

CAHIERS FRANÇOIS VIÈTE

Série II - N°5

2011

Histoire de la géologie

sous la direction de
Pierre Savaton

GABRIEL GOHAU – *Géologie et civilisations*

VINCENT DEPARIS – *La théorie des marées d'Isaac Newton*

MIREILLE GAYET – *Alexandre de Humboldt et la pasigraphie en géologie*

CLAUDE BABIN – *Deux siècles de biostratigraphie en massif armoricain :
de l'enquête individuelle aux actions collectives*

NADIA PIZANIAS – *Le diluvium géologique au XIX^e siècle :
histoire d'un terme ambigu*

PASCAL RETIF – *Les cartes géologiques du département de Loire-Inférieure*

PIERRE SAVATON – *La géologie expérimentale : une voie fondatrice
de la géologie moderne*

PATRICIA CREPIN-OBERT – *La logique d'une enquête historique :
étude d'un manuscrit inédit de Jean-Etienne Guettard sur la formation
des coquilles dans les montagnes*

Centre François Viète
Épistémologie, histoire des sciences et des techniques
Université de Nantes

LA GEOLOGIE EXPERIMENTALE : UNE VOIE FONDATRICE DE LA GEOLOGIE MODERNE

Pierre SAVATON*

Résumé

Auguste Daubrée (1814-1896) publie en 1867 un *Rapport sur les progrès de la géologie expérimentale*, puis en 1879 ses *Études synthétiques de Géologie expérimentale*. Cette géologie expérimentale développée dès la fin du XVIII^e siècle à l'appui des débats sur la réalité d'une fusion des roches va nourrir aussi bien l'évolution des idées sur la transformation et l'origine des roches magmatiques et métamorphiques, que le développement véritable de l'expérimentation et de la modélisation analogique. Aux spéculations des systèmes et à l'empirisme cartographique du XVIII^e siècle s'ajoute alors une troisième approche constitutive de la géologie, qui cherche à appuyer le discours géologique sur les outils et méthodes des sciences chimiques et physiques avant même le développement de la géophysique et de la géochimie.

Introduction

Le terme de géologie expérimentale désigne au XIX^e siècle un ensemble de travaux de laboratoires qui comprennent aussi bien des synthèses de minéraux et de roches, que des montages cherchant à reproduire l'allure plissée ou les fractures de couches rocheuses, la schistosité, ou la désagrégation mécanique de roches massives, en sables et galets. Pour la plupart des historiens de la géologie, cette géologie expérimentale a toujours été secondaire par ses apports à la constitution d'une science géologique à la fin du XVIII^e siècle, début du XIX^e siècle et par son rôle limité dans les grandes controverses de ce premier siècle de géologie scientifique. Smith (1969), Porter (1977), Oldroyd (1974) ont insisté sur les liens directs existant entre la géologie expérimentale, la

* Centre d'Études et de Recherche en Sciences de l'Éducation (CERSE EA965), Université de Caen Basse-Normandie et Centre François Viète (EA1161), Université de Nantes, pierre.savaton@unicaen.fr

chimie et la minéralogie, mais sans reconnaître à cette démarche expérimentale un rôle significatif dans le développement de la géologie¹. C'est cette appréciation de la place de la géologie expérimentale dans les débats des débuts de la géologie scientifique que nous souhaitons nuancer à travers la controverse autour de l'origine des basaltes et granites, à la fin du XVIII^e siècle et au milieu du XIX^e siècle, en nous appuyant notamment sur les travaux de Sally Newcomb sur les expérimentalistes britanniques de la fin du XVIII^e siècle et le travail de Gabriel Gohau sur les premiers expérimentalistes français du XIX^e siècle².

La revendication en France d'une nouvelle branche de la géologie sous le terme de géologie expérimentale, est clairement l'œuvre d'Auguste Daubrée, pour qui l'expérimentation est une condition nécessaire à l'évolution des sciences géologiques³. C'est avec lui qu'elle fait son entrée en 1867 dans l'inventaire des sciences qui composent la géologie française, par l'intermédiaire d'un rapport à l'Empereur sur les progrès des sciences françaises depuis vingt ans⁴. Mais Daubrée, en limitant ses propos, dans ses publications de géologie expérimentale, à ses propres travaux et en minimisant ceux des autres (plus anciens ou contemporains mais conduits hors de France), réduit notre représentation de la participa-

¹ Cyril S. Smith (1969), « Porcelaine and plutonism », Cecil J. Schneer (éd.), *Toward an History of Geology*, Massachusetts Institute of Technology, pp. 317-338. David Oldroyd (1974), « Mechanical geology », *Ambix*, 1974, 21, pp. 157-178. Roy Porter (1977), *The Making of Geology. Earth Science in Britain, 1660-1815*, Cambridge, Cambridge University Press.

² Sally Newcomb (1990), « Contributions of British Experimentalists to the Discipline of Geology, 1780-1820 », *Proceedings of the American Philosophical Society*, volume 134, n°2 (juin 1990), pp. 161-225. Sally Newcomb (2009), *The World in a Crucible: Laboratory Practice and Geological Theory at the Beginning of Geology*, Boulder (Colorado), The Geological Society of America, special paper 449. Gabriel Gohau (1997), « Expériences anciennes sur la formation des roches cristallines. Du dernier quart du XVIII^e siècle aux années 1850 », *Bulletin de la Société Géologique de France*, tome 168, n°6, pp. 813-820.

