

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/293440006>

Une brève histoire de la 3D en grotte

Article in *KARSTOLOGIA* · January 2014

CITATION

1

READS

1,222

4 authors, including:



Stéphane Jaillet

Université Savoie Mont Blanc

247 PUBLICATIONS 699 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Benjamin Sadier

Université Savoie Mont Blanc

79 PUBLICATIONS 250 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Jean-Jacques Delannoy

Université Savoie Mont Blanc

278 PUBLICATIONS 1,796 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Roches Gravées de Guadeloupe : Archéologie, Sens et Société [View project](#)



Karst, chemical elements and speleology [View project](#)

Stéphane JAILLET¹,
Benjamin SADIÉ^{1, 2},
Guy PERAZIO² et
Jean-Jacques DELANNOY¹

(1) Laboratoire Edytem, Université
de Savoie, CNRS, Pôle Montagne,
73376 Le Bourget du Lac Cedex
stephane.jaillet@univ-savoie.fr

(2) Perazio Engineering,
137 rue Mayoussard,
38430 Moirans

Une brève histoire de la 3D en grotte

RÉSUMÉ: Objet qui s'exprime en 3D, la grotte (ou le réseau souterrain) est traditionnellement représentée en plan, en coupe, en sections. Cependant dès les premiers projets topographiques, ce type de représentation s'est heurté à la nécessaire simplification qu'impose l'exercice. Aussi c'est assez précocement qu'apparaissent des méthodes originales de visualisation 3D (maquettes, anaglyphes, blocs-diagrammes). À partir des années 1980, le développement des outils photographiques et infographiques autorise l'apparition de premiers travaux photogrammétriques. Dans le même temps et dans les années 1990, les logiciels de traitement de données spéléologiques filaires apparaissent, deviennent de plus en plus performants et proposent des images 3D de grottes. Depuis une vingtaine d'années, les scanners laser entrent sous terre et proposent des

modèles denses qui renouvellent l'image 3D des grottes. De fait aujourd'hui, plusieurs techniques coexistent et se complètent pour poursuivre l'œuvre commune d'une représentation paradoxalement jamais aboutie et satisfaisante des mondes souterrains. Mais toutes cherchent à proposer une image la plus juste (au sens mathématique comme au sens esthétique) des mondes souterrains.

MOTS-CLÉS: grotte, photogrammétrie, lasergrammétrie, image 3D, représentation, visualisation.

ABSTRACT: A BRIEF HISTORY OF 3D IN CAVE. The cave (or the underground network), an object that is expressed in 3D, is traditionally represented in plan and section. However with the first topographic projects, this type of representation has met with the necessary simplification of the exercise.

So early emerges original methods of 3D visualization (models, anaglyph, block-diagram). From the 1980s, the development of photographic and informatic tools allows the appearance of first photogrammetric works. At the same time and in the 1990s, caving data processing software appear, becoming more efficient and give 3D images of caves. For twenty years, laser scanners go in caves and propose high resolution models that renew 3D image of the caves. Today, several techniques coexist and complement each other. Those techniques give a paradoxically never successful and satisfactory representation of the underground karst. All want to offer the most accurate image (in mathematical and aesthetic sense) of underground worlds. **KEY-WORDS:** cave, photogrammetry, lasergrammetry, 3D image, representation, visualization.

« Et sache que plus exactement tu approches de la nature
par la voie de l'imitation, plus belle et plus artistique deviendra l'œuvre »



Albrecht Dürer (1471 – 1528)

Introduction

Avec une organisation des formes et une géométrie des conduits qui se déploie dans les trois dimensions, le karst est par nature un objet éminemment 3D. Saisir cet objet naturel pour en proposer une représentation, c'est donc chercher à produire une image de cette complexité géométrique d'un espace ici souterrain, donc non visible. Or produire l'image 3D de la grotte, c'est passer par un certain nombre de codes de représentation. Si les concepts inhérents aux règles de la perspective se formalisent à la Renaissance

[Flocon & Taton, 1963], assez rapidement des modes de représentation du monde souterrain laissent la place à des vues cavalières, mêlant les éléments de surface et les éléments souterrains du paysage karstique. Ainsi au milieu du XVIII^e siècle, le document « *Plann der wunderbahren situation, bei St. Cantiam (...) durch 3 Grotten* » (Geyer činný, entre 1751 et 1760, figure 1) exprime bien cette approche en proposant une vue cavalière du site de Skocjan (perte de la Reka, Karst classique, Slovénie) avec une volonté de représenter les élé-

ments souterrains (succession de pertes et de résurgences, entrée des galeries) et les éléments de surface (reliefs, forêts, bâti). Ici, ni plan, ni coupe, mais une vue plus ou moins écorchée, plus ou moins repliée qui montre bien la difficulté de représenter sur un même document la totalité des éléments constitutifs du paysage karstique.

Plus de deux siècles et demi plus tard, une recherche sur le terme « *karst* » dans *Google Image* offre un résultat tout aussi éloquent : 60 % des images sont des blocs-diagrammes ou des vues cavalières

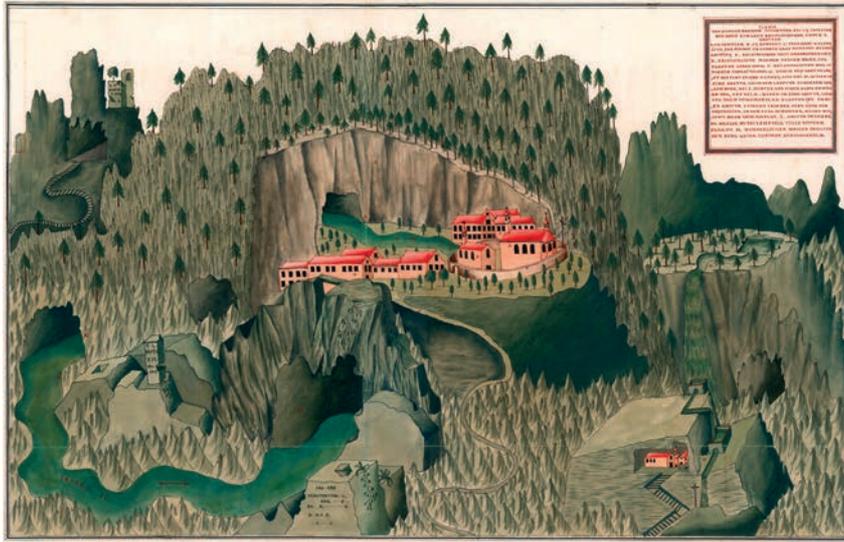


Figure 1 : Plann der wunderbahren situation, bei St. Cantiam wie auch den Lauf des Flusiesero, durch 3 Grotten [Geyer činný, entre 1751 et 1760]. Extrait Moll's map collection (Moll-0090.900, AA.T.XV, 8G). Cette vue cavalière du site de Skocjan (perte de la Reka, karst classique) est une tentative de représentation des éléments souterrains (succession de pertes et de résurgences, entrée des galeries) et des éléments de surface (reliefs, forêts, bâti). Ni plan, ni coupe, mais une vue cavalière plus ou moins écorchée et repliée qui montre bien la difficulté de représenter sur un même document la totalité des éléments 3D constitutifs du paysage karstique. *This perspective view of the Skocjan site (Reka sinkhole, classic karst) is an attempt to represent underground elements (succession of sinkhole and resurgences, entrance galleries) and surface elements (reliefs, forests, buildings). No plan, no section, but a folded and away cut perspective view which shows the difficulty of representing on the same document all the 3D constituent elements of the karst landscape.*

1. Si les représentations sous forme de bloc-diagramme rendent bien compte de la géométrie des massifs karstiques parce que le but est de donner à voir à la fois l'extérieur et l'intérieur, les réseaux souterrains font encore majoritairement l'objet de représentations 2D (plans, coupes développées, sections, plus rarement coupes projetées) parce que ça correspond à l'usage qu'en font les spéléologues.

et cette proportion reste de l'ordre de 25 % jusqu'à la page 7 (figure 2). Au-delà, des images parasites perturbent les proportions. Il semble donc qu'une représentation du karst passe bien par le truchement de ce type d'image « déportée », en vue cavalière, en perspective bref en 3D et qu'aucune représentation planaire ou en coupe (bien qu'elles soient nombreuses¹) ne semble parfaitement satisfaisante. De ces deux exemples pris à plus de 250 ans d'écart, il ressort deux constats au moins : le premier est qu'aucune représentation du karst ne semble se satisfaire complètement d'une vue « à plat » que celle-ci soit en coupe ou en plan, le second est que toute image du karst est toujours une image

déportée, vue « en dehors de l'objet », donc une image construite, c'est-à-dire une image de l'esprit proposée selon certains codes (dessin, croquis, peinture, modèle 3D orienté, etc.), et donc toujours signée. En effet, représenter la grotte pour en proposer une topographie ou un croquis, c'est de fait produire une image distancée (au sens propre) de l'objet investi. Alors que le monde souterrain se parcourt de l'intérieur, alors que les levés topographiques sont réalisés dans les conduits même du karst, l'image topographique proposée est toujours une image externalisée de la cavité, c'est-à-dire vue depuis l'extérieur de la grotte, « l'œil dans le calcaire » pourrait-on dire. Cet « angle de vue », cette posture topographique que propose la représentation du monde souterrain impose donc à la fois (i) un effort intellectuel de distanciation : on sort de la grotte pour proposer une image vue de l'extérieur de la grotte et (ii) un choix, une position, un regard orienté par la volonté du topographe dans la représentation qu'il propose. Cette représentation impose de fait une visualisation et donc une formalisation en 3D, au moins intellectuellement (et paradoxalement projetée sur une image 2D).

Il nous semble donc qu'il y a ici matière à questionner le champ de l'image karstique, le champ de l'image des grottes et ceci sur une certaine épaisseur temporelle. C'est le propos de cet article : celui de balayer cette évolution de la représentation 3D des grottes dans une perspective historique couvrant les XIX^e, XX^e et le début du XXI^e siècle. Dans

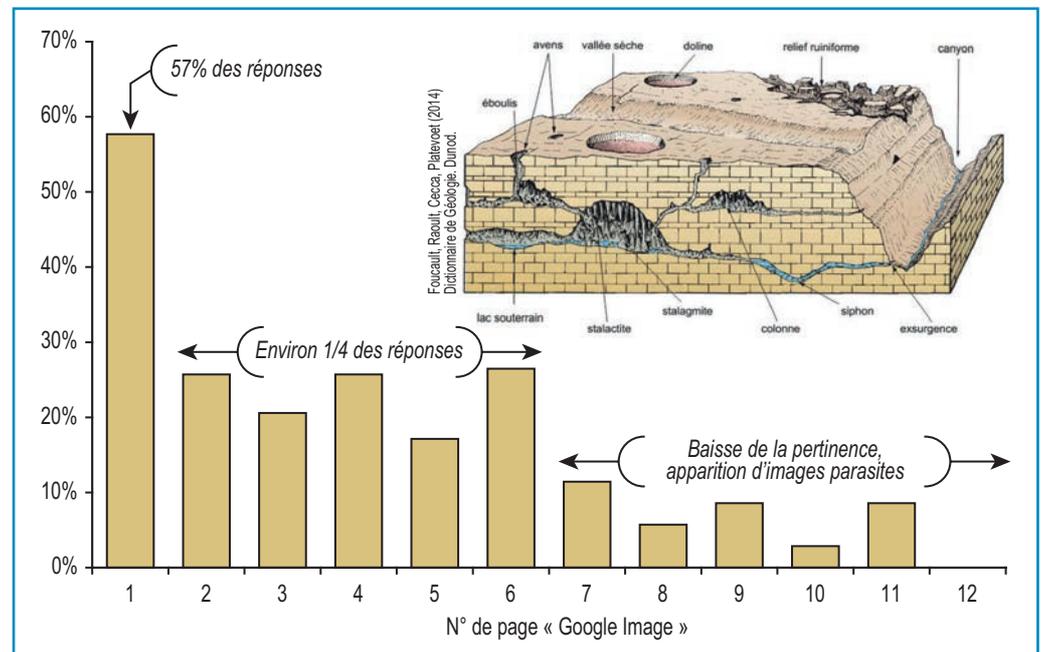


Figure 2 : La recherche sur les douze premières pages de « Google Images » du terme « karst » fait apparaître une proportion significative de blocs-diagramme et de schémas 3D au côté de photos ou de croquis puis d'images non pertinentes. Sur la première page, près de 60 % des réponses sont des images 3D. *Research on the first twelve pages of "Google Images" of the name "karst" brings up a significant proportion of block diagram and 3D images alongside pictures or sketches then non irrelevant images. On the first page, almost 60% of responses are 3D images.*

un premier temps, nous le verrons, les représentations en perspective, les blocs-diagrammes, les maquettes satisfont en partie à cette exigence d'une représentation déportée et 3D du karst. Plus tard, le projet de visualisation 3D des conduits karstiques et les travaux de la communauté spéléologique avec le développement important des logiciels dédiés constituent un apport indéniable à ces représentations 3D. En parallèle et sur d'autres échelles, les années 1970 puis les années 1990 verront le développement de la photogrammétrie puis de la lasergrammétrie avec les développements et les applications que l'on connaît aujourd'hui en grotte, renouvelant profondément la richesse des représentations 3D du milieu souterrain.

