

L'évolution minérale

André Souesme, membre de la SAGA.

Le présent article a pour but de présenter le concept d'évolution minérale (1^{re} partie) au travers de deux articles de R. Hazen *et al.* publiés en 2008 « Évolution minérale » (2^e partie) et, en 2022, « Modes paragénétiques des minéraux » (3^e partie).

1^{re} partie.

Concept d'évolution minérale

1. Le concept « d'évolution »

Bien que les collections de minéraux présentent leurs spécimens accompagnés de nombreuses informations, il est très rare d'y trouver l'âge du minéral. C'est pour replacer la minéralogie dans sa « 4^e dimension » que R. Hazen, minéralogiste et astrobiologiste américain, a introduit le concept « d'évolution minérale » dans un article publié en 2008 (Hazen *et al.*, 2008).

L'évolution minérale est une séquence irréversible d'événements conduisant à des assemblages de minéraux de plus en plus complexes et diversifiés. Elle présente plusieurs similarités avec l'évolution biologique : comme cette dernière, elle se caractérise par le hasard et la nécessité, c'est-à-dire que des phénomènes déterministes et stochastiques se produisent. Comme nous allons le voir, elle a connu des phases de forte diversification, séparées par des périodes de stase durant lesquelles il ne s'est pas formé pas de nouveaux minéraux.

L'extinction concerne aussi l'évolution minérale : certains minéraux ne se forment plus, comme, par exemple, certains minéraux des chondrites à enstatite qui sont instables sur terre dans leur état oxydé. Ils pourraient toutefois réapparaître si les conditions physico-chimiques appropriées étaient rétablies.

2. Comment se traduit l'évolution ?

L'évolution minérale se traduit d'abord par une augmentation du nombre de minéraux, passé de quelques dizaines à l'état pré-solaire à plus de 6 000 (nombre de minéraux connus début 2024 ; en 2008, lors de la publication de l'article de Hazen *et al.*, le nombre de minéraux reconnus par l'IMA était de 4 300).

L'évolution entraîne aussi des variations des abondances relatives des minéraux de surface, une augmentation de la diversité des associations minérales et des variations de la taille et de la morphologie des minéraux.

SiO₂, par exemple, se présente sous la forme de rares micro-grains de cristobalite dans les chondrites, de grains millimétriques de quartz dans certaines achondrites, de cristaux centimétriques dans les granitoïdes et de méga-cristaux dans les pegmatites.

Autre exemple, les feldspaths sont riches en calcium dans les chondrites, en plagioclases calco-sodiques dans les achondrites, en feldspaths sodi-potassiques dans l'évolution des roches ignées sur Terre.

3. Les processus à l'œuvre

Trois grands types de processus peuvent être distingués.

3.1. Séparation et concentration

Des éléments simples à l'origine de groupes de minéraux (par exemple les borates et les phosphates) étaient initialement présents en très faibles quantités et très dispersés. Ils ont été concentrés de diverses façons (différenciation planétaire en noyau et manteau, dégazages, cristallisation fractionnée, fusion partielle...), ce qui a permis l'émergence de nouveaux groupes de minéraux.

3.2. Variables intensives et volatiles

Avec le refroidissement planétaire, les minéraux ont été exposés à une gamme plus large de variables intensives (température, pression) et à des réactions avec des composés volatils (eau, CO₂, O₂). Ainsi, calottes glaciaires, lacs asséchés, roches métamorphiques ont été à l'origine de nouveaux minéraux.

3.3. Influence biologique directe ou indirecte

L'émission d'oxygène par les organismes photosynthétiques a fini par enrichir l'atmosphère terrestre en oxygène de manière très significative (cf. l'événement de la grande oxydation ci-dessous).

De leur côté, les organismes vivants élaborent des minéraux tels que l'aragonite qui ne sont pas en équilibre avec leur environnement et qui ne se formeraient pas en l'absence de processus biologiques.

2^e partie. Chronologie de l'évolution minérale

Selon Hazen *et al.*, l'évolution minérale a connu 10 stades qui se chevauchent partiellement et qui, pour certains, se poursuivent de nos jours. Ces 10 stades se répartissent en trois ères :

- l'ère de l'accrétion planétaire (> 4,55 Ga) qui comprend deux stades : minéraux primaires des chondrites, différenciation et altération des planétésimaux ;
- l'ère des remaniements de la croûte et du manteau (de 4,55 à 2,5 Ga) qui regroupe trois stades : évolution des roches magmatiques, formation des granites, tectonique des plaques ;
- l'ère de la minéralogie liée à la biologie qui regroupe les cinq derniers stades : le monde biologique anoxique, les changements atmosphériques du Paléoproterozoïque, les changements biogéochimiques du Néoproterozoïque et le Phanérozoïque.

Avant de passer en revue les dix stades de l'évolution minérale terrestre, il est toutefois nécessaire de présenter les minéraux pré-terrestres (stade 0).

1. Stade 0 : les minéraux pré-terrestres (> 4,6 Ga)

Au début de l'Univers, il y a seulement de l'hydrogène et de l'hélium. La formation de minéraux est rendue possible, des millions d'années plus tard, par la synthèse d'éléments plus lourds (C, O, Si, N) dans les étoiles.

Des micro-minéraux se forment à des températures supérieures à 1 500 °C dans les atmosphères en expansion des géantes rouges et les éjectas des supernovæ.

On retrouve des grains interstellaires pré-solaires dans la matrice de chondrites et que l'on identifie par leurs compositions isotopiques « anormales ».

Une douzaine de minéraux réfractaires (C, carbures tels que la moissanite SiC, nitrures, oxydes, silicates de Mg) ont ainsi été recensés et baptisés « minéraux d'Ur », seuls présents pendant des dizaines de millions d'années.

Diamant et graphite seraient les deux premiers cristaux du cosmos.

Quand une étoile riche en carbone explose, les températures du gaz éjecté baissent et, à 4 400 °C, chaque atome de carbone, avide de liaisons, se lie à quatre autres pour former de minuscules pyramides où chaque atome de carbone veut à son tour quatre compagnons : il se forme ainsi des nanocristaux de diamant, selon un processus toujours à l'œuvre de nos jours.

Tous les autres cristaux sont moins réfractaires que le diamant. Le graphite succède au diamant à partir de

4 000 °C : chaque atome de C se lie à trois autres pour former un triangle plat et des feuillets glissant les uns sur les autres.

2. Ère de l'accrétion planétaire

2.1. Stade 1 : formation des minéraux chondritiques primaires

Rappelons que les chondrites, météorites pierreuses formées dans la nébuleuse solaire, sont des agrégations complexes de chondres, CAI, AOA et autres objets réfractaires dans une matrice à grains fins de grains de minéraux et poussières.

