



Dynamiques environnementales

Journal international de géosciences et de l'environnement

39-40 | 2017

Explorateurs, femmes et hommes de science :
voyages en terres mal connues

Stanislas Meunier (1843-1925) et la controverse sur le creusement des « puits naturels du calcaire ». L'apport de la géologie expérimentale

Stanislas Meunier (1843-1925) and the controversy about the digging of «natural limestone wells». The contribution of experimental Geology

Stéphane Jaillet, Christine Maury et Christophe Gauchon



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/dynenviron/409>

DOI : 10.4000/dynenviron.409

ISSN : 2534-4358

Éditeur

Presses universitaires de Bordeaux

Édition imprimée

Date de publication : 1 juin 2017

Pagination : 90-100

ISSN : 1968-469X

Référence électronique

Stéphane Jaillet, Christine Maury et Christophe Gauchon, « Stanislas Meunier (1843-1925) et la controverse sur le creusement des « puits naturels du calcaire ». L'apport de la géologie expérimentale », *Dynamiques environnementales* [En ligne], 39-40 | 2017, mis en ligne le 01 juin 2018, consulté le 28 novembre 2019. URL : <http://journals.openedition.org/dynenviron/409> ; DOI : 10.4000/dynenviron.409



La revue *Dynamiques environnementales* est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.



figure 1 : Portrait de Stanislas Meunier (1843 - 1925) réalisé par Lecomte de Noüy en 1920 (reproduction illustrant la note nécrologique publiée dans le n° 2666 de la Nature du 9 mai 1925 ; Licence CC 0-Domaine public, Wikimedia commons).

STANISLAS MEUNIER



Stanislas Meunier (1843-1925) et la controverse sur le creusement des « puits naturels du calcaire ». L'apport de la géologie expérimentale

Stéphane Jaillet¹, Christine Maury² et Christophe Gauchon³

« L'expérience ne trompe jamais ; seuls vos jugements errrent, qui se promettent des résultats étrangers à notre expérimentation personnelle ».

Léonard de Vinci

Résumé/Abstract

À la fin du XIX^e siècle, Stanislas Meunier (1843-1925), professeur au muséum d'Histoire Naturelle, développe la géologie expérimentale. Il est sans doute le seul à tester les processus érosifs et s'intéresse notamment au creusement des cavernes et des puits naturels du calcaire. Sa théorie est basée sur l'expérimentation. Par un jet acide, ascendant ou descendant, il cherche à reproduire les phénomènes de la nature et génère ainsi des formes de dissolution sur des maquettes calcaires de dimensions modestes (une dizaine de centimètres). Les formes coniques obtenues, en entonnoir (jet descendant) ou en éteignoir (jet ascendant), lui permettent d'ébaucher des lois sur le rôle des fluides (d'origine météorique ou d'origine profonde) dans le creusement des puits naturels du calcaire. Edouard-Alfred Martel (1859-1938) est à ce moment-là un jeune explorateur des mondes souterrains. Son approche est naturaliste. Il observe des puits naturels et les topographies. Il réfute les assertions de Meunier. Une controverse, étalée sur une vingtaine d'années, nourrira une bibliographie analysée ici. Au début du XX^e siècle chacun des protagonistes reconnaît la qualité du travail de l'autre et ils se citent de manière croisée. A travers cet exemple, on mesure combien ces approches naturalistes d'un côté, expérimentale de l'autre, ont nourri des réflexions fécondes sur les processus morphogéniques en œuvre dans la karstification.

Stanislas Meunier (1843-1925) and the controversy about the digging of "natural limestone wells". The contribution of experimental Geology

At the end of the 19th century, Stanislas Meunier (1843-1925), professor at the Museum of Natural History in Paris, developed experimental Geology. He is probably the only one to test the erosive processes. He is particularly interested in digging caverns and limestone natural wells. His theory is based on experimentation. With an acid jet, ascending or descending, he tries to reproduce the natural phenomena and thus generates forms of dissolution on limestone models (small dimensions, about ten centimeters). The conical shapes obtained, as a funnel (downward jet) or as a snuffer (upward jet), allow him to propose laws on the fluids effect (meteoric or deep origin) in the digging of natural limestone wells. At this time, Edouard-Alfred Martel (1859-1938) is a young speleologist. His approach is naturalistic. He observes natural wells and surveys the caves. He refutes Meunier's assertions. A controversy, spread over twenty years, gives us a bibliography analyzed here. At the beginning of the 20th century, each of the protagonists recognized the quality of the work of the other by cross-referencing. Through this example, we measure how these naturalistic and experimental approaches, fed fertile reflections on the morphogenic processes for the karstification.

Mots clés/Key-words

Stanislas Meunier, Edouard-Alfred Martel, Géologie expérimentale, puits naturels du calcaire.

Stanislas Meunier, Edouard-Alfred Martel, experimental Geology, limestone natural wells.

Introduction

Étudier les grottes, comprendre les mécanismes de la dissolution, analyser la diversité des processus qui peuvent conduire à la création de vides dans les calcaires, tels sont certains des objectifs de la karstologie. Entre (i) une approche naturaliste, aujourd'hui assez dominante en spéléo-karstologie, consistant à décrire le milieu et à partir de ces observations, proposer des éléments d'interprétations et (ii) une approche plus modélisatrice consistant, à partir de lois mathématiques (aujourd'hui des algorithmes), à proposer la genèse de conduits souterrains et de vides qu'il s'agit ensuite de confronter à la réalité, il existe une troisième voie : (iii) l'approche expérimentale. Cette dernière consiste à reproduire par des maquettes et des expériences de laboratoire les modalités de genèse de la forme ou du dépôt. Les premiers produisent des modèles conceptuels, les seconds des modèles mathématiques, les derniers des modèles expérimentaux, des pilotes, des maquettes¹.

Si aujourd'hui, en géoscience, cette approche connaît un certain succès dans le domaine de la dynamique fluviale et littorale ou dans le domaine des plissements profonds, force est de reconnaître que peu de travaux concernent le domaine du karst hormis les célèbres scallops, les « coups de gouges », de Curl qui dans les années 1960 et 1970 développa ce type d'approche pour codifier expérimentalement le rapport unissant la vitesse d'un courant, sa température et la longueur des formes pariétales engendrées (Curl, 1966, 1974). Ce travail a été repris par une approche mathématique en 3D (Bird et al., 2009) ou appliqué à plusieurs cas d'étude sous terre (Lismonde et al., 1987) ou en extérieur (Cailhol, 2011). Moins connu, citons le travail expérimental mené par D. Genty pour faire pousser de la calcite en salle contrôlée (température, débit, humidité, saturation, ...). Un travail similaire, dans l'esprit au moins, a été conduit afin de reproduire les conditions souterraines (Day et al. 2011). Quelques travaux du même type ont été tentés pour les dépôts souterrains en base d'aven (Noury et al., 2007) ou pour la dissolution des surfaces lapiazées (Sabaut, 2006). Dans le domaine de l'hydrogéologie, citons l'expérience étonnante développée à Moulis : une maquette expérimentale visant à reproduire le fonctionnement intermittent de la source de Fontestorbe. Plus récemment encore Bailly (2009) propose des maquettes de fonctionnement hydrologique du karst ou des essais de dissolution sur pierre d'alun.

Mais il est un précurseur à toutes ces expériences, celui qui fut un des ardents défenseurs et praticiens de la géologie expérimentale : Stanislas Meunier (1843-1925 ; **figure 1 p. 90**). En 1875, il écrit : « Les géologues étudient depuis de longues années les accidents désignés sous le nom de puits naturels, et un grand nombre d'hypothèses ont été imaginées pour en expliquer l'origine ». C'est sur cette assertion qu'il va construire une expérimentation qu'il justifie ainsi : « Nous avons pensé que l'observation pure et simple n'est pas suffisante pour résoudre un problème de cette nature (...) ».

