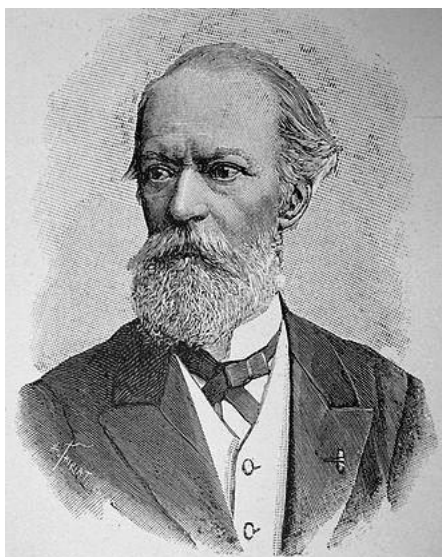


NOTICE SUR LA VIE ET LES TRAVAUX DE PAUL HAUTEFEUILLE



Paul-Gabriel Hautefeuille (1836-1903)
(gravure de Henri Thiriat)

PAR M. D. GERNEZ

Lorsqu'un savant a consacré sa vie à la recherche des vérités scientifiques et qu'il a pris une large part à des découvertes de premier ordre, dont la certitude est si bien établie qu'on les enseigne le plus souvent sans prendre la peine d'en citer les auteurs, il est bon, il est même patriotique, dès qu'il a disparu, qu'une voix s'élève pour faire connaître aux jeunes générations les services qu'il a rendus et la reconnaissance qu'on lui doit. C'est sans doute ce qu'a pensé le Conseil de la Société chimique de Paris, après la mort de P. Hautefeuille, qui fut un des membres de la première heure et dont les nombreux et importants travaux font le plus grand honneur à la science française. Il m'a désigné pour en présenter un résumé aux lecteurs du *Bulletin* : contemporain de P. Hautefeuille, lié avec lui d'une amitié de quarante années, que n'a jamais troublée le plus léger nuage, confident de ses recherches et témoin des brillants résultats obtenus, je n'hésite pas à rendre ce suprême hommage à sa mémoire. Comme il ne s'agit pas ici d'un panégyrique mais d'un exposé où l'éloquence des faits suffira pour faire apprécier leur auteur, je crois, en écrivant ces pages, ne pas aller à l'encontre de ses dernières recommandations, qui affirmaient son extrême répugnance pour les vains éloges où trop souvent les entraînements de la rhétorique ne se font pas faute de farder la vérité et de travestir l'histoire.

Hautefeuille (Paul-Gabriel) est né à Étampes (Seine-et-Oise) le 2 décembre 1836. Son père, originaire de la Beauce, où sa famille a encore de nombreux représentants, était venu dans cette ville remplir les fonctions de notaire. Il les abandonna, après treize ans d'exercice pour diriger à Paris le Contentieux de la Compagnie des chemins de fer Paris-Lyon-Méditerranée. Ce changement de résidence facilita les études de son fils, commencées au Collège d'Etampes et terminées au Lycée Condorcet.

P. Hautefeuille fut admis en 1855 à l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures, s'éleva vite aux premiers rangs de sa promotion, et, au concours de sortie, en 1858, il fut classé troisième et reçut le premier diplôme d'ingénieur chimiste. Il se livra alors aux études médicales qu'il poursuivit jusqu'aux derniers examens; en même temps il se laissait entraîner à sa passion pour les recherches chimiques. L'illustre chimiste J.-B. Dumas¹, l'un des fondateurs de l'Ecole Centrale, qui en présidait le Conseil de perfectionnement, et qui avait constaté son intelligence, mis à l'épreuve ses connaissances et pressenti ses aptitudes, le recommanda en 1862 à son élève et ami Henri Sainte-Claire Deville² qui l'admit à son laboratoire de l'Ecole Normale supérieure.

A cette époque, qui mérite d'être qualifiée les *temps héroïques* du laboratoire de l'École Normale, notre illustre maître s'était entouré de jeunes normaliens, ses élèves, et de savants amis qui poursuivaient avec lui ou isolément des recherches importantes et dotaient la science de brillantes découvertes.

Avec H. Debray³, il complétait ses études magistrales sur les métaux de la mine de platine; avec M. Fouqué⁴, il déterminait la composition et la forme de la topaze du Brésil⁵;

¹ Jean-Baptiste Dumas (1800-1884). Voir dans les illustrations des chimistes.

² Henri Sainte-Claire Deville (1818-1881). Voir dans les illustrations des chimistes.

³ Jules Henri Debray (1827-1888) a fait partie du Comité des arts chimiques de la Société d'Encouragement dès 1868. Il entre à l'École normale en 1847, devient agrégé-préparateur en 1850 et en 1851, Henri Sainte-Claire Deville (1818-1881) est nommé maître de conférences et une solide amitié va lier les deux hommes. Le premier travail de Debray porte sur le glucinium (béryllium). Il partage ensuite son temps entre l'enseignement dans différents lycées parisiens et ses recherches en particulier sur les métaux de la mine du platine. Il réalise des expériences sur le phénomène de dissociation. Il remplace Sainte-Claire Deville à l'École normale et à la Sorbonne. [Notice sur M. Henri Debray, Société d'encouragement pour l'industrie nationale, Paris (1888) pp. 6-9, par Louis Troost]

⁴ Ferdinand André Fouqué (1828-1904) né à Mortain, dans le département de la Manche, mort à Paris. Il fut reçu à l'École Normale en octobre 1849 et il y resta trois ans, sous la direction d'une série d'hommes distingués, tels que Delafosse le minéralogiste, initiateur de Pasteur; Verdet, réputé dès sa sortie de l'École le plus érudit et le plus intelligent des jeunes professeurs de Physique; Balard, qui fut aussi mon maître en Chimie; puis Henri Sainte-Claire Deville, dans le sillon duquel sont entrés Fouqué et tant d'autres jeunes normaliens pendant un tiers de siècle. Ses missions, de 1860 à 1873, le conduisirent tour à tour du Vésuve à l'Etna, de Santorin dans l'Archipel grec, à Terceira dans les Açores. Élu en 1877 professeur titulaire de la chaire d'histoire des corps inorganiques au Collège de France, il se montra le digne continuateur des grandes traditions de cet établissement. [Notice sur la vie et les travaux de Ferdinand Fouqué lue par Marcelin Berthelot en 1906]

⁵ Les topazes « impériales » du Brésil ont été découvertes en 1751 dans les alentours d'Ouro Preto, dans l'état de Minas Gerais : parmi les localités célèbres citons Antonio Pereira, Dom Bosco, Rodrigo Silva et surtout la mine Vermelhao-

avec M. L. Troost⁶, il faisait la synthèse des sulfures naturels et déterminait les densités de vapeurs des corps à des températures que l'on n'avait pas atteintes avant eux; avec Damour⁷, il faisait connaître la nature des colombites⁸; avec Caron, il donnait une préparation facile du magnésium, en faisait connaître de nouvelles propriétés et découvrait des siliciures métalliques. Tout en prenant sa très large part de ces importants travaux, il imaginait et réalisait les premières expériences qui établissaient l'une des plus grandes découvertes du siècle dernier : la *Dissociation*.

A côté de ces maîtres, M. Grandeau appliquait le spectroscope à la recherche du rubidium et du cæsium⁹ dans les matières alcalines naturelles; Lechartier précisait et appliquait les procédés d'analyse immédiate des minéraux et, dans un laboratoire voisin où Pasteur poursuivait ses immortelles découvertes sur les fermentations et les maladies des vins, Raulin commençait sur la nutrition d'une mucédinée un travail qui a fait époque, M. Van Tieghem expliquait les phénomènes de la fermentation de l'urée et de l'acide hippurique, et M. Duclaux entreprenait ses études sur l'absorption de l'ammoniaque et la production d'acides gras dans la fermentation alcoolique.

Dans un pareil milieu, où les questions abordées et résolues étaient à la fois si nouvelles et si diverses, on se sentait entraîné par la contagion de l'exemple des maîtres et soutenu par le désir et l'espoir de montrer qu'on n'était pas trop indigne de leur bienveillance et de leurs conseils. P. Hautefeuille y fut accueilli non en étranger mais en camarade, avec les marques d'une cordialité qui devint plus étroite encore lorsqu'on eût découvert ses qualités éminentes : une grande habileté manuelle, une intelligence vive et pénétrante, associées à une sagacité qui lui faisait distinguer vite le

Vermillon (Saramenha). La couleur orangée des topazes impériales, avec des nuances roses sous certains angles de vision, en fait des pierres gemmes appréciées (voir Fig. 1). Les topazes autres qu'impériales sont abondantes dans les pegmatites du Brésil. Depuis plus de deux siècles, ce pays en est le principal producteur. Les cristaux atteignent des dimensions importantes, jusqu'à métriques ; malheureusement, beaucoup d'entre eux sont incolores ou très légèrement bleutés, et donc impropres à la joaillerie. Soumis cependant à un traitement par irradiation gamma suivi d'un chauffage, ils acquièrent une coloration bleu intense (voir Fig. 2). [*Les minéraux, sciences et collections*]

⁶ Louis Joseph Troost (1825-1911). Il a fait des études au lycée Charlemagne puis à l'Ecole Normale rue d'Ulm de 1848 à 1851. D'abord nommé professeur au lycée d'Angoulême, il revient à Paris au lycée Bonaparte. Élu membre de l'Académie des sciences en remplacement de Wurtz le 7 juillet 1884, il en deviendra vice-président en 1904 et président en 1905. Il s'est fait connaître par des recherches sur les densités des vapeurs et sur les hydrures métalliques. Il a aussi étudié le lithium, le zirconium ainsi que le rôle du silicium et du manganèse dans les fontes. Voir dans les illustrations des chimistes.

