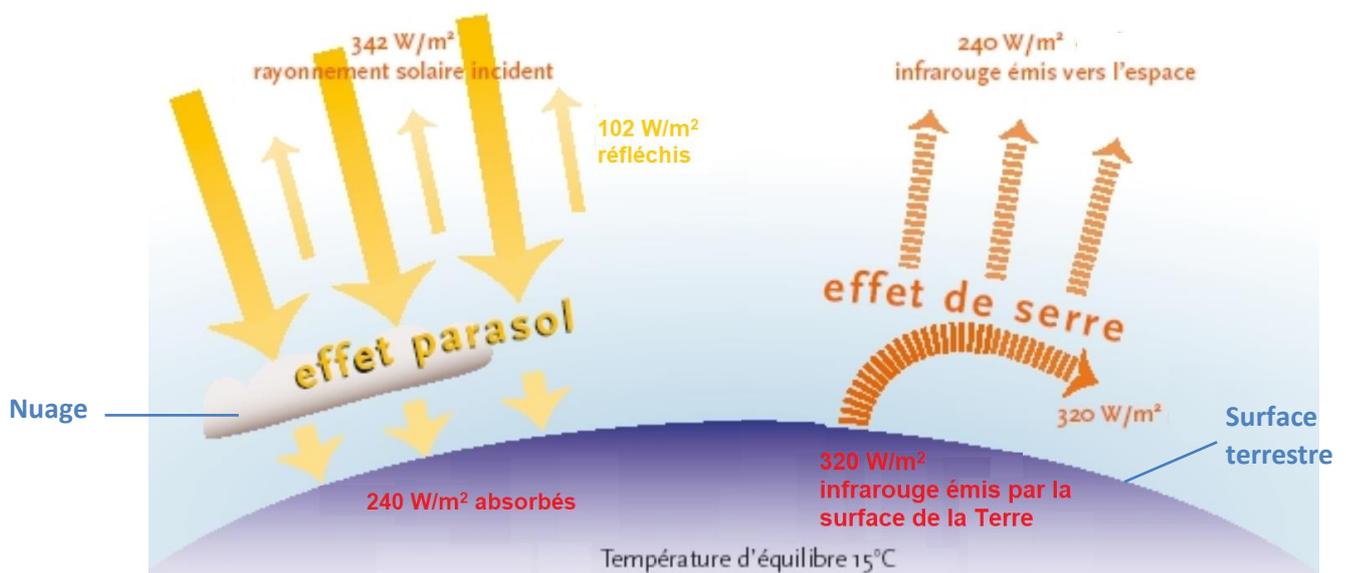


*D'après G. Woillard, revu par Ellwood in Brugal et al. 2001 dans Manuel d'Archéologie, François Djindjian, 2011, Ed Armand Coli*

## Document 6 - Les émissions volcaniques et leurs conséquences

### Document 6a - Le bilan radiatif de la Terre

Le bilan radiatif de la Terre dresse un inventaire de l'énergie reçue et perdue par l'atmosphère et hydrosphère de la planète.



### Document 6b - Les matériaux émis dans l'atmosphère lors d'une éruption volcanique

Outre les matières solides, de nombreux gaz sont libérés lors d'une éruption volcanique. Le tableau ci-dessous présente les proportions des principaux gaz émis lors de deux éruptions explosives à l'exception de la vapeur d'eau. Ces gaz sont normalement en concentration très faible dans l'atmosphère.

	Mt. St. Helens (USA)	Mérapi (Indonésie)
H <sub>2</sub> (%)	0,85	1,54
CO <sub>2</sub> (%)	6,64	7,07
CO (%)	0,06	0,16
SO <sub>2</sub> (%)	0,2089	1,15
H <sub>2</sub> S (%)	0,3553	1,12

D'après volcano.oregonstate.edu

### Document 6c - L'influence de quelques composants atmosphériques sur le bilan radiatif de la Terre

Les effets suivants sont régionaux et relativement brefs si seule la troposphère (les 10 premiers km environ) est affectée. Si les gaz et les particules ci-dessous atteignent la stratosphère (10 à 50 km d'altitude), l'effet est mondial et plus durable, jusqu'à plusieurs années.

