



Collection de Minéraux
SORBONNE UNIVERSITÉ

MÉTAMORPHOSES MINÉRALES

Ce que nous racontent les pierres

MÉTAMORPHOSES MINÉRALES

Ce que nous racontent les pierres

Remerciements

Cet ouvrage est publié à l'occasion de l'exposition temporaire *Métamorphoses minérales, ce que nous racontent les pierres*.

Coproduction :
Pôle Collections Scientifiques et Patrimoine,
Bibliothèque de Sorbonne Université (BSU) ;
Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP).

Du 21 janvier 2025 au 3 janvier 2026

Catalogue & exposition

Auteur.e.s :
François Baudin, Jean-Claude Boulliard,
Stéphane Jouve, Laurence Le Callonnec, Erwan
Martin, Charles Ragusa, Anne Verlaguet

Coordination :
Céline Paletta

Graphisme :
Paola Giura, Alexandre Lethiers, Erwan Martin,
Céline Paletta, Anne Verlaguet

Médiation :
El-Bachir Diane, Paola Giura

Accueil & administratif :
Fabienne Gallaire

Affiche & communication :
Terava Jacquemier, Nicolas Thimon

Cette exposition a été rendue possible grâce au soutien et aux prêts de :

- ◆ La Bibliothèque de Sorbonne Université (BSU)
- ◆ La Direction des relations sciences culture société (DRSCS)
- ◆ L'Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP)
- ◆ Contribution Vie Etudiante et de Campus (CVEC)
- ◆ L'Association des Amis de la collection de la Sorbonne (A.M.I.S.)

Table des matières

Introduction	p.5
Métamorphoses géologiques	p.6
Sur le fond des océans	p.6
Transformation des roches à l'état solide	p.10
Un même magma à l'origine de roches très différentes	p.13
Les Alpes : témoins de la subduction d'un océan	p.14
Métamorphoses cristallines	p.17
Du multiple à l'unique, de l'unique au multiple	p.17
Du parfait à l'imparfait	p.19
D'un minéral à l'autre	p.24
Métamorphose de la matière organique	p.28
De l'organique au minéral	p.28
Les bâtisseurs	p.32
Métamorphoses de la matière	p.36
Le gypse, une pierre qui grille au feu	p.36
Le graphite, un outil de création	p.47
Conclusion	p.58
Bibliographie	p.59



Introduction

L'histoire de notre planète, et des éléments qui la composent, est jalonnée de multiples combinaisons, créations, déstructurations ou métamorphoses, fusions, séparations, voire de disparitions.

Les conditions extrêmes générées par la danse des plaques tectoniques ont favorisé la naissance et l'évolution des roches qui nous entourent. Bien que cette évolution ne suive pas le même chemin darwinien buissonnant que celle des êtres vivants, il existe, dans le cycle des roches, des mélanges, des mutations, des adaptations, des extinctions et des résurgences comparables.

Dans le cadre de l'année des géosciences, le Pôle Collections Scientifiques et Patrimoine et la Collection de Minéraux de Sorbonne Université, ont souhaité mettre en lumière la richesse et la diversité de leur patrimoine géologique. Tant sur le plan matériel qu'immatériel, Sorbonne Université conserve de multiples trésors insoupçonnés dédiés à l'enseignement et à la recherche.

L'exposition *Métamorphoses minérales, ce que nous racontent les pierres* est l'occasion de valoriser ces collections et les connaissances associées. Grâce à la mobilisation de plusieurs chercheuses et chercheurs, elle retrace les changements internes et externes de la matière minérale, depuis les profondeurs de la Terre jusqu'à leur transformation par l'être humain.

Métamorphoses géologiques

Être pétrologue c'est vivre dans le secret des pierres, c'est décrypter leurs singulières écritures minérales afin de comprendre une temporalité gelée dans l'intimité de la matière. Car il est des pierres qui se souviennent d'un étrange voyage, l'impossible voyage au centre de la Terre. Elles nous permettent de penser à reculons sur une échelle de temps défiant notre mémoire, notre petit théâtre personnel. Elles nous font vivre la naissance, l'enfance de notre planète il y a 4 milliards d'années. Ces pierres qui n'ont rien oublié, qui défient notre perception de l'espace, ce sont les roches métamorphiques.

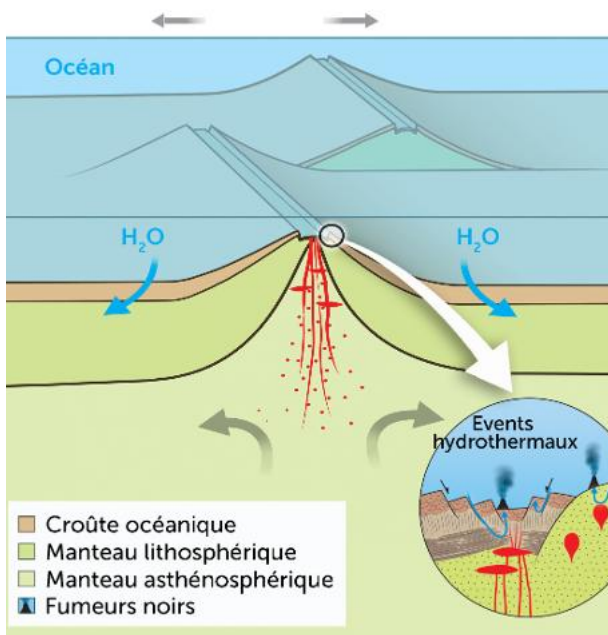
Violaine Sauter
Histoires de pierres, 2023

Sur le fond des océans

Transformation de roches en magma : la fusion partielle du manteau

La Terre se refroidit inexorablement depuis sa formation il y a 4,568 milliards d'années. Si la température à la base du manteau est d'environ 3500°C, elle n'est que de 1000°C dans sa partie la plus superficielle. Ce contraste thermique entraîne la remontée des roches profondes du manteau, chaudes et peu denses. Ces roches se refroidissent lors de leur ascension, deviennent plus denses et finissent par descendre à nouveau.

Cette convection au sein du manteau est le moyen le plus efficace pour la Terre d'évacuer sa chaleur interne. Les cellules de convection mantellique entraînent le mouvement des plaques lithosphériques en surface, c'est le moteur de la tectonique des plaques.



Dorsale médio-océanique :
Zone de divergence des plaques.

Là où les plaques s'écartent (zones de divergence), les roches chaudes ascendantes du manteau (péridotites) subissent une fusion partielle par décompression adiabatique. Autrement dit, la remontée de ces roches au sein du manteau induit une baisse de la pression, avec peu d'échange de chaleur avec les roches environnantes. Ainsi, le point de fusion du manteau ascendant est franchi et le magma formé lors de cette fusion partielle génère la lave qui forme la croûte océanique aux fonds des océans.

Transformation de magma en roches : formation de la croûte océanique

Au niveau des dorsales, le magma formé par fusion partielle du manteau est de composition basaltique. S'il s'épanche sur le fond de l'océan, sous 2000 à 4000 mètres d'eau, il forme des laves en coussin (*pillow lava*). La bordure des laves en coussin est généralement formée de verre, car le choc thermique causé par le contact avec l'eau de mer froide, empêche la formation de cristaux et vitrifie instantanément la lave. Le cœur du coussin a un peu plus de temps pour refroidir : quelques petits cristaux à peine visibles à l'œil nu cristallisent au sein du verre formant une roche que l'on appelle basalte.

A l'inverse, le magma mis en place en profondeur au sein de la croûte

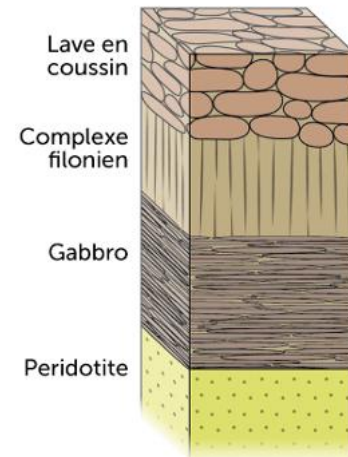
océanique refroidit plus lentement, laissant le temps aux cristaux de se former. Cette roche entièrement cristallisée est un gabbro. Entre gabbros et basaltes en coussin, des filons (*dykes*) micro-cristallisés peuvent former un complexe filonien. La croûte océanique fait au final ~5-7 km d'épaisseur.

Transformation de la croûte océanique par hydratation

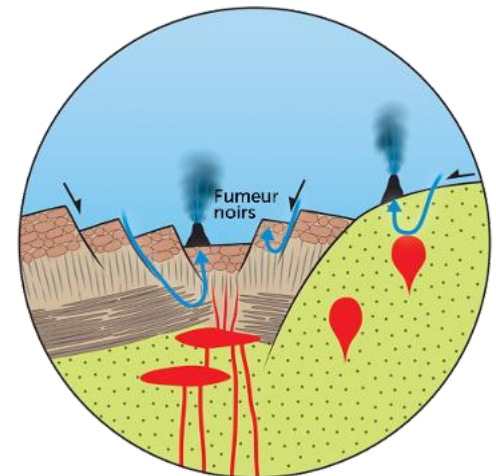
La croûte océanique nouvellement formée s'éloigne progressivement (quelques cm/an) de part et d'autre de la dorsale, et se refroidit. Les forces extensives la fracturent. L'eau de mer s'infiltre alors dans les failles et interagit avec les minéraux et le verre qui constituent la croûte (et parfois même le manteau), les transformant partiellement en minéraux hydratés.

En s'infiltant en profondeur, l'eau se réchauffe et devient de moins en moins dense, ce qui lui permet de remonter vers le fond océanique. Le fluide chaud ascendant est brutalement refroidi au contact de l'eau de mer, provoquant la précipitation de sulfures riches en métaux qui s'agglomèrent en cheminées noires (fumeurs noirs). Les sorties de fluides chauds riches en hydrogène créent également des espaces propices au développement d'une vie primitive.

Cette circulation convective de fluides, appelée hydrothermalisme océanique, contribue à la fois à refroidir et à hydrater la croûte océanique à mesure qu'elle s'écarte de la dorsale.

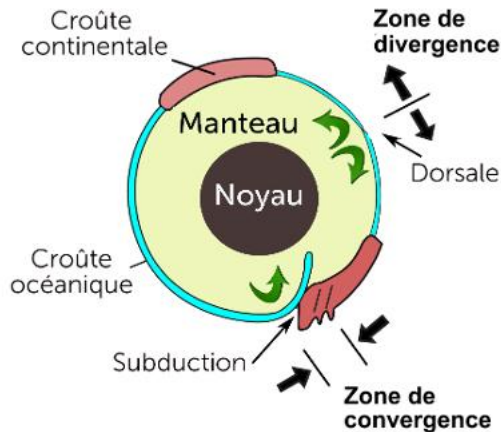


Coupe type de la croûte océanique



Hydrothermalisme océanique

Transformation des roches à l'état solide : métamorphisme et déshydratation de la lithosphère océanique