1. On lira avec intérêt le chapitre introductif de la thèse de Pierre-Yves Jeannin (1996) qui fait le point sur la notion de « modèle », modèle du karst en tant qu'élément éloquent et représentatif, en tant que schéma interprétatif, en tant que formalisation mathématique d'un fonctionnement.

I- Stanislas Meunier et la Géologie expérimentale

À la fin du XIX^e siècle, au Muséum d'Histoire Naturelle de Paris, Stanislas Meunier, professeur de Géologie, expérimente un certain nombre de « phénomènes géologiques » au premier rang desquels les processus érosifs et ce qu'il appelle lui-même la dénudation. Il se situe dans une lignée intellectuelle qui est celle des expérimentateurs tels que James Hutton (écossais, 1726-1797), James Hall (écossais, 1761-1832), Alphonse Favre (suisse, 1815-1890), Bailey Willis (américain, 1857-1949) pour n'en citer que quelques-uns. En France, Auguste Daubrée (1814-1896) est sans doute un des plus connus. Tous cherchent à reproduire en laboratoire des phénomènes de la nature et en particulier des plissements ou le rôle de la chaleur dans la genèse des roches.

Stanislas Meunier est d'abord l'aide naturaliste de Daubrée. Chimiste au départ, il entre au Muséum d'Histoire Naturelle en 1867 et en devient professeur entre 1892 et 1920. Sa notice nécrologique parue en 1925 dans la revue « La Nature » le décrit comme un « esprit ingénieux et cultivé, préoccupé des grandes questions géologiques : la théorie de la terre, l'activisme (sic), la géologie comparée et expérimentale. On lui doit de très importantes études, notamment sur les météorites ». Mais c'est surtout à propos de la géologie expérimentale que le personnage nous intéresse en ce sens qu'il va sans doute être le premier à tester l'érosion et l'altération des calcaires.

La discipline semble être née dans un climat conflictuel. En 1899, lorsque Meunier ouvre son ouvrage « La Géologie expérimentale », il écrit dès la préface : « Le livre que je présente aujourd'hui au public est le résumé du Cours que j'ai professé en 1898 au Muséum d'histoire naturelle. Le sujet qu'il concerne est un de ceux qui me passionnent le plus, et voilà plus de trente ans maintenant que je le cultive (...) Les critiques ne m'ont pas manqué, mais les encouragements ont été nombreux aussi, - les premiers venants de savants (...) - et les seconds des résultats obtenus (...) ». Plus loin dans l'introduction, il ajoute : « Charles Sainte-Claire Deville, à la suite, du reste, d'Elie de Beaumont se déclare adversaire de l'expérimentation géologique (...) et traite les appareils mis en œuvre de joujoux. Ce reproche n'est d'ailleurs qu'une sorte d'appendice à celui que l'auteur fait à la doctrine des Causes actuelles, et c'est l'occasion de répéter que le point de vue expérimental et le point de vue actualiste ont entre eux les liens les plus intimes et les plus solides. Cependant, certains esprits moins ouverts qu'on eut désiré les voir, ont fait beaucoup d'objections à la légitimité de l'expérimentation géologique. Leur principal argument est basé sur la différence évidente qu'il faut faire entre la similitude en mécanique et la similitude en géométrie. Il est clair qu'une grande machine ne marche pas toujours comme une petite (...). Il est clair aussi que si une action est trop faible pour produire un résultat quelconque on pourra le répéter indéfiniment sans qu'elle ne produise jamais rien ». Meunier est donc tout à fait conscient de deux aspects fondamentaux de la Géologie expérimentale : (i) le problème du transfert d'échelle, autant dans la dimension invoquée que dans les seuils

que cela implique et (ii) la dialectique qu'implique de fait actualisme et expérimentation. Ces deux points qui sont à la fois une force et une faiblesse sont au cœur des critiques émises à l'encontre de la démarche.

Notre propos n'est pas ici de défendre une position plutôt qu'une autre, mais plutôt d'analyser comment à cette époque, Meunier met en œuvre un certain nombre d'expérimentations, motivé qu'il est par les limites qu'il pressent à l'observation directe des phénomènes naturels. Ce travail s'applique à divers domaines de la Géologie mais il est particulier en ce sens qu'une place importante est donnée au domaine de l'érosion (altération et dénudation) et plus particulièrement concernant le karst ou l'érosion des calcaires. Ceci apparaît dans son ouvrage principal publié en 1899 (seconde édition en 1904) : *La Géologie expérimentale* mais aussi dans le *Catalogue sommaire de la collection de géologie expérimentale du muséum d'Histoire Naturelle* (1907). Cette collection est la cinquième des six séries exposées au public (Meunier, 1900).

Le catalogue de 1907 qui illustre les objets résultants des travaux de géologie expérimentale de Stanislas Meunier présente les objets exposés dans la galerie de Géologie du Muséum de Paris. L'ouvrage s'ouvre ainsi : « Après de très nombreuses objections, dont beaucoup ont revêtu un caractère tout à fait puéril, la **géologie expérimentale** a enfin reçu définitivement droit de cité dans la Science. Son but, comme on le sait, est d'imiter par les procédés du laboratoire, les phénomènes géologiques et les produits variés qu'ils ont engendrés dans les diverses régions de l'écorce terrestre. (...) nous avons résumé autant que possible l'énumération des objets qui dès maintenant, sont placés sous les yeux du public dans la Galerie de Géologie du Muséum de Paris (1).

(1) (...) un certain nombre d'objets portés au Catalogue n'ont pu trouver place dans nos vitrines, soit à cause de leur trop grande dimension, soit à cause de la difficulté et parfois de l'impossibilité de leur conservation (...).

Dans le catalogue de 176 pages, 167 figures décrivent les différentes expériences. Sur ces 167 figures, 26 (soit près de 16 %) concernent l'altération des calcaires, la karstification et même parfois la sédimentation souterraine. C'est ce travail sur l'érosion souterraine qui nous intéresse ici.

II- Un travail spécifique sur la genèse des cavernes

Incontestablement, c'est la « reproduction expérimentale des puits naturels » ou bien « l'imitation des avens des Causses » qui constitue les éléments les plus spectaculaires pour la karstologie. Stanislas Meunier met au point toute une série de machines et d'expériences dont le principe général consiste à envoyer de l'eau acidulée sur des calcaires et de contrôler autant que faire se peut un certain nombre de paramètres comme le débit, l'orientation du jet, la quantité d'acide ou l'état de fracturation de la roche.

La motivation de l'auteur tient dans l'introduction de son premier compte rendu à l'Académie des Sciences en 1875 intitulé « Sur les puits naturels du calcaire grossier ». Sur la base d'une revue bibliographique, Stanislas Meunier s'attache au creusement des puits naturels ; la question intéresse les savants de l'époque à la fois par le prisme de la géologie minière et des gisements métalliques et par celui de la paléontologie : comment les puits se sont-ils formés, comment se sont-ils remplis, s'agit-il de phénomènes synchrones ou dissociés dans le temps ? Le problème touche autant aux processus qu'aux formes qui en résultent.

Sur les formes, il semble qu'un certain consensus ait d'abord prévalu ; S. Meunier n'écrit-il pas dès 1875, à propos des puits naturels : « ce sont toujours des cavités cylindriques très profondes » ? Or lorsque Martel entreprend ses premières explorations spéléologiques dans les Causses, il rapporte quasiment les mêmes observations dans un de ses premiers CRAS, parlant alors de « puits ovales, en forme de bouteilles aplaties » qu'il compare à de « véritables marmites de géants » comme le prouve « de haut en bas, sur tout son pourtour, une gigantesque hélice figurant le sillon tracé dans la pierre par quelque gros bloc tourbillonnant dans l'eau furieuse ». Et les résultats des premières expérimentations de S. Meunier confirment ces observations : « La dalle est soutenue de façon que le liquide corrosif, après avoir circulé dans toute l'épaisseur de la pierre, s'écoule sans difficulté. Après quelques jours de ce régime, on trouve le calcaire traversé par un conduit vertical, dont tous les détails de forme coïncident avec ceux que M. Martel a si complètement décrits dans les avens des Causses et dans les gouffres des régions calcaires » (1894).