⁷ Augustin Alexis Damour (1808-1902) minéralogiste français né et mort à Paris. Après une formation de droit il poursuit une carrière administrative notamment au ministère des affaires étrangères, jusqu'en 1853. Mais sa passion était la minéralogie et en autodidacte il se consacra à l'analyse chimique des minéraux. Il commença ainsi une deuxième carrière, avec de multiples publications. On lui doit également quelques publications sur la préhistoire. Il présida la Société géologique de France en 1857. [Wikipedia]

⁸ La colombite serait une variété de la tantalite contenant du niobium; appelée aussi niobite. C'est une rareté de collection. [Note d'Yves Antuszewicz]

⁹ Césium. [Note d'Yves Antuszewicz]

côté nouveau des phénomènes, enfin, ce qui rehaussait encore ses mérites, une humeur toujours égale et une parfaite modestie.

Le premier travail qu'il entreprit eut pour objet la reproduction des trois espèces minérales sous lesquelles on rencontre l'anhydride titanique dans les filons : le *rutile*¹⁰, dont les formes appartiennent au système quadratique, l'*anatase*¹¹ qui cristallise en octaèdres du même système, mais avec un autre rapport d'axes et la *brookite*¹² orthorhombique.

H. Sainte-Claire Deville avait, peu de temps auparavant, transformé les oxydes amorphes en cristaux par l'action, à haute température d'un courant d'une vapeur convenablement choisie qu'il désigna sous le nom d'*agent minéralisateur*. Un courant de gaz chlorhydrique, par exemple, passant sur l'anhydride titanique amorphe contenu dans un tube fortement chauffé, le transformait en rutile et se retrouvait en totalité à la sortie de l'appareil. L'effet était certain, mais le mode d'action demandait une explication, H. Deville la donna : le gaz chlorhydrique et l'anhydride titanique réagissent, à la température de l'expérience, dès qu'ils se rencontrent, il en résulte deux produits volatils : le tétrachlorure de titane et la vapeur d'eau qui, un peu plus loin, reproduisent à une température un peu différente, par réaction inverse, du gaz chlorhydrique et de l'anhydride titanique, lequel, passant de l'état de vapeur à l'état solide, cristallise. A l'appui de cette explication, il fit remarquer que les cristaux se trouvent toujours plus loin que la matière amorphe initiale, dans le sens du courant gazeux, ce qui a fait donner au phénomène le nom de *volatilisation apparente*. H. Deville et ses élèves en firent connaître un grand nombre d'exemples. P. Hautefeuille utilisa cette découverte; il lui donna des formes très ingénieusement combinées de manière à reproduire non seulement les trois espèces cristallographiques, mais aussi les diverses variétés sous lesquelles chacune d'elles a été rencontrée jusqu'ici dans les roches :

Par l'action de la vapeur d'eau sur le tétrachlorure ou le tétrafluorure de titane très fortement chauffés (1000°) et en

¹⁰ Rutile, du latin *rutillus*, rougeâtre; formule chimique : TiO_2 ; le rutile se macle très souvent. Voir dans les illustrations la Fig. 3. Les fins cristaux jaunes inclus dans le quartz sont nommés depuis longtemps « cheveux de Vénus ». La mine de Novo Horizonte, au Brésil est réputée pour ses cheveux de Vénus. [*Les minéraux, sciences et collections*]

¹¹ Anatase, du grec *anatisis*, allongement, à cause du grand paramètre cristallin vertical; formule chimique : TiO_2 ; forme fréquente en pyramide avec parfois des terminaisons basales. Se trouve en Norvège, dans les Alpes, au Brésil, etc. Voir dans les illustrations la Fig. 4.

¹² Brookite, dédiée au minéralogiste anglais H. J. Brooke (1771-1857); formule chimique : TiO_2 . Se trouvait dans les Alpes, en Oural prépolaire, en Arkansas, au Pakistan, etc. En France on en trouve en Oisans, en Savoie et dans le massif du Mont-Blanc. Voir dans les illustrations la Fig. 5.

variant les modes de production de ces réactifs, il a obtenu : le rutile aciculaire du quartz hyalin, le lamellaire de New-York, la sagénite de Saussure, le rutile mâclé de Grave's Mountain. Quant aux longues aiguilles rouges qui ont fait donner à cette espèce le nom de rutile, P. Hautefeuille l'a obtenue plus tard à l'aide des vanadates alcalins.

L'anatase, incolore ou bleue, suivant qu'on opère en milieu oxydant ou réducteur, se produit si le mélange de fluorure de titane et de vapeur d'eau est chauffé à une température d'environ 800°. On peut l'obtenir même à 600°, d'après des expériences ultérieures de P. Hautefeuille et Perrey, si l'on opère sur l'anhydride titanique et le gaz chlorhydrique mêlé de vapeur d'eau sous une pression de 2 atmosphères.

La formation de la brookite exige que les matières réagissantes soient à la température de 900° et suivant la manière de les produire on obtient les variétés : *lamelliforme*, celle de l'Oural, ou l'*arkansite*.

Après avoir précisé les circonstances de production des diverses formes cristallisées de l'anhydride titanique, P. Hautefeuille reproduisit un certain nombre de ses combinaisons. Il obtint le *sphène*¹³ $\text{SiO}_2 \cdot \text{TiO}_2 \cdot \text{CaO}$ en chauffant, à une très haute température, dans un creuset de platine, le mélange des deux anhydrides avec du chlorure de calcium et reprenant par l'eau la masse refroidie. Dans cette expérience, par l'addition au mélange d'un peu de chlorure manganeux, il obtint le sphène rose ou *greenovine*. En supprimant dans cette préparation du sphène l'anhydride silicique et chauffant énergiquement il reproduisit le titanate de calcium $\text{TiO}_2 \cdot \text{CaO}$ ou *perowskite*. Par des moyens analogues il prépara les titanates monomagnésien et dimagnésien, diferreux, dimanganeux et les silicates correspondants.

Ces résultats furent exposés dans une thèse pour le doctorat ès sciences physiques que P. Hautefeuille soutint brillamment en Sorbonne (8 février 1865); six mois après, il recevait un second diplôme de docteur après avoir soutenu devant la Faculté de médecine une thèse ayant pour titre : *Recherches sur les résines*.

Ce travail n'est pas une simple compilation, il contient des résultats intéressants que P. Hautefeuille eut plus tard l'occasion d'utiliser.

¹³ Sphène, également appelé titanite, est un minéral accessoire important de certaines roches magmatiques, comme les pegmatiques. On le trouve dans les fentes alpines riches en calcium, mais aussi au Pakistan, en Afrique et en Amérique. Voir dans les illustrations la Fig. 6.

L'administration de l'École Centrale s'empressa de confier au jeune docteur les fonctions de répétiteur de mécanique¹⁴, puis de chimie industrielle qu'il abandonna en 1876, lorsqu'il fut nommé à l'École normale maître de conférences de minéralogie en remplacement de M. Friedel¹⁵ qui succédait à Delafosse dans la chaire de minéralogie de la Faculté des sciences. Quand on organisa l'École des hautes études, H. Deville le choisit comme sous-directeur de son laboratoire de l'École Normale où pendant vingt-trois ans, il a travaillé sans relâche donnant, comme son cher Directeur, l'exemple d'une ardeur féconde qui ne faiblit jamais. En 1885, Friedel abandonna sa chaire de minéralogie pour continuer l'enseignement de la chimie organique dans la chaire que son illustre maître Würtz¹⁶ avait inaugurée avec tant d'éclat, P. Hautefeuille céda, non sans hésitations aux dispositions bienveillantes que lui témoignaient les professeurs de la Sorbonne; il fut nommé professeur. Jusqu'à sa mort, il s'acquitta de ses fonctions avec un talent et une conscience connus et appréciés de tous, sans négliger un seul jour, malgré les transformations successives du laboratoire dont il pouvait disposer, de poursuivre et de développer avec M. Perrey les recherches brillantes qu'ils avaient commencées au laboratoire de l'École Normale.

Ces recherches, P. Hautefeuille les a orientées dans des directions très diverses et, de plus, sa préoccupation de jeter plus de lumière sur des résultats obtenus l'a conduit quelquefois à les reprendre plus tard, à les confirmer et à les étendre par des expériences sinon plus démonstratives, au moins plus élégantes, c'est pourquoi je ne m'astreindrai pas à en suivre l'ordre chronologique et, pour en simplifier l'exposé, je réunirai celles que l'on peut considérer comme formant un ensemble, en commençant par les synthèses minéralogiques qui continuèrent ses premiers travaux.

Ses études sur la cristallisation de la silice ont mis très nettement en évidence l'influence de la température sur la formation, dans le même milieu, d'espèces cristallines différentes. La silice amorphe chauffée quelques heures avec du tungstate de sodium, à la température de fusion de l'argent (954°) se transforme en lamelles hexagonales de *tridymite*¹⁷; si

¹⁴ Paul Hautefeuille fut : Répétiteur de Cinématique, de 1859 à 1864, puis Répétiteur de Métallurgie des petits métaux et de Chimie industrielle de 1864 à 1876. [*Histoire de l'École Centrale des Arts et Manufactures* (Charles de Comberousse)]

¹⁵ Charles Friedel (1832-1899) fut, avec Paul Schützenberger, en 1883, le fondateur de l'École de physique et de chimie industrielles, à l'origine de plusieurs prix Nobel. [Note d'Yves Antuszewicz] Voir dans les illustrations des chimistes.