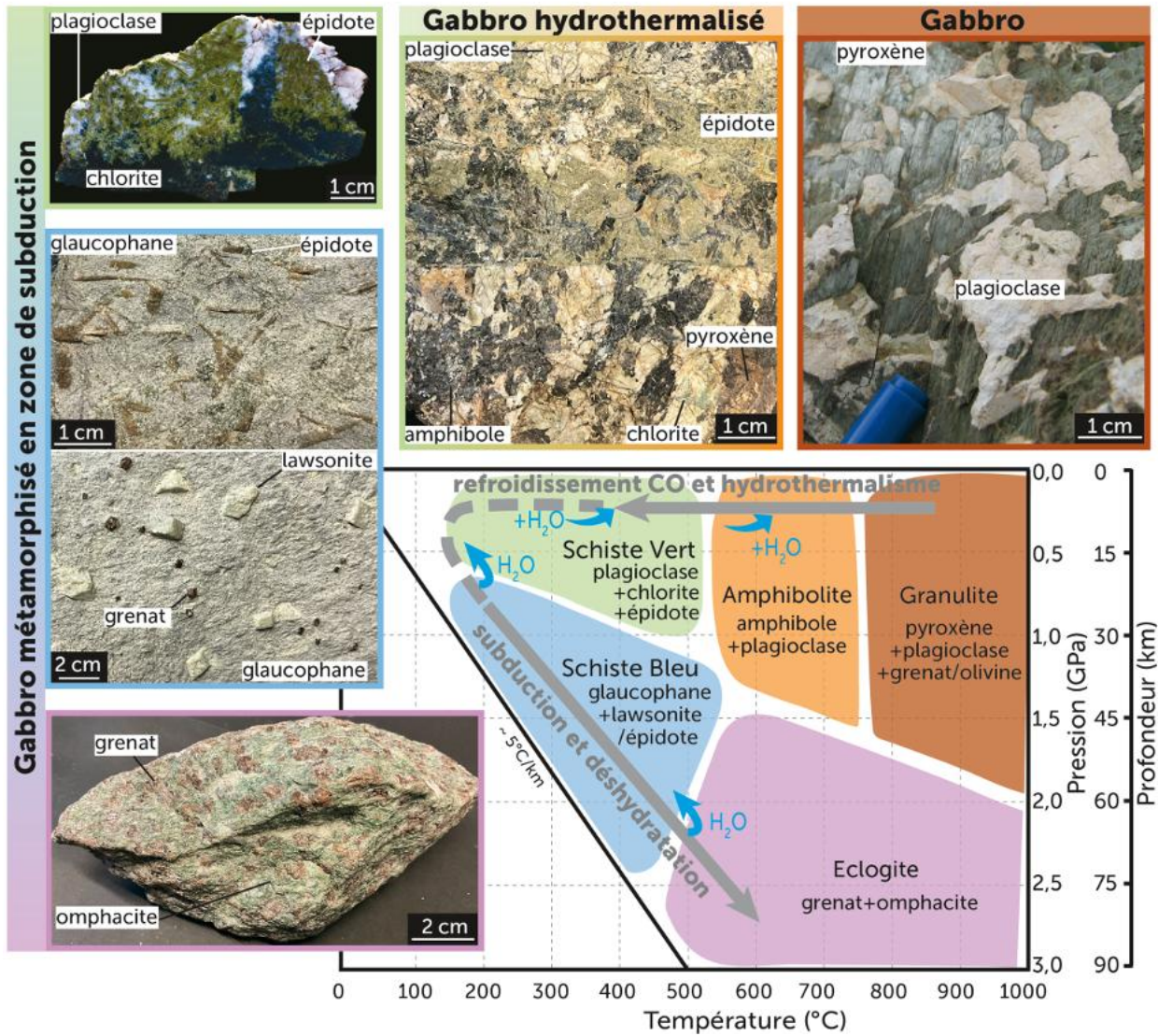


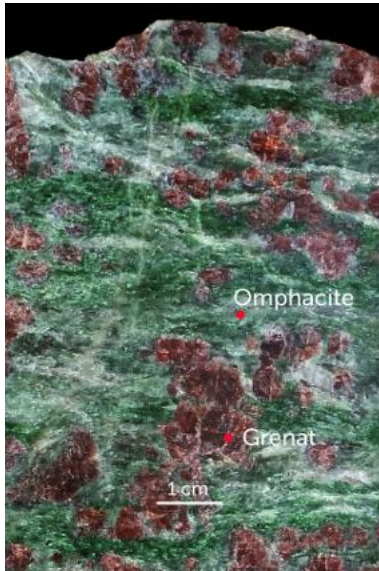
Si d'un côté les plaques lithosphériques s'écartent au niveau des dorsales, de l'autre elles finissent toujours par se rapprocher dangereusement. Dans ces zones de convergence, la plaque lithosphérique la plus dense plonge sous l'autre et sombre dans le manteau.

Une plaque océanique « ancienne », qui a eu le temps de se refroidir, est dense. Elle plonge sous la lithosphère continentale (moins dense) ou sous une autre lithosphère océanique plus jeune (et moins dense). C'est la subduction océanique.

La température et surtout la pression augmentent fortement avec la profondeur, ce qui déstabilise les minéraux hydratés de la lithosphère océanique. Ces minéraux se transforment progressivement en nouveaux minéraux plus compacts (plus denses) et de moins en moins hydratés, en lien avec les nouvelles conditions pression-température. Ces transformations minérales se font à l'état solide, sans fusion. Ce sont les réactions métamorphiques.

Quand la croûte océanique entre en subduction, les minéraux stables (jusque vers ~20 km de profondeur) sont le feldspath plagioclase ainsi que la chlorite et l'épidote, deux minéraux verts. On appelle donc « faciès des Schistes Verts » la gamme de conditions pression-température de stabilité de cet assemblage de minéraux. Quand la croûte océanique atteint ~20 km de profondeur, la chlorite se transforme en glaucophane, une amphibole bleue bien moins hydratée,





Eclogite, Norvège

ce qui libère de l'eau dans les roches. Le glaucophane bleu coexiste avec l'épidote ou la lawsonite : c'est le « faciès des Schistes Bleus ». Au-delà de ~60 km de profondeur, la roche se déshydrate encore au cours de réactions métamorphiques qui forment du grenat et de l'omphacite (un pyroxène vert), deux minéraux anhydres qui caractérisent le « faciès des Eclogites ». En parallèle, les sédiments qui recouvrent la croûte océanique subissent également des réactions de déshydratation. Au-delà de 80-90 km de profondeur, le manteau libère à son tour beaucoup d'eau.

L'eau libérée par la déshydratation progressive de la lithosphère océanique en subduction a des conséquences mécaniques importantes. Elle influence fortement la façon dont les roches se déforment (rhéologie) et favorise leur fracturation.

On pense aujourd'hui que les grands séismes destructeurs qui ont lieu dans les zones de subduction sont en partie liés à cette libération d'eau dans les roches.

Des écailles de roches qui s'échappent vers la surface !

Au fur et à mesure que la lithosphère océanique se déshydrate, elle devient plus dense et plonge inexorablement dans le manteau jusqu'à ~2900 km de profondeur où elle sera finalement « recyclée ». Cette zone est appelée familièrement le « cimetière des plaques ».

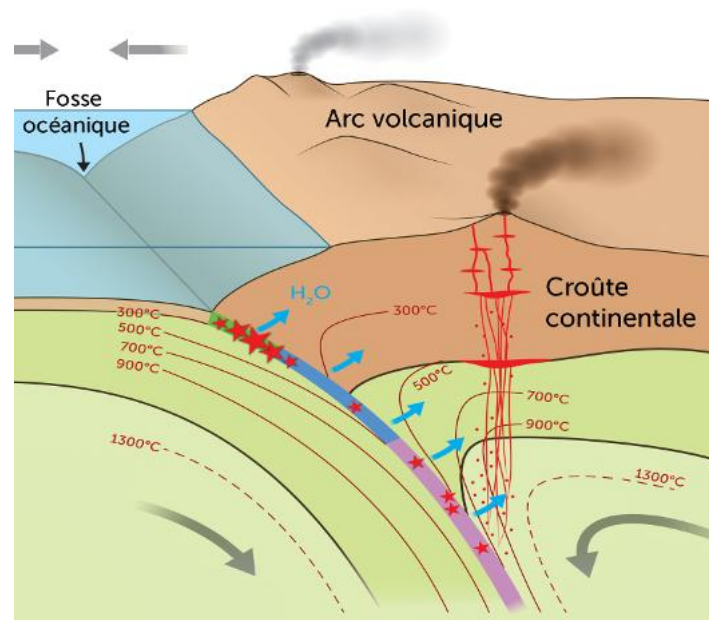
Quelques écailles de roches se détachent parfois de la plaque plongeante et remontent le long du plan de subduction. Ces écailles se retrouvent aujourd'hui en surface, au cœur des chaînes de montagnes.

Lors de leur remontée, ces roches conservent en grande partie les minéraux formés en profondeur. Ces minéraux « fossilisés » ont enregistré le « chemin pression-température » suivi par les roches et nous permettent de reconstituer les profondeurs et les températures atteintes par les roches au cours du temps.

Magmatisme et volcanisme d'arc

Les fluides libérés lors de la subduction de la lithosphère océanique sont principalement composés d'eau et de quelques éléments solubles (e.g. K, Ca, Na). Si une partie de ces fluides remonte le long du plan de subduction, une partie s'infiltré dans le coin de manteau de la plaque chevauchante. Ces fluides interagissent chimiquement avec les roches du manteau et transforment une partie de ses minéraux en minéraux hydratés. Cette réaction entre roche et fluide est appelée métasomatose.

L'hydratation du coin de manteau abaisse la température de fusion, ce qui entraîne sa fusion partielle dès 80-100 km de profondeur. Le magma produit est à l'origine du magmatisme et volcanisme d'arc à l'aplomb des zones de subduction.

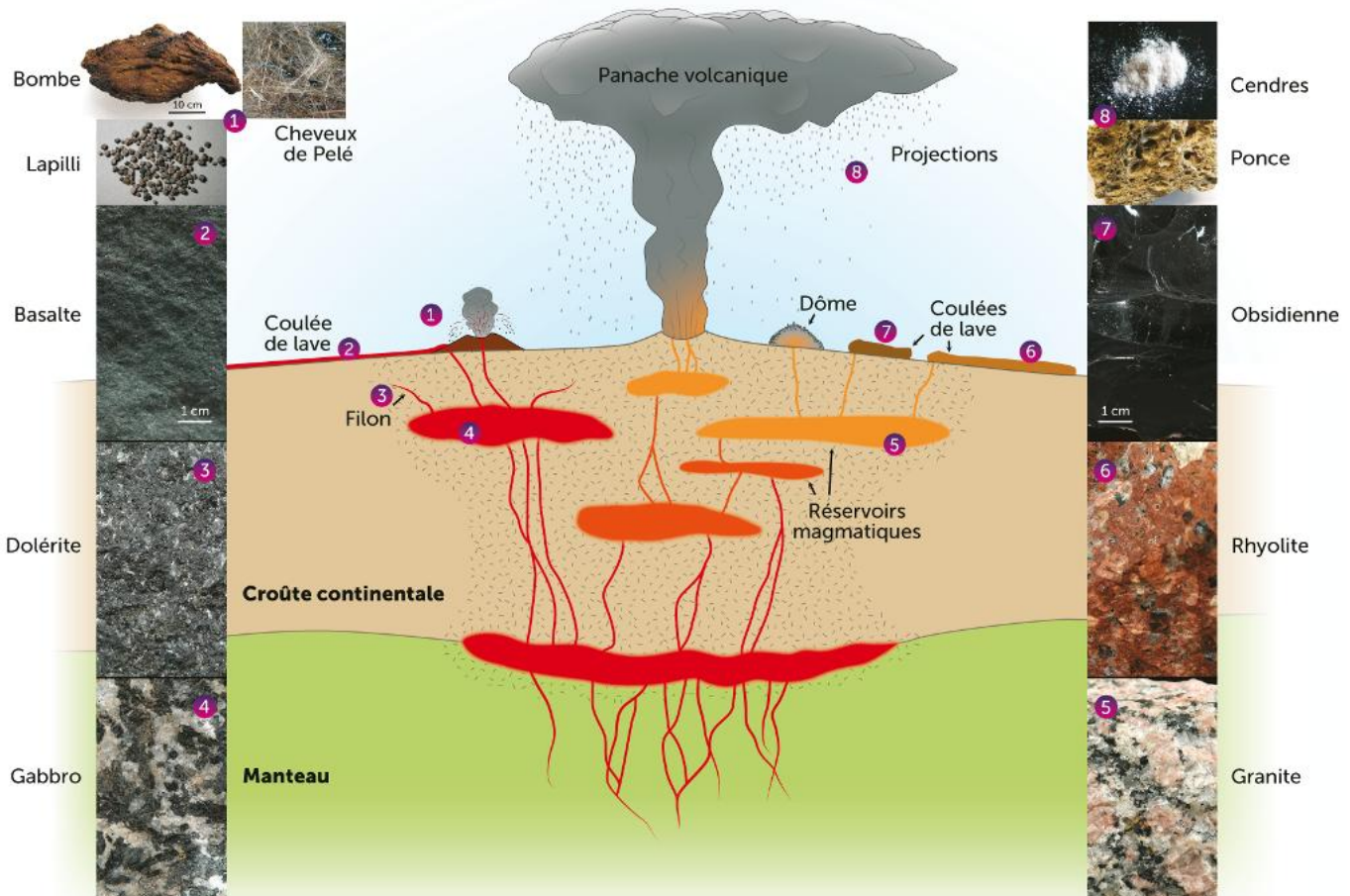


Zone de convergence des plaques - Subduction

Un même magma à l'origine de roches très différentes

Un même magma, produit des roches magmatiques aux apparences très différentes, selon sa profondeur de mise en place et le dynamisme éruptif mis en jeu lors de son épanchement en surface.

Lors de sa remontée vers la surface, le magma reste principalement dans la croûte au sein de réservoirs magmatiques, où il refroidit lentement. Les cristaux ont le temps de se former et la roche produite est entièrement cristallisée : les cristaux sont jointifs, comme pour les gabbros et les granites.



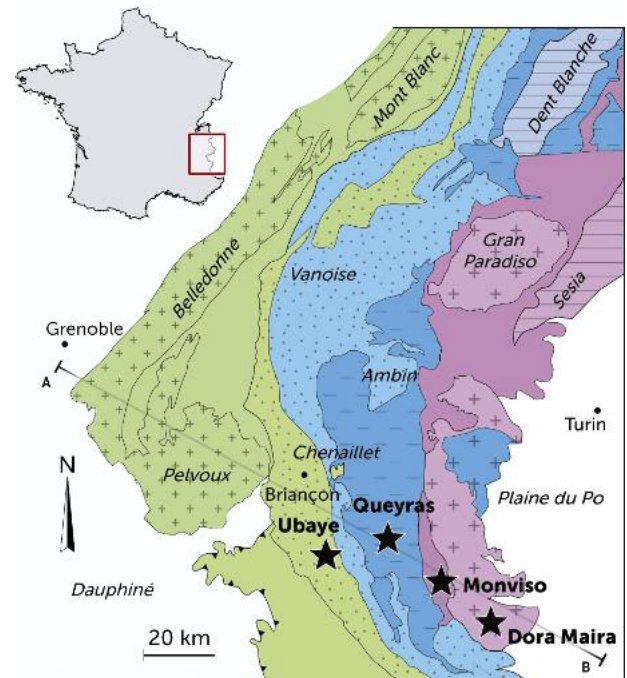
Une petite partie du magma arrive en surface. Selon sa viscosité et sa teneur en gaz, il forme des roches différentes.

