PIERRE BERTHIER ET LA BAUXITE

Michel Gastou, membre de la SAGA.

Préambule

L'aluminium n'est pas un métal comme les autres (fer, cuivre, argent, etc.). Il n'a été découvert que très récemment, au cours du XIX[e] siècle, mais depuis le début du XX[e] siècle sa consommation n'a cessé de croître**.** Il est issu d'une roche, sédimentaire ou résiduelle, appelée bauxite.

Cette roche a été découverte depuis bien longtemps, mais son identification chimique n'a été faite qu'en 1821, il y a donc 200 ans, par Pierre Berthier**,** à partir d'échantillons qu'il avait reçus et correspondant à une roche sédimentaire des Alpilles, en Provence, provenant d'un lieu appelé « Colline des Beaux ». Il nomma cette roche « *terre d'alumine des Beaux* », dans un article publié dans le journal de l'École des mines (Berthier, 1821) (voir paragraphe « La bauxite » ci-dessous). Le terme actuel de *bauxite* est donné 40 ans plus tard en 1861, par Henri Sainte-Claire Deville qui corrige le nom *beauxite,* donné en 1844 par Armand Dufrenoy.

La bauxite est riche en minéraux d'aluminium, difficiles à extraire pour produire du métal. En 1825, le chimiste et physicien danois Hans Christian Orsted réussit à produire une forme impure du métal. En 1827, Friedrich Wöhler approfondit les travaux d'Orsted. Il isole l'aluminium par action du potassium sur le chlorure d'aluminium, obtenant une poussière grise d'aluminium (voir plus loin la figure 13). Il est le premier à mettre en évidence les propriétés chimiques et physiques de cet élément, dont la plus notable est la légèreté.

En 1854, Henri Sainte-Claire Deville, soutenu dans ses recherches par Napoléon III, parvient à produire de l'aluminium à partir de l'alumine (oxyde d'aluminium). En 1886 le « procédé Hall-Héroult » permet la production de l'aluminium par électrolyse (figure 1) mais ce n'est qu'en 1887, soit 66 ans après l'identification, que le chimiste autrichien, Karl-Josef Bayer, met au point le « procédé Bayer » d'extraction de l'alumine totale (86 %), toujours utilisé et constamment amélioré.

La première usine électro-métallurgique française s'installe à Froges (Isère) en 1887. En 1893, l'usine de Gardanne est créée par Péchiney pour exploiter la bauxite par le procédé Bayer.

Depuis novembre 2012, le site de Gardanne est détenu par le groupe Alteo. Avec ses 128 années d'activités, le site constitue la plus ancienne usine du monde.

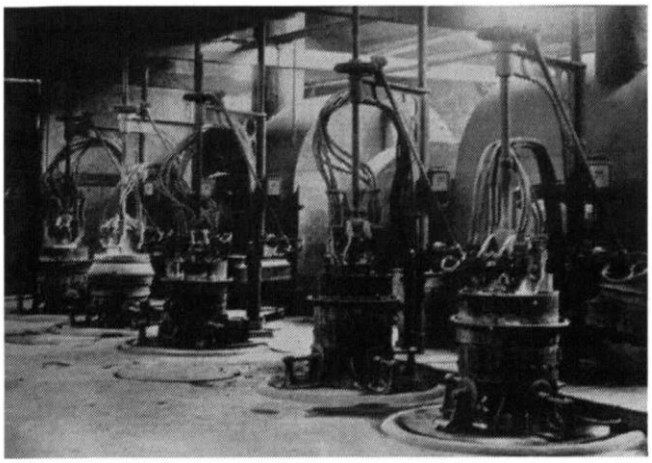

Figure 1. Atelier de la Société électrométallurgique de Froges, vers 1889. Il comporte six cuves que l'on faisait tourner pour casser les croûtes du bain et faciliter la dissolution de l'alumine. © Institut pour l'Histoire de l'aluminium.

Il y a deux cents ans que de l'hydrate d'alumine mélangé à de l'oxyde rouge de fer est identifié et a permis, il y a 167 ans, de découvrir, par extraction à partir de la bauxite, ce qui deviendra le métal actuellement le plus utilisé : *l'aluminium métallique.*

En 2021, Pierre Berthier, ce découvreur, minéralogiste et chimiste peu connu mais de grand talent, est « ressuscité » par l'Institut de France pour ce 200[e] anniversaire.

Richard Tremblier, notre Président et animateur de la Commission de minéralogie, a souhaité que la SAGA aussi lui rende hommage dans *Saga information*. C'est le but de cet article qui, en plus, tentera de faire un exposé succinct, pour des raisons éditoriales, de ce que sont la bauxite et l'aluminium.

Pierre Berthier

Pierre Berthier (figure 2), l'acteur principal de la découverte, est né en 1782 à Nemours. Il fut élève du collège de cette ville. Puis, après avoir suivi les cours de l'École polytechnique entre 1798 et 1801 (il fit partie de l'Association polytechnicienne), fut admis en 1801 à l'École des mines de Paris, où il reçut, en 1805, le diplôme d'ingénieur et fut nommé professeur en 1816 et chef du laboratoire. En 1827, avant d'être au sommet de sa carrière, il est élu membre de l'Académie des sciences. Le 28 novembre 1828, il fut nommé chevalier de la Légion d'honneur et promu, le 10 janvier 1835, au grade d'officier du même ordre. En 1836 il est nommé inspecteur général des mines, et en 1859 reçoit la grande médaille d'or, à l'effigie d'Olivier de Serres, de la Société impériale d'agriculture.

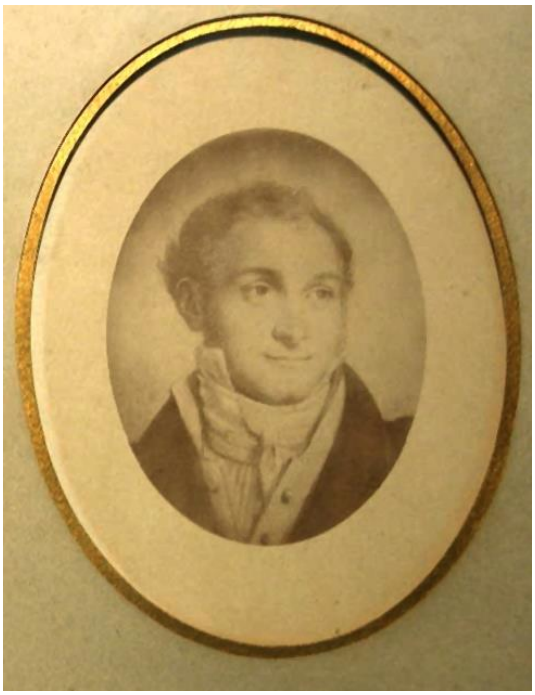

Figure 2. Pierre Berthier (1782-1861). D'après mindat.org, photo domaine public.

Berthier était d'une taille un peu inférieure à la moyenne. Il jouissait d'une excellente constitution et parvint à l'âge de soixante-seize ans sans aucune infirmité. Les traces de la petite vérole, dont sa figure était couverte, contribuaient peut-être encore à en augmenter l'expression naturellement spirituelle et parfois railleuse.

Son activité professionnelle fut brusquement interrompue en 1858 par un accident de la circulation qui le laissa paralysé. Depuis lors, il ne quitta plus son appartement et dut renoncer à ses recherches. Il mourut, le 24 août 1861, en son domicile dans le 6e arrondissement de Paris. Son nom est inscrit sur la tour Eiffel.