Composant	Effet
Cendres	Effet parasol
CO <sub>2</sub>	Effet de serre (difficilement quantifiable compte tenu du CO <sub>2</sub> atmosphérique préexistant)
H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub>	Transformation en H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pluies acides
H <sub>2</sub>	Aucun impact direct
Aérosols dont H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Effet parasol très élevé
CO	Contribution à la formation de l'ozone troposphérique Transformation en CO <sub>2</sub> dans l'atmosphère

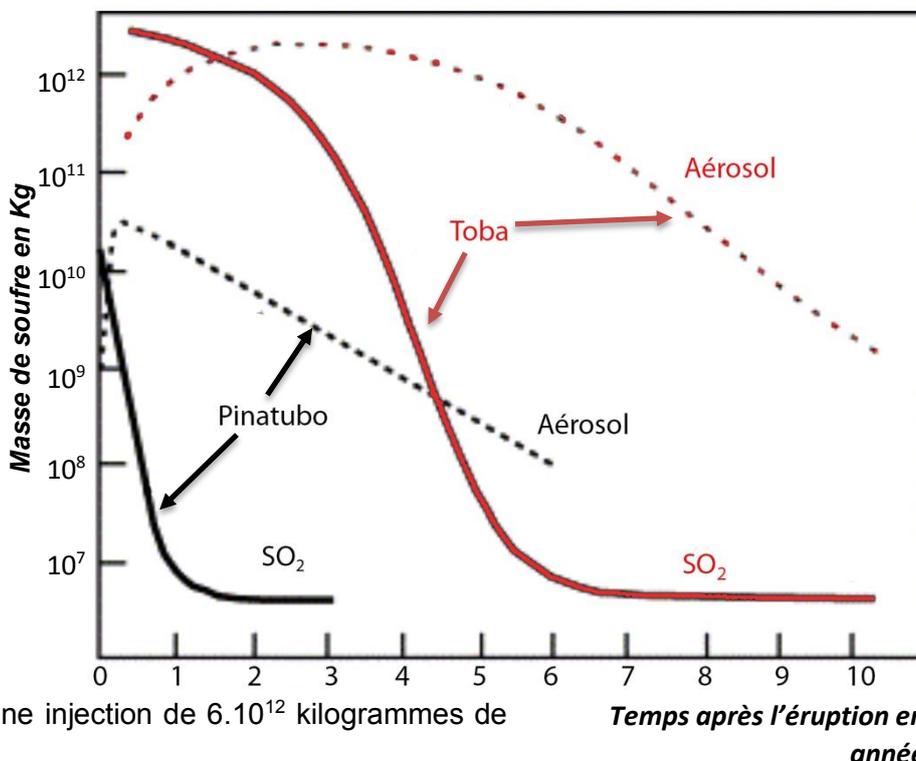
D'après le MOOC Volcanologie physique de l'IPGP

### Document 6d - Le devenir des matériaux sulfurés

Éjecté dans la stratosphère, le dioxyde de soufre se mélange avec la vapeur d'eau de l'atmosphère et se transforme alors en acide sulfurique liquide (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Il devient ce qu'on appelle un "aérosol", c'est-à-dire de fines gouttelettes de quelques dixièmes de microns de diamètre en suspension dans un gaz.

Le graphe ci-à-droite présente les masses totales de soufre, sous la forme de dioxyde de soufre (traits pleins) et d'aérosol de sulfate (traits pointillés) qui auraient été émises dans la stratosphère lors de l'éruption de Toba. Ces résultats sont issus d'un modèle numérique. Pour la simulation, il a été considéré une injection de  $6 \cdot 10^{12}$  kilogrammes de SO<sub>2</sub> dans la stratosphère.

Les masses de soufre sous la forme de SO<sub>2</sub> et d'aérosol de sulfate observées pour le Pinatubo (éruption de 1991) sont présentées à titre de comparaison.



## Exercice 3 - Les stériles miniers uranifères de Lozère

Les « stériles miniers » sont constitués des sols et des roches déplacés et non exploités pour accéder aux roches économiquement rentables. Parmi les stériles, on distingue usuellement les **stériles francs** qui sont des roches ne présentant aucune concentration en substance utile et les **stériles de sélectivité** qui sont des roches dont la concentration en substance utile est jugée non valorisable sur des critères technico-économiques.

Entre 1945 et 2001, 250 sites miniers d'uranium ont été exploités en France, permettant ainsi la production de 80 000 tonnes d'uranium. Cette exploitation a généré 200 millions de tonnes de stériles, dont une partie stockée en tas (verse) dans l'enceinte ou aux alentours des anciens sites miniers. Des stériles furent aussi cédés pour un usage public à des entreprises ou à des particuliers, la majeure partie du temps afin de servir dans la construction. Les stériles issus des mines d'uranium ayant potentiellement une activité radioactive, le suivi de l'accès à ces stériles par le grand public apparaît aujourd'hui comme un problème de santé publique et fait, depuis la circulaire du 22/07/2009, l'objet d'un recensement et d'un suivi approfondi.