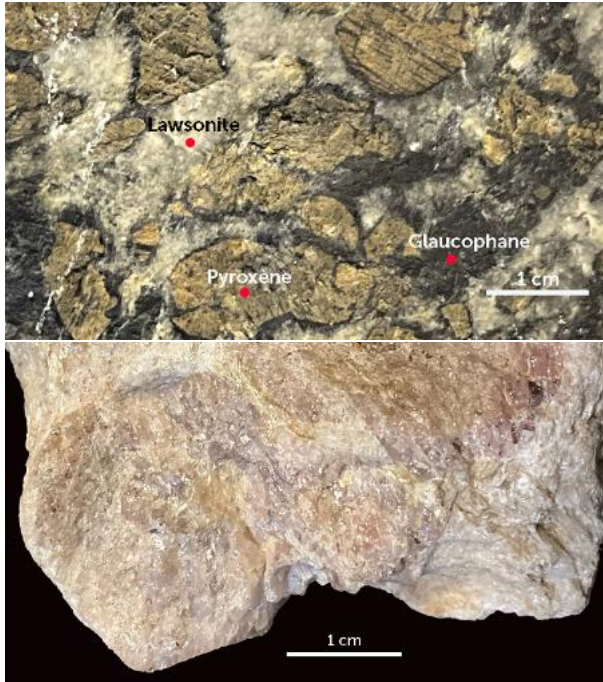
Si la viscosité est faible, se mettent en place des coulées de laves (basaltiques ou rhyolitiques). Au contraire, si la viscosité est très élevée, des coulées épaisses d'obsidienne ou des dômes se forment.

Le gaz contenu dans la lave peut être à l'origine de dynamismes éruptifs explosifs, générant différentes projections : bombes, lapilli, cheveux de Pelé, ponces et cendres. Enfin, le magma injecté dans les filons subit un refroidissement intermédiaire et forme par exemple des dolérites.

Les Alpes, témoins de la subduction d'un océan

Quand on parcourt le massif du Monviso d'Est en Ouest depuis la plaine du Pô, on marche d'abord sur des roches vert sombre : des péridotites du manteau très riches en serpentine. Au-dessus, on trouve des roches massives, dont les rares niveaux rouges et verts sont constitués de grenat et d'omphacite : ce sont d'anciens gabbros métamorphisés dans le « faciès des Eclogites ». Au-dessus, se trouvent d'anciens basaltes recouverts de roches d'origine sédimentaire, aux minéraux du « faciès des Eclogites ». Le massif du Monviso constitue finalement une écaille de lithosphère océanique, qui a été entraînée jusqu'à ~80 km de profondeur dans une zone de subduction il y a 45 Ma, avant d'être détachée de la plaque





*Meta-gabbro, massif du Queyras (en haut)
Grenat, massif de Dora Maira (en bas)*

plongante et de remonter jusqu'en surface.

Il en est de même pour le massif du Queyras, formé de roches d'origine sédimentaire contenant des blocs formés d'anciens pyroxènes magmatiques entourés de glaucophane et de lawsonite. Ces anciens gabbros et les sédiments qui les recouvraient ont été métamorphisés dans le faciès des Schistes Bleus, arrachés à la plaque plongeante à ~40-60 km de profondeur avant de remonter. Les roches du Monviso et du Queyras sont donc les reliques d'un ancien océan aujourd'hui refermé.

Les roches du massif de Dora Maira dans les Massifs Cristallins Internes sont de nature très différente, c'est de la croûte continentale.

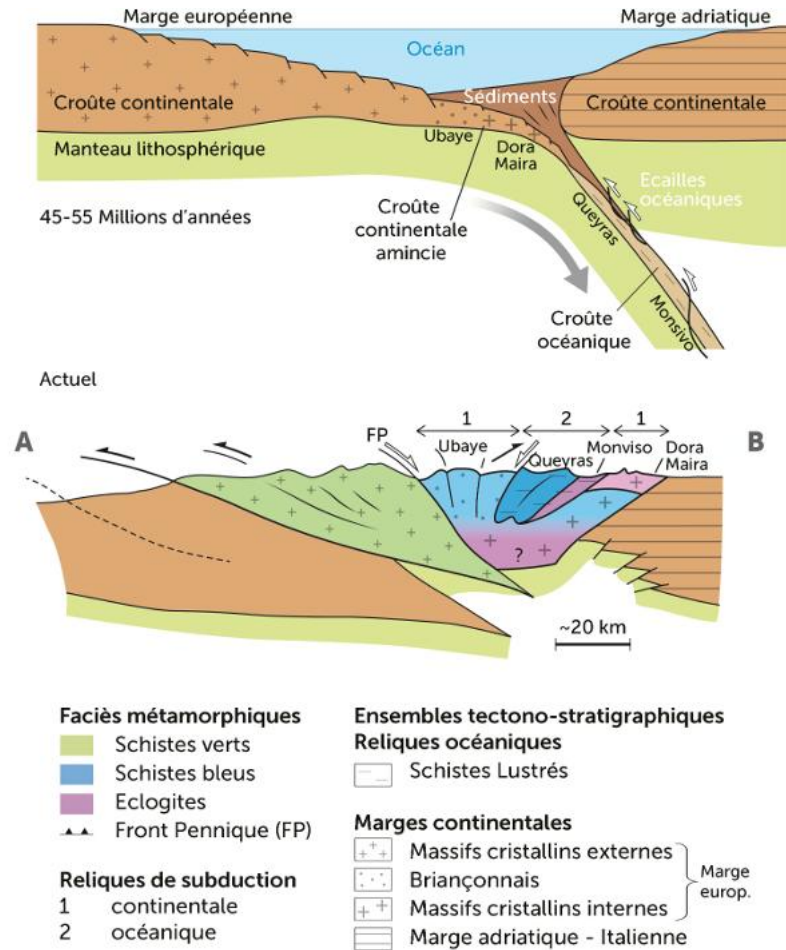
Cependant, on y trouve des minéraux (grenat rose, coesite) qui témoignent d'un enfouissement à plus de 100 km de profondeur, quelques millions d'années après le Monviso ! Ces roches formaient la marge continentale européenne très amincie, entraînée en profondeur par le poids de la plaque océanique.

Les minéraux métamorphiques des roches alpines sont donc de précieux indices qui nous racontent l'histoire de la région. Il y a ~200 Ma, la lithosphère continentale qui appartenait à la Pangée a été fracturée, étirée, et donc fortement amincie. De la lithosphère océanique s'est

formée à partir de ~160 Ma, séparant la plaque européenne de la plaque Adriatique ou Italienne.

La vie de ce petit océan Ligure fut de courte durée. Il y a ~100 Ma, la remontée de l'Afrique vers l'Europe a provoqué une compression, entraînant la subduction de la plaque européenne sous le microcontinent Adriatique. Entraînées par le poids de cette plaque océanique plongeante, les roches de la marge continentale européenne très amincie ont ensuite plongé à leur tour dans la zone de subduction. On parle de subduction continentale.

A l'arrière, la marge non amincie n'a pas pu plonger sous le microcontinent Adriatique (même densité), ce qui a entraîné la phase de collision continentale vers ~35 Ma. Elle a épaissi la croûte et formé les Massifs Cristallins Externes.



Métamorphoses cristallines

On ne badine pas avec les métamorphoses.
Milan Kundera, L'insoutenable légèreté de l'être, 1982

Du multiple à l'unique, de l'unique au multiple

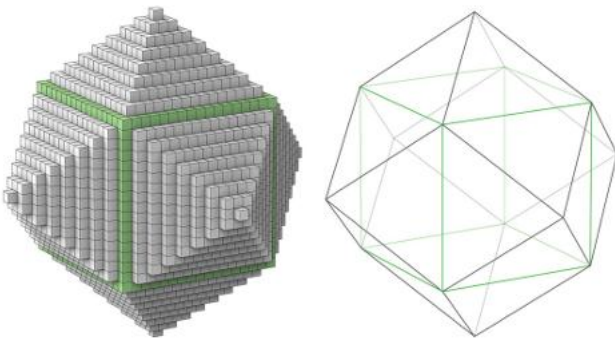
Pour les philosophes de l'Antiquité comme Aristote, la matière minérale ne pouvait pas avoir de formes propres. Elle ne pouvait avoir que des formes accidentelles, dues à des causes extérieures.

A la fin du XVIII^e siècle, Jean-Baptiste Romé de l'Isle (1736-1790) étudie les cristaux dans toutes leurs métamorphoses avec l'attention la plus scrupuleuse. Il montre que, pour une espèce minérale donnée, toutes les formes cristallines se déduisent d'une seule forme dite primitive.

Vers 1780, René-Just Haüy (1743-1822) « dissèque » les cristaux afin d'en extraire un « noyau », une forme cristalline de base.

Il montre que toutes les autres formes s'expliquent par l'empilement sur ce noyau de petites « briques » appelées molécules intégrantes.

Plus tard, vers 1850, Auguste Bravais (1811-1863) construit un modèle mathématique, encore d'actualité, inspiré de cette théorie. La structure cristalline est représentée par un ensemble de



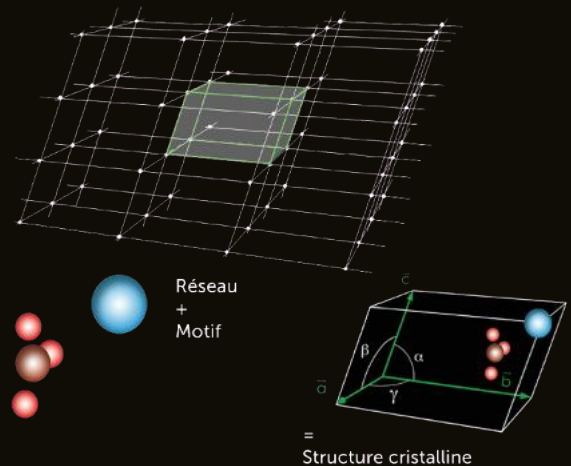
Solides primitifs selon Haüy

points, appelés nœuds, espacés les uns après les autres selon trois distances constantes, dans trois directions de l'espace. A chaque point est associée une quantité de matière, toujours la même, appelée motif.

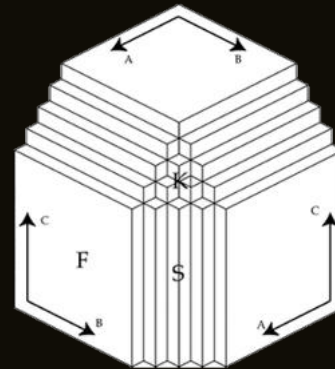
Bravais propose aussi la première théorie des formes cristallines. Il postule que les faces les plus stables sont celles qui ont les plus fortes densités de nœuds.

En 1955, Piet Hartman et William G. Perdok introduisent dans leur théorie, les liaisons les plus fortes entre les atomes, décrites par des vecteurs. Les faces les plus stables sont celles décrites par ces vecteurs et/ou leurs différences : les faces F (*flat* : plates), S (*stepped*, à marches) et K (*kinked*, crantées).

Ces théories ne sont pas suffisantes. Certaines formes résistaient. Plus tard Jean-Claude Boulliard et Micheline Sotto montrent que la stabilité des faces peut être commandée par des structures en surface différentes de celles du volume. Ces structures sont dues à un dépôt d'éléments chimiques différents de la composition du minéral.



Structure cristalline selon Bravais : nœud de la maille du réseau, motif, structure finale



Les différents types de faces cristallines selon Hartman et Perdok

Le XIX^e siècle a vu s'installer une science de l'ordre, le XX^e siècle a été celui de la recherche d'explications du désordre.
Préface Hubert Curien, *Le cristal et ses doubles*, 2010

Les anomalies

Les théories du XIX^e siècle décrivent des cristaux parfaits. Or, la nature a toujours bien résisté aux intuitions et aux théories parfaites élaborées par l'esprit humain. Cette résistance est apparue très tôt.



Quartz citrine, Zambie (en haut)
Aragonite, Espagne (en bas)
Coll. Minéraux, Sorbonne Université

En effet, Romé de L'Isle postule que les cristaux ont des formes convexes, mais constate que les cristaux de gypse « fer de lance » de Paris ont une partie concave.

Il l'explique comme un groupement orienté de deux (demi-)cristaux : une macle. Les macles ont des formes variées : en croix, en cœur, etc.

Toutefois, certaines macles n'ont pas de parties concaves et laissent à penser que l'on a un seul cristal. Ainsi, l'aragonite, sous forme de colonne à six faces planes paraît être hexagonale. En fait, c'est une macle à trois individus de plus basse symétrie.

L'épitaixie est un phénomène proche où le groupement est dû à la croissance orientée d'individus d'une espèce sur le cristal d'une autre espèce. Au Boléo

(Mexique) on trouve des formes en étoile, qui combinent six pyramides de cumengeite épitaxiées sur les six faces carrées d'un cube de boléite.

Les minéralogistes du XIX^e siècle sont confrontés à d'autres anomalies. La première est l'existence de cristaux « tordus », avec des arêtes et des faces courbes, comme les quartz alpins « gwindels ».

La seconde anomalie est un paradoxe : des cristaux cubiques réagissent à la lumière comme s'ils n'étaient pas cubiques. Ne sont-ils que presque cubiques ? Sont-ils des macles invisibles ?

Les réponses ont attendu l'invention du microscope électronique à partir de 1933. On a pu sonder les cristaux et découvrir des défauts qui génèrent des contraintes produisant les anomalies optiques. Pour les gwindels, Patrick Cordier a démontré qu'ils étaient dus à des défauts appelés dislocation-vis. Ils peuvent aussi expliquer les « nœuds papillons » de la stilbite ou les « pliages en genou » de la stibine.