¹⁶ Charles-Adolphe Wurtz (1817-1884) médecin et chimiste français d'origine alsacienne. Il fut professeur et doyen de la Faculté de médecine de Paris, professeur à la Sorbonne, et membre de l'Académie de Médecine. Voir dans les illustrations des chimistes. [Note d'Yves Antuszewicz]

¹⁷ La tridymite est une espèce minérale de la famille des tectosilicates, et un des polymorphes de la silice, avec le quartz, la coésite, la cristobalite, la stishovite, de formule SiO₂ pouvant contenir des traces : titane, aluminium, fer, manganèse, magnésium, calcium, sodium, potassium, eau. Un mélange microcristallin de cristobalite et de tridymite est une variété

l'opération est prolongée davantage, les lamelles sont plus épaisses et à pans non striés. A une température plus basse, à 750°, la silice amorphe et la tridymite, elle-même, se dissolvent lentement, puis se transforment, après quelques centaines d'heures en doubles pyramides hexagonales ayant toutes les propriétés du quartz. Si l'on substitue au tungstate de sodium le tungstate de lithium on peut obtenir du quartz sous la forme de pyramides beaucoup plus aiguës et rappelant le *quartz en obélisque de Chamonix*¹⁸. On accélère du reste la transformation en soumettant la masse fondue à des alternatives fréquentes de températures comprises entre 750° et 850°. Dans ces opérations il y a non pas une simple dissolution de la silice dans le tungstate employé mais réaction des deux corps avec formation de silicate de sodium et de tungstate acide qui, à une température différente, reprend le sodium et abandonne la silice à l'état de cristaux.

Un autre procédé de synthèse du quartz, plus rapproché sans doute que le précédent de celui qui a produit ce corps dans les filons est celui dans lequel P. Hautesfeuille a employé l'acide hydro-fluo-silicique agissant à 200° sur de la silice gélatineuse dans un tube de platine hermétiquement clos.

Longtemps après ces expériences, il a obtenu avec le concours de M. Perrey, en remplaçant le tungstate de sodium par du vanadate de lithium, du quartz qui a exactement le facies des cristaux que l'on trouve dans les roches métamorphiques.

L'interprétation du mode d'action qu'exerce le milieu a conduit P. Hautesfeuille à réaliser toute une série d'espèces minéralogiques en employant comme milieux minéralisateurs des *dissolvants apparents* susceptibles, comme les tungstates alcalins de donner des sels acides. Il a utilisé dans ce but les phosphates et les vanadates alcalins avec addition au besoin des acides de ces sels. C'est ainsi qu'il réalisa la synthèse des feldspaths *albite*¹⁹ et *orthose*²⁰, obtenus pour la première fois, par voie sèche : l'albite, en chauffant les proportions théoriques de silice et d'alumine avec du tungstate de sodium, à la température du rouge sombre, pendant

d'opale : la lussatite. La tridymite est présente dans les roches lunaires ainsi que dans des météorites. En juin 2015, le rover Curiosity en découvre sur Mars. Voir la Fig. 7 dans les illustrations des minéraux. [Note d'Yves Antuszewicz]

¹⁸ Nous n'avons pas à notre disposition de photographie de cristaux de quartz de la vallée de Chamonix, les exemplaires que j'y possède étant actuellement sous la neige, j'ai joints une photographie de quartz fumé des Grisons (voir Fig. 16 dans les illustrations des minéraux. [Note d'Yves Antuszewicz]

¹⁹ L'*albite* est le membre le plus acide des feldspaths plagioclases. On la rencontre fréquemment dans les fentes granitiques alpines. Voir la Fig. 8 dans les illustrations des minéraux. [Note d'Yves Antuszewicz]

²⁰ L'étymologie de ce nom est grecque (*orthos* signifiant droit). L'*orthose* est un constituant majeur des granites. Voir la Fig. 9 dans les illustrations des minéraux. [Note d'Yves Antuszewicz]

plusieurs jours; l'orthose, en chauffant vers 950° un silico-aluminate très alcalin avec la quantité d'acide tungstique nécessaire pour lui enlever l'excès de potassium. Par les mêmes procédés il reproduisit d'autres silicates alumineux : l'*oligoclase*²¹, l'*amphigène*, la *néphéline*²², la *pétalite*²³, etc.

Au cours de ces recherches, il eut soin de préciser la marche à suivre pour trouver, dans chaque cas particulier, le milieu favorable à la synthèse que l'on veut produire et ouvrit ainsi une voie nouvelle pour la reproduction des espèces minérales.

Il montra lui-même la fécondité de cette méthode en préparant un grand nombre d'espèces minéralogiques inconnues, parmi lesquelles je citerai deux silico-titanates de sodium, une vagnérite du vanadium, une leucite et une orthose ferriques (silicates doubles dans lesquels l'oxyde ferrique remplace l'alumine), des silicates cobaltiques et potassiques, des silicates doubles d'aluminium et de lithium, la mélilite glucinique, plusieurs silico-glucينات soit de potassium, soit de sodium, etc. Avec Margottet²⁴, en employant le chlorure de lithium comme milieu minéralisateur, il prépara le *péridot*²⁵ et l'hyperstène du lithium et un silicate non encore trouvé dans les roches $5\text{SiO}_2 \cdot \text{Li}_2\text{O}$, de plus, avec l'acide ortho-phosphorique comme dissolvant à chaud de la silice, une combinaison hydratée $2(\text{P}^{205} \cdot \text{SiO}_2) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ qui cristallise à 125° et se dissout sans résidu dans l'eau froide. Si l'on chauffe assez fortement et assez vite pour déshydrater l'acide ortho-phosphorique, on obtient le composé $\text{P}^{205} \cdot \text{SiO}_2$ appelé par les auteurs phosphate de silice, remarquable, par sa propriété rare d'avoir, suivant les conditions de sa formation, quatre formes cristallines incompatibles entre elles : les prismes hexagonaux réguliers se produisent au-dessous de 300° , les lamelles ressemblant à la tridymite et les octaèdres réguliers entre 700° et 800° , enfin les prismes clinorhombiques entre 800° et 1000° .

²¹ L'*oligoclase* est un minéral de la classe des silicates sous-classe des tectosilicates de la famille des feldspaths. Voir la Fig. 10 dans les illustrations des minéraux. [Note d'Yves Antuszewicz]

²² Le nom *néphéline* provient du grec (*nephele* : nuage), car la pierre devient blanche sous une attaque acide. De grands cristaux ont été extraits de l'Ontario, au Canada (mine de Bancroft). Voir la Fig. 11 dans les illustrations des minéraux. [Note d'Yves Antuszewicz]

²³ Le nom *pétalite* provient du grec (*petalon* : feuille), du fait de la structure monoclinique du cristal. Sa formule chimique contient du lithium : $\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$. Le minéral provenait historiquement de l'île d'Elbe. On en a depuis trouvé en Afghanistan et en Birmanie. Voir la Fig. 12 dans les illustrations des minéraux. [Note d'Yves Antuszewicz]

²⁴ J. Margottet, décédé quelques mois seulement après Paul Hautefeuille, fut successivement agrégé-préparateur à l'École Normale supérieure, professeur de chimie à la Faculté des sciences de Montpellier, doyen de la Faculté des sciences de Dijon, recteur des Académies de Chambéry, Poitiers et Lille. Outre les travaux effectués en collaboration avec son maître et ami, on lui doit des recherches conduites avec beaucoup d'habileté et de précision sur les sulfures, séléniures et tellures métalliques.

²⁵ Le *péridot* (terme utilisé en joaillerie) est également nommé *olivine* en gemmologie. Le gisement historique du péridot est l'île de Zabargad, dans la Mer Rouge (Égypte), appelée Topasos ou Topazios, dans l'antiquité. Depuis, de nombreux gisements ont été découverts : en Birmanie, au nord de Mogok ; au Pakistan, dans la vallée de Naran-Kaghan ; au Sri Lanka, vers Ratnapura. La couleur verte est plus ou moins prononcée, selon la teneur en fer. Voir la Fig. 14 dans les illustrations des minéraux. [Note d'Yves Antuszewicz]

La même méthode d'investigation appliquée par ces auteurs à l'action de l'acide ortho-phosphorique sur les anhydrides zirconique et stannique ont donné lieu à la découverte de combinaisons analogues à la précédente et à la préparation de plusieurs phosphates de sesquioxydes d'aluminium, de fer, de chrome, d'uranium cristallisés et anhydres.

Plus tard, P. Hautefeuille, ayant reconnu que les fluorures ont la propriété de *minéraliser* les silicates, prépara avec Péan de Saint-Gilles plusieurs espèces artificielles qui avaient la composition et les propriétés des micas; résultat qui fut, depuis, confirmé et développé par plusieurs savants.

