



HAL
open science

Symphonie chimique

Philippe Boulvais

► **To cite this version:**

Philippe Boulvais. Symphonie chimique. Editions Les Oeuvres vives, 134 p., 2020, 978-2-9544664-6-0. insu-02536383

HAL Id: insu-02536383

<https://insu.hal.science/insu-02536383>

Submitted on 10 Apr 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

© Éditions les Œuvres vives, 2020
ISBN 978-2-9544664-6-0

Symphonie chimique

Philippe BOULVAIS

Les Œuvres vives

La Terre est une boule d'éléments chimiques. Certains sont abondants et célèbres, comme le fer, l'oxygène, l'aluminium ; d'autres sont rares et méconnus, comme le gallium, le germanium, l'euporium.

Au sein de la planète, les éléments ne sont pas répartis de façon homogène. Dans l'atmosphère, on trouve essentiellement de l'azote et de l'oxygène, plus quelques autres éléments volatils regroupés en molécules diverses, comme le gaz carbonique (CO_2) ou le méthane (CH_4). Dans les océans et les eaux de surface continentale, l'hydrogène et l'oxygène forment la molécule d'eau (H_2O). Dans les roches

de la croûte terrestre, continentale ou océanique, le silicium et l'oxygène forment la base des minéraux silicatés, dans lesquels on trouve les éléments dits lithophiles. Sous la croûte, une immense enveloppe de roches silicatées particulièrement riches en magnésium constitue le manteau terrestre. Et au centre de la planète, le noyau métallique est composé d'un alliage de fer, de nickel et de soufre. Nous-mêmes, matière vivante, ne sommes pas grand-chose d'autre qu'un assemblage, plus ou moins bien réussi d'ailleurs, de carbone et d'hydrogène, d'oxygène et d'azote, et d'un peu de phosphore.

Tous les éléments chimiques sont construits sur le même modèle, celui de l'atome, infime entité plus petite qu'un millionième de millimètre. On mesure les atomes en ångström (Å), un ångström valant 0,1 nanomètre. Chaque atome est constitué d'un noyau autour duquel orbitent des électrons. Et le noyau lui-même est constitué de protons et de neutrons.

La différence entre les éléments chimiques se fait par le nombre de protons que l'on trouve dans leur noyau, et que l'on appelle le numéro atomique. Par exemple, les atomes d'hydrogène contiennent un proton, ceux de carbone en contiennent six,

ceux de fer en contiennent vingt-six. Le nombre d'électrons autour du noyau atomique est identique à celui des protons. Comme les protons portent une charge électrique positive et que les électrons portent une charge électrique négative, les atomes sont électriquement neutres. Parfois, bien souvent en fait, les atomes perdent ou accueillent un ou plusieurs électrons, et deviennent des ions, cations et anions. Le sodium a la faculté de perdre facilement un électron, alors que le chlore peut en accueillir un supplémentaire dans son nuage électronique. Sodium (Na^+) et chlore (Cl^-) sont ainsi faits pour s'entendre, pour se lier ioniquement, et former le couple NaCl , la halite, autrement connue comme le sel de cuisine. Les neutrons ne servent pas à grand-chose. Ils sont neutres électriquement, et ne font qu'alourdir la masse du noyau des atomes. Par exemple, les atomes de carbone, qui contiennent six protons, peuvent contenir six neutrons, ou bien sept, ou bien huit. Cela nous donne trois espèces de carbone, trois isotopes dit-on, avec douze masses pour le carbone 12, treize pour le carbone 13 et quatorze pour le carbone 14. Pour tout dire, l'augmentation du nombre de neutrons dans le noyau des atomes crée un déséquilibre qui se traduit par une instabilité de ces noyaux. Et de

temps en temps, ces noyaux surchargés en neutrons se désintègrent ; c'est la radioactivité. L'isotope 14 du carbone est radioactif, il se désintègre en azote 14, isotope radiogénique, c'est-à-dire généré par la radioactivité. Cette propriété est d'ailleurs à la base de la méthode de datation dite « au carbone 14 ».

Sur Terre, on ne fabrique pas d'éléments chimiques, hormis ceux qui proviennent de la désintégration des isotopes radioactifs. La grande majorité des éléments chimiques terrestres était présente au moment même de sa formation, il y a 4,57 milliards d'années. Comprendre la Terre nécessite donc de savoir d'où viennent les éléments qui la constituent. Il faut alors remonter l'histoire à son début, au moment même de la naissance de l'Univers, il y a 13,8 milliards d'années. Naissance grandiose connue comme étant le Big Bang (Grand Boum en Français...). La matière générée dans ce Big Bang s'est propagée dans ce qui est maintenant notre univers. Au sein de larges nuages d'hydrogène, des étoiles se sont ensuite formées. Les étoiles apparaissent, vivent puis meurent. À chaque étape, des noyaux d'atomes sont synthétisés, c'est la nucléosynthèse, puis ils sont dispersés dans l'espace. Notre Soleil, lui, est apparu il y a 4,57 milliards d'années, et pour l'accompagner les planètes du

système solaire, dont la Terre.

C'est cette histoire grandiose, cette symphonie cosmique, que je vais raconter ici, pas moins. Voyage dans le temps et dans l'espace, dans l'espace-temps parfois, vous découvrirez la succession d'événements dont la Terre est héritière. Et pour le dire déjà, cette histoire continuera bien après que nous soyons redevenus poussière d'étoile. Sur et dans la Terre elle-même, l'histoire est tout aussi riche. L'individualisation des réservoirs terrestres, rocheux, métalliques et aqueux s'est faite par suite de grands événements géologiques, y inclus la formation de la Lune. À une échelle plus réduite, les processus géologiques terrestres, mis en musique par la Tectonique des plaques, ont permis de concentrer des éléments chimiques dans de véritables gisements. Ainsi du néodyme, membre du groupe des Éléments de Terres Rares, exploités dans les sols chinois et burundais, et que l'on retrouve maintenant au cœur de nos éoliennes ou dans nos téléphones portables. Longue partition que l'histoire des éléments chimiques, du Big Bang à nos écrans.

Le Big Bang et les étoiles

L'univers dans lequel nous errons, petite planète autour d'une petite étoile (le Soleil), dans un coin excentré d'une petite galaxie (la Voie Lactée), est apparu il y a 13,8 milliards d'années. Qu'y avait-il avant ? Réponse difficile, voire impossible, en tout cas pour moi. Je laisse les théoriciens, les théologiens, les poètes, et éventuellement mon beau-frère, s'en occuper. Le lecteur curieux d'approfondir se tournera vers les livres et conférences de Jean-Pierre Luminet, le bien nommé, dont l'œuvre foisonnante est éclairante...

La naissance de l'Univers

Le Big Bang marque la naissance brutale de notre univers. Les physiciens s'échinent à reconstituer la séquence d'apparition des particules générées là, leurs interactions, leur disparition. Pour nous, il est suffisant de comprendre que dès les premières secondes après le Big Bang, une masse incommensurable de matière s'est dispersée, un peu comme une bille de plâtre qui exploserait, répandant brutalement un nuage blanchâtre tout autour. Sitôt le Big Bang, c'est un nuage de protons, de neutrons, d'électrons aussi, qui enfle prodigieusement. Protons et neutrons s'associent alors, pour former les premiers noyaux d'hydrogène et d'hélium. Ces deux éléments sont encore aujourd'hui les plus abondants dans l'univers. À ce stade, les atomes ne sont pas réellement formés, car les liaisons entre les électrons et les noyaux d'atomes ne résistent ni aux chaleurs extrêmes ni aux photons, incarnation de la lumière, qui n'ont de cesse de casser ces liaisons. Il faut attendre quelques milliers d'années pour qu'avec la baisse de la température ambiante, les électrons réussissent à se fixer autour des noyaux. Les premiers atomes proprement dits sont alors

constitués.

Comme un nuage de plâtre après l'explosion de la petite bille, le nuage primordial est riche en atomes d'hydrogène essentiellement. Le nuage semble homogène de prime abord. Mais à y regarder de plus près, certaines zones de ce nuage sont plus denses que d'autres. La force de gravité qui y règne contrecarre l'expansion. Et ces énormes masses où l'hydrogène se concentre seront les futures galaxies, regroupement d'étoiles.

Depuis 13,8 milliards d'années, l'univers est toujours en expansion. On le sait notamment en observant les galaxies : toutes s'éloignent les unes des autres, et d'autant plus rapidement qu'elles sont éloignées les unes des autres. Il est possible que, dans quelques temps, « un certain temps » comme disait Fernand, l'énergie cinétique initiale insufflée par l'explosion primordiale ne soit plus suffisante pour contenir la propension naturelle des corps à s'attirer entre eux, selon la loi de la gravitation universelle. La gravité l'emportera, et l'univers cessera son expansion. Les galaxies feront le chemin inverse, et se rapprocheront les unes des autres. L'univers s'effondrera sur lui-même, en un fatal Big Crunch (que je ne traduis pas pour le coup...). Ce

Big Crunch s'accompagnera alors peut-être de la naissance d'un nouvel univers, par l'entremise d'un nouveau Big Bang. Pas d'inquiétude néanmoins, ou malheureusement peut-être pour les plus curieux, nous ne serons plus là pour observer ce cataclysme universel.

La formation des étoiles

Au sein des grandes masses d'hydrogène issues du Big Bang, et qui donneront naissance aux galaxies, la matière n'est à nouveau pas répartie de manière homogène. Certaines zones plus concentrées voient l'effondrement sur elles-mêmes de grandes quantités d'hydrogène. Si la température diminuait au sortir du Big Bang, la température augmente à nouveau dans ces zones en effondrement, simplement par l'effet des interactions entre les atomes qui les composent. On passe ainsi de quelques milliers de degrés, températures communes dans les nuages d'hydrogène, à plusieurs centaines voire à des millions de degrés. Et à ces températures, les énergies deviennent telles que les noyaux d'hydrogène peuvent fusionner entre eux

pour former des noyaux d'hélium. C'est une fusion nucléaire. Pour fabriquer un noyau d'hélium, il faut deux noyaux d'hydrogène. Or, il s'avère que la masse d'un noyau hélium est légèrement inférieure à la masse de deux atomes d'hydrogène. Mais rien ne se perd, tout se transforme : la masse disparue est transformée en énergie. La fusion nucléaire s'accompagne donc d'une formidable libération d'énergie. Peut-être un jour réussirons-nous d'ailleurs à maîtriser ce processus sur Terre, et à l'étendre sur une échelle industrielle. C'est l'objet de la recherche menée actuellement dans le cadre du programme ITER, sur le site de Cadarache, dans le sud de la France. Ce sera la fin de nos problèmes de production d'énergie, et accessoirement la fin de la production d'énergie à base de combustion d'énergies fossiles, pétrole ou charbon, ou de fission nucléaire (qui contrairement à la fusion nucléaire, consiste à casser des atomes lourds, comme l'uranium 235).

Dans le nuage d'hydrogène en effondrement, l'énergie libérée par la fusion d'atomes d'hydrogène en atomes d'hélium est telle que la température augmente encore, favorisant de nouvelles fusions, qui libèrent plus d'énergie. Ce qui apparaît comme une catastrophe inarrêtable n'est en réalité que la

naissance d'une étoile ; notre Soleil est né ainsi.

Certaines étoiles sont plus massives que le Soleil, d'autres le sont moins. La taille d'une étoile dépend en fait de la taille du nuage d'hydrogène qui s'est effondré sur lui-même. Et cette taille n'est pas définie en réponse à quelque processus physique complexe ; c'est le hasard qui décide. Dans le nuage de plâtre après l'explosion de la bille, les zones plus concentrées en poussière blanche sont aléatoirement réparties. Dans les masses d'hydrogène géantes, les futures galaxies, les nuages d'hydrogène sont variables en taille et en répartition. Les étoiles qui en naîtront seront de taille variable.

Aujourd'hui, les étoiles sont regroupées dans les galaxies. La taille même des galaxies est variable. Et pour tout dire, les galaxies sont regroupées en amas de galaxies, correspondant à des zones plus vastes, plus massives. Héritage du Big Bang, les toutes petites hétérogénéités initiales ont conditionné la répartition de la matière dans notre univers, sous forme d'étoiles, de galaxies, d'amas de galaxies. Une galaxie comme la nôtre compte cent milliards d'étoiles, et dans l'univers, il y a environ cent milliards de galaxies. Calculons : il y a environ dix mille milliards de milliards d'étoiles dans

l'univers (10^{22}). Difficile de prendre la mesure de ce nombre... C'est à peu de choses près le nombre de litres d'eau que contient l'océan terrestre. La prochaine fois que vous regarderez la mer, vous aurez peut-être des étoiles plein les yeux...

Dans les étoiles de la taille du Soleil, la température atteint environ quinze millions de degrés au cœur. Ces températures sont suffisantes pour provoquer la fusion d'hélium et d'hydrogène, pour former un noyau de lithium (qui comprend donc trois protons et quelques neutrons) Malheureusement pour lui, le lithium n'est pas stable à ces températures. Sitôt sa formation, il fusionne avec un autre noyau de lithium pour former un atome de carbone (qui comprend six protons et autant, voire un peu plus, de neutrons). Le béryllium (quatre protons) et le bore (cinq protons) fonctionnent comme le lithium : dès qu'ils se forment, ils sont détruits. Le Soleil ne contient donc en son centre, là où il fait le plus chaud, qu'un peu de carbone en plus de l'hydrogène et de l'hélium.

Dans les étoiles plus massives que le Soleil, dix fois plus massives disons, les températures internes sont encore plus élevées, ce qui se comprend

car la quantité d'hydrogène initiale étant plus grande, les fusions nucléaires y sont plus actives, et libèrent donc plus d'énergie. Par analogie, une grande flambée de cheminée est plus chaude qu'un feu gentillet au fond de l'âtre ; une grosse étoile est plus chaude qu'une petite étoile. Alors, dans le cœur de ces étoiles massives, le carbone lui-même peut entrer en fusion avec des noyaux plus légers, pour former des noyaux d'azote (sept protons), d'oxygène (huit protons), et ainsi de suite jusqu'au silicium (quatorze protons). Le silicium étant très stable, il faudrait des températures encore plus élevées pour qu'il fusionne à son tour.

Au cours de la vie des étoiles massives, on génère ainsi par fusions nucléaires les noyaux d'atomes entre l'hélium et le silicium. Fait intéressant et peut-être contre-intuitif, les étoiles massives vivent moins longtemps que les étoiles de la taille du Soleil. En effet, si elles disposent de plus de carburant à leur naissance, elles le brûlent beaucoup plus vite. A sa mort, le Soleil aura vécu neuf milliards d'années. Nous en sommes à la moitié ; pas de panique... De leur côté, les étoiles massives « s'éteignent » au bout de quelques millions voire dizaines de millions d'années. Mais, le grandiose de leur extinction compense brillamment la brièveté

de leur existence.

La mort des étoiles

Avant sa déchéance ultime, une étoile vit. Si sa taille est prédéterminée par la quantité initiale d'hydrogène disponible, elle se maintient en forme (sphérique) sous l'action de deux forces opposées. La première est la gravité, qui tend à concentrer la matière. L'autre est la pression de gaz, qui tend à augmenter le volume de l'étoile. Car en effet, aux températures des cœurs d'étoiles, la matière est gazeuse, plasma torride. Stephen Hawking, fantastique physicien anglais, célèbre aussi bien par ses travaux sur l'univers et les trous noirs que par sa résistance exceptionnelle à la maladie de Charcot, a comparé une étoile à un ballon de baudruche. Le ballon est rempli de gaz sous pression, maintenu en place par l'enveloppe même du ballon, qui joue le rôle de la gravité. L'analogie renvoie à la destinée des étoiles, qui comme les ballons, finissent en une explosion terrible. Pression de gaz et gravité s'équilibrent donc. Elles donnent à l'étoile sa forme sphérique et définissent ses mensurations. Avec le

temps, la quantité d'hydrogène diminue, car les noyaux d'hydrogène fusionnent entre eux pour donner de l'hélium, en proportion de deux pour un. La pression de gaz diminue donc d'un facteur deux. On a vu plus haut que cette fusion s'accompagne d'une perte de masse, compensée par une forte libération d'énergie (le Soleil nous chauffe en conséquence). La force de gravité au sein de l'étoile, directement fonction de la masse, diminue donc également, mais beaucoup moins que la pression de gaz. Et ce qui devait arriver arriva : après une certaine quantité de fusion d'hydrogène, la pression de gaz ne parvient plus à compenser la gravité, et l'étoile s'effondre sur elle-même. C'est le début de sa mort.