³ Auguste Daubrée (1859), « Études et expériences synthétiques sur le métamorphisme », *Annales des mines*, 5^e série, tome XVI. Auguste Daubrée (1867), *Rapport sur les progrès de la géologie expérimentale*, Paris, Hachette. Auguste Daubrée (1879), *Études synthétiques de géologie expérimentale*, Paris, Dunod.

⁴ Pierre Savaton (2009), « Le rapport sur les progrès de la géologie expérimentale d'Auguste Daubrée », E. Barbin, J.-L. Godet et G. Stenger (coord.), *1867 - L'année de tous les Rapports. Les lettres et les sciences à la fin du Second Empire*, Pornic, Éditions du temps, pp. 199-209.

tion de cette nouvelle géologie aux grands débats géologiques du moment. C'est une réflexion sur la place historique de la géologie expérimentale dans les questions de pétrologie que nous souhaitons stimuler.

1. La géologie expérimentale et la controverse sur l'origine des basaltes et autres roches : 1780-1820

1.1. La reconnaissance d'un volcanisme ancien : colonnes prismées et chaussées de Géants.

Dès 1751, Jean Étienne Guettard (1715-1786), de retour d'un voyage en Auvergne, se dit convaincu de l'origine volcanique de la chaîne des Puys, mais pas de celle des prismes (orgues) connus à travers l'Europe et interprétés classiquement comme d'origine aqueuse. Ce n'est qu'en 1779, après un voyage sur les volcans italiens cette fois-ci (1771-1772), et une étude minéralogique du Dauphiné, qu'il reconnaît l'origine volcanique de ces prismes basaltiques. Les coulées de laves (cheires), les scories et les cendres du Massif central étaient semblables par bien des aspects aux volcans italiens déjà bien connus des savants, car souvent visités. Mais, les colonnes de basaltes disséminés dans des terrains divers et anciens étaient considérées séparément. Giovanni Arduino (1714-1795) avait pour sa part rapporté dès 1759 un épisode volcanique ancien près de Padoue et reconnu, comme d'autres auteurs, plusieurs volcans anciens dans le nord de l'Italie. C'est aussi un voyage en Auvergne qui poussait Nicolas Desmarest (1725-1815) en 1763 à y défendre l'existence d'édifices volcaniques reconnaissables par leur morphologie (coulées, cratères) et à interpréter les basaltes en colonnes comme d'origine également volcanique. Le volcanisme était alors considéré comme un phénomène géologique récent et mineur de l'histoire de la Terre et les coulées basaltiques interprétées comme des produits de la fusion du granite (roche primitive par excellence) par la combustion de veines de charbons. Saussure, ayant tenté en vain d'obtenir des basaltes par des expériences de fusion des granites, s'était rattaché alors à une autre hypothèse, celle d'un produit de la fusion de tufs volcaniques. Dans les années 1770, de nombreux sites volcaniques anciens sont reconnus à travers l'Europe et de nombreux gisements de basaltes en colonnes sont décrits. Ainsi, Rudolf Erich Raspe (1737-1794) reconnaît en 1771 un volcanisme ancien près de Kassel (Hesse) où des basaltes prismés (*wackens*) sont surmontés par des basaltes massifs. Les basaltes en colonnes décrits en Écosse, en Irlande et en Islande étant situés à proximité de la mer, il en conclut qu'il s'agit là d'écoulements sous-marins. Raspe par la suite interpréta les montagnes de Saxe comme éga-

lement d'origine volcanique et reprit l'idée plus ancienne d'un volcanisme produit par une fermentation souterraine. Joseph Banks (1743-1820) concluait en 1772 de son voyage à l'île de Staffa, que les prismes basaltiques de la grotte de Fingal étaient indubitablement d'origine volcanique. James Keir (1735-1820) avançait l'idée en 1776 que les colonnes de la Chaussée des Géants en Irlande pouvaient être considérées comme de grands cristaux produits par le lent refroidissement d'un solide fondu. Barthélémy Faujas de Saint de Fond (1741-1819) publiait en 1778 un mémoire sur les montagnes volcaniques du Vivarais et du Velay, alors que Jean-Louis Soulavie (1752-1813) concluait lui aussi à leur origine volcanique après sa propre exploration du Vivarais et du Velay. John Whitehurst (1713-1788) se déclarait convaincu, dans son étude sur la géologie du Derbyshire, de l'origine volcanique des basaltes et défendait l'idée que tous les basaltes anciens (*whins, whinstones, wakens, basalt*) observés à travers l'Europe étaient d'origine volcanique. Les basaltes stratifiés résultaient d'un refroidissement souterrain et l'absence de cônes volcaniques à proximité de la Chaussée des Géants devait être rapportée à l'érosion et à leur disparition en mer. La position de Johan Jacob Ferber (1743-1790) était légèrement différente. S'il se déclarait convaincu de l'origine volcanique des basaltes allemands, il concédait toutefois que la nature puisse produire les mêmes effets par des causes distinctes, le feu et l'eau, et qu'il était par conséquent possible que certains basaltes prismatiques soient des produits de la cristallisation d'une solution aqueuse.

L'identification des basaltes en colonnes comme d'origine volcanique ouvrait le chemin à l'identification d'un volcanisme ancien, caractérisable uniquement par ses roches. L'interprétation volcanique des basaltes élevait le volcanisme au rang de processus de formation des roches et déclenchait une controverse en remettant en cause la thèse paradigmatique de l'origine aqueuse de toutes les roches défendue par Werner et ses élèves.

