

CHAPITRE I : DEFINITIONS

1. PETROLOGIE / GEOCHIMIE

- PETROLOGIE
- GEOCHIMIE

Pétrologie

La **PETROLOGIE** (science des roches), s'intéresse aux mécanismes ([physiques](#), [chimiques](#) et [biologiques](#)) qui sont à l'origine de la formation et de la transformation des [roches](#). Le spécialiste qui applique ou développe la pétrologie est un **PETROLOGUE**.

La pétrologie, dans un sens plus large, inclut la pétrographie et la **pétrogenèse** ou **lithogenèse** (étude des processus pétrogénétiques ou lithogénétiques à l'origine des roches).

Les deux termes de [pétrographie](#) et de pétrologie reflètent surtout le [développement historique de la science](#) des roches.

La pétrographie décrit ces roches (en ce qui a trait aux structures, textures, compositions, etc.) et leurs relations avec l'[environnement géologique](#).

La pétrologie est la science qui se démarque de la première par sa démarche [phénoménologique](#), en expliquant les processus pétrogénétiques à l'origine des roches.

Pétrologie Classique

La pétrologie est classiquement l'étude des roches par l'observation sur le terrain et au microscope ([optique](#) ou [électronique](#)) et par l'analyse [spectroscopique](#) et [chimique](#) des roches elles-mêmes ou de leurs [minéraux](#). Du fait de la nature des phénomènes impliqués, on peut parler non pas d'une mais de trois disciplines pétrologiques :

- La **Pétrologie Magmatique** (parfois aussi dénommée pétrologie « [cristalline](#) ») s'intéresse aux [roches magmatiques](#), telles que les [basaltes](#) ou les [granites](#). L'histoire de la formation d'une roche magmatique peut être très complexe : elle débute par la genèse d'un [magma](#) (schématiquement, un liquide produit de la fusion de roches préexistantes) et se poursuit par la [cristallisation](#) progressive de ce magma, étape pendant et après laquelle se déroulent maintes transformations chimiques. Par abus de langage, on restreint souvent l'usage du terme « pétrologie » à la seule pétrologie magmatique.
- La **Pétrologie Sédimentaire** (ou [sédimentologie](#)) s'intéresse aux mécanismes présidant à la formation des [roches sédimentaires](#), telles que les [calcaires](#) ou les [grès](#).

- La **Pétrologie Métamorphique** se donne pour objectif la compréhension des transformations qui conduisent à la formation de roches métamorphiques, telles que les schistes ou les gneiss. À l'origine simples roches magmatiques ou sédimentaires, ces roches ont connu, lors d'une période d'enfouissement à grande profondeur dans la croûte terrestre, les effets d'une longue exposition à de fortes pressions et à de hautes températures. En vertu de quoi leur textures, leur minéralogie, leur chimie aussi, ont pu connaître de profondes transformations.

Ces trois champs d'étude se distinguent nettement par les outils et méthodes qui s'y prêtent. Divers logiciels de systématisation et de simulation permettent une approche dynamique générale, mais les études de terrain sont variées.

Globalement, les trois disciplines s'appuient sur des approches pétrographiques et puisent largement dans les outils, méthodes et concepts proposés par d'autres sciences (aux premiers rangs desquelles la chimie, la chimie organique, la physique, la physico-chimie et l'analyse numérique), et plus particulièrement des géosciences (géochimie, géodésie, géophysique, minéralogie).

Pétrologie Expérimentale

La pétrologie expérimentale vise à reproduire au laboratoire les conditions de température et de pression que les minéraux, les roches ou leurs précurseurs (magmas, fluides hydrothermaux) ont subies à l'intérieur de la croûte ou du manteau terrestres.

L'objectif est d'établir les propriétés d'équilibre des matériaux terrestres (voire extraterrestres) dans ces conditions, ainsi que la nature et la cinétique de leur évolution.

La pétrologie expérimentale emploie des appareils permettant d'atteindre de hautes températures (jusqu'à un maximum de 3 700 °C environ) à pression atmosphérique ou bien haute voire très haute pression (jusqu'à 600 GPa environ, soit six millions d'atmosphères).

L'inconvénient est que, plus les conditions à atteindre sont extrêmes, plus la taille des échantillons doit être réduite : quelques cm³ dans les cas les plus favorables, moins d'un mm³ dans les conditions les plus extrêmes.

Les appareils employés sont typiquement des autoclaves, des pistons-cylindre ou des cellules à enclumes de diamant. Ce sont les travaux de pétrologie expérimentale, dont le pionnier fut Norman Bowen (1887-1956), qui ont permis d'établir les DIAGRAMMES DE PHASES et les TABLES DE DONNEES THERMODYNAMIQUES nécessaires à la compréhension des processus pétrogénétiques (les mécanismes responsables de la formation des roches).

Synthèse

La pétrologie traite de l'origine, de la présence, de la structure et de l'histoire des roches ignées ou métamorphiques (la pétrographie, science voisine, étudie les caractéristiques des roches cristallines examinées au microscope sous une lumière polarisante).

Le pétrologue (pétrologiste) rend compte des modifications qui se produisent spontanément dans les masses rocheuses lorsque le magma se solidifie, lorsque les roches solides fondent totalement ou en partie, ou lorsque les sédiments subissent des transformations chimiques ou physiques.

Il étudie en particulier la cristallisation des minéraux et la solidification du verre à partir de matériaux en fusion (processus ignés), la recristallisation des minéraux à hautes températures sans passage par une phase de fusion (processus métamorphique), les échanges d'ions entre les minéraux, et les processus de sédimentation comprenant l'érosion, le transport et le dépôt.

Enfin, la pétrologie est l'étude des roches, de leur composition, de leur nature et de la façon dont elles se mettent en place dans la croûte terrestre. Il faut considérer les roches comme des indices pour retracer l'histoire de la terre. En regroupant ces différents indices, on va pouvoir préciser la vision de l'histoire de la terre.

Géochimie

Science qui **étudie l'histoire et le comportement des éléments chimiques** qui composent les **zones profondes et superficielles du globe terrestre** à l'aide des méthodes conjointes de la **géologie et de la chimie**.