Pour les étoiles de la taille du Soleil, l'effondrement, l'implosion de l'étoile, s'accompagne d'une élévation de température qui favorisent d'autant les réactions de fusion nucléaire. La quantité de carbone augmente au cœur. L'augmentation de température n'est pas suffisante néanmoins pour générer des noyaux plus lourds que le carbone. Dans le même temps, de formidables ondes de choc accompagnent l'implosion, si bien que les parties externes de l'étoile sont éjectées dans l'espace environnant. Ce triptyque implosion - onde

de choc - explosion est connu des moins jeunes grâce aux anciens téléviseurs à tube cathodique défectueux. Ainsi d'une étoile : quand elle implose, un observateur extérieur n'y voit qu'une explosion. Lorsque le Soleil mourra de sa belle mort dans 4,5 milliards d'années, il enflera jusqu'à englober la planète Mars. Mars étant plus éloignée du Soleil que la Terre, vous comprenez donc que la Terre sera alors balayée par un nuage d'hydrogène à une température de plusieurs milliers de degrés, volatilissant sous forme gazeuse toute matière qui sera exposée à la surface. Ce sera la fin de toute forme de vie terrestre. Zones externes expulsées, le Soleil deviendra un astre riche en carbone, errant dans la Voie lactée, et se refroidira lentement. Il sera de moins en moins lumineux, jusqu'à devenir un corps noir, seul. Fin de l'histoire.

Pour les étoiles massives, plus de dix fois la masse du Soleil, la fin de vie se déroule en conséquence des mêmes événements. Mais cette fois, le surcroît de température est suffisant pour que même les noyaux de silicium parviennent à fusionner avec des noyaux plus légers, pour former des noyaux plus lourds, tels que le phosphore (quinze protons et un peu plus de neutrons), le soufre (seize protons). À chaque nouvelle fusion

nucléaire générée, une nouvelle énergie est libérée, et la température augmente d'autant. Et c'est ainsi jusqu'à la fusion qui génère du fer 56 (vingt-six protons et trente neutrons). Ce noyau de fer est extrêmement stable, et il lui est impossible de fusionner avec d'autres éléments. Il faut faire intervenir d'autres processus qu'une fusion nucléaire simple pour fabriquer les noyaux plus lourds que le fer. Ces processus surviennent au stade ultime de l'effondrement des étoiles massives sur elles-mêmes, et tiennent à des flux terribles de neutrons, à la collision entre les couches externes de l'étoile qui s'effondrent et l'onde de choc formidable émise par le cœur déjà effondré. Il est possible aussi que certains éléments lourds soient générés lorsque deux étoiles à neutrons, elles-mêmes résidus d'implosions antérieures d'étoiles massives, entrent en collision. C'est bien compliqué à vrai dire...

Toujours est-il que les éléments plus lourds que le fer existent bel et bien. On les connaît dans la classification périodique des éléments, cobalt, plomb ou platine. Seulement, ils sont difficiles à générer, en conséquence de quoi ils sont peu abondants dans l'univers. Chose a priori étonnante, ils sont d'autant plus rares que leur numéro atomique (le nombre de protons de leur

noyau) est impair. Par exemple, l'euporium (de numéro 63) est moins abondant que ses voisins le samarium (numéro 62) et le gadolinium (numéro 64). Reportées en fonction du numéro atomique, comme dans un diagramme $y = f(x)$, joie des collégiens, les abondances des éléments dessinent ainsi une distribution en dents de scie, avec des pics pour les numéros pairs et des creux pour les numéros impairs. La raison de cette particularité tient à la plus grande stabilité des noyaux pairs, mieux agencés, plus réguliers, et donc plus stables. Quoi qu'il en soit, au palmarès des abondances cosmiques, vient donc en tête l'hydrogène, suivi de l'hélium. Le carbone, le silicium et le fer, tous trois très stables pendant la nucléosynthèse stellaire, et tous trois de numéro atomique pair d'ailleurs, complètent le quinté. Le lithium, le béryllium et le bore sont des exceptions, car ils sont instables aux températures stellaires. En fait, ces éléments sont synthétisés dans l'espace interstellaire, par l'interaction entre des rayonnements cosmiques et les quelques atomes qui s'y promènent. Ces trois éléments sont parmi les plus rares dans l'univers.

Lorsque qu'une étoile massive meurt, elle s'effondre sur elle-même, et de formidables ondes de choc sont émises. Ce processus est une supernova.

Les ondes dispersent dans l'espace alentour une partie des noyaux d'atomes qui viennent d'être générés lors de l'effondrement même, en particulier les noyaux lourds. Après que des électrons se soient accrochés aux noyaux, en réponse à une interaction fondamentale de nature électrique, les atomes sont formés, et ainsi les éléments chimiques. En un mot, les supernovas ensemencent l'univers en éléments chimiques lourds. Pour visualiser l'affaire, cherchez sur internet des images de la Nébuleuse du Crabe. C'est ce qui reste d'une supernova observée au XI^e siècle par les astronomes chinois. Vous apprécierez par vous-même le grandiose du processus. À l'endroit même où se déroulent les supernovae, le résidu ultime est un corps extrêmement dense et massif, comme une étoile à neutrons ou un pulsar. Cela peut aboutir également à un trou noir, objet céleste ayant concentré tellement de matière et devenu si massif que même la lumière ne parvient plus à s'en échapper... Vilaine bête !

Le système solaire

Le système solaire est l'ensemble des astres soumis au champ de pesanteur du Soleil. Pour tenter d'en saisir la composition chimique, il paraît judicieux d'inventorier ses matériaux constitutifs, au premier rang desquels les planètes, puis les météorites. Les modalités de formation du système solaire pourront alors être présentées. Où l'on verra que le Soleil descend d'un nuage d'hydrogène fécondé par une supernova...

Les matériaux du système solaire

L'essentiel de la masse du système solaire est contenu dans le Soleil lui-même. Plus de 99%. Et ce Soleil, petite étoile de type naine jaune, est composé essentiellement d'hydrogène et d'hélium. L'hydrogène y est en fusion nucléaire pour former de l'hélium. L'énergie libérée nous est transmise en partie sous forme de radiations lumineuses : le Soleil nous éclaire et nous chauffe. Reste qu'à partir de l'analyse du spectre électromagnétique émis par le Soleil, nous savons qu'il contient également des éléments chimiques lourds, identiques à ceux que l'on trouve sur Terre. On sait donc déjà que le Soleil n'est pas une étoile de première génération, issu uniquement d'un nuage d'hydrogène fils du Big Bang : nécessairement, la présence d'éléments lourds implique qu'une partie de la matière constitutive du Soleil est passée par un cycle stellaire précédent, terminé par une supernova, seul processus capable de synthétiser les noyaux lourds.

Me Voici Tout Mouillé, J'ai Suivi Un Nuage...

Cette jolie phrase est un moyen mnémotechnique utile à la mémorisation des planètes du système

solaire. Mercure, Vénus, Terre, Mars, puis, après la virgule, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune. Les huit planètes sont citées dans l'ordre de leur distance au Soleil. Mercure, la plus proche, est aussi très chaude, son nom l'atteste. Vénus, sœur favorite de la Terre, présente elle-aussi des températures élevées à sa surface, supérieures à 450°C. Mars, planète rouge, tient sa couleur de l'abondance des oxydes de fer dans les roches de sa surface. Ces quatre premières planètes, les planètes telluriques, ont en commun leur taille relativement réduite, ainsi que leur constitution : elles sont composées essentiellement de roches et de métaux. Toutes possèdent en effet un noyau métallique proche en composition du noyau terrestre, alliage de fer, nickel et de soufre, et entouré d'un manteau rocheux. Les quatre planètes externes sont les planètes joviennes (de Jupiter) et sont des géantes gazeuses. Elles sont en effet beaucoup plus massives que les quatre planètes telluriques, et disposent d'une épaisse couche de gaz en surface. En leur cœur, elles possèdent néanmoins un noyau de roches et de métaux, très proches de la constitution d'une planète tellurique. Un peu comme si une autre Terre se trouvait au centre de Jupiter ou de Saturne.

Les matériaux rocheux et métalliques ne sont pas composés des mêmes éléments chimiques que les gaz. Les éléments volatils donnent les gaz, les éléments réfractaires constituent les roches et les métaux. De la répartition des planètes, il vient donc que le système solaire est hétérogène du point de vue des éléments chimiques. Les zones internes, correspondant aux planètes telluriques, sont riches en éléments réfractaires (ou pauvres en éléments volatils), alors que les zones externes, correspondant aux géantes gazeuses, sont très riches en éléments volatils et contiennent la même quantité d'éléments réfractaires que les zones internes. Reste à établir la différence profonde entre volatils et réfractaires, clé pour identifier et comprendre les processus à l'origine de la répartition des éléments chimiques au sein du système solaire.

Les éléments se présentent sous trois formes, solide, liquide ou gazeuse, suivant les températures et pressions auxquelles ils sont soumis. À haute température, au-delà de 2000°C disons, tous les éléments sont à l'état de gaz. En refroidissant, les éléments condensent à l'état solide ou à l'état liquide. Nous expérimentons l'affaire nous-même dans notre quotidien : l'air que nous respirons contient de la vapeur d'eau, issue de l'évaporation

des océans. Dans l'atmosphère, s'il fait froid, cette vapeur d'eau condense sous forme de cristaux, et il neige. S'il fait un peu meilleur, il ne fait que pleuvoir ; la vapeur d'eau s'est condensée en gouttes de pluie. Plus près de nous, au petit matin, en été et au printemps, nous voyons se former de gouttelettes à la surface des herbes du jardin ou sur les fils des toiles d'araignée au travers des chemins forestiers ; c'est la rosée du matin. À la fin de l'automne ou en hiver, du givre se forme, minuscules cristaux de glace.

Condensation à l'état liquide ou condensation à l'état solide est la destinée de tous les éléments présents dans une masse de matière chaude, au-delà de 2000°C, et qui refroidirait. Les éléments réfractaires ont une température de condensation élevée, et condensent en premier lors du refroidissement, les volatils condensent ensuite, à plus basse température. L'azote ne condense à l'état liquide qu'à des températures extrêmement basses, vers -196°C, et se présente donc à l'état gazeux dans notre atmosphère terrestre, heureusement plus chaude. Au nombre des éléments réfractaires, on compte le titane, le magnésium, le calcium. Les cendres de nos cheminées sont riches en chaux, oxyde de calcium ; le calcium n'a pas

été volatilisé dans les fumées. Les volatils sont les éléments constitutifs de l'atmosphère, azote, oxygène, carbone, hydrogène surtout. Des éléments possèdent un caractère intermédiaire ; ainsi le plomb qui, simplement chauffé dans une casserole, se liquéfie rapidement et émet des vapeurs nocives. La fabrication de munitions à partir de statues royales en temps révolutionnaires satisfait aux principes de la physique élémentaire.

Des satellites sont en orbite autour des planètes. Si Mercure et Vénus en sont dépourvus, nous avons la Lune, et Mars dispose de Phobos et Déimos, deux petits satellites légèrement absurdes, en forme de patateïde échevelé. Les géantes gazeuses sont mieux garnies que les planètes telluriques, et des dizaines de satellites en font l'ornement. Ornement enrichi de la présence d'anneaux. Ceux de Saturne sont les plus célèbres car les plus visibles et identifiés depuis longtemps, par Galilée au début du XVIIe siècle. Mais les autres géantes en disposent également, plus ténus. Histoire intéressante que celle de ces anneaux. Pour faire simple, les anneaux correspondent à des satellites qui, soit n'auraient pas réussi à se regrouper en une seule masse pour former un satellite, soit l'auraient réussi, mais cette masse aurait ensuite explosé sous

un effet de marée. Tout le monde sait que les océans terrestres se déforment sous l'influence conjuguée du Soleil et de la Lune ; nous avons des marées de plusieurs mètres d'amplitude. Moins connues sont les déformations des continents, induites par les mêmes effets de marée, mais dont l'amplitude (quelques centimètres) et la longueur d'onde (centaines de kilomètres) sont respectivement trop faible et trop grande pour que nous les ressentions (ce qui n'est pas plus mal...). Imaginez maintenant l'influence de Saturne, énorme masse, sur ses satellites. Nombre d'entre eux n'ont pas résisté aux tensions internes générées par les marées saturnales. Ils n'ont pas réussi à se regrouper, ou s'ils l'ont fait, ils ont explosé. Les géantes gazeuses sont terribles pour leurs enfants satellitaires.

Entre les deux groupes de planètes, et correspondant à la virgule de la jolie phrase où vous mouillâtes en suivant un nuage, se trouve la ceinture d'astéroïdes. C'est un ensemble d'astres de tailles variables. Les poussières côtoient les blocs, les fragments percutent les bolides. Le plus gros objet de la ceinture d'astéroïdes est Cérès, sphère de mille kilomètres de diamètre. Chose intéressante, c'est de la ceinture d'astéroïdes que proviennent la plupart des météorites qui tombent sur Terre ; nous y

reviendrons. Les astéroïdes de la ceinture tournent autour du Soleil, en décrivant une trajectoire, une orbite, parallèle aux orbites planétaires. Et toutes ces orbites sont contenues dans un même plan, le plan de l'écliptique. Le système solaire prend ainsi l'aspect d'un disque, Soleil au centre. Pluton, situé au-delà de Neptune, n'est plus considéré comme une planète depuis quelques années pour cette raison : la rotation de Pluton se fait dans un plan oblique d'une dizaine de degrés par rapport au plan de l'écliptique. Pluton pleure de n'être plus une planète. Et au-delà de Neptune, il existe d'autres astres soumis à l'attraction du Soleil, faisant donc partie du système solaire et en constituant les confins. Je passe sur les détails. Je me contente ici d'indiquer que ce sont les objets trans-neptuniens, et que des comètes célèbres, voyageuses extrêmes dans le système solaire y retournent après nous avoir rendu des visites régulières.

Les météorites

Les météorites, à la différence des comètes, ont une origine proche de nous, la ceinture d'astéroïdes. Elles méritent une place à part, car, de nature extra-terrestre, ce sont nos témoins les plus précieux des origines du système solaire. Environ trente mille tonnes de météorites parviennent sur Terre chaque année. Comment se fait-ce ? La proximité de Jupiter, la plus grosse des planètes, et le fait qu'au sein même de la ceinture d'astéroïdes il y ait des astres de la taille d'une petite planète, comme Cérès, génèrent des perturbations gravitationnelles dans cette ceinture. Emphase pour expliquer que, parfois, des blocs en sont expulsés lorsqu'ils sont déviés de leur trajectoire par le jeu des masses de Jupiter ou de Cérès. Ces blocs errent alors dans l'espace interplanétaire, et de temps à autre, croisent le champ de gravité terrestre, et nous tombent dessus. Histoire amusante. Une météorite est tombée dans le Morbihan il y a quelques années. On ne l'a pas retrouvée. Il faut préciser ici que la commune où elle s'est vraisemblablement écrasée se nomme Néant-sur-Yvel. Les recherches à Néant n'ont rien donné... Certaines météorites sont

en provenance de Mars ou de la Lune. La surface de ces deux astres présente la trace de nombreux cratères d'impact, vestiges des temps tumultueux originels de l'histoire du système solaire, que nous détaillerons plus loin. À chaque impact, des fragments sont éjectés dans l'espace. Et parfois croisent la Terre. Les célèbres météorites de la classe SNC, pour Shergottite, Nakhlite et Chassignite, nommées en lien avec le nom de leur site d'impact, sont d'origine martienne. Reste que la grande majorité des météorites nous vient de la ceinture d'astéroïdes. À leur entrée dans l'atmosphère terrestre, à des vitesses supersoniques de plusieurs kilomètres par seconde, les frottements avec les gaz de l'atmosphère chauffent tellement la surface des météorites qu'elle fond. Et à l'impact sur la surface terrestre, cette surface fondue refroidit extrêmement rapidement, si bien qu'elle se fige en une croûte noire, du même noir que celui des obsidiennes, laves refroidies rapidement, trempées dit-on. De tels contrastes de température, fusion en surface d'un corps froid en son centre, car en provenance de l'espace froid, génèrent des tensions internes qui bien souvent font exploser les météorites. Les chercheurs de météorites ont donc développé une stratégie *ad hoc*. Si vous trouvez un

fragment de météorite, il est vraisemblable que vous en trouverez d'autres pas trop loin ; c'est la technique que je baptise « technique du chercheur de champignon »... À vrai dire, cette technique est efficace pour les régions désertiques et rocheuses, les regs (à ne pas confondre avec les ergs, champs de dunes sableuses) ; elle ne fonctionne pas très bien à Néant-sur-Yvel. Les météorites ayant fondu en surface à l'entrée dans l'atmosphère, elles présentent une croûte de fusion, noire. Cailloux noirs sur fond ocre des déserts, les météorites sont facilement détectables. Théodore Monod, scientifique explorateur des régions désertiques au Sahara a raconté comment les hommes du désert entassent des cailloux, dont des météorites, noires en surface, pour baliser leurs routes dans l'immensité rocheuse.