Il poursuivit ultérieurement ce genre de recherches avec le concours de M. Perrey et obtint des produits qui, par leur nature, la pureté de leurs formes et leurs dimensions exceptionnelles, fixèrent l'attention et l'admiration des connaisseurs à l'Exposition universelle de 1900; la *cymophane* obtenue par fusion dans un sulfure alcalin d'un mélange d'alumine et de glucine; le *zircon*, préparé avec le silicate de zirconium fondu dans du molybdate de lithium à 700° et dont les cristaux, ayant jusqu'à 8 millimètres de longueur présentent toutes les anomalies optiques des cristaux naturels; la *phénacite*²⁶, qui n'avait pas encore été reproduite, préparée par la décomposition lente d'un silico-glucinate de lithium dans le vanadate de lithium en fusion, en magnifiques cristaux rhomboédriques ou hexagonaux suivant la température de formation; la *willémité*²⁷ qui résulte de la combinaison de la silice et de l'oxyde de zinc dans du vanadate neutre de potassium chauffé à 700°; le *corindon* obtenu par l'action du gaz chlorhydrique à 600° sur de l'alumine *non cuite*, c'est-à-dire préparée par décomposition de l'oxalate d'aluminium à la température la plus basse possible. Ce corindon est incolore. Les cristaux obtenus avec l'alumine chromifère ont les formes et la couleur du rubis oriental. Si le gaz chlorhydrique décompose le sulfate d'aluminium chauffé à 700°, il produit, sur l'excès d'alumine amorphe, de petits cristaux de saphir blanc; enfin P. Hautefeuille et M. Perrey ont poursuivi avec beaucoup de sagacité et de persévérance la reproduction de l'*émeraude*²⁸,

²⁶ La phénacite tient son nom du grec (terme signifiant trompeur), car elle ressemble au quartz. Sa formule chimique est Be_2SiO_4 . Voir la Fig. 13 dans les illustrations des minéraux. [Note d'Yves Antuszewicz]

²⁷ La willémité est un minéral assez commun, découvert en 1640 dans le New Jersey (Etats-Unis). Les cristaux de diverses couleurs (translucides, blancs, verts ou bleus) sont variables également en taille. En Europe, on en trouve de petite taille en Belgique à Moresnet, district de Plombières-Vieille Montagne. [Note d'Yves Antuszewicz]

²⁸ A ce sujet une mention est due aux longues recherches, effectuées par Paul Hautefeuille et son dévoué collaborateur Ferrey, pour la reproduction de l'émeraude. Cette variété chromifère de béryl est sortie, en tout semblable aux plus belles plus belles émeraudes naturelles, avec leur somptueuse parure verte, des fourneaux qui, durant plusieurs années, ont fonctionné sans arrêt dans le laboratoire de minéralogie de la Sorbonne. Malheureusement, au point de vue pratique et malgré l'habileté

silicate double d'aluminium et de glucinium $6\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{GlO}$. Le vanadate de lithium ne pouvait pas servir à cette synthèse à cause de la facilité avec laquelle la silice et la glucine s'unissent dans ce milieu en produisant la phénacite. Ils lui ont substitué le bimolybdate de lithium qui s'unit à la silice, l'alumine et la glucine en formant au rouge sombre une combinaison cristallisée en octaèdres dans laquelle entrent aussi la lithine et l'acide molybdique. Mais peu à peu cette combinaison se détruit si l'on élève la température et si on la maintient à 800° , pendant une quinzaine de jours : il s'en sépare des prismes hexagonaux d'émeraude. Lorsque les matières premières ont été additionnées d'une petite quantité d'oxyde de chrome, les cristaux ont la belle couleur verte de l'émeraude naturelle, ils en ont aussi la parfaite limpidité et toutes les propriétés physiques; l'addition d'oxyde ferrique produit de l'émeraude jaunâtre, celle d'un protoxyde (chaux, magnésie, oxyde de zinc) modifie les dimensions relatives du prisme hexagonal.

A ces recherches se rattachent des mémoires cristallographiques sur la blende zonée, sur la forme des cristaux obtenus par la volatilisation apparente de la *greenockite* et de la *wurtzite*²⁹, sur la cristallisation de la *glucine*, sur la variation provoquée des formes des émeraudes de synthèse, sur l'existence de silicates différents dans des cristaux homogènes en apparence, sur l'application du procédé de l'amorçage pour provoquer la formation de certains silicates, mémoires à la lecture desquels on ne sait ce qu'il faut louer le plus : de la sagacité de l'invention, de l'habileté patiente du praticien et de la finesse de l'observateur.

Dès que les expériences de H. Sainte-Claire Deville eurent mis en évidence les phénomènes de *dissociation* et défini les conditions des réactions inverses, P. Hautefeuille ébaucha l'étude de la dissociation de l'acide iodhydrique. Il trouva que ce gaz commence à se dissocier vers 180° sous la pression normale, que la proportion dissociée est 2,6% à 440° et atteint 3,4% lorsque la température devient 700° et que réciproquement les éléments gazeux se combinent aux mêmes températures en donnant les mêmes mélanges. Il fit voir, de plus, que si les iodures et les bromures peuvent être décomposés par le gaz chlorhydrique aux températures élevées,

des opérateurs, il n'a pas été possible d'obtenir des cristaux assez gros pour pouvoir être utilisés comme gemmes. [Notice historique sur le troisième fauteuil de la section de minéralogie lue dans la séance publique annuelle du 17 décembre 1928 par Alfred Lacroix]

²⁹ La wurtzite est un sulfure de zinc, que l'on trouve dans les gîtes métallifères. On en trouve dans les mines de lapis-lazuli d'Afghanistan et plus récemment dans les mines de Merelani, en Tanzanie. Mais on trouve aussi en Allemagne, en Bohême et en Roumanie. L'étymologie du nom est en l'honneur du célèbre chimiste alsacien, Charles Adolphe Wurtz. Voir la Fig. 15 dans les illustrations des minéraux. [Note d'Yves Antuszewicz]

inversement les chlorures peuvent être transformés en bromures ou iodures par les gaz bromhydrique et iodhydrique, qui se dissocient aux mêmes températures.

Bientôt commença entre M. L. Troost et P. Hautefeuille une collaboration qui, pendant dix années, se signala par le nombre, la précision, l'originalité et l'importance des résultats obtenus. Abordant l'étude des transformations polymériques de certains corps, ils montrèrent par des expériences, qui n'ont laissé aucune prise à la critique, l'analogie que présentent les lois de ces transformations avec les lois de la dissociation des corps composés. Ils établirent, par exemple, que le cyanogène enfermé dans un vase sous une pression initiale F , à une température constante T° exerce sur les parois une pression qui diminue graduellement jusqu'à une valeur f , qu'il conserve aussi longtemps que la température est invariable, en même temps qu'il se dépose sur les parois du vase du paracyanogène solide. Inversement, si l'on met du paracyanogène dans un tube que l'on ferme après y avoir fait le vide et qu'on porte sa température à T° , la tension initiale, nulle d'abord, augmente graduellement jusqu'à la valeur f qui n'est pas dépassée quelle que soit la durée de l'expérience, le tube contient alors du cyanogène à cette tension que les auteurs ont appelée *tension de transformation des deux corps*. La valeur de cette tension augmente avec la température : égale à 54 mm. à 502° , elle augmente régulièrement et atteint 1310 mm. à 640° .

Le phénomène est d'une netteté parfaite et sa loi est analogue à celle de la dissociation du carbonate de calcium. M. L. Troost et P. Hautefeuille ont ensuite envisagé un problème plus complexe et plus délicat, celui des transformations de l'acide cyanurique cristallisé soluble et de son isomère la cyamélide insoluble en acide cyanique, dont la composition chimique est aussi la même, et les transformations inverses. Les difficultés des expériences tenaient surtout à l'inégalité très grande des vitesses des transformations inverses aux mêmes températures et à la nécessité de ne pas dépasser la température de 350° au-delà de laquelle la transformation est accompagnée d'une décomposition. Les auteurs ont trouvé que l'acide cyanurique et la cyamélide, solides tous deux, présentent, en dégageant l'acide cyanique gazeux aux mêmes températures, les mêmes tensions de transformation qui varient régulièrement, depuis 56 mm. tension à 160° jusqu'à 1200 mm. à 350° . Quant à la transformation inverse de l'acide cyanique gazeux elle produit, de 350° à 160° de l'acide cyanurique avec des tensions égales aux valeurs trouvées aux mêmes températures, mais ces valeurs ne sont atteintes qu'au bout d'un temps beaucoup plus long.

Une autre étude non moins intéressante, et qui présentait de sérieux dangers d'exécution, est celle des transformations réciproques du phosphore incolore en phosphore rouge. Lorsqu'on chauffe en vase clos du phosphore incolore à l'une des températures supérieures à son point normal d'ébullition (278°) sa vapeur prend une tension initiale F et, si la température est maintenue constante, on observe que la tension diminue graduellement jusqu'à un minimum f , qu'elle conserve ensuite tant que la température ne change pas, en même temps qu'un enduit rouge couvre la paroi interne du vase. Cette tension f est aussi celle qu'atteint la vapeur émise dans un tube vide d'air où l'on aurait enfermé du phosphore rouge.

La tension F est la force élastique maxima de la vapeur de phosphore, f la tension de transformation du phosphore à la température T . M. L. Troost et P. Hautefeuille ont déterminé ces tensions aux températures comprises entre 360° et 577° . Les courbes, qui représentent leurs expériences, ont même allure, les tensions maxima ayant toujours des valeurs plus grandes. Ces importants résultats mettent en évidence de la manière la plus nette les analogies que présentent les phénomènes de transformation polymériques avec les phénomènes de dissociation et aussi avec la vaporisation des corps. Il y a pourtant une différence qui n'a pas échappé à la perspicacité des auteurs. Si l'on, fait arriver des vapeurs d'acide cyanique ou de phosphore dans une enceinte dont deux régions sont à des températures différentes, le dépôt d'acide cyanurique ou de phosphore rouge, au lieu de se produire sur la paroi froide comme cela arrive dans le cas des vapeurs, se fait sur la région la plus chaude et la vapeur a la tension de transformation qui correspond à la température de cette région. Dans le cas de l'acide cyanique, par exemple, nous avons vu qu'à 160° la tension de transformation est 56 mm. et qu'à 360° elle est 1200 mm.; si nous supposons que dans la même enceinte deux régions soient l'une à 160° , l'autre à 360° , le dépôt d'acide cyanurique se fera sur la paroi chaude et la tension de l'acide cyanique atteindra 1200 mm. Ce sont là des phénomènes remarquables de faux équilibres.