1.2. *Werneriens contre Huttoniens*

Abraham Gottlob Werner (1749-1817) publiait en 1786 une *Brève classification et description de diverses roches*, qui prolongeait celles de Johann Lehmann et de Torbern Bergman (1735-1784). La Terre primitive était couverte par un océan, mélange d'eau et de minéraux, qui en s'abaissant graduellement déposait sur les masses continentales découvertes une série de combinaisons de minéraux à l'origine des roches observables aujourd'hui à l'affleurement. Toutes les roches étaient ainsi pensées comme issues de dépôts aqueux déterminés par les propriétés

chimiques de cet océan au cours du temps. Pour Werner et son école, la disposition des roches et leur succession étaient plus importantes que leur composition car elles permettaient de reconstituer l'histoire de la Terre. Cette thèse, plus tard qualifiée de neptuniste, s'imposa rapidement en Europe par le rayonnement de l'enseignement de son auteur qui attirait à Freiberg des savants de toute l'Europe. Ces élèves devenus disciples, de retour dans leur pays se chargeaient alors de développer de leur côté des discours géologiques construits au sein de ce paradigme.

Ainsi, Robert Jameson (1774-1854) à Édimbourg ou Jean-François d'Aubuisson de Voisins (1769-1841) à Paris se chargèrent de défendre cette thèse neptuniste et firent école.

En Écosse, James Hutton (1726-1797) proposait alors en 1785 une *Théorie de la Terre* dans laquelle il contestait cette idée de l'origine aqueuse de toutes les roches et défendait l'idée d'une induration (*consolidating power*) des roches par la chaleur⁵. À la différence de Buffon, Moro ou Leibniz qui défendaient également une origine ignée des roches mais conservaient à l'eau un rôle important, Hutton n'accordait de rôle qu'à la chaleur. Ses idées exposées en 1785 et publiées en 1788 étaient développées et argumentées dans la présentation de sa théorie en 1795⁶. Il y expliquait que l'eau ne pouvait être l'agent de fluidité et de consolidation car elle ne pouvait pas dissoudre la plupart des roches, ne pouvait pas traverser les roches consolidées imperméables, et que les pores des roches ne contenaient pas d'eau.

Dans le débat sur l'origine volcanique ou non des basaltes, il s'opposait aux *volcanistes* en défendant une solidification souterraine des basaltes, thèse qualifiée par la suite de plutonique. Pour Hutton le volcanisme était un phénomène permanent, qui évacuait en surface un excès de chaleur profonde à l'origine de la fusion des roches. Les basaltes actuels avaient un équivalent refroidi en profondeur sous la pression des autres couches, les whinstones. Il concluait de ses observations de terrain (1788) que les roches appelées whinstones, toadstones, ragstone, trapp et les colonnes de la Chaussée des Géants étaient toutes des basaltes et provenaient toutes d'une fusion.

⁵ James Hutton (1788), « Theory of the Earth or an investigation of the laws observable in the composition, dissolution, and restoration of land upon the Globe », *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, volume 1, partie 2.

⁶ James Hutton (1795), *Theory of the Earth with proofs and illustrations*, Edinburgh, Creech.

« On the Earth we find no vestige of a beginning, no prospect of an end » écrivait-il⁷. La Terre n'a ni commencement ni fin. Les granites ne sont pas des roches primitives, elles sont l'expression du recyclage des roches. Les filons de granite qu'il observe en Écosse notamment à Glen Tilt (1785) en étaient la preuve. L'eau des mers ne s'était pas retirée comme Werner l'affirmait, mais le fond de l'océan s'était soulevé ; les couches de roches avaient été alors déformées, plissées, fracturées, et injectées par des filons de granite. »

Hutton s'appuyait sur ses observations de terrain pour justifier sa théorie construite de manière spéculative, mais ne croyait pas aux tests expérimentaux, bien que lui-même chimiste : « That it was no right to judge of the great operations of the mineral kingdom, from having kindled a fire, and looked into the bottom of a little crucible »⁸.

1.3. La géologie expérimentale et la thèse Huttonienne

L'opposition entre les idées de Hutton et de Werner s'appuyait en Grande-Bretagne sur des observations et expérimentations en laboratoires conduites par des géologues de premier plan. Elles s'articulaient essentiellement autour de l'origine de trois roches, les calcaires, les granites et les basaltes et autour de la question de la solubilité de la silice.

Les premières expérimentations naissent à l'interface entre des observations et spéculations géologiques d'une part et des observations et essais industriels d'autre part. Ainsi James Keir, qui reconnaissait en 1776 dans la Chaussée des Géants du nord de l'Irlande une manifestation d'un volcanisme ancien, réalisait ces mêmes années toute une série d'expérimentations pour obtenir des cristaux par lent refroidissement d'un solide fondu. Momentanément en charge d'une verrerie, il s'intéressait à la cristallisation des verres. Mais ses travaux, s'ils conduisent à faire de lui l'un des premiers expérimentateurs anglais, ne permettent pas de trancher en faveur d'une thèse plutôt que d'une autre.

Joseph Black (1728-1799) s'intéressait de son côté aux transformations des calcaires, qu'il définissait en 1755 comme des roches transformables en chaux par cuisson avec perte d'eau et dégagement d'un air fixé dans la roche (*fixed air*) : le dioxyde de carbone. La connaissance de l'existence de sources pétrifiantes et de concrétions dans les grottes des régions calcaires tendait alors à conforter l'idée d'une origine aqueuse de ces roches. L'eau contient des carbonates. L'eau contient aussi de la silice.