Nous chercherons dans cet exercice à comprendre l'impact possible des stériles sur les populations ainsi qu'à identifier quelles mesures peuvent être mises en place pour le limiter.

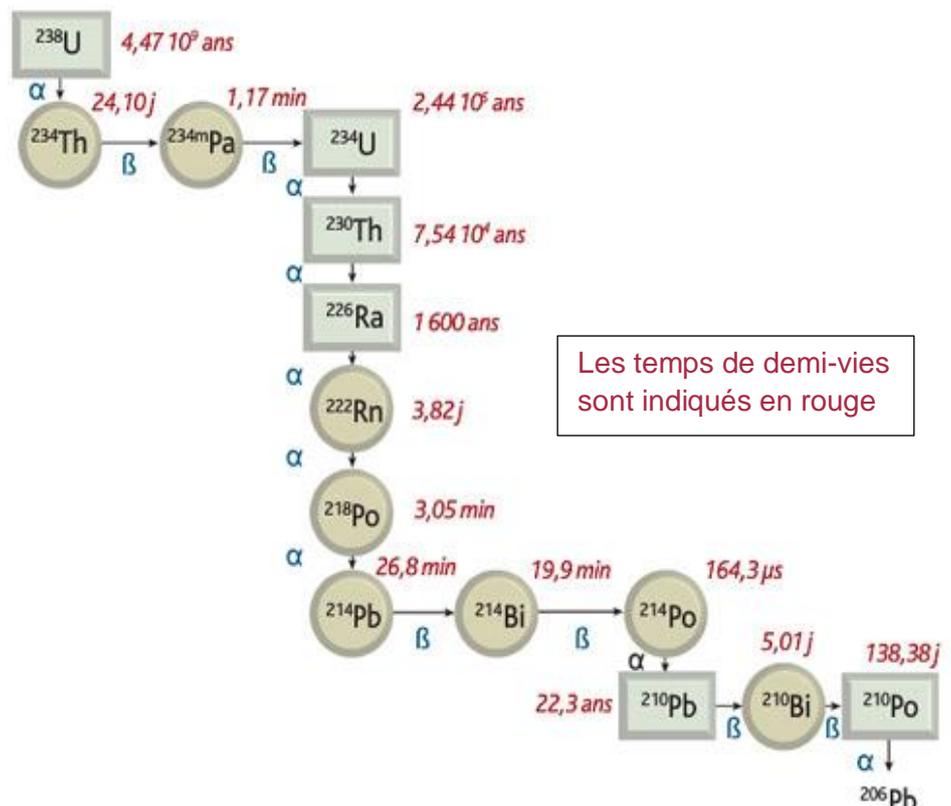
### Document 1 - La décroissance radioactive de l'uranium

Les trois isotopes qui composent l'uranium naturel sont l'uranium 238, l'uranium 235 et l'uranium 234.

L'uranium 235 et l'uranium 238 sont les parents de 2 chaînes de désintégrations qui comptent respectivement 10 et 13 radionucléides émetteurs de particules  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  avant d'atteindre respectivement le plomb 207 et le plomb 206.

Dans la chaîne de désintégration schématisée, le radon 222 ( $^{222}\text{Rn}$ ) est la seule particule à l'état de gaz. Il peut s'échapper dans l'atmosphère et s'accumuler dans les espaces clos notamment les maisons peu ventilées. Ce gaz est incolore et inodore.

La demi-vie du radon 222 ( $^{222}\text{Rn}$ ), très courte (3,82 j), entraîne une émission importante de particules  $\alpha$ . Il se désintègre en polonium 218 ( $^{218}\text{Po}$ ) et peut alors, s'il est inhalé, se déposer dans les alvéoles pulmonaires. Le polonium 218 ( $^{218}\text{Po}$ ) subit à son tour de nombreuses désintégrations radioactives entraînant l'exposition de l'organisme à une quantité importante de rayonnements potentiellement cancérogènes notamment des rayonnements  $\alpha$  très énergétiques.