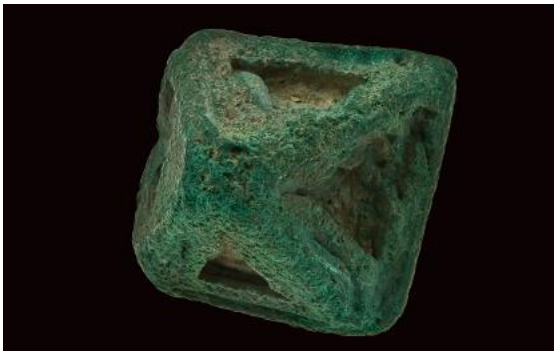
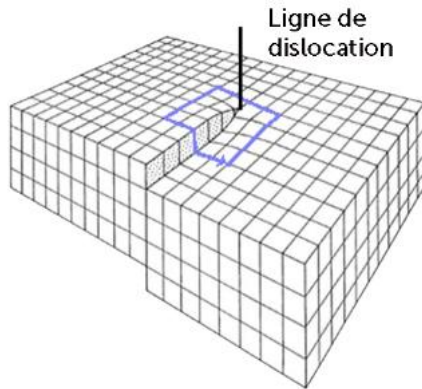
Cumengeite épitaxiée sur boléite
Boléo, Mexique



Quartz tordu « Gwindel »
Val Giuf, Grisons, Suisse



Stibine, pliage en genou
Wuling, Jiangxi, Chine
Coll. Minéraux, Sorbonne Université



Les formes de croissance

La naissance de la cristallographie à la fin du XVIII^e siècle s'est accompagnée de recherches sur les mécanismes de croissance : du cristal presque parfait à une masse amorphe.

Dans la croissance lente, idéale, les atomes se déposent couche par couche de sorte que les surfaces demeurent planes. Ce n'est pas toujours le cas. Le microscope électronique montre qu'il existe des sortes de pyramides aplaties avec des « marches » en spirale qui résultent de l'émergence de dislocation-vis.

Lorsque la croissance est de plus en plus rapides, on observe les cas suivants :

Les trémies présentent des parties creuses à la place des faces lisses, alors que les sommets et les arêtes sont bien formés. Les cristaux de sel des marais salants sont souvent en trémies.

*Pyrite (cristal parfait), Espagne
Schema croissance marche
Cuprite (trémie), France
Coll. Minéraux, Sorbonne Université*

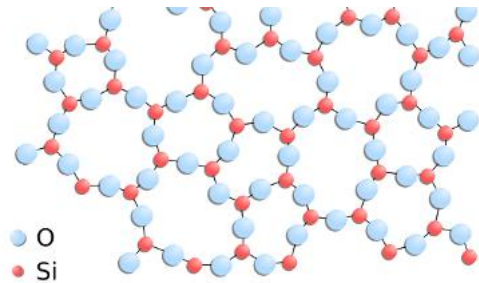
Les **dendrites** apparaissent lorsque les atomes n'ont pas le temps de former des couches complètes. Les surfaces ne sont plus lisses et des excroissances émergent. Elles croissent et se développent comme des branches, d'où des formes en flocons de neige, en sapins ou en rameaux. Les cuivres et argents natifs sont des exemples de croissance en dendrites.

Les **fibres** apparaissent lorsque des cristaux se gênent les uns les autres. Sur une surface plus ou moins plane, la croissance latérale est gênée, seule la croissance vers le haut est libre, les cristaux sont alors allongés, en fibres, comme dans les amiantes. Lorsque la croissance démarre à partir d'un centre, on a des formes sphériques.

Les **masses polycristallines** n'ont pas de forme spécifique. Elles prennent celle de la cavité où elles ont crû. La forme en boule des agates vient de ce qu'elles ont rempli d'anciennes bulles de gaz. Les stalactites et les masses mamelonnées sont la conséquence de l'écoulement d'eau saturée en minéraux qui dépose la matière en fines couches successives.



*Argent (dendrites), Chihuahua, Mexique
Reibeckite (fibres), Afrique du Sud
Agate polycristalline, Bresil
Coll. Minéraux, Sorbonne Université*



Structure amorphe

Dans certaines conditions les atomes n'ont pas eu le temps de s'organiser. Ils ont une **structure amorphe**, comme les obsidiennes issues d'une roche fondue vite refroidie. L'opale amorphe, est un empilement de petites billes de silice qui n'ont pas eu le temps de cristalliser.

Les formes cristallines : une question d'environnement

La croissance cristalline peut être modifiée par la circulation des fluides et leur concentration.

Lorsque le cristal est environné de façon homogène par le fluide minéralisateur, la forme du cristal est celle que l'on attend des lois de la cristallographie.

Si la solution s'écoule dans une direction précise, le cristal s'allonge dans cette direction. Ce qui explique certaines formes non cubiques de pyrite ou de fluorite.

Les minéraux ne sont pas toujours éternels. Une nouvelle circulation de fluides moins concentrés les dissout. On passe ainsi de la croissance à la dissolution. Les sommets et les arêtes sont arrondis et les surfaces sont bombées. Certains défauts sont des sites de dissolution : il en résulte la formation de canaux vides ou de parties creuses sur les faces. Le béryl présente souvent des formes de dissolution. Les canaux ont une base hexagonale en accord avec la symétrie de ce minéral.



Béryl (dissolution), Ukraine
Coll. Minéraux, Sorbonne Université

D'un minéral à l'autre

La paramorphose

Certains minéraux cristallisent à une température élevée et se transforment, en se refroidissant, en un minéral de même formule mais de structure interne différente. Ceci, en gardant la forme du premier cristal. On a dans ce cas ce que l'on appelle une paramorphose.

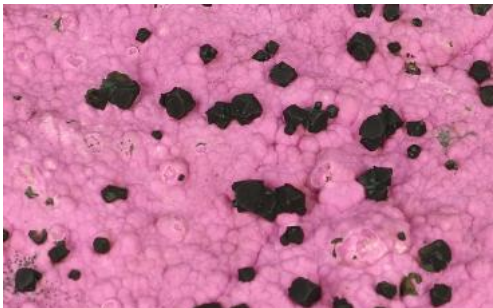
Un minéral très fréquent l'illustre : le quartz. Au-dessus de 573°C, il est hexagonal, on parle alors de quartz-béta. En dessous, on a le quartz-alpha de structure trigonale. La transformation alpha-béta ou béta-alpha, due à de petits déplacements d'atomes, est rapide. Le quartz-béta n'existe donc pas aux pressions atmosphériques et aux températures ordinaires.

Le sulfure d'argent Ag_2S change de structure à 177°C. Au-dessus de cette température, nous avons l'argentite cubique et en-dessous l'acanthite monoclinique. La transformation est rapide.

Comme les conditions de formation sont souvent au-dessus de 177°C, les formes cristallines d'acanthite sont rares et les cristaux cubiques que l'on voit dans les collections, sont des paramorphoses d'argentite en acanthite.



*Quartz alpha, Madagascar
Argentite, Chili
Coll. Minéraux, Sorbonne Université*



*Limonite après pyrite maclée, Colombie
Kolwezite après cuprite sur dolomite cobaltifère, RDC
Serpentine après olivine, Norvège
Coll. Minéraux, Sorbonne Université*

La pseudomorphose

Lorsque l'environnement chimique change, les cristaux peuvent être petit à petit attaqués et se transformer en un autre minéral. Tout en gardant plus ou moins bien la forme du cristal initial. On parle alors de pseudomorphose.

L'oxygène en produit, car il oxyde quelques minéraux. Ceux contenant des ions ferreux Fe^{2+} , par exemple, s'oxydent en ions ferriques, Fe^{3+} , comme la pyrite ou la sidérite, qui se transforment en oxydes de fer tout en gardant la forme cristalline initiale.

Outre l'oxygène, il y a le gaz carbonique. Dissous dans l'eau il donne l'acide carbonique. La cuprite, un oxyde de cuivre, y est sensible et se transforme en malachite, un carbonate de cuivre. La cuprite de Kolwezi, en République démocratique du Congo, s'est formée dans un environnement où l'on trouve des minéraux de cobalt. Elle se pseudomorphose en kolwezite : un carbonate de cuivre et cobalt.

L'eau joue aussi un rôle. Le minéral le plus important du manteau supérieur est l'olivine un silicate de magnésium et de fer (sous forme d'ions ferreux). Au contact

de l'eau, elle se pseudomorphose en serpentines (silicates de magnésium hydratés).

Les pseudomorphoses vont dans un sens comme dans l'autre. Ainsi, à l'apport d'oxygène correspond le retrait de l'oxygène. La cuprite, par exemple, se forme dans la zone d'oxydation des gisements de cuivre. Dans la zone de cimentation où la réduction prend le dessus sur l'oxydation, elle se pseudomorphose en cuivre natif, comme à Rubtsovsk en Russie.

La périmorphose et autres cohabitations

Il y a des situations où la forme, plus ou moins cristalline, ne résulte pas d'un minéral seul.

Un cas curieux est celui de la périmorphose. Elle apparaît lorsqu'un cristal est recouvert par un autre minéral qui, pour ainsi dire, le moule. Ce cristal est ensuite dissout par la circulation de fluides. Il ne reste que le moule.

Ce phénomène impose que le cristal moulé soit suffisamment soluble et que le minéral formant le moule soit suffisamment insoluble. Ces conditions sont respectées dans les périmorphoses de quartz sur calcite ou fluorite.





*Calcite de Bellecroix, France
Lutécite, Paris, France
Coll. Minéraux, Sorbonne Université*

Pour croître le cristal doit être dans un milieu qui ne soit pas un obstacle : les plus beaux cristaux se développent dans des cavités, dans des roches fondues ou des milieux visqueux. Une situation plus étrange est celle où le milieu est du sable. Des minéraux peuvent y croître en contournant les grains et imposer leurs formes cristallines : on a ce qui ressemble à des cristaux de sable.

C'est le cas de la calcite de Bellecroix à Fontainebleau : ses cristaux sableux apparaissent grâce la circulation d'eau au travers d'un banc de craie recouvrant une couche de sable.

Un autre exemple célèbre est celui des roses des sables. Elles se forment en profondeur à la limite supérieure où stagnent des eaux chargées en sulfate de calcium. Il y a aussi des fluorites sableuses, plus rares.

Le minéral peut aussi croître lorsque le milieu perd de la matière. C'est ce qui arrive dans certains fossiles : la matière organique d'un animal ou d'une plante, après sa mort, se décompose, disparaît et peut être remplacé par un minéral : quartz, calcite, pyrite, ...

Métamorphoses de la matière organique

Les corps organisés, quelles que soient leur composition et leur origine, à quelque classe qu'ils appartiennent, s'altèrent plus ou moins rapidement dès que la vie les a quittés et qu'ils restent exposés à l'action des agents atmosphériques, de l'air, de la lumière, de la chaleur et de l'humidité. Leurs éléments, l'hydrogène, l'oxygène, le carbone, l'azote et les substances terreuses qu'ils contiennent se séparent pour entrer dans de nouvelles combinaisons, ou bien retournent à l'atmosphère, à l'eau et à la Terre. Telle est, comme nous avons déjà eu occasion de le dire, la loi générale de la nature.

Adolphe D'Archiac

Introduction à l'étude de la paléontologie stratigraphique, 1864

De l'organique au minéral

Lors de la mort d'un organisme, la matière organique qui le compose est rapidement détruite par d'autres organismes, nécrophages, bactéries, insectes, ...

Les restes plus durs ou minéralisés comme les os, dents, coquilles et bois, se dégradent quant à eux beaucoup plus lentement, et peuvent même être conservés. Après leur enfouissement dans



les sédiments, ces parties minéralisées vont alors être remplacées par de nouveaux minéraux. C'est la fossilisation.

On estime les chances de fossilisation d'un organisme à moins de 0,1%. La représentativité du registre fossile est donc faible spatialement et temporellement. La qualité de la fossilisation dépend largement des conditions environnementales dans lesquelles elle se déroule et d'une conjonction de plusieurs facteurs. Un milieu de dépôt pauvre en oxygène avec un enfouissement rapide sont des conditions qui facilitent le processus.



*Diptère (mouche), Miocène
Céreste (Alpes-de-Haute-Provence)
Coll. géosciences, Sorbonne Université*

Dépôts à conservation exceptionnelle

Les éléments les plus durs et les plus minéralisés sont donc ceux qui se fossilisent le mieux. Le squelette des requins est constitué principalement de cartilage et se préserve très rarement, contrairement à leurs dents dont l'émail est particulièrement résistante.

A l'opposé, la chitine des insectes, ou la kératine de la peau, des poils ou des ongles, sont beaucoup plus fragiles et se fossilisent très exceptionnellement. Les gisements dans lesquels sont trouvés ce type de fossile sont appelés Konservat-Lagerstätten (dépôt à conservation exceptionnelle).

Ils permettent d'accéder à des informations habituellement inaccessibles avec les fossiles classiques ne comprenant que des coquilles et des os, comme par exemple des

couleurs résiduelles de coquillages, la structure interne des os, des feuilles, du bois, ou la trace de certains organes.

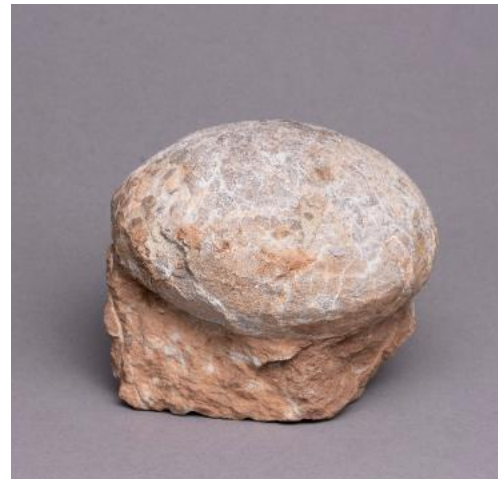
Les formes fossiles

La fossilisation préserve parfois non seulement les corps, mais aussi la trace des activités. La paléoichnologie étudie ainsi les traces de terriers, les pistes ou les empreintes fossiles, permettant de reconstituer le milieu de vie, parfois le comportement et les interactions des individus. Il est souvent difficile d'attribuer ces traces à un organisme précis. Si certains vers, crustacés ou coquillages ont été retrouvés dans leurs terriers, il est rare de trouver l'animal fossilisé au bout de la piste laissée par ses traces de pas. En outre, plusieurs espèces très différentes peuvent produire le même type de traces, ou inversement.