L'ensemble de ces dispositifs sont en partie présentés dans l'ouvrage de 1899 (seconde édition 1904) mais surtout dans le catalogue sommaire de 1907. Nous reproduisons (**figure 2**) certaines de ces maquettes et les résultats publiés. Le premier de ces dispositifs (section 26. Reproduction expérimentale des puits naturels) est ainsi décrit : « Cette reproduction suppose l'emploi d'un appareil pour attaquer les roches calcaires par un jet d'eau acidulée (...). Il se compose, comme on voit, d'un réservoir F fournissant de l'eau additionnée d'une quantité, faible et déterminée, d'acide chlorhydrique, à la surface d'une roche calcaire B, en un point ou une cavité se produit et s'accroît bientôt (...). Si l'on a suffisamment étendu la dissolution, l'effervescence à la surface de la roche est extrêmement faible ; mais on gagne du temps en opérant avec des liquides plus chargés et il y a intérêt à faire varier le mode opératoire, suivant le résultat qu'on désire obtenir ».

Le résultat de l'expérimentation est présenté ainsi (section 27, fig. 33) : « L'échantillon dessiné a été scié, suivant l'axe de la cavité, produite pour en faire voir tous les accidents. On constate que sa forme générale est celle d'un cône dont le sommet est à la partie inférieure, ou, suivant l'appellation consacrée, en entonnoir. Cependant, ses surfaces ne sont pas lisses, mais au contraire interrompues par des régions d'une saillie relative très sensible. Il en résulte comme des sortes de corniches qui trahissent l'inégale solubilité des différents lits (...). Ce fait est intéressant à noter, parce qu'il reproduit, avec une fidélité complète, les

Extrait catalogue sommaire
Meunier 1907

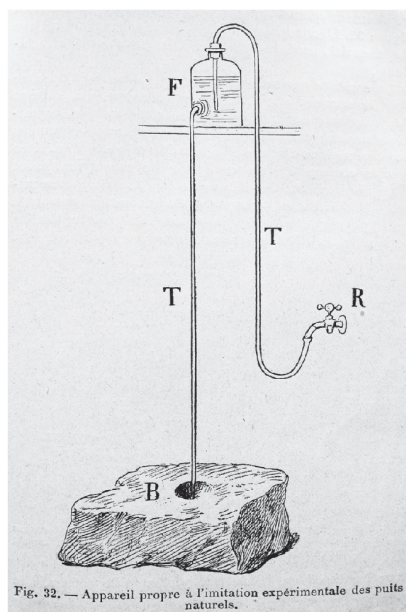


Fig. 32. — Appareil propre à l'imitation expérimentale des puits naturels.

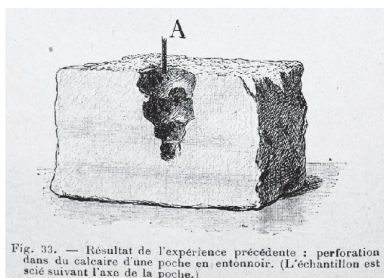


Fig. 33. — Résultat de l'expérience précédente : perforation dans du calcaire d'une poche en entonnoir. (L'échantillon est scié suivant l'axe de la poche.)

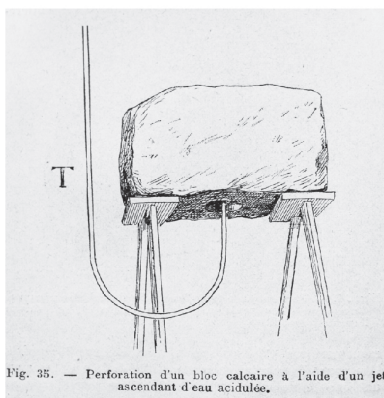


Fig. 35. — Perforation d'un bloc calcaire à l'aide d'un jet ascendant d'eau acidulée.

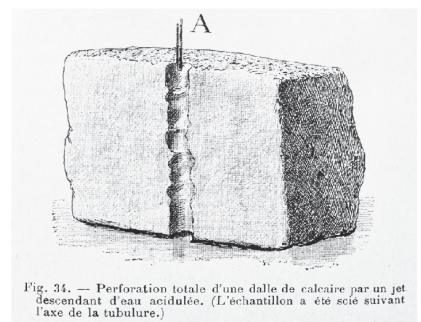


Fig. 34. — Perforation totale d'une dalle de calcaire par un jet descendant d'eau acidulée. (L'échantillon a été scié suivant l'axe de la tubulure.)

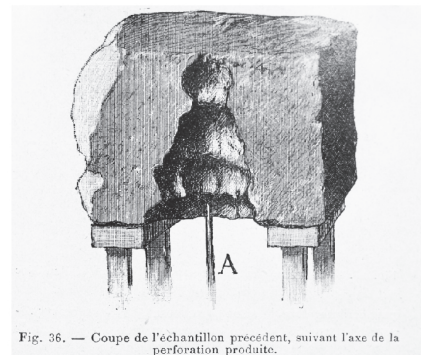


Fig. 36. — Coupe de l'échantillon précédent, suivant l'axe de la perforation produite.

figure 2 : Planche synthétique présentant les figures 32 à 36 du catalogue sommaire de la collection de géologie expérimentale du Muséum d'Histoire Naturelle.

particularités offertes par les parois des puits naturels ». Lorsque l'expérience est poursuivie, elle conduit à la perforation totale d'une dalle de calcaire (section 28, fig. 34) : « En continuant l'expérience (...) la cavité s'approfondit peu à peu et, au bout d'un temps convenable, la dalle est entièrement perforée ».

Après avoir façonné puits et poche de dissolution, l'auteur s'attache à l'« Imitation des avens des Causses. Influence des fissures préexistantes sur l'érosion souterraine » (section 30, fig. 37, 38, 39 et 40). Le texte de ces expériences est le suivant : « Les expériences précédentes ont reçu un complément des plus importants par des essais réalisés sur des roches préalablement fissurées. On prend un parallélépipède de calcaires et avec une masse on en sépare un quart sous la forme d'un prisme (...). On remet le bloc en place, mais en laissant la fissure bailler assez largement puis on y laisse filtrer le filet d'eau acidulée (...). Le liquide corrosif s'insinue dans la roche, creuse un puits naturel qui correspond aux Avens des Causses, puis sculpte, dans le sens transversal, des canaux (...) et où l'on reconnaît les accidents de forme des cavernes naturelles. On remarque surtout l'association des perforations verticales avec les perforations transversales, puis dans ces dernières, des inégalités locales qui produisent en petit les successions si ordinaires de salles plus ou moins élevées et de couloirs qui les font mutuellement communiquer ». À la suite de cette expérience qui permet de connecter en quelque sorte la zone de transit vertical et la zone de transit horizontal, l'auteur propose une dernière expérience intitulée « Attaque d'une roche fissurée par un filet d'eau acidulée lancé horizontalement dans le plan de la fissure ». (...) « Elle consiste à faire arriver le courant corrosif, non plus par une fissure verticale où se creuse un aven, mais directement par la fissure horizontale. Il y a alors très rapidement

comme une combinaison des effets décrits au n°30 avec ceux qui concernent la dénudation subaérienne (...). Non seulement il se fait une suite de cavernes, mais le sol de ces cavernes se sculpte d'une sorte de lit ou torrent, et c'est tout à fait comparable à ce que montrent beaucoup de cavernes naturelles ».