La géochimie proprement dite s'efforce d'approfondir les problèmes théoriques que pose **l'origine de la répartition des éléments chimiques et de leurs combinaisons dans les diverses couches du globe terrestre**.

La Géochimie : discipline de la géologie qui étudie **la répartition des éléments chimiques dans les différents grands réservoirs terrestres**. Cette distribution est liée au **comportement chimique des éléments** ainsi qu'aux **différents processus géologiques de transfert ayant lieu sur la terre**.

**ELLE TRAITE LA DISTRIBUTION ET L'ABONDANCE
DES ELEMENTS CHIMIQUES DANS LES DIFFERENTS RESERVOIRS.**

La **Géochimie** est une science qui applique les principes de la chimie à l'explication des processus géologiques, passés et présents, qui affectent les enveloppes terrestres internes (noyau, manteau, croûtes) et externes (océans, atmosphère, biosphère).

Le Glossary of Geology and Related Sciences, publié en 1960, définit la géochimie comme « la science qui traite de l'abondance absolue et relative des éléments et des isotopes sur la **Terre** entière, qui traite également de leur distribution et de leurs migrations, en vue d'aboutir à des lois générales du comportement de la matière à l'échelle planétaire».

Mais c'est à partir des années 1950, avec le développement de nouvelles techniques d'analyses, permettant notamment de mesurer des concentrations élémentaires ou des rapports isotopiques, que cette science a pris son essor.

Aujourd'hui, la géochimie est la source de multiples découvertes et avancées de premier ordre comme la datation d'objets géologiques, l'étude du climat, le traçage de flux de matière entre des ensembles géologiques. Quand elle s'applique aux planètes ou aux météorites et poussières cométaires, on parle de Cosmochimie.

La **Géochimie** applique les outils et concepts de la **chimie** à l'étude de la **Terre** et plus généralement des **planètes**. Dans une certaine mesure, des échantillons sont accessibles à l'investigation chimique (notamment par l'étude des **météorites**) ou la présence des **éléments chimiques** sont déterminés par des méthodes indirectes, ce qui permet à cette **discipline scientifique** d'étudier l'**abondance relative et absolue de ces éléments**, leur distribution et leurs migrations lors de la **différenciation planétaire**. Ces études permettent **in fine** de chercher des lois générales du comportement de la matière à l'échelle planétaire, ce qui lie cette discipline à la **Cosmo-chimie** dans la mesure où elle s'intéresse aux processus de formation planétaires et intra-planétaires. En ce qui concerne la Terre, cette discipline a pour objectif la connaissance des cycles par lesquels la plupart des éléments chimiques sont conduits alternativement en surface et en profondeur au sein de la planète. S'agissant du sédiment, la géochimie étudie les phénomènes chimiques qui se déroulent de l'interface eau-sédiment à la profondeur du sédiment lui-même.

Le russe **Mikhaïl Lomonossov** est traditionnellement considéré comme le **père de cette discipline scientifique**, le savant étudiant les gisements de minerais au XVIII^e siècle. Un siècle plus tard, des chimistes et minéralogistes tels que **Martin Heinrich Klaproth**, **Lavoisier**, **Berthollet** ou **Fourcroy** posent les bases de la **chimie minérale** qui relève de la géologie et de la géochimie.

L'invention du terme de « géochimie » est attribuée au chimiste allemand [Christian Schönbein](#) en 1838. Cependant, pendant près d'un siècle, le terme le plus courant pour désigner cette discipline est celui de « géologie chimique » et il y a peu de contact entre les géologues et les chimistes.

Le russe [Vladimir Vernadsky](#) et ses collègues germano-norvégien [Victor Moritz Goldschmidt](#) et américain [Frank Wigglesworth Clarke](#) sont considérés comme les fondateurs de la géochimie moderne dans les [années 1920](#).

D'abord avec l'extension de la chimie à travers la minéralogie superficielle, la géochimie a acquis un statut de discipline à part entière après la [Seconde Guerre mondiale](#), au moment du développement de la [géologie isotopique](#) (géochronologie absolue). Par son approche transdisciplinaire, la géochimie est un bon exemple de fusion entre plusieurs domaines aux objectifs distincts, comme la [physique](#), la [biologie](#), la paléontologie (discipline également multidisciplinaire), etc.

Domaines d'Application

D'un point de vue applicatif, les buts de la géochimie sont, entre autres :

- la détermination de la composition des différentes enveloppes terrestres, de leur évolution, des hautes couches de l'[atmosphère](#) à la [graine](#).
- la quantification des transferts de [matière](#) et d'[énergie](#) au sein de la Terre ; l'identification et la quantification des interactions entre ses différentes [enveloppes](#) ou [réservoirs](#).
- l'identification et la caractérisation des processus chimiques, mécaniques, minéralogiques ou autres, qui modifient les compositions chimiques des géomatériaux, provoquant leur [différenciation](#).
- la détermination de l'âge des roches et des événements ayant affecté la Terre, par le biais de la [géochronologie](#).
- l'étude des conditions environnementales passées ([paléoenvironnements](#)).

Dans ses ramifications théoriques et appliquées, la géochimie couvre aussi bien des processus [endogènes](#) qu'[exogènes](#), sur du matériel [organique](#) ou [non organique](#). Ainsi, l'application des méthodes de la géochimie à l'étude des êtres vivants a donné naissance à la [biogéochimie](#). Les deux plus grands domaines restent toutefois la [géochronologie](#), et l'étude des roches « chaudes » (en profondeur) ou « froides » (en surface), sur Terre ou dans les autres systèmes planétaires.