⁷ James Hutton (1788), *op. cit.*, p. 304.

⁸ James Hutton (1795), *op. cit.*, p. 251.

La découverte en 1791 en Islande de sources siliceuses était dès lors plutôt favorable aux partisans des idées de Werner pour qui les roches primitives granitiques provenaient également de dépôts aqueux dans un océan ancien aux caractéristiques différentes des océans actuels. Black qui réalisait l'analyse de ces eaux islandaises notait qu'elles étaient riches en alcalins et concluait sur l'insolubilité de la silice dans les eaux chaudes, comme le défendait Torben Olof Bergman, mais sur sa solubilité dans les eaux alcalines.

Hutton défendait l'idée que les calcaires, s'ils provenaient certes de sédiments d'origine marine, étaient ensuite consolidés et cristallisaient sous l'effet de la chaleur souterraine. À ses détracteurs qui faisaient remarquer que la chaleur des fours transformait les calcaires en chaux, Hutton arguait de l'effet de la pression liée à l'enfouissement de ces roches, qui bloquait cette transformation et favorisait la cristallisation. L'air fixé ne pouvait pas s'échapper. Les calcaires et les marbres ne différaient que par leur degré de fusion et l'existence dans les marbres de fossiles cristallisés à structure spathique était un argument supplémentaire en faveur de cette cuisson.

C'est à John Playfair (1748-1819) que l'on doit la popularisation des idées de Hutton, avec la publication en 1802 de *Illustrations of the Huttonian Theory of the Earth*, mais il faut cependant attendre les *Principles of Geology* de Charles Lyell (1830-1833), pour que le modèle de Hutton se répande et s'impose face à la thèse neptuniste. En Wernérien, Robert Jameson ne voyait dans les verres pierreux obtenus par « fusion / cristallisation » que des verres et non une roche et John Murray (1728-1820) trouvait dans les sources siliceuses islandaises un argument pour réfuter la position Huttonienne qu'une roche produite par l'eau devrait nécessairement être soluble dans l'eau (1802)⁹. La géologie expérimentale ne devait véritablement prendre une place importante dans cette controverse qu'avec les expérimentations de Hall, partisan et ami de Hutton.

Chimiste et défenseur des thèses de Lavoisier, James Hall (1761-1832), après avoir visité l'Auvergne et la Limagne, avait conclu lui aussi à l'origine volcanique des basaltes anciens. Dès 1788, il se rangeait au modèle de Hutton qui confirmait ses propres observations de terrain et notamment la présence de filons de granite recoupant des roches stratifiées (des schistes) près de Galloway au sud-ouest de l'Écosse. À partir de

⁹ John Murray (1802), *Comparative View of The Huttonian and Neptunian System of Geology*, Edinburgh, Ross and Blackwood.

1790, Hall réalisa une série d'expériences sur la fusion et le refroidissement de basaltes de différentes origines et montra qu'en jouant sur la vitesse de refroidissement on pouvait obtenir un verre à allure pierreuse (*stony*). Il obtenait un « basalte » en faisant fondre et refroidir un basalte, prouvant ainsi que cette roche pouvait être produite à partir d'une roche fondue. S'il concluait de ses expériences qu'elles prouvaient la justesse de l'hypothèse de Hutton, il ne réussissait pas pour autant à convaincre les Wernerien pour qui celles-ci ne réfutaient pas l'idée d'une formation des basaltes par dépôt aqueux, plusieurs causes pouvant produire les mêmes effets. Hall expérimenta également sur la cristallisation des granites et la question de la cristallisation tardive du quartz, mais sans qu'aucun de ses résultats ne marquât de point décisif dans la controverse.

Dans le même temps, Thomas Beddoes (1760-1808) réalisait toute une série d'expériences pour montrer que les granites et les basaltes provenaient d'un même magma et ne différaient que par leur vitesse de refroidissement, et partant d'observations de terrain sur le passage de granites à des basaltes, reprenait les observations de Buffon sur des scories métallurgiques et des porcelaines pour conclure que la taille des cristaux dépendait de la température de fusion et de la vitesse de refroidissement.

Hall mettait également au point de 1804 à 1805 une série d'expérimentations sur les effets de variations de la pression sur la cristallisation notamment des calcaires. Il concluait en 1812 d'une expérience de cuisson sous pression d'un échantillon de calcaire, que celui-ci avait été transformé en marbre par fusion et cristallisation, mais sans en convaincre grand monde. Notons que la géologie expérimentale de Hall ne se réduisait pas à ses seules expérimentations de fusion/cristallisation et de synthèse de minéraux. Elle tentait également de reproduire l'allure des plissements et fractures des terrains stratifiés par emploi de maquettes et de montages, ce qui fait également de lui un des pionniers de la géologie structurale.