Les chondres sont des objets sphériques ($\varnothing \sim 1$ mm) constitués de gouttelettes fondues, formées dans l'espace par chauffage instantané et refroidissement rapide lors de la formation du Soleil (figure 1). Les CAI (*Calcium Aluminium-rich Inclusions*) sont des inclusions riches en calcium et aluminium ; les AOA (*Amoeboid Olivine Aggregate*) sont des agrégats d'olivine amiboïdes. D'autres petits objets réfractaires, de diamètre millimétrique, (URIs *Ultra-Refractory Inclusions*) sont également présents.

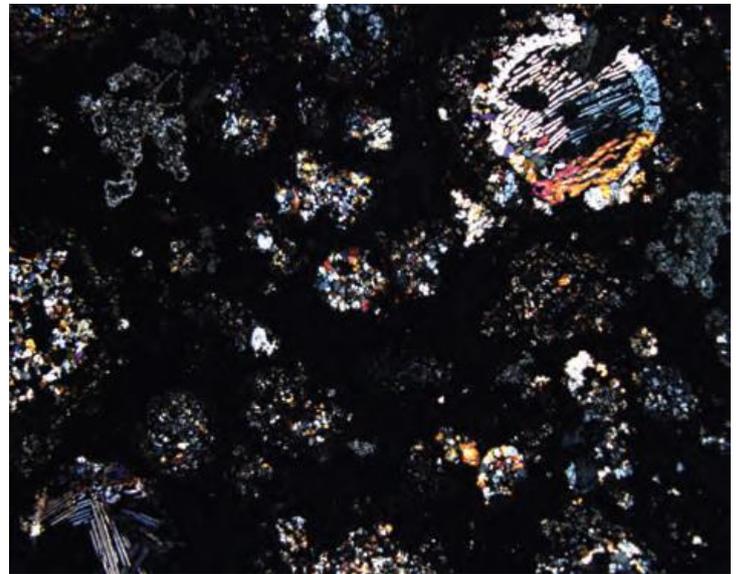


Figure 1. Chondres et CAI de la météorite d'Allende (chondrite carbonée CV3, Mexique, 1969). L'olivine est le minéral (biréfringent) le plus abondant. Largeur de l'image : ~7 mm. Photo T. McCoy. In Hazen *et al.* 2008.

Les minéraux les plus importants des chondres sont le pôle Mg de l'olivine (forstérite), des pyroxènes, la kamacite et taénite pour (Fe,Ni), FeS (troïlite).

Les inclusions riches en calcium et aluminium (figure 2) présentent, de leur côté, une douzaine d'oxydes et silicates de calcium, aluminium et magnésium.

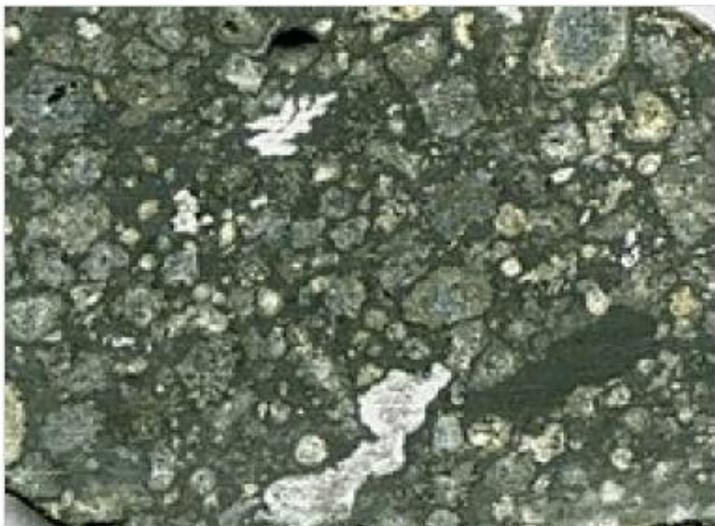


Figure 2. Coupe transversale d'une chondrite contenant des chondres d'olivine ronds et des inclusions minérales riches en calcium et en aluminium, blanches et irrégulières.
Photo James St. John. Source Wikipédia.

La matrice des chondres apparaît majoritairement formée de silicates (olivine, pyroxènes).

Au total, les chondrites de type 3 (c'est-à-dire les moins altérées) contiennent une soixantaine de minéraux primaires différents.

2.2. Stade 2 (de >4,56 à 4,55 Ga)

Altération aqueuse

Avec la progression de l'accrétion, l'altération aqueuse à basse température (inférieure à 100 °C) apporte de nouvelles séries de minéraux.

L'altération de l'olivine et du pyroxène entraîne l'apparition de la chlorite, de la serpentine, du talc et d'autres phyllosilicates, ainsi que d'hydroxydes, de sulfates et de carbonates.

La halite est également un minéral qui se forme à cette époque.

Métamorphisme

Le métamorphisme fait apparaître l'albite, les feldspathoïdes et une variété de micas, les amphiboles et les pyroxènes.

Des chondrites portent aussi la trace d'impacts avec :

- les formes de majorite, akimotoite et pérovskite de $(Mg,Fe)SiO_3$ (la pérovskite n'est pas un silicate - absence de tétraèdres - mais un oxyde) ;

- les formes de wadsleyite et ringwoodite de l'olivine $(Mg,Fe)_2SiO_4$;

- les formes de coésite et stishovite de SiO_2 .

Au total, les chondrites comprennent environ 150 espèces minérales primaires et secondaires.

Différenciation de planétésimaux

Les planétésimaux de diamètre > 200 km fondent et se différencient sous l'action de la radioactivité (^{26}Al) et/ou du vent solaire, conduisant à la diversité minéralogique des achondrites.

Les **achondrites primitives** (acapulcoïtes, lodranites, winonaïtes) proviennent de chondrites ayant subi une fusion partielle et une différenciation minimale : olivine, orthopyroxène, plagioclase, troïlite (FeS), Fe-Ni y sont notamment recensés.

Les **météorites différenciées** incluent plusieurs classes d'achondrites pierreuses, les sidérites et les mixtes (pallasites (figure 3), méso-sidérites). Individuellement, elles présentent moins de minéraux que les chondrites, mais leur grande variété a conduit à l'apparition de beaucoup de minéraux.