Grands Principes

Pour un type de matériau et/ou d'unité géologique considérés, les mesures et études des divers éléments chimiques, et les informations qu'ils peuvent apporter, sont fortement liés à leur abondance relative, ce que l'on appelle la composition chimique du matériau :

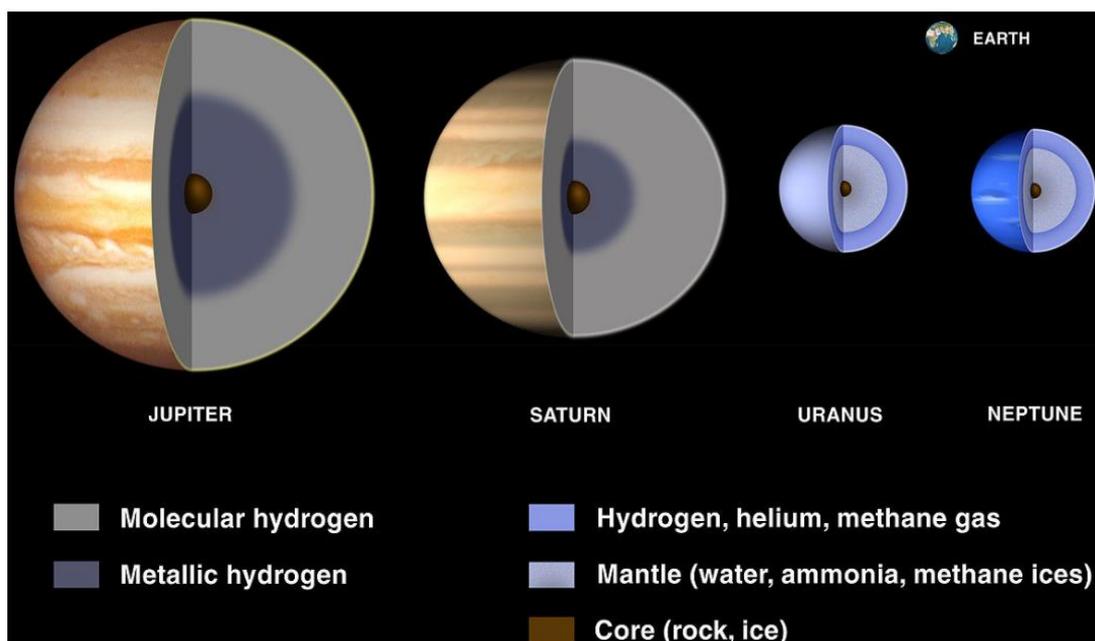
- Les éléments plus abondants, qui forment en général à quelques-uns les quelque 95 à 99 % du matériau, sont appelés, dans le contexte spécifique de l'étude, *éléments majeurs*. Cette étude est alors le plus souvent menée à l'interface avec la [minéralogie](#), du fait de la tendance de ces éléments à s'organiser en [phases](#) plus ou moins définies, les [minéraux](#).
- Les éléments chimiques moins abondants, de l'ordre du pour-cent et appelés, toujours contextuellement, *éléments mineurs*, selon les conditions physico-chimiques, forment des [phases](#), sous forme de minéraux accessoires.
- Enfin le reste des éléments chimiques, présents en très petites à infimes quantités, sont dits *en trace* ou encore appelés *éléments-traces*. Leur comportement lors des processus de différenciation s'explique le plus souvent via une application de la théorie [thermochimique](#) d'équilibre en milieux dilués, en faisant intervenir une notion de partage de ces éléments sous l'effet de la [loi d'action de masse](#).
- Depuis en gros le premier tiers du XX^e siècle, le développement de la [spectrométrie de masse](#) a permis l'extension des mesures chimiques aux *mesures isotopiques*. Cet aspect, pas à proprement parler « chimique », est toutefois totalement sous-entendu et intégré en géochimie, même s'il est parfois spécifié sous le terme de *géochimie isotopique* en complément des *géochimies élémentaires* (au sens de *géochimie des éléments chimiques*). Sur le plan pratique, on distingue deux types de variations de [rapports isotopiques](#), celles entre isotopes stables, et celles entre isotopes [radioactifs](#) ou radiogéniques :
 - Deux *isotopes stables* d'un même élément chimique fractionnent entre deux phases, du fait d'effets quantiques, dès lors que la température n'est pas trop élevée (le terme de fractionnement signifie que leur rapport d'abondance n'est pas le même entre les deux phases). Une des applications les plus notoires est le [Paléothermomètre de l'oxygène](#) pour décrypter les [évolutions de la température moyenne de l'atmosphère terrestre](#) sur les quatre cents derniers milliers d'années.
 - La [radioactivité](#) est la transmutation d'un isotope père, radioactif, en un isotope fils, dit radiogénique. La simplicité de la [loi de désintégration radioactive](#), et son intangibilité, sont la base de la [géochronologie](#), science de la datation absolue.

Bien que ces principes théoriques soient souvent emprunts d'une hypothèse d'équilibre thermodynamique, l'importance des métastabilités minérales confrontée aux longues périodes de temps géologiques qui permettent aux processus de diffusion chimique de jouer parfois un rôle dans l'évolution cinétique des matériaux, font de la géochimie un domaine singulier par rapport à la thermochimie traditionnelle.

Méthodes d'Analyse

L'analyse des roches, minéraux et autres géomatériaux fait appel à de nombreux types d'analyses physico-chimiques. En voici quelques-unes :

- la **MICROGRAPHIE** : préparation d'une lame mince de roche et observation au **microscope optique**, notamment à la **lumière polarisée** ;
- l'**ANALYSE CHIMIQUE** élémentaire : déterminer la composition en éléments d'une roche (**concentration massique** des différents éléments, en général traduite sous forme d'**oxydes** pour les éléments majeurs) ; initialement faite avec des réactions chimiques (dosages) élément par élément, ces analyses sont maintenant faites avec des méthodes physiques globales donnant la concentration en tous les éléments comme la spectrométrie de masse à source **plasma** ou la **spectrométrie de fluorescence X** ;
- l'analyse de **phase** par **DIFFRACTION DE RAYONS X** : on a accès à la **structure cristalline** des composants, et l'on peut donc déterminer la nature des phases, par exemple reconnaître les différentes formes de cristallisation de la **silice** ou bien savoir si le **calcium** est présent sous forme de CaO ou de CaCO₃.



Modèles de Structure Interne des Planètes Géantes.

Géochronologie

La **GEOCHRONOLOGIE** est la Science de
Datation des Evénements de l'Histoire de la Terre.

DISCIPLINE SCIENTIFIQUE qui a pour objet
l'Etude des Temps Géologiques et des Evénements Successifs
qui ont affecté le Globe Terrestre.