À la suite de ces travaux, dans le même catalogue sommaire, Stanislas Meunier présente alors une série d'expérimentations regroupées sous un paragraphe 11 – Sédimentation souterraine.

Bien que la notion de calcaire concrétionné y apparaisse, il ne s'agit pas véritablement de sédimentologie endokarstique (au sens dépôt en grotte), mais plutôt de la reproduction d'expériences de précipitations chimiques (concrétionnement) pouvant se mettre en place en roche meuble (voir plus haut la liste des figures concernées).

Au-delà de l'intérêt direct du recours à l'expérimentation, ce qui est à l'époque extrêmement novateur, Stanislas Meunier propose des réponses à des questions de son temps, celles du creusement des puits naturels du calcaire. Ce faisant il va se retrouver confronté à celui qui organise l'exploration des gouffres et des grottes : Martel lui-même.

III- Puits naturels en entonnoir ou en éteignoir : la controverse avec Martel

Il existe une discussion dans la seconde moitié du XIX^e siècle qui vise à comprendre si les puits naturels du calcaire sont creusés de haut en bas (par des eaux météoriques) ou de bas en haut (par des eaux profondes)². Ces différents modes de creusement

2. Des discussions de ce type ont été analysées à propos des minières



et leurs conséquences génétiques ont d'ailleurs été analysés récemment dans le mémoire de P. Audra (2007).

S. Meunier connaît bien ce débat, et pense que les expérimentations peuvent concourir à le faire progresser. Citant Le Blanc (1842), il note à son propos : « l'auteur émet l'avis que ce sont des canaux d'éjection qui ont émis successivement les éléments des terrains parisiens, et qui plus tard sont devenus absorbants comme ils le sont aujourd'hui. (...) Cependant (...) beaucoup d'observateurs anglais admettent au contraire que les puits ont été creusés par les eaux ruisselant à la surface ». L'année suivante en 1876, dans une note intitulée : « Faits pour servir à l'histoire des puits naturels » il écrit : « (...) nous devons admettre que les eaux superficielles ont exercé sur le travertin inférieur une action corrosive analogue à celle dont le calcaire grossier porte des traces en tant de points ».

Conscient de cette possibilité d'un creusement de bas en haut, Stanislas Meunier tente d'ailleurs une expérience intéressante, cette fois avec un jet ascendant dans l'espoir manifeste d'obtenir un cône avec la pointe en haut alors qu'il avait obtenu un cône avec la pointe en bas dans l'expérience n°33. Il met donc en place une expérience de perforation en pleine masse calcaire, par un jet ascendant d'eau acidulée (section 29, fig. 35) et il est noté : « On modifie légèrement l'appareil (...) en recourbant le tube qui descend du flacon réservoir, de façon que le jet d'eau acidulée qu'il débite soit projeté verticalement de bas en haut. On le fait ainsi arriver à la surface inférieure du parallélépipède de calcaire et on voit une perforation se produire au contact du dissolvant. (...) on constate (...) que l'effet produit est pour ainsi dire symétrique de celui qui résultait des effets du jet descendant. C'est encore (...) une cavité conique qui se présente, mais cette fois la base du cône est à sa partie inférieure et la disposition n'est plus celle d'un entonnoir mais celle d'un éteignoir ».

Mais Martel (De Launay et Martel, 1890) ne l'entend pas ainsi. Car il ne fait aucun doute pour lui que le creusement des puits est dû principalement à l'action des eaux de surface lorsqu'elles s'engouffrent dans des fissures qu'elles élargissent progressivement. Associer une forme en éteignoir à un creusement par le bas ne correspond absolument pas à ses propres observations. Il note à la fin d'un important article paru dans le Bulletin de la Société Géologique de France à propos des grottes et eaux souterraines : « (...) nous rappellerons toutefois comment les formes de certains avens creusés par en haut, si souvent comparables à ces cônes posés sur leur base (voir fig. 1 et 2), sont contraires à la théorie développée par M. Stanislas Meunier (CR 2-9 janvier 1888) et déjà combattue ici même par M. de Grossouvre d'après laquelle un courant descendant d'eau acide donnerait toujours (et expliquerait seul) une disposition en cône la pointe en bas. Même si l'on admettait qu'un très grand nombre de poches de phosphates et de minerais de fer ont été creusées d'en haut par élargissement de diaclase comme semble l'indiquer en particulier la présence de galets roulés dans les phosphorites du Quercy, on devrait laisser de côté un argument peu concluant ».

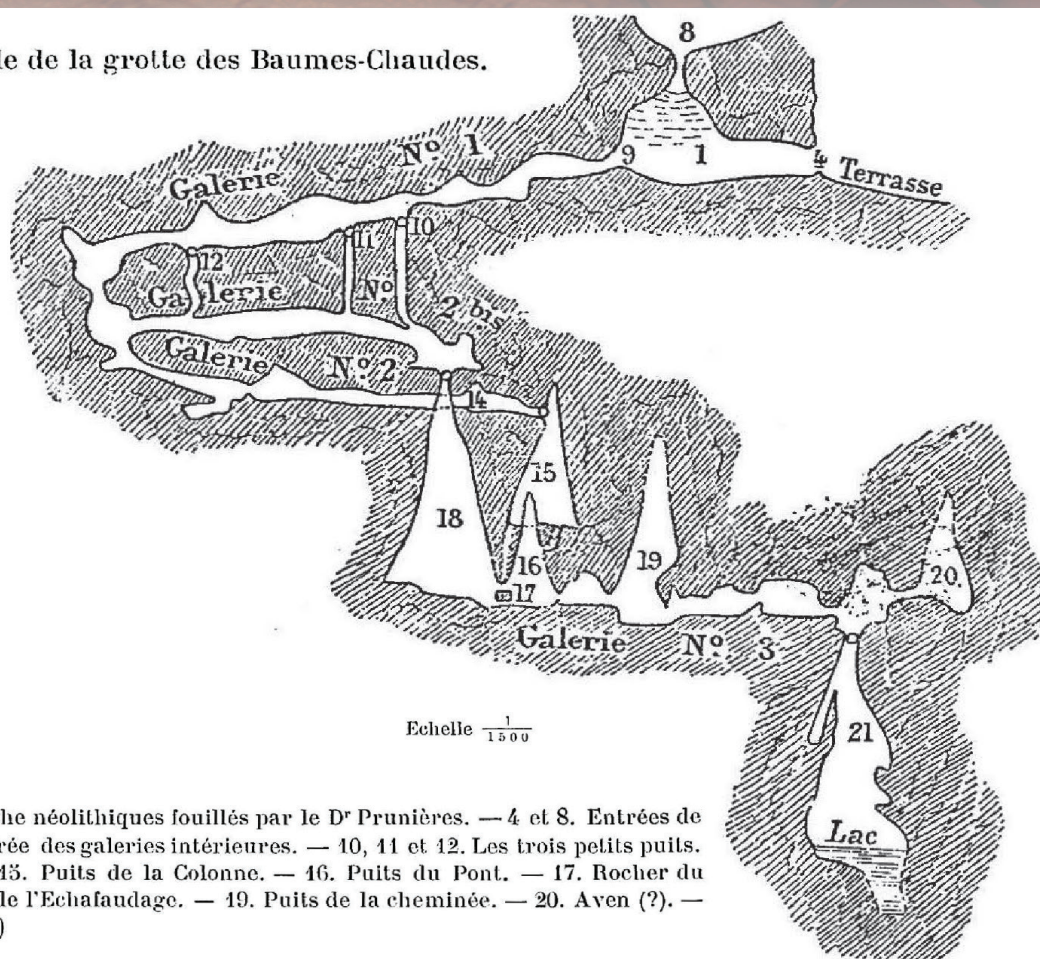
En effet S. Meunier dans ce compte-rendu du 2-9 janvier 1888 à l'Académie des Sciences avait noté : « On pourrait penser (...) que la dénudation souterraine (...) résulte d'eau émanant de la profondeur. (...) l'observation (...) et l'expérimentation peuvent être substituées aux suppositions (...). (...) j'ai montré par des spécimens que je conserve au Muséum, que la forme des excavations qu'on peut creuser verticalement dans le calcaire par un filet d'eau acidulée varie essentiellement suivant qu'on opère de haut en bas ou dans le sens opposé. Dans les deux cas, c'est une cavité conique qui se produit ; mais si l'eau corrosive est ascendante, la pointe du cône est dirigée en haut ; elle est en bas dans l'autre condition (...) ».