Il convient de citer, après ces travaux d'une nouveauté saisissante, l'étude de l'absorption de l'hydrogène par les métaux alcalins, et de la dissociation des hydrures de potassium et de sodium K^2H et Na^2H ; celle de l'absorption de l'hydrogène par le palladium conduisant à l'existence du composé dissociable de formule Pd^2H qui peut lui-même absorber des quantités considérables d'hydrogène.

Envisageant un autre sujet de recherches M. L. Troost et P. Hautefeuille firent connaître des composés fluorés et

chlorés nouveaux du silicium : le sous-fluorure est un gaz qu'ils obtinrent en chauffant à 1200° le silicium amorphe, qui est parfaitement fixe à cette température, dans un courant de tétrafluorure de silicium; ce gaz se détruit à la température plus basse, de l'extrémité du tube de porcelaine, et il y dépose du silicium cristallisé en reproduisant le fluorure initial. De là un moyen de réaliser, par volatilisation apparente, le transport du silicium amorphe et sa cristallisation, ou bien, si l'on refroidit brusquement l'extrémité de l'appareil, de condenser le sous-fluorure. De même, le dichlorure de silicium résulte de l'action du tétrachlorure sur du silicium chauffé à la fusion. Si le courant de vapeur est lent, il y a transport et cristallisation du silicium; s'il est plus rapide et, si les produits gazeux sont brusquement refroidis, on condense un mélange de dichlorure, de trichlorure et de tétrachlorure de silicium.

On sait qu'un mélange de vapeur de tétrachlorure de silicium et d'air ou d'oxygène chauffé fortement produit de nombreux oxychlorures; M. L. Troost et P. Hautefeuille en ont isolé six dont un seul était connu, ont démontré que chacun d'eux se dédouble, à haute température en tétrachlorure et oxychlorure plus oxygénés et les ont caractérisés par l'étude de leurs propriétés et la préparation des éthers qui en dérivent. Ils ont obtenu des composés analogues par l'action de l'oxygène sur les tétrachlorures de titane et de zirconium. A cette occasion, ils ont mis en évidence, par des expériences variées, l'action du chlorure de bore sur le vernis des tubes de porcelaine d'où résulte la formation du chlorure de silicium et celle du chlorure double d'aluminium et de potassium, et ils ont constaté que le chlorure de silicium est sans action sur le vernis feldspathique, mais réagit sur l'alumine libre et la zircone.

Des recherches calorimétriques délicates et d'un intérêt évident pour la métallurgie les ont conduits à des résultats de nature à éclairer la pratique industrielle. Entre autres déterminations précises, j'indiquerai qu'un équivalent de silicium qui se transforme en silice dégage environ deux fois plus de chaleur qu'un équivalent de carbone lorsqu'il devient de l'anhydride carbonique et trois fois plus que le même équivalent de carbone transformé en oxyde de carbone. Mais, le problème le plus intéressant qu'ils aient résolu, c'est la comparaison des combinaisons du fer et du manganèse avec les différents corps simples non métalliques : carbone, silicium, phosphore et soufre. Ils ont trouvé que les quantités de chaleur dégagées par l'union du manganèse avec ces corps simples sont notablement supérieures à celles qui se dégagent dans la formation des composés correspondants de ces mêmes

corps avec le fer; comme, d'autre part, les composés du manganèse s'oxydent en dégageant plus de chaleur que les composés qui contiennent des quantités équivalentes de fer, on s'explique aisément, d'après ces déterminations, que les ferromanganèses éliminent les corps non métalliques de leurs combinaisons avec le fer dans les fontes diverses qu'ils transforment en fer doux et passent facilement dans les scories. Tels sont les résultats les plus saillants d'une collaboration féconde à la fois par le nombre, l'importance, la variété des difficultés vaincues et par l'éclat de découvertes dont le temps n'a pas diminué la portée.

Pour montrer la flexibilité du talent de P. Hautefeuille et la souplesse avec laquelle il savait se plier aux recherches les plus diverses, je vais sommairement donner quelques exemples. Il collabora avec son maître H. Deville dans un travail qui avait pour objet la mesure des propriétés explosives du chlorure d'azote. De nombreuses déterminations calorimétriques il résulte que, si le chlorure d'azote détonait sans produire de travail extérieur, la température du chlore et de l'azote atteindrait 2128° sous la pression de 5361 atmosphères.

Avec M. Cailletet³⁰ il réalisa des recherches sur les changements d'état des gaz au voisinage du point critique; sur la liquéfaction des mélanges gazeux et sur la mesure des densités de l'oxygène, de l'azote et de l'hydrogène retenus sous une pression de 300 atmosphères dans l'anhydride carbonique liquéfié.

Avec Margottet, il étudia les produits de la combustion eudiométrique de l'hydrogène avec l'oxygène et le chlore.

Les recherches que P. Hautefeuille entreprit avec M. J. Chappuis peuvent être plus facilement analysées. Après avoir établi par des expériences variées l'influence de la pression sur la transformation de l'oxygène en ozone, ils ont montré qu'elle est bien plus complète aux basses températures et que, par exemple, la tension de l'ozone dans le mélange est quintuplée quand on passe de $+ 20^{\circ}$ à $- 55^{\circ}$. Avec l'ozone à haute tension ils ont réalisé de remarquables expériences, montré qu'une compression brusque le détruit avec détonation, et étudié les effets d'une compression lente. Dans ce cas, si l'on élève la pression jusqu'à 125 atmosphères dans un tube dont la partie fermée et recourbée est refroidie vers $- 100^{\circ}$ par un jet d'éthylène liquide et si l'on attend que l'intérieur du tube de verre épais se soit mis en équilibre de

³⁰ Louis Cailletet (1832-1913). Voir sa photographie dans les illustrations des chimistes.

température avec l'extérieur on observe la formation, à la pointe du tube, d'une colonne liquide d'un bleu indigo foncé. C'est l'ozone liquéfié qui par évaporation donne un gaz bleu ayant un spectre d'absorption aussi caractéristique que son odeur et pouvant servir à le reconnaître dans les mélanges gazeux. Cette propriété fut utilisée peu après par ceux qui l'avaient découverte dans une étude très délicate qui devait les conduire à trouver l'anhydride perazotique.

Le passage de l'électricité à travers un mélange d'azote et d'oxygène avait été étudié depuis Cavendish par un grand nombre de savants. Si le mélange est humide on savait qu'il se produit de l'acide azotique lorsqu'il est traversé par des étincelles à haute tension; s'il est sec on voyait se former des vapeurs nitreuses. P. Hautefeuille et M. J. Chappuis, en se servant d'effluves et d'un mélange d'azote et d'oxygène secs et refroidis obtinrent un composé nouveau très volatil. Ce corps est caractérisé par un spectre d'absorption très différent de celui de l'ozone qui se produit plus ou moins dans l'expérience, surtout quand l'azote est en petite quantité. Ce spectre diffère aussi du spectre d'absorption du peroxyde d'azote qui se forme aussi par le passage de l'étincelle électrique dans le même milieu et c'est en suivant au spectroscopie les phases des expériences que les auteurs ont pu déterminer avec précision les meilleures conditions pour l'obtenir seul. Ce composé nouveau se dépose sous forme de cristaux incolores lorsque les parois de l'appareil sont refroidies à -26° ; mis au contact de l'eau, il donne les réactions des acides, de là le nom d'anhydride perazotique qu'il a reçu; sa composition est exprimée par la formule Az^2O^6 . Il se détruit à toutes les températures supérieures à 0° ; la décomposition est complète à 130° et il se sépare en peroxyde d'azote et oxygène. Les auteurs estiment que ce corps, qui ne se produit que sous l'influence des faibles tensions électriques et qui se décompose au contact de l'eau en acide azotique est peut-être le composé intermédiaire de la transformation de l'air en acide azotique dans la production des azotates naturels.

Enfin, parmi d'autres travaux dont la plupart ne se prêtent pas à une analyse sommaire, j'en signalerai encore deux qui montrent d'une manière piquante la sagacité de P. Hautefeuille et de M. Perrey; le premier est relatif au rochage de l'argent et de l'or fondus dans la vapeur de phosphore, le second est une étude très soignée de la neige phosphorique.

On sait que l'argent fondu absorbe une quantité notable d'oxygène qu'il abandonne, pour la plus grande partie, par refroidissement au moment de la solidification, avec

soulèvement de la masse, c'est le phénomène du rochage. Pour l'expliquer, on fait remarquer que les corps dissolvent les gaz en plus grande quantité lorsqu'ils sont liquéfiés qu'à l'état solide et aussi que l'argent, lentement refroidi reste surfondu au-dessous de la température de fusion, ce qui exagère encore l'émission gazeuse. Aucun corps ne ressemble moins à l'oxygène que le phosphore; les auteurs ont pourtant découvert que l'argent fondu produit les mêmes effets sur tous les deux. Liquéfié dans une nacelle à l'intérieur d'un tube de porcelaine, où l'on fait arriver de la vapeur de phosphore, il en absorbe une certaine quantité, la retient pendant le refroidissement tant qu'il est liquide et l'abandonne au moment de la solidification. Alors se produit un foisonnement qui se manifeste par une grappe de bulles métalliques plus ou moins volumineuses à parois minces qui ont été gonflées par la vapeur de phosphore.