Richard Kirwan (1733-1812), professeur à Dublin, contestait le modèle de Hutton et les conclusions des expériences de Beddoes sur l'origine du basalte¹⁰ et faisait de l'expérimentation une démarche pour démontrer la justesse de ses vues Wernériennes et l'erreur de ses opposants. Il développa une minéralogie quantitative (échelle de dureté des minéraux, échelle de transparence, de brillance) basée sur un sens aigu

¹⁰ Richard Kirwan (1794), « Examination of the Supposed Igneous Origin of Stony Substances », *Transactions of the Royal Irish Academy*, 5 (1793), pp. 51-81.

de la description. Il avança toute une série d'arguments expérimentaux contre les thèses Huttoniennes : 1) l'ordre de cristallisation des minéraux du granite déduite des observations de roches s'oppose à l'ordre déduit des températures de fusion des minéraux : le quartz devrait cristalliser avant les feldspaths, or on observe l'inverse dans les roches ; 2) quand on fond du quartz et des feldspaths, on obtient un verre et pas une roche ; quand on fond du granite, on obtient un verre gris-blanc fort différent d'un basalte ; 3) des sels de solubilité différente peuvent cristalliser séparément dans une solution aqueuse, mais ne cristallisent jamais séparément lorsqu'ils sont mélangés ; 4) le quartz est infusible, mais est soluble dans l'acide fluorique (découvert en 1771 par Torbern Bergman). Il consacra un chapitre de son ouvrage synthétique de 1799, *Geological Essays*, à la réfutation des idées de Hutton (*On the Huttonian Theory of the Earth*) et critiqua les expériences de fusion/cristallisation de James Hall de 1804 au motif que Hall ne décrivait pas précisément les verres qu'il obtenait, empêchant ainsi la contradiction¹¹.

Les expérimentations sur la fusion et la cristallisation de roches cessent en Grande-Bretagne vers 1804. Techniquement les expérimentateurs ne progressaient plus. James Hall n'avait pas prouvé l'origine ignée des basaltes, il n'avait pas convaincu la communauté géologique, mais les Wernerienens n'avaient pas non plus réussi à démontrer expérimentalement leur thèse. Nombre de Wernerienens (dont Kirwan) admettaient alors que les roches pouvaient avoir plusieurs origines possibles. Les disciplines de Werner tels Léopold von Buch, Alexandre von Humboldt, Jean-François d'Aubuisson, George Poulett Scrope, William Conybeare, William Phillips, Ami Boué... se ralliaient les uns après les autres à l'origine ignée des basaltes et des granites, autant sous l'effet d'arguments de terrain (filons granitiques recoupant des terrains stratifiés) que par manque d'arguments nouveaux à opposer à la possibilité de produire des granites par cette voie de la fusion. Webb Seymour et John Playfair concluaient en 1815 sur la nécessité d'améliorer les expérimentations pour espérer tirer au clair cette origine des granites. L'abandon de la question par les Wernerienens ne justifiait plus les recherches des Huttoniens. Les débats de la géologie portaient alors sur des questions de paléontologie, de stratigraphie et de géomorphologie.

Ces expérimentations conduites pendant vingt ans par des géologues britanniques reconnus ont influencé la pensée géologique, selon Sally Newcomb, en y introduisant l'idée de preuve et de réfutation par

¹¹ Richard Kirwan (1799), *Geological Essays*, London, Bremner.

l'expérience, à la manière des chimistes et physiciens. Cette démarche positive est aussi celle défendue cinquante ans plus tard par Daubrée dans son plaidoyer pour la géologie expérimentale et ce passage par la pratique des laboratoires de chimie marque aussi l'émergence de la géologie expérimentale en France au début du XIX^e siècle.

2. La géologie expérimentale et la question de la synthèse des minéraux par voie sèche et voie humide

La France fut peu engagée dans le débat entre expérimentalistes sur l'origine des roches, mais cela ne signifie pas que le débat lui était étranger. Buffon, De Saussure, Jean D'Arcet, Dolomieu avaient également développé précocement des travaux expérimentaux ou montré un intérêt pour ceux-ci. Horace Bénédict de Saussure (1740-1799) est même un précurseur dans ce domaine. Dans ses *Voyages dans les Alpes* (1779-1796), il présentait des recherches expérimentales sur la nature des pierres, qui par leur fusion devaient avoir produit les différentes laves des volcans. Il réalisa des expériences de fusion puis de refroidissement en vue de reproduire les phénomènes de l'intérieur du globe et chercha à démontrer, en vain, que la fusion du granite pouvait être à l'origine de diverses roches, dont les basaltes. Mais le matériau qu'il obtint par fusion de granites, n'avait pas l'allure d'une lave refroidie (masse pierreuse différente d'une lave).

La géologie expérimentale qui se développa en France au début du XIX^e siècle dans les laboratoires des pétrographes, minéralogistes et chimistes a d'autres objets, d'autres finalités. La pétrographie a, dès ses origines, associé une recherche sur la composition minéralogique et chimique, sur la structure et les modes de gisements des roches, à une recherche sur leur origine. La première approche s'appuyait sur la minéralogie et la seconde sur la chimie et le terrain. Les pétrographes français tels René Just Haüy (1745-1822), Louis Cordier (1777-1861) ou Alexandre Brongniart (1770-1847) se sont surtout préoccupés du premier aspect. La question des origines était seconde dans leurs préoccupations. Louis Cordier, après ses travaux (1807-1808) sur la minéralogie des produits volcaniques, abandonnait ses expérimentations au profit de la caractérisation de la chaleur terrestre¹².

¹² Louis Cordier (1816), « Mémoire sur les substances minérales dites en masse », *Journal de Physique*, volume 82-83. Louis Cordier (1827), « Mémoire sur la chaleur souterraine ».

