

TRAVAUX DU COMITÉ FRANÇAIS D'HISTOIRE DE LA GÉOLOGIE (COFRHIGÉO)

TROISIÈME SÉRIE, t. XXVIII, 2014, n° 3
(séance du 11 juin 2014)

Timo G. NIJLAND & Jacques TOURET

*Un naturaliste aux multiples facettes : Jean Lavalley (1820-1880)
et la notion de pression de cristallisation*

Résumé. La notion de pression de cristallisation est très utilisée en géologie appliquée pour expliquer la formation de veines de quartz ou la dégradation des monuments (maladie de la pierre). On considère souvent qu'elle est due à l'Allemand Carl Wilhelm Correns, alors qu'un médecin botaniste de Dijon, Jean Lavalley (1820-1880), a joué un rôle de pionnier qui n'a été reconnu que très récemment. Après avoir obtenu deux thèses la même année (1845) à Dijon (médecine et géologie), Jean Lavalley fut candidat à la chaire de botanique de l'université de Montpellier, mais ne fut pas retenu. Il resta définitivement en Bourgogne, devenant le second directeur du jardin botanique de Dijon, professeur à l'École de médecine et de pharmacie de cette ville, très impliqué dans la vie municipale, député au Conseil général sous le Second Empire. Libéral convaincu, il s'opposa vivement à l'administration du Second Empire, tentant aussi de prendre la tête de la défense de la ville contre l'invasion prussienne en 1870. Mis en cause à l'issue de la guerre, il fut acquitté en raison de son manque d'expérience militaire. Il se retira alors dans une propriété familiale à Premières (près de Genlis), où existait une faïencerie dont il fit un centre industriel et artistique important. Lavalley effectua ses expériences sur la pression de cristallisation à l'issue de sa thèse de géologie (le calorique comme agent de métamorphisme), pendant une durée de dix-huit mois. Cette notion fut très en vogue pendant la seconde moitié du XIX^e siècle pour expliquer de nombreux phénomènes (formation de veines métallifères, voire de chaînes de montagne). Après une longue interruption, de nouvelles expériences furent effectuées en Allemagne et aux USA ; elles conduisirent notamment, au début du XX^e siècle, à la formulation de principes couramment admis aujourd'hui (équation de Correns et Steinborn, principe de Taber) et au sujet desquels la discussion n'est toutefois pas close. Le nom de Jean Lavalley mérite de ne pas être oublié car il s'agit d'un thème de recherches qui touche aux aspects les plus importants de la croissance cristalline.

Mots-clés : Pression de cristallisation – maladie de la pierre – croissance cristalline XIX^e siècle.

Abstract. The concept of crystallization pressure is widely invoked in applied sciences to explain various phenomena such as formation of quartz veins and salt damage in monuments. Several

geologists have elaborated this principle, of whom the German Correns is perhaps most well known. The first known experiments concerning crystallization pressure were, however, performed by a native of Dijon, Jean Lavalley. He was, amongst others, director of the jardin botanique in Dijon, professor at the École de médecine et de pharmacie in the same town and member of the local municipal council, as well as deputy in the Conseil général during the Second Empire. He published, alone or with co-authors, on different subjects like edible mushrooms, the flora in the botanical garden and the “grand vins” of Bourgogne. After unsuccessfully organizing the defence of his native Dijon during the French-German war of 1870, he was tried in court, but excused because of his lack of military experience. After resigning from both his positions in Dijon, he moved to Premières near Genlis in the Côte d'Or, where he had inherited an old faïence factory which he transformed in an artistic place. After defending his geology thesis, *Le calorique considéré comme agent de métamorphisme dans les roches*, Lavalley started experiments on crystallization pressure, which lasted for 16 months, and published the results in a rather short paper in the *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, in 1853. During the second half of the 19th century, crystallization pressure became a major geological phenomenon to explain a number of occurrences, from ore-bearing veins to mountain chains. After a long break, new experiments, notably in Germany and the US, have led to most commonly accepted ideas of today (Correns and Steinborn equation, Taber principle). But the debate is not over, and the pioneering role of Jean Lavalley should be fully recognized.

Key words: Crystallisation pressure – salt damage – crystal growth – 19th century.

Introduction

La notion de pression de cristallisation est souvent invoquée en sciences, notamment appliquées, pour l'explication de phénomènes variés, tels que la formation de veines métallifères ou la dégradation saline de monuments (maladie de la pierre). Ce principe a été élaboré par plusieurs géologues, parmi lesquels le nom de l'Allemand Carl Wilhelm Correns (1893-1980) est le plus souvent cité. Les premières expériences connues dans ce domaine ont toutefois été réalisées par un médecin de Dijon, Jean Lavalley (1820-1880), dont une rue de la ville porte le nom, et qui y est surtout connu pour avoir été directeur du jardin botanique de cette ville. En dépit d'activités multiples, peu de choses ont été publiées sur lui. Nous n'avons pu trouver qu'un petit article des *Mémoires de l'Académie des Sciences, Arts et Belles-Lettres de Dijon* (Tome CXXVII, années 1987-1988), qui reprend pour l'essentiel le manuscrit MJS, conservé dans les archives du musée municipal (cf. Archives, ci-dessous). Aucune de ces publications ne mentionne des travaux minéralogiques ou géologiques qui, bien que très limités dans le temps, n'en furent pas moins dignes d'intérêt. Ce n'est que très récemment que l'on a reconnu leur aspect novateur dans un domaine qui semblait réservé aux écoles allemande et américaine.

Jean Lavalley, botaniste et médecin

Né en 1823, Jean Lavalley soutint en 1845 deux thèses de doctorat devant l'Académie de Dijon, la première en médecine avec un mémoire de thèse de 39 pages intitulé *De l'hydropisie de la cavité abdominale* (Lavalley, 1845a), et la seconde en géologie, le 19 décembre de la même année (Lavalley, 1845b, voir ci-dessous). Ce principe de thèses doubles était assez courant à l'époque, ancêtre de ce qui a longtemps persisté avant que les multiples réformes universitaires de la fin du XX^e siècle ne viennent mettre un terme aux « thèses d'État ». Les activités de Jean Lavalley furent multiples. Il fut, entre autres choses, directeur du jardin botanique de Dijon, professeur et directeur de l'École locale de médecine, membre du conseil municipal et du conseil général (MJS), en un mot un notable de la ville pendant les temps compliqués de la Deuxième République et du Second Empire. Après avoir obtenu ses deux doctorats, Jean Lavalley avait fait une brève tentative de quitter sa ville natale, postulant pour la chaire de botanique de l'université de Montpellier. Mais un candidat « mieux connu » (MJS) lui fut préféré, Charles Martins (1806-1889), qui prit ses fonctions en 1849 (Genty, 1934). Entre temps, le fondateur et premier directeur du jardin botanique de Dijon, le pharmacien Pierre Fleurot, décéda prématurément en 1849, âgé à peine d'une cinquantaine d'années. Le poste fut alors proposé à Jean Lavalley, qui ne devait plus quitter la Bourgogne.