Comme pour les espèces biologiques, chaque type de trace porte un nom spécifique, indépendant de l'espèce qui l'a produite. On les appelle des ichnoespèces.

De la même façon, l'espèce ayant produit des œufs fossilisés est rarement identifiable avec précision. Les embryons étant rarement préservés, ils sont donc classés en espèces particulières : les ooespèces.

Fossiles plus surprenants, mais très fréquents, les bromalites regroupent les matières fécales et régurgitations fossiles. Ils apportent des éléments très



*Oeuf de dinosaure indéterminé, Mésozoïque
France, Coll. géosciences, Sorbonne Université*



*Coprolithes d'hyène des cavernes
Grotte d'Artenac (Saint-Mary, Charente)
Coll. Musée d'Angoulême*



*Feuille fossile dans travertin calcaire
Sézanne (Marne)*

importants sur la paléobiologie et les comportements alimentaires. Si les producteurs de ces bromalites sont souvent inconnus, il arrive que quelques formes, très caractéristiques, puissent être attribuées avec une certaine fiabilité. Ainsi un coprolithe, une déjection fossilisée de 44 cm pour 7 kg, a-t-il été attribué au *Tyrannosaures rex*.

Signalons un autre type de fossilisation particulier. Celle produite par la formation des travertins et des tufs. Ces deux roches se forment aux abords de rivières ou de sources fortement agitées et très chargées en carbonate de calcium : des sources chaudes pour les travertins et eaux froides pour les tufs.

Sous certaines conditions, l'eau projetée sur les berges peut déposer progressivement sur les plantes alentours une couche de calcaire de plus en plus épaisse, à la manière de l'eau de douche sur un robinet. Au fur et mesure de leur encroûtement, les plantes meurent, se dégradent, puis disparaissent, ne laissant que le moule de leur présence.

A la fin du XIX^e siècle, Ernest Munier-Chalmas, chargé de recherche à la Sorbonne, eu l'idée de verser un mélange de plâtre dans les cavités laissées par le

travertin de Sézanne dans la Marne, puis de plonger l'ensemble dans l'acide. Le calcaire, contrairement au plâtre, s'est dissout, ne laissant que le moulage des végétaux et des animaux qui avaient été encroutés par le calcaire. Il en résulte des moulages exceptionnels et uniques de graines, crustacés, mais surtout de fragiles fleurs préservées en trois dimensions ! L'ensemble de ces moulages est aujourd'hui précieusement conservé dans les collections de Sorbonne Université. Le même phénomène de pétrification est actuellement en cours et peut être observé au pied de la Cascade des tufs, près d'Arbois dans le Jura, ou à proximité des cascades d'Ouzoud au Maroc.

Les bâtisseurs

Très tôt dans l'histoire de la vie, les organismes ont créé des structures minéralisées. Les plus anciennes ont 3,5 milliards d'années et sont de simples précipitations calcaires produites par des cyanobactéries (« algues bleues »). Elles forment des structures appelées stromatolithes et sont parmi les plus anciennes traces du vivant. Elles adoptent des morphologies très variées : de petites « billes » isolées jusqu'à de spectaculaires boules ou colonnes. Les stromatolithes peuvent former de véritables récifs ou massifs calcaires atteignant parfois 3 km d'épaisseur comme dans l'Anti-Atlas Marocain. Les cyanobactéries ont joué un rôle déterminant dans l'apparition de la



*Stromatolithe, Protérozoïque, Pilbara (Australie)
Coll. géosciences, Sorbonne Université*

vie, en participant très largement à la production de l'oxygène de l'atmosphère.

Les cyanobactéries photosynthétiques sont encore très présentes actuellement, mais toutes ne produisent pas de stromatolithes, loin de là. Leur prolifération pose divers problèmes comme l'anoxie des eaux ou la libération de métabolites toxiques. Elle est largement liée aux activités humaines, en particulier les apports excessifs en nitrates et phosphates. Les constructions de stromatolithes actuelles sont rares, en particulier pour les formes récifales marines ou lacustres dont les plus connues sont celles de *Shark Bay* en Australie. Cependant, des formes plus petites sont connues autour de sources chaudes sulfureuses ou pétrifiantes comme à Réothier dans les Hautes-Alpes.



Rudistes, Montmérac (Charente)
Coll. Sorbonne Université

Dépôts à concentration exceptionnelle

Beaucoup de roches contiennent des fossiles, parfois en très grosses quantités. Elles peuvent résulter de l'accumulation et de la concentration de coquilles comme pour les lumachelles, ou de la présence d'anciens récifs formés de coraux ou de coquillages coloniaux comme les récifs de rudistes.

La craie, quant à elle, résulte de l'accumulation de fragments du squelette d'algues planctoniques, en particulier les coccolithes, et forment des couches de plusieurs centaines de mètres.

Lorsque la grande densité de fossiles 35

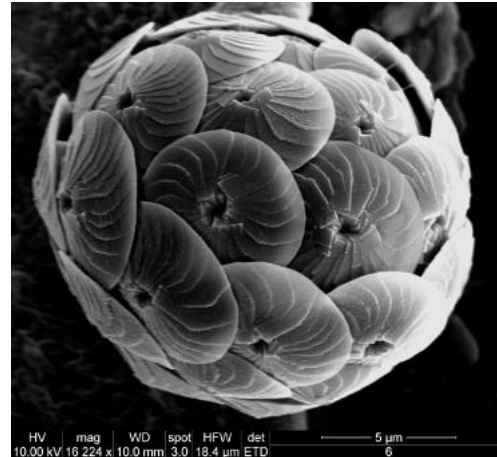
résulte de concentration et accumulation, on les appelle Konzentrat-Lagerstätten (dépôt à concentration exceptionnelle). Ils proviennent soit de dépôts sur de longues périodes en l'absence d'autres sédiments, ou d'un unique évènement catastrophique comme une crue brutale.

Plusieurs gisements paléontologiques du Bassin de Paris peuvent être considérés comme des Konzentrat-Lagerstätten, mais le plus emblématique est probablement celui de Grignon (Yvelines).

Daté du Lutétien (47,8 à 41,2 millions d'années), les sédiments qui le composent se sont déposés dans une mer couvrant le Bassin de Paris et qui formait un golfe communiquant avec l'Atlantique et la Manche.

On y trouve déposée une faune de mollusques exceptionnellement riche, représentée par plus de 800 espèces. En plus d'une accumulation exceptionnelle, les coquilles de Grignon ont conservé leurs motifs colorés. Blanches en lumière naturelle, des points, bandes et autres zébrures apparaissent comme par magie sous éclairage UV !

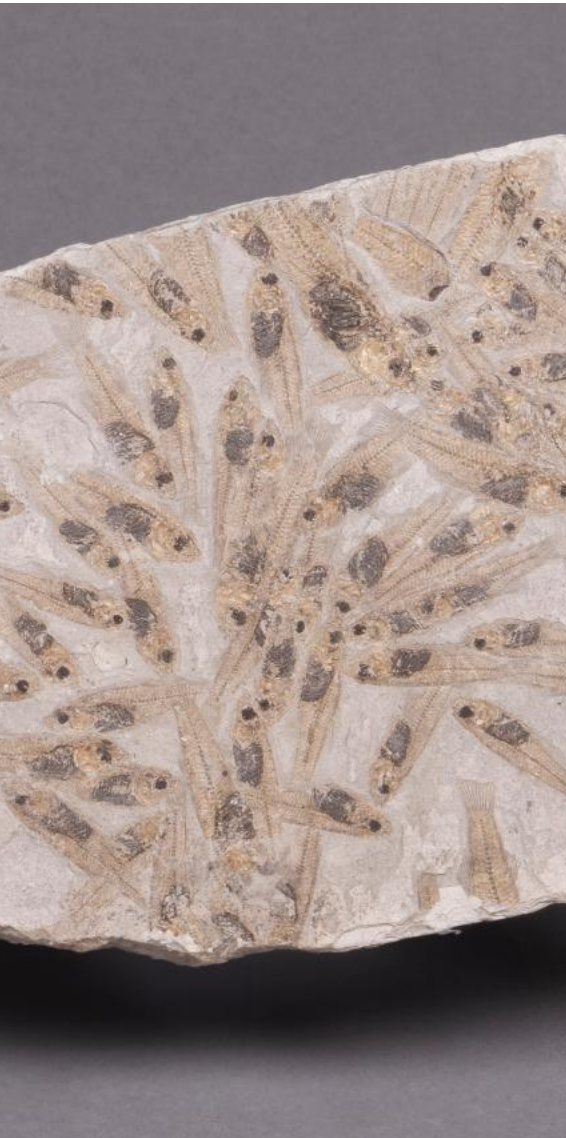
En plus d'être un Konzentrat-Lagerstätten, le gisement de Grignon est donc aussi un Konservat-Lagerstätten.



*Coccosphère (assemblage de coccolithes
Microscope électronique, 2011*



*Corail, origine inconnue, Crétacé
Coll. géosciences, Sorbonne Université*



Lorsque les accumulations proviennent de débris végétaux en grande quantité, la fossilisation peut aboutir à la formation de charbon. Les gisements les plus riches en charbon datent du Carbonifère (-360 Ma – 295 Ma), période au climat tropical ayant favorisé la présence de vastes forêts luxuriantes et parfois marécageuses. Le charbon s'est donc formé par l'accumulation de grandes quantités de débris végétaux à fleur d'eau stagnante de type tourbière.

La faible quantité d'oxygène ralentit la décomposition, et permet à une partie de la matière organique d'échapper à la destruction complète. Au fur et à mesure de son enfouissement, et donc de l'augmentation de la température de l'environnement, la matière végétale passe par plusieurs étapes.

Elle va d'abord perdre son eau et les éléments volatiles (CO_2), puis concentrer le carbone. On appelle ce processus la carbonisation ou houillification. Le processus complet demande entre 10 et 100 millions d'années. En fonction de sa teneur en carbone, le charbon sera appelé différemment : tourbe (50-55%), lignite (55-75%), houille (75-90%), puis anthracite (>90%). Plus la teneur en carbone est élevée, plus le pouvoir calorifique du charbon est important.

Ces gisements exceptionnels sont grandement recherchés et exploités par les groupes humains partout dans le monde.

Poissons (Placosmilia sp.) asphyxiés dans une mare asséchée, Oligocène Actinopterygii, Coll. géosciences, Sorbonne Université

Métamorphoses de la matière

Il y a presque 10 000 ans, en ces temps lointains où l'humanité s'initiait à l'agriculture puis à l'élevage en complément de la chasse, de la pêche et de la cueillette, se développaient aussi les arts du feu, notamment la céramique puis, plus tard, la métallurgie.

Le gypse, une pierre qui grille au feu

Autour des foyers, nos ancêtres avaient depuis bien longtemps remarqué que certaines pierres résistaient bien aux flammes, que d'autres éclataient et d'autres encore se métamorphosaient en crépitant. Parmi ces dernières, l'une produit une poudre blanche, qui mélangée à l'eau, a des qualités de liant et d'enduit. Cette roche, « la pierre à plâtre », les grecs anciens l'appelaient γύψος (gýpsos) : la « (pierre) qui grille au feu », dont l'origine dérive peut-être d'un mot sémite plus ancien que l'on retrouve dans l'arabe جبس, (*jibs*).



Les plus anciennes traces d'utilisation du plâtre remontent au VIII^e millénaire avant J.-C., au Proche-Orient, notamment dans la ville de Çatal Höyük, dans le centre de la Turquie, où les murs en brique étaient recouverts de plâtre. En 2800 avant J.-C, les Égyptiens ont également utilisé du plâtre comme liant pour jointoyer les pierres de la pyramide de Kheops à Gizeh. Travaillé avant de durcir ou moulé, seul ou avec d'autres matériaux, le plâtre se métamorphose en décoration et œuvre d'art.

Qu'est-ce que le gypse ? Comment se forme-t-il ? Que se passe-t-il lors de sa transformation en poudre de plâtre ? Quels sont les propriétés et les différents usages du plâtre, hier et aujourd'hui ? Pourquoi le plâtre de Paris est-il si réputé ? Autant de questions que nous allons aborder dans ces quelques pages consacrées à ce minéral et à ses métamorphoses.



Gypse sous deux formes cristallines : saccharoïde (à la base) et pied d'alouette (grands cristaux de couleur miel sur les deux tiers supérieurs).

Diversité des formes cristallines

Le gypse est à la fois un minéral, du sulfate de calcium hydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), et une roche sédimentaire d'origine évaporitique. Le gypse (minéral) existe sous diverses formes, soit en grands cristaux aux formes acérées : gypse fer de lance, pied d'alouette, soit en petits cristaux fibreux ou saccharoïdes, c'est-à-dire ressemblant à des cristaux de sucre.

Le gypse peut également cristalliser en englobant d'autres minéraux, comme les grains de quartz (sable) pour donner une rose des sables.