L'école géognosique de Freiberg entendait en revanche classer et même nommer les roches d'après leur disposition spatiale. Elle défendait l'idée d'un lien entre gisement (rapports avec les autres masses minérales) et origine, mais n'était guère ouverte aux aspects chimiques. Carl Friedrich Naumann (1797-1873), élève de Werner, professeur de cristallographie à Jena puis à Freiberg, puis professeur de géognosie à Leipzig, comme Carl Bernhard von Cotta (1808-1879), son élève et successeur à Freiberg, ont maintenu jusque dans les années 1850, une minéralogie qui ne faisait pas de place à la chimie¹³.

La géologie expérimentale développée à l'École des mines de Paris prolongeait en revanche les travaux d'analyses chimiques développés par Haüy, Cordier, Dolomieu et Fleuriau de Bellevue (réduction en poudre des roches de mélanges ou roches composées et étude des grains au microscope). Elle cherchait à obtenir expérimentalement les minéraux qui composaient les roches mélangées et plus spécifiquement la classe des roches porphyriques et hémi-cristallines selon la classification de Brongniart. Deux procédés, deux voies étaient alors suivis et défendus fondant rapidement deux écoles pour penser l'origine des roches granitiques et métamorphiques. La géologie expérimentale était à nouveau et plus encore qu'à la fin du XVIII^e siècle un outil au service d'une controverse majeure.

2.1. La voie sèche

Ces expérimentations qui visaient à synthétiser des minéraux par fusion/cristallisation sans ajout d'eau ont surtout été développées à l'École des mines de Paris par Pierre Berthier et Jacques-Joseph Ebelmen, son suppléant puis successeur. Pierre Berthier (1782-1861) professeur de docimasia et chef du laboratoire de l'École des mines à partir de 1816, fut élu à l'Académie des sciences en 1827 et nommé ingénieur général des mines en 1848. Il réalisa toute une série de fusions simples (fusions de minéraux fusibles) de silice avec différentes bases en proportions définies et obtint dès 1823 des combinaisons cristallines identiques à des cristaux naturels, notamment des pyroxènes. Cette synthèse expérimentale du pyroxène réfutait alors l'idée de Dolomieu et Haüy selon laquelle les pyroxènes présents dans les roches volcaniques étaient des reliques résistantes au feu. Une synthèse de ses travaux et publications sur la

¹³ Carl Friedrich Naumann (1850), *Lehrbuch der Geognosie*, Leipzig, Engelmann. Carl Bernhard von Cotta (1855), *Die Gesteinslehre*, Freiberg, J.G. Engelhardt.

fusion par la voie sèche fut publiée à partir de 1834¹⁴. Il s'agit avant tout d'un mémento des analyses qui permettent de caractériser et d'identifier chimiquement les constituants des roches et les minerais. L'auteur n'y développait aucune considération aucune extrapolation sur l'origine des roches réduisant ainsi cette géologie expérimentale à un usage analytique. Les travaux de Jacques-Joseph Ebelmen (1814-1852), à partir de 1838, offraient de nouvelles perspectives¹⁵. La fusion de minéraux réputés infusibles, par addition de substances capables de les rendre fusibles (fondant) avant de s'évaporer (sublimation) et de permettre leur cristallisation, relançait la question de l'origine ignée de bien des roches porphyriques et granitiques. Ebelmen obtint ainsi des silicates anhydres (spinelles, péridot, pyroxène, pérovskite, rutile, magnétite...) et de nouvelles espèces.

2.2. *La voie humide*

Les travaux sur la voie humide s'inscrivent dans le prolongement de la question de l'origine des roches carbonatées et notamment des idées sur l'origine de la dolomie. Giovanni Arduino (1779), puis Léopold von Buch (1822), Léonce Élie de Beaumont (1829) avaient retenu une origine par percolation au sein de masse de calcaires. Haidinger et Morlot (1847) devaient par la suite obtenir expérimentalement de la dolomie par réaction entre un carbonate de calcium et un sulfate de magnésium, en présence d'eau sous pression, ce qui militait en faveur d'une origine par la voie humide. Forchhammer (1849) puis Sterry Hunt (1866) confirmaient également ce modèle de percolation de sels de magnésium dans des calcaires. Les minéraux des filons étaient classiquement considérés dans les années 1830 comme d'origine aqueuse. Henri Sureau de Sénarmont (1808-1862) défendait cette thèse en s'appuyant sur des synthèses de minéraux en présence d'eau et notamment une synthèse de cristaux de quartz à haute température (1851).

Mais, le grand défenseur de la synthèse par la voie humide est alors incontestablement Daubrée. Il produit des cristaux de silice à des températures très inférieures aux températures de fusion, par réaction chimique en présence d'eau et affirme qu'il est possible de fondre le quartz, les feldspaths et les pyroxènes à de faibles températures pourvu qu'il y ait de

¹⁴ Pierre Berthier (1834), *Traité des essais par la voie sèche*, tome 1, Paris, Thomine. Pierre Berthier (1848), *Traité des essais par la voie sèche*, tome 2, Paris, Auguste Durand.

¹⁵ M. Salvétat (1855), *Recueil des travaux scientifiques de M. Ebelmen*, tome 2, Paris, Mallet-Bachelier.

l'eau. Il obtient ainsi des cristaux de quartz en chauffant un verre durant un mois à 400°C en présence d'eau, puis obtient des feldspaths en transformant une obsidienne en une roche granuleuse proche d'un « trachyte », par chauffage en présence d'eau. Des cristaux de feldspaths ayant été identifiés dans la partie haute d'un four de cuivre, il réfute leur origine par la voie sèche et fait dépendre celle-ci de la présence de vapeur d'eau. Pour Daubrée seule la voie humide est susceptible de produire un granite.