Une autre région est propice à la recherche de météorites, la calotte polaire antarctique. Étonnant, non ? Le fait est que l'Antarctique est recouvert d'une couche de glace épaisse de plusieurs kilomètres, accumulation de neiges qui ne fondent pas (pas encore en tout cas, mais gare au réchauffement climatique...). Sous son propre poids, la calotte flue vers la côte, et transporte avec elle les météorites qui lui sont tombées dessus. À la côte, où la calotte fond partiellement en plus de

détacher quelques icebergs vers le large, elle libère les météorites qu'elle contenait, et de véritables gisements se forment en pied de certaines falaises. Une des dernières missions scientifiques dévolues à la recherche de météorites antarctiques, mission anglaise de janvier 2020 à laquelle a participé Romain Tartèse, spécialiste des volatils dans le système solaire, et accessoirement déjà cité dans *Terre de Granite* (Romain, tu m'en dois deux...), a permis la récolte de 90 spécimens. Heureux scientifiques qui font de longs voyages à la recherche de cailloux tombés du ciel.

Les compositions des météorites sont variées. Je n'en ferai pas l'inventaire ici. Il nous suffit de savoir que certaines sont métalliques, constituées d'alliages proches de ce qu'on croit être le noyau métallique des planètes telluriques, et que d'autres sont rocheuses. Au sein de ces dernières, deux grandes catégories sont à distinguer, les chondrites, qui représentent plus de 85% des chutes sur Terre, et les achondrites, assez proches en composition de nos basaltes terrestres.

Les chondrites sont des roches totalement inconnues sur Terre, d'origine exclusivement extraterrestre. Si l'on ajoute le fait que certains

des éléments contenus dans les chondrites ont été datés avec précision à 4,57 milliards d'années, en utilisant la radioactivité de certains atomes, on ne peut qu'apprécier ces objets, véritables témoins des temps originels du système solaire. Alors, de quoi sont constituées ces chondrites ? D'abord, ce sont des cailloux, avec une cohésion interne réelle, suffisante pour qu'ils gardent leur intégrité à leur entrée dans l'atmosphère. La première particularité des chondrites est de contenir des petites billes, globalement sphériques, de quelques millimètres de diamètre. Ces billes, appelées chondres, contiennent des minéraux comme l'olivine ou le pyroxène, minéraux connus sur Terre dans les roches magmatiques comme le basalte. Avec olivine et pyroxène, se trouvent des composants vitreux, véritables éléments de magmas figés, trempés, refroidis si vite qu'aucun cristal n'a eu le temps d'y croître. Il faut bien sûr distinguer ce verre interne aux chondres, témoin de l'histoire ancienne des chondrites, du verre de la croûte de fusion formée par frottement au pourtour des chondrites lorsqu'elles arrivent dans l'atmosphère terrestre. En plus des chondres, les chondrites contiennent des inclusions dites réfractaires, constitués de minéraux exotiques, rares, riches en calcium et aluminium.

L'acronyme anglais CAI's (pour Calcium Aluminium Inclusions) est communément utilisé pour nommer ces grains. Chondres et CAI's baignent dans une matrice, qui donnent la cohésion à l'ensemble. Cette matrice est d'abord formée de minéraux argileux, dont la spécificité est de contenir de l'eau dans leur structure cristalline. Et enfin, dernier élément notable, la matrice des chondrites contient des molécules organiques, c'est-à-dire des assemblages volatils de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote. Je ne dis pas bien sûr que ces molécules sont biotiques, générées par une forme de vie extraterrestre ; bien loin de moi l'idée de chercher dans l'espace l'origine de la vie sur Terre. Je reviendrai sur ce point plus bas. Il reste que, au vu de leur constitution minéralogique, si la matrice des chondrites est riche en éléments volatils, les inclusions qu'elle contiennent, chondres et CAI's, sont riches en éléments réfractaires. Bien curieux ces objets en provenance de la ceinture d'astéroïdes, qui ne sont ni pauvres ni riches en volatils, comme le sont respectivement les planètes telluriques et les géantes gazeuses. Véritables témoins du système solaire précoce, les chondrites fournissent des contraintes majeures pour élaborer le modèle de sa formation.

Un modèle de formation du système solaire

Savoir qui nous sommes, pauvres terriens, passe par comprendre d'où nous venons, enfants des étoiles. C'est la motivation profonde de la recherche scientifique en cosmochimie et en planétologie. L'élaboration des modèles scientifiques est basée sur des données observables, mesurables, et des concepts. L'inventaire des matériaux du système solaire est à mettre au compte des données observables. Il est temps maintenant de dérouler l'histoire de la formation du système solaire, au moins dans ses grandes lignes. Je jetterai sans doute un voile sur certains aspects, encore débattus dans la communauté. J'en omettrai certains autres.

Le système solaire étant particulièrement riche en hydrogène, l'histoire commence nécessairement par celle d'un nuage d'hydrogène, errant dans la galaxie. Errance monotone depuis les temps bigbanguesques, jusqu'à l'acte originel, coït cosmique avec une supernova. Les éléments chimiques lourds, plus lourds que le silicium et le fer, sont générés dans les stades ultimes de la vie des étoiles massives. Et les matériaux du système

solaire contiennent de ces éléments. Le modèle est donc qu'il y a environ 4,6 milliards d'années, une supernova s'est déclenchée dans la galaxie, non loin du nuage d'hydrogène errant qui va donner naissance au Soleil, et qu'on nomme la nébuleuse protosolaire. Les ondes émises par cette supernova ont non seulement déstabilisé ce nuage, mais l'ont ensemencé d'éléments lourds.

Un argument essentiel à l'appui de cette idée vient de la géochimie isotopique. Attention, ce n'est pas la partie la plus simple de l'histoire ; accrochez-vous... Certains atomes sont radioactifs. On l'a vu, une surabondance de neutrons dans le noyau est cause de sa déstabilisation. Tous les atomes radioactifs ne se désintègrent pas à la même vitesse : la moitié d'un stock de carbone 14 se désintègre en 5300 ans, la moitié d'un stock d'uranium 235 en 700 millions d'années. Ces durées, correspondant au temps nécessaire pour désintégrer la moitié des isotopes radioactifs d'un système, sont appelées la demi-vie des isotopes radioactifs. Pendant une supernova, de nombreux isotopes radioactifs d'éléments lourds sont fabriqués, au nombre desquels l'isotope 26 de l'aluminium. Cet aluminium 26 (^{26}Al) a une demi-vie de 700 000 ans, et se désintègre en magnésium 26 (^{26}Mg). Dans certains matériaux du

système solaire, certaines météorites, on a décelé des variations d'abondance de ^{26}Mg par rapport aux autres isotopes du magnésium, dont l'isotope 24. Les géochimistes ont en effet mesuré le rapport d'abondance $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ dans différents matériaux du système solaire ; et ils observent des variations de ce rapport isotopique. Or, comme aujourd'hui la radioactivité de l'aluminium 26 est éteinte (tous les atomes ^{26}Al ont disparu depuis bien longtemps), la seule manière d'expliquer les variations du rapport $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ est d'envisager une inégale répartition d'aluminium 26 au tout début de l'histoire. Et pour ce faire, il a nécessairement fallu que l'aluminium 26 soit incorporé en quantités variables dans les matériaux en cours de condensation et d'accrétion, alors qu'il n'était pas éteint. Peu de temps s'est donc écoulé entre la fabrication de l'aluminium 26 et son incorporation dans les matériaux du système solaire ; une supernova s'est donc déclenchée peu de temps, quelques millions d'années seulement, avant la naissance du système solaire. Ainsi est née l'idée que cette supernova, génératrice d'éléments nouveaux, a également causé l'effondrement du nuage protosolaire. Cet accouplement originel s'est déroulé il y a environ 4,6 milliards d'années, à peine quelques millions d'années avant les âges

les plus vieux mesurés à ce jour sur les chondrites (4,57 milliards d'années) ; ce fut l'acte fondateur de notre système solaire. De l'usage de la géochimie isotopique, compliqué certes, mais fondamental pour reconstituer l'histoire ancienne.

Dans la Voie lactée, on observe aujourd'hui des nébuleuses riches en hydrogène. Les températures y sont élevées, jusqu'à 3000°C. La nébuleuse protosolaire était probablement dans le même état. L'arrivée des ondes en provenance de la supernova s'est accompagnée d'un flot d'atomes lourds, eux-mêmes à haute température, donc à l'état gazeux. Au départ, tout ne fut que gaz. La mécanique céleste, dont je ne mesure pas toutes les subtilités et dont je n'exposerai donc pas les fondements ici, nous dit qu'à son effondrement, le nuage protosolaire s'est mis en rotation, s'est aplati, et que la grande majorité de la matière qui y était présente s'est concentré en son point central, le futur Soleil. L'image est celle d'un disque renflé en son centre. Au centre justement, la température a nécessairement augmenté en lien avec l'augmentation des interactions entre les atomes. À un certain stade, les températures ont été suffisantes pour déclencher la fusion de noyaux d'hydrogène, sur le modèle de ce que j'ai expliqué plus haut. Le

Soleil s'est allumé. Dans le même temps, au sein du disque solaire qui ne contient que les atomes ayant échappé à l'attraction du Soleil (ce qui constitue à peine 1% de la masse totale du système solaire), la température a diminué car la matière y était diluée, et les interactions entre atomes y étaient moins importantes. Les éléments les plus réfractaires ont alors commencé à condenser. On se souvient que dans une masse gazeuse chaude qui se refroidit, les premières condensations se font à l'état solide ou à l'état liquide. Après leur condensation, les nanoparticules puis microparticules ont commencé à s'agglomérer les unes aux autres, certaines solides et certaines autres liquides, toutes connaissant une croissance continue en agrégeant les particules voisines. C'est possiblement de cette façon que sont apparues les CAI's et les chondres aujourd'hui composants des chondrites. La forme d'équilibre d'un corps fluide dans l'espace est une sphère. Il suffit de visionner les vidéos des astronautes en apesanteur qui s'amuse à attraper et à ingurgiter les billes d'eau volant dans leur cabine spatiale. Les chondres sont des petites billes, et une bonne façon d'acquérir cette forme est d'avoir été liquide. D'ailleurs, on observe du verre dans ces chondres ; et ce verre est un magma trempé, refroidi si vite qu'il

n'a pas cristallisé. Reste que ce magma a été liquide, forcément : l'état liquide est avéré. Les CAI's de leur côté, peuvent s'apparenter à des cristaux formés lors de la condensation à l'état solide des éléments réfractaires, comme l'aluminium ou le calcium. Grâce aux géochronologues, qui sont parvenus à dater les constituants les plus fins des chondrites, nous savons que cette condensation à température élevée (vers 1500-2000°C) s'est faite vers -4,57 milliards d'années.

Le refroidissement au sein du disque solaire se poursuit. De nouveaux atomes condensent, de nouveaux minéraux apparaissent qui contiennent des éléments de moins en moins réfractaires, ou des éléments plus volatils. À nouveau, ces minéraux s'agglomèrent les uns aux autres, tout en englobant les matériaux formés avant eux, tels que les CAI's et les chondres. Les minéraux argileux, puis les molécules organiques, constituées d'éléments volatils, sont probablement fabriqués là. Cette séquence de condensation et d'accrétion reproduit ainsi la structure interne des chondrites, véritables témoins du refroidissement primordial du disque solaire.

Vous l'aurez noté, à mesure que les atomes condensent et s'accrètent, la taille des matériaux solides augmente. Les particules s'agglomèrent les unes aux autres, pour former des petits cailloux, puis de véritables blocs. Plus un corps grandit, plus il est capable de capter des éléments plus petits. On assiste ainsi à un véritable cannibalisme particulaire, où les gros mangent les petits. Assez vite, les gros deviennent très gros, suffisamment gros pour développer un champ d'attraction gravitaire efficace. Alors, non seulement ces mega-blocs agglomèrent statistiquement de plus en plus de nouveaux matériaux, car leur surface externe augmente, mais grâce à leur champ de pesanteur, ils en attirent de nouveaux. Plus les corps sont gros, plus ils grossissent vite. Lorsqu'enfants nous faisons rouler une boule de neige pour fabriquer un bonhomme, nous fumes témoins d'un processus comparable : la petite boule de neige croît doucement au départ, puis après quelques tours dans la neige, elle grossit plus vite, de plus en plus vite.

Quelques millions d'années après l'effondrement de la nébuleuse solaire et la naissance du Soleil, il ne reste dans le disque solaire que quelques centaines de gros blocs, des planétésimaux, petites planètes en somme, qui ont avalé et digéré

l'essentiel des petits blocs. La partition qui se joue alors est quelque peu effrayante, guidée par la baguette gravitationnelle de la mécanique céleste. Les planétésimaux tournent autour du soleil, dans le plan de l'écliptique. Certains, légers, sont propulsés hors de leur trajectoire par la masse imposante de planétésimaux plus grands, les proto-planètes ; ils viennent alors percuter d'autres planétésimaux dans des chocs dantesques. De proche en proche, on voit ainsi se dessiner le cortège des planètes actuelles, nourries continûment au sein du disque solaire, véritables ogresses de ces temps agités.

Reste qu'à ce stade, nous n'avons pas d'explication pour la nature duale des planètes, d'un côté les planètes telluriques riches en éléments réfractaires et de l'autre les géantes gazeuses riches en éléments volatils, en plus de contenir un noyau rocheux et métallique. Il faut considérer ici un nouveau paramètre : cette histoire d'accrétion planétaire s'est déroulée alors que le Soleil était une étoile toute jeune, bien vive. On peut observer aujourd'hui des étoiles jeunes dans la galaxie. Elles émettent des flux importants de particules, de véritables vents stellaires. Le Soleil s'est comporté ainsi à son origine. Le Soleil continue d'ailleurs d'émettre ses particules, à la faveur des célèbres

éruptions solaires, crachant dans l'espace des flots de matière. Une partie de ces vents parvient sur Terre, mais grâce au champ magnétique terrestre, les particules des vents solaires sont déviées vers les pôles. Là, suivant les lignes du champ magnétique, elles plongent vers la surface terrestre, et en profitent pour interagir avec les gaz de notre atmosphère. Ceux-ci sont alors excités et émettent des rayonnements lumineux, ce qui donne naissance aux magiques aurores boréales.

Au début de l'histoire du système solaire, les vents émis par le Soleil étaient donc beaucoup plus violents qu'actuellement. Les particules solaires ont balayé le disque solaire en cours d'accrétion. Si ces particules n'ont pas d'effet sur les blocs déjà accrétés, riches surtout en éléments réfractaires, les éléments volatils ont été repoussés des zones internes du système solaire vers les zones externes. Je m'amuse parfois en amphithéâtre à reproduire ce phénomène. Je m'installe à l'extrémité de la paille, en bas d'amphi, et je dispose devant moi une boîte de craie (taille d'une boîte à chaussure) et des petits morceaux de craie, voire de la poussière de craie. La boîte représente un bloc riche en éléments réfractaires, condensés et accrétés, les éclats de craie et la poussière représentent les éléments volatils,

non encore accrétés. Moi, je représente le Soleil (j'aime bien...). Je souffle alors sur le dispositif, j'émet un vent en quelque sorte, et si la boîte ne bouge pas, la poussière vole et les éclats roulent sur la paillasse, et s'éloignent de moi. Les éléments réfractaires restent sur place, les éléments volatils s'éloignent du Soleil. Les planètes telluriques de la zone interne sont appauvries en éléments volatils, lesquels sont évacués vers les zones externes, et on les retrouve aujourd'hui dans la masse des géantes gazeuses.

Entre les planètes internes et les planètes externes, se trouve la ceinture d'astéroïdes, amas de blocs qui ne se sont jamais accrétés entièrement, un peu comme les anneaux de Saturne. Les chondrites nous viennent de cette zone, ni appauvrie ni enrichie en élément volatils. Prenons le carbone, élément volatil, à titre d'exemple. La teneur en carbone de la Terre est de 0,3% ; elle est de 3% pour les chondrites dites carbonées. Ces météorites contiennent aussi bien des éléments réfractaires que des éléments volatils, dans des proportions assez proches de celle du système solaire à son origine

Il est alors remarquable de tirer de ces observations que les chondrites ont la composition

du système solaire. Ces roches extra-terrestres sont donc non seulement les plus anciens témoins de la formation du système solaire, mais en plus elles renferment des informations précieuses sur sa composition chimique globale. Les chondrites sont les plus remarquables objets primitifs à disposition des scientifiques désireux de percer les mystères entourant la naissance du Soleil et la formation des planètes.