De nombreuses publications, dont certaines sont encore connues aujourd'hui, témoignent d'une activité continue de Jean Lavalley au sein du jardin botanique, avec pour résultat qu'il est surtout connu aujourd'hui comme botaniste. Il ne semble toutefois pas avoir fait l'unanimité auprès de ses collègues. Dans une publication réalisée à propos du centenaire du jardin botanique (Genty, 1934) on peut ainsi lire qu'à Pierre Fleurot a succédé « *le docteur Lavalley, excellent homme, qui fit beaucoup de bien, mais que les questions industrielles, philanthropiques et politiques préoccupaient malheureusement davantage que la botanique ou la floriculture* ». Ses travaux dans ces domaines ne manquent toutefois pas d'intérêt, tout en portant parfois l'empreinte d'un certain amateurisme. À côté d'articles occasionnels dans des journaux tels que la *Revue horticole de la Côte-d'Or* (Lavalley, 1853a), il publia un catalogue des plantes du jardin botanique (Lavalley, 1854), ainsi qu'un traité somptueusement illustré des champignons comestibles (Lavalley et Savy, 1852) (Fig. 1). Il n'est malheureusement donné aucune indication sur les échantillons représentés, que ce soit le nom scientifique, la description ou la provenance, si bien qu'il est écrit dans le manuscrit conservé au musée (MJS) que l'« *On ne se rend pas compte du but que poursuivait Lavalley en faisant exécuter ce grand travail iconographique, qui reste énigmatique* ».

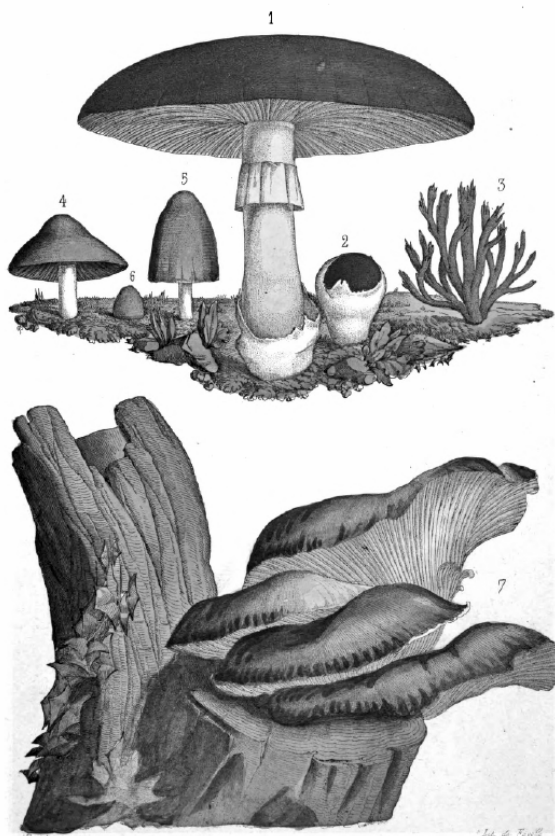


Fig. 1. Une des planches du *Traité pratique des champignons comestibles* (Lavalle, 1852) (original en couleurs). Remarque de contemporains : « On ne se rend pas compte du but que poursuivait Lavalle en faisant exécuter ce grand travail iconographique, qui reste énigmatique ».

Plus importante est l'*Histoire et statistique de la vigne et des grands vins de la Côte d'Or*, parue un an après le traité sur les champignons (Lavalle, 1855) (Fig. 2), dans laquelle on trouve une description détaillée des célèbres vignobles de la Bourgogne. Pour la première fois, des notions géologiques, en particulier les noms d'étages stratigraphiques, sont introduits dans la définition des différents crus. Cette spécificité du vignoble bourguignon persiste jusqu'à aujourd'hui, faisant le bonheur de quelques géologues de l'université locale lorsqu'ils doivent identifier les terrains propices à l'extension de quelques vignobles. Dans ce traité sont également notées avec beaucoup de soin les dates de début des vendanges, année après année. Au total, les archives municipales de Dijon conservent toutes ces dates pour la période 1385-1906, virtuellement sans hiatus, donnant des indications importantes et fiables sur les variations climatiques pendant cette période (Labbé et Gaveau, 2011). Réimprimée en 1982 et très prisée outre-Atlantique, la *Statistique* est à l'origine d'un curieux débat, qui se poursuit encore actuellement sur quelques blogs américains, concernant le nom réel de son auteur : certains pensent ainsi que le nom était Lavallé, le prénom Jules (par exemple MJS). On peut oublier ce débat futile : toutes les archives, ainsi que les nombreux documents officiels qu'elles contiennent (en particulier des lettres à l'administration, voir ci-dessous) montrent sans ambiguïté que le nom de Jean Lavalle est le seul qui doit être retenu.



Fig. 2. Première page de l'*Histoire et statistique de la vigne et des grands vins de la Côte d'Or* (1855).

Son intérêt pour la botanique n'empêche pas que Jean Laval ne soit pas oublié sa vocation première, pratiquant la médecine et, surtout, devenant successivement professeur puis directeur de l'École locale de médecine. Il fait preuve dans ces domaines d'un désir constant de venir en aide à ses concitoyens, publiant des articles sur les moyens de détecter les fraudes sur le lait (Laval et Delarue, 1856), d'aider à la fécondation artificielle des poissons (Laval, 1852), ou de combattre maladies et épidémies (Laval, 1863, 1864). Le souci de faire profiter le plus grand nombre de ses connaissances l'amena ainsi à être, à partir de 1850 (environ), l'éditeur d'un journal local destiné au public cultivé, les *Causeries scientifiques, médicales et littéraires*. Il est également évident qu'un notable aussi actif ne pouvait manquer de s'intéresser à la politique de sa ville, ce qui lui causa progressivement de sérieux ennuis.

Grandeur et décadence

Le jardin botanique dépendant directement de la municipalité, Jean Laval ne pouvait manquer de chercher à jouer un rôle dans la politique locale et, au moment où il fut nommé directeur, il devint également membre du conseil municipal. Profondément libéral et attaché à la République, il eut bien du mal à accepter le coup d'État instaurant le Second Empire et, à partir de 1852, il entra en rébellion ouverte contre l'administration, bombardant le maire de lettres ouvertes rageusement critiques : « *Comment, nos égouts [sic] infectent, notre Suzon est d'une puanteur repoussante ; certains de nos lavoirs sont des sources de miasmes délétères ; notre rivière à l'eau autrefois si pure et où prospérait [sic] si bien sa truite saumonée [sic], est aujourd'hui couverte d'une couche irisée qui dégoûte le baigneur et tue*

le poisson, et nous devrions attendre quinze années la suppression de ces causes de maladie et de mort. Nous n'avons ni marché sérieux pour la grande culture, ni bourse pour le commerce, ni marché de détail convenable. Nos jardiniers sont obligés de tenir leurs expositions sur un trottoir et dans un lieu où il n'y a ni eau ni ombre... Notre théâtre, continuellement encombré de décors, est exposé à des chances considérables d'incendies. Les exercices équestres n'ont, à Dijon, ni cirque ni arène. Et nos collections, nos musées et nos écoles ? Et tout cela ne pourrait être largement modifié qu'après quinze années [...] » (Lavalle 1865, p. 7-8). Le résultat fut que, peu de temps avant le début de la guerre franco-prussienne, on lui retira sans ménagement la direction de l'École de médecine, devenue entre temps l'École de médecine et de pharmacie. Il demeura directeur du jardin botanique, mais commençait de prendre ses distances lorsque la guerre lui donna l'occasion d'accéder à un destin qu'il aurait voulu national.