Heinrich Rose (1795-1864), élève de Klaproth et de Berzélius, professeur de chimie à Berlin, distingue alors deux formes de silice : une silice amorphe de densité comprise entre 2,2 et 2,3 et une silice cristallisée de densité égale à 2,6. Le quartz fondu se solidifie sous forme amorphe (2,2), alors que le quartz des granites a une densité de 2,6. Ce dernier ne peut donc provenir d'une fusion. De plus, la fusion de feldspaths conduit à une masse vitreuse qui ne fournit jamais de cristaux même pour des vitesses de refroidissement très faibles. Le granite a donc une origine aqueuse.

2.3. La géologie expérimentale et la nouvelle controverse sur la formation des granites

Pour Davis Young, les travaux des expérimentalistes britanniques avaient imposé l'idée des granites ignés, mais ne l'avaient pas démontrée¹⁶. La théorie Huttonienne d'une formation des granites par fusion de roches, qui a semblé s'imposer au début du XIX^e siècle, n'avait pas pour autant supprimé l'héritage neptuniste des géologues, car au-delà de la question fusion/pas fusion le modèle de Hutton souffrait encore de fortes critiques tant pour sa présentation des phénomènes d'érosion, que pour sa dimension cyclique qui rompait avec l'évolution sagittale des neptunistes et nécessitait une source de chaleur non identifiée.

Dolomieu, après avoir défendu l'idée que les coulées de laves provenaient de la fusion de roches en profondeur (fusion de granites par exemple), proposait dès 1797 un modèle où les basaltes étaient issus d'une matière visqueuse primitive, située en dessous des granites et ayant hérité son caractère visqueux et fluide de l'histoire primitive de la Terre¹⁷. Contrairement au modèle de Hutton, il n'y avait pas de combustion profonde (pas d'oxygène en profondeur), pas de fusion récente des roches et donc pas de cyclicité. Cordier (élève de Dolomieu) retenait de cette thèse en

¹⁶ Davis A. Young (2003), *Mind over Magma. The Story of Igneous Petrology*, Woodstock, Princeton University Press.

¹⁷ Gabriel Gohau (1997), *op. cit.*

1827, l'idée d'une chaleur profonde héritée de l'origine de la Terre et la structurerait en un modèle de refroidissement séculaire de la Terre. Le matériel fondu observé en surface au niveau des volcans n'étant alors que l'arrivée en surface d'un matériel profond déjà fondu à la faveur des fracturations engendrées dans la croûte (5 km d'épaisseur) par son refroidissement. La géologie expérimentale des années 1830-1850 allait alimenter la controverse sur l'origine ignée ou non des granites autour de trois thèses : la fusion sèche, la fusion hydratée et la transformation aqueuse sans fusion.

2.3.1. *Formation du granite par fusion sèche*

Joseph Fournet (1801-1869), ingénieur des mines, chimiste, professeur de géologie minière et métallurgique à l'université de Lyon propose en 1844 d'expliquer la cristallisation tardive du quartz par sa combinaison avec d'autres éléments qui le maintiendraient en solution¹⁸. Il parle d'un état de surfusion du quartz au sein des magmas (terme qu'il vient de créer). La contestation est d'emblée très vive car la différence de température entre fusion et cristallisation du quartz devrait dans ce cas atteindre plusieurs centaines de degrés.

Partisan lui aussi d'une origine ignée par fusion sèche, Joseph Durocher (1817-1860), ingénieur des mines, professeur de géologie à Rennes, conteste aussi bien cette théorie de la surfusion, que le raisonnement de Scheerer, pour qui, les minéraux du granite (quartz, micas, feldspaths) restent sous forme de minéraux distincts même dans les liquides. Pour Durocher le magma est un mélange homogène de silice, d'alumine, d'alcalins et de bases contenant K, Na, Ca, Mg... Il défend l'idée que le quartz et les feldspaths commencent à cristalliser à peu près aux mêmes températures, mais que se sont les vitesses de cristallisation qui diffèrent. La cristallisation du quartz est beaucoup plus lente et il passe d'abord par un état amorphe avant de cristalliser. Pour lui les pétrosilex, les porphyrys et les granites sont trois termes d'une même séquence (issus d'un même magma), mais avec une séparation plus ou moins complète des minéraux (1845). Lors de la réunion de la Société géologique de France de 1847, qui reste dans les annales comme la grande confrontation sur la question de l'origine des granites, Durocher réfute la fusion hydratée de Scheerer : les granites ne renferment pas plus de 1% de minéraux hydratés et ne contiennent jamais de vésicules (comme c'est le

¹⁸ La forte viscosité des liquides silicatés explique leur basse température de cristallisation.

cas pour les basaltes). La controverse entre les deux hommes dura jusqu'à la mort de Durocher en 1860.

Le chimiste, physicien et minéralogiste allemand Robert W. E. Bunsen (1811-1899), professeur à Heidelberg établit alors : que la température de solidification d'un corps isolé est toujours différente de celle d'un mélange ; que l'ordre de cristallisation entre l'eau et le chlorure de calcium varie selon leur concentration respective ; qu'une solution reste une solution même si elle est chauffée de quelques centaines de degrés. Par conséquent le quartz et les feldspaths ne peuvent pas cristalliser en solution aux mêmes températures que lorsqu'ils sont isolés. Bunsen rejoint les thèses de Durocher. Ses analyses chimiques des basaltes islandais le conduisent à distinguer deux types de sources magmatiques : un type acide (trachytique) et un type basique (pyroxénique). La combinaison de ces deux sources pouvant expliquer selon lui l'existence de toutes les combinaisons intermédiaires possibles. La voie sèche avait ses arguments expérimentaux, les autres thèses aussi.