L'or qui ne roche pas dans l'oxygène, fondu dans une atmosphère de phosphore et refroidi présente les mêmes particularités que l'argent.

Depuis plus d'un siècle tous les chimistes ont brûlé du phosphore dans l'air ou l'oxygène sans remarquer que les flocons neigeux qu'ils obtenaient et qui produisent au contact de l'eau, avec bruissement, une solution acide n'étaient pas une matière homogène.

P. Hautefeuille et M. Perrey ont découvert que la combustion du phosphore contenu dans un tube traversé par un courant d'air ou d'oxygène en excès, produit trois anhydrides : l'un plus volatil que les autres va se condenser dans la partie froide du tube : c'est l'anhydride cristallisé, observé antérieurement par Schrötter, formé de cristaux clinorhombiques très rapidement solubles dans l'eau; le deuxième anhydride est une poudre amorphe qui s'accumule dans les régions du tube échauffées par la combustion et le troisième reste sur la paroi du tube chauffée au rouge sous forme d'une masse vitreuse. L'anhydride cristallisé a une tension de vapeur qui atteint 760 mm. à 250° et, si on le chauffe au-delà de cette température, il se polymérise en anhydre amorphe dont la tension n'est que de quelques millimètres. Cette polymérisation est accompagnée d'un dégagement de 3,26 calories; la poudre amorphe qui en résulte produit, au contact d'un excès d'eau des grumeaux gélatineux qui, suivant leur abondance, exigent de 15 minutes à plusieurs heures pour se dissoudre. Ces deux anhydrides, chauffés au rouge naissant, sous une forte tension de vapeur, fondent en une masse vitreuse, incolore, transparente, qui se fendille par refroidissement avec bruit et lueurs, comme l'anhydride borique. Il est très adhérent au verre dont il détermine

souvent la rupture en se refroidissant. Chauffé au rouge naissant dans un tube, il reproduit, par sublimation, l'anhydride cristallisé sans laisser de résidu. Il ne se dissout dans l'eau que très lentement en produisant, comme les deux autres une solution d'acide métaphosphorique.

On n'aurait qu'une idée fort incomplète des mérites de Paul Hautefeuille, si l'on se bornait à estimer sa valeur par l'importance de ses découvertes scientifiques. On peut dire que chez lui la bonté l'emportait encore sur la science. Tous ceux qui l'ont connu savent qu'il fut un admirable modèle de piété filiale. Pendant 30 ans il prodigua à sa mère paralysée des soins aussi assidus qu'intelligents avec autant de tendresse que de persévérance; puis il se consacra à consoler la vieillesse de son père et ne se permit de penser à lui qu'après leur avoir fermé les yeux à tous deux. Resté seul, il se souvint qu'il avait entrevu, peu de temps auparavant, une personne appartenant à l'une des familles les plus honorables de Valenciennes dont les qualités exceptionnelles l'avaient vivement frappé; il lui demanda d'unir sa vie à la sienne. Ils se créèrent un intérieur un peu retiré du monde, mais fécond en bonnes œuvres de toute nature. Cette union parfaite dura 20 années, elle s'est dénouée en quelques instants. Le 8 décembre 1902, au matin, après avoir tracé avec sa femme le programme de la journée - programme qui n'avait en vue que le bonheur des autres - il sentit tout à coup une vive douleur de tête, qu'en médecin il jugea être la dernière. Il demanda et reçut les secours de la religion dont il avait toujours scrupuleusement et modestement pratiqué tous les préceptes et il s'éteignit en paix, laissant à sa veuve pour consolation le souvenir des 20 années de bonheur qu'ils se sont données l'un à l'autre.

Comme son illustre et cher maître, H. Sainte-Claire Deville, P. Hautefeuille était un homme de cœur. Très sensible au malheur des autres, il leur venait en aide de la bonne manière : largement, discrètement et avec discernement. Comme lui, il était bienveillant et pratiquait non seulement cette bienveillance stricte dont on a dit qu'elle est « le commencement de la justice » mais celle beaucoup plus large et plus précieuse, qui laisse un souvenir de vive reconnaissance au cœur de ceux qui en sont l'objet.

L'Académie des sciences avait récompensé ses travaux en lui décernant le prix Lacaze (1882) et en l'appelant dans la section de Minéralogie à remplacer Mallard (1895).

Ses anciens camarades de l'École Centrale lui avaient donné un témoignage de leurs vives sympathies en le nommant membre du comité de leur Association amicale et depuis 1895

l'Administration de l'École avait fait appel à ses lumières en le choisissant pour faire partie du Conseil de Perfectionnement.

LISTE DES MEMOIRES ET PUBLICATIONS DE P. HAUTEFEUILLE.

1. Reproduction du rutile et de la brookite. *Comptes rendus*, 1863, t. **57**, p. 148.
2. Reproduction de l'anatase. *Ibid.*, 1864, t. **59**, p. 188.
3. Reproduction du sphène. *Ibid.*, 1864, t. **59**, p. 698.
4. Etudes sur les titanales et les silicates. *Ibid.*, t. **59**, p. 722.
5. Etudes sur la reproduction des minéraux titanifères (thèse soutenue devant la Faculté des sciences). *Annales de Chimie et de Physique*, 1865, 4^e série, t. **4**, p. 129.
6. Recherches sur les résines (thèse soutenue devant la Faculté de médecine de Paris), 1865.
7. Sur quelques réactions inverses. *Comptes rendus*, 1867, t. **64**, p. 704
8. Action de la chaleur sur l'acide iodhydrique. *Ibid.*, 1867, t. **64**, p. 688.
9. Action de l'acide iodhydrique sur quelques chlorures et sulfures. *Bulletin de la Société chimique*, 1867, p. 198.
10. Iodure de titane. *Ibid.*, 1867, p. 201.
11. Chaleur de combinaison des acides sulfhydrique et sélénhydrique, *Comptes rendus*, 1869, t. **68**, p. 1554,
12. Sur les chlorovanadates. *Ibid.*, 1873, t. **27**, p. 896.
13. Reproduction de l'albite. *Ibid.*, 1877, t. **84**, p. 1301.
14. Reproduction de l'orthose. *Ibid.*, 1877, t. **85**, p. 952.
15. Reproduction de la tridymite. *Ibid.*, 1878, t. **86**, p. 1133.
16. Reproduction du quartz. *Ibid.*, 1878, t. **86**, p. 1194.
17. Reproduction de l'amphigène. *Ibid.*, 1880, t. **90**, p. 213.
18. Sur un silicate de sesquioxyde de fer et de potasse correspondant à l'amphigène. *Ibid.*, 1880, t. **90**, p. 378.
19. Sur deux nouveaux silicates d'alumine et de lithine. *Ibid.*, 1880, t. **90**, p. 541.
20. Sur une propriété nouvelle des vanadates. *Ibid.*, 1880, t. **90**, p. 774.
21. Sur la reproduction simultanée de l'orthose et du quartz. *Ibid.*, 1880, t. **90**, p. 830.
22. Sur deux nouveaux silicotitanates de soude. *Ibid.*, 1880, t. **90**, p. 868.
23. Mémoire sur la reproduction de quelques minéraux et sur une nouvelle méthode pour obtenir des combinaisons cristallisées par la voie sèche. *Annales de l'École normale supérieure*, 2^e série, t. **9**, p. 365.
24. Observations cristallographiques sur une variété de blende naturelle. *Comptes rendus*, 1881, t. **93**, p. 774,
25. Sur la cristallisation de la greenockite et de la wurtzite. *Ibid.*, 1881, t. **93**, p. 824.

En collaboration avec H. SAINTE-CLAIRE DEVILLE.

26. Mesure des propriétés explosives du chlorure d'azote. *Comptes rendus*, 1869, t. **69**, p. 152.

En collaboration avec M. L. TROOST.

27. Sur la production du paracyanogène. *Comptes rendus*, 1868, t. **64**, p. 735.
28. Lois de la transformation du paracyanogène en cyanogène et de la transformation inverse. *Ibid.*, t. **66**, p. 795, et *Annales scientifiques de l'École normale supérieure*, 1868, 2^e série, t. **2**, p. 252.
29. Sur quelques propriétés de l'acide cyanique. *Comptes rendus*, 1868, t. **67**, p. 1195.
30. Lois de la transformation de l'acide cyanique en ses isomères et de la transformation inverse. *Ibid.*, 1868, t. **67**, p. 1345.
31. Chaleur de transformation de quelques isomères. *Ibid.*, 1869, t. **69**, p. 48.
32. Chaleur de combustion de l'acide cyanique et de ses isomères. *Ibid.*, 1869, t. **69**, p. 102.
33. Chaleur de combinaison du bore avec le chlore et avec l'oxygène. *Ibid.*, t. **70**, p. 185, et *Annales de Chimie et de Physique*, 1870, 4^e série, t. **9**, p. 71.
34. Chaleur de combinaison du silicium avec le chlore et avec l'oxygène. *Comptes rendus*, 1870, t. **70**, p. 252.
35. Sur les phénomènes calorifiques qui accompagnent la transformation de l'acide hypoazotique en acide azotique et l'introduction de ces deux corps dans les composés organiques. *Ibid.*, 1871, t. **73**, p. 378.
36. Sur la volatilisation apparente du bore et du silicium; existence d'un maximum de la tension de dissociation. *Ibid.*, t. **73**, p. 443, et *Annales de Chimie et de Physique*, 1871, 5^e série, t. **7**, p. 454.