Si aujourd'hui une certaine démocratisation s'établit dans la prise en charge de ces outils, nous verrons cependant que l'image topographique et *a fortiori* l'image topographique 3D des mondes souterrains reste une affaire d'experts et nous discuterons *in fine* des implications dans la production, le contrôle et donc la constitution d'un référentiel imagé des mondes souterrains. Nul doute qu'il y a là matière à mieux saisir les relations complexes mais fécondes qui unissent les hommes au monde souterrain et aux cavernes.

I. Les premières tentatives de représentation 3D à la fin du XIX^e et au cours du XX^e siècle

Dès la fin du XVIII^e siècle, les premiers explorateurs du monde souterrain qui ont cherché à rendre compte, notamment par le dessin, de cette géométrie ont eu recours au plan, à la coupe et dès le XIX^e siècle aux profils de conduits [Shaw, 1992; Gauchon, 1997]. Les plans de Martel (André & Duthu, 1999), ou plus tôt de la grotte de Rouffignac [Gauchon et al., 2013] sont à ce titre assez éloquentes. Ce mode de représentation, avec généralement un plan, une coupe et des sections, constitue un standard toujours en vigueur dans les publications spéléologiques et permet de représenter l'essentiel des informations contenues dans les conduits du karst. Cependant, il oblige à un effort cognitif de reconstruction géométrique pour la perception effective de la troisième dimension. Cette troisième dimension n'apparaît que par la jonction

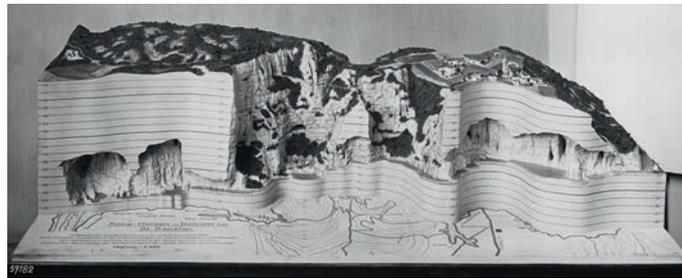


Photo 1 : La maquette 3D d'une partie de Skocjanske jame, réalisé en 1924 par Robert Oedl alors qu'il explore la cavité et est élève ingénieur à l'université de Munich. On reconnaît le village de Skocjan, Mala et Velika Dolina et le pont naturel. Dimension : 167 cm x 71 cm x 50 cm, maquette détruite. Photo n° 2069, Deutsches Museum (Munich). *The 3D model of part of Skocjanske jame, made in 1924 by Robert Oedl during he explores the cavity and is an engineering student at the University of München. We recognize Skocjan village, Mala and Velika Dolina and natural bridge. Dimension: 167 cm x 71 cm x 50 cm, model destroyed. photo No. 2069 Deutsches Museum (Munich).*

ou plutôt l'appariement intellectuel que réalise le lecteur des trois types de documents généralement fournis.

Des maquettes...

C'est pourquoi très tôt, certains ont eu recours à la construction de maquettes pour représenter cette complexité des conduits, maquettes qu'ils pouvaient même enrichir au fur et à mesure du développement des recherches spéléologiques dans tel ou tel réseau. Si la maquette ne constitue pas en soit une représentation imagée en 3D, elle constitue une alternative technique astucieuse pour offrir une visualisation directe de la complexité géométrique de la cavité.

En 1924, Robert Oedl (1898-1978) réalise une maquette d'une partie de la grotte de Skocjan (la zone d'entrée) à l'échelle 1/500 (photo 1). Il explore alors la cavité et est élève ingénieur à l'université de Munich. On reconnaît aisément sur le document le village de Skocjan, Mala et Velika dolina et le pont naturel. Malheureusement, cette maquette a été détruite lors du bombardement de Munich durant la seconde guerre mondiale. Seule une photographie de la maquette 3D est connue [Shaw et al., 2010]. À ce moment-là, Oedl réalise des levés topographiques au théodolite de la cavité. Manquant de temps et considérant cependant que ce secteur n'a pas fait l'objet d'un niveau de détail suffisant, il emploie un stéréo-restituteur et des couples de photographies combinés au relevé au théodolite, ce qui est sans doute la première utilisation de ce type de matériel en domaine souterrain. Il lève de même la salle « Mrtvo jezero » et indique sur son plan les positions de caméra, ce qui laisse entendre qu'il aurait

utilisé ce procédé photogrammétrique assez loin sous terre [Shaw et al., 2010]. Ceci semble extrêmement précurseur à cette époque, bien que techniquement possible. À la suite de la maquette de Robert Oedl, plusieurs réalisations en maquette verront le jour sur le site de Skocjan où elles sont toujours présentées au public.

Edouard-Alfred Martel, pour « l'Exposition des Grottes » organisée à la gare de Paris-Quai d'Orsay par la Compagnie des Chemins-de-Fer du Paris-Orléans-Midi, a présenté des maquettes en relief, réalisées en plâtre². Malheureusement, nous n'avons pas pu retrouver trace de ces maquettes hormis quelques photographies générales de l'exposition.

Pierre Chevalier [1944 a] a réalisé une maquette, en fil de fer, à l'échelle du 1/1 000 du réseau de la Dent de Crolles en Chartreuse (14 km de développement à ce moment-là, plus de 50 km aujourd'hui), présenté à la Société de Géographie le 6 mai 1944 (ainsi qu'en 1952 au premier stage de formation de cadre de spéléologie à Perquelin, photo 2). Cette maquette est le support de ses observations et constitue un élément important des idées qu'il développe dans le domaine de la spéléogénèse [Chevalier, 1944 b]. Dans un esprit similaire, les « Drabons et Chieures » de Méaudre ont réalisé en 1988 une maquette faite de baguettes de plexiglas collées à 1/1 000 du Trou qui Souffle [Lismonde, 1991]. De même, le Groupe spéléologique valentinois a réalisé une maquette en 3D (à base de fil de cuivre) de la grotte de la Luire (44 km de développement), encore visible sur le site il y a quelques années. Accompagnée de schémas en perspective [Garnier, 2008], elle constitue un support à la réflexion

2. Daniel André, communication personnelle.

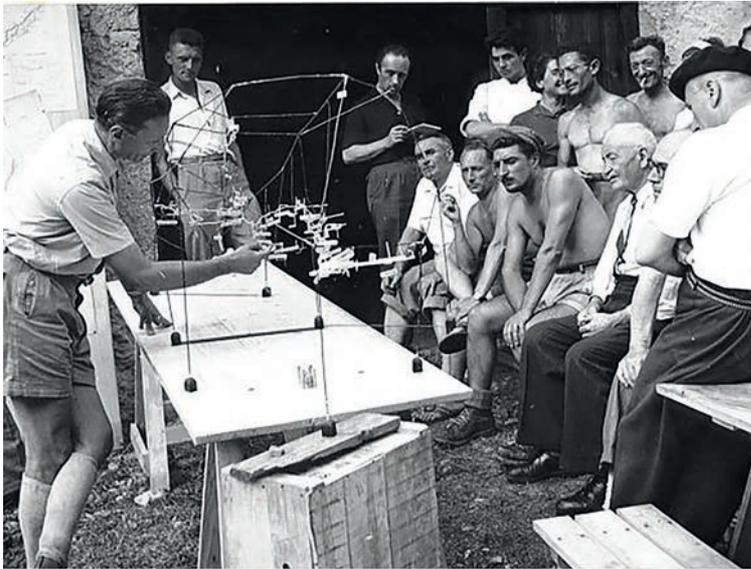


Photo 2: Pierre Chevalier (à gauche) présente la maquette du réseau souterrain de la Dent de Crolles. Séance de travail dans la cour de la maison Delarue (Archives de l'Ecole française de spéléologie) St-Pierre-de-Chartreuse (Isère) - 1952. Pierre Chevalier (left) presents a model of the underground network of the Dent de Crolles. Working session in the courtyard of the house Delarue (Archives of the French School of Speleology) St-Pierre-de-Chartreuse (Isère) - 1952.

sur le fonctionnement hydrologique de ce très grand réseau du Vercors.

Dans un esprit différent, mais avec une production similaire, il convient de citer les travaux de Stanislas Meunier (1843-1925). Celui-ci, professeur de Géologie expérimentale au Muséum d'Histoire Naturelle, expérimente l'érosion des calcaires. Ses travaux l'amènent, durant la seconde partie du XIX^e siècle, à faire couler de l'eau acidifiée sur des blocs pour produire des maquettes qui reproduisent en relief et en creux les morphologies des grottes [Meunier, 1894 et 1907]. Les conclusions qu'il tire de l'analyse de ses maquettes l'amènent à une controverse avec Martel [Martel, 1905; Jaillet et Maury, 2014], controverse qui montre assez bien le décalage qui peut exister entre approche naturaliste (représenter le réel) et une approche modélisatrice (expérimenter pour expliquer le réel). Quelques-unes de ces maquettes (résidus d'expériences) subsistent au Muséum à Paris.

...des anaglyphes et des blocs-diagrammes de conduits

Durant la même période apparaît une méthode de représentation des volumes souterrains par les anaglyphes (figure 3). Au moins

Figure 3: Les deux éditions de « en relief par les anaglyphes » sur des grottes à la fin des années 1930. Il s'agit ici d'un premier mode de représentation des volumes souterrains par restitution du relief à l'aide de deux filtres de couleur différente (rouge et bleu). Both editions of "en relief par les anaglyphes" in caves in the late 1930s. This is a first mode of representation underground volumes with relief restitution using two different color filters (red and blue).



deux éditions seront publiées, toujours sur des grottes touristiques (Padirac et les merveilles souterraines de la France, à la fin des années 1930). Bien que limités à des photographies de salles et de concrétions avec un mode de restitution du relief basé sur l'utilisation de lunettes rouge et bleu, les anaglyphes de grottes constituent une méthode précoce de représentation du volume en 3D. Le procédé est toujours d'actualité en stéréorestitution et trouve support soit dans des livres [Chailloux, 1994; Lismonde, 1997] soit sous forme de diaporamas³.

En 1942, J. Harlen Bretz publie un volumineux article précurseur dans lequel il décrit un certain nombre de formes de l'endokarst. À plusieurs reprises, il a recours au bloc-diagramme ou au dessin en perspective pour représenter, à l'échelle de drains ou de portions de conduits, l'organisation des différents objets et leur relation avec l'encaissant calcaire (figure 4). Plusieurs de ces dessins seront repris en France, notamment par Renault [1970]. Bien des géomorphologues décrivant les morphologies de l'endokarst prolongent encore cet esprit du bloc-diagramme souterrain [par exemple Lauritzen et al., 2000].

À l'échelle d'une cavité, il convient de citer une certaine « mode » qui a, durant une petite vingtaine d'années, permis de représenter des gouffres en vue cavalière. Ces vues cavalières sont directement inspirées des normes du dessin technique (ou dessin industriel). La topographie spéléologique, comme le dessin dit d'ensemble, permet de représenter l'objet investi à l'aide de différentes vues de côté, de face et de dessus [Chevalier, 2004] (dans le domaine des grottes: un plan et des coupes). Mais la perception de la troisième dimension impose parfois le recours à une vue en perspective [Flocon et al., 1963]. Cette vue n'a généralement pas vocation à donner les cotes exactes de l'objet (les angles et souvent les dimensions ne sont pas respectés) mais à en faciliter la lecture et notamment le passage d'une vue à une autre. Ainsi, si la géométrie descriptive [Javary, 1881] a permis de formaliser depuis longtemps (travaux du mathématicien G. Monge, 1747-1817) les règles de projection orthogonale (conservation des angles et des longueurs), la perception de la complexité de l'objet passe aussi par la perspective cavalière, fausse géométriquement mais intelligible pour l'esprit. Ce type de représentation, considéré comme un « plus » dans la topographie spéléologique, mais pas comme un document complet [Faucher et al., 1991], a eu cours

3. Voir les travaux de « La Salle 3D International Team » - <http://www.lasalle3d.com/>

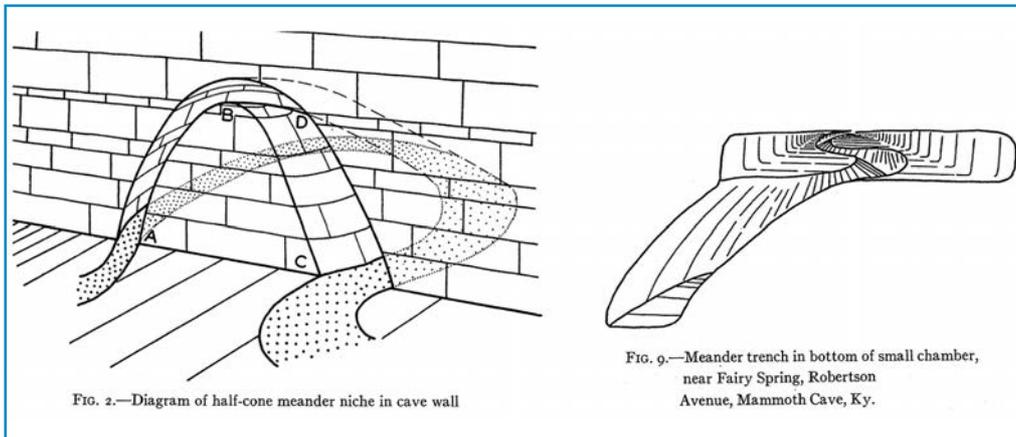


Figure 4: Les vues en perspective de H. Bretz en 1942 sont une solution pour visualiser en 3D la complexité géométrique des conduits et des processus spéléogénétiques que l'auteur veut décrire. *Perspective views of H. Bretz in 1942 are a solution for viewing 3D the geometric complexity of galleries and underground process that the author wants to describe.*

dans les années 1970 et 1980 (figure 5) tout en restant une pratique assez minoritaire. L'intérêt est donc bien de faciliter la compréhension. L'inconvénient est double cependant: (i) le point de vue est imposé par le dessinateur et (ii) la conservation des angles et des longueurs n'est pas respectée (sauf pour les longueurs en cas de perspective axonométrique et non conique). À partir des années 1980 et surtout 1990, l'apparition des images 3D animées des logiciels de la communauté spéléologique va reléguer aux oubliettes ce type d'images pourtant originales et parlantes des grottes.