Pour Martel, la forme des puits compte finalement assez peu : dès 1890, il a descendu les puits de la grotte des Baumes Chaudes (Lozère ; **figure 3**) et il a observé la forme des puits : « presque tous les avens se présentent en forme de cônes plus larges à la base qu'au sommet » (article BSGF de 1890). Mais lorsqu'il descend le grand aven de Jean Nouveau en 1892, il le décrit à la fois comme « une grande cheminée à peu près cylindrique » (Les Abîmes, p. 46) et comme « conique, la pointe en haut » (idem, p. 48). Cylindre ou cône pointe en haut, la nuance importe peu, mais Martel ne peut admettre que les puits creusés par les eaux de surface affectent une forme en cône pointe en bas. Sur ce point, les résultats auxquels Meunier est arrivé sont en contradiction flagrante avec ses observations de terrain, et Martel n'admet pas que la forme en éteignoir qu'il observe puisse alimenter l'idée d'un creusement des puits naturels de bas en haut. Il l'a écrit clairement dès 1894 : « les géologues tendent à abandonner cette dernière opinion, [i.e., celle des] cheminées d'éruptions geysériennes » (idem, p. 48). Même si la polémique va se développer autour des termes d'entonnoirs et d'éteignoirs, la pierre d'achoppement porte bien sur les mécanismes de creusement.

Sur un autre front, M. de Grossouvre rétorque également aux expérimentations : « Cette conclusion de M. Meunier que les poches en forme d'entonnoirs qui existent à la surface des plateaux calcaires ne peuvent être dues à l'action d'eaux émanant de la profondeur peut s'appliquer à nos gisements de minerais (...). Je ne puis contester les résultats des expériences du Muséum (...) : on comprend bien qu'un courant d'eau acide, traversant une roche calcaire, agira plus énergiquement dans les premières parties de son parcours, puis que son action corrosive ira en diminuant (...) : une forme en entonnoir, évasé du côté de l'arrivée du courant, résultera (...) de ce mode d'action (...). Nous ne croyons donc pas que les expériences citées soient décisives (...) et en particulier sur la direction de leur courant. (...). Dans l'état de nos connaissances, l'explication (...) la plus simple (...), est celle qui est basée sur l'action d'eaux minéralisées venant de la profondeur ».

Pour des raisons qui ne sont pas les mêmes, Meunier se retrouve face à deux détracteurs. M. de Grossouvre d'un côté ne voit pas dans ces poches en entonnoirs une altération météorique et rejette la proposition de Meunier qui propose d'associer la forme conique

Coupe verticale de la grotte des Baumes-Chaudes.



1. Abris sous roche néolithiques fouillés par le Dr Prunières. — 4 et 8. Entrées de la grotte. — 9. Entrée des galeries intérieures. — 10, 11 et 12. Les trois petits puits. — 14. Guérite. — 15. Puits de la Colonne. — 16. Puits du Pont. — 17. Rocher du Pont. — 18. Puits de l'Echafaudage. — 19. Puits de la cheminée. — 20. Aven (?). — 21. Puits du Lac (2)

figure 3 : Coupe verticale de la grotte des Baumes Chaudes (Lozère), à droite, figure 2 de l'article de Launay et Martel (1890).

(pointe en haut ou pointe en bas) à l'orientation du flux d'eau (depuis le bas ou depuis le haut). De Launay et Martel citent M. de Grossouvre, sans pour autant être sur le même type d'argumentaire. Ils voient des formes en éteignoirs (cône pointe en haut) associés à des arrivées d'eau depuis le haut et montrent à l'appui de cette analyse les topographies de l'aven de Tabourel (Aveyron) et des Baumes Chaudes (Lozère) écrivant alors : « (...) Certaines coupes (...) sont extrêmement curieuses par (...) une série d'entonnoirs renversés, superposés les uns aux autres. Cette forme, qu'on doit expliquer ici par le creusement torrentiel en spirale, pourra être rappelée (...) dans la question si discutée de la formation par en haut ou par en bas des poches de minerais de fer sidérolithique généralement disposés en entonnoirs inverses. Nous ne croyons pas (...) pour les avens, (...) que le creusement est venu d'en bas sous l'action de sources acides ».

En 1894, Stanislas Meunier organise son contre-argumentaire en deux points essentiels : d'une part en cherchant des exemples qui confortent son expérience et d'autre part en cherchant à expliquer pourquoi les avens sont différents de ceux qu'il créait en expérimentation : « Une dalle de calcaire placée horizontalement étant réduite à coups de masse en trois ou quatre fragments, par deux fissures verticales (...) est soutenue de façon que le liquide corrosif (...) s'écoule sans difficulté. Après quelques jours de ce

régime, on trouve le calcaire traversé par un conduit vertical, dont tous les détails de forme coïncident avec ceux que M. Martel a si complètement décrits dans les avens des Causses (...). En attaquant un banc calcaire par-dessus, on y fait des entonnoirs à pointe inférieure, reproduisant l'allure des poches à fer en grains, à phosphorite ou à bauxite. En opérant en sens contraire, c'est-à-dire par un jet ascendant (...) on excave des éteignoirs à pointe supérieure (...). On a émis des doutes sur la légitimité de mes conclusions générales, et M. de Grossouvre en particulier les a contestées. En revanche, j'ai été heureux d'en trouver une confirmation dans les coupes données par M. Huet à l'égard des exploitations métallifères du Laurium. On y rencontre du calcaire corrodé au contact d'assises schisteuses qui ont guidé les eaux métallifères. Or toutes les fois que le calcaire est au toit du schiste, c'est-à-dire que la corrosion s'est faite de bas en haut, les amas remplissent des poches en éteignoir (...); toutes les fois que le calcaire est au mur de la roche imperméable, et que, par suite, il a été attaqué de haut en bas, les poches sont en entonnoirs (...). Ici l'exemple des mines du Laurium est employé pour contrer les arguments de M. de Grossouvre. Or ce dernier développait un argumentaire certes discutable mais sur des poches sidérolithiques, et Stanislas Meunier avec un gisement argentifère dans un contexte géologique bien différent détourne quelques peu la critique en limitant la réponse au caractère morphologique du gisement.



Il ajoute ensuite : « Plus récemment, MM. de Launay et Martel m'ont opposé une objection nouvelle, tirée de la forme fréquente des avens. Ici, en effet, la dissolution s'est faite et se continue incontestablement de haut en bas, et cependant la forme est fréquemment en cône reposant sur la base. Mais en considérant ces formes comme contraires à la théorie que j'ai exposée, on ne paraît pas avoir remarqué que, les avens aboutissant à de grandes cavités souterraines, celle-ci assurent l'écoulement immédiat des eaux superficielles, auxquelles ils ont procuré une issue. Dès lors, aucune des conditions réalisées dans les poches ne se trouve reproduite, et il est facile de comprendre que le maximum d'usure des puits doit tendre à se produire vers le bas, à cause des matériaux solides (sables et argile) charriés le long des parois par les eaux descendantes ». Ici encore Stanislas Meunier élude la question en invoquant le fait que « les conditions ne sont pas reproduites » ce qui est fort paradoxal car il veut justement son expérience représentative des phénomènes naturels et il dit lui-même combien le produit de ses expérimentations ressemble aux observations menées par d'autres sur le terrain.