Après la débâcle de Sedan (1^{er} septembre 1870), ce qui restait de l'armée française refluit vers Metz ou, pour ceux qui ne furent pas piégés dans cette poche fatale, en désordre vers le sud. Jean Lavalle prit le commandement d'un *Comité de Défense de la Côte d'Or*, chargé de s'opposer à l'avancée des armées prussiennes autour de Dijon (MJS). Un jeune correspondant de guerre anglais, Ernest Alfred Vizetelly (1855-1923), qui se trouvait dans la région à cette époque, raconte (traduction du texte anglais) : « *Des actions variées, fin Octobre, furent suivies par une marche rapide des armées prussiennes vers Dijon. Il y avait alors 12.000 ou 13.000 Gardes mobiles en Côte d'Or, désorganisés et sans commandement. La seule autorité était exercée par un civil, le Dr Lavalle. En comptant les soldats réguliers et les Gardes nationaux, on devait atteindre environ 20.000 hommes, mais pauvrement armés et équipés, avec un nombre insuffisant d'officiers aux compétences très inégales. Werder (commandant des troupes prussiennes) s'approcha de Dijon de façon hésitante, comme quelqu'un qui n'est pas sûr du terrain, ni de la force des armées en face de lui. Mais cette approche fut suffisante pour alarmer les Français, qui évacuèrent Dijon le 30 octobre, laissant Werder occuper la ville sans coup férir avec deux brigades. Trois jours auparavant, Metz s'était rendu [...] » (Vizetelly, 1914, p. 219).*

Après la guerre, Lavalle fut rendu responsable de cette piteuse défense, d'abord blâmé dans des articles de presse, puis dans quelques rapports d'apparence officielle. Traîné devant les tribunaux et incarcéré à Lyon, il fut rapidement innocenté « *en raison de son manque total d'expertise militaire* » (MJS). Mais il semble que ceci ne suffit pas à stopper les attaques contre sa personne, puisqu'il éprouva le besoin de se justifier par deux lettres écrites « *au Maire de Dijon et aux Membres du Conseil Municipal* », au nom du *Comité de Défense de la Côte d'Or* (Lavalle, 1872a, b). Si la première lettre est surtout une nouvelle critique de la mauvaise administration de la ville, la seconde est une expression passionnée de son idéal républicain et de son amour pour sa patrie. Après avoir rappelé les calomnies et agressions dont il fit l'objet – il dit même avoir été battu et poignardé –, il justifie son action pendant la guerre : « *J'ai eu une ambition ardente : celle d'être utile à mon pays et de fonder sa puissance sur les bases solides de l'égalité dans le droit, de la fraternité dans le devoir, de la liberté dans l'acte* » (Lavalle, 1872b). Il mentionne ensuite le soutien des plus hautes autorités nationales : Jules Crémieux, ministre de la Justice, et surtout Léon Gambetta, chef du

Gouvernement après la guerre. On ne connaît pas la réponse du maire, ni si Lavalley prit une part quelconque dans l'établissement de la Troisième République, qu'il devait pourtant appeler de ses vœux. Pendant les huit années qu'il lui restait à vivre, il prit progressivement ses distances avec Dijon, se retirant dans sa demeure de Premières, une bourgade à une trentaine de kilomètres à l'est de Dijon. Lavalley y possédait « *une modeste demeure* » (MJS), ainsi qu'une fabrique de céramique qu'il avait héritée de ses grands-parents. Après avoir appris l'art de la poterie auprès d'un moine italien du nom de Léonardi (Jacquemart, 1873, p. 424), le grand-père avait bâti un four de briques et commencé à produire des céramiques vers 1783, reconnaissables à une marque JL (Litchfield, 1900, p. 242 ; Burton et Hobson, 1909, p. 68). Il s'agissait d'œuvres assez élaborées, auxquelles Jean Lavalley donna une véritable dimension artistique et industrielle. À sa mort à Premières en 1880, la fabrique comptait plusieurs centaines d'ouvriers (au maximum 280), pour finalement fermer ses portes en 1905. Ses productions étaient recherchées (Bonnet, 1917), elles continuent probablement de faire le bonheur de quelques collectionneurs.

Travaux géologiques

En fait, seuls deux travaux d'intérêt géologique ont été publiés par Jean Lavalley, sa thèse de 1845 (Lavalley 1845b) et, huit ans plus tard, une courte note aux *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, intitulée *Recherches sur la formation lente des cristaux à la température ordinaire* (Lavalley, 1853b). Cette seconde publication relate des expériences dont il n'est pas aisé de savoir où et quand elles ont eu lieu, très probablement quelque part à Dijon. Sa thèse de géologie, *Le calorique considéré comme agent de métamorphisme dans les roches*, traite de sujets qui étaient alors à l'ordre du jour, grâce notamment au *Manuel de Géologie* de Henry T. de la Beche, traduit et popularisé en France par André Brochant de Villiers (1772-1840) (de la Beche, 1837). On y trouve surtout la description des transformations que subissent certaines couches sédimentaires, notamment calcaires, sous l'influence du « *calorique* », fluide immatériel « *dégagé des masses incandescentes qui les [les couches sédimentaires] ont bouleversées* » (p. 7). Mais rien n'est dit sur la nature du calorique, terme qui, après avoir été très utilisé au début du siècle (voir, par exemple, Scipion Breislak, 1812), vivait alors ses dernières années. L'importance attachée aux roches calcaires, sur l'exemple des Alpes tessinoises, vient de Leopold von Buch (1774-1853), l'inspirateur d'Élie de Beaumont et de la pensée académique française (surtout parisienne) de l'époque. Ce classicisme – mais pouvait-il en être autrement de quelqu'un qui se considérait probablement comme un géologue amateur – se marque aussi par les références à *l'Explication de la Carte géologique de France* d'Armand Dufrénoy et Léonce Élie de Beaumont, dont le premier tome était paru en 1841. Il est intéressant de noter la distinction faite par Jean Lavalley entre calorique « *normal* » (régional) et « *anormal* » (local, au voisinage des roches intrusives). Une dizaine d'années plus tard, ces noms seront repris par Achille Delesse (1817-1881), dans un travail que l'on considère généralement comme la première étude sérieuse sur le métamorphisme dans notre pays (Delesse, 1858, voir, par exemple, Touret et Nijland, 2002). Mais « *calorique* » est alors remplacé par « *métamorphisme* », et le terme a vécu, remplacé tout au long de l'ouvrage par celui de « *chaleur* ». Vingt ans après la

mort de Nicolas Sadi Carnot (1796-1832), les géologues avaient su se dégager d'une conception qui remontait au Moyen-Âge.

Il n'est pas nécessaire de pousser plus avant l'analyse d'un travail purement livresque et descriptif qui, comme plus tard, beaucoup de secondes thèses des thèses d'État, se résume à quelques généralités. On notera toutefois en conclusion une idée intéressante, qui, si elle avait été poussée plus avant, aurait pu se révéler extrêmement féconde : le rôle de la pression, aide possible du calorique (chaleur) pour expliquer le métamorphisme : « *N'est-ce pas au calorique aidé d'une pression considérable qu'est due la cristallisation de la craie du nord de l'Irlande, de Dax, etc. ? Sans la pression à laquelle étaient soumises ces roches calcaires, leur cristallisation eut-elle été possible ?* » (Lavalle, 1845b, p. 19). Après 1850, le rôle de la pression pour expliquer la schistosité deviendra un thème récurrent en géologie, surtout dans les pays de langue allemande (par exemple Oldroyd, 1996, p. 206). C'est naturellement le physicien Eduard Riecke (1845-1915) et son « *principe* » qui en tireront le plus grand bénéfice mais, bien avant, l'idée que des sédiments puissent être transformés en schistes sous l'effet de la pression avait été pressentie par Henry Clifton Sorby (1826-1908) (Sorby, 1863) et, surtout, Karl August Lossen (1841-1893) (Lossen, 1869, p. 218).