37. Sur les sous-chlorures et les oxychlorures de silicium. *Comptes rendus*, t. **73**, p. 563, et *Annales de Chimie et de Physique*, 1871, 5^e série, t. **7**, p. 459.
38. Sur les spectres du carbone, du bore, du silicium, du titane et du zirconium. *Comptes rendus*, 1871, t. **73**, p. 620.
39. Action de la chaleur sur les oxychlorures de silicium. *Ibid.*, t. **74**, p. 111, et *Annales de Chimie et de Physique*, 1872, 6^e série, t. **7**, p. 469.
40. Sur quelques dérivés organiques des oxychlorures de silicium. *Comptes rendus*, 1872, t. **75**, p. 1710.
41. Sur quelques réactions des chlorures de bore et de silicium. *Ibid.*, 1872, t. **75**, p. 1819.
42. Recherches sur les transformations allotropiques du phosphore (1^{er} mémoire). *Ibid.*, 1873, t. **76**, p. 76.
43. Recherches sur les transformations allotropiques du phosphore (2^e mémoire). *Ibid.*, t. **76**, et *Annales scientifiques de l'École normale supérieure*, 1873, 2^e série, t. **2**, p. 269.
44. Recherches sur l'enrichissement des fontes et de l'acier en silicium. *Comptes rendus*, t. **76**, p. 482, et *Annales des mines*, 1873.
45. Recherches sur la dissolution des gaz dans la fonte, l'acier et le fer. *Comptes rendus*, 1873, t. **76**, p. 562.
46. Sur le palladium hydrogéné. *Ibid.*, t. **78**, p. 686, et *Annales de Chimie et de Physique*, 1874, 5^e série, t. **2**, p. 279.
47. Sur les chaleurs de combustion des diverses variétés de phosphore rouge. *Comptes rendus*, t. **78**, p. 748, et *Annales de Chimie et de Physique*, 1874, 5^e série, t. **2**, p. 145.
48. Sur les alliages que forme l'hydrogène avec les métaux alcalins. *Comptes rendus*, t. **78**, p. 807, et *Annales de Chimie et de Physique*, 1854, 5^e série, t. **2**, p. 275.
49. Sur la densité de l'hydrogène combiné aux métaux. *Comptes rendus*, 1874, t. **78**, p. 968.
50. Sur la dissolution de l'hydrogène dans les métaux de la famille du fer et sur la décomposition de l'eau à la température ordinaire par le fer. *Ibid.*, 1875, t. **80**, p. 788.
51. Recherches sur les fontes manganésifères. *Ibid.*, 1875, t. **89**, p. 909.
52. Etudes calorimétriques sur les carbures de fer et de manganèse, nouveau carbure de manganèse. *Ibid.*, 1875, t. **80**, p. 964.
53. Étude calorimétrique sur les siliciures de fer et de manganèse. *Ibid.*, 1875, t. **81**, p. 264.
54. Sur un borure de manganèse cristallisé et sur le rôle du manganèse dans la métallurgie du fer. *Ibid.*, t. **81**, p. 1263, et *Annales de Chimie et de Physique*, 1876, 5^e série, t. **9**, p. 65.
55. Recherches critiques sur certaines méthodes employées pour la détermination des densités de vapeur et sur les conséquences qu'on en tire. *Comptes rendus*, 1876, t. **83**, p. 220.
56. Sur les lois de compressibilité et les coefficients de dilatation de quelques vapeurs. *Ibid.*, 1876, t. **83**, p. 333.
57. Sur les causes d'erreur qu'entraîne l'application de la loi des mélanges des vapeurs dans la détermination de leur densité. *Ibid.*, 1876, t. **83**, p. 597.
58. Sur les corps susceptibles de se produire à une température supérieure à celle qui détermine leur décomposition complète. *Ibid.*, 1877, t. **84**, p. 946.
59. Sur un nouveau mode de préparation des oxychlorures de silicium. *Bulletin de la Société chimique de Paris*, 1881, t. **35**, p. 360.

En collaboration avec M. L. CAILLETET.

60. Recherches sur les changements d'état dans le voisinage du point critique de température. *Comptes rendus*, 1881, t. **92**, p. 840.
61. Recherches sur la liquéfaction des mélanges gazeux. *Ibid.*, 1881, t. **92**, p. 901.
62. Sur les densités de l'oxygène, de l'hydrogène et de l'azote liquéfiés en présence d'un liquide sans action chimique sur ces corps simples. *Ibid.*, 1881, t. **92**, p. 1086.

En collaboration avec M. J. CHAPPUIS.

63. Recherches sur l'ozone. *Comptes rendus*, 1880, t. **91**, p. 228.
64. Recherches sur l'effluve électrique. *Ibid.*, 1880, t. **91**, p. 281.
65. Sur la liquéfaction de l'ozone et sur sa couleur à l'état gazeux. *Ibid.*, 1880, t. **91**, p. 122.
66. Recherches sur la transformation de l'oxygène en ozone par l'effluve électrique en présence d'un gaz étranger. *Ibid.*, 1880, t. **91**, p. 762.

67. Sur la liquéfaction de l'ozone en présence de l'acide carbonique et sur sa couleur à l'état liquide. *Ibid.*, 1880, t. **91**, p. 815.
68. De la recherche des composés gazeux et de l'étude de quelques-unes de leurs propriétés à l'aide du spectroscope; acide perazotique. *Ibid.*, 1881, t. **92**, p. 80.
69. Quelques faits pour servir à l'histoire de la nitrification, *Ibid.*, 1881, t. **92**, p. 134.
70. Sur la rétrogradation produite par l'effluve électrique dans la transformation de l'oxygène en ozone. *Ibid.*, 1882, t. **94**, p. 646.
71. Sur l'acide perazotique. *Ibid.*, 1882, t. **94**, p. 1111.
72. Sur la composition et l'équivalent en volume de l'acide perazotique. *Ibid.*, 1882, t. **94**, p. 1306.
73. Sur la liquéfaction de l'ozone. *Ibid.*, 1882, t. **94**, p. 1249.
74. Action des effluves électriques sur l'oxygène et l'azote en présence du chlore. *Ibid.*, 1884, t. **98**, p. 626.
75. Recherches sur l'ozone. *Annales de l'École normale supérieure*, 1884, 3^e série, t. **1**, p. 55.
76. Recherches sur l'acide perazotique. *Ibid.*, 1884, 3^e série, t. **1**, p. 103.

En collaboration avec J. MARGOTTET.

77. Sur la silice et les silicates de lithine. *Comptes rendus*, 1881, t. **93**, p. 686.
78. Recherches sur les phosphates cristallisés. *Ibid.*, 1883, t. **96**, p. 849.
79. Recherches sur quelques phosphates doubles. *Ibid.*, 1883, t. **96**, p. 1142.
80. Sur une combinaison d'acide phosphorique et de silice. *Ibid.*, 1883, t. **96**, p. 1052.
81. Sur le polymorphisme du phosphate de silice. *Ibid.*, 1884, t. **99**, p. 789.
82. Sur les combinaisons de l'acide phosphorique avec l'acide titanique, le zircon et l'acide stannique. *Ibid.*, 1886, t. **102**, p. 1018.
83. Sur un phosphate de silice hydraté. *Ibid.*, 1887, t. **104**, p. 111.
84. Sur les phosphates de sesquioxyde de fer et d'alumine. *Ibid.*, 1888, t. **106**, p. 135.
85. Sur la synthèse simultanée de l'eau et de l'acide chlorhydrique. *Ibid.*, 1889, t. **109**, p. 641.

En collaboration avec M. A. PERREY.

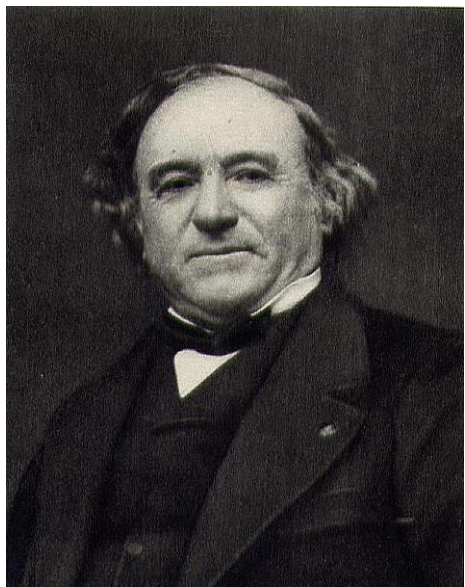
86. Sur le rochage de l'or et de l'argent dans la vapeur de phosphore. *Comptes rendus*, 1884, t. **98**, p. 1378.
87. Sur l'acide phosphorique anhydre. *Ibid.*, 1884, t. **99**, p. 33.
88. Sur les oxychlorures d'aluminium. *Ibid.*, 1885, t. **100**, p. 1219.
89. Sur la volatilisation apparente du silicium à 440°. *Ibid.*, 1885, t. **100**, p. 1220.
90. Sur l'action minéralisatrice des sulfures alcalins. Reproduction de la cymophane. *Ibid.*, 1888, t. **106**, p. 487.
91. Sur la reproduction de la phénacite et de l'émeraude. *Ibid.*, 1888, t. **106**, p. 1800.
92. Sur les combinaisons silicatées de la glycine. *Ibid.*, 1888, t. **107**, p. 786.
93. Sur la reproduction du zircon. *Ibid.*, 1888, t. **107**, p. 1000.
94. Sur la préparation et les propriétés de l'orthose ferrique. *Ibid.*, 1888, t. **107**, p. 1150.
95. Sur les silicoglucinate de soude. *Ibid.*, 1890, t. **110**, p. 344.
96. Sur les combinaisons silicatées de la glucine. *Annales de Chimie et de Physique*, 6^e série, t. **20**.
97. Sur la cristallisation de l'alumine et de la glucine dans les silicates. *Société minéralogique de Paris*, 1890, t. **13**, p. 147.
98. Sur diverses combinaisons silicatées des oxydes de cobalt et de zinc, de la magnésie et de la glucine. *Ibid.*, 1890, t. **13**, p. 141.
99. Sur la cristallisation de l'alumine et de quelques autres oxydes dans l'acide chlorhydrique. *Comptes rendus*, t. **110**, p. 1038.
100. Contribution à l'étude des levures. *Ibid.*, 1894, t. **118**, p. 589.