Finalement en 1907, il ne cherche plus à comparer ses entonnoirs et éteignoirs aux poches karstiques, mais utilise à nouveau comme élément de comparaison l'analogie minier déjà utilisé en 1894 : « C'est encore (...) une cavité conique qui se présente, mais cette fois la base du cône est à sa partie inférieure et la disposition n'est plus celle d'un entonnoir mais celle d'un éteignoir. Or cette remarque a un très grand intérêt, parce qu'on rencontre souvent dans la nature des associations d'entonnoirs et d'éteignoirs et que l'expérimentation permet de reconnaître le mode de perforation de chacune de ces catégories de cavités. Pour ne citer qu'un exemple, les célèbres mines de zinc de Laurium, en Grèce, présentent des entonnoirs au mur des couches de schistes et des éteignoirs à leur toit, ce qui est conforme à ce qui vient d'être dit ».

Enfin, il note page 39 du catalogue en 1907 à la suite de l'expérience n°34 (cf. supra) : « si l'on poursuit encore, on reconnaît que le diamètre de la perforation tend à s'élargir à sa partie inférieure, de sorte que la cavité tubulaire tend à prendre la forme d'un tronc de cône dont la grande base serait placée en bas ». Ce faisant, il reconnaît que le prolongement de l'expérience qui conduit à une perforation verticale (figure 34 du catalogue) peut conduire à un éteignoir identique à ceux qu'il avait engendrés par un jet d'eau acide descendant et identique à ceux observés par Martel dans ses campagnes spéléologiques. Martel l'emporte donc, mais Meunier sort grand de la controverse car il a su modifier son protocole d'expérimentation pour obtenir des résultats plus conformes aux observations de terrain.

D'ailleurs dès 1905, Martel lui-même faisait la part belle aux travaux de Meunier dans sa « Spéléologie au XX^e siècle », très important volume de la collection Spelunca (tome VI, pp. 568-570)³, preuve du crédit qu'il accordait, plus de dix ans après la controverse, aux travaux de Stanislas Meunier. Enfin, dans son *Traité des*

eaux souterraines (1921), Martel reviendra encore une fois sur ces formes de puits : à ce moment-là, il ne fait plus référence à l'ancienne querelle avec S. Meunier, mais fondamentalement, il reste attaché à l'idée que « les abîmes sont de colossales marmites de géants formées de haut en bas (...) Toute autre théorie est absolument fautive et ne peut plus être soutenue que par ignorance ou par parti pris », p. 146-47. Comme à ses débuts, il reparle « de puits ovales, en forme de bouteilles », p. 167, et au mieux admet-il « la forme d'entonnoir qu'affecte la plupart du temps la partie supérieure des abîmes » (p. 169) ; en effet les cuvettes au fond desquelles s'ouvrent les puits résultent des tourbillons que l'eau a formés en surface avant de s'engouffrer, et il récusé sur ce point un écrit de G. de Gasperi (1916) qui avait confondu ces cuvettes et les puits eux-mêmes.

Discussions et conclusions

La discussion sur les puits naturels, telle qu'elle s'est développée entre S. Meunier et E. A. Martel (**figure 4**), ne doit pas faire oublier les enjeux de géologie minière qui s'attachaient à cette question. On a vu que les analogues miniers ont été plusieurs fois mobilisés lors des échanges. Car dans l'entourage proche de S. Meunier, un autre personnage, d'une toute autre importance, avait émis un avis dissonant sur la forme des puits : Auguste Daubrée, dans son ouvrage sur les eaux souterraines (1887), avait évoqué les amas sidérolithiques que l'on trouve parfois dans des cuvettes, parfois dans des fentes ou crevasses, « quelquefois aussi [dans] des formes d'entonnoirs » (p. 82), même si la figure qui accompagne ce développement n'est pas très explicite. Sans doute Daubrée faisait-il bien la distinction entre filons et amas filoniens, auxquels il consacre deux chapitres différents, mais ses explications ne font pas bien la part entre le creusement proprement dit et la formation de ces amas. Et il est fort probable que les expérimentations de S. Meunier aient d'abord cherché à préciser ces points cruciaux, même si les discussions dévieront ensuite vers d'autres sujets. Mais il faut bien mettre au crédit des expérimentations de S. Meunier qu'elles ont prouvé, au moins théoriquement, la possibilité d'un creusement de bas en haut par une solution acide, contrairement à ce que soutenait mordicus Martel, et annonçant par là les développements plus récents sur la karstification hypogène.

Stanislas Meunier se révèle à la fin du XIX^e siècle un précurseur de la Géologie expérimentale appliquée aux phénomènes d'altération et de dénudation. Il est sans conteste le seul à aborder la question de l'érosion des calcaires et met en œuvre, dans ce but, un arsenal méthodologique adapté aux moyens de son temps. Il est tout à fait conscient des limites de ce type d'approche, mais croit fermement à l'intérêt de ses expériences qui, au côté d'une approche d'observation qu'il respecte, lui semble être un élément complémentaire de preuve scientifique. Cette démarche expérimentale est unique en grotte et si aujourd'hui des expériences sont toujours conduites (dans le domaine des géosciences, dans le domaine de l'archéologie expérimentale...), il faut bien reconnaître que peu de travaux sont conduits

3. Nous n'avons pas identifié de correspondance entre Martel et Meunier dans l'ouvrage « La Plume et les Gouffres », D. André, 1997.

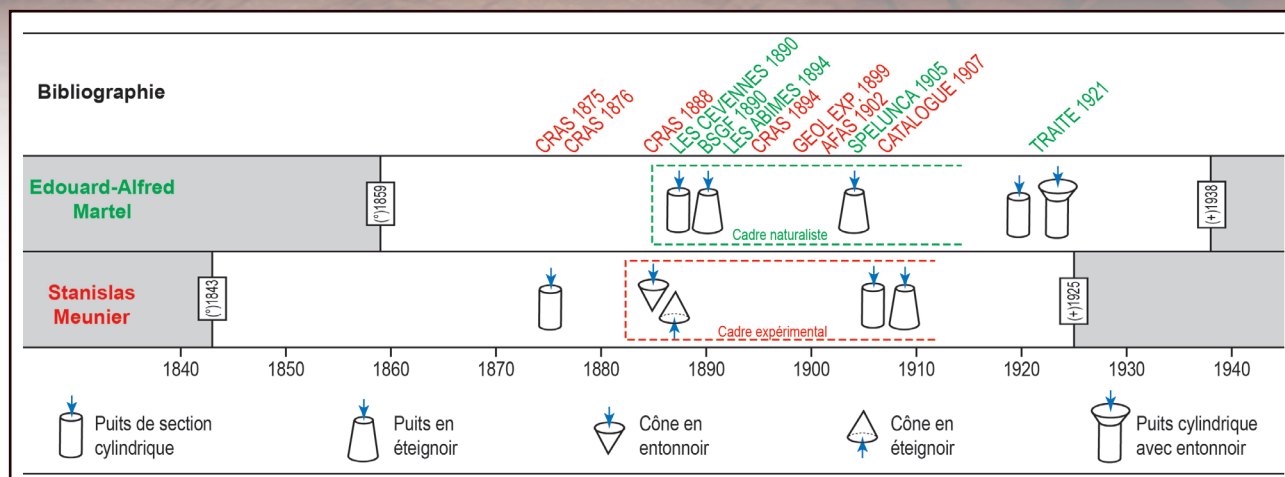


figure 4 : Représentation chrono-synoptique de la controverse Martel / Meunier entre 1875 et 1907 et représentation schématique des modèles génétiques des puits naturels.

en référence à des questions de karstogenèse. Il convenait donc de rendre justice à ce personnage pour l'originalité et pratiquement l'unicité de son travail sur l'érosion des calcaires.