Rayable à l'ongle, il a une faible dureté (2



*Rose des sables, Mexique
Coll. minéraux, Sorbonne Université*

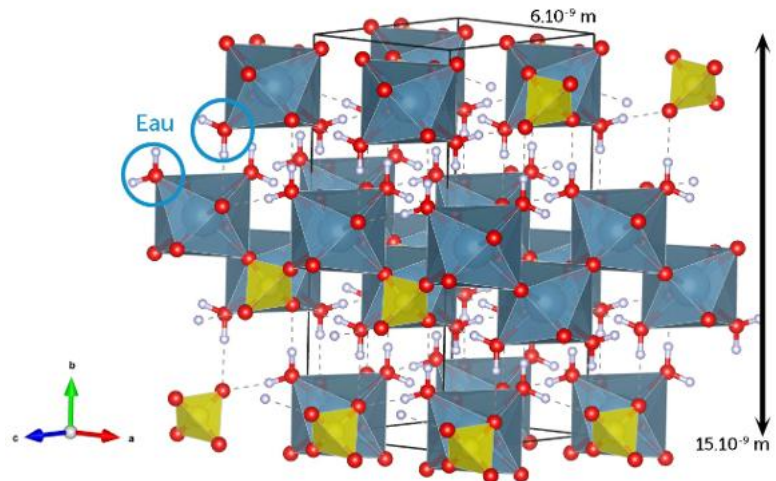
sur l'échelle de Mohs). Il est également très soluble dans l'eau (2 g par litre à 20°C) et peut donner naissance à des eaux dites séléniteuses, à cause de leur couleur blanche translucide rappelant celle de la Lune. Le gypse est de faible densité (2,3). Il acquiert une certaine plasticité sous de fortes pressions, comme dans les massifs montagneux où des couches de gypse peuvent constituer des niveaux de glissement entre deux masses rocheuses.

De l'eau au cœur du minéral

Le gypse est un minéral hydraté, c'est-à-dire que la molécule d'eau est incluse dans sa structure cristalline, où elle compte pour 20% du poids du minéral.

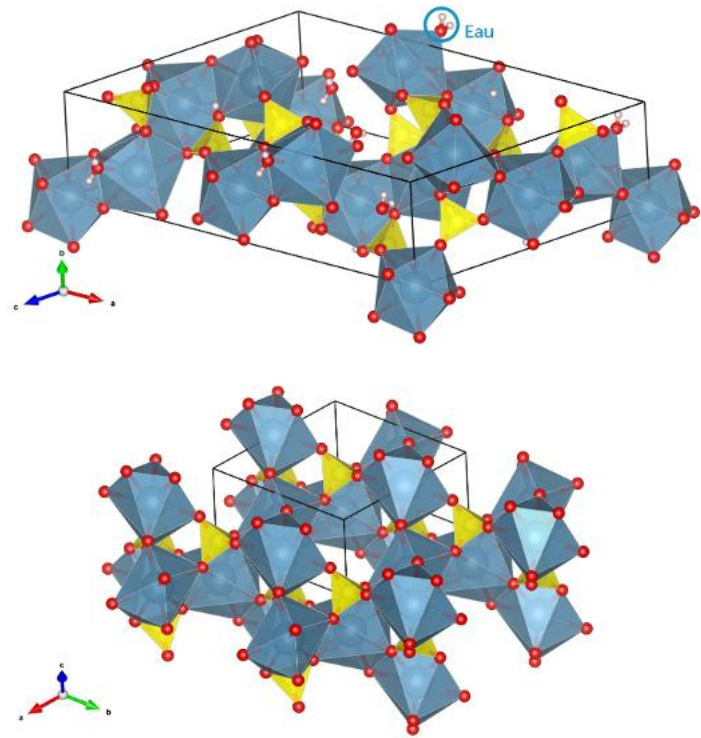
Le gypse cristallise selon une maille monoclinique ; l'une des sept catégories de classement des cristaux dans l'espace tridimensionnel. Les liaisons entre les ions Ca^{2+} et SO_4^{2-} sont fortes et dues aux échanges d'électrons. Tandis que les liaisons des molécules d'eau avec les autres atomes sont électrostatiques. Les molécules d'eau s'organisent ainsi dans un plan cristallographique qui constitue une zone de fragilité du minéral qu'on appelle un plan de clivage.

*Structure cristalline du gypse.
Les octaèdres, en bleu, sont constitués d'un atome de calcium au centre et d'un atome d'oxygène à chaque sommet.
Les tétraèdres, jaunes, sont constitués d'un atome de soufre au centre et au sommet de quatre atomes d'oxygène.*



Sous l'effet d'une augmentation de la température, les propriétés physiques du gypse sont modifiées par le départ des molécules d'eau. Lorsque l'on chauffe du gypse dans un tube à essai de la condensation apparaît sur les parois de verre, prouvant que de l'eau est libérée. Vers 120°C, la teneur en eau du gypse passe de 20% à 6% et le minéral commence à se transformer du point de vue cristallographique. Il devient tout d'abord du sulfate de calcium hémihydraté, appelé bassanite, qui ne contient plus qu'une demie molécule d'eau ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$). La perte de 1,5 molécules d'eau augmente la densité du minéral (2,73) et impose une réorganisation de la maille cristalline qui devient rhomboédrique.

Chauffé à 200°C, le gypse devient du sulfate de calcium anhydre (CaSO_4), ou anhydrite soluble, qui cristallise dans une maille hexagonale. Ce minéral, de densité 2,96 et de dureté 3,5, n'est plus rayable à l'ongle. Chauffé à 350 °C, l'anhydrite soluble se réorganise dans une maille orthorhombique pour devenir de l'anhydrite insoluble.

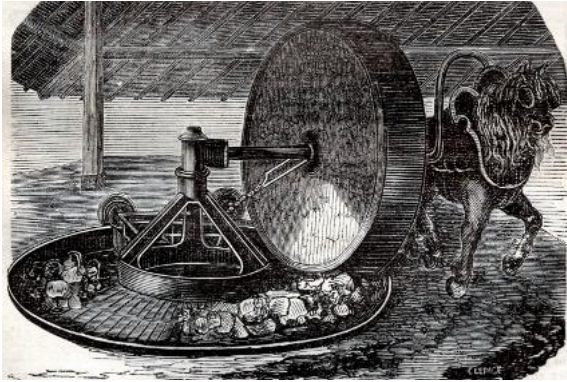


Structure cristalline de la bassanite (gauche)
Les molécules d'eau sont cerclées de bleu.

Structure cristalline de l'anhydrite (droite)

Du tube à essai aux procédés industriels

42 La fabrication du plâtre compte trois étapes principales : le broyage du minerai de gypse dans une machine à concasser ; la calcination, pour



Moulin à meule à un cheval pour le broyage du plâtre (extrait de René, 1861, Archives du Musée du plâtre).

obtenir des matières microcristallines par réactions de déshydratation ; et enfin la réduction en poudre fine dans un moulin.

La calcination peut se faire avec deux procédés industriels différents : sous atmosphère sèche pour les plâtres les plus courants ; ou sous atmosphère humide et sous une pression de 2 à 7 fois la pression atmosphérique pour la fabrication de plâtre bien cristallisé, très fin et particulièrement résistant à la compression. Le plâtre courant est constitué d'un mélange de bassanite avec

de l'anhydrite soluble et insoluble en proportion plus ou moins importante. Une fois la poudre de plâtre obtenue, le produit est ensuite formulé, c'est-à-dire mélangé avec différents ajouts, comme de l'amidon -pour améliorer l'adhésion entre le plâtre et le carton-, des colorants, ou encore des retardateurs pour allonger les temps de prise du plâtre. Il existe ainsi un grand nombre de variétés de plâtre, adaptées chacune à un usage.

Un matériau polyvalent ... résultat d'une métamorphose réversible

La poudre de plâtre se dissout dans l'eau (9,08 g par litre d'eau à 20°C) pour ensuite s'épaissir et finir par durcir en dégageant de la chaleur.

C'est le chimiste Antoine Lavoisier qui, vers 1764, explique le mécanisme de la prise du plâtre, montrant que le matériau réincorpore l'eau perdue lors de la cuisson pour reformer du gypse lors de la phase de solidification. La transformation du gypse en poudre de plâtre est donc une métamorphose réversible en somme.

Le plâtre est surtout utilisé dans la construction, pour monter des cloisons, comme enduit, comme matériau de scellement ou mortier, et pour réguler la prise du ciment. Sa bonne résistance au feu en fait un matériau idéal dans la construction. En effet, au cours d'un incendie, l'eau contenue dans le plâtre est vaporisée, absorbant ainsi la chaleur et retardant la montée en température, sans libérer aucun produit toxique. Le plâtre a aussi d'autres usages plus spécifiques : plâtre chirurgical ou dentaire, moulage artistique, etc. Autrefois, il avait même un usage agricole comme amendement dans les prairies ou pour conserver la viande, emballée dans une toile et plongée dans du plâtre fin délayé (d'après un brevet de 1855). Il est aussi utilisé dans le traitement de l'eau comme agent de contrôle du tartre, pour le brassage de la bière, pour clarifier le vin. Mélangé à la poudre de marbre, le plâtre donne le stuc, et à des fibres végétales, il constitue le staff.

Le blanc de Paris ...

Grâce à ses gisements de gypse sur les collines de Montmartre et Ménilmontant, Paris est connue comme étant la ville du plâtre. L'histoire débute même à Lutèce quand les Romains apportèrent aux Celtes leurs procédés de construction en plâtre. Plusieurs vestiges des II^e et III^e siècle (dalles, colonnes, sarcophages en plâtre) témoignent d'un premier âge du plâtre dans la capitale. Après une éclipse lors des grandes invasions, le plâtre reprend du service au Moyen Âge, où il sert aussi bien à la fabrication en série de sarcophages moulés que dans l'habitat pour ses propriétés ignifuges.



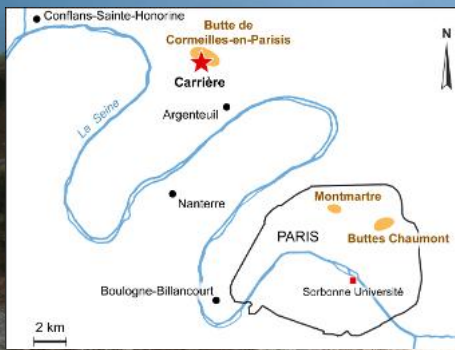
Détail d'un sarcophage en plâtre datant du Haut Moyen Âge, trouvé lors des fouilles de la cathédrale de Nanterre.

Le 18 Août 1667, une ordonnance de Louis XIV oblige à enduire les boiseries intérieures et extérieures des habitations pour éviter à la capitale le sort de Londres, grandement détruite lors de l'incendie de 1666. La ville se pare alors de façades blanches enduites d'un plâtre épais contenant souvent des grains de charbons de bois et des déchets de gypse. Cette technique perdura jusqu'au milieu du XIX^e siècle. Ainsi, le plâtre « ou blanc de Paris » acquiert sa renommée. Une grande partie du bâti historique d'Île-de-France montrent encore des façades enduites en plâtre, souvent peintes ultérieurement, et fréquemment confondues avec des enduits de ciment ou de chaux.

Des plâtriers font carrières

Le plâtre est largement exploité dans le Nord de Paris, en carrière souterraine sous Montmartre et à ciel ouvert au niveau des Buttes Chaumont. Les petites productions artisanales du Moyen Âge cèdent la place à des exploitations industrielles à partir du XVIII^e siècle. Si la fabrication du plâtre a cessé aujourd'hui dans Paris, la toponymie garde le souvenir de cette activité. Ainsi, la rue et la place Blanche (9^e arrt) tiennent leurs noms de la chaussée enduite de poudre tombée des charrois de plâtre qui descendaient les rues pentues de Montmartre.

Peu à peu, les carrières parisiennes ne suffisent plus à alimenter la demande et la ville gagne les collines de Montmartre et de Ménilmontant. L'exploitation se déplace en banlieue. En 1832, une carrière à plâtre est créée par Pierre-Étienne Lambert à Corneilles-en-Parisis. En 1930, elle devient la plus grande exploitation d'Europe à ciel ouvert et la seule en France à produire du plâtre, des briques et de la chaux hydraulique à partir, respectivement, du gypse, des argiles, des calcaires et marnes provenant du site.



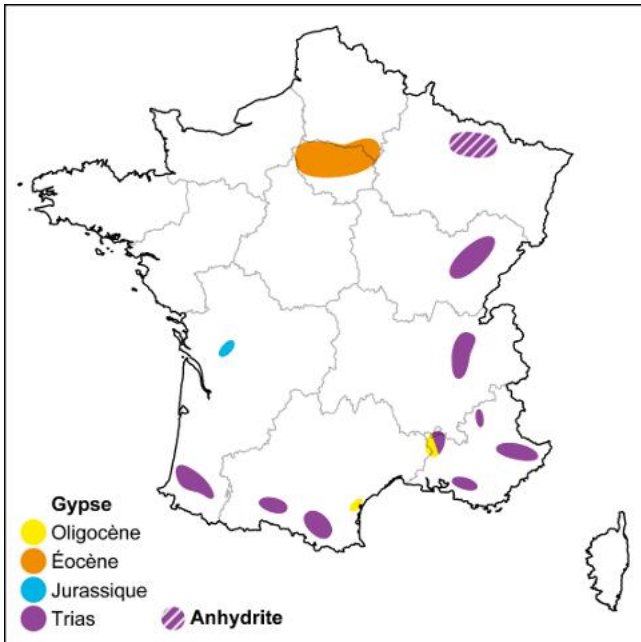
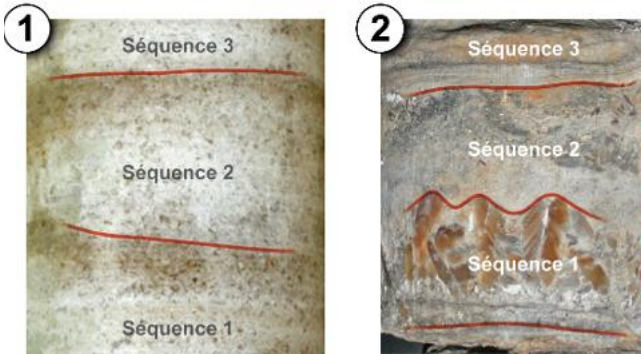
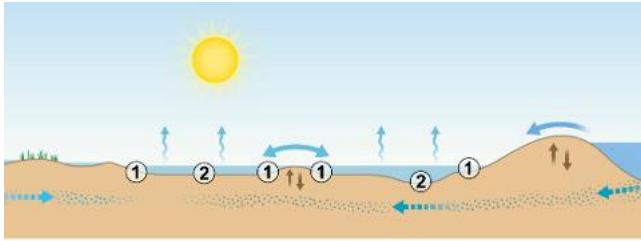
- 1 Sable de Fontainebleau
- 2 Marnes à huîtres
- 3 Argiles vertes de Romainville & Glaises à cyrènes
- 4 Marnes bleues d'Argenteuil
- 5 Marnes blanches de Pantin
- 6 Première masse de gypse

La formation du gypse de Paris

L'environnement actuel se rapprochant le plus de celui qui a conduit au dépôt du gypse dans le bassin de Paris est la sabkha, c'est-à-dire un bassin à forte salinité dans des régions arides occupant le fond d'une dépression plus ou moins séparée du milieu marin.