Ses travaux scientifiques

Les travaux scientifiques de Berthier couvrent la minéralogie (en particulier les minéraux argileux et le fer), la métallurgie, la géologie, la gîtologie (la gîtologie est la science qui étudie les gisements de minerais exploitables), la chimie ainsi que l'enseignement pratique.

En dehors de son « *Traité des essais par la voie sèche* », couronnement de son enseignement, il donne une série d'analyses dans les *Annales des mines*. Grand savant, à qui nous devons la découverte de la bauxite (figure 3), il est à l'origine de grands progrès dans la minéralogie et la géologie. Ses analyses portent sur les eaux minérales et les phosphates minéraux, qui en font un précurseur dans l'indication des niveaux phosphatés du Gault (Crétacé inférieur) et d'autres horizons géologiques. Ses analyses sur les cendres des végétaux et les terres végétales éclairent les problèmes fondamentaux de l'agriculture rationnelle.

Figure 3. Bauxite et plaque commémorative, à l'entrée de l'office du tourisme des Baux-de-Provence (Bouches-du-Rhône). Source : BlueBreezeWiki CC BY-SA 3.0.

La présentation des travaux scientifiques de Berthier qui suit est largement inspirée de la notice publiée par Daubrée, dans les *Annales des mines* en 1869. Pour donner une idée, sommaire, des découvertes aussi nombreuses et diverses que celles dont la science et l'industrie sont redevables à Berthier, le sujet a été partagé en sept parties : minéralogie ; géologie ; cendres

des végétaux et terre végétale ; phosphates et diffusion du phosphore ; minéralurgie ; chimie ; publications d'ensemble.

Minéralogie

Ce sont les minéraux utiles, métalliques ou pierreux, qui ont toujours le plus particulièrement attiré son attention.

Il serait trop long d'examiner tout ce que nous ont appris ses nombreux travaux sur les minerais de cuivre notamment ceux du Chili, sur les minerais d'argent, en particulier ceux du Mexique, sur les minerais de nickel. On ne peut lire ses études sans y trouver des documents précieux, tant pour la connaissance minéralogique des minerais que pour leur traitement.

Géologie

Ses travaux ne sont pas seulement minéralogiques, ils ont fourni une foule de documents sur le mode de formation des substances minérales et, par conséquent, sur la géologie générale : on en trouve des preuves dans les observations, dont Berthier accompagne souvent l'exposé de ses expériences. Il s'intéressait à cette science et fut membre, depuis sa fondation, de la Société géologique de France.

La géologie trouvait aussi un enseignement des plus utiles, et alors tout nouveau, dans ses études sur la synthèse des minéraux et de l'eau. Des chercheurs montraient tout l'intérêt que l'étude des sources minérales présente, du point de vue de la géologie, mais également pour la thérapeutique. Berthier s'y livra lui aussi.

Il analysa l'eau de Salins-les-Bains (Jura), dans le but d'apprécier les procédés suivis pour l'extraction du sel, et d'y chercher des perfectionnements.

Après avoir fait connaître la composition de l'eau minérale de Chaudes-Aigues (Cantal), la plus chaude de la France, Berthier étudia, conjointement avec son collègue Puvis, celle de Vichy, dont l'examen chimique fut pour lui l'occasion de considérations géologiques.

L'analyse des sources thermales de Bourbon-Lancy révéla, pour la première fois, dans les eaux minérales de la France la présence de la potasse, dont Berzelius avait démontré l'existence en d'autres localités.

La source saline de Soultz-Sous-Forêts (Bas-Rhin) présente cette particularité remarquable de jaillir, non du Trias, mais de couches tertiaires, qui renferment en même temps des gîtes de pétrole. Elle est aussi caractérisée, au point de vue chimique, comme l'a montré Berthier, par l'abondance du brome, en même temps que par l'absence de sulfates. Il en est de même des sources de Creutznach (Hesse-Darmstadt) qui sortent également dans des conditions spéciales, en relation avec le porphyre quartzifère.

Cendres des végétaux et terre végétale

Berthier, qui abordait toujours les questions d'une manière complète, avait été d'abord amené, par ses recherches sur la minéralurgie (ci-après), à s'occuper de la composition des cendres d'un grand nombre de bois. La connaissance de cette composition est en effet d'un puissant secours lorsqu'on veut remonter à toutes les influences qui peuvent agir dans les opérations métallurgiques, où l'on brûle de grandes quantités de combustibles, comme dans la fabrication de la fonte.

Mais il est encore un tout autre point de vue, auquel ses études présentent un intérêt majeur, car elles éclairent les relations qui existent entre les éléments inorganiques des végétaux et le sol qui les supporte. C'est ainsi qu'à l'époque elles ont apporté un tribut important à la physiologie et à l'agriculture, qu'elles rattachent à la chimie et à la géologie.

En 1859, la Société impériale et centrale d'Agriculture de France voulut proclamer, de la manière la plus éclatante, l'importance qu'elle attachait aux travaux de Berthier sur les cendres des végétaux, en même temps qu'aux découvertes de phosphates que ce savant avait faites, il y avait déjà quarante ans. La grande médaille d'or, à l'effigie d'Olivier de Serres, lui fut décernée (figure 4).

Figure 4. Médaille d'or, à l'effigie d'Olivier de Serres. Source : Internet.

En outre, l'assemblée décida que l'état de santé de Berthier l'empêchant de venir recevoir lui-même cette distinction, le président, qui était alors M. Chevreul, irait, à la tête d'une députation, la lui porter à son domicile. Berthier reçut cet hommage avec plaisir et reconnaissance.

Phosphates et diffusion du phosphore

Il a encore rendu à l'agriculture, en même temps qu'à la géologie, des services très considérables par les découvertes successives de l'acide phosphorique dans le règne minéral, qu'il fit d'une manière si inattendue, preuve de l'esprit très ouvert qui le dirigeait dans ses recherches et de la rare sagacité avec laquelle il choisissait son sujet et savait le poursuivre. Le premier, il montra que la chaux phosphatée constitue dans les terrains stratifiés des gisements abondants en rognons isolés.

Minéralurgie

On vient de voir ce que Berthier a apporté dans la connaissance des substances minérales de toutes sortes, mais les procédés qui servent à élaborer ces substances, pour les approprier aux besoins de la société, et que l'on groupe ordinairement sous le nom de **minéralurgie**, ne sont pas moins redevables aux découvertes de ce savant éminent. Comme l'a dit très justement Arago, *« il n'est peut-être pas d'opération métallurgique que les nombreux travaux de M. Berthier n'aient contribué à expliquer ou à perfectionner »*.

Les combustibles, sur lesquels reposent presque tous les traitements de minerais, ont fixé d'une manière toute spéciale l'attention de Berthier, qui a fait de nombreuses études sur leur composition chimique. Le procédé si simple et si pratique qu'il a imaginé, pour déterminer leur pouvoir calorifique, est devenu d'un emploi général et a rendu les plus grands services.

Chimie

Ses premiers travaux portent principalement sur les études chimiques des sulfates, chlorures et phosphates qu'il publia en 1807. Il a aussi imaginé divers procédés de séparation ou de dosage, de détermination du pouvoir calorifique des combustibles.

Plusieurs de ces travaux se distinguent par leur simplicité ou par leur élégance. Nous ne les citerons pas, mais ce qui caractérise les méthodes de Berthier, ce n'est pas la délicatesse, ni la rigueur, mais surtout la simplicité et la rapidité. Elles s'adressent spécialement aux ingénieurs et aux industriels et ont l'avantage de pouvoir être employées partout, même dans les pays les plus reculés, de préférence à des méthodes qui seraient plus exactes, mais aussi plus compliquées.