En collaboration avec L. PÉAN DE SAINT-GILLES.

101. Sur la reproduction, des micas. *Comptes rendus*, 1887, t. **104**, p. 508.
102. H. Sainte-Claire Deville, ses travaux minéralogiques, leçon d'ouverture du cours de minéralogie, le 26 mars 1885. *Revue scientifique*, 25 avril 1885.

Illustrations

Chimistes



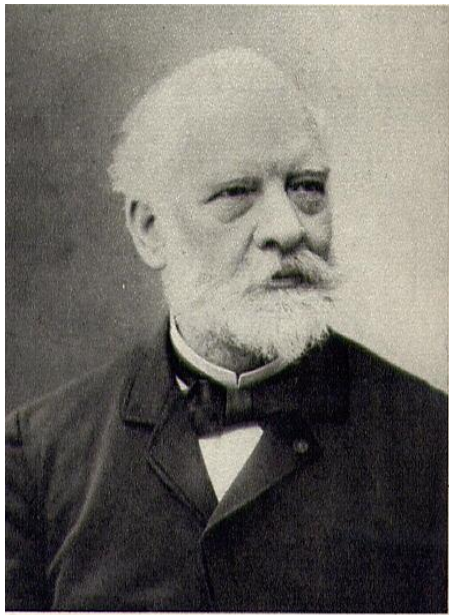
Jean-Baptiste Dumas (1800-1884)



Charles-Adolphe Wurtz (1817-1884)



Henri Sainte-Claire Deville (1818-1881)

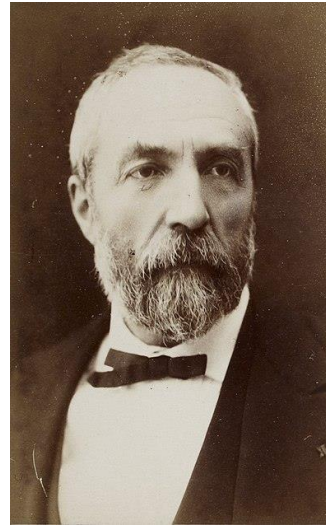


Charles Friedel (1832-1899)

Elèves de Sainte-Claire Deville



Augustin Alexis Damour (1808-1902)



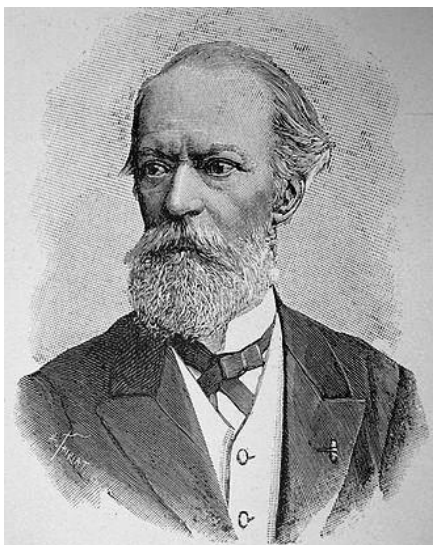
Ferdinand André Fouqué (1828-1904)
(Eugène Pirou, 1883)



Alfred Ditte (1843-1908)



Louis-Joseph Troost (1825-1911)



Paul Hautefeuille (1836-1903)



Louis Paul Cailletet (1832-1913) en 1909

Minéraux

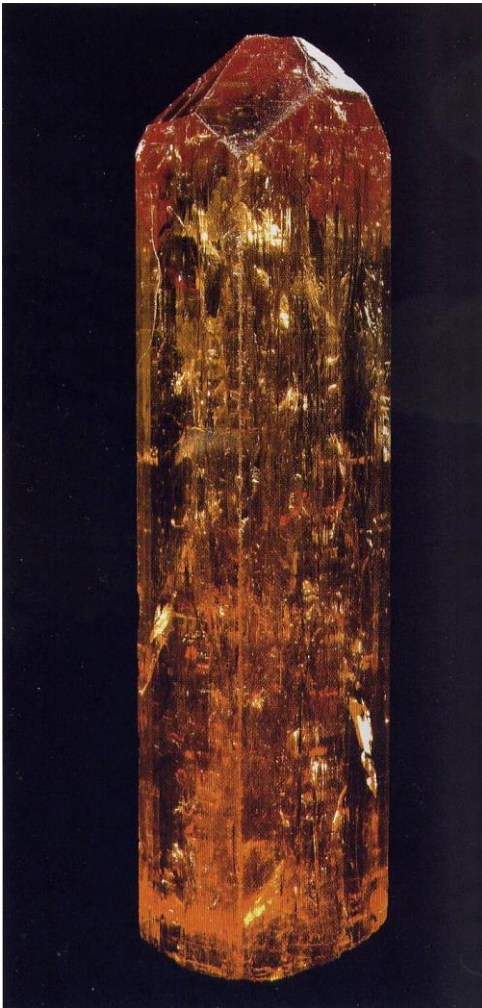


Fig. 1 : topaze impériale (Ouro Preto, Brésil)

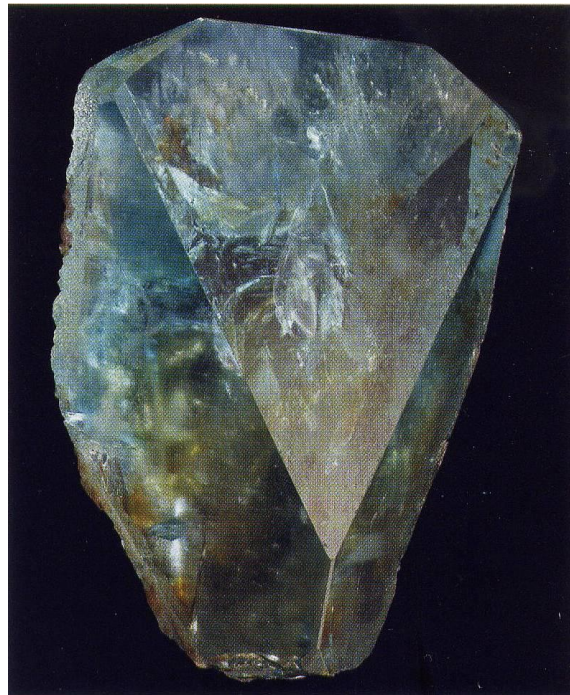


Fig. 2 : autre topaze du Brésil (Virgem de Lapa)



Fig. 3 rutile (Brésil)



Fig. 4 anatase (Norvège)



Fig. 5 brookite (Balouchistan)



Fig. 6 sphère (Pakistan)

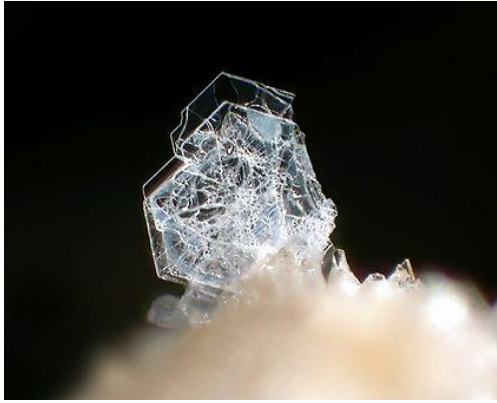


Fig. 7 tridymite (Ochtendung, Eifel, Allemagne)



Fig. 8 Albite avec lépidolite (Brésil)



Fig. 9 orthose (Brésil)



Fig. 10 oligoclase



Fig. 11 néphéline (Ontario)



Fig. 12 pétalite (Afghanistan)



Fig. 13 phénacite (Brésil)

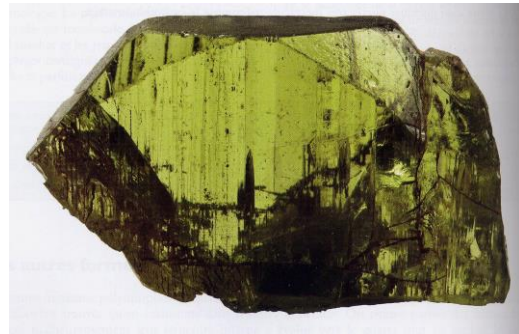


Fig. 14 olivine (Egypte)



Fig. 15 wurtzite (Tanzanie)



Fig. 15 quartz fumé (Grisons, Suisse)

Source : *Bulletin de la Société chimique de France*, 1^{er} semestre 1903, tome XXIX, p. I-XX (1353-1372)