Le Terre primitive

La terre s'est formée dans un fracas cosmique, il y a 4, 57 milliards d'années. Sa composition chimique globale est proche de celle des chondrites, ôtée d'une quantité importante d'éléments volatils. Reste que la Terre a un océan à sa surface, une atmosphère, une biosphère, autant de réservoirs riches en éléments volatils. L'histoire racontée précédemment est donc incomplète, et ne rend pas compte de toutes les observations que l'on peut faire à Terre. De plus, la Terre elle-même, aussi insignifiante qu'elle soit au regard des géantes gazeuses, des étoiles, des galaxies, a subi une évolution interne complexe, et dont nous sommes les héritiers. Notre planète mérite donc qu'on s'y attarde, en commençant par l'exposé des

processus qui ont marqué sa prime jeunesse, durant les premières dizaines de millions d'années de son existence.

L'évolution précoce de la Terre

La Terre, avant d'être une planète, fut un planétésimal, puis une proto-planète. Elle a crû en ingurgitant les astres alentour. L'accrétion planétaire est un processus violent. Chaque arrivée d'astre sur Terre représente un choc terrible, un violent impact. Une part significative de l'énergie cinétique du bolide se dissipe sous forme d'ondes, une part encore plus importante s'est dissipée sous forme de chaleur. Applaudissez des deux mains. L'énergie cinétique de vos mains qui vont se heurter est transformée en ondes (si vous entendez du bruit, c'est parce que des ondes issues de l'impact viennent frapper vos tympanes), et en chaleur (au bout de quelques applaudissements, vous sentez vos mains se réchauffer). Notez d'ailleurs que si vous ressentez la chaleur, c'est parce que vous absorbez une partie de la chaleur dégagée dans les frappements. La chaleur ne se dissipe pas entièrement vers l'extérieur. Pour

la Terre à son origine, c'est pareil. Les chocs qu'elle a subis ont généré énormément de chaleur. Ajoutez à cela l'énergie libérée par les radioactivités de courte demi-vie dont il fut question plus haut, à propos d'aluminium 26, et vous déduisez facilement que la Terre primitive était très chaude. Pour tout dire, elle était tellement chaude qu'elle a été entièrement fondue ! Gigantesque boule de magma tournant autour du Soleil. Dans cet état, beaucoup des éléments chimiques initialement présents dans les astres venus percuter la Terre se sont volatilisés sous forme de gaz. C'est particulièrement vrai pour les éléments volatils. Ces éléments gazeux ont donné naissance à une atmosphère primitive. Il n'en reste presque rien aujourd'hui... Quand la Terre était fondue, le Soleil était encore bien jeune. Les vents solaires étaient violents. Donc, non seulement la Terre a été appauvrie en éléments volatils du fait de sa position interne dans le disque solaire, mais en plus, sa fusion généralisée ayant induit son dégazage a généré une atmosphère primitive soufflée en grande partie par les vents solaires. À cette époque, le champ magnétique terrestre n'était vraisemblablement pas aussi bien installé qu'aujourd'hui, et n'a donc pu servir de bouclier protecteur. La Terre se trouva fort dépourvue de ses volatils.

Dans ce scénario, l'existence des océans, composés d'hydrogène et d'oxygène, éléments volatils regroupés dans la molécule d'eau est énigmatique. La Terre devrait être sèche, et elle ne l'est pas... Environ cent millions d'années après la naissance du système solaire, le disque solaire contenait quelques dizaines à quelques centaines de planétésimaux ou proto-planètes ; on l'a mentionné plus haut. Là, un véritable jeu de quilles gravitationnel a permis d'éjecter des zones externes vers les zones internes du système solaire des bolides de belle masse, riches en éléments volatils. C'est normal qu'ils le soient, venant des zones externes enrichies en ces éléments. Eh bien, on pense que l'eau présente sur Terre vient en grande partie de cette venue tardive de matière, en provenance des confins du système solaire. Les Anglo-saxons parlent d'une « late veneer ». Il existe de nombreux arguments à l'appui de cette idée, notamment des arguments de géochimie isotopique appliquée aux éléments hydrogène et oxygène, qui contiennent chacun plusieurs isotopes. Mais s'agissant d'eau, et anticipant un futur ouvrage sur le thème, je laisse la chose en l'état. Considérons simplement que l'eau terrestre nous est arrivée environ cent millions d'années après la naissance du système solaire,

vers -4,45 milliards d'années. Est-ce à dire que les océans existaient déjà, ou que l'eau en question constituait une atmosphère dense, comme dans un sauna finlandais ? Réponse bien difficile à nouveau, car les archives de l'époque sont rares.

Les plus vieux matériaux que l'on connaisse sur Terre sont des grains de zircon contenus dans de vieilles roches australiennes collectées sur le site de Jack Hills, et dont l'âge de cristallisation a été mesuré à 4,4 milliards d'années. Ces zircons sont des silicates de zirconium (de formule $ZrSiO_4$). Ils contiennent donc beaucoup d'oxygène, comme tous les silicates d'ailleurs. Retour à la géochimie isotopique... L'oxygène contient huit protons dans son noyau, et il existe des atomes d'oxygènes avec huit neutrons, neuf neutrons et dix neutrons ; l'oxygène a donc trois isotopes, ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O . Il s'avère que les zircons des Jack Hills ont un rapport isotopique ($^{18}O/^{16}O$) anormalement élevé, et ce n'est pas dû à la radioactivité, ^{16}O et ^{18}O n'étant ni radioactifs ni radiogéniques (c'est-à-dire générés par la radioactivité d'un autre atome radioactif). Pour expliquer le rapport $^{18}O/^{16}O$ des zircons, les chercheurs découvreurs de cette anomalie ont proposé que le matériel source des magmas dans lesquels ces zircons ont cristallisé a interagi avec de

l'eau, assez froide qui plus est. Par extension, ces chercheurs ont également proposé, et c'est largement admis par la communauté scientifique maintenant, que l'eau libre existait à la surface de la Terre il y a 4,4 milliards d'années. De là à conclure que les océans existaient il y a au moins 4,4 milliards d'années, il n'y a qu'un pas, que nous franchissons allègrement. Un petit pas (pour l'homme), un grand plongeon dans l'océan. Nous pouvons donc considérer que l'océan terrestre existait à -4,4 milliards d'années, et que l'eau nécessaire à sa formation a été apportée sur Terre vers -4,45 milliards d'années. Cette eau a d'abord constitué une atmosphère riche en vapeur d'eau, qui condensée, a donné naissance à l'océan.

Je récapitule. La Terre se forme à partir de -4,57 milliards d'années, dans l'immédiateté de la naissance du Soleil. Entièrement fondue, elle perd son atmosphère primitive sous l'action des vents solaires notamment. Vers -4,45 milliards d'années, des corps en provenance des confins du système solaire parviennent sur Terre, *late veneer* riche en éléments volatils et en eau. L'océan terrestre peut se former ; la vie y apparaîtra bientôt...

Le noyau terrestre et la Lune

Deux événements exceptionnels surviennent sur la période, entre -4,57 et -4,45 milliards d'années : la formation du noyau terrestre et la formation de la Lune. Rien de moins !

Commençons par la formation du noyau, sujet déjà abordé dans Terre de granite. Lorsque la Terre était entièrement fondue, elle n'était pas composée d'un seul magma homogène, bouillonnant. Deux magmas co-existaient, deux magmas de compositions chimiques différentes. Le premier était un magma sulfuré, riche en fer et en nickel, et ayant une densité de 10 (un mètre cube de ce magma pèse dix tonnes). Le second était un magma silicaté, riche en silicium et en oxygène, et ayant une densité de 5, deux fois inférieure à celle du magma sulfuré. Naturellement, le magma le plus dense a eu tendance à couler au centre de la planète, chose rendue possible par l'état liquide des magmas, qui peuvent se séparer, comme l'huile et le vinaigre. Les éléments chimiques ayant une affinité avec le fer (éléments sidérophiles) ou le soufre (éléments chalcophiles) ont été incorporés dans le magma le

plus dense et se trouvent concentrés aujourd'hui au cœur de la planète. Car vous l'aurez compris, ce magma sulfuré riche en fer et en soufre a donné naissance à notre noyau métallique.

Petite précision sur le mot chalcophile. Le préfixe « chalco » réfère au cuivre, et non au soufre. Le grand géochimiste Goldschmidt, à l'origine de la classification géochimique des éléments en quatre groupes (atmosphiles, lithophiles, sidérophiles, chalcophiles) a en effet attribué au cuivre une qualité propre au soufre. À sa décharge, si l'on connaît beaucoup de minéraux sulfurés, nombre d'entre eux contiennent du cuivre. Ainsi la chalcopyrite (CuFeS_2). Or le cuivre s'oxyde facilement et prend alors de jolies couleurs bleu-vert facilement reconnaissables, parfois proches du vert de gris des plaques de cuivre de nos monuments. Soufre et cuivre vont souvent de pair. Ainsi, si chalcophile signifie « qui aime le cuivre » étymologiquement, cela signifie « qui aime le soufre » géochimiquement. Suffit de le savoir...

Parmi les éléments chalcophiles, on trouve l'or, le plomb ou le tungstène. Ces éléments sont donc principalement concentrés dans le noyau. Et pourtant, on en trouve à la surface de la Terre.

La raison en est que ces éléments ne sont pas parfaitement chalcophiles, et qu'une partie est restée dans le magma silicaté. Une autre raison tient à la venue tardive de blocs cent millions d'années après la naissance du système solaire (la *late veneer* que j'ai mentionnée plus haut), et après la formation du noyau. Ces blocs de composition chondritique ont apporté avec eux des éléments variés, y inclus des chalcophiles qui n'ont pu rejoindre le noyau terrestre, déjà formé. Dans le magma silicaté resté en surface, et qui donnera le Manteau Primitif une fois cristallisé, on trouve les éléments lithophiles (« qui aiment les pierres », lesquelles sont principalement formées de minéraux silicatés, à base de silicium et d'oxygène) ; ce sont par exemple l'aluminium, les Éléments de Terres Rares, dont le désormais fameux néodyme, constituant important des aimants permanents des éoliennes, ou l'uranium. Nous nous trouvons pour ce dernier élément chimique, l'uranium, devant un nouveau paradoxe. Bien que l'uranium soit l'élément chimique le plus lourd que l'on ait sur Terre, avec 92 protons et plus de 140 neutrons (les électrons ne pèsent quasiment rien en comparaison des protons et des neutrons), cet élément est quasi absent dans le noyau, et se trouve concentré dans

la croûte terrestre. Sa masse atomique n'est donc pour rien dans son comportement géochimique ; et si le magma sulfuré et ferrifère a coulé au centre de la Terre à ses débuts, l'uranium n'ayant aucune affinité avec le soufre et le fer, il est resté dans les couches externes de la planète.

Intuitivement, il est facile de comprendre que la séparation des liquides sulfurés et silicatés s'est faite rapidement. En première approximation, un morceau de craie (de densité 2) coule dans une bouteille d'eau (de densité 1) aussi vite que le magma sulfuré coule dans le liquide silicaté. C'est une expérience que je fais en amphithéâtre, en empruntant une bouteille d'eau à un étudiant, et en la sacrifiant... Etant donné les dimensions de la Terre, sphère dont le rayon mesure 6370 kilomètres, il a nécessairement fallu « un certain temps » pour que la séparation fût complète. Une fois de plus, la géochimie isotopique nous aide à estimer la durée du processus ; et à nouveau, le raisonnement n'est pas des plus simples. Respirez un bon coup... Un isotope de l'hafnium (^{182}Hf), élément lithophile, concentré dans le magma silicaté donc, se désintègre en un isotope du tungstène (^{182}W), élément chalcophile, concentré dans le magma sulfuré. La période de demi-vie de ^{182}Hf vaut neuf millions

d'années. Les géochimistes ont mesuré l'abondance de ^{182}W dans certaines météorites, chondrites d'un côté et météorites métalliques de l'autre. Ces dernières correspondent à des noyaux de proto-planètes explosées dans la période de cannibalisme planétaire du début du système solaire. Ils ont observé que les météorites métalliques avaient une sous-abondance de ^{182}W . Pour expliquer cette donnée, il a nécessairement fallu que le magma sulfuré se soit séparé du magma silicaté avant que l'isotope 182 de l'hafnium ne se fut désintégré totalement. Ils en ont conclu que la séparation des noyaux planétaires, dont celui de la Terre, s'est faite durant les soixante premiers millions d'années qui ont suivi la formation de ^{182}Hf , c'est-à-dire au cours de la supernova qui a déclenché l'effondrement du nuage protosolaire (vers -4,6 milliards d'années). Vous avez suivi ? Pas bien grave... On considère en tout cas que la formation du noyau terrestre s'est déroulée entre -4,57 milliards et -4,54 milliards d'années. Très vite après, dans les quelques dizaines de millions d'années qui ont suivi, le magma silicaté a cristallisé, s'est solidifié, et est devenu ce qu'on appelle le Manteau Primitif. Je détaillerai plus loin les modalités de cristallisation de l'océan magmatique pour donner ce Manteau.

Autre événement exceptionnel de ces temps primitifs, la formation de la Lune. Depuis la nuit des temps (c'est vrai qu'observer la Lune se fait mieux la nuit), les hommes ont réfléchi à la raison d'être de notre satellite. Nombre de théories ont été élaborées. Je n'en ferai pas ici l'inventaire. Je me limiterai à dire qu'une formidable avancée des connaissances sur le sujet s'est faite à partir de l'étude des échantillons rapportés de la Lune par les Américains, au retour de leurs missions Apollo. Les Américains ont collecté 392 kilogrammes de roches lunaires. Pour être juste, il faut mentionner aussi les Soviétiques qui, s'ils n'ont pas mis le pied sur la Lune, y ont envoyé des sondes, et les en ont fait revenir. Ils ont ainsi collecté des mini-forages du sol lunaire, le fameux régolithe, témoin des rayonnements cosmiques anciens, piégés en profondeur du sol. Les échantillons américains sont tous identifiés, numérotés, catalogués. Les scientifiques ont anticipé les progrès technologiques à venir après les années 70 ; et nombre de ces échantillons sont encore vierges d'investigation et d'analyses. Nos connaissances sur la Lune s'améliorent donc encore de nos jours.

Parmi les nombreuses données recueillies, beaucoup portent sur les caractéristiques

géochimiques des roches lunaires. D'abord, on sait que les roches lunaires sont pauvres en eau, plus pauvres que les roches terrestres. J'ai assisté un jour à un exposé de Francis Albarède, un des grands géochimistes français, qui concluait son intervention par une diapo où il avait simplement écrit « The Moon is dry ! » (« La lune est sèche ! »). Façon exagérée, légèrement provocatrice, de souligner la pauvreté en eau, et par extension en éléments volatils, de la Lune. Par ailleurs, les roches lunaires sont anormalement pauvres en fer par rapport à un réservoir de composition chondritique. Un modèle de formation de la Lune, qui satisfait ces deux observations de premier ordre, s'appelle le GIH (encore un acronyme anglais pour Giant Impact Hypothesis, ou Hypothèse de l'Impact Géant). La Lune se serait formée à partir de la collision entre la Terre et un astre, nommé Théïa, dont la taille aurait été proche de celle de la planète Mars. Cet impact aurait eu lieu après la formation du noyau terrestre (riche en fer), et le matériel éjecté n'aurait affecté que le manteau terrestre (appauvri en fer) ; ainsi, la Lune elle-même formée par la concentration en orbite de ces éjections est caractérisée par une relative pauvreté en fer. Quant aux volatils, on comprend aisément que la chaleur

libérée au cours de l'impact aurait volatilisé nombre d'éléments chimiques, les plus volatils donc, lesquels éléments auraient été perdus ensuite sous l'action des vents solaires ou simplement parce qu'éjectés suffisamment loin, hors du champ d'attraction gravitationnelle de la Terre et de la Lune. Ce n'est pas la seule hypothèse actuellement proposée, mais c'est celle qui retient le plus de suffrages dans la communauté scientifique. Elle nous suffira ici. Reste à savoir quand cet impact vraisemblable a eu lieu. Les études de géochronologie menées sur les roches lunaires ont permis d'obtenir un âge de 4,47 milliards d'années pour un échantillon, âge le plus vieux obtenu à ce jour pour une roche lunaire. Évidemment, l'impact ne peut être que plus vieux que cet âge. Et pour tenir compte de la pauvreté en fer des roches lunaires, l'impact a nécessairement eu lieu après que le noyau terrestre ne se fut formé, soit après -4,54 milliards d'années. La Lune s'est donc formée, dans le cadre du modèle GIH, entre -4,54 et -4,47 milliards d'années. On se contentera volontiers de cet intervalle, somme toute assez précis.