Dans sa thèse, Jean Lavalle mentionne brièvement les travaux expérimentaux de François-Sulpice Beudant (1787-1850) concernant la transformation de matières végétales en charbon (Lavalle, 1845b, p. 13). Il ne donne aucune précision sur la façon dont il a conduit ces expériences, ne mentionnant pas, par exemple, s'il a été inspiré par le célèbre Écossais Sir James Hall (1761-1832), dont les travaux dataient de plus de trente ans et étaient décrits en détail dans les manuels de l'époque : par exemple, *in* Daguin (1863, p. 524) : « *Procédé de Hall. Certaines substances se décomposent par l'action de la chaleur, avant d'entrer en fusion [...] comme la craie, la houille, la corne. Il renfermait ces substances dans des tubes de fer hermétiquement fermés, de manière que les gaz provenant d'une petite partie décomposée exerçaient une pression énorme, qui empêchait le reste de se décomposer. La craie fond ainsi, et prend souvent, après s'être refroidie, l'aspect du marbre saccharoïde, La sciure de bois se transforme en un charbon bitumineux semblable à la houille, et brûlant avec une flamme brillante.* » Toujours est-il que, sans que l'on sache exactement où et quand, Lavalle, qui à côté de son travail de médecin était alors en charge du Jardin botanique, décide de reprendre ses expériences, en s'intéressant au rôle de la pression sur le mode de cristallisation des sels. Il est certain que la facilité de cristallisation des sels sous pression atmosphérique en font un matériel particulièrement propice. Probablement a-t-il aussi pris quelque inspiration chez Beudant, qui, chargé par Louis XVIII de rapporter à Paris la riche collection de l'exilé Jacques-Louis de Bournon (1751-1825), avait été impressionné par la multiplicité des formes des cristaux et avait cherché à les reproduire expérimentalement (Lacroix, 1930). Beudant avait analysé les facteurs déterminant la forme des cristaux dans les solutions salines, un travail qu'il présenta devant l'Académie des sciences en 1817, publié un an plus tard (Beudant, 1818). Il reprit la description de ces travaux dans une section (Causes des variations des structures) de son *Traité élémentaire de minéralogie*, l'un des ouvrages les plus diffusés du XIX^e siècle (Beudant 1837, p. 189-205). Parmi les nombreux facteurs influençant la forme des cristaux, on trouve (entre autres) la température, l'humidité

relative de l'air à pression atmosphérique, la vitesse de refroidissement, la forme des récipients, le volume et la concentration des solutions-mères, même l'électricité, sorte de *deus ex-machina* de l'époque.

Mais Beudant ne dit rien sur la pression, et c'est peut-être ce manque, ajouté à la remarque qu'il fit à la fin de sa thèse, qui conduisit Jean Lavalley à entreprendre une série d'expériences, dont on ne sait pas quand elles ont commencé, probablement peu de temps après sa thèse, ni où elles ont eu lieu, sans doute dans les locaux techniques du jardin botanique. En effet, la publication des résultats dans les *Comptes Rendus*, quelques années plus tard (Lavalley, 1853 b), n'est pas une véritable note scientifique, mais plutôt un résumé de deux pages, ne donnant que les résultats sous forme d'une liste de vingt observations, ou plutôt propositions, concernant le mode de formation des cristaux allongés. Le procédé n'était pas inhabituel à l'époque. Les *Comptes Rendus* servaient avant tout à disséminer la connaissance, et le Secrétaire perpétuel – à l'époque l'omniprésent Élie de Beaumont –, avait tout pouvoir de décider si et comment un texte soumis devait être publié. Sans doute a-t-il considéré que la forme des cristaux était un thème trop éloigné des chaînes de montagnes pour mériter une publication *in extenso*. On sait donc simplement que les expériences « *ont duré plus de 15 mois* » et que les conditions ont été variables, « *en les modifiant de manière à étudier ces phénomènes sous différents points de vue* » (Lavalley, 1853b). Il semble aussi qu'un certain nombre de sels aient été utilisés, mais Lavalley en mentionne seulement deux par leur nom, l'alun et le nitrate de plomb $Pb(NO_3)_2$. La plupart des vingt propositions sont des considérations assez générales, qui ont perdu aujourd'hui tout intérêt. Mais deux concernent directement la notion de pression de cristallisation ; la proposition 3 : « *Si le cristal est placé sur le fond du vase contenant le liquide saturé qui lui fournit les éléments nécessaires à son accroissement, la face inférieure se développe beaucoup plus que les autres* », et la proposition 6 : « *Un cristal quelconque se formant sur le fond d'un vase auquel il n'adhère pas, se soulève sur ses bords, et il se forme à la face inférieure un angle rentrant parfaitement évident, et qui ne peut être considéré comme le résultat de la réunion de plusieurs cristaux* ». Autrement dit, la pression exercée par le poids du cristal entraîne une augmentation de la taille de la surface de contact (anticipation de ce qui deviendra plus tard le « *principe de Riecke* ») et, surtout, la cristallisation exerce une force capable de soulever le cristal. Sans que Lavalley utilise lui-même ce nom, on peut trouver dans ces deux propositions (surtout la proposition 6) une justification de la notion de pression de cristallisation, alors couramment admise dans les pays de langue allemande. Les veines minéralisées de Saxe contiennent en effet fréquemment des minéraux allongés perpendiculaires aux épontes et minéralogistes et géologue miniers allemands admettaient, plus ou moins intuitivement, que c'était la force exercée par ces minéraux allongés lors de leur cristallisation qui écartait les lèvres de la fissure, permettant ainsi la circulation. Le principe avait été évoqué par Abraham Gottlob Werner (1749-1817) lui-même, mais surtout avait été clairement exprimé par ses successeurs à Freiberg : Karl Gustav Adalbert von Weissenbach (1797-1846), Bernhard von Cotta (1808-1879) et Gustav Adolf Kenngott (1818-1897) (von Weissenbach, 1836, p. 22 ; Cotta 1854, p. 16, 286, Kenngott, 1855). La pression de cristallisation était du reste devenue un moyen commode d'expliquer les phénomènes les plus divers. Le célèbre chimiste Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899) y faisait appel pour expliquer l'élévation des sols en Islande

(Bunsen 1847), alors qu'un médecin de Stuttgart, George Ludwig Duvernoy (dates inconnues) n'hésitait pas à expliquer ainsi la formation des chaînes de montagnes (Duvernoy, 1852). Ce Duvernoy, dont les idées furent qualifiées d'absurdes par quelques contemporains (par exemple Volger 1854, p. 66, 225), ne doit pas être confondu avec un homonyme célèbre, Louis-Georges Duvernoy (1777-1855), successeur de Cuvier au Collège de France. Mais les deux hommes faisaient probablement partie de la même famille. Le père de George Ludwig (www.martinszeller-verband.de) était originaire de Montbéliard, alors sous autorité allemande, et aussi bien Cuvier que Louis-Georges Duvernoy avaient fait leurs études à l'Académie Caroline de Stuttgart, avant que Montbéliard ne redevienne française en 1793. George Ludwig qui, comme Lavalley, était naturaliste et médecin [il avait soutenu une thèse de botanique (Duvernoy, 1825)] avant de devenir « *Stadtdirektionartz* » (médecin municipal) de Stuttgart, n'a pas laissé une grande trace en géologie. Cependant, ses idées ont fait un retour inattendu un siècle plus tard avec René Perrin (1893-1966) et son « *métamorphisme générateur de plissement* » (Perrin, 1935), suscitant alors le même scepticisme de la part de ses contemporains.