La géochronologie est devenue une science très précise,
Puisqu'elle dispose d'un étalon de temps permettant
de fixer l'âge de tout minéral radioactif, chaque élément radioactif
Ayant une « durée de vie », une période de désintégration constante.

La **Géochronologie** est la Science employée pour déterminer l'âge des Roches, Fossiles,
et Sédiments à partir de différentes méthodes de Datation.

On distingue deux types de géochronologie : la **Géochronologie Absolue** et
la **Géochronologie Relative**, chacune avec ses propres procédés et résultats qui seront
ensuite mis en rapport pour obtenir une datation plus précise.

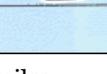
La géochronologie est aussi à la base de la Chronostratigraphie qui a pour but d'ordonner
chronologiquement les dépôts sédimentaires et ainsi établir un registre géologique complet de
la Terre. Ses résultats servent aussi au développement de l'Echelle des Temps Géologiques.

Chronostratigraphie

La **Chronostratigraphie** est une branche de la Stratigraphie dont l'objet est l'étude de l'âge
des Couches de Roches en relation au Temps.

Le but de la chronostratigraphie est de classer les différentes séquences et époques des dépôts
de roches en fonction de la région géologique, et finalement d'établir un registre géologique
complet de la Terre.

La nomenclature stratigraphique standard est le système chronostratigraphique fondé sur des
intervalles de temps paléontologiques définis par des assemblages de fossiles connus
(Biostratigraphie). La chronostratigraphie permet de donner un sens aux interfaces et
intervalles des assemblages de fossiles.

CENOZOIC ERA (Age of Recent Life)	Quaternary Period	<i>Pecten gibbus</i>		<i>Neptunea tabulata</i>	
	Tertiary Period	<i>Calyptrophorus velatus</i>		<i>Venericardia planicosta</i>	
MESOZOIC ERA (Age of Medieval Life)	Cretaceous Period	<i>Scaphites hippocrepis</i>		<i>Inoceramus labiatus</i>	
	Jurassic Period	<i>Perisphinctes tiziani</i>		<i>Nerinea trinodosa</i>	
	Triassic Period	<i>Trochites subbullatus</i>		<i>Monotis subcircularis</i>	
PALEOZOIC ERA (Age of Ancient Life)	Permian Period	<i>Leptodus americanus</i>		<i>Parafusulina bosei</i>	
	Pennsylvanian Period	<i>Dictyoclostus americanus</i>		<i>Lophophyllidium proliferum</i>	
	Mississippian Period	<i>Cactocrinus multibrachiatus</i>		<i>Prolecanites gurleyi</i>	
	Devonian Period	<i>Mucrospirifer mucronatus</i>		<i>Palmatolepus unicornis</i>	
	Silurian Period	<i>Cystiphyllum niagarensis</i>		<i>Hexamoceras hertzeri</i>	
	Ordovician Period	<i>Bathyrurus extans</i>		<i>Tetragraptus fructicosus</i>	
	Cambrian Period	<i>Paradoxides pinus</i>		<i>Billingsella corrugata</i>	
	PRECAMBRIAN				

Chronostratigraphie par les fossiles.

Méthodes de datation

A l'étude géochronologique, on trouve deux grandes familles de méthodes de datation et résultats. D'une part, la [Datation Relative](#) situant l'âge du corps géologique par rapport à autres événements [Géologiques](#) ou [Biologiques](#) majeurs, et de l'autre la [Datation Absolue](#), qui permet d'obtenir un résultat précis, exprimé en années, en étudiant les enregistrements et traces inhérentes au sujet d'étude.

Méthodes de datation relative

- La [stratigraphie](#) : l'ensemble d'études des couches sédimentaires superposées au cours du temps.
- Le [paléomagnétisme](#) : l'étude de l'enregistrement du champ magnétique terrestre passé dans les roches.

On parle ainsi de chronologie relative. Cette science est basée sur des principes géologiques et paléontologiques. Ils sont au nombre de Quatre (4) :

- **Principe de Superposition**
- **Principe de Continuité Latérale**
- **Principe de Recoupement**
- **Principe d'Inclusion**

Méthodes de datation absolue

- La [Datation Radiométrique](#) : l'ensemble d'études des traces de [Radioisotopes](#) dans un corps, notamment la [Datation par le Carbone 14](#) et la [Datation par les Traces de Fission](#).

Une **Datation Radiométrique** (dite « par **Radiochronologie** ») est une méthode de [Datation Absolue](#) utilisant la variation régulière au cours du temps de la proportion de [Radioisotopes](#) dans certains corps. La plus connue est sans doute la [Datation par le Carbone 14](#), mais il en existe bien d'autres. Toutes ne font pas appel aux mêmes raisonnements physiques et géologiques, et leurs précisions varient. Les méthodes de datations radiométriques constituent le cœur de la [Géologie Isotopique](#).

Les méthodes de [Datation Absolue](#) sont aujourd'hui nombreuses, comme la [Datation par le Carbone 14](#), la [Thermoluminescence](#), la [Datation par l'Uranium-Thorium](#),... Elles sont adaptées à des tranches de temps variables d'une méthode à l'autre.

Principales méthodes de datation actuelles :

- [Datation par le Carbone 14](#) (âges de quelques centaines d'années jusqu'à 50 000 ans).
- [Résonance Paramagnétique Electronique](#) (d'environ 20 000 ans à un million d'années).
- [Thermoluminescence](#) (d'environ 100 ans à 800 000 ans).
- [Datation par Luminescence Stimulée Optiquement](#) (d'environ 100 ans à 350 000 ans).
- [Datation par l'Uranium-Thorium](#) (d'environ 1000 ans à 500 000 ans).
- [Datation par le Potassium-Argon](#) (d'environ 100 000 ans à plusieurs milliards d'années).
- [Datation Argon-Argon](#) (d'environ 100 000 ans à plusieurs milliards d'années).