II. Une approche 3D à l'échelle des réseaux: le travail des spéléologues

Représenter l'endokarst, c'est donc dans un premier temps faire des plans et des coupes et les habiller correctement. Cependant, au tournant des années 1990, les premiers logiciels de traitement de données spéléologiques permettent de proposer des visualisations 3D redéfinissant en partie les codes de représentation et de visualisation des grottes et du karst.

Une discrétisation du monde souterrain

Dans les faits, tout projet topographique constitue un projet de discrétisation de l'espace souterrain. Il s'agit de passer d'un monde continu, celui que nous propose la nature, à un monde mathématique, un monde discret,

un monde algébrique où le continuum de la surface de la caverne est remplacé par une succession de points. On parle d'échantillonnage, de numérisation ou de discrétisation. Cela est vrai pour une topographie « spéléo », pour un lever de géomètre expert ou, comme nous le verrons plus loin, pour un balayage laser 3D par lidar. Dans tous les cas, la procédure

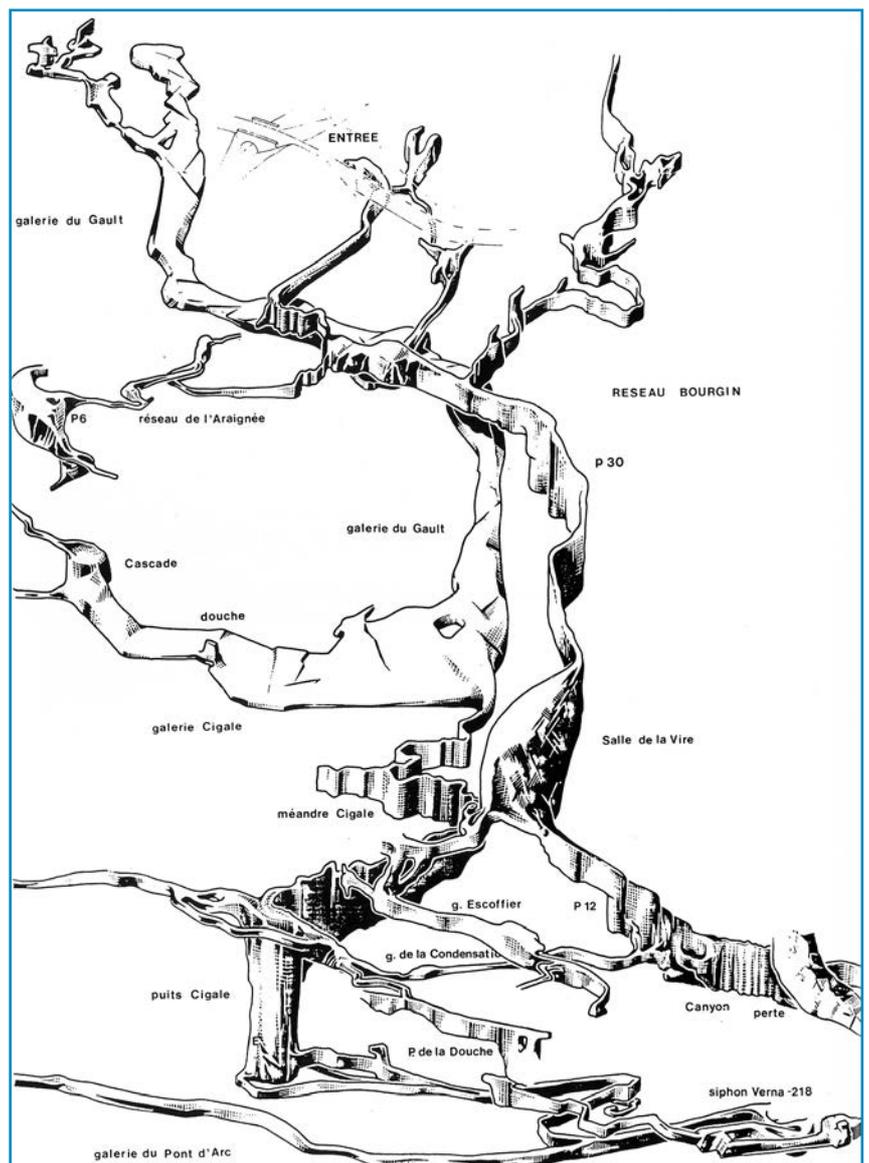
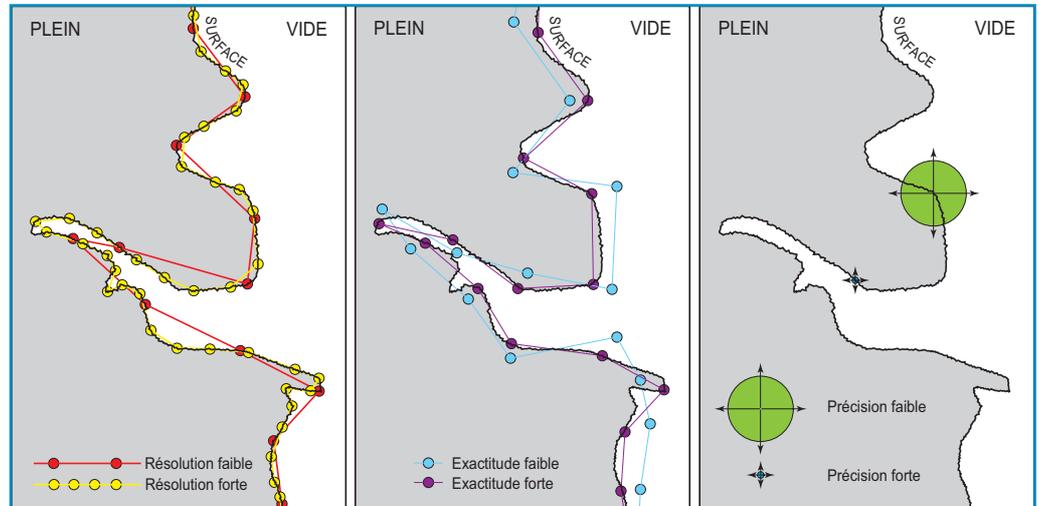


Figure 5: Perspective axonométrique réalisée par Bernard Peigné sur la partie supérieure du Trou qui Souffle (Lismonde, 1991). Les parallèles sont respectées (pas les angles) et il n'y a pas de modification de l'échelle des objets en fonction de l'éloignement. Ce type de représentation 3D a eu un certain succès durant les années 1970 et 1980, et celle-ci est un modèle du genre. *Axonometric perspective conducted by Bernard Peigné on the top of the "Trou qui Souffle" (Lismonde 1991). The parallels are respected (not the angles) and there is no change in the scale of objects based on distance. This type of 3D representation has had some success in the 1970s and 1980s. This one is a model.*

Figure 6: Discrétiser l'espace souterrain en 2D ou 3D consiste à passer d'un monde continu (ici l'interface de la paroi, entre plein et vide) à un monde discret, mathématique, constitué d'une succession de points, plus ou moins bien résolu, (à gauche: maille entre deux points), plus ou moins exact (au centre: qualité du positionnement du point), plus ou moins précis (à droite: dispersion et fidélité des mesures). Le schéma est volontairement sans échelle.

Discretize underground space in 2D or 3D is a operation to go from continuous world (here the interface of the wall, between full and empty) to a discrete world, mathematics. The result is a succession of points, more or less large (left: distance between two points), more or less accurate (center: quality of positioning point), more or less precise (right: dispersion of measurements). The picture is voluntary without scale.



de discrétisation souffre de deux problèmes, indépendamment de l'échelle, celui (i) de la résolution et celui (ii) de la précision (figure 6).

La résolution, c'est la maille donc la finesse avec laquelle on choisit de représenter la grotte. Qu'il s'agisse d'une succession de points topographiques ou d'un dessin, les anfractuosités de la grotte sont représentées jusqu'à une certaine limite, généralement métrique dans le cas d'un levé spéléologique. La précision est associée à la qualité des instruments et à la compétence des opérateurs qui les utilisent. Dans le cas d'un levé de type topographie spéléologique, le positionnement d'un point est de l'ordre du décimètre (parfois du centimètre) et les mesures angulaires (pente, direction) sont données au degré près (parfois au demi-degré). Les levés réalisés par station totale (tachéomètre) ou par laserscanner correctement référencé peuvent approcher une précision millimétrique

dans l'absolu. En spéléologie, on distingue souvent le cheminement (la polygonale) et l'habillage topographique (le dessin). La qualité du cheminement est considérée comme une opération géométrique alors que l'habillage est souvent lié à la sensibilité de l'opérateur qui va « plus ou moins bien » dessiner la grotte. La *British Cave Research Association* distingue ainsi des cotations topographiques selon un code double (chiffre et lettre) qui permet d'apprécier la qualité d'une discrétisation topographique⁴ en distinguant les deux domaines, strictement technique et géométrique d'un côté et plus artistique de l'autre⁵.

Lorsque l'on s'intéresse cependant aux représentations 3D de grands réseaux karstiques, la partie artistique reste très limitée et n'apparaît plus que dans les choix d'orientation de la vue cavalière retenue. En effet, à partir d'une certaine échelle, seuls les tronçons

4. Sur la méthode topographique en spéléologie, voir Fabre et al. (1978), Müller (1980), Faucher et al. (1992), Grossenbacher (1992), Häuselmann (2002, 2011).
5. Cette cotation a été mise à jour en 2002 par le BCRA: <http://bcra.org.uk/surveying/>

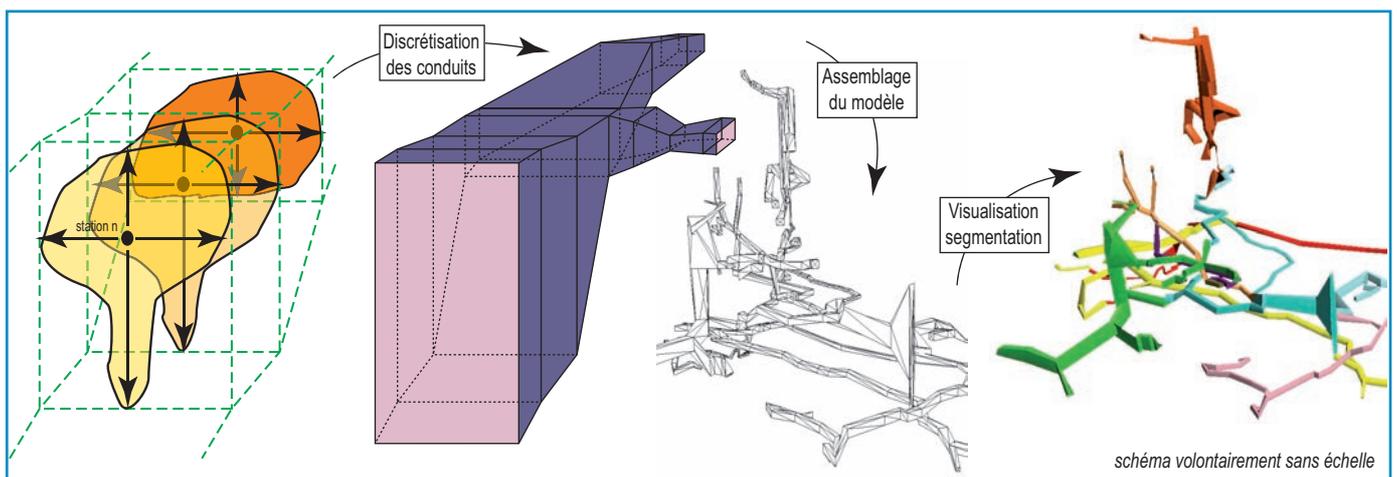


Figure 7: Discrétisation spéléologique de maille métrique à décimétrique. Une section de galerie est caractérisée par sa position dans l'espace 3D (station n) et par quatre mesures de largeur (gauche, droite, haut et bas). Les galeries sont ici une suite de polyèdres dont les caractéristiques géométriques (distance entre deux stations notamment) correspondent à la maille du modèle. L'assemblage, la visualisation et la segmentation 3D sont faits sur des gammes de logiciels dédiés (ici *Visual Topo* et *MeshLab*). *Discretization caving with decametric mesh. A gallery section is characterized by its position in 3D space (station n) and 4 width measurements (left, right, top and bottom). The galleries are here a sequence of polyhedra whose geometric characteristics (distance between two stations in particular) is the resolution of the mesh model. The assembly, visualization and 3D segmentation are made on dedicated softwares (here *Visual Topo* and *MeshLab*).*