Les géologues de Freiberg auraient pu trouver chez Lavalley une confirmation expérimentale de leurs idées. Mais Robert Bunsen avait alors demandé le même travail à un des chimistes les plus célèbres de l'époque en Allemagne, Hermann Franz Moritz Kopp (1817-1892) (Bredig, 1910). Kopp publia ses résultats deux ans après Lavalley (Kopp, 1855), avec des conclusions diamétralement opposées : « *Un cristal d'un poids spécifique très peu supérieur à celui de la solution ne peut exercer qu'une force très faible sur sa base. On pourrait donc s'attendre à ce qu'il annule cette force lors de sa croissance et pousse vers le bas [...] mais je n'ai jamais pu observer que cela se produise et que le cristal puisse se soulever* » (Kopp 1855, p. 124-125, traduction libre du texte allemand). Kopp ne cite pas Lavalley, et l'on n'a aucune preuve qu'il ait eu connaissance de ses travaux (bien que le libellé de son texte semble directement s'opposer à celui de la proposition 6). Toujours est-il que l'autorité de Kopp est infiniment supérieure à celle d'un obscur médecin botaniste de province. Pendant toute la fin du XIX^e siècle, la notion de pression de cristallisation fut considérée comme dépassée et devant être oubliée. C'est par exemple ce qu'écrivit Otto Lehmann (1855-1922), le découvreur des cristaux liquides, dans un célèbre traité de physique moléculaire (Lehmann, 1888). Ayant fait ses études à Strasbourg de 1872 à 1877, Lehmann connaissait pourtant très bien la minéralogie française, faisant référence dans son livre à d'autres aspects du travail de Lavalley (Lehmann, 1888, p. 313).

Nouvelles recherches sur la pression de cristallisation

Après un interlude de près d'un demi-siècle, les travaux expérimentaux sur la pression de cristallisation sont repris à grande échelle, en s'attachant cette fois à décrire précisément et quantifier un mode opératoire sur lequel Lavalley – pas plus que Kopp d'ailleurs – n'avait donné le moindre détail. Au Geophysical Laboratory de la Carnegie Institution de Washington, DC (USA), George Becker (1849-1919) et Arthur Day (1869-1960) imaginent un dispositif simple, un cristal immergé entre deux lames de verre dont on peut mesurer l'écartement

(Becker et Day, 1905). Ils conclurent à la réalité de la pression de cristallisation, mais comme précédemment, leurs résultats ne furent pas confirmés par les Allemands Willy Bruhns (1864-1929) et Werner Mecklenburg (1880-1968) (Bruhns et Mecklenburg, 1913 ; Mecklenburg, 1913). Ces derniers conclurent à l'absence de pression de cristallisation, ce qui fut bientôt repris dans les traités allemands (par exemple Boeke, 1915, p. 328), mais poussa Becker et Day à reprendre leurs expériences et à comparer dans le détail leurs résultats avec ceux de Bruhns et Mecklenburg. Ils montrèrent alors (Becker et Day, 1916) que, toutes choses égales par ailleurs, leurs résultats étaient identiques, mais que les différences d'interprétation tenaient à des conditions expérimentales différentes : uniquement des cristaux « libres » (sans charge sur les plaques de verre) dans le cas de Becker et Day, et certains cristaux chargés chez Bruhns et Mecklenburg. Ayant réalisé que ces différences étaient probablement aussi la cause des résultats contradictoires observés par Koppe et Laval, Stephen Taber (1882-1963), de l'université de South Carolina, explora cette voie de recherche, publiant également ses résultats en 1916 (Taber, 1916a, b) : « *L'auteur commença ses travaux sur la croissance cristalline [...] faisant attention à observer toutes les précautions prises par Bruhns et Mecklenburg. [...] Les premiers résultats étaient confus, certains cristaux soulevant leur charge de quelques dixièmes de millimètre, alors que d'autres ne bougeaient pas [...]. Plus tard, on s'aperçut que les cristaux chargés n'augmentaient leur hauteur que s'il n'y avait aucun cristal libre (non chargé) dans le bain* » (Taber, 1916a p. 534, traduction libre du texte anglais). Cette conclusion, qui est aussi celle de Becker et Day en 1916 (travail dont Taber n'a pu avoir connaissance, car il est paru quelques mois après ses propres travaux), fit entrevoir à Taber le rôle de la pression dans une solution saturée : « [...] *il apparaît que lorsque deux cristaux, identiquement placés dans une solution saturée, sont soumis à des pressions différentes, le système est en équilibre instable. En d'autres termes, une solution peut être sursaturée par rapport à un cristal sous pression faible, alors qu'elle tendra à dissoudre un cristal placé sous une pression plus forte. Cela explique probablement pourquoi Bruhns et Mecklenburg n'ont pu reproduire les résultats des expériences de Becker et Day* » (Taber, 1916a, p. 535, traduction du texte anglais).

L'importance d'avoir dans le même bain des cristaux libres et en charge peut s'expliquer par le fait que, dans ce cas, le degré de saturation de la solution est déterminé par les cristaux libres. Les cristaux en charge seront sous-saturés, donc de la matière pourra se déposer, tendant à annihiler la différence de pression.

Bien que les travaux de Taber semblent prouver la réalité de la pression de cristallisation, puisque l'on peut mettre en évidence une modification, certes minime, mais sensible, des cristaux chargés, bien des réticences subsistèrent longtemps, surtout en Allemagne. Dans sa thèse, Richard Schmidt (Kiel) avait certes fait appel à ce mécanisme pour expliquer les orientations parallèles des agrégats fibreux de halite et de gypse (Schmidt, 1911), mais dix ans plus tard, dans une adresse devant l'Association géologique de Munich (Münchener Geologische Vereinigung), H. Steinmetz, à partir d'une revue exhaustive de Karl Erik Andrée (1880-1959), s'attachait à en démontrer l'inexistence dans tous les exemples où il avait été invoqué. Cela n'empêcha pas quelques chercheurs de mettre en œuvre des moyens

de plus en plus sophistiqués pour mesurer des forces et des déplacements manifestement minimes. On peut citer en Russie les travaux d'Alexei Wassiljewitsch Schubnikow (1880-1970), d'abord à l'Institut Lomonossow de l'Académie des sciences de Leningrad (Saint-Petersburg), puis à l'Institut de cristallographie de l'Académie des sciences de Moscou (Schubnikow, 1934). Mais, encore une fois, l'impulsion définitive vint d'Allemagne, avec les travaux de Carl Wilhelm Correns (1893-1980) (en collaboration avec Werner Steinborn) à l'Institut de minéralogie et pétrographie de l'université de Rostock (Correns, 1926 ; Correns et Steinborn, 1939) (Fig. 3). Ces auteurs analysèrent surtout le rôle du degré de sursaturation, c'est-à-dire la concentration réelle (C) divisée par la concentration à saturation (Cs) d'une solution-mère pendant la concentration d'un sel à température ordinaire. Ils conçurent un dispositif expérimental permettant de mesurer avec une grande précision la pression exercée par la face supérieure du cristal au cours de sa croissance – pour autant que l'on puisse en juger, une reproduction directe des expériences de Laval. Ils montrèrent alors que la pression (P) est directement proportionnelle au logarithme du degré de sursaturation : $P = R T / V \ln(C/C_s)$, où R = constante du gaz idéal, T = température, V = volume molaire du cristal de sel). Cette équation, connue sous le nom d'*équation de Correns et Steinborn*, reste très utilisée dans les travaux de croissance cristalline. Toutefois, surtout dans la littérature anglo-saxonne, la croissance cristalline par sursaturation sous pression est souvent connue sous le nom de *Principe de Taber* (par exemple Hilgers, 2005).