D'après <http://www.irsn.fr/>

## Document 2 - Évaluation des doses de rayonnement ionisant reçu par un être humain

Le rayonnement des particules est mesuré avec différents appareils, par exemple pour le rayonnement  $\gamma$  le scintillomètre SPP2 ou encore le radiamètre. On obtient des mesures en coups par seconde symbolisé c/s ce qui correspond au nombre de désintégrations des noyaux des atomes radioactifs présents dans l'échantillon testé. Certains appareils donnent également les mesures en Becquerel ou en milliSievert (mSv). Le Becquerel, symbole Bq est l'unité de mesure de l'activité des matières radioactives, c'est-à-dire le nombre de désintégrations qui s'y produisent par seconde. Le Sievert, symbole Sv est l'unité de mesure de la quantité d'énergie qu'un corps humain absorbe quand il est soumis à un rayonnement ionisant. Les doses ionisantes reçues par un être humain sont calculées en Sievert par an. C'est donc la quantité d'énergie absorbée par un être humain au cours d'une année.

### Document 2a - Calcul de la DEAA (Dose Efficace Ajoutée Annuelle)

Pour évaluer les risques d'exposition aux rayonnements ionisants (radioactivité) pour un individu donné on tient compte à la fois de la radioactivité des différents lieux qu'il fréquente et du temps qu'il y passe.

La dose ionisante totale (Dose Efficace Annuelle) est issue à la fois de sources ionisantes naturelles encore appelées le bruit de fond, et de sources ionisantes issues de l'activité humaine aussi appelées la Dose Efficace Ajoutée Annuelle.

Dose Efficace Ajoutée Annuelle (DEAA) = Dose Efficace Annuelle (DEA) – bruit de fond.

*Bases de connaissances IRSN (irsn.fr)*

### Document 2b - Règlementation autour de la DEAA (Dose Efficace Ajoutée Annuelle)

Afin de limiter l'impact des activités anthropiques sur les populations, l'article R1333-8 du code de la santé publique définit une limite de DEAA de  $1 \text{ mSv.an}^{-1}$  à ne pas dépasser. Cette valeur ne s'applique pas pour les personnes travaillant dans le secteur nucléaire, les patients bénéficiant d'une radiothérapie, les volontaires à des programmes de recherche médicale et biomédicale...

<https://www.legifrance.gouv.fr>

## Document 3 - Mesure de radioactivité dans des bâtiments ; le cas des abords de la mine des Bois-Noirs en Lozère et dose reçue par un être humain en $\text{mSv.an}^{-1}$

La mine des Bois-Noirs a été exploitée à partir de 1960.

Étude de juin 2001 :

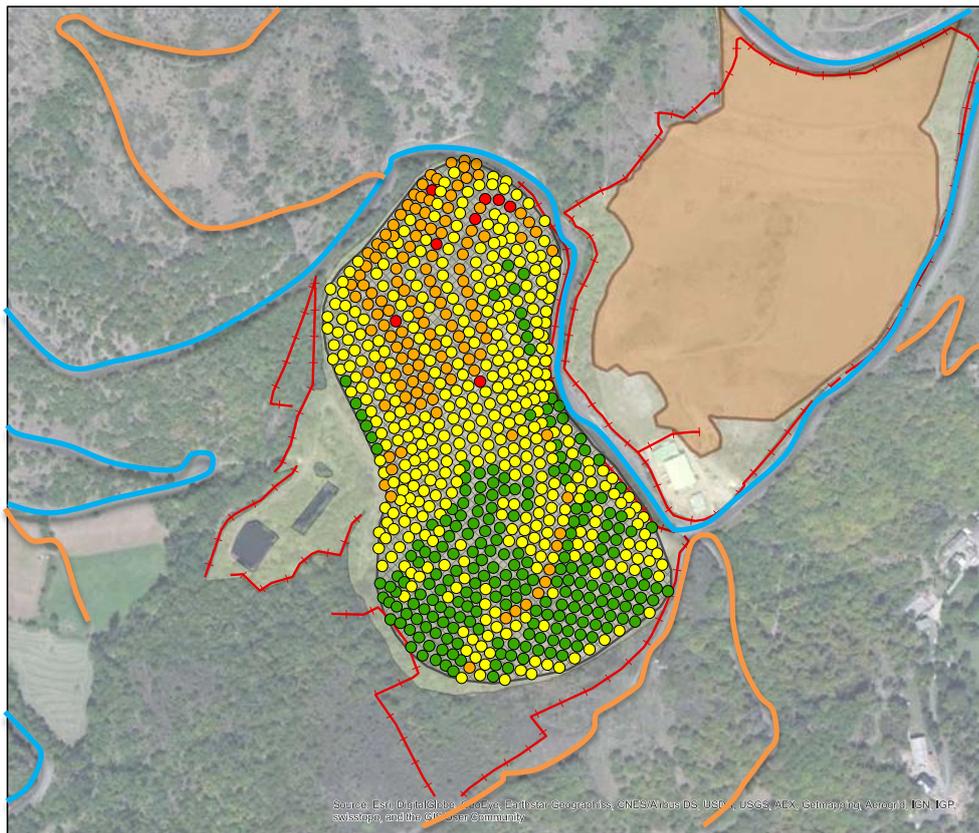
Localisation	Radon 222 (Bq.m <sup>-3</sup> )	mSv.an <sup>-1</sup>
Saint Priest La Prugne <b>Maison éloignée de l'exploitation</b>	355	5,91
<b>Moulin de Poyet proche de l'exploitation (chambre sur cave)</b>	724	12
Scierie Mondière proche de l'exploitation (local d'affûtage)	7 720	36,7