L'apparition de la vie, cause et conséquence chimiques

L'océan recouvre la Terre dès -4,4 milliards d'années. Les premières traces de micro-fossiles datent de -3,5 milliards d'années. Mais il est fort probable que la vie soit apparue sur Terre bien avant sous forme de cyanobactéries, vers -4,0 milliards d'années, voire juste après la stabilisation de l'océan terrestre. La communauté scientifique mondiale est très mobilisée sur cette question.

Je n'envisage pas ici une origine extraterrestre de la vie. Trop facile. Je n'expose pas plus une éventuelle origine divine. Je respecte les croyances, mais en bon matérialiste, je me limite aux sciences naturelles.

Parmi les observations qui alimentent la réflexion, il faut d'abord mentionner l'existence des sources hydrothermales profondes, découvertes dans les années 70 au fond des océans, les célèbres fumeurs noirs. À proximité immédiate de ces fumeurs se développe une vie luxuriante qui tire son énergie des réactions bio-géochimiques mettant en jeu les éléments chimiques dissous dans les fluides

hydrothermaux. Ces fluides sont originellement de l'eau de mer, infiltrée dans les roches de la croûte océanique. À quelques centaines de mètres voire quelques kilomètres de profondeur, l'eau infiltrée est suffisamment réchauffée par les fortes températures induites par les corps magmatiques profonds pour que sa densité soit nettement diminuée. L'eau chaude et peu dense remonte alors vers la surface (le fond des mers), chargée en éléments qu'elle a dissous des roches lors de sa circulation. À la résurgence, les fumeurs noirs dont la température se situe vers 350 - 400°C entre en contact avec l'eau de mer ambiante, aujourd'hui vers 4°C. Un tel contraste physique entraîne de profonds déséquilibres chimiques, dont la plus nette manifestation est la précipitation en masse de sulfures variés, riches en plomb, en zinc, en cuivre. Un véritable *Trésor des abysses*.

Dans la Terre ancienne, de tels amas sulfurés se sont formés également. On en connaît âgés de plus de trois milliards d'années. Et à vrai dire, il n'y a aucune raison pour que les mécanismes d'interaction entre l'eau de mer et les roches du plancher océanique, régis par les mêmes lois physiques qu'aujourd'hui, ne se soient pas déroulés dès que l'océan eut recouvert la surface de la Terre. Bien sûr, à cette période, la Terre était plus chaude

que maintenant ; les océans itou. Des températures proches de 100°C sont vraisemblables. Et si l'océan ne bouillait pas, c'est parce que l'atmosphère terrestre était beaucoup plus dense que maintenant, et avec elle la pression atmosphérique qui empêchait l'ébullition de l'eau. Mike Russell, éminent scientifique britannique, se fait le chantre depuis de nombreuses années de l'hypothèse de l'émergence de la vie en association avec l'installation de sources hydrothermales sous-marines. J'ai assisté en août 2019 à la conférence qu'il a donnée sur le sujet lors d'un congrès de géologues à Glasgow. Non seulement sa conférence était passionnante, tant par le sujet que par le ton enthousiaste qu'il emploie, mais en plus, je crois avoir compris son message. L'idée de Mike Russell consiste à dire que les déséquilibres chimiques patents observés à une échelle de quelques centimètres entre les fluides hydrothermaux, à pH élevé à cette époque (ou à forte alcalinité si vous préférez) en réponse à des réactions de transformation de péridotite en serpentinite, et l'eau de mer ambiante ont pu générer des molécules dont la fonction est de limiter ces déséquilibres. Et il s'avère que ces molécules sont des ancêtres des protéines, voire même de l'ARN (Acide Ribonucléique, composant

essentiel des cellules). Les briques élémentaires de la vie étaient apparues, la machine était lancée. En un mot, la vie est apparue (serait apparue, pour le dire prudemment) en réponse à des déséquilibres chimiques entre des eaux, hydrothermales et océaniques. Joli passage dans notre symphonie.

Si la cause de l'apparition de la vie est vraisemblablement chimique, le développement de la vie elle-même a eu des conséquences majeures sur le système chimique de la Terre. Là, il n'y a pas de doute. Les premiers vrais êtres vivants à peupler les océans étaient des cyanobactéries, communément appelées « algues bleues ». Organismes fonctionnant sur le mode de la photosynthèse, ces cyanobactéries transforment le gaz carbonique (molécule CO_2) en oxygène (molécule O_2) ; elles en profitent pour développer leur matière organique carbonée. L'atmosphère primitive était très riche en CO_2 , avec un effet de serre associé sans commune mesure avec ce que l'on connaît aujourd'hui. Pas de limite au développement algaire de ce point de vue. Et avec le temps, l'atmosphère s'est enrichie en oxygène, produit par ces chères « algues bleues ». Nous autres, animaux, profitons de cet oxygène pour respirer. Néanmoins, il a fallu attendre longtemps avant que l'atmosphère ne s'oxygénise. Si l'on admet que

la vie est apparue vers -4,0 milliards d'années, la grande oxygénation atmosphérique (connue par l'acronyme GOE, anglais à nouveau (!), pour Great Oxidation Event) n'est intervenue que vers -2,3 milliards d'années, soit plus d'un milliard et demi d'années après le début de la fabrication d'oxygène photosynthétique.

Pendant tout ce temps, le système de sources hydrothermales a fonctionné au fond des océans (il fonctionne encore aujourd'hui au niveau des dorsales médio-océaniques, cf supra). Si les fluides hydrothermaux transportent sous forme dissoute des éléments comme le cuivre, le plomb ou le zinc, précipités ensuite sous forme de sulfures, ils transportent encore plus des éléments comme le fer et le silicium, autrement plus abondants dans les roches du fond des océans (les basaltes aujourd'hui). Et de façon remarquable, le fer a la possibilité de s'oxyder facilement. Il passe ainsi de l'état d'oxydation +2 à l'état d'oxydation +3 si on le met en présence d'oxygène et d'eau. Tout le monde connaît la propension naturelle des pièces de ferraille à s'altérer en rouille, laquelle n'est rien d'autre qu'un minéral de formule FeO,OH , c'est-à-dire un oxy-hydroxyde de fer. Eh bien, dans l'océan ancien, les molécules d'oxygène libérées par les

premières algues ont été utilisées par le fer dissous dans les sources hydrothermales, où il se trouvait sous la forme réduite +2, pour s'oxyder sous le degré +3. Lorsque le fer s'oxyde, il précipite sous forme d'oxy-hydroxydes (la rouille) ou bien sous forme d'oxyde (l'hématite, de formule Fe_2O_3 , et de couleur rouge). Les roches sédimentaires marines âgées de deux à trois milliards d'années contiennent ainsi des couches riches en fer plus ou moins oxydés et en silice (oxyde de silicium). Ces niveaux de fer rubanés, connus sous l'acronyme anglais, encore (!), de BIF (pour Banded Iron Formation) constituent les plus grands gisements de fer exploités aujourd'hui à la surface de la Terre. Les compagnies minières mauritaniennes, australiennes et brésiliennes le savent mieux que quiconque. En tout cas, il a fallu attendre que la quantité d'oxygène produite soit supérieure à celle consommée par l'oxydation du fer pour qu'une partie de cet oxygène rejoigne l'atmosphère, qui est alors devenue oxydante. Les BIF illustrent à merveille les conséquences chimiques de l'apparition et du développement de la vie à la surface de la Terre, au cœur des océans.

La cristallisation de l'océan magmatique

La formation du noyau terrestre par coulage d'un magma sulfuré et ferrifère a laissé un océan magmatique silicaté en surface. Cet océan a cristallisé rapidement, en quelques dizaines de millions d'années quand même, conséquence inévitable de sa perte de chaleur interne vers l'espace plus froid. Il est devenu le Manteau Primitif, concentré des éléments lithophiles de la Terre.

En terme rocheux, le Manteau correspond à une péridotite, roche composée majoritairement des minéraux olivine et pyroxènes. La composition chimique de ces minéraux reflète la composition chimique de l'océan magmatique. Le magma était riche en silicium, magnésium (et un peu de fer dont tout le stock terrestre n'a pas rejoint le noyau de la planète) et en oxygène ; par conséquent, les minéraux qui y sont apparus par cristallisation sont riches en ces éléments : ce sont l'olivine (de formule $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$) et les pyroxènes (de formule $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$).

Les éléments chimiques possèdent des caractéristiques atomiques propres, qui

conditionnent la façon dont ils sont incorporés dans les cristaux. Ce sont leur taille, mesurée par le rayon ionique, et leur degré d'oxydation, correspondant au nombre d'électrons gagnés ou perdus lors des liaisons que les éléments établissent avec leurs voisins. Par exemple, le silicium s'oxyde sous forme +4 lorsqu'il est en contact avec l'oxygène de degré -2. La molécule silicate est donc de formule $(\text{SiO}_4)^{4-}$. Elle correspond à un tétraèdre d'oxygènes au centre duquel se loge un atome de silicium. De son côté, le magnésium s'oxyde avec le degré +2. Il faut donc deux atomes de magnésium pour neutraliser la molécule silicate : c'est ainsi que se forme l'olivine magnésienne (la forstérite) de formule chimique Mg_2SiO_4 . Comme il y a du fer dans le manteau et que lui aussi est de degré d'oxydation +2, un peu de fer peut remplacer le magnésium dans la structure de l'olivine, pour former Fe_2SiO_4 (la fayalite). L'olivine est donc un mélange entre un pôle magnésien et un pôle ferreux, et a une composition générale de formule $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$.

Où insérer alors les éléments autres que le silicium, le magnésium et l'oxygène, présents dans l'océan magmatique, mais en plus faibles quantités ? L'océan magmatique contenait en effet 92 espèces chimiques différentes, de l'hydrogène (numéro atomique 1) à l'uranium (numéro atomique 92). Si les éléments les plus abondants, les éléments majeurs, ont imposé la nature des minéraux apparus lors de la cristallisation (l'olivine et les pyroxènes), les éléments les moins abondants, que l'on nomme éléments traces, ont été incorporés dans ces cristaux, de manière passive.

Pour comprendre la manière dont cela s'est déroulé, prenons l'exemple d'une salle de classe, comme un analogue à un cristal d'olivine. Chaque élève est à sa place sur sa chaise, comme chaque atome est à sa place dans son site cristallographique au sein l'olivine. L'agencement des élèves est régulier ; dans l'olivine, l'agencement des atomes de silicium, de magnésium et d'oxygène est régulier lui aussi.

Une première possibilité d'incorporer un élément trace est qu'il se substitue dans l'agencement cristallographique à un des éléments majeurs. Il faut pour cela que la taille de l'élément

trace et son degré d'oxydation soient proches de ceux de l'élément majeur ; c'est le cas par exemple du nickel (Ni^{2+}), élément trace de même taille et de même charge que le magnésium (Mg^{2+}). Les atomes de nickel peuvent donc remplacer quelques atomes de magnésium pendant la croissance de l'olivine, sans modifier sa structure. L'élève nickel remplace l'élève magnésium et le professeur n'y voit que du feu.

Maintenant, il arrive parfois qu'une chaise soit vide ; dans un cristal, cela correspond à une lacune. Dans cette lacune peut venir s'insérer un autre élément chimique, comme un nouvel élève arrivant en retard pourrait prendre place. Autre possibilité, les tables de la classe peuvent ne pas être très bien alignées, cela correspond à un défaut cristallin comme un clivage ou une macle. À vrai dire, il existe une large palette de défauts cristallins. Là peuvent se loger des éléments chimiques a priori incompatibles avec les structures minéralogiques, parce que plus grands que les éléments majeurs qui en forment la charpente, ou parce que présentant des degrés d'oxydation différents. Au rang des éléments chimiques incompatibles se trouvent par exemple le très gros rubidium (Rb^+), les Éléments de Terres Rares (ETR^{3+}), le très chargé niobium

(Nb⁵⁺).

C'est selon ces mécanismes variés que furent incorporés tous les éléments traces dans les cristaux du Manteau Primitif, lorsque l'océan magmatique cristallisa. Il reste que les éléments incompatibles, gros éléments traces ou avec de forts degrés d'oxydation, ne sont pas à leur aise dans les cristaux d'olivine ou de pyroxènes. À la première occasion, ils ne demanderont qu'à en sortir. Cette occasion va bientôt se présenter...

Les réservoirs terrestres

La différenciation du Manteau Primitif

Le Manteau Primitif n'existe plus aujourd'hui. Depuis 4,45 milliards d'années, les mouvements internes à la planète en ont effacé toute trace. Il s'est transformé, il s'est différencié dit-on, en deux réservoirs mantelliques, le manteau supérieur et le manteau inférieur, et un réservoir crustal, la croûte continentale. Le manteau inférieur et le manteau supérieur sont séparés par une discontinuité physique sise à environ 660 kilomètres de profondeur. Cette discontinuité correspond à une augmentation de la densité des roches en réponse à une transformation minéralogique. La

croûte continentale, de composition globalement granitique, surmonte le manteau supérieur, et constitue le socle des continents émergés. La croûte océanique, de composition basaltique, ne doit pas être considérée comme un réservoir en tant que tel. Formée au niveau des dorsales médio-océaniques, la croûte océanique est recyclée régulièrement dans le manteau via le processus de subduction. Elle représente donc plus un composant du manteau qu'un réservoir à part entière.

Aux réservoirs rocheux s'ajoutent les réservoirs de surface, riches en éléments volatils, l'hydrosphère, l'atmosphère, la biosphère. Ici, nous nous concentrerons sur les réservoirs rocheux, dont l'évolution géochimique enregistre la dynamique terrestre, actuelle et passée.

Sitôt l'océan magmatique cristallisé sous forme de Manteau Primitif, celui-ci s'est animé de mouvements internes, toujours actifs aujourd'hui. Ces lents et puissants mouvements permettent à la Terre d'évacuer sa chaleur interne. Les roches chaudes du manteau profond montent vers la surface, et ce mouvement ascendant est compensé par une descente des roches froides de surface. Le tout dessine de larges cellules de convection à

l'échelle du manteau tout entier.

Pendant la remontée des roches profondes, la pression exercée sur ces roches, qui correspond peu ou prou au poids des roches situées au-dessus, diminue. Lorsqu'elles arrivent vers cent à cent cinquante kilomètres de profondeur, les roches commencent à fondre, par le processus de fusion partielle, qui porte bien son nom dans le sens où les roches ne fondent qu'en partie, et laissent un résidu solide non-fondu. Au déclenchement de la fusion partielle, les premières gouttes de magmas apparaissent aux joints entre les cristaux ; puis avec l'avancement du processus, le magma constitue un film continu entre les cristaux. Tout ça se passe vers 1500°C. À une telle température, la diffusion est un processus efficace, tant et si bien que les éléments traces, ceux qui sont incompatibles dans la structure des cristaux et qui n'y ont été incorporés que dans des défauts, se faufilent entre les mailles des cristaux pour se dissoudre dans les magmas ; un peu comme un élève se glisserait subrepticement hors de la salle de classe. Bien sûr, le magma est formé principalement de silicium, de magnésium et d'oxygène, éléments les plus abondants dans le manteau. Mais la composition chimique du magma est différente de la source qui fond, parce

que certains éléments comme les Éléments de Terres Rares ou l'uranium préfèrent intégrer le liquide magmatique plutôt que de rester dans le résidu solide. C'est ainsi les magmas acquièrent des compositions chimiques distinctes de celle de la source dont ils sont issus par fusion partielle. Les premiers magmas granitiques issus du Manteau Primitif ont une composition différente de celui-ci ; leur accumulation en surface est à l'origine de la formation de la croûte continentale, réservoir géochimique distinct du réservoir mantellique.