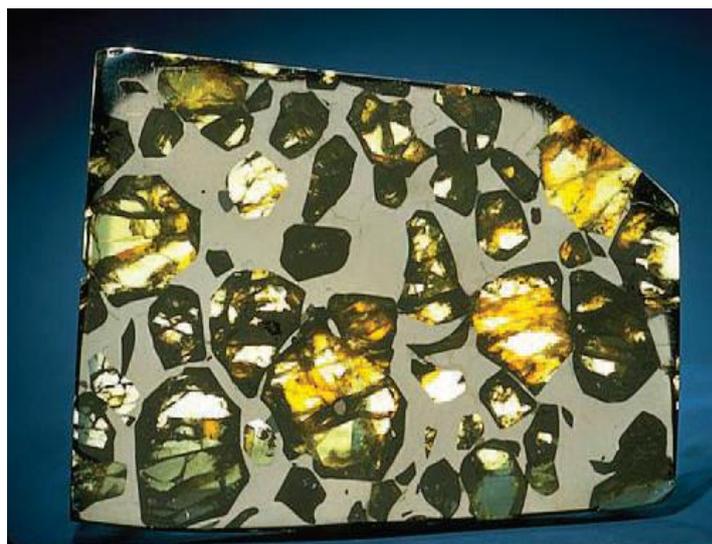


Figure 3. Pallasite, météorite mixte.
Cristaux d'olivine magnésienne noyés dans le ferro-nickel.
Issue d'un événement violent (collision d'astéroïdes) générant un mélange de métal et de silicates.
Photo Smithsonian. In Hazen et Ferry, 2010.

Parmi les achondrites pierreuses, citons les eucrites où apparaissent de manière significative la forme du quartz de SiO_2 , le feldspath potassique, la titanite, le zircon, les diogénites riches en orthopyroxènes et les brachinites caractérisées par l'olivine équigranulaire.

Les **météorites fer-nickel**, qui correspondent au cœur des planétésimaux différenciés, sont dominés par les alliages Fe-Ni (kamacite, taénite) avec des sulfures de métaux (troïlite) et des carbures. Apparaissent aussi deux douzaines de phosphates.

Selon R. Hazen, ce sont au total quelque 250 minéraux qui sont connus dans tous les types de météorites (ce nombre sera porté à 470 minéraux par Rubin et Ma, en 2021). Silicates de magnésium, sulfure de fer et Fe-Ni sont les minéraux dominants.

3. Remaniements de la croûte et du manteau (de 4,55 à 2,5 Ga)

3.1. Stade 3. Initiation de l'évolution des roches magmatiques

Le stade 3 se déroule de 4,55 à 4,0 Ga.

Deux grandes tendances parallèles sont distinguées ; les feldspaths plagioclases et les minéraux ferromagnésiens. Nous retrouvons là les fameuses « séries de Bowen », familières à tous ceux qui ont suivi des cours de géologie à l'université (figure 4).

En cumulé, le nombre de minéraux présents sur Terre à cette époque atteint 500.

Toutes les planètes rocheuses et les lunes atteignent cette étape. Toutefois, sur les corps pauvres en volatils (Mercure, Lune), le nombre cumulé de minéraux n'excède guère 350. Sur les corps riches en volatils (eau et autres), il y a émergence d'hydroxydes, d'hydrates, de carbonates et d'évaporites, ce qui porte le nombre de minéraux cumulé à 500. C'est donc le stade atteint par la Terre, mais aussi par Mars qui a jadis porté de l'eau.

3.2. Stade 4. Production de granitoïdes et formation de cratons

Le stade 4 correspond approximativement à la période allant de 4,0 à 3,5 Ga.

La fusion des basaltes, sous l'action de la chaleur interne, conduit à des granitoïdes qui forment des cratons et fabriquent les minéraux du granite de manière significative (quartz, feldspaths alcalins, micas).

S'opèrent également des concentrations d'éléments rares (Li, Be, B, Ta, terres rares, U), à l'origine de quelque 500 nouveaux minéraux trouvés notamment

dans des pegmatites (béryls, spodumène (Li), tourmaline (B), tantalite) (figure 5 et figure 6).

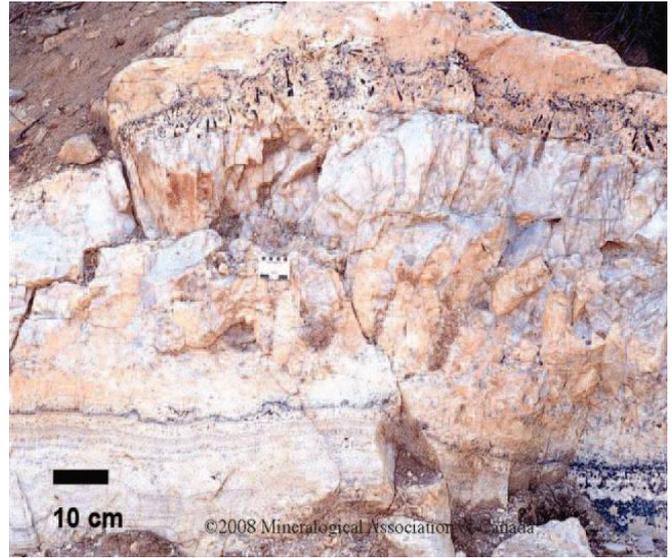


Figure 5. San Diego gem pegmatite, Mesa Grande, California.

D'après London 2008. In Hazen et Ferry, 2010.

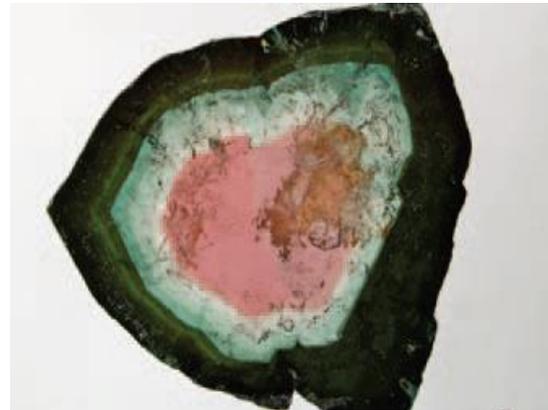


Figure 6. Tourmaline (cyclosilicate).

Photo Robert Downs. In Hazen et Ferry, 2010.

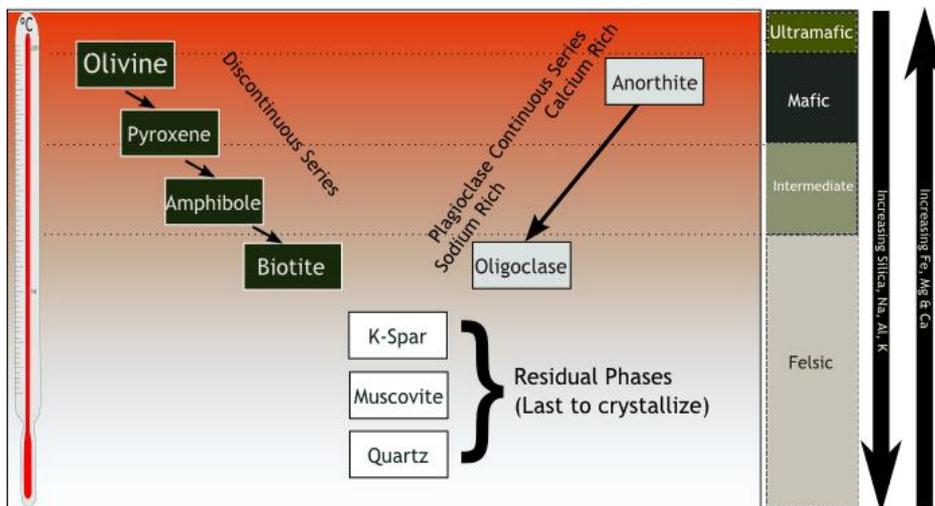


Figure 4. Les deux séries réactionnelles de Bowen. D'après Bowen (1928).