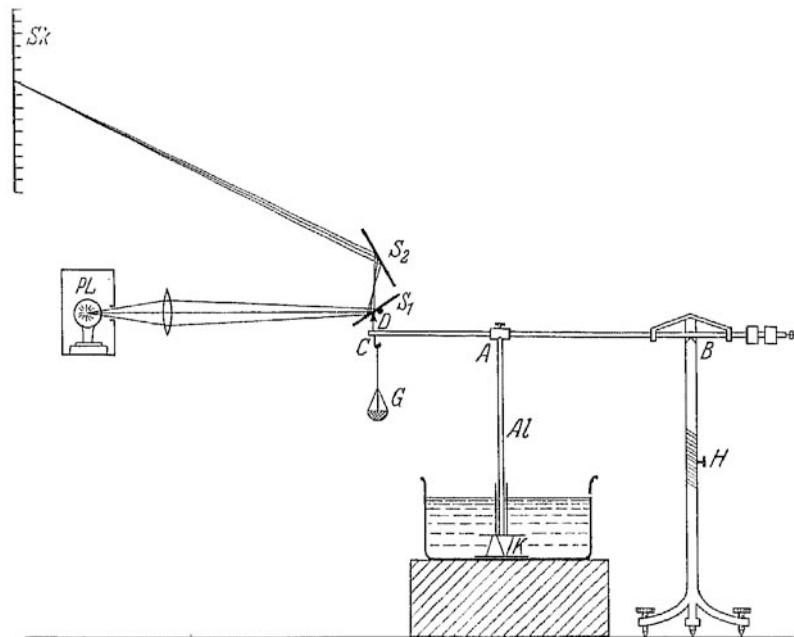


Fig. 3. Dispositif expérimental utilisé par Correns et Steinborn (1939) pour la mesure de la pression de cristallisation (schéma). PL = Lampe au tungstène, S1 = miroir orientable, S2 = miroir fixe, Sk = échelle de mesure, D = vis de rotation du miroir, C = extrémité du fléau de la balance, G = contrepoids, K = cristal en cours de croissance, A = barre de liaison en aluminium (Al), B = balance, H = réglage de la hauteur.

Professeur à Heidelberg puis Göttingen (où il transforma les *Heidelberger Beiträge* en *Contributions to Mineralogy and Petrology*), Carl Wilhelm Correns est sans nul doute l'un des minéralogistes et pétrographes les plus importants de l'Allemagne moderne. Ses activités

furent multiples, et il n'est pas certain que ses collègues de Göttingen aient considéré son travail sur la pression de cristallisation comme très important. Aucune mention n'en est faite dans sa notice nécrologique (Hoefs, 1982). Toutefois, ce concept est très utilisé en géologie appliquée et en sciences de l'ingénieur, sans parler de l'énorme littérature concernant la croissance cristalline : dégradation des matériaux de construction poreux par les sels solubles (maladie de la pierre) (par exemple Scherer, 1999 ; 2004 ; Steiger, 2005a, b ; Lubelli, 2006 et bien d'autres), colmatage des pores par des sels en réponse à l'injection de CO² dans les aquifères (par exemple Osselin *et al.*, 2013), attaque chimique sulfatée de bétons et mortiers avec formation d'ettringite ou thaumasite (par exemple Bary *et al.*, 2014 ; Bizzozero *et al.*, 2014), croissance des minéraux dans les veines (par exemple Means et Li, 2001), avec leurs conséquences lors de la fracturation hydraulique (par exemple Noiriél *et al.*, 2010).

Conclusion : des discussions toujours actuelles

La très grande majorité des travaux cités ci-dessus acceptent les conclusions de Correns et Steinborn, au point d'avoir incité des auteurs américains à faire une traduction commentée en anglais de l'article original en allemand (Flatt *et al.*, 2007). La pression de cristallisation, notamment, est sans nul doute le mécanisme le plus souvent évoqué pour expliquer la « *maladie de la pierre* ». Peu de phénomènes géologiques ont fait pendant si longtemps l'objet d'études expérimentales, avec des résultats divergents, avant que Correns et Steinborn ne semblent mettre un point final aux discussions. Or, il n'en est rien. Utilisant toutes les ressources de la technologie moderne (analyse d'image, microscope électronique), quelques chercheurs reviennent sur la réalité du concept, estimant que la pression exercée par un cristal en cours de croissance ne peut excéder la résistance du matériel poreux qui le contient (par exemple Desarnaud, 2009 ; Desarnaud *et al.*, 2013). En d'autres termes, on retrouve après 150 ans le même type de discussions que celles qui ont opposé Laval et Kopp. Dans une aventure qui n'est donc pas terminée, quelques noms (Taber, Correns, Steinborn) ont acquis une réputation quasi universelle. Il est juste de rappeler les autres, en particulier le rôle de pionnier joué, probablement sans qu'il s'en rende compte lui-même, par un modeste botaniste et médecin de Dijon, dont la rue du Docteur Laval perpétue le souvenir dans sa ville natale.

Remerciements : Mme Béatrice Remoissenet, chargée des collections du Jardin des Sciences : muséum, planétarium, jardin botanique de Dijon, nous a aimablement fourni une copie du document manuscrit cité ci-dessous en archive. Notre manuscrit a bénéficié des commentaires et critiques de Jean Gaudant.

Archive : Cité comme MJS dans le texte. Document anonyme, non daté (mais certainement postérieur à mai 1927, en fonction d'indications dans le texte), intitulé: « *Dr Laval* », 4 pages, conservé au Musée de Dijon.