Le processus de fusion partielle est bien connu aujourd'hui au niveau des dorsales médio-océaniques, zones d'extension où deux plaques lithosphériques s'écartent l'une de l'autre. Au milieu de l'Atlantique, la dorsale permet l'écartement entre les plaques qui portent les Amériques et les plaques qui portent l'Afrique et l'Eurasie. Les magmas qui se forment là ont une composition basaltique, bien différente de la composition du manteau duquel ils sont issus par fusion partielle, en l'occurrence le manteau supérieur. Les magmas basaltiques constituent la croûte océanique. En comparant les compositions chimiques de la croûte océanique et du manteau supérieur, on peut visualiser le comportement des éléments chimiques

pendant ce processus. Et l'on remarque clairement que les éléments de grande taille et de fort degré d'oxydation (comme les Éléments de Terres Rares ou le niobium) sont concentrés dans la croûte océanique par rapport au manteau supérieur ; ces éléments, incompatibles avec la structure des cristaux du manteau, préfèrent se dissoudre dans les magmas basaltiques. Le couple formé par la croûte océanique et le manteau supérieur nous donne alors une clé pour comprendre le réservoir qu'est la croûte continentale, pour comprendre le couple qu'elle forme avec le Manteau Primitif.

La croûte continentale

La croûte continentale est le réservoir géochimique qui nous intéresse le plus, parce que nous y vivons, parce que nous la cultivons, parce que nous l'exploitons. Et nous avons besoin de savoir ce qu'on peut y exploiter, et pendant combien de temps. Nous avons besoin d'estimer nos ressources et nos réserves, d'autant plus que le développement de nos sociétés humaines continue à grands pas.

La première chose à faire est d'estimer la composition chimique de la croûte continentale, connaissance qui nous permettra de comprendre la manière dont elle s'est formée à partir du Manteau Primitif. La chose n'est pas aisée... Il suffit de regarder une carte géologique du monde, ou seulement celle d'un continent (Europe ou Amérique du Nord) pour s'apercevoir que les roches de la croûte continentale sont très variées, traduisant le fait que la croûte continentale est un réservoir géochimique très hétérogène. Plusieurs stratégies peuvent alors s'imaginer, ou ont été mises en place pour obtenir une composition globale, ou une composition moyenne. L'idée la plus simple, en même temps la plus géniale, consiste à utiliser les roches qui représentent elles-mêmes une moyenne d'autres roches. Goldschmidt, dans la première moitié du XXe siècle, a utilisé les moraines glaciaires déposées par la calotte polaire au cœur du continent américain lors de la dernière glaciation. La calotte nord-américaine, l'inlandsis, a raclé les roches de la surface du continent lors de sa progression vers le sud, les a transportées, les a mélangées, puis les a déposées en tas lorsqu'elle s'est retirée vers le nord à la fin de l'ère glaciaire. Ces tas de cailloux serpentant dans les plaines du

midwest américain représentent donc un mélange des roches du continent. Goldschmidt a ainsi obtenu la première estimation de la composition globale de la croûte continentale. En 1985, Taylor et McLennan, deux géochimistes également, ont eu l'idée d'utiliser les sédiments transportés en suspension par les fleuves. Idée lumineuse ! Postez-vous à la sortie du Nil, de l'Amazone, ou du Blavet, collectez la boue déposée à l'embouchure, et vous avez une composition moyenne de l'Afrique de l'est, de l'Amérique du sud, ou de la Bretagne. Et cette idée d'utiliser les sédiments fins, les shales, est d'autant plus admirable qu'elle est valable aussi pour les vieux sédiments. Les schistes du bassin de Rennes sont d'anciens sédiments fins déposés il y a 600 millions d'années environ ; ils donnent une composition moyenne de la croûte continentale de l'époque. Ainsi, non seulement nous connaissons assez bien la composition chimique moyenne de la croûte continentale actuelle, mais nous avons également accès à son évolution au cours des temps géologiques. Merci les sédiments fins !

Rigoureusement, ces sédiments fins ne nous renseignent que sur la partie supérieure de la croûte continentale, celle qui est altérée par le climat et érodées par les rivières et les fleuves ; c'est

une limite de la stratégie. Les scientifiques ont contourné cette difficulté en inventoriant les roches de la croûte continentale profonde aujourd'hui remontées en surface à la faveur de mouvements tectoniques et de l'érosion. Dans les vieilles chaînes de montagne, on peut ainsi collecter des roches dites granulitiques, véritables témoins de la croûte profonde. En parallèle, les géophysiciens analysent les ondes sismiques émises par les tremblements de terre. Comme la vitesse de propagation des ondes est liée à la nature des roches qu'elles traversent, et donc à leur composition chimique, nous avons là des informations cruciales sur les roches profondes inaccessibles à l'observation, pas plus que par forage. Je passe vite d'ailleurs sur ces forages, par essence limités en diamètre, dont la profondeur maximale est de dix kilomètres, et dont le coût exorbitant empêche leur mise en œuvre opérationnelle à des fins purement scientifiques.

Toutes sources de renseignements conjuguées, nous connaissons la composition chimique de la croûte continentale. En parallèle, nous connaissons assez bien la composition du Manteau Primitif, composition chondritique expurgée d'éléments volatils sous l'action des vents solaires notamment, et à laquelle il faut soustraire

également nombre d'éléments chalcophiles et sidérophiles concentré dans le noyau terrestre. Nous pouvons donc comparer ces deux compositions chimiques. Nous observons alors des différences, et constatons avec surprise, et joie, que pour la grande majorité des éléments chimiques, les différences entre la croûte continentale et le Manteau Primitif sont les mêmes que les différences entre la croûte océanique et le manteau supérieur. Et comme nous savons que la croûte océanique est un magma formé par fusion partielle du manteau supérieur, nous pouvons déduire que la croûte continentale, en tant que réservoir géochimique, s'apparente à un liquide magmatique extrait du Manteau Primitif par un processus de fusion partielle. Autrement dit, la croûte continentale est au Manteau Primitif ce que la croûte océanique est au manteau supérieur. Il faut être géochimiste pour accepter cette conclusion. Un géologue dont l'outil de base est la carte géologique dira que la croûte continentale, riche en sédiments, en schistes, en granites divers et variés, est tout sauf un magma, encore moins un magma de nature basaltique. Il aura raison ; mais le géochimiste n'a pas tort non plus. Il faut comprendre que la croûte continentale est la pellicule superficielle de la Terre, soumise aux effets

climatiques (les roches s'altèrent), aux effets des rivières et des fleuves (la croûte s'érode), aux effets tectoniques (la croûte se déforme dans les chaînes de montagne), autant de processus à l'origine des hétérogénéités géologiques évidentes sur les cartes, mais qui ne sont que des redistributions internes, sans conséquences majeures sur sa composition globale en tant que réservoir.

Le manteau actuel

Le manteau actuellement sous nos pieds est divisé en deux réservoirs, le manteau supérieur et le manteau inférieur. La question est maintenant de préciser les éventuelles particularités de chacun. Les données géophysiques issues de l'analyse des ondes sismiques émises par les tremblements de terre sont précieuses. Ces ondes parcourent le globe dans son intégralité, à une vitesse proportionnelle à la composition minéralogique, et donc chimique, des roches qu'elles traversent. Elles nous informent que, globalement, les manteaux supérieur et inférieur ont une composition assez proche en termes de teneurs en silicium, magnésium, fer,

et oxygène. Mais dans le détail, et on le sait par d'autres outils d'investigation, géochimiques, de nettes différences apparaissent. D'abord le manteau supérieur. Nous disposons de quelques échantillons de péridotite du manteau supérieur, apportés à la surface de la Terre par des mouvements tectoniques liés aux mouvements des plaques lithosphériques ou par des laves issues du manteau et qui en ont arraché des fragments, les xénolithes. Outre ces échantillons, nous disposons d'informations indirectes par l'analyse chimique des basaltes des dorsales médio-océaniques. Comme ces basaltes sont issus de la fusion du manteau supérieur, il est possible de calculer la composition de ce manteau, en effectuant une modélisation numérique du processus de fusion partielle. Cet exercice fait la joie des étudiants de géochimie à l'université... Toutes informations intégrées, nous connaissons bien maintenant la composition de ce réservoir qu'est le manteau supérieur. Et nous pouvons donc la comparer à la composition du Manteau Primitif. Et, ô surprise, le manteau supérieur est différent du Manteau Primitif. Il a la composition attendue du résidu de la fusion partielle qui a donné la croûte continentale. La croûte continentale est enrichie en certains éléments chimiques (les gros cations avec

les degrés d'oxydation les plus élevés) ; ces mêmes éléments sont appauvris dans le manteau supérieur. Et plus l'enrichissement est important dans la croûte continentale, plus l'appauvrissement est prononcé dans le manteau supérieur. En somme, mélangez la croûte continentale actuelle avec le manteau supérieur, et vous obtenez une composition de Manteau Primitif ! La boucle est bouclée : le Manteau Primitif s'est différencié en deux réservoirs complémentaires, la croûte continentale, enrichie en certains éléments, et le manteau supérieur, appauvri en ces mêmes éléments. Pour avoir énoncé cette idée à la fin des années 70, Claude Allègre, éminent géochimiste français et accessoirement ministre de l'éducation nationale et de la recherche dans le gouvernement Jospin à la fin des années 90, a reçu une reconnaissance internationale.

Dans ce schéma, le manteau inférieur, sous la limite de 660 kilomètres de profondeur, n'a théoriquement pas enregistré les effets géochimiques de la formation de la croûte continentale. Il devrait présenter une composition proche du Manteau Primitif. C'est globalement vrai. Pour l'attester, nous utilisons des échantillons indirects du manteau inférieur, les basaltes des îles océaniques, car évidemment nous n'en avons pas d'échantillons

directs. A la base du manteau inférieur, au contact avec le noyau, des instabilités gravitaires de grande échelle se développent. Quésaco ? La base du manteau est chauffée par la chaleur libérée par le noyau terrestre en cours de cristallisation ; c'est la chaleur latente de cristallisation du noyau. Lorsque dans les temps primitifs le magma sulfuré et ferrifère a coulé au centre de la planète pour former le noyau, tout était liquide. Depuis ce temps, à peine la moitié du noyau a cristallisé, en perdant assez peu de chaleur. Le manteau sus-jacent a servi d'isolant thermique. C'est d'ailleurs ce qu'on demande à un manteau... Quoi qu'il en soit, cette chaleur latente est encore aujourd'hui libérée dans le noyau. Les roches de la base du manteau étant chauffées, leur densité diminue, et devient inférieure à celle des roches sus-jacentes, moins profondes. Il y a inversion de densité, et donc instabilité gravitaire : de larges volumes de roches de la base du manteau prennent un mouvement ascendant, sous forme de panaches mantelliques, tels de grands champignons qui pousseraient à travers une épaisse couche d'humus. Lorsque ce matériel atteint des faibles profondeurs, cent à cent cinquante kilomètres sous nos pieds, les roches commencent à fondre ; des magmas sont générés. Les volcans d'Hawaï

ou de la Réunion, véritables points chauds situés au cœur de grandes plaques lithosphériques, sont formés dans ce contexte de panaches mantelliques. L'analyse de ces basaltes d'île océaniques donne donc des informations sur leur source mantellique, en provenance du manteau inférieur, exactement comme l'analyse des basaltes des dorsales médio-océaniques renseigne sur le manteau supérieur.

Sans surprise, la composition globale du manteau inférieur est proche de celle du Manteau Primitif. Mais dans le détail, certaines hétérogénéités ne peuvent s'expliquer, selon les géochimistes, que par le recyclage dans le manteau inférieur de quelques composants issus de la croûte continentale et de la croûte océanique. Dans les années 80, les géochimistes ont ainsi suggéré que les zones de subduction, qui font s'enfoncer des plaques lithosphériques océaniques dans le manteau et qui portent non seulement la croûte océanique mais aussi, à leur surface, des sédiments issus de l'érosion des continents, permettaient de recycler dans le manteau profond des éléments chimiques initialement présents en surface. Chose inconcevable alors pour les géophysiciens, qui, dogme puissant, considéraient que les plaques subductées ne pouvaient pas franchir la barrière

physique représentée par la discontinuité de densité à 660 kilomètres de profondeur, limite entre le manteau supérieur et le manteau inférieur. Il a fallu attendre le milieu des années 90, dix ans plus tard, pour que les géophysiciens, forts de leurs progrès technologiques, réussissent à obtenir des images des profondeurs mantelliques (des images de tomographie sismique dit-on), comme un scanner donne une image de l'intérieur du corps humain, pour que les choses évoluent. Le dogme s'est effondré : les plaques lithosphériques franchissent bien la limite infranchissable ! Plus de barrière au recyclage dans le manteau profond de matériaux initialement crustaux. Le manteau inférieur est donc un réservoir géochimique globalement primitif, mais enrichi régulièrement en éléments chimiques d'origine crustale grâce au processus de subduction. Ou comment l'analyse géochimique renseigne sur la dynamique terrestre. C'est ainsi que Claude Allègre a inventé le terme de Géodynamique chimique, titre de son article publié en 1979. Il y trace les portées de la symphonie chimique de la Terre.

Le couple rubidium-strontium

Un aspect que nous n'avons pas abordé encore est la durée des processus de différenciation terrestre, c'est-à-dire de la formation des réservoirs. Nous avons mentionné parfois les vitesses géologiques ou l'échelle des temps géologiques, uniquement. La radioactivité naturelle de certains atomes, désintégration naturelle des noyaux, permet de mesurer le temps en géologie. Les géochronologues en font leur métier. Je ne détaillerai pas ici les fondamentaux de la géochronologie. Je donnerai uniquement une vision géochimique de la durée de la formation de la croûte continentale aux dépens du Manteau Primitif.

Les témoins les plus anciens de la croûte continentale sont les grains de zircon des Jack Hills, mentionnés plus haut. Ils sont âgés de 4,4 milliards d'années. *A contrario*, la portion la plus jeune de la croûte continentale date d'hier. Je m'explique. Les Andes sont une chaîne de montagne développée au-dessus d'une zone de subduction. La plaque lithosphérique Pacifique plonge sous la plaque Amérique du Sud. Dans les Andes, en plus de pics

montagneux, il y a de nombreux volcans. À vrai dire, un volcanisme important se met en place au-dessus de chaque zone de subduction ; l'Etna en Italie, le Mont Fujiyama au Japon, le Pinatubo aux Philippines sont là pour en témoigner. La lave typique de ces volcans est nommée andésite, en référence aux Andes justement. La particularité de cette lave est de posséder une composition chimique très proche de la composition moyenne de la croûte continentale. La portion de croûte continentale la plus jeune correspond donc à la dernière éruption d'andésite, hier donc.

De la ressemblance entre les andésites et la croûte continentale est née l'idée que la croissance de la croûte continentale se fait dans les zones de subduction. C'est sans doute vrai depuis trois milliards d'années, depuis que la tectonique des plaques régit la géodynamique terrestre. Avant cela, d'autres mécanismes étaient en jeu. Avant la tectonique des plaques, une façon simple de fabriquer des roches d'affinité continentale, à savoir granitique, comme le sont globalement les andésites, est de faire fondre des basaltes. Avant -3 milliards d'années, les basaltes sont émis avec les komatiites en contexte de panache mantellique. En surface, ces basaltes sont altérés par l'eau de mer,

omniprésente, et sont hydratés. Il suffit alors que ces basaltes soient plongés vers les profondeurs mantelliques, par un mécanisme *per descensum* compensant la remontée des panaches mantelliques par exemple. À des profondeurs de cinquante à cent kilomètres, suffisamment chauffées, ces roches commencent à fondre. Les liquides magmatiques produits alors sont de composition granitique. Les premières masses continentales ont été formées ainsi.

Tout cela ne nous dit pas quel est l'âge moyen de la croûte continentale, donnée importante pour comprendre les modalités de croissance crustale au cours des temps géologiques, depuis 4,4 milliards d'années. Deux modèles principaux ont été proposés, avec d'un côté une croissance crustale continue, à un rythme régulier, et de l'autre une croissance par à-coups, avec des périodes de croissance rapide alternant avec des périodes de quiescence. À titre personnel, mon pronostique va vers le deuxième modèle, qui rend plus compte des chroniques établies sur les populations de zircons de tous âges, tout en étant compatible avec la dynamique cyclique des phases tectoniques, connue sous le nom des cycles de Wilson. Les masses continentales sont rassemblées en super-

continents comme la Pangée il y a 300 millions d'années ; puis ces masses se séparent, comme la Pangée s'est disloquée il y a 200 millions d'années ; puis les masses continentales se regroupent en un nouveau super-continent, comme le futur à naître suite aux collisions alpines, qui courent aujourd'hui depuis la Nouvelle-Zélande jusqu'à l'Amérique centrale, en passant par le système Alpes-Himalaya. La croissance de la croûte continentale s'est donc probablement effectuée de manière épisodique, depuis 4,4 milliards d'années.