Carrière de Cormeilles-en-Parisis en 2017 montrant les deux masses de gypse. L'extraction s'est d'abord faite à ciel ouvert en décapant les couches qui recouvrent le gypse. Aujourd'hui, la première masse est exploitée en souterrain et la partie à ciel ouvert est comblée.

Le fonctionnement de la lagune alterne entre des périodes d'envoie, lors d'une communication avec la mer, et des périodes d'évaporation intense, le climat étant tropical avec une forte saisonnalité. On observe ainsi une succession de séquences de dépôt débutant par des lamines argileuses (apport d'eau marine), la précipitation de cristaux de gypse saccharoïde puis fer de lance/pied d'alouette lors de l'assèchement du milieu. Une nouvelle séquence redémarre avec une troncature plus ou moins importante des grands cristaux de gypse sous-jacents. Dans la partie centrale de la lagune, du gypse saccharoïde fin peut précipiter à l'interface eau-sédiment. Lors des phases d'envoie



du gypse plus grossier et de couleur miel, provenant des bordures, peut être apporté et resédimenté. On observe ainsi également des séquences de dépôt de granulométrie alternante.

Les gisements de gypse en France

Plus de 2,1 millions de tonnes de gypse ont été extraites en 2021 des différentes carrières de la région parisienne, soit 65% de la production nationale. Les couches gypseuses du bassin parisien se répartissent en quatre masses dont la plus récente et la plus épaisse -appelée première masse- est très pure. Ce gypse s'est déposé il y a environ 35 millions d'années, pendant un intervalle de temps que les géologues appellent le Priabonien, à l'Éocène supérieur.

Modèle de dépôt du gypse du Bassin de Paris.

Les grands gisements de gypse (et d'anhydrite) et leur âge en France métropolitaine.

D'autres gisements existent dans les Pyrénées, les Alpes, le Jura et en Lorraine. Ils datent du Trias supérieur, soit entre 235 et 230 millions d'années. En Charentes, les gisements de la région de Cognac datent de la limite entre le Jurassique et le Crétacé, il y a environ 140 millions d'années. Les gisements les plus jeunes, de l'Oligocène (30 millions d'années) se rencontrent dans le couloir rhodanien et le Gard.

Si la transformation du gypse en plâtre est le procédé de métamorphose le plus utilisé à Paris et ailleurs, ce n'est pas le seul connu. En effet, l'argile et le quartz extraits des formations du Tertiaire sont utilisés après transformation par la chaleur pour la fabrication de briques et de tuiles pour le premier et le verre pour le second.



*Antoine-Laurent de Lavoisier, plâtre patiné
Aimé-Jules Dalou (1886).
Coll. Petit Palais, Paris*

Le graphite : une forme de carbone, une matière à créations

Le graphite est un minéral entièrement constitué de carbone agencé en feuillets superposés, ce qui lui donne sa faible dureté. Le minerai, de mauvaise qualité, était déjà exploité dans l'Antiquité en Europe centrale : en Bavière, en Bohême et en Moravie. Il était incorporé dans les céramiques pour augmenter leur résistance au feu.

Ce n'est qu'au XVI^e siècle que le graphite est découvert en Angleterre pour la première fois en blocs naturels très purs. Il est d'abord baptisé plombagine ou *blacklead* (plomb noir) en raison de la croyance de sa composition en plomb. Son nom actuel lui est donné plus tard, par le chimiste suédois Carl Scheele qui différencie le plomb de cette nouvelle variété de carbone en 1779. Il vient du grec ancien γράφειν (*graphein*), signifiant écrire, rappelant qu'il est la matière première des crayons.

Les gisements de graphite

Les gisements de graphite de haute qualité se trouvent, pour la plupart, en veines le long de failles recoupant des couches de roches carbonées encaissantes. Ces failles se forment lorsqu'un magma remonte des profondeurs de la Terre et augmente la pression sur la roche.

Simultanément, des réactions chimiques entre la roche et le magma intrusif libèrent des fluides riches en carbone qui



Veine de graphite pur du Sri Lanka.

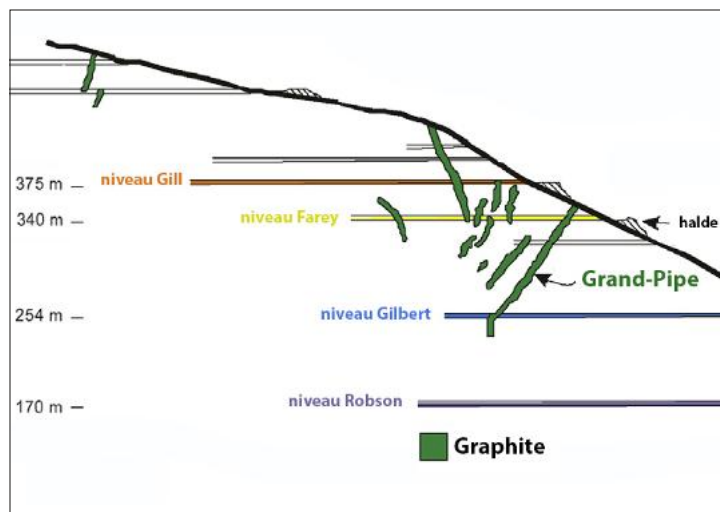
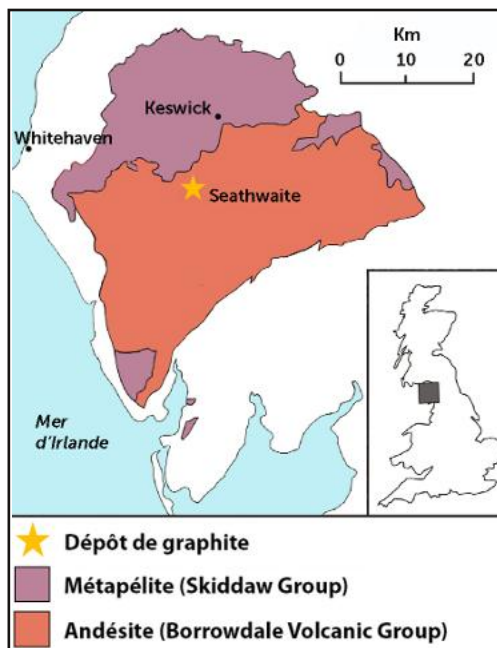
circulent dans les failles sous l'action de la chaleur. Le carbone y cristallise alors en graphite.

Ce processus se retrouve dans les gisements historiques majeurs de Borrowdale en Angleterre et de Botogol en Sibérie.

Borrowdale en Angleterre

La mine de la vallée de Seathwaite à Borrowdale au nord-ouest de l'Angleterre est la première source historique de graphite massif. La formation géologique de ce grand gisement est liée à l'activité volcanique régionale dans le comté de Cumbria (*Borrowdale Volcanic Group*) à l'Ordovicien supérieur, il y a 450 millions d'années. Le magma andésitique a traversé des roches métamorphiques carbonées métapélitiques (*Skiddaw Group*).

Au flanc de la vallée, des galeries horizontales étaient creusées jusqu'aux filons (*pipes*) sub-verticaux de graphite. Au sommet du plus grand



Carte géologique du comté de Cumbria
Coupe de la mine de graphite à Seathwaite.
Images modifiées d'après Ortega & al. 2010



Vue du Grand-Pipe par le niveau Faray

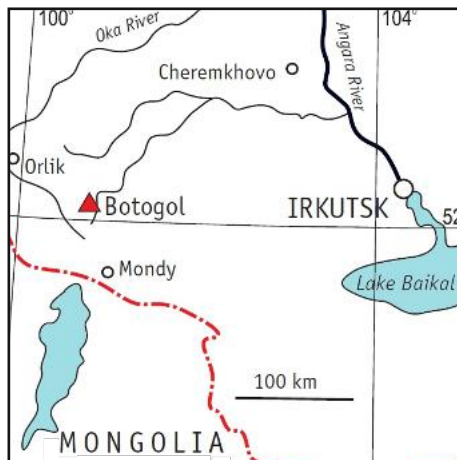
d'entre eux, surnommé *Grand-Pipe*, le folklore local raconte qu'un frêne déraciné par la tempête a révélé le précieux minéral aux bergers du Moyen-Âge. Cependant, un moule en graphite pour la contrefaçon de pièces communes, réalisé durant le règne de Henry VII, exhumé près de Borrowdale, montre que ce gisement était déjà connu vers 1500.

Dès cette époque le minerai de Borrowdale est considéré comme le plus prestigieux au monde. L'exploitation de la mine continue jusqu'à la fin du XIX^e siècle, où il devient évident que les filons sont tous épuisés.

Botogol en Sibérie

La découverte fortuite et opportune en 1847 d'un autre gisement comparable en Sibérie, dans le massif de Botogol, par le français Jean-Pierre Alibert, enrayer alors la crainte d'une pénurie.

Le massif alkalin de Botogol est formé par une intrusion de syénite au Cambrien, il y a 500 millions d'années, dans les couches superficielles de marbre calcaire bitumineux (*Dabanzhalgin Formation*). Le graphite s'y trouve en réseaux de veines massives ou de veinules (*stockwerk*) exploitables. Alibert et ses associés décident d'y ouvrir une mine.

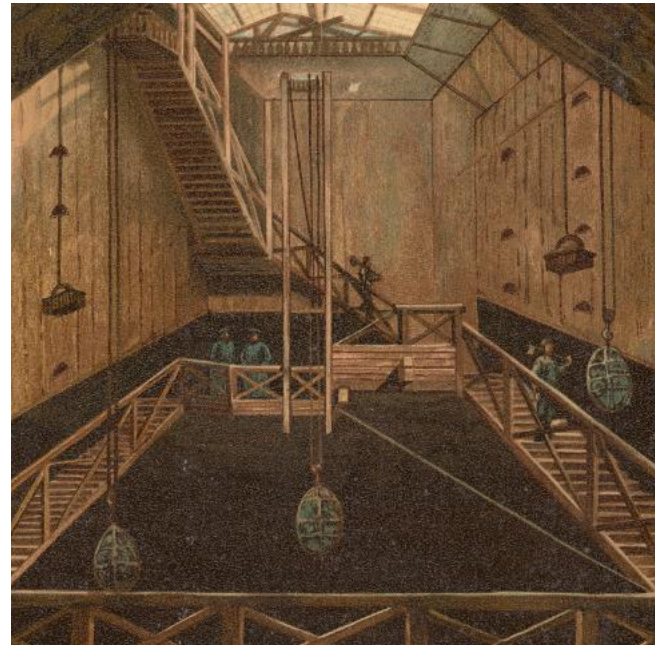
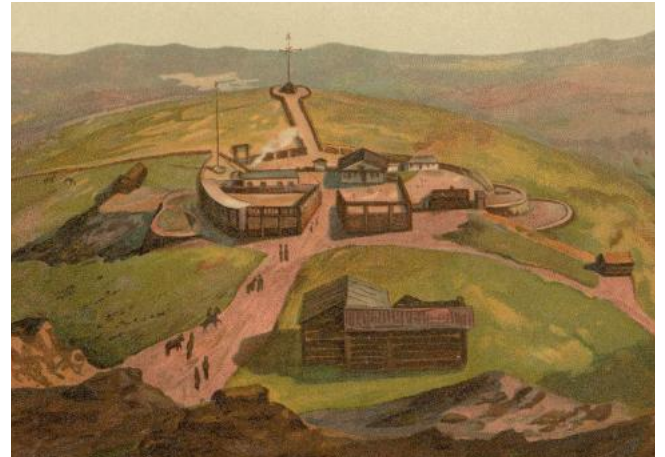


Environs d'Irkoutsk en Sibérie à la frontière avec la Mongolie

Les installations du site sont d'un luxe remarquable pour ce territoire inhospitalier très en retrait du monde. Alibert y construit une chapelle, un jardin botanique, une station d'observation astronomique et des entrepôts pour le minéral. Au centre, le Puits donne accès aux galeries souterraines via des escaliers en bois.

Dans la vallée, il aménage une ferme pour loger et nourrir les populations nomades qui s'installent et travaillent avec lui. Les blocs de graphite massif sont expédiés pour un long périple : d'abord portés à dos de renne jusqu'au fleuve Amour, ils descendent ensuite par flottage à son embouchure, aux confins de l'Extrême-Orient, où les grandes lignes maritimes les acheminent vers le marché européen.