Publications d'ensemble

Il a couronné la publication de ses nombreux mémoires, parsemés de tant de découvertes, par un ouvrage d'ensemble, le *Traité des essais par la voie sèche* (1834).

L'art de reconnaître, par cette voie, la présence et la proportion d'un ou de plusieurs corps utiles ne présente pas seulement des avantages par la rapidité des procédés, mais aussi à cause de leur extrême analogie avec ceux de la métallurgie des ateliers, dont ils éclairent, à peu de frais, certaines opérations.

Le grand travail de Berthier, avant tout remarquable par la richesse des faits qu'il contient, ne l'est pas moins par l'ordre dans lequel ils sont groupés, ainsi que par la concision avec laquelle ils sont exposés. Quand on parcourt ses publications, on remarque, d'abord, la forme extrêmement concise et nette sous laquelle les faits sont partout présentés.

Les découvertes dont il vient d'être rendu compte, de façon très succincte, montrent combien Berthier excellait comme homme de science.

Ce qui rehausse encore son mérite, c'est qu'il avait toujours eu une anomalie de la vision pour voir de près, ce qui est pourtant si utile au chimiste. Aussi, quand on le voyait à l'œuvre, s'étonnait-on qu'il lui fût possible d'arriver à une exactitude irréprochable, d'autant qu'il ne disposait pas des procédés rapides et puissants d'expérimentation que l'on connaissait de son temps. Son laboratoire s'est toujours fait remarquer par une simplicité primitive.

Il faut ajouter qu'il n'était pas accompagné dans les opérations, longues et fastidieuses, qu'entraînent certaines recherches. Il travaillait constamment seul, et restait dans son laboratoire, chaque jour, jusqu'à une heure avancée. Son habileté, ses habitudes laborieuses et sa persévérance expliquent comment il a pu être aussi fécond. On peut encore remarquer que, pendant la plus grande partie de sa vie, Berthier vivait dans l'isolement, sans tirer parti des ressources qu'aurait pu lui offrir la fréquentation d'autres savants.

On a vu les services considérables et variés que Berthier a rendus à la minéralogie, aux industries minéralurgiques, à la chimie et à l'agriculture, par ses découvertes personnelles. Il a bien mérité aussi, en propageant la science, par les cours si complets qu'il a professés et par l'enseignement pratique qu'il donnait avec tant de soin et de dévouement, dans le laboratoire de l'École des mines. Les élèves français et étrangers qu'il a ainsi formés pendant plus de trente années ont appliqué, depuis lors, les connaissances qu'ils lui devaient dans les contrées les plus diverses. Le bien qu'il a ainsi produit ne saurait être trop apprécié. Partout, au loin comme en France, il a porté avec éclat la renommée de l'École des mines.

Mais comme rien n'est parfait, il faut le reconnaître, Berthier était un homme peu sociable à qui l'on a souvent reproché des formes cassantes et brusques, et même un abord presque bourru. Mais, comme il arrive

souvent, sous cette âpreté extérieure, il cachait des qualités d'esprit et de cœur, qu'on ne manquait pas d'apprécier dans son intimité. Sa conversation était pleine d'intérêt, de piquant et souvent de charme.

La berthiérite

La **berthiérite** est une espèce minérale de la catégorie des sulfosels, de formule $FeSb_2S_4$, qui fut découverte en France, en 1827. Elle fut ainsi nommée en l'honneur de Pierre Berthier.

Sa localité type se situe à Chazelles, district de Brioude, Haute-Loire, en région Auvergne-Rhône-Alpes.

Berthiérite (cristaux de 5 à 6 cm), mine Les Biards, Glandon, Limoges, Haute-Vienne, France.
© Luigi Mattei. Source : https://www.mindat.org/min-640.html.

La bauxite

En 1821, dans les *Annales des mines*, Pierre Berthier (1782-1861) décrit ainsi sa découverte :

« *Il existe auprès d'Arles, sur une colline qui porte le nom de colline des Beaux, et tout-à-fait à la superficie du sol, un dépôt considérable de minerai de fer, semblable par son aspect et par son gisement aux minerais de fer dits d'alluvions […] en ayant envoyé quelques échantillons au laboratoire de l'École pour faire constater sa richesse, je l'ai examiné et j'ai trouvé qu'il était composé* ***d'hydrate d'alumine, mélangé d'oxyde rouge de fer****. L'hydrate d'alumine n'ayant pas encore, que je sache, été trouvé en Europe, je crois devoir rapporter les expériences qui m'ont conduit à reconnaître son existence dans le minerai des Beaux ».*

Il avait reçu en 1820 des échantillons de « minerai de fer », recueillis par G. Mollien dans la montagne du Fouta-Djalon (actuellement en République de Guinée). Il avait distingué deux types parmi les échantillons : le premier très riche en fer ; le deuxième enrichi en alumine et en fer. Sa description macroscopique minutieuse des échantillons lui permit de conclure que le premier type représentait une cuirasse latéritique ferrugineuse et que le deuxième type était une bauxite latéritique ferrugineuse, typique pour la région de la Guinée. Il avait conclu que ce minerai était un mélange d'oxydes et d'hydrates de fer ferrique, d'hydrate d'aluminium avec un peu d'argile, conclusion complètement confirmée par les recherches récentes.

Une année plus tard, en 1821, Berthier reçut des échantillons d'un certain M. Blavier, qui les considérait comme un minerai de fer potentiel qu'il espérait pouvoir fondre dans un haut fourneau. Les échantillons provenaient des Alpilles, en Provence, d'un lieu portant le nom de « *Colline des Beaux* ». Berthier a très justement reconnu que les échantillons étaient chargés de « chaux carbonatée » **et qu'il s'agissait d'une imprégnation ultérieure.** Ainsi, après avoir éliminé ces carbonates par l'acide acétique, il a étudié le résidu en détail. L'analyse chimique a montré la composition suivante : Al_2O_5 52 % ; SiO_2 non déterminé ; Fe_2O_5 27,6 % ; H_2O 20,4 % ; Cr trace ; total : 100 %. Berthier reconnut que les échantillons provenant du Fouta-Djalon et des Alpilles avaient la même composition chimique et minéralogique. Il constata que les échantillons constituaient un mélange

d'aluminium hydraté et d'oxyde de fer, **ce qui était une vraie découverte mondiale** !

N'étant pas géologue, Berthier n'a pas essayé d'expliquer l'origine de ces matériaux, il notait seulement qu'aux Beaux le dépôt est « *semblable par son aspect et par son gisement aux minerais de fer dits d'alluvion* ». Soulignons que Dufrenoy, dans son *Traité de minéralogie* (1845), a nettement reconnu que la bauxite « *ne peut être regardée comme une espèce minérale* ». En dépit de cela, Hausmann, dans son *Handbuch der Mineralogie* (1847), se référant à l'article de Berthier, considère la matière, sans appellation, comme un nouveau minéral. La même idée fut reprise par Dana, dans la 6e édition de son *System of Mineralogy* (1892) où il considéra la bauxite comme un minéral, ayant la composition $Al_2O_5.2\ H_2O$.

De nos jours, il est bien connu qu'un tel minéral n'existe pas et que **la bauxite est vraiment une roche**, comme le disait déjà Berthier. Mais Dana (1892), Groth (1898) et Zirkel (1907) continuèrent à considérer, à tort, la bauxite comme un minéral ; c'est un bel exemple de la longévité d'une erreur minéralogique (Bardossy, 1997).