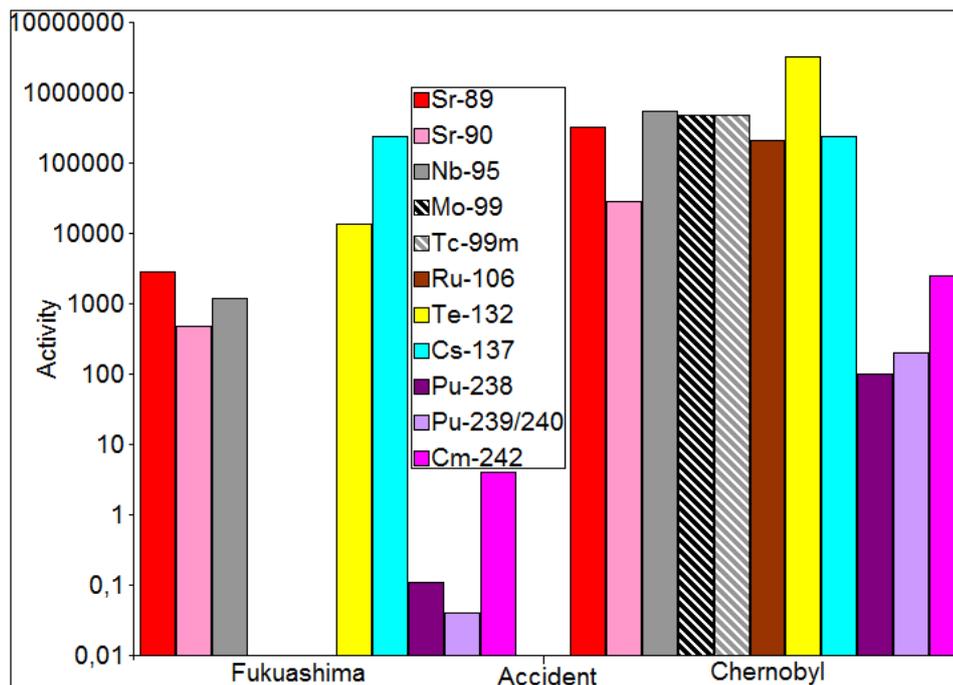
Pour la plupart des méthodes, les datations brutes obtenues demandent des corrections encore appelées calibrage (dont chacune dépend de la méthode employée). Lorsque la date a été calibrée, on a souvent la mention **calAP** ou **calBP** (dans les articles de recherche) ainsi que la mention de la méthode ou du logiciel de calibrage, ainsi que l'[Intervalle de Confiance](#) (en % ou en σ).

Radioisotope (Radionucléide, radioélément)

- Un **Radionucléide** (contraction de [Radioactivité](#) et de [Nucléide](#)) est un nucléide [Radioactif](#), c'est-à-dire qui est instable et peut donc se décomposer en émettant un rayonnement.
- Un **Radioisotope** (contraction de *radioactivité* et d'[Isotope](#)) est un isotope radioactif (parce que son [Noyau](#) est un radionucléide).
- Un **Radioélément** (contraction de *radioactivité* et d'*élément*) est un [Elément Chimique](#) dont tous les isotopes connus sont des radioisotopes.

Cette instabilité peut être due à un excès de [Protons](#) ou de [Neutrons](#), voire des deux. Les radioisotopes existent naturellement mais peuvent aussi être produits artificiellement par une [Réaction Nucléaire](#).

Lors d'une catastrophe nucléaire (telle que la [Catastrophe de Tchernobyl](#)) ou lors d'une [Explosion Atomique](#) (telle qu'un [Essai Nucléaire](#)), une grande quantité de radionucléides sont propulsés dans l'atmosphère, se propagent autour du globe terrestre et retombent plus ou moins rapidement sur le sol.

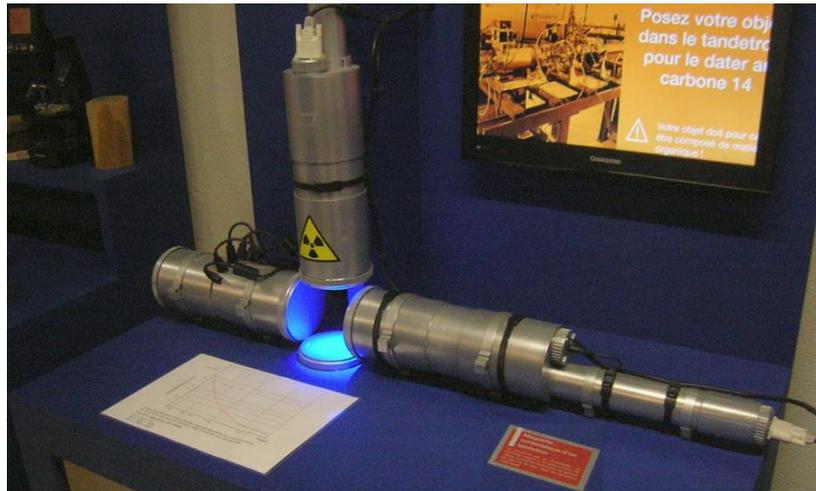


Ce graphique à barres compare les relevés de radioisotopes constatés sur le terrain en [juin 2011](#) à 500 mètres de la [centrale de Fukushima Unité I \(Japon\)](#) (à gauche) avec les données équivalentes fournies dans un rapport de l'[OCDE](#) pour la [catastrophe de Tchernobyl \(Ukraine\)](#) (à droite).

Datation par le Carbone 14

La **Datation par le Carbone 14**, dite également **Datation par le Radiocarbone** ou **Datation par Comptage du Carbone 14 Résiduel**, est une méthode de [Datation Radiométrique](#) fondée sur la mesure de l'[Activité Radiologique](#) du [Carbone 14](#) (^{14}C) contenu dans la [Matière Organique](#) dont on souhaite connaître l'[Age Absolu](#), c'est-à-dire le temps écoulé depuis la mort de l'organisme (animal ou végétal) qui le constitue.

Le domaine d'utilisation de cette méthode correspond à des âges absolus de quelques centaines d'années jusqu'à, et au plus, 50 000 ans. L'application de cette méthode à des événements anciens, tout particulièrement lorsque leur âge dépasse 6 000 ans ([Préhistoriques](#)), a permis de les dater beaucoup plus précisément qu'auparavant. Elle a ainsi apporté un progrès significatif en [Archéologie](#) et en [Paléontologie](#).