Déterminer l'âge moyen de la croûte continentale est une gageure, tant elle constitue un réservoir hétérogène. Une idée est alors née pour contourner le problème. Puisque la croûte continentale et le manteau supérieur sont deux réservoirs complémentaires, l'un s'apparente à un liquide de fusion partielle, l'autre au résidu non fondu, les deux réservoirs ne peuvent qu'avoir le même âge moyen. Les dorsales médio-océaniques et les basaltes qui s'y mettent en place sont une fenêtre sur le manteau supérieur, fenêtre longue de 60 000 kilomètres, distance totale des dorsales actuelles à la surface du globe. Eh bien, la composition de ces basaltes est remarquablement homogène, ce qui implique que le manteau supérieur lui-même

est homogène. Notez à ce sujet que la meilleure façon d'homogénéiser un réservoir est de bien le mélanger ; vous l'expérimentez lorsque vous faites des mélanges de peinture : vous touillez hardiment le bleu avec le jaune pour obtenir un beau vert. Sur Terre, c'est à une convection dynamique que l'on doit l'homogénéité de composition du manteau supérieur. En tout état de cause, calculons un âge moyen pour le manteau supérieur, nous aurons l'âge moyen de la croûte continentale.

Les éléments rubidium et strontium sont le bon outil pour ce travail, travail difficile mais prometteur d'une information importante. Cela vaut donc la peine de s'accrocher lors de la lecture des prochaines lignes. Il y est question de géochimie isotopique, encore... Rubidium et strontium sont deux éléments traces, peu abondants sur Terre, inconnus du grand public. Le noyau de rubidium possède 37 protons et 48 ou 50 neutrons. Il existe donc deux isotopes de rubidium : ^{87}Rb et ^{85}Rb . De son côté, le strontium (38 protons) peut contenir 46, 48, 49 ou 50 neutrons, correspondant à quatre isotopes : ^{84}Sr , ^{86}Sr , ^{87}Sr , ^{88}Sr . Chose intéressante, l'isotope ^{87}Rb est radioactif, et il se désintègre en ^{87}Sr . La période de demi-vie associée est fort longue, 49 milliards d'années ; la désintégration

de ^{87}Rb est bien lente. Lente mais suffisante pour que l'on puisse mesurer des variations d'abondance en ^{87}Sr dans les roches anciennes, pour peu qu'elles contiennent du ^{87}Rb . À vrai dire, on n'arrive pas à mesurer l'abondance de chacun des isotopes d'un élément, on ne mesure que la concentration totale en cet élément, soit la somme de ses isotopes. En revanche, on mesure facilement le rapport d'abondance de deux isotopes, par exemple $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Les météorites les plus anciennes et les moins riches en ^{87}Rb contiennent du strontium dont le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ n'a pas évolué depuis la formation du système solaire. Normal, pas de ^{87}Rb , donc pas de croissance de ^{87}Sr . Ce rapport vaut 0,699, et est connu sous le doux acronyme (anglais à nouveau...arghh), de BABI (BABI pour Basaltic Achondrite Best Initial) ; c'est en effet le rapport isotopique du strontium initialement présent dans le système solaire. La Terre globale, de composition chondritique du point de vue du strontium et du rubidium, avait ce rapport isotopique à sa formation. Aujourd'hui la Terre a une valeur de 0,7047, légèrement supérieure au BABI car la quantité de ^{87}Sr a augmenté par désintégration radioactive de ^{87}Rb . Lorsque le noyau terrestre a coulé au centre de la planète, l'océan magmatique silicaté a concentré

l'intégralité du strontium et du rubidium (ce sont deux éléments lithophiles, voisins respectivement du potassium et du calcium du point de vue de leur comportement géochimique). Le Manteau Primitif présente donc lui aussi un rapport isotopique de 0,7047, valeur que l'on retrouve d'ailleurs dans nombre de basaltes d'îles océaniques formés à l'aplomb des panaches sourcés dans le manteau inférieur, primitif pour l'essentiel. La croissance du rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre 0,699 et 0,7047 pour la Terre globale et le Manteau Primitif a été directement contrôlée par la quantité de rubidium présente dans ces réservoirs par rapport à la quantité de strontium.

Lors de la différenciation du Manteau Primitif en croûte continentale et manteau supérieur, le rubidium, l'un des plus gros cations présents sur Terre, se comporte de façon très incompatible. Mal en place dans les cristaux du manteau, il incorpore préférentiellement les magmas produits par fusion partielle. Le rubidium est ainsi extrêmement concentré dans la croûte continentale par rapport au manteau supérieur, résidu non fondu de l'extraction crustale. Le strontium a un comportement assez proche, mais moins extrême. Le strontium est légèrement enrichi

dans la croûte par rapport au manteau supérieur. Ainsi, les granites très anciens, âgés de plus de trois milliards d'années ont incorporé beaucoup de rubidium et un peu moins de strontium. Beaucoup de rubidium implique beaucoup d'isotope ^{87}Rb , et depuis lors une forte croissance de l'abondance de ^{87}Sr , et par suite, une forte augmentation du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de ces roches. Les vieux granites ont un rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 1,0 et plus. Des granites un peu plus jeunes, ayant les mêmes quantités de Rb et Sr, mais pour lesquels moins de temps s'est écoulé entre leur formation et aujourd'hui, ont des valeurs un peu plus basses. Les granites bretons de Lizio, Questembert ou Quiberon, seulement vieux de 300 millions d'années, ont des valeurs $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ proches de 0,750. La croûte continentale, d'âge variée de place à place, présente donc un rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ très variable, quoique toujours supérieur à 0,7047. Les sédiments fins, dont nous avons discuté l'intérêt plus haut, lissent quelque peu cette hétérogénéité, mais comme ils sont d'âges variés, leur rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ reste variable. Vraiment, pas facile d'obtenir une valeur moyenne pour la croûte...

Le manteau supérieur est le réservoir complémentaire de la croûte continentale. Si la croûte contient beaucoup de rubidium et un peu moins de strontium, le manteau supérieur est très appauvri en rubidium et un peu moins en strontium. La conséquence est que la quantité de ^{87}Sr n'a pas beaucoup augmenté dans ce manteau supérieur au cours du temps. Et en effet, la valeur du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ que l'on mesure sur les basaltes des dorsales océaniques vaut 0,702, valeur inférieure à celle de la Terre globale ou du Manteau Primitif, 0,7047. Cette valeur de 0,702 est commune à tous les basaltes des dorsales océaniques, et ne fait que confirmer la très grande homogénéité de composition du manteau supérieur.

On en vient au temps. Au sein du Manteau Primitif, le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ a évolué au cours des âges, en fonction de l'abondance relative en rubidium et en strontium de ce réservoir ; idem pour le manteau supérieur. À partir de la connaissance des abondances relatives, quantifiées par le rapport de concentration Rb/Sr , on peut calculer l'âge pour lequel le rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des deux réservoirs, aujourd'hui respectivement de 0,7047 et 0,702, était similaire. Ce calcul, objectif idéal d'une séance de travaux dirigés en géochimie isotopique à

l'université (au moins pour l'enseignant...), donne un résultat de deux milliards d'années. L'âge moyen du manteau supérieur est donc de deux milliards d'années. L'âge moyen de la croûte continentale est donc lui aussi de deux milliards d'années. Cela implique que la moitié de la masse des continents s'est extraite du Manteau Primitif avant -2 milliards d'années, l'autre s'est extraite depuis. La géochimie élémentaire couplée à la géochimie isotopique du couple rubidium-strontium pose une contrainte essentielle à la reconstitution de l'histoire de la croûte continentale.

Les Éléments de Terres Rares

Parmi les éléments chimiques utilisés par les scientifiques pour caractériser les processus à l'origine de l'évolution des réservoirs terrestres, les Éléments de Terres Rares (ETR) sont célèbres (au moins parmi les géochimistes...). Certains ETR sont connus du grand public néanmoins. J'ai déjà mentionné le néodyme. C'est un métal stratégique car il entre dans la composition des aimants permanents utilisés pour la fabrication d'électricité à

partir d'énergie éolienne. La production d'électricité est d'autant plus efficace que l'aimant est puissant. À ce jour, les aimants les plus puissants sont un alliage de fer, de bore et de néodyme. Ainsi, pour une éolienne, on utilise entre cinq cents kilogrammes et une tonne de néodyme. Les ETR sont aussi des éléments critiques pour nous, Européens (je n'imagine guère un lectorat international...). En effet, plus des trois-quarts de la production mondiale d'ETR est réalisée en Chine. Je passe sous silence les conditions environnementales et sociales dans lesquelles cette exploitation se fait ; pour le coup, ça nous couperait les envies d'une transition énergétique. Au Burundi, une exploitation d'ETR a été ouverte en septembre 2017. J'ai été sollicité pour travailler à la caractérisation géologique de ce gisement, en encadrant les travaux de thèse de Seconde Ntiharirizwa, maître assistante à l'Université de Bujumbura. Seconde vient d'ailleurs de soutenir sa thèse à l'Université de Rennes 1, en décembre 2019. Les conditions d'exploitation au Burundi n'engendrent que peu de dommages sur l'environnement, en plus de fournir du travail à quelques dizaines de personnes. L'exploitation minière est donc bien acceptée par la population.

Avant d'être exploités, au Burundi ou en Chine, les ETR doivent être concentrés dans un gisement économiquement rentable, par des processus géologiques *ad hoc*. Il en va ainsi de tous les métaux d'ailleurs. Pour les ETR, dont les concentrations originelles dans la Terre Globale sont très faibles, à peine quelques grammes par tonne, de multiples processus sont à l'œuvre pour atteindre des concentrations significatives, jusqu'à plus de 50% dans le minerai burundais (le plus riche du monde !), qui se déroulent sur de longues périodes géologiques.

Pour apprécier les détails de ces processus, il faut remonter aux caractéristiques intimes des ETR, c'est-à-dire qu'il nous faut descendre à l'échelle atomique. À nouveau, le lecteur gagnera à se montrer concentré pour la lecture du paragraphe suivant. Pas toujours simple, la géochimie des éléments... Les Éléments de Terres Rares sont principalement le groupe des Lanthanides, groupe de quinze éléments chimiques dont le nombre de protons est compris entre 57 (le lanthane) et 71 (le lutétium). À l'état neutre, ces atomes possèdent donc de 57 à 71 électrons, qui se répartissent selon des orbitales autour du noyau central constitué de protons et de neutrons. Les orbitales électroniques

correspondent aux trajectoires probables de vol des électrons autour du noyau. Il y a plusieurs altitudes de vol. Et plus l'altitude est élevée, plus les trajectoires peuvent être compliquées. À basse altitude, la trajectoire de vol décrit une sphère, où seuls deux électrons peuvent cohabiter : c'est le niveau 1, sphérique, avec deux électrons, et on le note $1s^2$. Au niveau supérieur, une première trajectoire possible est toujours une sphère, qui contient à nouveau deux électrons (niveau 2 sphérique avec deux électrons, soit niveau $2s^2$) ; mais à ce niveau 2, trois autres trajectoires, hélicoïdales, sont possibles. Chacune de ces nouvelles trajectoires peut accepter deux nouveaux électrons (les trois trajectoires hélicoïdales sont notées $2p^6$). Et ainsi de suite pour les niveaux les plus élevés : les trajectoires deviennent de plus en plus compliquées. Pour les ETR, le fait est que les niveaux les plus élevés (niveau $6s^2$ par exemple) sont remplis d'électrons alors que certaines couches plus basses, ne le sont pas. Ainsi la sous-couche $4f$, qui peut contenir quatorze électrons. C'est là la caractéristique remarquable du groupe des quinze lanthanides, le remplissage progressif de la sous-couche $4f$, qui de vide à pleine, offre quinze possibilités (comptez sur vos doigts jusqu'à quatorze en commençant par

zéro, vous arrivez bien à quinze !). Ce remplissage progressif de la sous-couche confère aux ETR des propriétés géochimiques proches, qui évoluent progressivement des ETR légers (à faible nombre de protons) vers les ETR lourds (à nombre de protons élevé). Par exemple, les ETR sont des éléments incompatibles avec les structures cristallines ; dans le détail les ETR légers sont très incompatibles, car de grande taille et de degré d'oxydation +3, et les ETR lourds sont un peu moins incompatibles, car s'ils possèdent le même degré d'oxydation (+3), ils sont environ 20% plus petits que les légers et peuvent donc s'insérer un peu plus facilement dans les structures cristallines. La diminution de la taille du rayon ionique au sein du groupe des ETR est appelée la Contraction des Lanthanides ; on dirait le titre d'un film de George Lucas...

Éléments réfractaires, les ETR ont été concentrés dans la Terre Globale par rapport au réservoir chondritique ; éléments lithophiles, les ETR ont été concentrés dans le Manteau Primitif par rapport à la Terre globale ; éléments incompatibles, les ETR ont été concentrés dans la croûte continentale par rapport au Manteau Primitif. Ces trois concentrations successives aboutissent à une teneur en ETR dans la coûte

continentale environ cinquante fois supérieure à celle d'un réservoir chondritique, soit quelques dizaines de grammes par tonne ; on est encore loin d'une concentration de 50%, mais c'est un début !

Les roches de la croûte continentale subissent les effets du climat lorsqu'exposées à la surface. Elles s'altèrent et elles s'érodent. Les ETR sont des éléments quasi insolubles dans l'eau ; ils restent donc stockés dans les argiles, minéraux d'altération que l'on trouve par exemple dans les sols. A vrai dire, les ETR s'adsorbent sur la surface des minéraux argileux. Le devenir des argiles, érodées et mises en suspension dans l'eau des rivières et des fleuves, est d'aller à la mer, où elles se déposent par décantation sous forme de sédiments fins. Les Japonais pensent avoir trouvé d'importantes ressources en ETR dans de telles argiles pélagiques, à tort vraisemblablement. Quoi qu'il en soit, les argiles pélagiques font partie de la lithosphère océanique, et sont enfouies en subduction quelques dizaines de millions d'années après leur dépôt. Dans la zone de subduction, les argiles se transforment, se métamorphisent, car elles y subissent une augmentation de pression et de température. Les argiles se transforment en schistes, puis en micaschistes. Les roches de l'Île de Groix,

au large de Lorient en Bretagne sud, présentent de beaux affleurements de micaschistes, certains riches en grenats, formés par la transformation de roches argileuses dans une subduction ancienne, vieille de 360 millions d'années, ensuite ramenées en surface par les soins conjugués de la tectonique et de l'érosion de surface. La caractéristique commune aux roches métamorphiques est de perdre de l'eau pendant leur recristallisation. Ainsi des argiles à leur transformation en micachistes. Les eaux libérées remontent vers la surface, tout en permettant localement la fusion partielle des roches du coin de manteau supérieur qu'elles traversent. Si vous faites subduire votre main droite sous votre main gauche, avec un angle de quarante-cinq degrés environ, vous voyez se dessiner un coin entre vos mains (l'expérience, déjà tentée dans le *Trésor des abysses*, consiste à placer vos mains horizontalement à hauteur d'yeux, face-à-face et vos doigts se touchant, et à faire descendre votre main droite sous votre main gauche). L'espace dessiné entre vos mains représente le coin de manteau où des eaux libérées par votre main droite remonteraient sous la paume de votre main gauche.

Les magmas formés dans le coin de manteau montent vers la surface terrestre car ils sont moins

denses que les roches mantelliques où ils prennent source. En surface, ces magmas donnent naissance aux nombreux volcans observables à l'aplomb des zones de subduction. Tous ces volcans sont de nature explosive ; ce trait commun est dû à l'eau que les magmas contiennent, dont une grande partie provient de la déshydratation métamorphique des argiles dans la zone de subduction. Pour être honnête (ça m'arrive...), cette eau provient principalement de la déshydratation des roches de la croûte océanique sur laquelle se sont déposées les argiles. Ces roches ont été altérées et hydratées lors de l'hydrothermalisme au niveau des dorsales, celui à l'origine des fumeurs noirs. Dans le coin mantellique au-dessus de la plaque plongeante, si une partie de l'eau provenant de la déshydratation métamorphique est incorporée dans les magmas qui s'y forment, une autre partie se disperse dans les roches du manteau sans que celles-ci ne fondent, et emporte avec elle des éléments chimiques dissouts. Les roches du manteau sont alors imprégnées de ces eaux. Les ETR sont peu solubles dans l'eau ; je l'ai dit. Mais l'eau de déshydratation est plus un fluide aqueux complexe que de l'eau pure. Ces fluides contiennent des quantités significatives de CO_2 qui provient de la déstabilisation des carbonates eux-

mêmes engagés dans la subduction), et de chlore (l'eau de mer est salée, riche en chlore, ainsi donc que les roches du plancher océanique qu'elle a altérées). Chlore et CO_2 sont des agents complexant efficaces pour les ETR : ils peuvent s'associer à ces ETR et augmenter leur dissolution dans les fluides aqueux. Les fluides sont alors capables de transporter les ETR et de les disperser dans le manteau non-fondu au-dessus de la subduction.