Étude complémentaire, décembre 2001 au lieu-dit « Moulin de Poyet » après recommandation d'aération :

Localisation	Radon 222 (Bq.m <sup>-3</sup> )	mSv.an <sup>-1</sup>	
<b>Moulin de Poyet</b>	Salle de bain – rez-de chaussée	129	2,15
	Cave adjacente au garage	447	7,45
	Chambre sur cave	240	4
	Chambre 2 <sup>e</sup> étage	188	3,13

*Rapport CRIIRAD n° 03-38 Site des Bois-Noirs*

## Document 4 - Données géographiques et relevés des compteurs de la verse à stériles des Bondons



Une exploitation d'uranium a eu lieu sur la commune des Bondons de 1980 à 1989. Les matériaux extraits mais non exploités constituent des stériles. On appelle « verse » le lieu où sont stockés ces stériles.

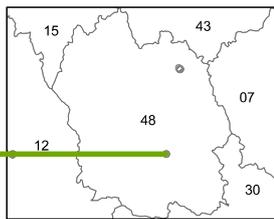
La commune des Bondons comptait 143 habitants en 2014.

Sur la commune voisine à l'est on compte une trentaine de constructions.

DDEA liée à l'usage des chemins : 0,14 mSv.an<sup>-1</sup>

Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroX, Cartosat1, Airphoto, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

1:4 000



### Légende

- Emprise minière
- Périmètre de sécurité
- Mine à ciel ouvert
- Mine à ciel ouvert en eau
- Entrée de galerie
- Travaux miniers souterrains
- Verse à stériles

Route départementale

Routes et chemins

### Flux de photons (SPP2)

Bruit de fond : **90** c/s  
 Minimum : **220** c/s  
 Moyenne : **444** c/s  
 Maximum : **1400** c/s

### Plan Compteur SPP2

- Inférieur à 300 c/s (223)
- Entre 300 et 600 c/s (398)
- Entre 600 et 1000 c/s (124)
- Supérieur à 1000 c/s (8)

Rapport PNGMDR 2013-2015 AREVA

## Document 5 - L'activité des stériles et leur réutilisation lors de l'exploitation minière en France

### Document 5a - Seuil de coupure

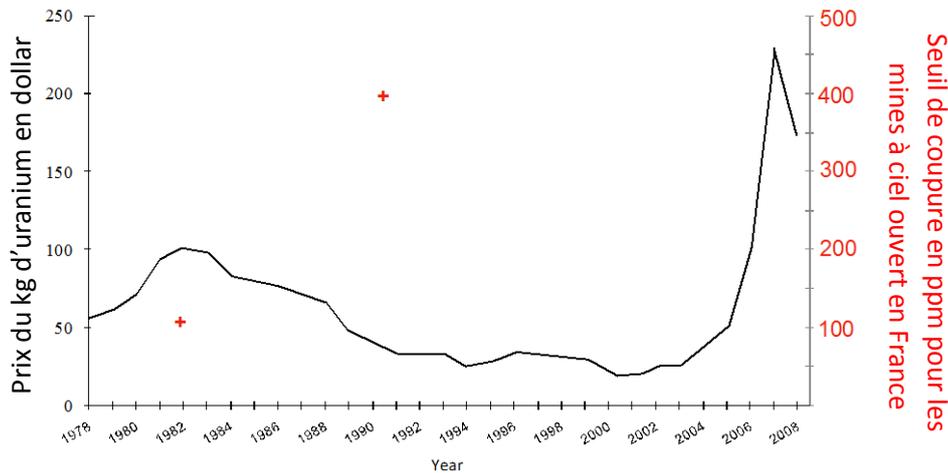
Les teneurs en uranium des stériles miniers sont comprises entre des valeurs très faibles, soit quelques grammes par tonne ou ppm, pour les « **stériles francs** » et des valeurs plus élevées, soit quelques centaines de grammes par tonne ou ppm, pour les « **stériles de sélectivité** ».