Aujourd'hui, les mines de Borrowdale et de Botogol sont abandonnées et leurs ruines sont devenues des sites mémoriels.



*Mine Alibert au sommet du massif du Botogol (en haut).
Remontée des blocs de graphite par le Puits (en bas).*



De la mine au musée

Invention du « crayon d'Angleterre »

Le graphite trouve sa principale application dans la fabrication des crayons dès le XVI^e siècle. Cette substance nouvelle et fragile, qui tache les mains, est rapidement gainée de bois pour une maniabilité plus confortable et une résistance accrue à la casse : c'est l'invention, dans la région de Borrowdale, du « crayon d'Angleterre ».

À l'aube du XIX^e siècle les manufactures familiales s'industrialisent, stimulées par la pression économique et le succès commercial planétaire de l'instrument. Dans les plus grandes usines, la découpe dans les blocs de graphite d'un mince ruban (la mine) collé dans une gouttière entre deux pièces de bois se fait à la chaîne dans des ateliers spécialisés.

Manufacture Faber de Stein (Bavière) - XIX^e siècle.

1. Atelier de purification du graphite

2. Moulin à moudre le graphite

3. Atelier du sciage et du rabotage du bois

4. Atelier de vernissage et numérotage des crayons

Estampes, Ritter & Kloeden, Nürnberg

Les crayons en graphite de Sibérie

Parallèlement, sur le continent, les essais de purification par traitement physico-chimique de graphite de moins bonne qualité se développent. Les premières tentatives restent très inférieures au graphite anglais. L'une de ces fabriques continentales, ouverte par le modeste menuisier Kaspar Faber en 1761 à Stein en Bavière, connaît le destin rayonnant d'une entreprise globale devenue aujourd'hui la maison Faber-Castell.

Le petit-fils de Kaspar, le baron Lothar von Faber, sut développer la fabrique familiale : il saisit l'opportunité en 1856 d'un accord commercial avec Alibert, permis par le gouvernement impérial russe, pour l'usage exclusif des produits très purs de sa mine sibérienne. Les crayons en « graphite de Sibérie de la mine Alibert » sont dès lors les produits phares commercialisés dans les luxueuses papeteries Faber européennes et américaines, jusqu'à la fin du XIX^e siècle.



Papeteries Faber de Londres (à gauche), Paris (au centre) et New-York (à droite).



Crayons en graphite de Sibérie de la Mine Alibert (Extrait du catalogue Faber en 1900).



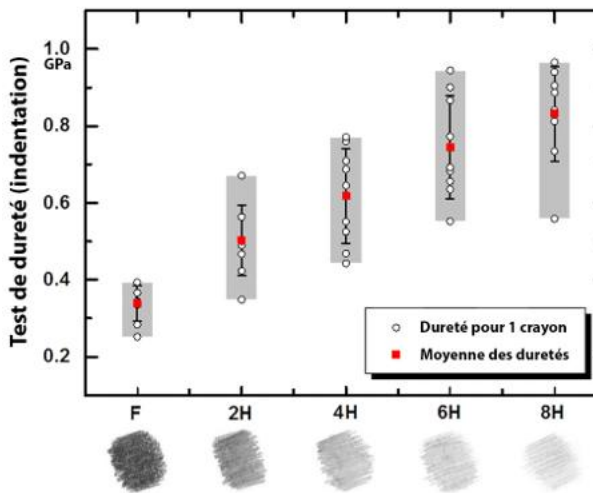
Trophée promotionnel en graphite de Sibérie donné à la papeterie Gravade à Paris.

La vente de ces crayons et des autres marchandises (crayons de moindre qualité, gommes, règles graduées, etc.) est alors assurée par une communication publicitaire onéreuse dans laquelle Alibert laisse toute sa fortune.

Très fier de ses découvertes minières, le partenaire commercial de la maison Faber dote, à ses frais, de nombreuses boutiques, institutions et musées à travers le monde, d'œuvres finement ciselées dans des blocs de graphite sibérien. Il souhaitait démontrer au public la haute qualité de son minerai et la richesse du gisement exceptionnel de Botogol, comparables à celles de Borrowdale.

Un instrument d'artiste

Les crayons en graphite sont des instruments privilégiés par les artistes pour l'exécution de leurs œuvres. Aux prémisses de la Terreur en 1792, le français Nicolas-Jacques Conté dépose un brevet qui offre une nouvelle palette de nuances de gris. Grâce à une mine composée de graphite mélangé à une quantité variable d'argile avant cuisson, la dureté est sensiblement augmentée, ce qui éclaircit la trace laissée sur le support. La nomenclature de dureté des crayons désigne par la lettre H (*Hardness*) les mines dures riches en argile, B (*Blackness*) les mines tendres pauvres en argile et F (*Fine*) ou HB (*Hard-Black*) les mines intermédiaires.



Test mécanique de dureté sur des mines à teneur en argile variable (F : 29% - 2H : 35% - 4H : 41% - 6H : 46% - 8H : 47%).

Les traits fins et raffinés des crayons les plus durs ont séduit les portraitistes néoclassiques comme Jean Auguste Dominique Ingres qui, dans une lettre à Alibert en 1863, affirmait : « *Je ne puis qu'ajouter mon approbation aux honorables éloges qui accompagnent la série complète de vos excellents crayons, d'une qualité supérieure.* »

A l'opposé, les traits plus larges et sombres des crayons les plus tendres convenaient mieux aux zones d'ombre, comme dans les esquisses de paysages de Thomas Gainsborough.

Enfin, aux tracés linéaires et tonaux s'ajoute dans les œuvres l'usage de la gomme. Elle relève, par réduction, la clarté du papier sous le graphite. Par combinaison de ces techniques, Auguste Rodin obtenait des effets hautement expressifs dans ses dessins.



Madame Bertin, Ingres, 1843.

*L'abandonnée, Rodin, 1902
(en bas à droite).*

*A clump of trees, Gainsborough,
1757 (en bas à gauche).
Coll. Metropolitan Museum of Art*





*Main sculptée en graphite de Sibérie,
Alibert, 1894.
Coll. Sorbonne Université*

Instrument de peintre, d'illustrateur, de graphiste, le crayon est aussi un outil d'écrivain. Johann Wolfgang Goethe témoigne dans son autobiographie du doux glissement silencieux du graphite qu'il opposait au crissement de la plume sur le papier :

« Il m'arrivait si souvent de me réciter une chansonnette sans pouvoir la retrouver, que je courais quelquefois à mon pupitre, sans me donner le temps de redresser une feuille posée de travers, et, sans bouger de la place, j'écrivais la poésie d'un bout à l'autre en diagonale. Dans ce même esprit, je prenais de préférence le crayon, qui traçait plus facilement les caractères, car il était arrivé quelquefois que le murmure et le craquement de la plume me réveillaient de mon poétique somnambulisme, me distrayaient et étouffaient, à sa naissance, une petite production. »

Vérité et Poésie, 1811-1833

C'est ce même calme poétique que recherche le transcendantaliste américain Henry David Thoreau. Préférant la vie dans les bois plutôt que dans la manufacture de crayon de son père, il doit ses études et la publication de son livre *Walden* (1854) au revenu des ventes de la *Thoreau Pencil Company*.

Curieusement, le crayon en graphite peut devenir lui-même le support de créations artistiques. Les sculpteurs cisellent la mine et détournent le crayon de son usage traditionnel tel que le dessin et l'écriture. Nous voyons dans ces surprenants petits objets les métamorphoses de la nature en culture, du minéral en outil, puis de l'outil en œuvre d'art.

*Black Horse, Salavat Fidai, 2017.
Coll. particulière*



Depuis la découverte du graphite pur dans les premières mines à Borrowdale et Botogol, d'autres gisements comparables ont été découverts depuis la fin du XIX^e siècle. C'est le cas, par exemple, des mines du Sri Lanka, en compétition avec les poudres massivement extraites des gisements chinois et mexicains au XX^e siècle, bouleversant le marché du crayon.

Ces ustensiles d'écriture, si présents dans notre quotidien, ne restent cependant pas le seul intérêt commercial du graphite.

Les propriétés physiques du graphite sont aussi recherchées par la métallurgie : avec un point de fusion à 3652°C, c'est un bon matériau réfractaire pour les creusets de métallurgie. On s'en servait en Angleterre, sous le règne d'Elisabeth I^{er}, pour couler les boulets de canon. La galvanoplastie utilise sa conductivité électrique pour appliquer sur un moule une couche métallique. Réduit en poudre, il lubrifie les

petites pièces mécaniques sans encrassement lié à la graisse. Le graphite est aujourd'hui un minéral stratégique pour la fabrication de piles au lithium.

Enfin, sa faculté à ralentir les protons intéressait l'Union soviétique, lors de l'accident nucléaire de Tchernobyl en 1986. Elle prévoyait le versement de graphite de la vieille mine Alibert sur le cœur de la centrale en fusion pour ralentir son effondrement. Compte tenu de la richesse du minerai du gisement de Botogol en éléments radioactifs (uranium et thorium), ce projet n'aura jamais lieu.

*Papillon sculpté en graphite de Sibérie
Alibert, 1894.
Coll. Sorbonne Université*



Conclusion

Le commencement de toutes les sciences, (...) c'est l'étonnement de ce que les choses sont ce qu'elles sont.

Aristote, Physique, 983

Montagnes, falaises, rochers, cristaux, fossiles, etc. chaque fragment du monde minéral est un témoin précieux et souvent silencieux de l'histoire complexe et unique de notre planète. Ces formes, issues des profondeurs de la Terre ou façonnées au fil des âges, portent en elles les traces de millions d'années de transformations. L'eau, la pression, la chaleur et les forces telluriques ont, en effet, sculpté ces éléments, modifiant leur structure et leur apparence.

Depuis les montagnes, fruits de rencontres puissantes entre les plaques tectoniques, aux fossiles de créatures disparues ou de plantes oubliées, l'exposition *Métamorphoses minérales* nous plonge dans une histoire qui dépasse l'échelle de notre existence. Chaque pierre, chaque minéral, est une capsule temporelle, un livre ouvert sur des phénomènes naturels extraordinaires, mais aussi une source d'étonnements et d'émerveillements scientifiques constante.

Le monde minéral comprend aussi ces matières qui entrent dans les activités ultimes de la société où se concentrent ses plus belles réalisations, celles qui seront léguées aux générations futures, en un mot celles de l'art.

Cette exposition, réunissant plusieurs spécialistes, ne dévoile qu'une partie infime de ce monde minéral aux si multiples facettes. Elle vous invite à revenir pour en explorer d'avantage.

Bibliographie

Métamorphoses géologiques

Michel F., *Tectonique des plaques, pourquoi et comment la Terre bouge ?*, 2024

Chopin C., *Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps : a first record and some consequences*, 1984

Agard P. & Lemoine M., *Visages des Alpes : structure et évolution géodynamique*, 2003

Nicollet C., *Métamorphisme et géodynamique*, 2010

Métamorphoses cristallines

Boulliard J.-C & Sotto M., *On the relations between the surface structures and the stability of complex faces*, 1998

Bravais A., *Études cristallographiques*, 1851

Cordier P. & Heidelbach F., *Origin of twist in 'gwindel' quartz crystals from the Alps: a transmission electron microscopy study*, 2013

Grigoriev D. P., *Ontogeny of minerals*, 1965

Hartman P. & Perdock W. G., *On the relation between structure and morphology of crystals*, 1955

Haüy, R.-J., *Traité de Minéralogie*, 1801

Romé de l'Isle J.-B., *Essai de cristallographie*, 1772

Métamorphoses de la matière

Ortega & al. - The graphite deposit at Borrowdale (UK) : A catastrophic mineralizing event associated with Ordovician magmatism, 2010

Robert – Les instruments de l'écriture. De l'outil confidentiel à l'objet public, 2008

Touret – Graphite from Botogol and Jean-Pierre Alibert, 2020

Tyler – Seathwaite wad and the mines of the Borrowdale valley, 1995

Crédits photographiques

© C. Ragusa / Coll. géosciences, SU
Fougère arborescente (Couverture)
Diptère (page 29)
Stromatolithe (page 32)
Rudistes (page 33)

© A. Jeanne-Michaud / Coll. minéraux, SU
Stilbine, (page 4)
Quartz citrine ; Aragonite (page 19)
Cumengeite ; quartz tordu ; stibine (page 20)
Pyrite ; Cuprite (page 21)
Argent ; Reibeckite ; Agate (page 22)
Béryl (page 23)
Quartz alpha ; Argentite (page 24)
Pseudomorphose partielle de cuprite en cuivre (page 26)
Calcite (page 27)

© C. Paletta / Coll. minéraux, SU
Limonite après pyrite ; Kolwezite après cuprite ; Serpentine après olivine (page 25)
Périmorphose de quartz (page 26)
Lutécite (page 27)
Rose des sables (page 38)

© Carmichael, Station Biologique de Roscoff
Cocosphère (page 35)

© C. Abrial
Gypse fibreux ; Gypse saccharoïde (page 36)

© G. Brusseau
Gypse sous deux formes cristallines (page 37)

© Société d'Histoire de Nanterre
Détail d'un sarcophage en plâtre (page 42)

© L. Le Callonnec
Carrière de Cormeilles-en-Parisis (page 44)

© www.margosagraphite.com
Veine de graphite pur (page 47)

© P. Kitmacher / Coll. géosciences, SU
Oeuf de dinosaure (page 30)
Corail (page 34)
Poissons (page 35)
Main sculpté en graphite (page 55)
Papillon (page 57)



BIBLIOTHÈQUE
UNIVERSITAIRE

A.M.S



Collection de Minéraux
SORBONNE UNIVERSITÉ