Lorsque la zone de subduction cesse de fonctionner, les perturbations physiques associées disparaissent. Depuis que la subduction à l'Île de Groix a cessé, la Bretagne est redevenue bien calme. Bien sûr, des événements se sont déroulés depuis (fabrication de la chaîne de montagne varisque de 350 à 300 millions d'années, ouverture de l'océan Atlantique depuis 200 millions d'années) ; mais aujourd'hui, la lithosphère bretonne (croûte continentale et son sous-bassement rigide dans le manteau) est stable. Chimiquement, c'est une autre affaire. Sous la croûte bretonne, dans la partie mantellique de la lithosphère, partie qui ne participe pas à la convection dans le manteau supérieur, on garde les stigmates des fluides ayant été largués dans la zone de subduction. Le manteau a été imprégné par ces fluides. On dit qu'il a été métasomatisé,

mot barbare pour dire qu'il a été fertilisé en certains éléments chimiques, dont les ETR, grâce à l'action conjuguée de l'eau du CO₂ et du chlore. Depuis que la tectonique des plaques s'est installée sur Terre, il y a trois milliards d'années, ce processus a cours. Les zones de subduction anciennes se comptent par centaines ; elles ont toutes disparu au gré des réajustements géodynamiques et des cycles de Wilson mentionnés plus haut. La partie mantellique de la lithosphère garde néanmoins l'empreinte chimique de ces subductions passées. Si bien que cette lithosphère sous-continentale est un réservoir varié et complexe, mystérieux encore par bien des aspects pour les géologues, surtout s'il est ancien et qu'il a enregistré les effets superposés de plusieurs subductions.

Le continent africain présente à l'affleurement des roches très anciennes. En profondeur, le manteau lithosphérique sous-continentale, lui-même très ancien, ne peut qu'être un réservoir complexe. Dans la région du Rift, on assiste actuellement à la déchirure de la lithosphère est-africaine. La corne de l'Afrique se détache progressivement, et essaye de migrer vers l'est. La région des grands lacs, dont le majestueux Lac Tanganyika, porte les stigmates de cette déchirure, appelée justement

un rift continental. La déchirure continentale est la conséquence en surface de mouvements mantelliques sous-jacents de plus grande ampleur. On imagine assez facilement le manteau convectif, sous la lithosphère, se déplacer suivant des courants ascendants complexes, suffisamment puissants pour réchauffer, déstabiliser, déchirer la lithosphère africaine. Or cette lithosphère ancienne est fertile, métagénérée en eau, CO₂, Cl et autres éléments chimiques dans son histoire passée. La réchauffer même légèrement est susceptible de la faire fondre. C'est exactement ce qui se passe sous la Tanzanie, avec un volcanisme important aussi bien que remarquable : le Kilimandjaro en est l'étendard.

Moins connu que le Kilimandjaro, l'Oldoinyo Lengai, également en Tanzanie, est remarquable par la nature des laves qu'il émet. Ce sont des laves très fluides, riches en éléments volatils, noires à leur éruption, et qui blanchissent en quelques jours. Ce sont des carbonatites riches en sodium, et c'est l'unique exemple au monde de ce type d'éruption. L'existence de l'Oldoinyo Lengai tient à la perturbation thermique de la vieille lithosphère sous-jacente, en réponse à la déchirure est-africaine. Pour tout dire, cette Afrique de l'est est le siège d'un magmatisme carbonatitique depuis

plusieurs centaines de millions d'années ! Rien qu'au Burundi, petit pays, on connaît deux exemples. L'un s'est mis en place il y a 700 millions d'années, dans la région de la Haute Ruvubu, au nord du Pays. La mission de terrain que j'y ai réalisée en 2014 avec ma collègue belge Sophie Decrée, et un étudiant de Master 2 (Corentin Cobert) reste l'un de mes grands souvenirs de géologie de terrain. L'autre exemple de magmatisme carbonatitique burundais s'est mis en place vers 600 millions d'années, dans la région de Gakara, à quarante kilomètres au sud de Bujumbura. C'est dans cette région de Gakara qu'on exploite aujourd'hui le gisement d'ETR le plus concentré au monde...

En voici l'histoire géologique, somme de processus qui ont tous contribué à concentrer un peu plus les ETR, jusqu'à la concentration record de 50% (imaginez : une tonne de minerai contient cinq cents kilogrammes d'ETR !). La partie mantellique de la lithosphère africaine a connu nombre d'événements de subduction entre -2,5 et -1 milliards d'années. Il y a un milliard d'années elle faisait partie d'un super-continent, Rodinia, qui s'est lui-même fragmenté vers -700 à -600 millions d'années. Cette fragmentation lithosphérique marque le début du cycle panafricain (précédant le

cycle varisque, précédant lui-même le cycle actuel, alpin). Les perturbations thermiques associées à cette dislocation ont déclenché une fusion partielle dans la lithosphère sous-continentale. Celle-ci ayant été métasomatisée, enrichie, fertilisée lors des subductions antérieures, elle fond facilement, et dès les premières gouttes formées (à un taux de fusion partielle assez faible), ces magmas riches en volatils (H_2O , CO_2 , Cl), et donc fluides, s'exfiltrent de la zone où ils ont été générés. Les ETR sont des éléments incompatibles, et se dissolvent donc dans ces magmas. Lors de leur remontée vers la surface, remontée assez rapide car ces magmas sont fluides, on assiste à la démixtion de ces magmas en deux nouveaux magmas. Pas facile à concevoir... Et pourtant. A grande profondeur, à forte pression donc, le magma est homogène ; mais à basse pression, ce magma se dissocie en deux composés. L'un collecte la fraction silicatée, qui donnera naissance à des roches proches de granites et de syénites, l'autre collecte la fraction carbonatée et hydratée, riche en volatils. Cette dernière composante, moins abondante que la première, correspond à un magma carbonatitique. Les ETR, par leur affinité avec les carbonates et le chlore, se dissolvent dans ce magma carbonatitique.

Les deux magmas se séparent donc, mais ils continuent leur remontée vers la surface l'un à côté de l'autre, et ce, tant qu'ils sont suffisamment fluides. Quand ils remontent, ils traversent des roches plus froides. Ils refroidissent donc, et commencent à cristalliser progressivement. Dans le magma carbonatitique apparaissent des minéraux comme le pyroxène (un silicate), l'apatite (un phosphate), la calcite (un carbonate) ; mais l'essentiel des volatils n'intègrent pas ces minéraux et restent dissous dans le magma. À partir d'un certain taux de cristallisation, ces volatils ne s'y dissolvent plus. Ils s'en exsolvent, et constituent alors un fluide aqueux-carbonique riche en chlore, très concentré en éléments dissous, dont les ETR. Cette phase fluide reste bloquée au sein du système magmatique où elle monte en pression, tant et si bien qu'à un certain stade, elle est capable de fracturer les roches alentours pour s'y injecter brutalement. À ce moment-là, la pression est relâchée au sein du fluide. Nouvelle conséquence de cette chute de pression, le CO₂ et l'eau ne se mélangent plus ! Il y a démixtion au sein même de la phase fluide entre ces deux volatils. C'est cet événement qui provoque la cristallisation du minerai d'ETR sous forme de carbonate d'ETR burundais, la bastnaésite.

Une étudiante de Master 2, Vanessa Elongo, travaillant dans le cadre de la thèse de Seconde, a étudié les inclusions fluides piégées dans la bastnaésite au moment de sa cristallisation. Elle a observé deux types d'inclusions : les unes contiennent uniquement du CO₂, les autres sont constituées d'une saumure aqueuse. La preuve est faite, les deux fluides se sont séparés physiquement, par le processus de démixtion.

Le minerai burundais est le plus riche du monde. Il s'est formé suite à une succession de processus géologiques variés qui, tous, ont participé à la concentration progressive des ETR dans les fluides minéralisateurs. Si la minéralisation s'est faite il y a 600 millions d'années, les ETR qu'on y trouve ont été extraits du manteau plus d'un milliard d'années avant, lors d'un épisode de croissance continentale. Les « âges modèles » du néodyme, c'est-à-dire les âges d'extraction des ETR du manteau supérieur, sont de l'ordre de 1,5 à 2,0 milliards d'années. Et il y a 30 millions d'années environ, la mise en place du rift est-africain, matérialisée par la dépression remplie par le Lac Tanganyika a permis de mettre à l'affleurement le gisement, en érodant les roches sus-jacentes. Aujourd'hui encore, le gisement d'ETR est altéré

sous climat équatorial, et les ETR entrent dans un nouveau processus géologique, la latérisation (ou formation des latérites). Bien longue l'histoire de la formation d'un gisement d'ETR. Bien faible la probabilité de découvrir un tel gisement. Bien chanceux le géologue qui travaille sur un objet si exceptionnel.

Mon collègue et néanmoins camarade Kerry Gallagher (prononcez *galahèr*, il y tient...) se plait à rappeler que sur Terre : « Tout est physique ». Pas faux. Les processus géodynamiques, au premier rang desquels les événements de la Tectonique des plaques sont régis par des lois physiques. Il reste que la matière terrestre elle-même est constituée d'atomes dont les propriétés géochimiques intrinsèques ont permis la mise en place de réservoirs de compositions différentes.

L'histoire de la Terre est une symphonie, les éléments chimiques en sont les notes. Commencée au Big Bang, la fabrication des noyaux d'atome, la nucléosynthèse, s'est poursuivie au cœur des

étoiles. Les étoiles les plus massives meurent dans un fracas formidable, les supernovae. Ce cataclysme destructeur est néanmoins source des atomes les plus lourds, plus lourds que le fer. Répandus dans l'espace par les ondes émises des supernovae, ces éléments viennent enrichir les nuages d'hydrogène errant dans les galaxies, héritiers du Big Bang. Le Soleil est né dans une de ces nébuleuses, il y a 4,57 milliards d'années, nuage protosolaire déstabilisé par le hasard d'une supernova proche.

Si l'essentiel de la matière originelle de ce nuage se trouve concentré au Soleil, un large disque de matière diffuse l'a ceint. Les éléments s'y sont condensés rapidement mais progressivement, les éléments réfractaires d'abord, puis les éléments volatils. Les chondrites nous offrent la mémoire de ces événements. Certains éléments sont encore sous forme gazeuse dans notre atmosphère, hydrogène, oxygène, azote. Le jeune Soleil a expulsé vers les confins du système solaire de larges masses de ces éléments volatils, les planètes géantes gazeuses les ont incorporées. Il a fallu attendre des réajustements planétaires, quelques dizaines de millions d'années plus tard, pour que la Terre soit percutée par des bolides venant de ces zones externes pour fonder son stock de volatils, l'eau au premier chef. Entre temps,

la proto-Terre était devenue Terre, en conséquence de l'accrétion d'une foultitude de corps plus petits.

La chaleur associée à ce bombardement a provoqué une fusion générale de la planète, phénomène à l'origine de la formation du noyau terrestre, chose accomplie durant les trente premiers millions d'années de son histoire. Un bolide un peu plus gros que les autres, de la taille de Mars, et que l'on nomme Theïa, est venu percuter la Terre. Hasard heureux des choses, la Terre n'a pas explosé à l'impact. Elle a souffert, perdu beaucoup de son sang, mais de cette souffrance est née la Lune, fille nocturne de la Terre. L'eau parvenue ensuite sur Terre, désormais scindée en un noyau métallique et un manteau silicaté, cristallisation de l'océan magmatique primitif, s'est condensée très vite sous forme d'océans, dans une atmosphère carbonique hostile, irrespirable. Immédiatement, l'eau liquide s'est infiltrée dans les anfractuosités des roches sous-jacentes, les a altérées, les a hydratées. Ces roches ont parfois été enfouies vers les profondeurs de la Terre, à la faveur des mouvements tectoniques chaotiques des temps anciens, tumultueux. Chauffées suffisamment, elles ont commencé à fondre pour former des magmas de composition granitique, dont l'accumulation en surface a généré

les premiers noyaux de croûte continentale, notre futur habitat.

Si l'eau de mer s'est infiltrée dans les roches, de puissants fluides hydrothermaux, proches en nature des fumeurs noirs actuellement visibles au niveau des dorsales médio-océaniques, ont jailli au fond des mers. Les déséquilibres chimiques entre ces sources chaudes et l'eau de mer ambiante est vraisemblablement à l'origine de la vie terrestre. Notre berceau ne fut guère douillet... Les premiers organismes vivants ont commencé à transformer le CO_2 atmosphérique en O_2 , l'oxygène de l'air. Il a fallu plus d'un milliard et demi d'années pour que l'air s'emplit de cet oxygène, événement connu comme la Grande Oxygénation (ou Great Oxidation Event). L'oxygène libéré par les algues était auparavant consommé par des réactions d'oxydation du fer, fer abondamment libéré par les conduits hydrothermaux. D'énormes quantités de fer ont été oxydées ainsi. Les plus grands gisements de fer actuellement exploités sur Terre, les BIF, se sont formés en ces temps d'oxygénation.

La Terre s'étant refroidie régulièrement, une couche rigide s'est installée à sa surface, la lithosphère. Et avec elle, la Tectonique des

plaques, il y a environ trois milliards d'années. La dynamique interne de la Terre, toujours régie par le besoin thermodynamique d'évacuation de chaleur était mieux réglée dès lors. Dans les zones de subduction, le magmatisme généré en profondeur par la libération des eaux de déshydratation métamorphique, a permis la croissance de la croûte continentale, plus de façon saccadée que de façon régulière. Certains éléments chimiques, comme le strontium et le rubidium, porteurs d'isotopes radioactif et radiogénique, aident à décrypter les modalités de cette croissance. Les fluides libérés dans la subduction ont en outre laissé une trace chimique dans la lithosphère sous-continentale, empreinte métasomatique riche en eau, CO₂ et chlore. Sollicitée lors de nouveaux événements tectoniques, cette lithosphère mantellique sous-continentale fut alors sujette à de légères fusions partielles, dont les magmas de nature carbonatitique sont l'expression. Associées à ces magmas, d'exceptionnelles minéralisations en Éléments de Terres Rares, éléments aujourd'hui critiques et stratégiques, se sont formées. Et par chance, un de ces gisements est aujourd'hui visible sur les collines bordant le Lac Tanganyika, au Burundi.

Les Éléments de Terres Rares exploités

aujourd'hui au Burundi, ou en Chine, ont été synthétisés dans une supernova, il y a près de 6 milliards d'années. Ils ont connu une longue épopée au sein du système solaire, puis au sein de notre planète. Extraits de leur gangue minéralogique, ces Éléments de Terres Rares se retrouvent maintenant dans nos téléphones portables et dans nos éoliennes. La prochaine fois que vous verrez des éoliennes dans un paysage, vous penserez peut-être au néodyme, note élémentaire d'une grande symphonie. Et vous espérerez sans doute qu'après avoir produit de l'énergie à partir du vent, cette note ne s'envole pas, mais qu'on la recycle, qu'on écrive en somme une nouvelle portée.

Table

Introduction	p.07
Chapitre 1 :	
Le Big Bang et les étoiles	p.13
La naissance de l'Univers	p.16
La formation des étoiles.....	p.18
La mort des étoiles	p.23
Chapitre 2 :	
Le système solaire	p.31
Les matériaux du système solaire	p.34
Les météorites.....	p.41
Un modèle de formation du système solaire.....	p.47
Chapitre 3 :	
La Terre primitive	p.59
L'évolution précoce de la Terre.....	p.62
Le noyau terrestre de la Lune.....	p.67
L'apparition de la vie, cause et conséquence chimiques	p.75
La cristallisation de l'océan magmatique.....	p.81
Chapitre 4 :	
Les réservoirs terrestres.....	p.87
La différenciation du Manteau Primitif	p.89
La croûte continentale.....	p.93
Le manteau actuel	p.98
Le couple rubidium-strontium	p.104
Les Éléments de Terres Rares	p.113
Conclusion.....	p.129

Achévé d'imprimer en Avril 2020
par l'imprimerie IDENTIC à Rennes, France
Dépôt légal avril 2020