Références

- ANDRÉE, K. (1912). Die geologische Bedeutung des Wachstumsdrucke kristallisierender Substanzen. *Geologische Rundschau*, **3**, p. 7-15.
- BARY, B., LETERRIER, N., DEVILLE, E., BESCOP, P. LE (2014). Coupled chemo-transport-mechanical modelling and numerical simulation of external sulfate attack in mortar. *Cement and Concrete Composites*, **49**, p. 70-83.
- BECHE, H. T. DE LA (1837). *Manuel géologique*, 2^e édition, Méline, Cans et Cie, Bruxelles, 505 p.
- BECKER, G. F., DAY, A. L. (1905). The linear force of growing crystals. *Proceedings of the Washington Academy of Sciences*, **7**, p. 283-288.
- BECKER, G. F., DAY, A. L. (1916). Note on the linear force of growing crystals. *Journal of Geology*, **24**, p. 313-335.
- BEUDANT, F. S. (1818). Sur les causes qui déterminent les variations des formes cristallines d'une même substance minérale. *Annales des Mines*, (1), 3, p. 289-344.
- BEUDANT, F. S. (1837). *Traité élémentaire de minéralogie*. Tome I, 2^e éd., Cabilian Jeune, Paris, 752 p.
- BIZZOZERO, J., GOSSELIN, C., SCRIVENER, K. L. (2014). Expansion mechanisms in calcium aluminate and sulfoaluminate systems with calcium sulfate. *Cement and Concrete Research*, **96**, p. 190-202.
- BOEKE, H. E. (1915). *Grundlage der physikalisch-chemischen Petrographie*. Gebruder Borntraeger, Bonn.
- BONNET, E. (1917). Un pharmacien inventeur d'une monnaie de billon. *Bulletin de la Société d'Histoire de la Pharmacie*, **5**, (16), p. 271-274.
- BREDIG, G. (1910). Kopp, Hermann. In: *Allgemeine Deutsche Biographie*, Historische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, **55**, p. 820-826.
- BREISLAK, S. (1812). *Introduction à la géologie ou à l'histoire naturelle de la Terre*. Traduit de l'italien par J.J.B. Bernard. Chez J. Klosterman Fils, libraire de l'École impériale polytechnique, Paris, 563 p.
- BRUHNS, W., MECKLENBURG, W. (1913). Über die sogenannte Kristallisationskraft. *Jahresbericht der Niedersächsichen geologischen Verein zu Hannover*, **6**, p. 22-115.
- BUNSEN, R. (1847). Ueber den inneren Zusammenhang der pseudovulkanischen Erscheinungen Islands. *Liebig's Annalen der Chemie und Pharmacie*, **62**, p. 1-59.
- BURTON, W., HOBSON, R. L. (1909). *Handbook of marks on pottery and porcelain*. MacMillan & Co., London, 210 p.
- CHARPY, G. (1981). *Le canton de Genlis en 1900 [...] à travers les cartes postales*. Éditions de Saint-Seine l'Abbaye, Saint-Seine l'Abbaye, 69 p.
- CORRENS, C. W. (1926). Über die Erklärung der sogenannten Kristallisationskraft. *Sitzungs-Berichte der preußische Akademie der Wissenschaften*, **11**, p. 81-88.

- CORRENS, C. W. (1949). Growth and dissolution of crystals under linear pressure. *Discussions of the Faraday Society*, **5**, p. 267-271.
- CORRENS, C. W., STEINBORN, W. (1939). Experimente zur Messung und Erklärung der sogenannten Kristallisationskraft. *Zeitschrift für Kristallographie etc.*, **101**, p. 117-133.
- COTTA, B. von (1854). *Gangstudien oder Beiträge zur Kenntnis der Erzgänge. Zweiter Band.* J.G. Engelhardt, Freiberg, 523 p.
- DAGUIN, P. A. (1863). *Cours de physique élémentaire avec les applications à la météorologie : à l'usage des lycées et des établissements d'instruction secondaire.* É. Privat, Toulouse & F. Tandeu, Paris, 756 p.
- DELESSE, A. (1858). *Études sur le métamorphisme des roches.* Dalmont et Dunod, éditeurs Paris, 471 p.
- DESARNAUD, J. (2009). *Mécanisme de croissance et de dissolution de cristaux de KCl sous charge : apport dans la connaissance des mécanismes d'altération des pierres par les sels.* Thèse de Doctorat d'État, Université Paul Cézanne-Aix-Marseille III, Marseille, 194 p.
- DESARNAUD, J., GRAUBY, O., BROMBLET, P., VALLET, J. M., BARONNET, A. (2013). Growth and dissolution of crystal under load: New experimental results on KCl. *Crystal Growth and Design*, **13**, p. 1067-1074.
- DUVERNOY, G. L. (1825). *Dissertatio inauguralis botanica, de salvinia natante, cum aliquibus aliis plantis cryptogamis comparata.* Eifert, Tübingen, 15 p.
- DUVERNOY, G. (1852). Ueber die ausdehnende Wirkung der Kristallisationskraft, nebst einem Versuche, die Gestalt der Erd-Rinde, besonders die Erhebung der Gebirge, hieraus zu erklären. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie, Geognosie und Petrefaktenkunde*, **1852**, p. 781-821.
- FLATT, J., STEIGER, M., SCHERER, G. W. (2007). A commented translation of the paper by C.W. Correns and W. Steinborn on crystallization pressure. *Environmental Geology*, **52**, p. 222-237.
- GENTY, P. (1934). Le centenaire du jardin botanique de Dijon. *Mémoires de l'Académie des Sciences, Arts et Belles-Lettres de Dijon*, **1933**, p. 220-234, Imprimerie Bernigaud-Privat, Dijon.
- HILGERS, C. (2005). *Aspects of material transport and polycrystal growth in fractures.* Habilitation thesis, RWTH Aachen, 118 p.
- HOEFS, J. (1982). Memorial of Carl Wilhelm Correns, May 19, 1893-August 29, 1980. *American Mineralogist*, **67**, p. 399-400.
- JACQUEMART, A. (1873). *History of the ceramic art. A descriptive and philosophical study of the pottery of all ages and all nations.* Sampson Low, Marston, Low & Searle, London, 627 p.
- KENNGOTT, A. (1855). Mineralogische Notizzen , betreffend die bekannte Species: Karstenit, Dolomit, Millerit, Turmalin, Galakit, Wasser, Plagionit, Dopsid, Zinkit, Calcit und Felsöbanit, sowie zwei Neue, den Enstatit im Geschlechte der Augit-Spathe und den Pseudophit im

- Geschlechte der Serpentin-Steatite. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften, mathematisch-naturwissenschaftliche Classe*, I, **16**, p. 152-179.
- KOPP, H. (1855). Ueber die Bildung von Krystallen mit Kernen. *Liebig's Annalen der Chemie und Pharmacie*, **94**, p. 118-125.
- LABBÉ, T., GAVEAU, F. (2011). Les dates de bans de vendange à Dijon : établissement critique et révision archivistique d'une série ancienne. *Revue Historique*, **657**, p. 19-51.
- LACROIX, A. (1930). Notice historique sur Francois-Sulpice Beudant et Alfred-Louis-Olivier Legrand des Cloizeaux, membres de la Section de Minéralogie de l'Académie des Sciences, lue dans la séance publique annuelle du 15 décembre 1930 par M. Alfred Lacroix, secrétaire perpétuel. Accessible sur www.anales.org
- LAVALLE, J. (1845a). *De l'hydropisie de la cavité abdominale*. Thèse, Académie de Dijon, Rignoux, Dijon, 39 p.
- LAVALLE, J. (1845b). *Le calorique considéré comme agent de métamorphisme dans les roches*. Thèse, Académie de Dijon, Loireau-Feuchot, Dijon.
- LAVALLE, J. (1852). *Observations pratiques sur les fécondations artificielles dans les poissons*. Mémoire adressé à M. le ministre de l'Agriculture et du Commerce, par M. Lavalley. E. Tricault, Dijon, 19 p.
- LAVALLE, J. (1853a). Notice sur le peuplier de l'Arquebuse à Dijon. *Revue horticole de la Côte-d'Or*, **1852-1853**, 8 p.
- LAVALLE, J. (1853b). Recherches sur la formation lente des cristaux à la température ordinaire. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **36**, p. 493-495.
- LAVALLE, J. (1854). *Catalogue général des plantes cultivées au jardin botanique de la ville de Dijon*. Loireau-Feuchot, Dijon, 105 p.
- LAVALLE, J. (1855). *Histoire et statistique de la vigne et des grands vins de la Côte d'Or* ; avec le concours de MM. Joseph Garnier, Delarue et d'un grand nombre de propriétaires et vigneron. Dusacq, Paris & Picart, Dijon & Joeger, Gray, Toulouse, 244 p.
- LAVALLE, J., (1863). *De l'Épidémie actuelle et de quelques-unes des causes d'insalubrité qu'on rencontre à Dijon*. A. Grange, Dijon, 6 p.
- LAVALLE, J. (1864). *Mémoire sur une maladie des céréales et spécialement du froment, présenté à l'Académie des sciences dans sa séance du 7 mars 1864*. Thévenard, Dijon, 7 p.
- LAVALLE, J. (1865). *Quelques mots sur les budgets de la ville de Dijon, de 1830 à 1864*. Dijon, 15 p.
- LAVALLE, J. (1872a). *Lettre du Dr J. Lavalley à M. Dubois, maire de Dijon et aux membres du Conseil municipal, relative aux actes du Comité de défense de la Côte-d'Or*. Rabutot, Dijon, 12 p.
- LAVALLE, J. (1872b). *Deuxième lettre à M. le maire et au Conseil municipal de la ville de Dijon*. Comité de défense de la Côte-d'Or, 18 p.