Pour la première fois le nombre cumulé de minéraux atteint le millier !

Ce stade d'évolution minérale aurait été atteint par Vénus, mais ni par Mars, ni par Mercure.

3.3. Stade 5. Tectonique des plaques et remaniement hydrothermal à grande échelle de la croûte

Difficile à dater, ce stade aurait commencé bien avant 3,0 Ga.

La subduction provoque des interactions fluide-roche et concentre des éléments rares. On assiste à la formation notable de gisements de sulfures avec 150 nouveaux minéraux de type sulfosel (et sulfures, séléniures, arséniures, tellurures, antimoniures). Se forment également des minéraux du métamorphisme tels que disthène, sillimanite, kyanite, cordiérite, jadéite (figure 7), staurolite, etc.

Le nombre cumulé de minéraux croît de 50 % pour atteindre 1 500.



Figure 7. Jadéite, clinopyroxène (métamorphisme de haute pression et basse température).

Photo Robert Downs. In Hazen et Ferry, 2010.

4. Ère de la minéralogie liée à la biologie

4.1. Stade 6. Biosphère anoxique de l'Archéen

Durant ce stade, qui court de 3,9 à 2,5 Ga, la vie a pu jouer un rôle dans la précipitation localisée de couches massives de carbonates, près des marges continentales et dans le dépôt de formations de fer rubanées (Fe et Mn).

Carbonates de fer, dolomites, calcaires, sulfates (baryte, gypse), évaporites (halogénures, borates) sont produits en abondance.

Au niveau des skarns carbonatés (métamorphisme de contact), se forment notamment diopside, trémolite, grossularite, wollastonite, scapolite.

Pour autant, le nombre cumulé de minéraux présents sur la Terre reste stable, aux alentours de 1 500. Le sol nu, la lente érosion de surface, la faible contribution de la vie anoxique ne sont pas propices à la formation de nouveaux minéraux.

4.2. Stade 7. La « grande oxydation » du Paléoproterozoïque

L'évènement de grande oxydation se serait déroulé de 2,5 à 1,9 Ga et aurait conduit progressivement à un taux d'oxygène atmosphérique compris entre 1 et 2 % du niveau actuel.

Cette oxygénation a permis un bond considérable dans le nombre de minéraux présents avec la formation de quelque 2 500 nouveaux minéraux, le total dépassant désormais les 4 000. En particulier, plus de 2 000 oxydes et hydroxydes, notamment métalliques, font leur apparition.

Rappelons que, sur la base des données actuelles (liste IMA de 6 000 minéraux), plus de 4 000 minéraux renferment de l'oxygène - lequel constitue 60 % des atomes de la croûte terrestre et 49 % en masse -, loin devant l'hydrogène (2 800 minéraux), le silicium (1 500), le calcium (1 200), l'aluminium, le fer et le soufre (1 100 minéraux chacun).

Comment expliquer cette « radiation minérale évolutive » ? Il s'avère que la moitié des 72 éléments simples pouvant former des minéraux ont plusieurs niveaux d'oxydation et que, dans un environnement enrichi en oxygène, ils ne sont plus réduits au plus bas niveau et peuvent donc former beaucoup plus de minéraux.

Les réactions chimiques pendant l'altération commencent à ressembler à celles en vigueur de nos jours : magnétite (Fe_3O_4) et hématite (Fe_2O_3) se forment à la place de la sidérite (FeCO_3) et de la pyrite (FeS_2).

Pour autant, on ne distingue pas de nouveaux minéraux de fer, mais simplement des changements dans leurs abondances relatives.

4.3. Stade 8. « L'océan intermédiaire »

Le « Milliard ennuyeux » (« *Boring Billion* » en anglais) qui s'étale de 1,9 à 1,0 Ga est une période de stase minérale.

La couche oxygénée de surface des océans s'épaissit. Les réserves de minerais de plomb, zinc et argent datent souvent de cette époque.

La formation du supercontinent Columbia, qui éclatera pour donner ensuite le supercontinent Rodinia, en-

traîne la formation de minéraux par création de fluides minéralisateurs lors des orogènes.

Nonobstant, il ne se forme pas de nouveaux minéraux.

4.4. Stade 9. La Terre « Boule de neige » du Néoprotérozoïque

De 1,0 à 0,542 Ga, plusieurs épisodes « *Snowball* » se succèdent. Lors des glaciations, le principal minéral est la glace, tandis que le volcanisme accroît la diversité minérale de surface.

Lors des interglaciaires, se forment d'épais dépôts de « *cap carbonates* » à croissance rapide, avec des cristaux géants d'aragonite, et des minéraux argileux en abondance.

Pour autant, le nombre cumulé de minéraux ne progresse pas.

4.5. Stade 10. La biominéralisation au Phanérozoïque

Ce stade, qui a débuté il y a environ 542 Ma, se caractérise par la biominéralisation généralisée dans les squelettes de calcite, aragonite, dolomite, hydroxylapatite, opale...

Plusieurs centaines de nouveaux minéraux, liés directement à la vie, font leur apparition ou sont produits en quantités beaucoup plus importantes.

Le stade 10 marque aussi l'avènement de la bioérosion : la colonisation par les plantes à partir du Silurien entraîne la production accrue de minéraux argileux - d'un ordre de grandeur - et la formation de sols.

Deux douzaines de ces minéraux se retrouvent dans le corps humain (calcite, aragonite, fluorapatite, gypse, magnétite, halite, sylvite, quartz, whewellite...).

4.6. Stade 10 bis. Minéraux anthropogènes

Par définition, un minéral est un corps solide, trouvé naturellement, formé par des processus géologiques, à structure cristalline... Les minéraux créés par l'homme constituent-ils une nouvelle étape de l'évolution minérale ?