Lors de l'exploitation des mines d'uranium, on classe une roche dans la catégorie des **stériles de sélectivité** lorsque les coûts de l'extraction de l'uranium contenu dans cette roche sont supérieurs au bénéfice de sa vente. On définit alors un **seuil de coupure** qui est la concentration d'uranium en dessous de laquelle les roches ne sont pas exploitées.

La valeur du seuil de coupure a évolué dans le temps en fonction de l'évolution des prix de l'uranium et de l'évolution des techniques d'exploitation.

Rapport d'expertise globale de l'IRSN sur le bilan décennal d'AREVA NC (1993-2004)

## Document 5b - Évolution du prix de l'uranium et du seuil de coupure (données mondiales)

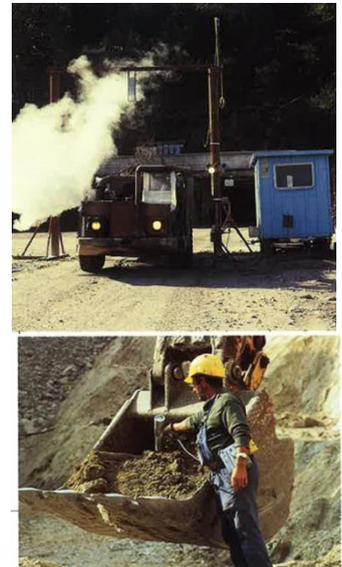


Uranium 2009: Resources, Production and Demand A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency

## Document 5c - Tri radiométrique

Lors de l'activité minière, les teneurs en uranium étaient mesurées grâce à des portiques de détection (photo du haut ci-contre) ou réalisées directement au godet des pelleteuses chargées de l'excavation (photo du dessous ci-contre). La fiabilité de ces mesures n'était pas toujours garantie. Par ailleurs des mélanges involontaires se sont parfois produits entre des stériles radioactifs et des stériles non radioactifs.

Une partie des stériles était réutilisée pour remblayer au fur et à mesure les galeries n'étant plus exploitées, mais pour éviter une accumulation trop importante des stériles, de grands volumes ont été cédés à des entreprises et des particuliers pour la construction ou l'aménagement de sites publics ou privés. Avant 1984, il n'y avait, ni contraintes d'utilisation, ni suivi concernant ces cessions. À partir de 1984, les responsables de l'exploitation de la majorité des mines d'uranium en France ont mis en place progressivement un registre permettant un suivi de la cession des stériles ainsi que des restrictions d'usage. En ce qui concerne les cessions antérieures à 1984, l'état des connaissances, notamment des lieux et des usages, reste pauvre. Des stériles ont parfois été détectés à plusieurs kilomètres de leur lieu d'extraction



Fiche n°1 Extraction de l'uranium en France IRSN 2017 et Photos : L'uranium de la Crouzille (Haute Vienne), B Bavoux, P-C Guillard.

## Document 6 - Les actions mises en place

Dans le cadre de la gestion des stériles disséminés en dehors des emprises minières, le seuil « d'incompatibilité d'usage » a été fixé à  $0,6 \text{ mSv.an}^{-1}$ . L'instruction du 8 août 2013 précise :

- **Cas « travaux »** : lorsque la DEAA moyenne  $\geq 0,6 \text{ mSv.an}^{-1}$ . Ces zones feront l'objet d'une recherche systématique d'actions correctives. Les objectifs seront fixés en fonction d'un bilan coûts / avantages
- **Cas « discussion »** lorsque la DEAA moyenne  $\geq 0,3 \text{ mSv.an}^{-1}$  et  $< 0,6 \text{ mSv.an}^{-1}$  feront l'objet d'études plus spécifiques pour statuer sur les travaux éventuels d'assainissement
- **Les autres cas** ne donnent pas lieu à des études ou des actions particulières

DREAL Nouvelle-Aquitaine Février 2017

### Questions :

Expliquer l'origine de la radioactivité mesurée sur le site des Bondons et de celle mesurée sur le site des Bois-noirs.

Évaluer, à partir des résultats des différentes mesures pour chacun des sites, les impacts sur l'être humain et proposer, le cas échéant, les mesures à prendre pour limiter les risques.