Dispositif de datation au carbone 14 dans le musée archéologique du [lac de Paladru](#).
Département de l'Isère en région Auvergne-Rhône-Alpes (France).

Principe de la Méthode ^{14}C

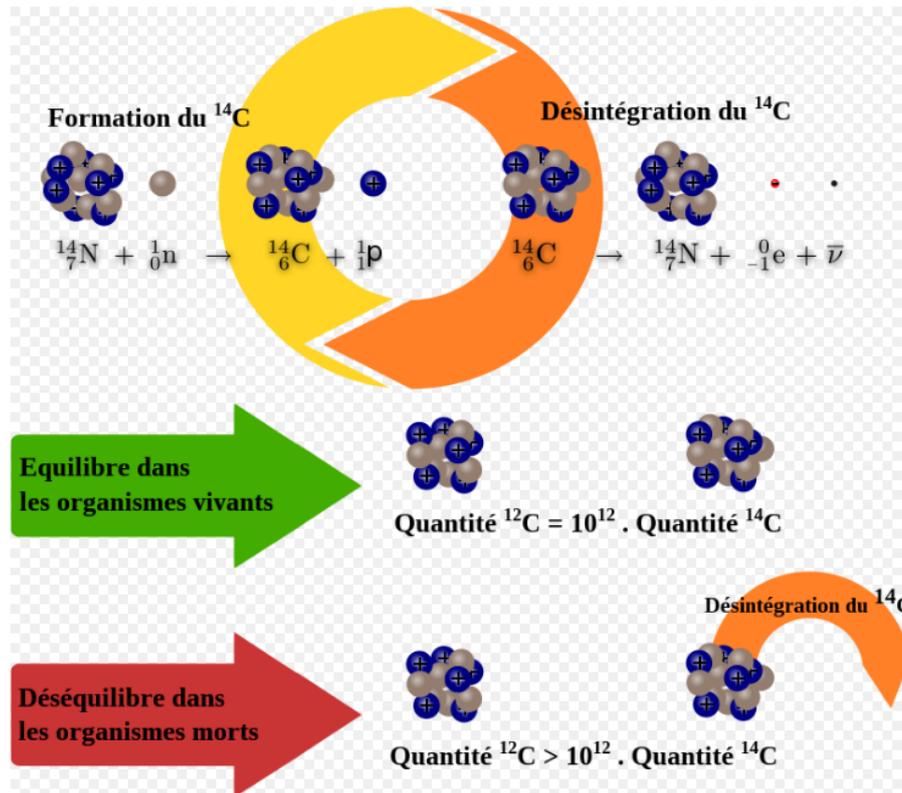
Le [Carbone 14](#) ou radiocarbone est un [Isotope Radioactif](#) du [Carbone](#) dont la [Période Radioactive](#) (ou demi-vie) est égale à $5\,734 \pm 40$ ans selon des calculs relevant de la [Physique des Particules](#) datant de 1961. Cependant, pour les datations on continue par convention d'employer la valeur évaluée en 1951, de $5\,568 \pm 30$ ans.

En première approche, on peut considérer que tant qu'une plante ou un animal est vivant, son organisme échange du carbone avec son environnement, si bien que le carbone qu'il contient aura la même proportion de ^{14}C (carbone 14) que dans la biosphère. Lorsque l'organisme meurt, il ne reçoit plus de ^{14}C et celui qu'il contient va se désintégrer peu à peu.

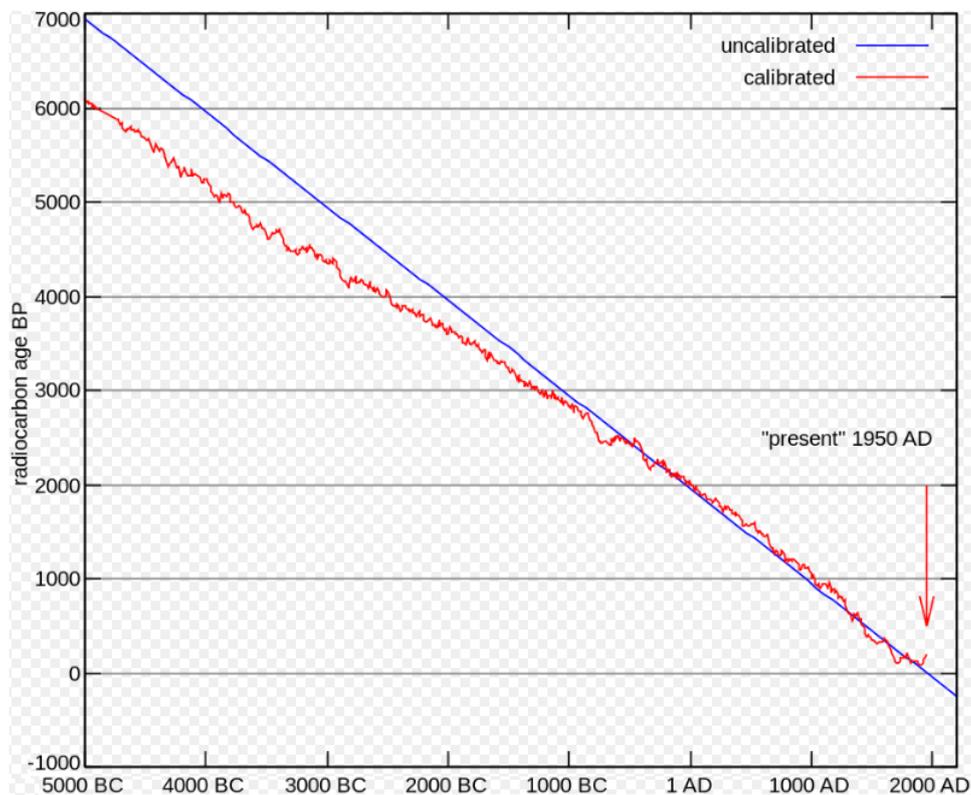
En deuxième approche, on considère qu'à cause du [Fractionnement Isotopique](#) survenant lors de la [Photosynthèse](#), le [Rapport Isotopique](#) $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ de l'organisme est inférieur de quelques pour cent à celui de la biosphère. Durant sa vie, la proportion de ^{14}C présent dans l'organisme par rapport au carbone total (^{12}C , ^{13}C et ^{14}C) est donc aisément rapportable à celle existant dans l'[Atmosphère](#) du moment.