Il est intéressant, et paradoxal, de noter que si la démarche expérimentale se veut rigoureuse et en contrepied (ou au moins en complément) d'une démarche naturaliste, elle repose *in fine* sur une analyse des objets produits : les maquettes et cette analyse reste justement une analyse observatoire et descriptive (donc naturaliste par essence). De même, on note un certain flou dans la présentation des protocoles (« *un temps convenable* » ou bien une « *eau additionnée d'une quantité, faible et déterminée, d'acide chlorhydrique* ») ce qui aujourd'hui ne saurait s'accorder à la rigueur qu'impose la reproductibilité des expériences.

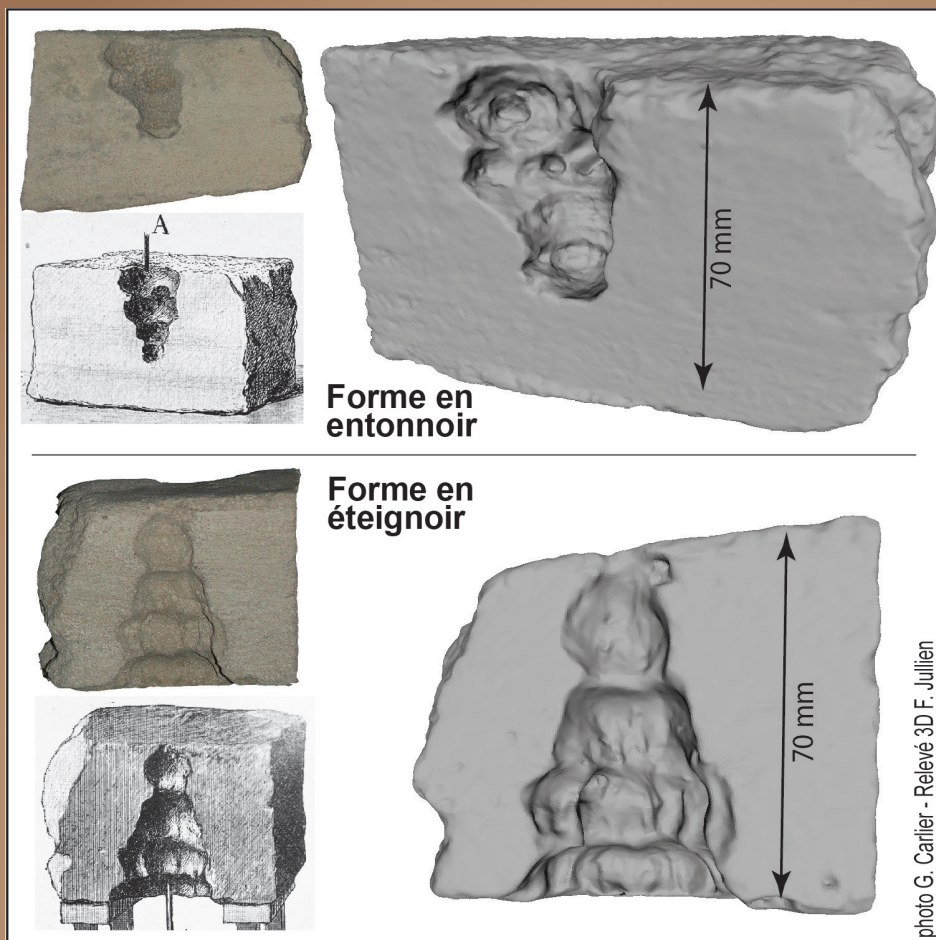
Si la validation des expérimentations passe donc par ce type d'observations, elle passe surtout par la mention d'analogues naturels, pris dans la bibliographie et invoqués parfois avec justesse, parfois moins à propos. C'est ainsi que naît la controverse avec Martel, controverse qui se finira semble-t-il heureusement dans une certaine reconnaissance mutuelle. Il est important de noter ici combien la précocité de cette controverse (1890) montre que Martel est alors clairement identifié et reconnu pour

la qualité de ses explorations et de ses observations de terrain (Gauchon, 1997). On se situe ici dans une période clé de redéfinition des paradigmes de la spéléogénèse et les observations de terrain de Martel, sur des objets sans intérêt économique direct (il explore des gouffres alors que le karst est surtout décrit et connus par les minières), qui renouvelle la vision des processus d'altération des calcaires. Ces périodes sont fécondes en production d'écrits et en controverses (Kuhn, 1962).

Stanislas Meunier (1843–1925) aura su apporter, dans l'évolution de ces idées, une touche originale : celle de l'expérimentation directe. Ses maquettes, dont nous sommes en train de retrouver la trace au Muséum d'Histoire Naturelle, constitue la mémoire de cette période riche et féconde de la compréhension des mondes souterrains. Leur étude (en projet), devrait ouvrir une belle perspective à cette recherche.

Remerciements : Nous tenons à remercier Daniel André qui le premier nous a mis sur la voie de Stanislas Meunier alors que nous cherchions des éléments relatifs à la modélisation et aux maquettes en relief du karst. Au Muséum National d'Histoire Naturelle à Paris, nous avons reçu l'aide de Sophie Guillon, Franz Jullien, Caroline Noyes, Gabriel Carlier et Anne Nivart que nous tenons à remercier ici.

Les maquettes retrouvées de Stanislas Meunier



Forme en entonnoir

Forme en éteignoir

bien la volonté d'inscrire la démarche qu'il entreprend dans une entreprise non scalaire, c'est-à-dire non soumise aux effets d'échelle.

La numérisation des maquettes retrouvées a été effectuée par Surfaçus (plateforme technique de la Direction des Collections, avec un scanner Range 7, Konica Minolta, mesure par triangulation par la méthode du sectionnement de la lumière). Le travail a permis de relever 8 blocs dans les trois dimensions avec un niveau de résolution très élevé. Une telle approche 3D permet de procéder à une analyse dimensionnelle de l'objet sans contact. Les maquettes investiguées sont de petite taille et ne permettent pas, par exemple, de mesurer directement les rapports hauteur / largeur des traces d'érosion, la profondeur des encoches... Il a ensuite été possible de recomposer

photo G. Carlier - Relevé 3D F. Jullien

Les maquettes de Stanislas Meunier sont présentées dans le « *Catalogue sommaire de la collection de géologie expérimentale du Muséum d'Histoire Naturelle* » (1907). Il nous a paru intéressant de les rechercher et ce n'est qu'après un certain temps qu'il fut possible de les retrouver dans les réserves de la Galerie de Géologie-Minéralogie du Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris. Nous avons mis en correspondance les dessins publiés par Stanislas Meunier et les maquettes, notant ainsi le soin apporté par Meunier au dessin. En l'absence de photographie, le dessin constitue, en effet, l'image centrale de la démonstration en montrant au lecteur les morphologies obtenues par les expériences. Ce dessin qui fait clairement apparaître les formes par un rendu d'ombrage, est complété par l'ajout d'un tube (en haut ou en bas) qui chaque fois représente l'arrivée d'eau « acidulée » et qui a permis la réalisation de l'expérience. De manière étonnante, l'échelle n'est pas mentionnée et il n'est pas possible sur la base uniquement du dessin de connaître la taille de la maquette. Ce n'est sans doute pas un oubli, mais

certain blocs pour réassembler les deux parties de la maquette originelle avant qu'elle ne soit coupée par Meunier en fin d'expérimentation. On dispose ainsi du modèle 3D de l'objet à la fin de l'expérimentation. Ceci ouvre deux perspectives qui nous semblent intéressantes et qui pourraient renouveler le regard sur cette thématique : (i) tester, par simulation numérique sur le modèle 3D les modalités de l'écoulement (par le haut ou par le bas) et (ii) comparer numériquement les morphologies obtenues ici avec des analogues naturels (coupes, poches karstiques, puits...) qui seraient aussi acquis en 3D, par lasergrammétrie par exemple.