R. Hazen a dénombré 208 minéraux reconnus par l'IMA et résultant principalement (voire exclusivement) des activités humaines. Par exemple, la rosièresite (phosphate de la mine de Carmaux), la ferrarisite (arséniate de la mine de Gabe Gottes en Alsace), l'yvonite (arséniate de la mine de Salsigne) n'ont pas d'occurrence naturelle connue.

À l'heure actuelle, l'IMA ne reconnaît plus de « nouveaux » minéraux issus exclusivement des activités humaines qui se déclinent selon trois sources principales :

- fabrication directe ;
- exploitation minière ;
- construction d'infrastructures (canalisations, forages).

3^e partie.

Les modes paragenétiques des minéraux

En 2022, Hazen et Morrison publient un article « *On the paragenetic modes of minerals : mineral evolution in perspective* » dans lequel ils précisent, approfondissent et parfois corrigent l'article de 2008.

1. Évolution de la chronologie entre 2008 et 2022

Le tableau ci-dessous compare les chronologies de l'évolution minérale entre l'article de 2008 et l'article publié 14 ans plus tard (tableau 1).

Dans l'article publié en 2022, Hazen et Morrison distinguent toujours 10 stades, plus un stade pré-terrestre. Les stades 3 (Évolution des roches magmatiques), 4 (Formation des granites) et 10 (Phanérozoïque) ont été subdivisés, compte tenu de leur forte contribution à l'accroissement de la diversité minérale. Le stade 3 distingue désormais croûte continentale et hydrosphère. Un stade 10b (Minéraux anthropogènes) est également individualisé.

L'amélioration des connaissances entre 2008 et 2022 a conduit à « resserrer » la chronologie des stades 3, 4 et 5 (5, Tectonique des plaques) : il en découle qu'une grande partie de la diversité minérale se serait établie plus tôt qu'estimé en 2008 (62,4 % dans les premiers 250 Ma).

Pour chaque stade, la chronologie de 2022 s'enrichit des modes paragenétiques des minéraux. Des estimations des nombres de minéraux relevant de chaque stade (et de chaque mode paragenétique associé audit stade) sont fournies, de même que les nombres de minéraux relevant uniquement de ce stade (et de chaque mode paragenétique associé audit stade).

Avant de présenter plus précisément chaque mode paragenétique, il est nécessaire d'en donner les caractéristiques générales.

2. Modes paragenétiques

Un mode paragenétique est un processus naturel par lequel un groupe d'atomes, sous forme solide et/ou fluide, est reconfiguré en une ou plusieurs nouvelles formes solides : condensation, évaporation, transformation de minéraux primaires en minéraux secondaires, biominéralisation...

À chaque stade sont donc associés un ou plusieurs modes paragénetiques : le stade 4a (Croûte continentale primitive) recèle à lui seul 15 modes (deux roches magmatiques, dix processus de surface, trois altération / métamorphisme de haute température) ; la phase 10a présente quatre modes paragénetiques associés...

Au total, 57 modes paragénetiques ont été recensés pour 5 659 minéraux (liste IMA - Mindat.org, juin 2021).

Chaque minéral est associé à au moins un mode paragénetique et chaque mode paragénetique s'applique à un groupe de minéraux qui partagent le même processus de formation.

59 % des minéraux (3 342) ont un seul mode paragénetique, 24 % (1 372) ont deux modes paragénetiques.

Albite, corindon, hématite, magnétite, calcite, hornblende, rutile, barytine, forstérite, ilménite, quartz,

sphalérite ont au moins 14 modes paragénetiques, tandis que la pyrite revendique même 21 modes paragénetiques.

Les environnements qui représentent un continuum de pression/température ont été regroupés (par exemple le métamorphisme régional à schistes verts et amphibolites) au sein d'un même mode paragénetique.

Les environnements qui représentent une séquence d'évolution ont été répartis en plusieurs modes paragénetiques (par exemple les roches ultramafiques et roches mafiques).

Notons enfin que la séquence des 57 modes paragénetiques - liste susceptible de connaître des évolutions au cours des prochaines années - reflète plus l'accumulation graduelle de processus de formation qu'un remplacement séquentiel des processus de formation.

Tableau 1. Comparaison des chronologies de l'évolution minérale entre 2008 et 2022.

Stade	Article Hazen 2008	Age (Ga)	Min. cum.	Article Hazen 2022	Age (Ga)	P.M. (*)	Min.	Min. Uni.
0	"Minéraux d'Ur" pré-terrestres	> 4,6	12	"Minéraux d'Ur" pré-terrestres	> 4,57	1-2	30	8
1	Minéraux primaires des chondrites	> 4,56	60	Phases nébulaires primaires	4,567 à 4,561	3-4	86	14
2	Altération et différenciation des planétésimaux	> 4,56 à 4,55	250	Altération et différenciation des planétésimaux	4,566 à 4,550	5-6	261	65
3	Evolution des roches magmatiques	4,55 à 4,0	350 à 500	3a - Croûte primitive de l'Hadéen	> 4,50	7-11	400	61
				3b - L'hydrosphère terrestre primitive	> 4,45	12-18	350	64
4	Formation des granites	4,0 à 3,5	1 000	4a - Croûte continentale primitive de la terre	> 4,4 - 3,0	19-33	2 385	1 031
				4b - Roches magmatiques hautement évoluées	> 3,0	34-37	1 476	662
5	Tectonique des plaques	>> 3,0	1 500	Initiation de la tectonique des plaques	< 4,3 - 2,5	38-43	458	56
6	Le monde biologique anoxique	3,9 à 2,5	1 500	Biosphère anoxique	< 4,0	44	11	0
7	Changements atmosphériques du Paléoprotozoïque	2,5 à 1,9	> 4 000	L'événement de la Grande Oxydation	< 2,4	45-47	2 328	1 298
8	L'océan intermédiaire	1,9 à 1,0	> 4 000	"L'océan intermédiaire"	1,9 - 0,9	-	0	0
9	Changements biogéochimiques du Néoprotozoïque	1,0 à 0,542	> 4 000	"La terre boule de neige"	0,9 - 0,6	-	0	0
10	Ere Phanérozoïque	0,542 au présent	4 300 +	10a - Oxygénation du Néoprot. / biosphère terrestre	< 0,6	48-53	597	72
				10b - Minéraux anthropogènes	< 10 Ka	54-57	603	11
	(*) P.M. Mode paragénetique	Liste IMA	4 300			Liste IMA	5 659	3 342

3. Présentation des modes paragénétiques des minéraux

Les tableaux 2 à 8 présentent, de manière synthétique, les 57 modes paragénétiques. Les colonnes « Min. » et « Seul PM » donnent respectivement le

nombre total de minéraux et le nombre de ceux qui ne se forment que selon le mode paragénétique indiqué.

Tableau 2. Stade pré-terrestre et stades 1 et 2.