Photo 3 : Mise en œuvre sur le terrain du matériel topographique classique en spéléologie. L'opérateur de droite mesure les distances, celui de gauche les angles de pente et de direction. L'espace entre les deux opérateurs (classiquement en spéléologie entre 1 m et 30 m) correspond à la maille de la procédure de discrétisation que constitue cette opération topographique. Cliché Stéphane Jaillet, Centre Terre. *Implementation in the field of classical topographic material. The operator (on the right) measures the distances, the other one (on the left) measures angle of slope and the direction. The space between the two operators (typically between 1 m and 30 m, in caving) is the mesh discretization of the topographic operation.* Photo Stéphane Jaillet, Centre Terre.

topographiques participent à la compréhension de la géométrie des conduits. Le dessin s'efface au profit d'une représentation de conduits tubulaires (section quadrangulaire, losangique ou octogonale) qu'offrent les logiciels 3D. Ces tronçons de conduits sont assimilés à un squelette filiforme (figure 7). Les stations sont acquises les unes après les autres (photo 3), sous forme de coordonnées polaires (distance, direction, inclinaison), et des sections de galeries permettent de rendre compte des changements majeurs des dimensions des conduits (figure 7). Pour ces sections, généralement quatre longueurs sont nécessaires (gauche, droite, haut et bas). Il s'agit donc bien d'une discrétisation des volumes souterrains mais ici à des mailles généralement pluri-métriques. Ce type d'approche et de représentation est donc valable à petite échelle (échelle du massif karstique), mais à plus grande échelle, c'est la qualité des dessins levés sous terre qui, s'appuyant sur ce squelette, permet de véritablement rendre compte des morphologies souterraines.

Les logiciels de traitement de données spéléologiques...

Depuis une vingtaine d'années, le recours aux solutions informatiques a permis d'automatiser et d'accélérer un certain nombre de procédures dans le trai-

tement et le rendu des données acquises en milieu souterrain. Des gammes de logiciels dédiés accélèrent la saisie des données, automatisent les calculs et proposent des solutions mathématiques aux bouclages des conduits, répartissant d'autant les erreurs matérielles ou de mesure [Heller, 1983; Budaj et Mudrák, 2008]. Citons quelques-uns de ces logiciels comme par exemple le peu connu *Turbo Topo*, développé autour du Groupe spéléologique valentinois, dans le début des

années 1990 sous Dos. Ce logiciel a connu une diffusion limitée, bien qu'il ait déjà possédé une fenêtre de visualisation 3D. Le plus célèbre *Toporobot* a été développé en Suisse par Martin Heller et il a connu une très large diffusion dans la seconde moitié des années 1990. Ce logiciel, dont les prémices du développement remontent aux années 1970 [Heller, 1983 et 1994], a su démocratiser sous l'environnement Mac la saisie des données et leur traitement. Il a permis surtout d'imposer un standard dans l'acquisition des 7 données de base (longueur, direction, pente, gauche, droite, haut, bas) et la logique d'un travail en séries et stations. Si ce logiciel n'est plus maintenu, il a marqué une génération importante de topographes souterrains. Le développement du module *Geo3D* [Huber, 1999] a offert les premières représentations 3D avec intégration des tailles de conduits et possibilité de navigation à la souris (figure 8).

Par la suite, *Visual Topo* (développé par Eric David) a su proposer des fonctionnalités tout aussi efficaces sous un environnement Windows. L'organisation des données sous forme de feuille de calcul, l'édition cartographique aisée, la visualisation 3D efficace, avec différentes options (colorisation des conduits, choix des perspectives, manipulation à la souris, intégration de MNT, etc.) ont rapidement imposé *Visual Topo* comme standard de la communauté française au moins durant toutes les années 2000 et aujourd'hui encore. En outre, l'exportation possible vers d'autres formats 3D est un atout

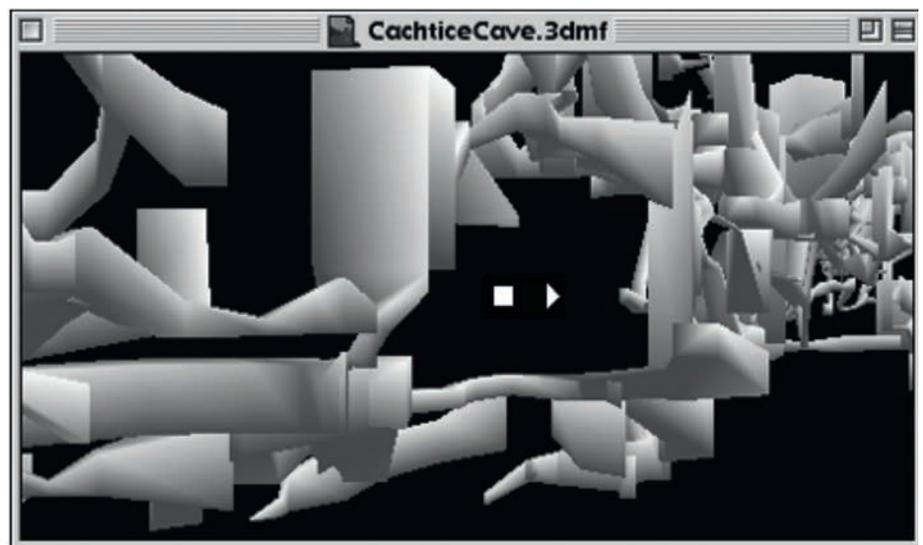


Figure 8 : Une des premières représentations d'un réseau spéléologique en 3D avec intégration de la taille des conduits et possibilité de navigation à la souris (données M. Sluka). Extrait Huber, 1999. *One of the first representations of a caving 3D network with integration the size of the conduits and possibility of navigation with a mouse (data M. Sluka). After Huber, 1999.*

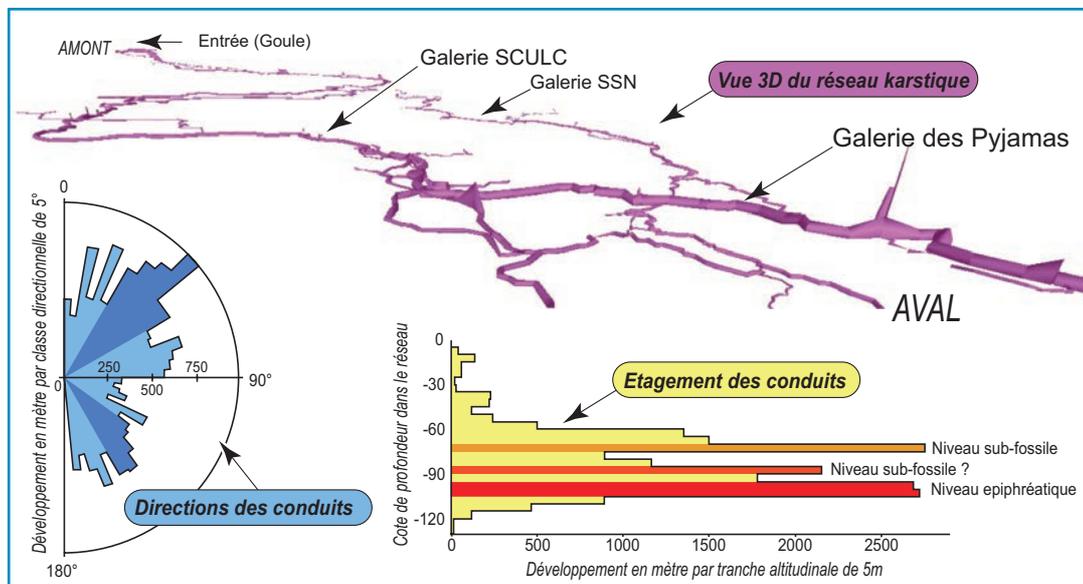


Figure 9: Analyses statistiques des données de cheminement 3D sur le système karstique de Foussoubie (Ardèche). Il est possible sur ces données de traiter à la fois les directions des conduits et l'étagement de ces conduits (Traitement sous VisualTopo et CaSuDaAn, d'après Jaillet et al., 2011). Statistical analysis of 3D tracking data on the Foussoubie karst system (Ardèche). The process give two result: directions and identification of stages of the galleries (Treatment under VisualTopo and CaSuDaAn, after Jaillet et al., 2011).

d'interopérabilité précieux. Cette interopérabilité se trouve également dans le logiciel *DPTopo* créé par David Pujol et toujours en développement. Ce dernier offre des outils d'analyse intéressants (rosaces de directions, histogrammes des profondeurs) et un visualiseur 3D efficace. *GHTopo*, créé par Jean-Pierre Cassou, est de même toujours en développement (sous Linux et sous Windows). Ce logiciel offre des fonctionnalités de récupération des données *Toporobot* et un outil de visualisation 3D efficace. Citons encore dans le domaine francophone *CyberTopo* (développé par Eric Sibert), très utilisé en Savoie, ou bien *Topo Calc'R* développé par Jean-Paul Héreil.

Bien d'autres logiciels de topographie spéléologique proposant des visualiseurs 3D existent et en dresser la liste exhaustive ne saurait être aisé. Cependant, il convient de citer chez nos collègues américains *Compass*, développé par Larry Fish pour Windows; *Winkarst* écrit par Garry Petrie, pour Windows; *Survex*, écrit par Olly Betts et Mark R. Shinwell, pour Windows / Linux / Mac Os, *Walls* développé par David McKenzie, pour Windows; *Caps* écrit par Hubert Crowell pour Windows. En Allemagne, citons *CaveRender* développé par Jochen Hartig. Citons pour finir *Thérion*, développé par Stacho Mudrák et Martin Budaj sous plateforme Linux, Windows et Mac. Ce logiciel offre, outre la possibilité de corriger automatiquement le dessin en cas de correction topographique (fonctionnalité de cartographie dynamique présente aussi dans *Topo Calc'R*), une restitution 3D basée sur le plan 2D. De fait les éléments de paroi dessinés, c'est-à-dire appréciés

par le topographe sur le terrain, servent, par élévation des hauteurs de galeries, à construire le modèle 3D. Celui-ci n'est donc pas la simple succession en perspective des différents tronçons de galeries mais bien une extrusion de la topographie 2D. Seuls les logiciels *Walls* (déjà cité) et *Tunnel*, développé par Julian Todd sous Java, proposent une solution similaire. Des logiciels dédiés aux tablettes, smartphones, pocket PC ou PDA (*Auriga*, développé par Luc Le Blanc au Canada; *PocketTopo*, développé par Beat Heeb en Suisse; *TopoDroid* développé sous Android) permettent parfois des exports de données 3D. Mais dédiés à l'acquisition des données sur le terrain, ils ne sont pas conçus pour offrir une visualisation 3D. Cependant des développements comme *Cave3D* sous Android ou *TopoDroid 3D sketching*, laissent espérer pour l'avenir des solutions intéressantes embarquées sur le terrain.

... pour une analyse à l'échelle des réseaux

Ce type d'acquisition numérique s'avère très satisfaisant à petite échelle. En effet, la géométrie des grands réseaux spéléologiques s'appréhende à l'échelle des massifs karstiques et c'est la position géométrique des conduits eux-mêmes qui constitue l'information à traiter. En ce sens, les logiciels de traitement de données développés au sein de la communauté spéléologique, constituent un excellent support de visualisation. Couplé à des MNT (maille à 50 m pour la BD altimétrique en France, par exemple) et à des modèles géologiques (maille

similaire pour un clic tous les millimètres sur une carte géologique), le modèle 3D des conduits peut être exploité pour des reconstitutions de paléo-niveaux de base ou pour l'identification de niveaux référentiels de karstification [Martineau, 2003; Filipponi et al., 2007 et 2008]. Le réseau peut de même être analysé pour lui-même; et des données statistiques peuvent être extraites du modèle numérique spéléologique. Ainsi, du réseau de Foussoubie (Ardèche), il a été possible d'extraire une analyse à cette échelle (figure 9). Vaste système karstique de la rive droite des gorges de l'Ardèche, le réseau de Foussoubie offre environ 23 kilomètres de conduits souterrains [Le Roux, 1984]. C'est un système perte-émergence avec une percée hydrogéologique d'environ 7 kilomètres. Dans cet exemple, les données ont été saisies sous *Visual Topo* pour la production d'un modèle 3D de 31 960 sommets et 59 916 faces, correspondant à 2 668 visées sur le terrain pour 22 855 m de développement. La longueur moyenne des visées est de 8,56 m [Jaillet et al., 2011]. Le modèle a ensuite été traité avec *CaSuDaAn* (*Cave Survey Data Analyser*) développé par M. Filipponi et l'analyse a permis de dégager les directions de conduits (par classe directionnelle de 5°), montrant le rôle fondamental de la structure géologique (fracture et stratification) sur la géométrie des drains. Le traitement permet de même une classification de l'étagement des conduits (ici par classe de 5 m). Ce type d'analyse, qui pouvait se faire auparavant en plan (2D) ou en coupe (2D), est désormais réalisé en 3D, certes

sans apport informationnel décisif, mais avec des outils de visualisation améliorés. Replacés dans un contexte tectonique, structural et de variations des niveaux de base, le résultat constitue un support pertinent à l'interprétation géologique et géomorphologique de la genèse et de l'évolution du système.