- LAVALLE, J., DELARUE, E. (1856). *Observations sur les moyens de reconnaître les falsifications du lait*. Loireau-Feuchot, Dijon, 19 p.
- LAVALLE, J., SAVY, F. (1852). *Traité pratique des champignons comestibles : comprenant leur organisation, leurs caractères botaniques, leurs propriétés alimentaires, leur culture, la manière de les préparer, les moyens de les distinguer des espèces vénéneuses et les soins à donner aux personnes empoisonnées par ces dernières*. J.-B. Baillièere, Paris & Lamarche et Derouelle, Dijon, 147 p.
- LEHMANN, O. (1888). *Molekularphysik, mit besonderer Berücksichtigung mikroskopischer Untersuchungen und Anleitung zu solchen sowie einem Anhang über mikroskopische Analyse*. Band I, W. Engelmann, Leipzig, 830 p.
- LITCHFIELD, F. (1900). *Pottery and porcelain, a guide to collectors*. Truslove, Hanson & Comba, London & New York, 362 p.
- LOSSEN, K.A. (1869). Metamorphische Schichten aus der paläozoischen Schichtenfolge des Osthazeres. *Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft*, **21**, p. 281-340.
- LUBELLI, B.A. (2006). *Sodium chloride damage to porous building materials*. PhD thesis, Delft University of Technology, Delft.
- MEANS, W.D. & LI, T. (2001). A laboratory simulation of fibrous veins: Some first observations. *Journal of Structural Geology*, **23**, p. 857-863.
- MECKLENBURG, W. (1913). Über die 'Kristallisationskraft', eine Darstellung vom chemischen Standpunkte aus. *Naturwissenschaften*, **1**, (52), p. 1294-1298.
- NOIRIEL, C., RENARD, F., DOAN, M. L., GRATIER, J.-P. (2010). Intense fracturing and fracture sealing induced by mineral growth in porous rocks. *Chemical Geology*, **269**, p. 197-209.
- OLDROYD, D. (1996). *Thinking about the Earth: A history of ideas in geology*. Continuum, London / New York, 410 p.
- OSSELIN, F., FEN-CHONG, T., FABBRI, A., DANGLA, P., LASSIN, A., PEREIRA, J. M. (2013). Stress induced by precipitation of salts under CO₂ injection in deep saline aquifers. In: *Proceedings of the International Workshop on Geomechanics and Energy: The Ground as Energy Source and Storage*, Lausanne.
- PERRIN, R. (1935). *Le métamorphisme générateur de plissement*. Imp. René et Paul Deslis, 56 p. Également publié dans les *Mémoires Annales des Mines*, **8-2**, p. 149-200.
- RAVOIRE, F. (2008). La manufacture de faïence de Villers-les-Pots (Côte-d'Or) (1820-1910) : Découvertes archéologiques récentes. *Revue archéologique de l'Est*, **57**, p. 367-388.
- RIOUX, J.A. (2011). Écologie, évolution : un précurseur montpelliérain, Charles-Frédéric Martins, directeur exemplaire du Jardin des plantes. *Bulletin de l'Académie des Sciences et Lettres de Montpellier*, **42**, p. 325-348.
- SCHERER, G. W. (1999). Crystallization in pores. *Cement & Concrete Research*, **29**, p. 1347-1358.

- SCHERER, G. W. (2004). Stresses from crystallization of salt. *Cement & Concrete Research*, **34**, p. 1613-1624.
- SCHMIDT, R. (1911). *Beschaffenheit und Entstehung parallelfaseriger Aggregate von Steinsalz und von Gips*. PhD Thesis, Christian Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel, 25 p.
- SCHUBNIKOW, A. (1934). Vorläufige Mitteilung über die Messung der sogenannten Kristallisationskraft. *Zeitschrift für Kristallographie*, **88**, p. 466-469.
- SORBY, H. C. (1863). On the direct correlation of mechanical and chemical forces. *Proceedings of the Royal Society of London*, **18**, p. 538-550.
- STEIGER, M. (2005a). Crystal growth in porous materials. I: The crystallization pressure of large crystals. *Journal of Crystal Growth*, **282**, p. 455-469.
- STEIGER, M. (2005b). Influence of crystal size on the crystallization pressure. *Journal of Crystal Growth*, **282**, p. 470-481.
- STEINMETZ, H. (1923). Über die Kristallisationskraft, insbesondere bei geologischen Vorgängen. *Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie*, **23**, p. 423-427.
- TABER, S. (1916a). The growth of crystals under external pressure. *American Journal of Science*, **4**, p. 532-556.
- TABER, S. (1916b). The origin of veins of the asbestiform minerals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **2**, p. 659-664.
- TOURET, J.L.R., NIJLAND, T.G. (2002). Metamorphism today: new science, old problems, p. 113-141 in OLDROYD, D.R. (ed.): *The Earth Inside and Out: Some Major Contributions to Geology in the twentieth Century*, Geological Society, London, Special Publication **192**, p.113-141.
- VIZETELLY, E.A. (1914). *My days of adventure: the fall of France (1870-1871)*. Chatto & Windus, London, 351 p.
- VOLGER, O. (1854). Ueber die Volumeveränderungen, welche durch die Kristallisation hervorgerufen werden. *Poggendorfer Annalen der Physik und Chemie*, **93**, p. 66-94.
- WEISSENBACH, K. G. A. von (1836). *Abbildung merkwürdiger Gangverhältnisse aus dem sächsischen Erzgebirge*. L. Voss, Leipzig, 63 p.

Websites

www.martinszeller-verband.de/genealogie/getperson.php?personID=I10278&tree=zeller
(accessed August 1, 2014).

Académie des Sciences, Belles-Lettres et Arts de Dijon: <http://www.acascia-dijon.fr/>

Le Jardin des Sciences, Dijon: <http://www.dijon.fr/les-musees!0-35/le-jardin-des-sciences-museum-planetarium-jardin-botanique!1-33/>