Stade - Mode paragénétique (PM)	Date (Ga)	Min.	Seul PM	Commentaires
PM 1 à 6		296		97 minéraux connus uniquement des météorites
"Minéraux d'Ur" pré-terrestres	> 4,567	30	8	PM 1 à 6 : occurrences dans les météorites
1. Condensats de l'atmosphère stellaire		22	1	Identification par les "anomalies" isotopiques Grains de moissanite stellaire (SiC) datés 7 Ga
2. Condensats interstellaires		8	7	8 "glaces" C-H-O-N non reconnues par l'IMA (sauf glace H ₂ O)
Stade 1. Minéraux nébulaires primaires	4,567 - 4,561	86	14	
3. Condensats de la nébuleuse solaire	> 4,565	48	14	Minéraux des CAI, Agrégats d'Olivine Amiboïdes, <i>Ultra-Refractory Inclusions</i>
4. Minéraux primaires des chondres	4,566 - 4,561	47	0	Gouttelettes (< 0,1 cm) des chondrites
Stade 2. Différenciation et altération des planétésimaux	4,566 - 4,550	261	65	
5. Minéraux primaires des astéroïdes	4,566 - 4,560	94	21	Achondrites, sidérites et mixtes
6. Minéraux secondaires des astéroïdes	4,565 - 4,550	205	44	Altération aqueuse, thermique ou d'impact Emergence des sulfates, carbonates, hydroxydes, phyllosilicates (argiles)

Tableau 3. Stade 3. Croûte primitive de l'Hadéen et hydrosphère primitive.

Stade 3a. Croûte primitive de l'Hadéen	> 4,50	400	61	Oblitération par le choc de Théia (4,51 Ga)
7. Roches magmatiques ultra-mafiques intrusives et extrusives		123	10	Minéraux ferro-magnésiens des péridotites, pyroxénites et komatiites
8. Roches magmatiques mafiques		93	6	Plagioclases et pyroxènes des basaltes et gabbros (fusion partielle des roches ultra-mafiques) Basaltes de la croûte océanique et des LIPs
9. Minéraux des laves / xénolithes (basse pression, haute température)		127	8	Processus pyrométamorphique (typiquement faciès à sanidinite, cornéennes)
10. Minéraux des zéolites dans les basaltes		107	30	Zéolites formées dans les cavités des basaltes en cours de refroidissement
11. Minéraux des fumerolles volcaniques ; milieu réducteur (voir aussi 45)		36	7	Prédominance des sulfures de métaux de transition
Stade 3b. Hydrosphère primitive	> 4,45	350	64	Création de 350 minéraux par interaction roche-eau dans les milieux marin et terrestre
12. Dépôts de sulfures souterrains hydrothermaux de l'Hadéen (voir aussi 33)		129	48	Nombre de minéraux relativement faible (contre 850 actuels) car éléments faiblement concentrés dans les fluides hydrothermaux de l'Hadéen
13. Serpentinisation à l'Hadéen (altération aqueuse à basse température)		67	8	Dégradation des roches (ultra)mafiques en brucite (hydroxyde), serpentines (phyllosilicates), magnétite...
14. Minéraux des sources chaudes, geysers et environnements géothermiques		61	1	Peut-être la première occurrence terrestre de la calcite, la barytine
15. Fumeurs noirs / blancs et autres minéraux hydrothermaux du plancher		32	0	Sulfures des fumeurs noirs, carbonates des fumeurs blancs
16. Altération aqueuse à basse temp. des lithologies subaériennes de l'Hadéen (voir aussi 23)		83	3	Zéolites, minéraux d'argiles, silicates hydratés
17. Minéraux marins authigènes de l'Hadéen (voir aussi 24)		51	1	Zéolites et silicates hydratés authigènes (précipitations sur place dans un environnement sédimentaire)
18. Minéraux formés par le gel		4	3	Glace, hydrohalite (NaCl. 2H ₂ O), ikaite (CaCO ₃ .6H ₂ O)

Tableau 4. Stade 4. Croûte continentale primitive et roches magmatiques hautement évoluées.

Stade 4a. Croûte continentale primitive	> 4,4 - 3,0	2 385	1 031	Grains de zircon (ZrSiO ₄) datés 4,4 Ga
Roches magmatiques		160	17	
19. Roches granitiques intrusives		143	15	Exemple de PM se poursuivant de nos jours
20. Roches volcaniques acides (rhyolite, dacite...)		45	2	Présence de minéraux uniquement associés à la cendre (ex. quadridavyne, feldspathoïde)
Processus près de la surface		1 113	244	
21. Précipitation chimique de carbonates, phosphates, formations de fer		79	3	Sur les marges continentales et en environnement lacustre notamment
22. Hydratation et altération aqueuse souterraine à basse temp. (voir aussi 23)		247	85	Silicates, phosphates hydratés, > 50 minéraux altérés de manganèse
23. Altération aqueuse sub-aérienne à basse temp. par des fluides non sensibles à l'oxydo-réduction (voir aussi 47)		398	79	Silicates hydratés, carbonates, phosphates, borates... formés en milieu réducteur (comparer avec les 2000 minéraux du PM 47)
24. Minéraux authigènes dans les sédiments terrestres (voir aussi 17)		74	0	Silicates, carbonates, et phosphates communs
25. Evaporites (prébiotiques)		210	65	Halite et sylvite (KCl), puis sulfates, plus long pour borates et nitrates
26. Minéraux détritiques de l'Hadéen (≠ PM stricto sensu : accumulation de grains dans un environnement sédimentaire)		250	7	Alliages métalliques, carbures et chalcogénures pas (encore) découverts in situ, la plupart pouvant correspondre à d'autres PM
27. Décomposition radioactive, auto-oxydation		9	0	U ⁴⁺ (uraninite UO ₂) oxydé en U ⁶⁺
28. Photo-altération, prébiotique		10	0	Minéraux secondaires formés par exposition aux UV (absence de couche d'ozone)
29. Minéraux générés par la foudre		7	0	Production de fulgurites par la foudre
30. Minéraux des impacts terrestres		16	5	Coesite, stishovite et chaoite (SiO ₂), diamant, riesite et akaogiite (TiO ₂)
Altération et / ou métamorphisme de haute température		1 505	770	
31. Carbonates, phosphates et formations de fer thermiquement altérés		356	89	
32. Dépôts de Ba / Mn / Pb / Zn, y compris métamorphiques		412	185	Mine de manganèse de Wessel (Afrique du Sud)
33. Minéraux déposés par les fluides hydrothermaux riches en métaux (voir aussi 12)		797	496	Sulfures, arséniures, séléniures, antimoniures et sulfosels, souvent économiquement importants
Stade 4b. Roches magmatiques hautement évoluées	> 3,0	1 476	662	
34. Pegmatites complexes des granites		564	238	
35. Roches magmatiques ultra-alkalines et agpaïtiques (riches en Na ₂ O)		726	377	
36. Carbonatites, kimberlites et roches magmatiques apparentées		291	40	Douzaines de carbonates et phosphates rares Carbonatite Tupertalik du Groenland (3,01 Ga) Gregoryite et nyerereite de l'Oï Doinyo Lengai (laves de faible viscosité)
37. Intrusions magmatiques stratifiées et minéraux associés du groupe du platine (Ru, Rh, Pd, Re, Os, Ir)		135	7	Plus de cent minéraux du groupe du platine, oxydes de fer, chrome, titane

Tableau 5. Stades 5 et 6.