La bauxite ne pouvant être considérée comme une espèce minérale (Dufrenoy 1845), le problème de son origine continua de se poser avec âpreté.

Il faut remarquer que l'on rencontre cette roche sous trois colorations :

• la **bauxite blanche** (figure 5) est la plus riche en alumine : de 55 à 75 % d'Al $(OH)_3$ et de 1 à 3 % de Fe $(OH)_3$.

Figure 5. Bauxite blanche du Var.
Source : www.les-mineraux.fr.

Elle trouve son emploi dans les industries du verre et de la porcelaine, en papeterie, en tannerie et dans l'industrie textile ;

• **la bauxite grise**, plus riche en silice, trouve notamment son emploi dans les fonderies pour la confection des moules en sable ;

• **la bauxite rouge**, colorée par des oxydes de fer (dont l'hématite), est celle qui nous concerne dans cet article.

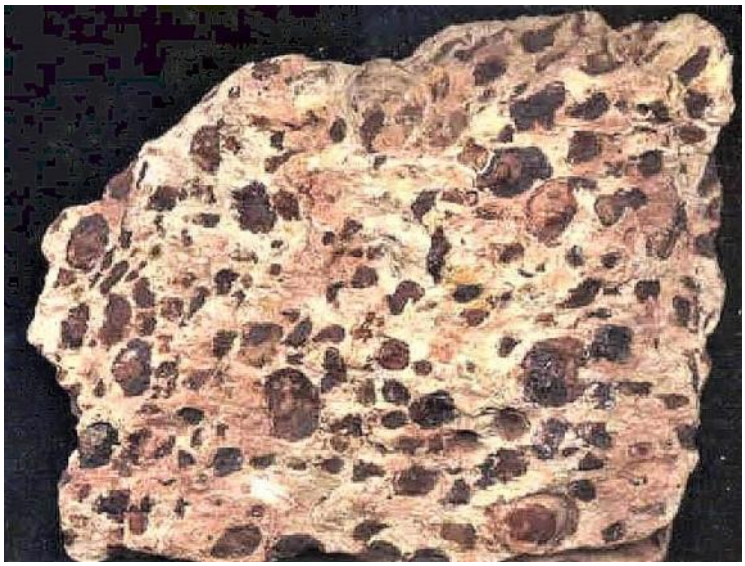

Figure 6. Bauxite de Carlencac dans l'Hérault.
Photo M. Gastou.

Hypothèse geysérienne

Lors de la réunion, en 1868, de la Société géologique de France en Languedoc, Henri Coquand, grand connaisseur du pourtour de la Méditerranée, proposa de voir dans les bauxites le résultat de l'action de geysers. Cette idée fut acceptée par les participants à la réunion.

Par la suite, Coquand (1871) reprit cette interprétation dans sa description des bauxites des Alpilles. Daubrée (1869a), se référant à Stanislas Meunier, professeur au Muséum d'Histoire naturelle de Paris, accepta lui aussi l'hypothèse de Coquand. Une telle opinion, dont Augé (1888) fut l'un des derniers défenseurs, était tout à fait à la mode à cette époque, et elle était appliquée à des roches diverses. Ainsi, proposait-on une origine hydrothermale pour « l'argile à silex » du bassin de Paris, dont on sait maintenant qu'il s'agit de produit d'altération superficielle de roches différentes. On proposa la théorie hydrothermale pour les « phosphorites du Quercy », qui sont dues au remplissage de cavités karstiques par concrétionnement *per descensum* dans les calcaires jurassiques de l'est de l'Aquitaine.

D'abord dominante, cette hypothèse fut remplacée par celle d'un phénomène d'altération superficielle.

Hypothèse par altération superficielle (latéritique) (figure 7)

C'est Dieulafait (1881) qui, abandonnant la théorie geysérienne, supposa que la bauxite venait de la décomposition superficielle de la « formation primordiale », composée surtout de granites. Les produits grossiers (galets, sable) de la décomposition se seraient déposés à petite distance des granites, seule la partie la plus fine, alumineuse et ferrugineuse, serait restée en suspension pour se déposer loin du lieu d'origine. La bauxite serait donc un véritable sédiment transporté par l'eau. Il s'agissait là d'un pas important vers les opinions actuelles sur la formation des bauxites de karst. Collot (1887), repensant la proposition de Dieulafait, souligna l'indépendance des gisements de bauxite vis-à-vis de leur mur et de leur toit.

Les gisements se seraient formés sur une surface émergée où affleuraient, selon leur inclinaison, divers étages stratigraphiques, allant du Jurassique supérieur (Oxfordien) au Crétacé inférieur (Urgonien).

Ils se présentent sous forme de couches ou de poches (figures 7 et 8). Dans les deux cas, ils reposent sur un substrat « mur » toujours très irrégulier.

Les couches sont recouvertes par un « toit » en calcaire stérile, de forme régulière en pente et en direction. Les gisements sont ensuite recouverts de « mort -terrain » (vocabulaire de carriers).

Aux États-Unis, la bauxite du grand gisement de l'Arkansas est issue de l'altération sur place d'une syénite néphélinique. Dans les régions tropicales, la latérite (nom donné aux produits rouges de l'altération superficielle sous climat tropical) est employée par la population locale pour fabriquer des briques, par séchage au soleil.

Ce fut ainsi Bauer (1898) qui, en étudiant les latérites des îles Seychelles et trouvant des échantillons fortement désilicifiés et enrichis en aluminium, compara la composition chimique de ces latérites alumineuses à celle des bauxites de France et constata leur analogie.

Lapparent (1906) a définitivement réfuté l'idée de l'origine geysérienne-hydrothermale des bauxites françaises et adopté l'hypothèse de l'altération superficielle, en invoquant l'importance d'un climat chaud et humide.

Selon le *Dictionnaire de géologie* de Foucault et Raoult (2014), la bauxite est une roche résiduelle ou sédimentaire, véritable minerai d'aluminium, car elle est riche en hydrates d'alumine (gibbsite, boehmite ou diaspore), auxquels s'ajoutent hématite, goethite, kaolinite, anatase, et un peu de rutile.

Elle est classée en deux types :

• **les bauxites autochtones** (dites aussi primaires), restées en place ou presque, sur leur roche mère (syénite, basalte, roches métamorphiques, etc.) dont elles dérivent par altération pédologique, sous couvert végétal en pays tropical (évolution de type latéritique). Dans certains cas, elles dériveraient de *terra rossa* sur substratum calcaire (figures 6, 7 et 8).

• **les bauxites allochtones** (dites aussi secondaires, ou resédimentées) en couches stratifiées liées à d'autres couches continentales (lacustres) ou marines, détritiques, ou calcaires. Elles proviennent du lessivage de sols latéritiques, dont les éléments ont été transportés (cours d'eau, et vent ?) et sédimentés dans des bassins lointains.