La datation par le carbone 14 se fonde ainsi sur la présence dans tout organisme de radiocarbone en infime proportion (de l'ordre de 10^{-12} pour le rapport $^{14}\text{C}/\text{C}_{\text{total}}$). À partir de l'instant où un organisme meurt, la quantité de radiocarbone qu'il contient ainsi que son activité radiologique décroissent au cours du temps selon une [Loi Exponentielle](#).

Un échantillon de matière organique issu de cet organisme peut donc être daté en mesurant soit le rapport $^{14}\text{C}/\text{C}_{\text{total}}$ avec un [Spectromètre de Masse](#), soit son activité X années après la mort de l'organisme.



Cycle du carbone 14 : Principe physique (désintégration et formation) de la méthode du radiocarbone pour la détermination de l'âge.



Etalonnage (Calibration) d'une datation au carbone 14.

La [locution](#) « **avant le présent** », en [abrégé AP](#), ou parfois « avant aujourd'hui » (AA), équivalent de l'[anglais](#) *before present* (**BP**), est utilisée en [préhistoire](#), en [paléontologie](#), en [géologie](#) et en [climatologie](#), pour désigner les âges exprimés en nombre d'[années](#) comptées vers le passé à partir de l'année **1950** du [calendrier grégorien](#). Cette date a été fixée arbitrairement comme année de référence parce qu'elle correspond aux premiers essais de [datation par le carbone 14](#). Elle est également légèrement postérieure aux premiers [essais nucléaires](#), qui ont perturbé la répartition d'isotopes utilisés en [datation radiométrique](#).

Limites de la datation par le carbone 14

La datation par le carbone 14 est une méthode très utilisée par les archéologues, mais son utilisation présente quelques limites :

- c'est la date de mort de la cellule de la plante ou de l'animal qui a servi de matière première qui est mesurée, pas celle de la construction ou de l'utilisation ou de la modification de l'objet à dater.
- l'élément que l'on veut dater doit avoir incorporé du carbone dans des proportions équivalentes à celles de l'atmosphère ; elle ne s'applique donc qu'aux matériaux organiques et en aucune façon aux produits minéraux.
- la méthode s'appuie sur le principe d'[Actualisme](#) et suppose que le rapport $^{14}\text{C}/\text{C}$ est resté constant dans l'atmosphère depuis la mort de l'élément à dater jusqu'à aujourd'hui ; ce n'est pas tout à fait le cas et des corrections sont donc nécessaires.
- la fermeture du système de l'élément à dater est aussi indispensable ; s'il incorpore de nouveaux atomes de carbone après sa mort, le rapport $^{14}\text{C}/\text{C}$ est bouleversé et le résultat ne sera pas fiable.
- la quantité de carbone radioactif diminue de moitié tous les 5 730 ans, valeur conventionnelle de la [Période](#) de cet élément.

Seuls les éléments datant de moins de 50 000 ans au maximum (environ huit périodes), présentant une quantité mesurable avec une précision assez bonne peuvent être datés.

De plus l'[Incertitude](#) croît en fonction de l'âge des matériaux et les résultats sont approximatifs au-delà de 35 000 ans.

Pour des âges plus anciens, d'autres méthodes sont mises en œuvre comme la [Datation au Potassium-Argon](#) ou la [Datation par le Couple Rubidium-Strontium](#) qui permettent de dater des roches, ou la [Thermoluminescence](#), qui permet de dater des roches ou des sédiments ayant été brûlés.

En 2012, les dates Radiocarbone sont étalonnées jusqu'à 26 000 ans \pm 450 BP. En 2019 l'équipe de Hai Cheng parvient à calibrer les dates Radiocarbone avec une incertitude inférieure à 100 ans jusqu'à 40 000 ans BP, puis inférieure à 300 ans jusqu'à 54 000 ans BP. En aout 2020 **le projet IntCal** conclut sept ans de recherches avec la publication de trois nouvelles courbes d'étalonnage (pour l'hémisphère nord, pour le sud et pour le milieu marin), repoussant l'âge limite de datation à 55 000 ans cal BP, avec un seul écart type au cours des époques successives.

Datation par les traces de fission

La **datation par les traces de fission** est une méthode de [datation radiométrique](#) qui repose sur l'analyse des traces laissées dans un [minéral](#) par la [fission spontanée](#) de l'[uranium 238](#) qu'il contient. Cette méthode peut être utilisée pour dater la formation d'un matériel géologique ou archéologique, ou le dernier épisode de haute température d'une roche.



Traces de fission révélées dans un minéral observé au microscope optique.

Principe de la Méthode

Tout matériau contenant naturellement de l'[Uranium](#) contient à un âge donné la même proportion d'[Uranium 235](#) et d'[Uranium 238](#). L'uranium 238 a plusieurs [Modes de Désintégration](#), le principal est une [Désintégration \$\alpha\$](#) en thorium 234, mais une petite partie ($5,45 \times 10^{-5}$ % du nombre total de désintégrations) des atomes d'uranium 238 se désintègre par [Fission Spontanée](#).

Les autres atomes présents dans la nature et pouvant subir une fission spontanée sont essentiellement l'[Uranium 235](#) (7×10^{-9} % du nombre total de désintégrations) et le [Thorium 232](#) ($1,1 \times 10^{-9}$ % du nombre total de désintégrations) mais ces cas sont marginaux et peuvent être ignorés, si bien que l'on considère que toute trace de fission est due à une fission spontanée d'uranium 238.

De là, on peut déduire par simple comptage du nombre de traces le nombre de fissions spontanées d'uranium 238 ayant eu lieu dans le matériau, en déduire le nombre d'atomes d'uranium 238 s'étant désintégré par fission spontanée ou désintégration α et donc en mesurant la quantité d'uranium encore présent dans l'échantillon déduire la quantité d'uranium présent au moment de sa formation.