Stade 5. Initiation de la tectonique des plaques	< 4,3 - 2,5	458	56	Minéralisation associée aux orogénèses Exposition aérienne de lithologies haute P/T précédemment cachées
38. Ophiolites (zones d'obduction)		108	7	Séquences de roches (ultra)mafiques de la lithosphère océanique profonde, très altérées
39. Métamorphisme de haute pression (faciès à schistes bleus, éclogites, d'ultra haute pression)		70	12	Schistes bleus : glaucophane, jadéite, lawsonite Eclogites : omphacite, pyrope UHP : coesite
40. Métamorphisme régional (faciès à schistes verts, amphibolite, granulite)		319	36	Schistes verts : chlorite, serpentine, épidote Amphibolite : amphibole, plagioclases Granulite : pyroxènes, plagioclases

Tableau 5 (suite).

Stade 5. Initiation de la tectonique des plaques	< 4,3 - 2,5	458	56	Minéralisation associée aux orogénèses Exposition aérienne de lithologies haute P/T précédemment cachées
41. Métasomatisme du manteau		16	1	Altération de la chimie des minéraux ultramafiques existants
42. Nodules de manganèse et fer (oxydes / hydroxydes) des fonds océaniques		15	0	Si nodules authigènes, PM 17 Si minéralisation microbienne / précipitation dans milieu oxygène, alors stades 6 ou 7 Si métaux libérés et reprécipités, issus de roches ultramafiques ou de cheminées hydrothermales, alors stades 3 ou 4 Provisoirement stade 5 : accroissement de la libération de Mn au niveau des dorsales
43. Minéraux de cisaillement (y compris mylonite / miroirs de faille)		9	0	Oxydes et silicates communs, recristallisés après cisaillement
Stade 6. Biosphère anoxique	< 4,0	11	0	Stromatolites carbonatés microbiens dès 3,5 Ga (craton de Pilbara, Australie)
44. Minéraux anoxiques liés à des micro-organismes (voir aussi 49)		11	0	Minéraux communs ayant plus de 5 PM Calcite, dolomite, sidérite

Tableau 6. Stade 7. Événement de la Grande Oxydation.

Stade 7. Événement de la Grande Oxydation	< 2,4	2 328	1 298	Incertitudes sur (1) le timing et (2) l'extension des processus abiotiques ayant produit des espèces minérales relativement oxydées
45. Minéraux oxydés des fumerolles (voir aussi 11)		424	168	Au total plus de 450 minéraux sont issus de fumerolles
a. Sulfates, arséniates, sélénates, antimoniates		253	116	
b. Autres minéraux oxydés des fumerolles		276	108	Carbonates, borates, nitrates, phosphates Minéraux incorporant des métaux de transition
46. Altération hydrothermale à basse température de minéraux près de la surface (voir aussi 22)		52	11	Sulfates et arséniates
47. Hydratation oxydative subaérienne à basse température, érosion (voir aussi 16 et 23) [47a à 47i = même PM]		1 998	1 119	1998 minéraux secondaires (35% des minéraux) 1119 avec ce seul PM (20% des minéraux)
a. Hydratation près de la surface de minéraux antérieurs		1 649	956	
b. Sulfates (SO ₄) ²⁻ et sulfites (SO ₃) ²⁻		409	185	185 / 409 = 45%
c. Carbonates, phosphates, borates, nitrates		577	338	
d. Arséniates, antimoniates, sélénates, bismuthinates		505	361	
e. Vanadates, chromates, manganates		372	229	
f. Minéraux à uranyle (U ⁶⁺)		236	173	173 / 236 = 73%
g. Minéraux d'érosion de surface portant un halogène		236	121	121 / 236 = 51%
h. Minéraux près de la surface oxydés, déshydratés		316	176	
i. Altération terrestre de météorites		28	10	10 minéraux de fer, nickel ou chrome connus uniquement de l'altération de météorites

Tableau 7. Stades 8 et 9.

Stade 8. "L'Océan intermédiaire"	1,9 - 0,9	0	0	pas de nouveau PM ("Boring Billion")
Stade 9. "La Terre Boule de neige"	0,9 - 0,6	0	0	pas de nouveau PM

Tableau 8. Stade 10. Oxygénation du Néoprotérozoïque / biosphère terrestre et minéraux anthropogènes.

Stade 10a. Oxygénation du Néoprotérozoïque / biosphère terrestre	< 0,6	597	72	
48. Minéraux de la zone de lessivage du sol	< 0,6	71	4	Systèmes racinaires (avec mycorhizes) Abondante production d'argiles (x 10) Minéraux d'Al hydratés (latérites, bauxites)
49. Biominéralisation cellulaire oxygène (voir aussi 44)	< 0,54	77	1	Hydroxyl/fluorapatite, calcite / aragonite, silice Seul PM de l'hazenite (phosphate sécrété par les microbes du lac Mono en Californie)
50. Minéraux de la houille et des schistes bitumineux	< 0,36	273	4	Hydrocarbures cristallisés Minéraux ammoniacés
51. Minéraux pyrométamorphiques (basse pression et haute température) (voir aussi 54 et 56)	< 0,36	128	32	Formation d'Hatrum (Israël et Jordanie) : sédiments soumis à des températures > 1000°C, formation de minéraux surtout avec Ca ²⁺ (hatrumite)
52. Minéraux dérivés du guano et de l'urine	< 0,4	72	17	Urine / guano des oiseaux / chauves-souris des caves et environnements arides Spheniscite formée par réaction de l'urine de pingouin sur des phyllosilicates (PM 47c aussi)
53. Autres minéraux d'origine taphonomique	< 0,4	117	14	Décomposition et / ou fossilisation du bois ou de plantes. Oxalates, acétates
Stade 10b. Minéraux anthropogènes	< 10 Ka	603	11	Peu de minéraux ayant ce seul PM
54. Minéraux des feux de charbon et autres mines (basse pression et haute température) (voir aussi 51 et 56)		234	6	Formés aussi par pyrométamorphisme (PM 51) et par fumerolles (PM 11 et 45) pour 228 d'entre eux Seul PM de la freitalite (C ₁₄ H ₁₀) et l'acétamide
55. Minéraux de mine anthropogènes		264	5	
56. Minéraux de scories et de fonte (basse pression et haute température) (voir aussi 51 et 55)		143	0	Forme de pyrométamorphisme
57. Autres minéraux formés par les activités humaines		49	0	Corrosion du bronze, du plomb (batteries), précipitation de minéraux des canalisations géothermiques, altération de carottes de laboratoire, sous-produits d'engrais...