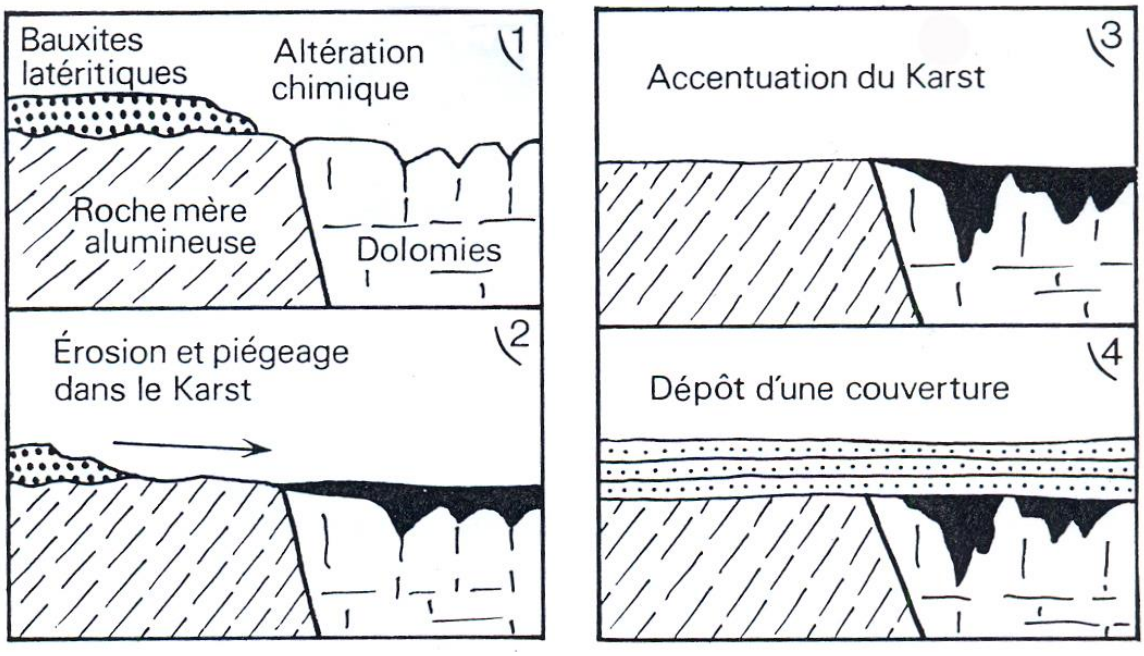

Figure 7. Karstification de bauxites latéritiques. D'après Bousquet et Vignard, 1980.

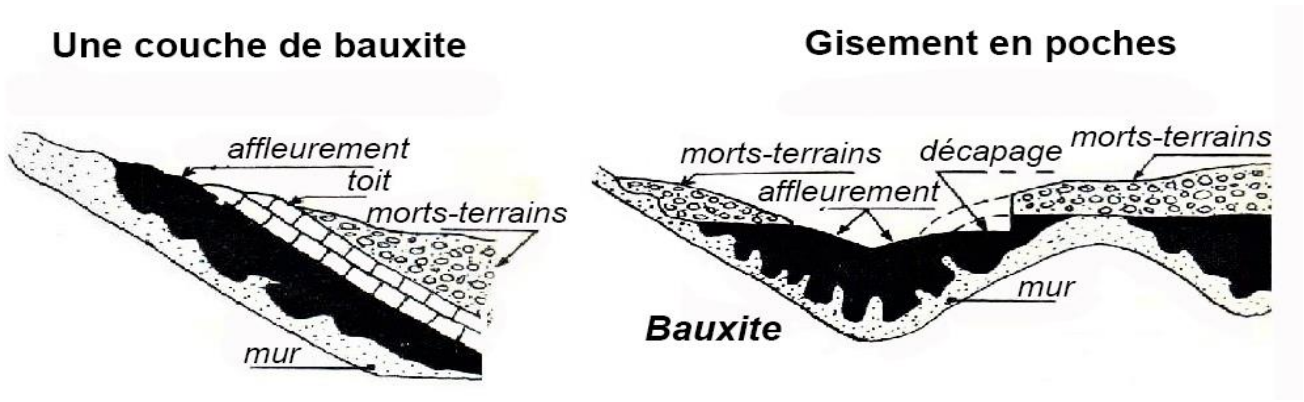

Figure 8. Couches recouvertes par un « toit » en calcaire stérile de forme régulière en pente et en direction. D'après Euzet, 1957.

Il nous reste un point remarquable à souligner avant d'aborder le métal aluminium.

Pendant les deux dernières décennies, les géologues et géophysiciens se sont intéressés de plus en plus aux reconstitutions paléogéographiques et paléoclimatiques. Cela a permis de montrer que la composition minéralogique des bauxites et leur répartition géographique peuvent être corrélées avec les changements de climat pendant les temps géologiques. Par exemple, dans certains gisements, la boehmite est secondaire par rapport à la gibbsite, dont elle représente un stade déshydraté, qui se forme en climat tropical à longue saison sèche.

Plusieurs caractéristiques texturales résultent à la fois des différences latitudinales dans les conditions climatiques actuelles, mais aussi et peut-être même davantage, des histoires paléoclimatiques qui se sont succédé depuis le Paléozoïque, liées à la dérive des continents ou, en d'autres termes, au mouvement des continents par rapport à l'équateur et aux tropiques.

Ainsi, dans une unité stratigraphique, les bauxites constituent-elles un horizon-repère très précieux. Les recherches actuelles sur les bauxites s'attachent plus particulièrement à la datation fine de ces formations, au moyen de l'analyse des isotopes radioactifs et des isotopes stables.

« Sans doute le savant modeste et solitaire que fut Berthier serait-il aujourd'hui surpris du développement scientifique et industriel mondial qu'engendra son article, occasionnel et désintéressé, de la roche rouge des Baux-de-Provence » *(Bardossy, 1997).*

Extraction de la bauxite dans le Midi de la France

Dans cet article nous ne parlerons que des bauxites rouges, riches en oxydes de fer, et contenant moins de 8 % de silice. La bauxite blanche étant inutilisable en raison de sa teneur élevée en silice.

Depuis la valorisation de la bauxite rouge, en tant que minerai d'alumine et d'aluminium, les productions mondiales de bauxite et de métal de première fusion ont cru régulièrement jusqu'en 1950 (production mondiale : 8,4 millions de tonnes (Mt) de bauxite), malgré les deux guerres et la crise de 1929. Cette croissance s'est très fortement accélérée jusqu'en 1974 (production mondiale : 83,9 Mt de bauxite ; production record française en 1973, avec 3,4 Mt).

À partir de cette date, les productions mondiales continuent à croître régulièrement, en particulier grâce à l'émergence de nouveaux pays gros producteurs (Australie, Brésil, Guinée, Jamaïque, ex-URSS, Surinam). Par contre, cette période va marquer le déclin rapide de la production minière métropolitaine de bauxite métallurgique (1,92 Mt en 1980, 1,45 Mt en 1985), qui disparaît en 1991. Il subsiste encore une petite production de bauxite grise, plus riche en silice.

La formation bauxitique du Midi de la France, pour l'essentiel Provence et Languedoc (figure 9), est distribuée en gîtes globalement stratiformes, plus rarement en amas, discordants dans le détail sur les roches carbonatées karstifiées du mur et coiffées par un toit sédimentaire en accordance ou qui la remanie. La minéralogie comporte diverses proportions d'hydroxydes d'alumine (boehmite, gibbsite, diaspore), de silicates d'alumine (kaolinite), d'oxydes-hydroxydes de fer (hématite, goethite) et de quartz.

La mise en place de cette formation résiduelle fossile s'est produite pendant toute la durée du Crétacé (-145 à -65 Ma), par la permanence d'une vaste ceinture chaude et humide à climat hydrolysant. L'exploitation des gisements, souvent en mine souterraine (figure 10), est rendue compliquée par la tectonique postérieure à la formation des bauxites, au cours du Cénozoïque (plissements et écaillages de l'encaissant et de la « couche » bauxitique). Les principales exploitations (figure 9) étaient situées dans le Var, avec le district de Brignoles (> 40 Mt), et dans l'Hérault, avec le district de Villeveyrac (43 Mt).