À côté de cette voie, celle d'une analyse basée sur la mesure directe de la géométrie des conduits, il en existe une autre, celle de la photographie, de la photogrammétrie et des productions 3D associées.

III. Photographie et photogrammétrie en grotte

Parmi les différents modes de représentation du monde souterrain, il convient de citer la photographie et ses applications. Malgré les difficultés de prise de vues inhérentes au milieu et à ses conditions particulières, ces méthodes se sont rapidement imposées. Elles devraient connaître encore des développements importants dans les années à venir. On distinguera ici la photogrammétrie proprement dite et la construction de modèles 3D à partir de relevés photographiques.

Photogrammétrie et projection pariétale

La photogrammétrie est une technique qui utilise la vision stéréoscopique humaine pour restituer le relief. À partir de deux (ou plus) points de vue d'une même portion de scène, il est possible de reconstituer le relief dans les secteurs couverts selon ces différents points de vue. Aimé Laussedat (1819-1907) est considéré comme un des pères de cette technique qu'il met en œuvre sur la façade de l'Hôtel des Invalides en 1849. Les développements ultérieurs de la méthode seront associés à la photographie aérienne. Les premières images sont celles réalisées par Felix Tournachon, dit Nadar, qui a photographié Paris depuis un ballon dans les années 1860. La photogrammétrie devient, durant tout le XX^e siècle, la base de la constitution des cartes topographiques [Kasser et al., 2001]. Plus récemment les développements informatiques et les acquisitions photographiques en formats numériques [Egels, 2011] ont conduit au développement de la multi-corrélation d'images [Pierrot-Deseilligny et al., 2011], technique qui connaît aujourd'hui une démocratisation importante.

En grotte, la photogrammétrie fut appliquée de manière ponctuelle et non systématique au relevé de parois ornées. En effet le relevé, technique consistant à reproduire tout en l'interprétant les tracés anthropiques pariétaux, reste complexe tant la géométrie de la paroi est elle-même complexe. Amédée Lemozi, dès les années 1920, invente une méthode basée sur un carroyage irrégulier. Il circonscrit « les parties du plafond gravé avec des cordes se coupant en petits losanges » [Lemozi, 1929] qu'il place au plus près de la paroi et dont les coins étaient cotés correctement. Cette méthode consistait donc déjà à projeter la paroi sur une géométrie gauche, faite de losanges et de quadrilatères. La justesse des résultats tenait à la fois à la proximité de cette surface à la paroi et à la maille de chacun de ces quadrilatères. À la même époque, Breuil utilise une méthode à base de supports transparents (papier cristal des fleuristes vigoureusement froissé), tandis que plus tard Glory développera une méthode similaire, mais sans contact, à Lascaux ou Bara-Bahaux à partir de pellicule cellulosique maintenue par deux aides à quelques centimètres de la paroi. Chabredier [1966] perfectionne encore la technique, notamment dans la grotte d'Ebbou (Ardèche) en plaçant un cadre fixé sur crémaillères et rotules. Le relevé se fait « par le maintien d'un

œil fermé, l'autre suivant la ligne ou le point considéré ». Il ajoute : « nous avons conçu un système capable (...) d'abolir la perspective, donc d'éliminer plus complètement les erreurs de visées ». Par la suite, le procédé sera perfectionné encore par Denis Vialou à la grotte d'Aldène ou Jean Clottes au Salon Noir de Niaux avec un relevé polyédrique sur feuilles transparentes maintenues proches de la paroi grâce à une armature métallique [Aujoulat et al., 2005].

Dans toutes ces approches, le point commun semble être la volonté de « corriger » les déformations géométriques de la paroi, c'est-à-dire pratiquement de supprimer l'information 3D. Mais pour ce faire, il a fallu tenir compte de la 3D qu'impose de fait la paroi. Le développement de la photographie et la quête d'une géométrie comme support d'une information 3D va pousser à l'utilisation véritable de la restitution photogramétrique [Maumont, 2010]. La 3D hier corrigée, devient alors support informationnel. La technique est mise en œuvre pour des relevés d'art rupestre, notamment en Australie et en Angleterre [Atkinson, 1968; Borchers, 1968; Clouten, 1974, 1977; Rivett, 1977]. Elle l'est aussi à Lascaux mais dans le but de la production du fac-similé [IGN, 1967; Lima, 2012]. En France, c'est sans doute Michel Lorblanchet qui le premier

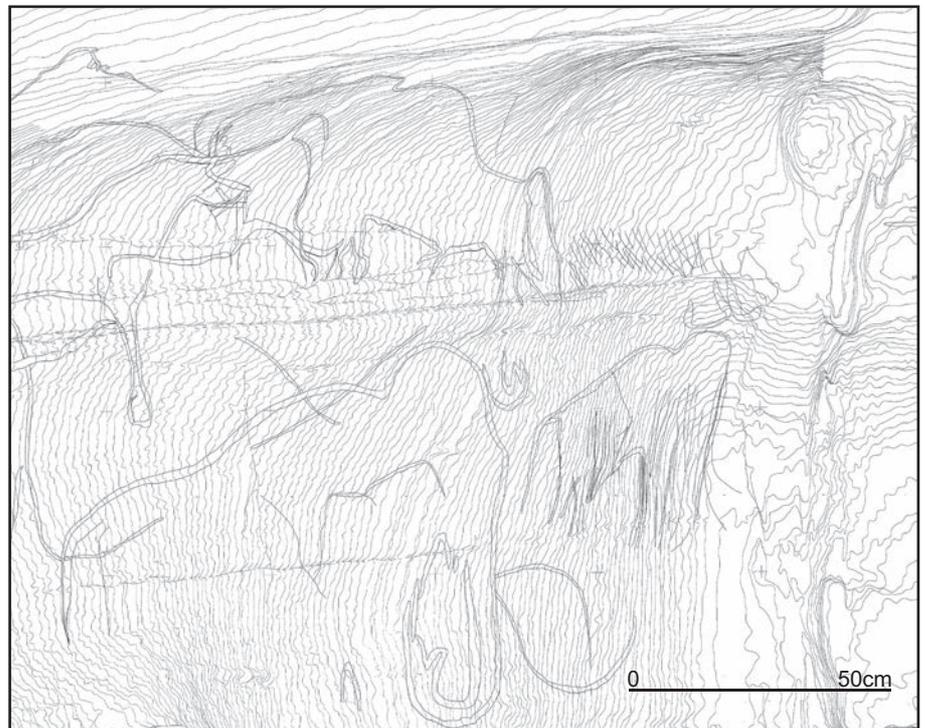


Figure 10: La frise noire de la grotte du Pech Merle relevée par photogrammétrie et présentée en courbes de niveau selon un plan de référence, placée en arrière de la paroi. Extrait Lorblanchet 1982, 2010. The «frise noire» of the Pech Merle Cave studied by photogrammetry and presented on a contour line map, placed behind. After Lorblanchet 1982, 2010.

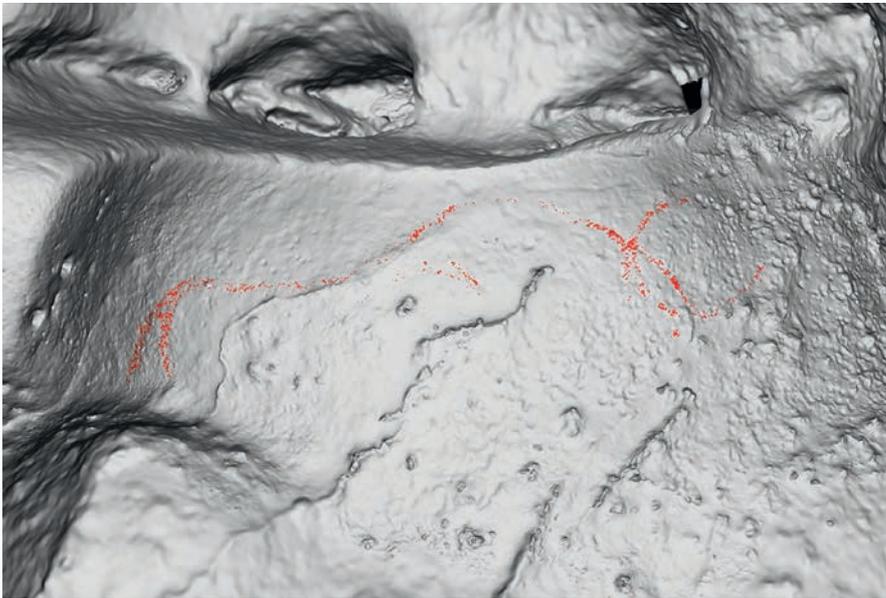


Figure 11: Relevé de l'Auroch Pts-08 de la grotte aux Points d'Aiguèze, dans son contexte pariétal immédiat. Le traitement photogrammétrique (ici sous *PhotoScan*) rend compte du relief tandis que le traitement des images (ici sous *DStreht*) permet d'éliminer les éléments non rattachés à l'œuvre. Extrait Monney, 2014. *Recording the Auroch Pts-08 to the "grotte aux Points" (Aiguèze), in its immediate context. The photogrammetric processing (here with PhotoScan) gives the topography, while the image processing (here with DStreht) eliminates parasite elements. After Monney, 2014.*

mit en œuvre la technique sur la Frise noire de la grotte du Pech Merle dans les années 1970. Avec P. Lebel, géomètre et photogrammètre, ils utilisent une chambre métrique UMK 10/13 18 en monture simple pour les prises de vues et un autographe Wild A10 pour la restitution. Ils parviennent à produire une cartographie en courbe de niveau de la paroi, cartographie sur laquelle les œuvres de la Frise viennent se placer [Lorblanchet, 1982 et 2010] (figure 10). Bien que le résultat permette une véritable analyse de la géomorphologie de la paroi et donc des relations fines unissant les œuvres au relief naturel, Lorblanchet reste mitigé quant à l'intérêt du procédé et note qu'outre le caractère lacunaire du relevé (il manque six figures), la restitution n'est possible qu'en associant les compétences du photogrammètre à celle du préhistorien connaissant très bien la paroi et les œuvres.

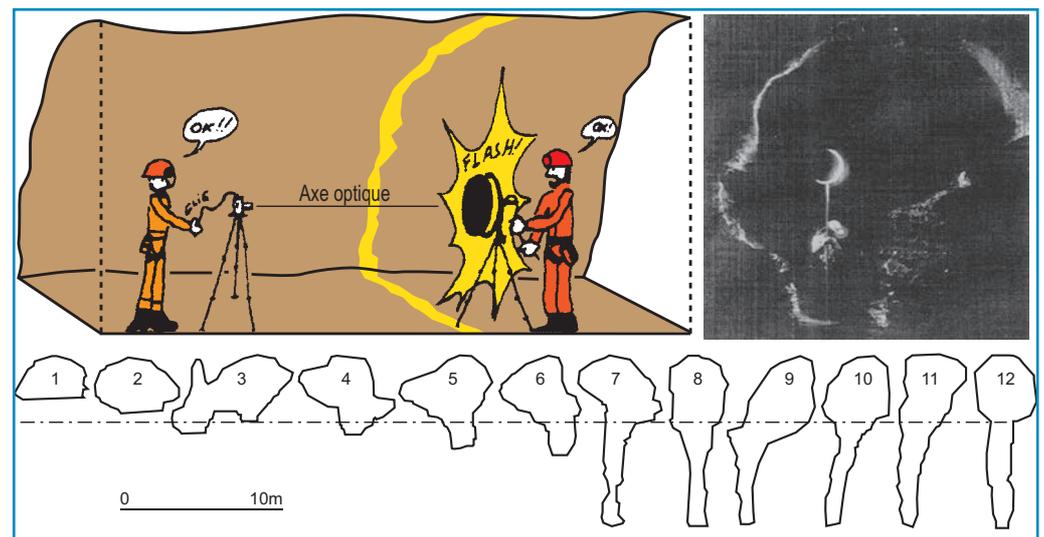
Ce point est important car il ouvre la voie de l'expert dans la production d'images du

monde souterrain. Qui finalement ici produit l'image correcte, ou plutôt l'image adaptée à la question de départ ? Dans le domaine de l'art pariétal, où la maîtrise technique de l'acquisition 3D est souvent confiée à une compétence tierce, ce point apparaît crucial. Nous reviendrons sur ce point plus loin, dans les discussions.