2.3.2. Fusion par la voie humide

Ainsi Carl Gustav Christoph Bischoff (1792-1870), le fondateur de la géologie chimique selon Karl Von Zittel, professeur de chimie à Bonn, neptuniste convaincu, spécialiste de l'étude des sources chaudes, s'opposait à l'origine ignée des granites au motif que l'on n'observait jamais de quartz cristallisé dans les laves ou dans les coulées des fours, même lorsque le matériel fondu était très riche en silice¹⁹. L'explication était à trouver dans l'absence d'eau. L'ordre de cristallisation des minéraux du granite s'opposait à cette origine ignée. Les cristaux de quartz observés dans des trachytes ne pouvaient être que des dépôts aqueux dans les pores de la roche.

Pour Theodor Scheerer (1813-1873), professeur de chimie et de minéralogie à la Bergakademie de Freiberg, ses observations dans des granites norvégiens en 1842 de grands cristaux de feldspaths et de micas automorphes, entourés de petits cristaux « amorphes » de quartz prouvaient leur antériorité par rapport au quartz. L'ordre de formation (feldspaths puis quartz) s'opposait alors à celui des températures de fusion. La présence de minéraux pyrognomiques²⁰ dans les granites était

¹⁹ Carl Gustav Bischoff (1855-1859), *Éléments of Chemical and Physical Geology*, volume 1 (Rôle de l'eau dans la transformation des roches) ; volume 2 (Minéralogie et pétrologie chimique).

²⁰ Les minéraux pyrognomiques (gadolinite, allanite = orthite) ainsi nommés par De la Metherie en 1800, sont des sorosilicates complexes contenant

alors également opposée à cette fusion. La chaleur sèche ne pouvait pas produire des granites et la présence dans ces roches de silicates hydratés (micas, tourmaline, minéraux pyrogéniques) militait en faveur d'une action de l'eau. L'eau permettait d'abaisser les températures de fusion et le quartz, fondu précocement, cristallisait tardivement à cause de cette présence.

2.3.3. Transformation aqueuse

Une troisième voie était défendue, qui repoussait l'idée de fusion sèche ou hydratée au profit d'une transformation aqueuse à l'état solide. Pour Achille Delesse (1817-1881), ingénieur des mines, professeur de géologie à Besançon, les roches plutoniques présentaient une *plasticité aqueuse* à la différence des roches volcaniques. Si ces dernières pouvaient être ignées (trachytes, dolérites), c'est-à-dire produites par une fusion sèche ou pseudo-ignée (basaltes) c'est-à-dire ignée mais avec de l'eau sous pression (voie humide), il n'en était rien pour les granites qu'il fallait penser dans leur contexte cartographique, en association avec des roches métamorphiques²¹. Champion du métamorphisme, Delesse n'était pas seul.

Théodore Virlet d'Arno (1800-1894), également ingénieur des mines, s'appuyait lui aussi sur des arguments de terrain pour défendre une origine des granites par transformation progressive de gneiss (granitisation) en continuité de la transformation des roches sédimentaires en gneiss (gneissification). Léonce Élie de Beaumont (1798-1874) faisait des granites des produits du métamorphisme des schistes et gneiss, tout comme James Geikie (1839-1915), professeur de géologie à Édimbourg, interprétait (1866) des syénites granitoïdiques comme provenant de la transformation latérale de grès feldspathiques, et des granites, comme la transformation latérale de graywackes et aux États-Unis, James Dana (1813-1895) rapportait l'origine des granites à une transformation thermique sans fusion.

du Cérium, du Thorium. Ils produisent spontanément de la lumière lorsqu'ils sont chauffés, mais perdent de leur couleur et de leur intensité et deviennent plus difficilement solubles dans les acides.

²¹ Achille Delesse (1857), « Études sur le métamorphisme », *Annales des mines*, 5^e série, tome XII, pp. 89-288.

Conclusion

Les expériences de fusion, de cristallisation, de synthèse, qui caractérisent à partir de la fin du XVIII^e siècle la naissance d'une nouvelle approche des questions géologiques, participent de la construction de cette science en prenant part aux débats sur l'origine des roches. Ces expériences qui souhaitent reproduire en laboratoire les effets de phénomènes naturels, se veulent à la fois des compléments de l'observation de terrain et l'application positive des lois de la physique et de la chimie à la compréhension de ces phénomènes. La géologie expérimentale n'a pas prétention à concurrencer l'observation mais à la renouveler, à l'enrichir par des questions que le terrain ne pose pas, mais que le laboratoire impose. Les acteurs de la controverse sur l'origine des basaltes, tout comme ceux de l'origine ignée ou non des granites, s'appuient largement sur leurs propres observations de terrain, en amont comme en aval de leurs expérimentations. Plus qu'une science nouvelle, c'est une démarche nouvelle qu'elle introduit en géologie entre l'héritage des théories spéculatives et la pratique empirique du terrain en installant le laboratoire comme interlocuteur du terrain. La révolution chimique et le lien entre la géologie naissante et le développement industriel et minier en font alors une voie naturelle de l'étude des objets et des phénomènes.