À l'heure actuelle, les coûts de production élevés ne permettraient plus à ces gisements d'être compétitifs avec les gisements facilement exploitables des nouveaux gros producteurs en zone tropicale (gisements tabulaires de gros volume, exploités à ciel ouvert).

La reconnaissance des gisements de bauxite du Midi de la France a fait l'objet d'un volet spécifique, « l'inventaire bauxites », à la demande du Ministère de l'Industrie. Le BRGM a mené de 1976 à 1979 cet inventaire des réserves métropolitaines en bauxites pour alumine dans les départements du Var, des Bouches-du-Rhône et de l'Hérault. Cet inventaire s'est appuyé sur une méthode mise au point pour tenir compte des problèmes spécifiques à ces districts : information dispersée, nombreux sondages réalisés par les exploitants, contexte géologique et structural complexe, morphologie des gisements variée, etc.

Un aspect prospectif, après croisement des données géologiques, gîtologiques et minières, a par ailleurs abouti à l'élaboration de cartes de prédictivité (délimitation d'aires potentiellement favorables).

Au 1er janvier 1978, un potentiel global de 389 Mt de formation bauxitique était estimé, incluant après sélections minéralurgiques et minières, environ 45 Mt de réserves exploitables et conditionnelles, hors zones déjà exploitées.

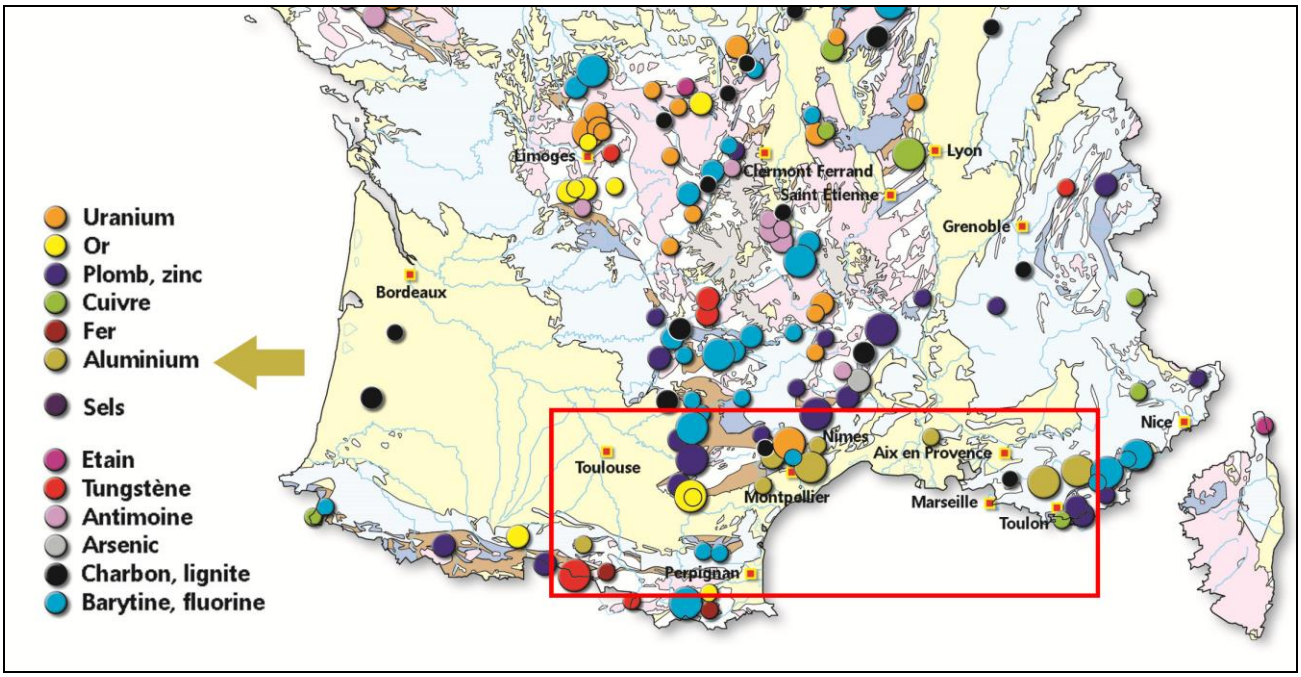

Figure 9. Extrait de la carte des principales mines anciennement exploitées, localisant les exploitations de bauxite en Languedoc et en Provence (pour la plupart dans les départements de l'Hérault, des Bouches-du-Rhône et du Var). La zone concernée est soulignée par un cadre rouge. Source : BRGM, in *Charles* et al.*, 2017.*

Figures 10. À gauche : exploitation d'un karst (Bédarieux, Hérault). Photo M. Gastou.
À droite : exploitation souterraine dans les Alpilles. Source : alpilles-info.fr/la-bauxite-dans-les-alpilles.

L'aluminium

Nous venons de voir que l'histoire de l'aluminium métallique (figure 11) est étroitement liée à celle de la bauxite dont il est extrait. Le nom aluminium (en latin, « alun » se dit *alumen*) fut donné par Sir Humphrey Davy en 1809, qui, le premier, réussit à isoler un alliage Al-Fe.

Figure 11. Tubes d'aluminium. Source : Internet.

Mais le procédé de la séparation du métal ne fut inventé qu'en 1854, par Henri Sainte-Claire Deville, (comme dit plus haut) dont les recherches ont été soutenues par Napoléon III. Le nouveau métal fut présenté en 1855 à l'Exposition universelle à Paris, où il attira un grand intérêt dans le public. La France est alors pratiquement seule à en fabriquer. Il a fallu attendre que l'usine de Gardanne, créée en 1893 par Péchiney, soit en activité pour exploiter industriellement le procédé Bayer.

L'aluminium est donc un métal contemporain qui, pendant longtemps, a été un métal rare. Son extraction extrêmement coûteuse par le procédé chimique, fondé sur la réduction du chlorure d'aluminium par le sodium, donne un métal dont le prix était alors comparable à celui de l'or (1 200 et 1 500 F /kg et l'argent seulement 210 F/kg). À cette époque, il est donc seulement utilisé en joaillerie (figure 12). On raconte que Napoléon III faisait mettre à la disposition de ses hôtes les plus illustres des couverts, fourchettes et cuillères, en aluminium, alors que les autres convives devaient se contenter d'or et d'argent !

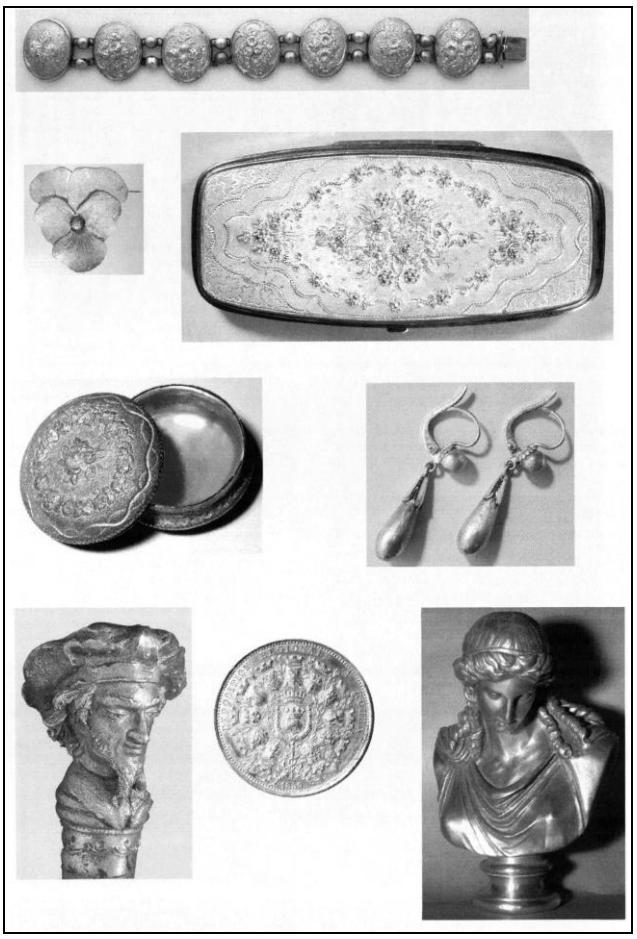

Figure 12. Objets en aluminium de « facture Napoléon III ». De haut en bas et de gauche à droite : bracelet ; broche ; étui à cigares ; boîte à ; boucles d'oreille ; pommeau de canne ; médaille de Rouen (1859) ; buste de Eiréné (vers 1862). In *Bourgarit et Plateau (2005), fig. 4. ©J. Plateau.*