Il y a plus de cent ans, Stanislas Meunier testait l'érosion des calcaires et produisait pour cela des modèles analogiques, des maquettes : ses résidus d'expérimentation. Aujourd'hui, pourvu de moyens numériques, nous ne faisons que prolonger l'analyse et poursuivons le même projet, celui de mieux comprendre la genèse des morphologies souterraines du karst.

Références bibliographiques

- AA., (1925).** Nécrologie : Stanislas Meunier. *La Nature*. Supplement n°2666, p. 145.
- André D., (dir.) (1997).** *La Plume et les Gouffres : correspondance d'Édouard Alfred Martel (1868-1936)*. Ass. Edouard Alfred Martel, Meyrueis, 608 p. ill.
- Audra P., (2007).** *Karst et spéléogenèse épigènes, hypogènes, recherches appliquées et valorisation*. Mémoire HDR Géographie, Univ. Nice, 457 p.
- Bailly D., (2009).** *Vers une modélisation des écoulements dans les massifs très fissurés de type karst : étude morphologique, hydraulique et changement d'échelle*. Thèse Univ Toulouse INPT, 307p.
- Bird A.-J., Springer G.-S., Bosch R.-F., Curl R.-L., (2009).** Effects of surface morphologies on flow behavior in karst conduits. *15th International Congress of Speleology*, pp. 1417-1421.
- Bögli A., (1964).** Corrosion par mélange des eaux. *Inter. Journal of Speleology*, 1/1-2, pp. 61-70, pl. 15-70.
- Bory de Saint Vincent, (1819).** *Annales générales des sciences physiques et naturelles*, T.1, p186, et pl IX, Bruxelles.
- Cailhol D., (2011).** Analyse croisée débits / vague d'érosion du moulin de Vogüe (Ardèche). *Karstologia* n°57, pp. 28-32.
- Choppy J., (2008).** Pourquoi se creusent les grottes. *Karstologia Mémoires* n°16, 200p.
- Curl R.-L., (1966).** Scallops and flutes. *Cave Research Group Great Britain, Trans.*, v. 7, pp. 121-162.
- Curl R.-L., (1974).** Deducing flow velocity in cave conduits from scallops. *The NSS bulletin*, vol. 36, n°2, p. 1-5.
- Daubrée A., (1887).** *Les eaux souterraines*. 2 vol.
- Day C.C. & Henderson G.M., (2011).** Oxygen isotopes in calcite grown under cave-analogue conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. N°75, pp. 3956-3972.
- Gauchon C., (1997).** *Des Cavernes et des Hommes*. Thèse Univ. Grenoble, *Karstologia Mémoires* n°7, 248 p.
- Goodchild M.-F. & Ford D.-C., (1971).** Analysis of scallop patterns by simulation under controlling conditions. *Journal of Geology*, vol. 79, pp. 52-62.
- Grossouvre (de) A., (1888).** Observations sur l'origine du terrain sidérolithique. Analogies avec certains dépôts triasiques. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 3^e série, t XVI, pp. 287-296, [voir Meunier p. 294].
- Jaillet S., (2000).** *Un karst couvert de bas-plateaux : le Barrois. Structure, fonctionnement, évolution*. Thèse Géogr. Physique, univ. Bordeaux 3, 710 p.
- Jaillet S. & Maury C., (2015).** Stanislas Meunier (1843-1925) et ses « maquettes de caverne » : une étude originale de l'altération des calcaires. *Actes de la 24^e rencontre d'Octobre*, Azé 2014, pp. 51-59.
- Jaillet S., Maury C., Jullien F., Noyes C. et Carlier G., (2016).** Les maquettes de Stanislas Meunier (1843-1925). Une « reproduction expérimentale des puits naturels » et une « imitation des avens des Causses ». *Actes de la 25^e rencontre d'Octobre*, Chalain 2015, pp. 109-112.
- Jeannin P.-Y., (1996).** *Structure et comportement hydraulique des aquifères karstiques*. Thèse Hydrogéol. Univ Neuchâtel, 237 p. + annexes.
- Kuhn T., (1962).** (trad. Laure Meyer), *La structure des révolutions scientifiques* [« Structure of scientific revolutions »], Paris, Flammarion, coll. « Champs / 791 », 1^{re} éd. 1962, 284 p.
- Launay (de) L. & Martel E.-A., (1890).** Note sur quelques questions relatives à la géologie des grottes et des eaux souterraines. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 3^e série, t XIX, pp. 142-165.
- Lismonde B. & Lagmani A., (1987).** Les vagues d'érosion. *Karstologia* n°10, pp. 33-38.
- Martel E.-A. et Gaupillat G., (1889).** Sur l'exploration et la formation des avens des Causses. *CRAS* t. 109. Pp. 622-625.
- Martel E.-A., (1890).** *Les Cévennes*. Notamment p. 73
- Martel E.-A., (1905).** Spéléologie expérimentale. La reproduction artificielle des cavernes et des avens (CRAFAS, Montauban 1902, Meunier S.). Spéléologie au XX^e siècle. *Spélunca*, p.568-570.
- Martel E.-A., (1921).** *Nouveau traité des eaux souterraines*.
- Meunier S., (1875).** Sur les puits naturels du calcaire grossier. *Compte-rendu de l'Académie des Sciences*, tome quatre-vingtième, séance du 29 mars 1875, pp. 797-799.
- Meunier S., (1876).** Faits pour servir à l'histoire des puits naturels. *Compte-rendu de l'Académie des Sciences*, tome quatre-vingt-troisième, séance du 10 juillet 1876, pp. 164-166.
- Meunier S., (1888).** Conditions géologiques du gisement phosphaté de Beauval (Somme). *Compte-rendu de l'Académie des Sciences*, tome cent-sixième, séance du 2-janvier 1888, pp 214-217.
- Meunier S., (1894).** Reproduction artificielle des avens. *Compte-rendu de l'Académie des Sciences*, tome cent-dix-huitième, séance du 26 février 1894, pp. 487-488.
- Meunier S., (1899).** *La géologie expérimentale*, F. Alcan Ed., 56 fig, 311 p. (seconde édition en 1904).
- Meunier S., (1900).** *Notice sur la galerie de Géologie*. in VIII^{ème} congrès géologique international, Livret guide des excursions en France, Paris, pp. 11-14.
- Meunier S., (1902).** Etude expérimentale des puits naturels, des cavernes et des autres cavités où se fait, dans les Causses, la circulation des eaux souterraines. *Rev. A.F.A.S. (Association Française pour l'Avancement des Sciences)*, congrès de Montauban, 31^e session, 1^{ère} partie, p. 218.
- Meunier S., (1907).** *Catalogue sommaire de la collection de géologie expérimentale du Muséum d'Histoire Naturelle*. Paris, Les fils d'Emile Deyrolle, 176 p.
- Noury M., Delannoy J.-J., Jaillet S., Sadier B., (2007).** *Le cône d'éboulis de l'aven d'Orgnac*. Chapitre 5, Aven d'Orgnac - Géomorphologie, sédimentologie, archives naturelles et modélisation 3D, EDYTEM / DREAL – Rapport d'étape n°2, pp. 77 à 95.
- Sabaut M., (2006).** *Apports des modelages 3D et des modélisations analogiques dans l'étude des surfaces karstiques lapiazées*, mémoire de master 2, université de Savoie, 39 p.