Multi-corrélation d'images

C'est sans doute pour cela que la technique ne connaît pas un succès si important et ce n'est que le développement récent des images numériques et de la multi-corrélation qui permet aujourd'hui de revisiter cette méthode. En effet, la multi-corrélation d'images offre la possibilité de générer un modèle 3D dense d'une scène prise sous différents points de vue et ceci à partir d'une masse d'images acquises assez aisément [Pierrot-Deseilligny et al., 2011]. Plusieurs solutions libres (*Autodesk123Dcatch*, *Arc3D web service*, *IGN MicMac*, *Visual SFM*, *PMVS*) ou payante (*Agisoft Photoscan*, *PhotoModeler Scanner*) permettent de produire assez efficacement et parfois de manière très spectaculaire des modèles 3D dans des conditions où l'acquisition doit être rapide (milieu aquatique, aérien ou souterrain). En outre, l'augmentation significative de la résolution des capteurs numériques autorise une augmentation importante de la taille des modèles et une diminution d'autant de la maille. Cependant, ce type de modélisation 3D de paroi n'a de sens et d'intérêt que lorsqu'il est conduit par un opérateur qui maîtrise correctement l'acquisition photographique et la chaîne de traitement informatique qui lui fait suite, mais surtout maîtrise et définit correctement la problématique associée à l'acquisition. En effet, ce n'est que si cette question est correctement établie que les mailles d'acquisition, les tolérances des masques, les exigences de

Figure 12: Principe de mise en œuvre du flash annulaire. Deux opérateurs suffisent pour réaliser l'acquisition des sections sur le terrain. La digitalisation du pinceau lumineux et la topographie des positions de section permettent de calculer le volume 3D du conduit (d'après Herbillon et al., 1997). *Principle of implementation of the ring flash. Two operators are enough to realize the acquisition of the sections on the ground. Digitizing the light beam and the topography of each positions allow to calculate the 3D volume of the gallery (after Herbillon et al., 1997).*



colorimétrie seront correctement définies. Nous reviendrons là encore sur ce point en discussion. Tout récemment, les relevés 3D photogrammétriques traités sous *Photoscan*, combinés à un traitement sous *ImageJ* et *DStretch* [Harman, 2005 et 2015], permettent de proposer des images 3D correctes, manipulables, orthorectifiées ou visualisées en 3D. Un travail de ce type est conduit actuellement à la grotte aux Points dans le Gard [Monney, 2014] (figure 11).

De la photographie à la section et au modèle 3D

À côté de ces méthodes de photogrammétrie et de multi-corrélations d'images, la photographie proprement dite a servi à la production de topographies et de modèles 3D en milieu souterrain. En effet, la photographie en elle-même produit une image de la galerie souterraine. Une photographie correctement contrastée et éclairée en contre-jour derrière un personnage produit une image assez correcte de la section de la galerie. Exploitant ce principe simple, plusieurs méthodes ont vu le jour.

En mine et carrière souterraine, des méthodes basées sur l'utilisation d'une lentille diffractant la lumière permettent de dessiner sur la paroi un pinceau lumineux fin. La photographie de ce pinceau de lumière permet d'extraire assez aisément un profil de galerie. La méthode est compliquée par trois problèmes essentiels : (i) la mise à l'échelle qui peut être résolue par la connaissance du diamètre de la lentille (généralement plusieurs décimètres) ; (ii) la déformation optique qui est en partie résolue par l'utilisation de focale longue, peu déformante ou par des méthodes mathématiques de corrections géométriques et enfin (iii) le géoréférencement des stations photographiques. Car l'intérêt essentiel de la méthode est de pouvoir multiplier les profils et de connaître correctement leurs positions respectives afin de produire à la fois une géométrie 3D du site minier, mais aussi un calcul correct des volumes exploités [Taton, 1960]. Dans un esprit similaire et en adaptant le système, des relevés de sections de galeries ont été réalisés dans la rivière souterraine de l'Iffernet (Lot) [Sergent, 1978 ; Tarrisse, 1998]. Un ou plusieurs flashes placés entre deux plaques rondes de 35 cm de diamètre génèrent un trait de lumière annulaire sur la paroi. Le tracé est digitalisé sous *Autocad* à partir de la photographie, mis

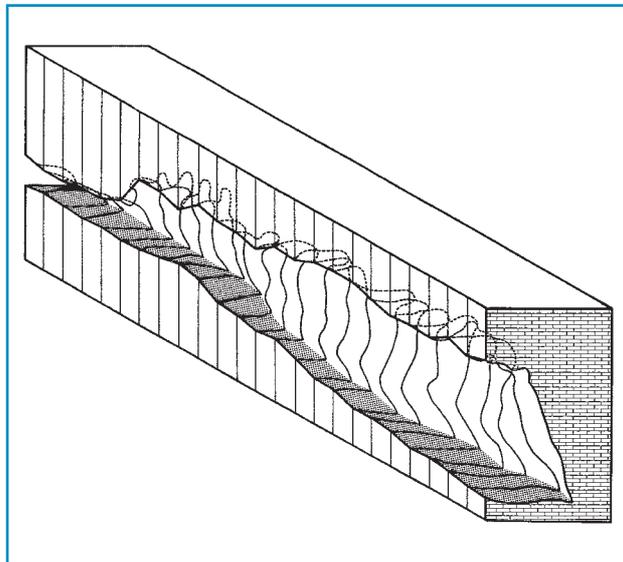


Figure 13 : Bloc-diagramme d'un secteur de galerie de la grotte de la Mouthe (Les Eyzies, Dordogne). Une série de coupes obtenues par profils lumineux (photos au fish-eye), redressées des transformations optiques, est assemblée pour obtenir cette vue 3D (extrait Aujoulat, 1987). *Block-diagram of a gallery of a part of the Mouthe cave (Les Eyzies, Dordogne). A series of sections obtained by photography (with a Fisheye), are recovered from optical transformations, and assembled for this 3D view (After Aujoulat, 1987).*

à l'échelle, référencé et placé dans une topographie (connaissance de l'abscisse linéaire de chaque section). Il sert alors à calculer des volumes ici pour un stockage d'eau potable. La même méthode a été utilisée avec succès au Rupt-du-Puits (Meuse) pour calculer l'évolution linéaire de la section du collecteur au droit de la zone des cascades (figure 12) [Herbillon et al., 1997]. Enfin, lorsque toutes les sections sont assemblées dans une même vue cavalière, il est possible de produire une image en perspective assez correcte d'une portion de cavité. C'est ce qui a été réalisé avec succès à la grotte de la Mouthe (Les Eyzies, Dordogne) [Aujoulat, 1987], l'exercice ayant nécessité une correction géométrique des déformations liées à l'utilisation d'une optique fish-eye (figure 13).

Toutes ces méthodes, tous ces développements répondent à un même objectif : produire une image et une géométrie plus juste encore du conduit souterrain. L'arrivée des laser-scanners au milieu des années 1990 va rebattre profondément les cartes de l'acquisition et de la représentation 3D des grottes.

IV. Scanners 3D et lasergrammétrie en grotte

Passer à une échelle plus fine implique une discrétisation plus fine des objets investis. Le recours aux lidars terrestres (laser-scanners) constitue alors une solution intéressante. Bien que coûteuse et impliquant l'utilisation d'un matériel conséquent, elle offre un niveau de détail inégalé sur les morphologies endokarstiques, à l'échelle du drain, comme à l'échelle de la paroi [Jaillot et al., 2013].

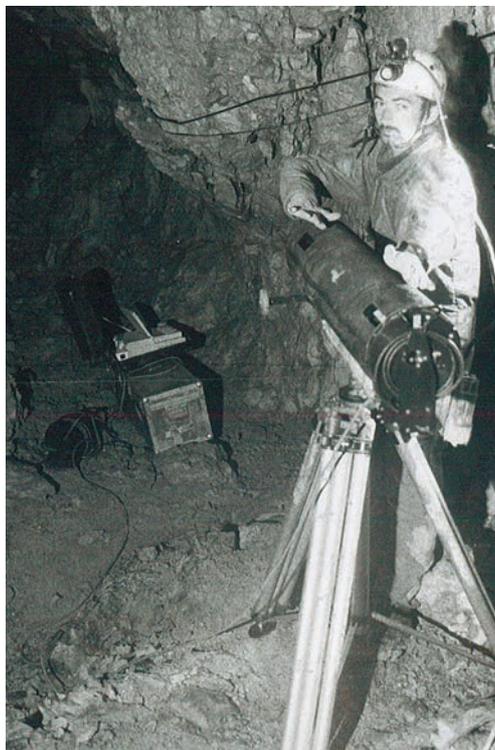
Principes d'acquisition

Le lidar est un principe d'acquisition à distance (télé-détection) basé sur les propriétés d'un faisceau de lumière renvoyé à l'émetteur. C'est un acronyme de « *light detection and ranging* » ou parfois de « *laser detection and ranging* ». C'est un vaste domaine que celui de la télé-détection (aérienne, terrestre fixe ou mobile, etc.) et dans le domaine des grottes et des milieux souterrains, c'est toujours la technologie terrestre qui s'impose. L'appareil est placé en position fixe (sur trépied généralement) et numérise par balayage laser son environnement immédiat. On parle alors de lasergrammétrie terrestre, de lidars terrestres, de balayage laser, de Scanners Laser Terrestres (SLT). Trois technologies coexistent essentiellement [Grussenmeyer et al., 2011] :

- (i) les scanners laser à impulsions, dit aussi à temps de vol. Ce sont des distancemètres dont la technologie est basée sur la mesure du temps de vol entre le point d'émission laser et point d'impact sur l'objet visé. Ils sont adaptés à des distances importantes de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres et sont peu adaptés au milieu souterrain quoiqu'ils aient à plusieurs reprises été employés sous terre (Optech Ilris 3D dans les Salles Rouges d'Ornac en Ardèche, Jaillot et al., 2010 ; 2011 ; Riegl à la Verna, Pierre Saint Martin, Chazaly et al., 2010) ;
- (ii) les scanners à décalage de phase, dits aussi à mesure de différence de phase, dont la technologie est basée sur une émission modulée et sur la comparaison des ondes émises avec celle des ondes retour. Cette technologie s'est imposée dans les lidars terrestres de moyenne

Photo 4 : Mise en œuvre du capteur Soisic dans la galerie de la Balme à Collomb (Savoie) en septembre 1998, dans le cadre du Mécénat technologique et scientifique EDF. Cliché J. Camaret.

Implementation of Soisic sensor in the gallery of the Balme at Collomb (Savoie) in September 1998, under the Patronage technological and scientific EDF. Photo J. Camaret.



portée (quelques décimètres à une centaine de mètres). Ces appareils, souvent montés sur un moteur rotatif, permettent d'acquérir des scènes complètes (champ de vision de 360° en horizontal et 270° ou plus en vertical). Ils se sont imposés dans le relevé des grottes et des objets à macro-échelle [Angas et al., ce volume] ;

- (iii) les scanners à triangulation, dont la technologie est basée sur le principe mathématique fréquemment utilisé par les topographes d'une mesure de la distance par la connaissance des angles de base du triangle. Le capteur mesure les deux angles de la base du triangle que forme la source laser, le récepteur (tous deux solidaires du scanner, mais non confondus contrairement aux deux autres technologies) et le point

observé. Le capteur Soisic de la société Mensi s'est imposé dès le début comme un capteur efficace, cependant limité à une vingtaine de mètres et assez encombrant. C'est ce capteur qui va servir aux toutes premières mesures en grotte.

Les premières acquisitions en grotte

C'est sans doute en 1994, à Vielmoüly, petite grotte de la vallée de la Beune (Dordogne) qu'un lidar 3D est embarqué pour la première fois sous terre. Norbert Aujoulat, pariétaliste au Centre national de préhistoire, et Guillaume Thibault, ingénieur à EDF R&D testent pour la première fois le capteur Soisic de la société Mensi [Aujoulat et al., 2005]. Ce travail s'inscrit dans une volonté du Mécénat Technologique et Scientifique d'EDF de développer de nouveaux outils et de nouvelles méthodes pour étudier en 3D des objets complexes à haute valeur patrimoniale, développements qui seront mis en œuvre sur des objets variés (statues, architectures anciennes). Rapidement, et alors même que la technologie Soisic est naissante, un scanner est introduit dans la grotte Cosquer (calanque de Morgiou), en coordination avec la mairie de Marseille mandatant une saisie photogrammétrique. À la complexité de la technologie naissante mise en œuvre s'ajoute celle de la plongée et du franchissement d'un matériel coûteux et encombrant dans le siphon, et celle de la pose d'un cordon numérique entre la surface et l'intérieur de la cavité pour le pilotage à distance du scanner. Mais la campagne de 1994 sera un succès et permettra l'acquisition de 4 700 000 points, 128 images couleur, pour 28 saisies et 67 heures d'acquisition et générant une densité pouvant atteindre un point tous les 2,5 cm [Thibault, 2001]. C'est à l'époque un exploit qui sera renouvelé en 1998 dans une cavité de moyenne montagne : la Balme à Collomb en Savoie où le même Mécénat EDF va permettre d'acquérir 3 millions de

Figure 14 : Procédure d'acquisition d'un conduit souterrain par balayage laser (ici avec 6 positions scanner). Des sphères sont employées sur le terrain pour assurer le référencement et la consolidation (assemblage) des différents nuages. L'ensemble est ensuite maillé pour produire le modèle RTI (Réseau de Triangles Irréguliers).
Process for acquiring an underground conduit by laser scanning (scanner here with 6 positions). Spheres are used on the ground to realize the topography of different clouds. The result is then meshed to produce the TIN model (Triangular Irregular Network).