Passé dans le domaine industriel à la fin du XIX^{e} siècle, l'aluminium est devenu le premier des métaux non ferreux pour ses qualités.

Sa légèreté (densité spécifique de 2,7 g/cm^3, soit environ un tiers de celle de l'acier (7-8 g/cm^3) ou du cuivre (8,96 g/cm^3), son excellent pouvoir réflecteur (quand il est poli), son inaltérabilité, sa bonne conductibilité électrique et thermique, sa facilité de décoration et la grande résistance mécanique de certains alliages lui donnent des débouchés dans :

- l'instrumentation scientifique : appareils scientifiques, jumelles, longues-vues, etc. ;
- les transports (un kilogramme d'aluminium permet de remplacer deux kilogrammes d'acier dans des applications automobiles) ;
- l'industrie électrique [excellent conducteur de la chaleur et de l'électricité (conductivité deux fois supérieure à celle du cuivre)] ;
- l'emballage (le métal lui-même ne libère ni odeur, ni goût ; ce qui en fait un élément de choix pour l'emballage alimentaire ou pharmaceutique) ;
- le bâtiment et toutes les autres industries (imperméabilité et effet barrière même à très faible épaisseur, une feuille d'aluminium est totalement imperméable et ne laisse passer ni microorganismes, ni odeurs, ni lumière).

Il fut employé d'abord à l'état pur, pour sa légèreté et son inaltérabilité, puis la mise au point d'alliages (Duralumin par exemple), d'une résistance mécanique plus grande, sera déterminante pour sa consommation qui a régulièrement doublé tous les huit ans, depuis le début du XX^{e} siècle jusqu'aux années 1970.

Minerais

L'alumine ou oxyde d'aluminium, composé chimique de formule Al_2O_3, solide blanc inodore insoluble dans l'eau (figure 13) est présente dans de nombreuses espèces minérales, les plus abondantes étant les feldspaths et les produits de leur décomposition : argiles (Al_2O_3, 2 SiO_2, 2 H_2O) et schistes.

Figure 13. Poudre d'alumine.

Son extraction est faite à partir des trois minéraux majeurs de la bauxite :

• la boehmite (Al_2O_3, H_2O), constituant principal des bauxites européennes (à titre d'exemple, dans l'Hérault une bauxite rouge boehmitique contient en moyenne 54 % d'Al_2O_3, 20 % de Fe_2O_3, 4 % de SiO_2, 3 % de TiO_2, 19 % de H_2O) ;

• la gibbsite (Al_2O_3, 3 H_2O), principal constituant des bauxites africaines, américaines et asiatiques ;

• le diaspore de formule AlO(OH) avec des traces : Fe, Mn, Cr, Si. Il n'est signalé en France qu'en microcristaux cryptocristallins. Il est exploité au Canada, en France (Occitanie, Haute-Loire, Auvergne), en Turquie et en Russie.

Caractéristiques chimiques et physiques

L'aluminium, élément chimique de numéro atomique 13, de symbole Al, appartient au groupe 13 du tableau périodique, ainsi qu'à la famille des métaux pauvres (figure 14). Il a pour masse atomique 26,98. Sa masse volumique est égale à 2,6989 g/cm^3 ; dureté : 1,5 ; point de fusion 660,323 °C. Point d'ébullition : 2 519 °C.

L'aluminium corps simple est un métal malléable, argenté, peu altérable à l'air et peu dense. Il se combine directement à tous les éléments non métalliques sauf l'hydrogène, donnant $AlCl_3$ à 250 °C, AlF_3 à 450 °C, Al_4C_3 à 550 °C, AlN à 700 °C, AlB_2 à 1 000 °C, etc. L'alumine fond à 2 040 °C et bout vers 3 500 °C.

Conclusion

Pour terminer cet article, un dernier mot sur Pierre Berthier. La sévérité qu'il s'appliquait à lui-même dans l'appréciation de ses propres recherches le portait à user de la même rigueur dans ses jugements sur les travaux des autres. S'il agissait ainsi, c'est qu'il voyait avant tout l'intérêt de la science, devant lequel disparaissaient pour lui toutes les individualités.

Son intégrité parfaite lui faisait ressentir une aversion profonde pour tout ce qui ressemblait à l'intrigue et son indépendance se manifestait en toute circonstance. Aucune considération personnelle ne l'influençait mais, s'il ne cachait jamais ce qu'il croyait être la vérité, même en présence des hommes qui n'étaient pas habitués à l'entendre, il faut aussi dire que son esprit d'équité était tel qu'il savait rendre justice même aux personnes dont il avait à se plaindre.

La simplicité des habitudes de ce savant et sa frugalité étaient remarquables. Il aimait la musique et assistait souvent à des opéras.