Conclusions générales

L'évolution minérale replace la minéralogie dans un contexte historique : dix stades d'évolution des minéraux (plus un stade pré-terrestre) peuvent être distingués avec 57 modes paragénétiques associés.

Bien qu'une majorité de minéraux ne se forment que selon un seul mode paragénétique, beaucoup de minéraux courants présentent, au contraire, un grand nombre de modes paragénétiques.

Le cycle hydrologique joue un rôle-clé dans la diversité minérale. Plus de 81 % des minéraux découlent des interactions eau - roche soit par :

- incorporation de OH⁻ ou H₂O (3 150 minéraux) ;
- déshydratation, évaporation ou précipitation (1 433 minéraux).

Près de la moitié des minéraux (2 707 minéraux, soit 48 %) résultent de processus biologiques et plus du tiers (34 %) de manière exclusive.

Une quarantaine d'éléments rares, dont la concentration n'excède pas 5 ppm dans la croûte, sont à l'origine de 2 400 minéraux (42 %), sous l'action de mécanismes de concentration d'ions métalliques par des anions. Il s'agit notamment des chalcogénures (As,

Sb, Se, Te), des métaux de transition (Cd, Mo, Sn), des éléments du groupe du platine (Pt, Ru, Rh, Ir, Os, Pd) et des terres rares (lanthanides, Sc, Y).

Bibliographie

Bowen, N.L., 1928. The evolution of the igneous rocks. Princeton University Press, New Jersey, 332 pages.

Hazen R.M., Papineau D., Bleeker W. *et al.*, 2008. Mineral evolution. *American Mineralogist*, 63, p. 1693-1720. Article séminal très dense.

Évolution minérale, Wikipédia, août 2023. Résumé en français de l'article séminal de 2008.

https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89volution_min%C3%A9rale.

Hazen R.M. et Ferry J.M., 2010. Mineral evolution : mineralogy in the fourth dimension. *Elements*, 6, p. 9-12.

<https://www.elementsmagazine.org/mineral-evolution-mineralogy-in-the-fourth-dimension/>.

Hazen R.M., Grew E.S. Origlieri M.J. et Downs R.T., 2017. On the mineralogy of the « Anthropocene epoch ». *American Mineralogist*, 102, p. 595-611.

https://www.geo.arizona.edu/xtal/group/pdf/AM102_5_95.pdf.

Hazen R.M. et Morrison S.M., 2022. On the paragenetic modes of minerals : a mineral evolution perspective. *American Mineralogist*, 107, p. 1262-1287. Article détaillant les 57 modes paragénétiques (repris par ailleurs sur le site mindat.org).

<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230000674/downloads/am-2022-8099.pdf>.

Rubin A.E. et Ma C., 2021. Meteorite mineralogy. Cambridge University Press, 418 pages.

Voir aussi :

Minéraux : www.mindat.org.

Météorites : www.lpi.usra.edu/meteor/.

Après les Journées Alfred Lacroix

18 et 19 septembre 2024

Ces journées scientifiques, organisées par le Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN), la Société française de Minéralogie et de Cristallographie (SFMC), la Société géologique de France (SGF) et le Comité français d'Histoire de la Géologie (COFRHIGEO), se sont déroulées dans l'auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution au Muséum national d'Histoire naturelle.

Dans *Saga Information* de septembre, nous n'avions pas pu donner le programme de ces deux journées car il n'était pas encore finalisé. Pour celles et ceux qui n'ont pas pu suivre ces journées, une deuxième chance est offerte.

- Il est possible de consulter le volume des résumés à la bibliothèque de la SAGA, des résumés très étoffés (plusieurs pages pour certains d'entre eux).

- Par ailleurs, il est possible de retrouver l'enregistrement vidéo des communications sur la page dédiée à l'événement (site de l'Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie) :

<https://impmc.sorbonne-universite.fr/fr/evenements/manifestations/journees-alfred-lacroix-museum-national-d-histoire-naturelle-18-19-septembre-2024.html> ou sur la chaîne :

<https://www.youtube.com/channel/UCR-MNx7D3tuVxMP9UqyvWAg>.

Les journées étaient subdivisées en six sessions.

Session 1 : Alfred Lacroix, l'illustre Savant. Modérateur J.-P. Lorand.

Session 2 : Alfred Lacroix, le Muséum, les collections. Modérateur C. Chopin.

Session 3 : 100 ans après Alfred Lacroix, la minéralogie aujourd'hui. Modérateur : C. Ferraris.

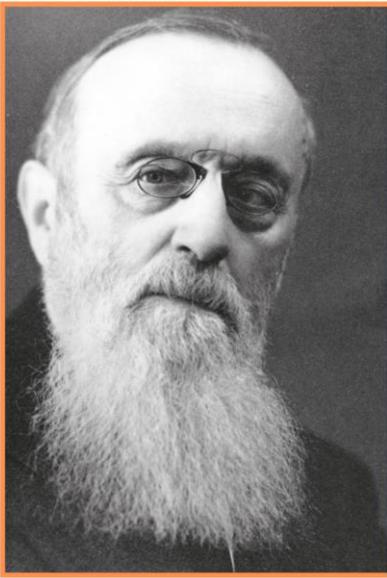
Session 4 : Alfred Lacroix, géologue puis volcanologue. Modérateur M. Guiraud.

Session 5 : Alfred Lacroix, pétrographe ou pétrologue ? Modérateur G. Godard.

Session 6 : Alfred Lacroix en dehors du monde académique. Modérateur P.-J. Chiappero.

Le 18 septembre, en fin de journée, les participants ont pu profiter d'une visite du laboratoire d'Alfred Lacroix, au 61 rue Buffon, MNHN.

JOURNÉES ALFRED LACROIX



18 & 19
SEPTEMBRE 2024

AUDITORIUM DE LA
GRANDE GALERIE DE
L'ÉVOLUTION

MUSÉUM NATIONAL
D'HISTOIRE NATURELLE

36 RUE GEOFFROY
SAINT HILAIRE, 75005
PARIS



VOLUME DES RÉSUMÉS

Comité d'organisation : J.-P. Lorand, M. Guiraud, C. Ferraris, G. Godard, C. Chopin.