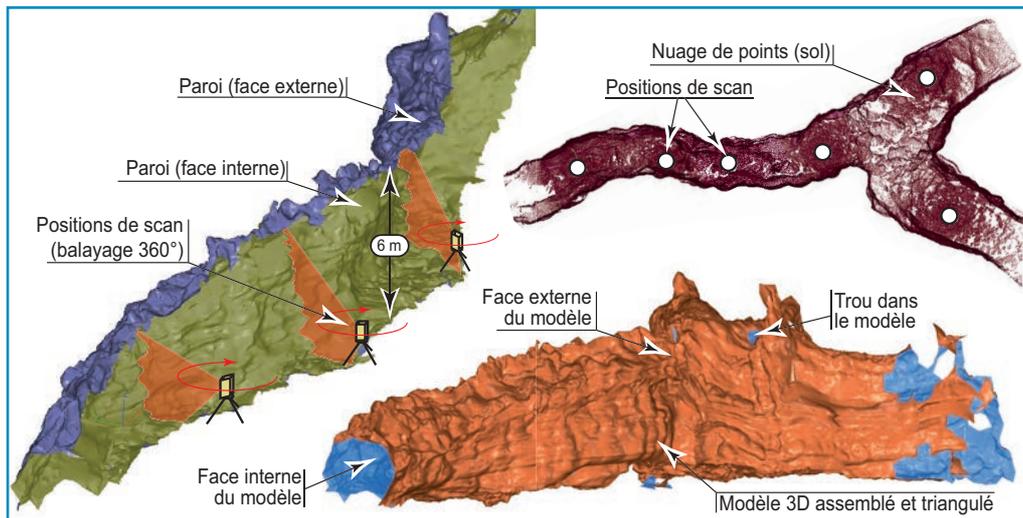




Photo 5 : Mise en œuvre d'un scanner courte portée (au centre, ici un Leica HDS 6000) sur le cône d'entrée de l'aven d'Orgnac (Ardèche, France). La procédure de relevé par balayage laser est complétée par une couverture photographique de l'objet souterrain par ballon captif (en haut à droite). Le géoréférencement est assuré par station totale (à gauche). Cliché S. Jaillet. *Implementation of a short-range scanner (here a Leica HDS 6000) on the underground cone of Orgnac (Ardèche, France). The process is completed by a photographic coverage of the underground object by balloon (top right). Georeferencing is by tachometer (left).* Photo S. Jaillet

points à partir de 22 positions de scans (acquisition Arnaud Lezennec, photo 4) [Blais et al., 1998].

En accompagnement de ces campagnes, les développements informatiques suivent. *3Dipsos* est ainsi développé par la société Mensi dans le cadre de partenariat avec EDF R&D. De même *CloudCompare* développé par EDF R&D et Telecom ParisTech. Peu à peu, au début des années 2000, d'autres matériels, adaptés à la moyenne distance, voient le jour chez Leica (en partenariat avec Zoller+Fröhlich) ou chez Faro. Certains scanners comme le Leica HDS6000 ou 7000 (données traitées sous *Cyclone*) ou aujourd'hui le Faro Focus (données traitées sous *Scene*) sont très employés en grotte et les dix dernières années ont été marquées par une certaine généralisation de l'acquisition numérique tridimensionnelle.

Numérisation, traitement des données

Aujourd'hui, différents scanners du marché autorisent des vitesses d'acquisition pouvant atteindre et dépasser parfois le million de points par seconde⁶. Ainsi, il n'est pas rare désormais qu'un projet de numérisation 3D d'une grotte dépasse plusieurs milliards de points. Les masses de données acquises, si elles participent à une meilleure analyse des formes et des détails, ne sont pas sans

poser des soucis dans les traitements qui suivent (puissance de calculs et de stockage, temps de traitement, capacité des algorithmes d'appariement et de maillage, performance des visualiseurs, etc.). Sur le terrain, la procédure d'acquisition des points sur le terrain reste généralement la même : mise en station de l'appareil, définition des fenêtres de scan, choix du pas angulaire déterminant la densité du nuage de points, multiplication des positions de scan (figure 14). Des objets géométriquement simples, placés dans la scène d'acquisition, permettent un géoréférencement au tachéomètre. Les sphères (pluricentimétriques à pluridécimétriques) sont les plus classiquement utilisées. En effet, la sphère présente l'avantage d'être une forme pure sur laquelle un ajustement mathématique sur un nuage de points donne le même centre quelle que soit la position de scan (photo 5 et photo de couverture). Ces sphères permettent d'assembler les scènes par mise en correspondance de leurs centres. En complément, des méthodes par *best-fit* (appariement direct de portion de deux nuages de points, basée sur une minimisation des distances en 3D) sont parfois utilisées [Besl et al., 1992].

La qualité des mesures est variable selon les conditions du milieu (taux d'humidité de l'air, surface humide, albédo...); cela est réellement problématique à partir

du moment où l'on travaille aux limites de l'appareil (température, distance). La maille du levé n'est pas constante, elle varie linéairement avec l'éloignement du scanner à la scène, et la multiplication des positions de scanners ne rend pas son évaluation stricte possible. L'acquisition terminée, il faut assembler les scènes (on parle de consolidation), nettoyer, et filtrer le nuage de points bruts. Il subsiste fréquemment quelques points aberrants dans la scène liés à des problèmes de réflexion (notamment sur les parois calcifiées pour lesquelles les photons laser subissent des réflexions multiples sous la frontière air-paroi) ou à des effets de bord, « queue de comète⁷ » par exemple, qui sont la marque des points situés en bord d'objet, le spot laser se formant en partie sur ce bord et en partie sur la surface située plus en arrière dans la direction de visée [Hajri et al., 2009; Sadier, 2006 et 2013]. Il est possible d'améliorer la qualité des points (réduction des queues de comète par exemple) en multipliant les tirs lasers et en augmentant la qualité des moyennes. Mais les temps d'acquisition augmentent alors considérablement et c'est toujours un compromis qui est recherché entre acquisition sur le terrain et post-traitement au bureau. Les points aberrants sont la plupart du temps éliminés « à la main ». À ces points aberrants s'ajoutent les points redondants. En effet,

6. Le scanner Soisic de Mensi captait 100 points par seconde.

7. On parle de queue de comète (comet tail en anglais), mais on emploie aussi souvent le terme de « voile de mariée » dans les articles francophones.

la multiplication des positions de scan augmente d'autant le nombre de points et certains secteurs (portion de parois) sont ainsi doublés, triplés ou quadruplés. Un processus de filtrage permet (i) d'éliminer les points redondants (liés à ces recouvrements des scènes de scan), (ii) d'uniformiser la densité du nuage de points par ré-échantillonnage, (iii) de lisser le nuage de points afin de diminuer les rugosités liées au bruit de mesure. Des fonctions de filtrage sont offertes par *Polyworks*, *Realworks* ou *3DReshaper*, des logiciels de retro-ingénierie fréquemment utilisés pour ce type de traitement.

Vers des modèles RTI à haute résolution de l'endokarst

Une fois le nuage validé, la suite de l'opération consiste à mailler le nuage de points pour obtenir un modèle RTI (Réseau Triangulaire Irrégulier, TIN en anglais). Cette opération permet de réduire la quantité de points acquis tout en conservant le même niveau d'information morphologique des objets. Les surfaces planes sont décrites par moins de triangles que les surfaces plus rugueuses. Cela permet également l'accélération des procédures d'affichage et de traitement. Le modèle RTI apporte surtout une information de voisinage à chaque sommet créé. Cette topologie est utile pour la suite des traitements, notamment l'identification des ruptures et discontinuités morphologiques. Il s'agit donc de transformer le nuage de points en une « peau numérique » continue avec création de nouveaux sommets, reliés par des arêtes. Ce faisant, on passe d'une information ponctuelle (le point) à une information surfacique (la peau) augmentant ainsi le potentiel d'information.

Les applications sont nombreuses. Citons-en ici quelques-unes pour montrer la diversité des thématiques abordées par les levés lasergrammétriques en grotte. La salle de la Verna (Pyrénées Atlantiques), le plus grand volume karstique français, a été scannée à une maille de 30 cm pour les besoins d'implantation d'une conduite forcée. Majlis al Jinn, dans le sultanat d'Oman, une des plus grandes salles souterraines du monde, a été scannée pour les besoins d'un projet d'aménagement touristique [Chazaly et al., 2010]. Plusieurs études archéologiques en grotte font dorénavant appel à la modélisation 3D, comme c'est le cas à la grotte Chauvet



Photo 6: Mise en œuvre d'un scanner courte portée (ici un Faro Focus 3D) dans la rivière souterraine de Gournier (Vercors, France). Les conditions de relevé sont ici particulièrement délicates (humidité maximale, batillage de l'eau et tremblement du pied, risque de mise à l'eau). Cliché M. Thomas, Karst 3e. *Implementation of a short-range scanner (here Faro Focus 3D) in underground river (Gournier, Vercors, France). The conditions are particularly difficult here (maximum moisture, water wave action and foot trembling, risk of launching).* Photo M. Thomas, Karst 3e.

(Ardèche) [Delannoy et al., 2010; Sadier, 2013], sur les fouilles préhistoriques du cône d'Orgnac (Ardèche) [Boche et al., 2011], à la grotte Parpalo (Espagne) [Lerma et al., 2010], à la grotte des Fraux [Burens et al., ce volume] ou pour l'art pariétal [González-Aguilera et al., 2009; Fritz et al., 2012; Angas et al., ce volume]. Dans les grottes de Choranche (Vercors), le plafond du lac de Coufin a fait l'objet d'un levé centimétrique avec identification semi-automatique des plans de fracturation [Hajri et al., 2010]. La grotte de Castellana [Caprioli et al., 2003] a fait l'objet d'un levé 3D sur les stalagmites comme la salle 2 d'Orgnac [Hajri et al., 2009] et ses stalagmites translitées. Des travaux 3D ont été menés sur des coups de gouges de parois [Bird et al., 2009] et un levé lidar a été fait dans les grottes de Gomantong à Bornéo pour distinguer les nids de salanganes des chauves-souris elles-mêmes [MacFarlane et al., 2015]. Ces travaux présentent une série de points communs, (i) la volonté de travailler sur la totalité de l'objet analysé et non uniquement sur une de ses parties (notion de complétude), (ii) la possibilité de travailler sur des objets peu accessibles (hauteur, sécurité) et enfin (iii) le choix de déporter le travail sur station informatique pour limiter le temps de présence sur site (conservation, préservation du site, disponibilité des équipes sur le ter-

rain). Nul doute que cette révolution lasergrammétrique n'a pas fini de renouveler les possibilités d'études du milieu souterrain (photo 6) et par là même la compréhension que nous pouvons avoir du karst et de ses conduits.

V. Discussions et conclusions

Depuis plus de deux siècles, la production d'images de grottes n'a fait que croître. L'utilisation du dessin, des maquettes, de la perspective, de la photogrammétrie et plus récemment de la lasergrammétrie procède de cette volonté d'une représentation exacte des mondes souterrains. Ainsi, produire une image et en l'occurrence une image 3D, n'est-ce pas chercher à imiter la caverne ? N'est-ce pas vouloir s'approcher au plus près du réel, notamment quand cette image est acquise à des mailles telles que celles que nous offrent aujourd'hui les lidars terrestres ? Cette augmentation de la résolution des acquisitions souterraines qui semble conduire à une image plus réelle, mieux « imitée », plus proche de la réalité, ne nous conduit-elle pas vers l'œuvre plus encore, comme le disait Albrecht Dürer⁸ ?

Du choix de l'opérateur dans la production 3D

C'est ici un paradoxe qu'il convient de révéler. En effet, on pourrait penser

8. Cf. citation en exergue.

que la production d'images 3D de la grotte est le fruit à la fois d'un travail technique (donc reproductible et indépendant de l'opérateur) et d'un travail plus artistique (lié cette fois à la sensibilité du dessinateur). L'arrivée récente des scanners 3D redéfinit cette distinction dans la mesure où l'habillage est obtenu par la densité très élevée des points sur la paroi et non par le choix d'un opérateur de dessiner ou non tel point. À l'inverse, les procédures d'assemblage par best-fit permettent aujourd'hui d'intervenir sur la consolidation en compléments des assemblages par les centroïdes des sphères et d'améliorer la polygonale. De fait la qualité de l'habillage (le dessin), obtenue par densité, conditionne la qualité de la topométrie et de ses bouclages. Il n'y a donc plus d'un côté une justesse géométrique et de l'autre une qualité de représentation, mais bien une approche globale, complète, où la qualité de la représentation passe par l'augmentation du nombre de points, plus juste en position, plus dense en nombre, plus riche dans le projet d'imitation de la grotte. Cependant, le placement du scanner dans telle ou telle position, le choix des mailles variables en fonction des distances entre appareil et paroi, variable en fonction du projet de représentation, la capacité à rechercher tel ou tel espace de la cavité avec un placement astucieux pour éviter les masques, la tolérance des trous sur des secteurs jugés secondaires, etc. sont autant de choix que l'opérateur a à sa disposition et qui personnalisent son travail.