La connaissance de la [Constante de Désintégration](#) de l'uranium 238 permet alors de calculer l'âge de l'échantillon. De plus la longueur des traces de fission, de l'ordre de la dizaine de [Micromètres](#), est significativement supérieure à la longueur des traces provoquées par d'autres phénomènes, comme le recul d'un noyau qui subit une désintégration qui provoque une trace d'une longueur de l'ordre du dixième de micromètres. Il est donc possible de distinguer relativement facilement les traces de fission.

Pour pouvoir dater du matériel jeune il faut donc que celui-ci soit riche en uranium ; tandis que pour dater de vieilles roches il faut utiliser des minéraux qui en contiennent peu.

Géochimie isotopique

La **Géologie Isotopique** est une branche de la [Géologie](#), apparentée à la [Géochimie](#), qui exploite l'étude des [Isotopes](#) stables et radioactifs présents sur [Terre](#) pour en étudier la composition et les variations au cours des [Temps Géologiques](#).

À l'origine, la géologie isotopique a consisté à utiliser les connaissances concernant la [Radioactivité](#) afin de dater des [Roches](#) et des [Minéraux](#). Cette discipline, au carrefour de la [Géologie](#) et de la [Physique Nucléaire](#), s'est surtout illustrée par ses méthodes de [Datation Absolue](#).

Elle a ensuite aidé à mieux comprendre la [Paléoclimatologie](#), les structures et la dynamique interne du globe. Avec les progrès techniques s'est développée l'étude des [Isotopes Stables](#), qui a donné accès à l'étude fine des grands processus géologiques, avec à la clé la reconstitution de [Paléoenvironnements](#).

Géochimie des isotopes radiogéniques

L'outillage de base de la géologie isotopique est le [Spectromètre de Masse](#) et comme son nom l'indique cette technique géologique repose sur la mesure, grâce à cet outil, des différents [Isotopes](#) des [Éléments Chimiques](#) présents dans les roches et dans les minéraux.

Chaque élément chimique est défini par son nombre de protons Z appelé [Numéro Atomique](#) ; c'est ce nombre qui détermine la case que cet élément occupe dans le [Tableau Périodique](#) de [Mendeleïev](#). Dans cette case, il peut exister plusieurs isotopes du même élément qui diffèrent alors par leur nombre de [Neutrons](#).

Certains isotopes sont stables, d'autres ne le sont pas et donnent, après une émission radioactive, naissance à un autre élément qui peut être lui-même sous la forme d'un isotope instable ou radioactif. Lorsque nous reportons sur un repère graphique, repère dont l'axe des [Abscisses](#) représente le nombre de neutrons (N) et l'axe des [Ordonnées](#) le nombre des protons (Z) de tous les isotopes connus, nous nous apercevons que tous les isotopes stables

sont regroupés autour d'une courbe nommée "[Vallée de Stabilité](#)" située en dessous de la droite $Z = N$.

Toutes les radioactivités corpusculaires tendent à faire revenir vers cette vallée les éléments qui les émettent, vallée qui correspond au minimum des énergies d'assemblage nucléaire.

Autre principe de base, l'équation qui régit l'évolution de tout [Isotope Radioactif](#) dite loi de Curie-Rutherford-Soddy.

Lorsqu'un isotope radioactif se désintègre, la variation de cet isotope suit une fonction du temps $N(t)$ qui obéit à la loi $N'(t) = -\lambda N(t)$. Cette équation différentielle a pour solution les fonctions du type $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$. λ est appelée "constante de désintégration".

Elle est liée à une autre constante caractéristique de cette désintégration, T , appelée [Période Radioactive](#) (ou demi-vie), temps au bout duquel il ne reste plus que la moitié de l'isotope présent au départ. Nous avons donc : $N_0/2 = N_0 e^{-\lambda T}$ d'où $\lambda = \ln(2)/T$.

La connaissance de cette constante λ permet d'utiliser cette équation pour mesurer un temps. C'est ce qu'on appelle la "chronologie par le père". Deux problèmes se posent : il faut connaître la quantité de l'élément de départ, nommé ici "élément père" et être sûr que la roche utilisée est bien un milieu fermé, c'est-à-dire que la quantité d'élément père ne varie pas au cours du temps (par apport ou au contraire par disparition non radioactive).

Il est possible d'améliorer le processus de chronologie en utilisant le couple "élément radioactif, élément radiogénique" autrement dit le couple "père, fils".

Géochimie des isotopes stables

On appelle classiquement « géochimie des isotopes stables » ce qui est en fait la géochimie des isotopes non [Radiogéniques](#) (par opposition à la [Datation Radiométrique](#) et au traçage des isotopes radiogéniques).

La recherche s'appuie sur la géochimie des isotopes stables des éléments légers les plus importants (carbone, oxygène, azote, chlore, hydrogène, soufre), tout en suivant les variations fines de leurs [Rapports Isotopiques](#).

Ainsi, on déchiffre les processus physico-chimiques (fusion, cristallisation, dégazage, interaction eau-roche, etc.) responsables de leurs répartitions dans les différents réservoirs (noyau, manteau, croûte, sédiments, atmosphère, etc.) de la Terre.

Nous suivons également l'évolution de ces répartitions depuis la naissance de la Terre et on apporte des contraintes sur les matériaux à partir desquels notre planète s'est formée.

Pour mesurer ces fines variations de rapports isotopiques, quelques dixièmes de pour cent en général, on utilise des procédures délicates d'extractions et de purifications de ces éléments,

souvent peu concentrés dans les objets géologiques, puis on les analyse au moyen de spectromètre de masse à source gazeuse (molécules CO_2 , H_2 , O_2 , CH_3Cl , N_2 , SO_2 , SF_6).

Par exemple pour l'azote, il est possible de mesurer le rapport $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ sur moins d'une [nano mole](#) d'azote. Pour le chlore, une technique d'extraction permet de détecter du chlore contenus dans des matrices silicatés à des concentrations inférieures à 100 [ppm](#) en vue de la mesure du rapport $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$.