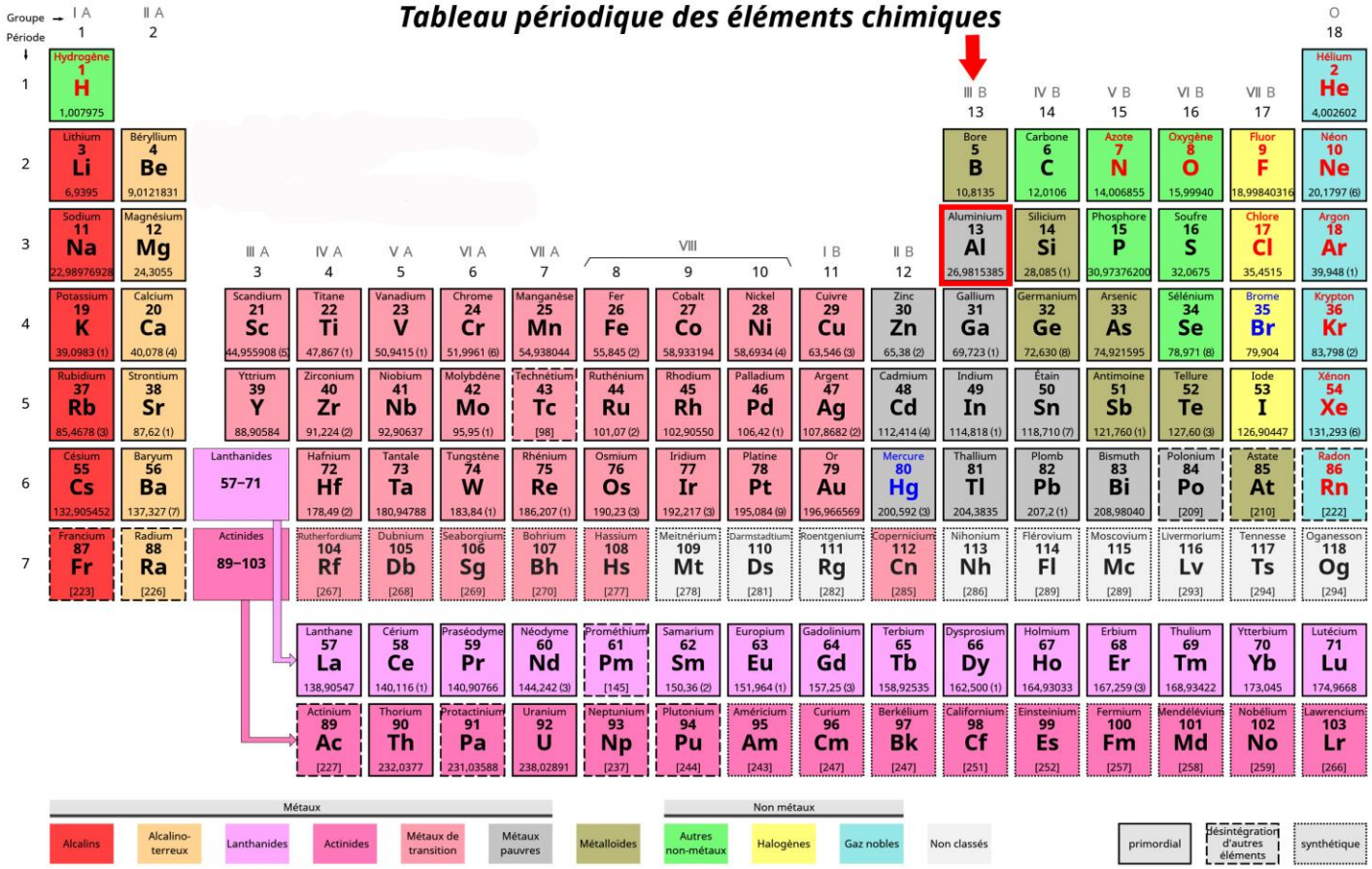

Figure 14. Tableau périodique montrant la place de l'aluminium de numéro atomique 13 (flèche).

Bibliographie

Augé M., 1888. Note sur la bauxite, son origine, son âge et son importance géologique. *Bull. Soc. Géol. France*, (3), 16, p. 345-350.

Bardossy G., 1997. Berthier, les Baux et l'histoire de la bauxite. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 324, série II a, p. 1031-1040.

Bauer M., 1898. Beiträge zur Geologie der Seychellen, innsbesondere zur Kenntnis des Laterits. *Neues Jahrbuch für Mineralogie*, Stuttgart, Bd 2, p. 162-219.

Bourgarit D. et Plateau J., 2005. Quand l'aluminium valait de l'or : peut-on reconnaître un aluminium « chimique » d'un aluminium « électrolytique » ? *Archéoscience*, 29, p. 95-105.
https://doi.org/10.4000/archeosciences.560

Berthier P., 1821. Analyse de l'alumine hydraté des Beaux, département des Bouches-du-Rhône. *Annales des Mines*, Paris, 1re série, 6, p. 531-534.

Bousquet J.-C. et Vignard G., 1980. Découverte géologique du Languedoc. Éd. BRGM, 96 pages.

Charles N., Dupuy J.-J., Christmann P., Galin R., Guillon D., 2017. Industrie minérale et activité minière en France. Collection « La mine en France ». Tome 1, 25 pages.

Collot L., 1887. Âge des bauxites du Sud-Est de la France. *Bull. Soc. Géol. France*, (3), 15, p. 331-345.

Coquand H., 1871. Sur les bauxites de la chaîne des Alpilles (Bouches-du-Rhône) et leur âge géologique. *Bull. Soc. Géol. France*, (2), 28, p. 98-115.

Dana E.S., 1892. The System of Mineralogy. John Wiley and Sons, New York, 6th ed., voir p. 251.

Daubrée M., 1869a. Note sur l'existence de gisements de bauxite dans les départements de l'Hérault et de l'Ariège. *Bull. Soc. Géol. France*, (2), 26, p. 915-918.

Daubrée M., 1869b. Notice sur P. Berthier. *Annales des mines*, Paris 6e série, Tome XV, p. 1-60.

Dieulafait M., 1881. Les bauxites, leurs âges, leur origine. Diffusion complète du titane et du vanadium dans les roches de la formation primordiale. *C. R Acad. Sci.*, Paris, 93, p. 804-807.

Dufrénoy A., 1844-45 et 1856. Traité de minéralogie, 1re et 2e éd., Carilian-Goeury et Victor Dalmont, Paris : tome 1, voir p. 346-347 et tome 2, voir p. 467.

Euzet M., 1957. La bauxite et sa production dans l'Hérault. *La Vie du Rail*, n° 604, juillet 1957.

Foucault A., Raoult J.-F., Cecca F. et Platevoet B., 2014. Dictionnaire de géologie, 8e édition. Éd. Dunod, 396 pages.

Gastou M., 2010. La bauxite dans l'Hérault. Gisements et production. *Saga Information*, n° 300, octobre 2010, p. 20-24.
Gèze B., 1995. Languedoc méditerranéen. Montagne noire, 2e édition. Elsevier/Masson, coll. Guides géologiques régionaux, 191 pages.
Hausmann F.L., 1847. Handbuch der Mineralogie. Zweiter Teil. Göttingen, Bandenhoeck und Ruprecht Verlag, 350 pages.
Lajoinie J.-P. et Laville P., 1979. Les formations bauxitiques de la Provence et du Languedoc. Dimensions et distribution des gisements. *Mémoire BRGM*, n° 100, 146 pages.
Lapparent A., 1906. Traité de géologie, 5e édition. Masson et Cie, Paris, 3 volumes, XVI + 2 014 pages.
Sainte-Claire Deville H., 1861. Minerais alumineux ou bauxite. *Annales Chimie et physique*, 61, p. 309-326.

Voir aussi

Bouilliard J.-C. et Tournis V., 2021. Découverte de la bauxite par Pierre Berthier : https://www.institutdefrance.fr/23-mars-1821-decouverte-de-la-bauxite-par-pierre-berthier/

- Encyclopédie Universalis, rubrique : aluminium.
- Wikipédia, rubrique : Pierre Berthier.

Pour en savoir plus sur l'exploitation de la bauxite

Un musée de la mine, le **Musée des Gueules rouges,** situé à Tourves dans le Var, présente la genèse géologique de la bauxite, les processus industriels de transformation de ce minerai en alumine, puis en aluminium.

Il retrace l'histoire de l'exploitation de la bauxite et de l'activité minière qui a fortement marqué les territoires du Var, des Bouches-du-Rhône et de l'Hérault, pendant plus d'un siècle.

À lire

Arnaud C. et Guillon J.-M., 2003. Les Gueules rouges : un siècle de bauxite dans le Var, Toulon. CDDP Var/Association des gueules rouges, 2003, 175 pages.

Musée des Gueules rouges
Avenue de la Libération
Quartier du Laou, 83170 - Tourves
Tél. : 04 94 86 19 63.
mgr@caprovenceverte.fr
https://www.la-provence-verte.net/activites/patrimoine-tourves-musee-des-gueules-rouges_266.html

L'entrée du musée, à Tourves dans le Var.
D'après https://www.tourves.fr/portfolio-items/musee-des-gueules-rouges/#.