Acquérir l'image 3D n'est donc pas qu'un acte technique et reproductible. Il s'agit du produit d'un certain nombre de choix certes techniques et méthodologiques, mais conditionnés par la compétence, la culture et la sensibilité de l'opérateur, et qui sur le terrain conduit à un relevé toujours différent. C'est le cas des relevés spéléologiques 3D comme des relevés par lasergrammétrie haute densité. C'est le cas plus encore quand vient l'étape de la production de l'image.

Une image construite de la caverne

Le traitement des données conduit à la production des images 3D. La visualisation 3D impose toujours deux angles de vues pour être réellement perçue. Ce peut être deux yeux (vision stéréographique qui constitue notre

quotidien) ou bien une vision animée, c'est-à-dire la visualisation d'un modèle en mouvement à l'écran. Il s'agit ici plus largement d'une perception visuelle de la troisième dimension. C'est l'opérateur qui dans la manipulation du modèle à l'écran, produit pour lui-même, ou pour d'autres, les différents angles de vue et contrôle ainsi la production de l'image 3D⁹. Pour autant, la perception 3D passe aussi par d'autres codes, ceux de la motricité, du mouvement, du déplacement dynamique. Une personne qui se déplace dans un espace construit une image 3D de cet espace par intégration visuo-motrice, et se donne une représentation « externalisée » de cet espace sans pourtant jamais placer son œil dans cette position externalisée. La construction mentale d'une représentation géocentrique est le produit de cette action de mouvement et de déplacement [Berthoz, 1997]. Mais dans ce cas aussi, la production de l'image 3D vient d'une double compétence : (i) celle de produire la visualisation (dessin, modèle 3D ou conceptualisation intellectuelle) et (ii) celle d'envisager un angle de vue, une position choisie. Cela montre bien qu'une image de la grotte ne peut être qu'une image construite pour soi-même ou pour d'autres et non produite *ex nihilo*.

Dans le cas des modèles 3D denses, on est en présence d'objets graphiques qu'un ordinateur permet de manipuler sous une grande variété de points de vue. L'opérateur qui manipule le modèle, et choisit tel angle pour illustrer un propos, produit une image nouvelle et originale, marquée donc par des choix (position, éclairage, focale, etc.) similaires à ceux opérés lors d'une prise de vue photographique (figure 15). Il y a là, ici encore, un paradoxe intéressant à relever : d'un côté, on note un projet de modélisation totale de la cavité, le désir (et la réussite probablement) d'atteindre une certaine complétude dans la connaissance de la grotte, c'est-à-dire de produire un « clone numérique », une copie conforme, qui autoriserait une représentation parfaite et non subjective du réel ; de l'autre, les opérateurs qui se saisissent du modèle 3D produisent, pour eux-mêmes ou pour d'autres, des images fixes ou animées qui correspondent à leur choix, leur vision, leurs propres désirs de représentation. Comme pour la photographie qui reste un acte technique et artistique, la production d'images 3D suppose une compétence technique et le fait d'assumer un certain nombre de choix (des choix de mise en scène, d'éclairages simples ou multiples,

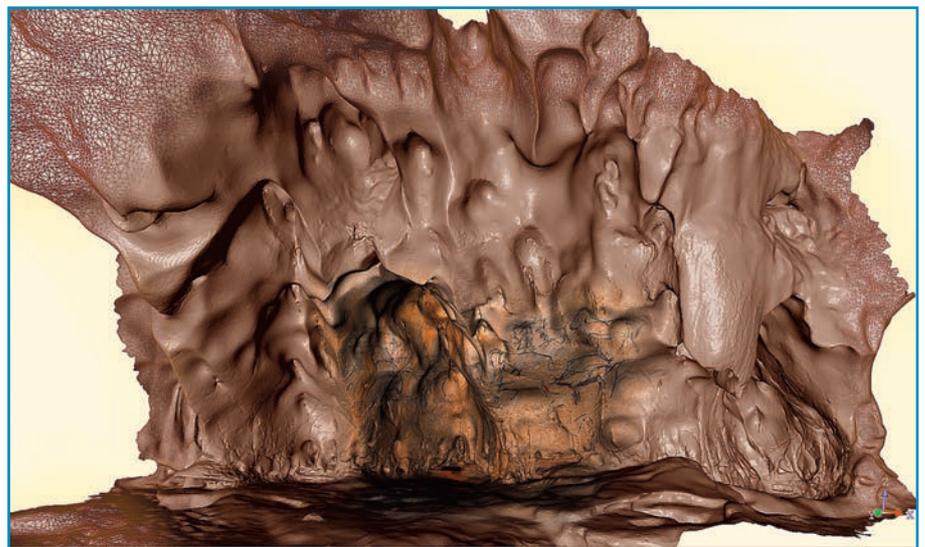


Figure 15: Extrait du modèle 3D de la grotte Chauvet (Ardèche). Ici une image infographique, produit de l'assemblage de plusieurs scènes de balayage laser à différentes résolutions et complétée par le drapage d'images sans ombre. Sur cette vue, on note sur les bordures le maillage RTI filaire (Réseau de Triangles Irréguliers) en rouge, puis en se rapprochant du centre, le maillage en mode plat avec deux types de résolutions scanners (contact bien visible sur le pendent à droite). Au centre, le drapage d'une image, elle-même composée de plusieurs photographies, permet la production du maillage final texturé. Levés scanners, Perazio Engineering, images drapées L. Guichard. Vue S. Jaillet et B. Sadier. *Part of the Chauvet cave 3D model (Ardèche). Here is a computer graphics image, product by the assembly of several laser scanning at different resolutions. The model is completed by matching of images without shade. In this view there is, on the edges, the wired TIN mesh in red, and then towards the center, the flat model with two types of scanners resolutions (the contact is visible on it at right). In the center, the matching of an image, itself composed of several photos, allows the production of textured final mesh. Surveys scanners, Perazio Engineering, images L. Guichard. View S. Jaillet and B. Sadier.*

9. Souvent sur des logiciels de type 3DSmax ou Blender.

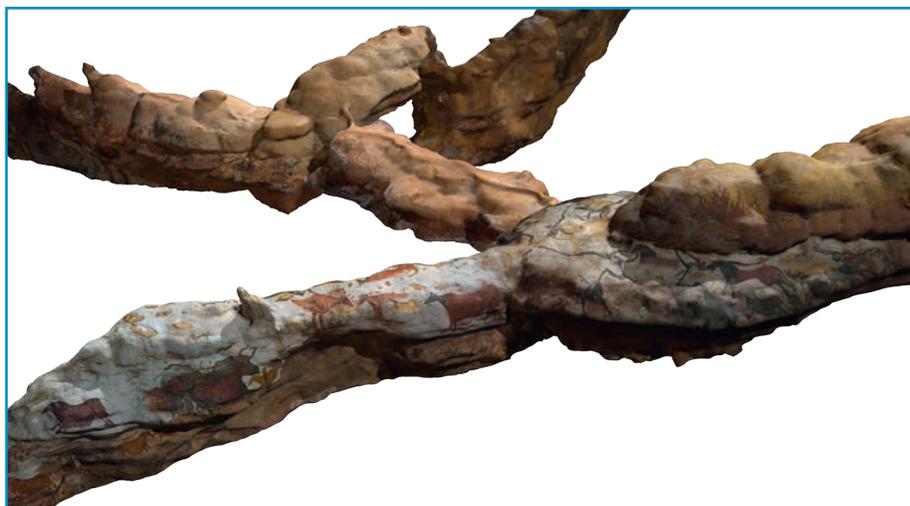


Figure 16: Une vue externalisée du modèle 3D de Lascaux. Cette vue impossible (position externalisée, œuvres pariétales reproduites sur l'enveloppe externe) offre à l'auteur ou au spectateur la possibilité d'une visualisation qui ne peut être que construite par et pour l'homme. Pour autant, n'est-il pas là le « regard de dieu » ? Cliché Perazio Engineering. *External view of the Lascaux 3D model. This impossible view (outsourced position, parietal works reproduced on the external envelope) offers to the author or the viewer the possibility of visualization that can only be built by and for man. However, isn't it here the "vision of god"?* Photo Perazio Engineering.

de température de lumière, d'optiques, etc.). Ainsi, l'ouverture sur une station de travail informatique de l'ensemble du modèle 3D, la connaissance des logiciels dédiés à ce type de travail, la maîtrise de ces choix restent une affaire de spécialistes tant les ressources informatiques et les compétences techniques sont sollicitées. La visualisation réelle du modèle 3D est donc, dans les faits, encore réservée à ceux qui sont capables de manipuler ce type de données, qui disposent des compétences et des ressources pour le faire. Les autres, spectateurs passifs, se contentent de ce que les premiers leur livrent : des productions imagées (images fixes ou images animées). Hier, le sachant (expert topographique) proposait une image de la grotte (figures 1 et 5) que seuls quelques spéléologues pouvaient saisir et comprendre. Aujourd'hui, le sachant (expert 3D) produit une image 3D du monde souterrain qui touche un public plus large¹⁰. On pourrait voir dans cette irruption de la 3D, une certaine démocratisation de l'image topographique des grottes. Mais il y a là encore, un paradoxe intéressant à relever, celui d'une plus grande démocratisation de l'image topographique souterraine, associée à une réduction des personnes qui réalisent

et donc contrôlent la production imagée et le discours qui peut s'y rattacher (figure 15). Il y a ici un décalage entre sachant et spectateur, décalage conscient ou inconscient, accepté ou subi, mais un décalage qui ne fait finalement que s'accroître.

Une meilleure représentation pour « voir » un objet par nature non visible

Pourtant, la représentation 3D des grottes reste un projet de visualisation et donc de partage¹¹. « *Les cartes (...) offrent à l'œil humain ce que nul ne pourra jamais offrir de visu* » [Hofman, 2012] ; et c'est encore plus vrai pour les mondes souterrains dont la visibilité tient à cette production imagée. Alors qu'une montagne, un fleuve, voire même la terre entière, peuvent être saisis par une photographie ou un regard, pour peu que l'œil soit bien placé, la grotte elle, impose une représentation verbale ou imagée pour prendre corps, pour exister. Elle revêt donc un caractère spécifique d'invisibilité ou plutôt de visibilité socialement ciblée. Seuls certains visitent la grotte et les mondes souterrains. Les autres, on l'a vu, se contentent de ce que les premiers leur en disent ou leur en montrent (des

topographies, des photographies, des discours, des modèles, donc des images). C'est à ce titre un statut qu'elle partage avec les grands fonds marins ou l'espace sidéral qu'effectivement seuls quelques initiés peuvent parcourir et voir. La topographie souterraine, véritable production graphique ou projet de représentation de la grotte, revêt donc d'emblée un enjeu d'existence, au sens de crédibilisation, de véracité. La topographie et l'image donnent « corps » à la grotte. Si l'on ajoute à cette particularité le rôle majeur de l'expert, précédemment évoqué, on comprend de fait combien proposer une image 3D du monde souterrain peut être complexe, varié et empreint de choix.

Lorsque ce regard est externalisé, lorsque les vues produites sont des vues impossibles (« l'œil dans le calcaire »), lorsque le drapage de la paroi, par exemple des œuvres pariétales, est fait sur la face externe du modèle, il y a bien construction d'une œuvre qui vise à générer un regard alternatif par rapport à la perception naturelle de la grotte (figure 16). Ce type de regard, ce type de représentation, cette construction, n'est-ce pas une façon de tenter d'approcher ce que d'aucuns appellent le « regard de Dieu »¹².

Conclusion

Le mythe d'une représentation totale et définitive des mondes souterrains

À travers cette brève histoire de l'image 3D des grottes, depuis les maquettes jusqu'aux derniers clones numériques, le projet procède donc toujours d'une même volonté, celui d'une certaine justesse, mais génère, on l'aura compris, une grande diversité de productions¹³. Représenter l'espace souterrain, c'est d'abord produire un document correct géométriquement et satisfaisant pour le regard, c'est-à-dire conforme à l'image « attendue » de la caverne. Mais cette image attendue n'est pas forcément celle uniquement d'une justesse mathématique. L'objectif est bien de passer de la « nature » (la grotte est ici la nature) à une « image de la nature »

10. On verra à ce sujet le film « Sanctum » (2011, Alister Grierson) qui montre une visualisation 3D animée d'un gouffre ou le film « La grotte des rêves perdus » (2010, Werner Herzog) qui montre le même type de visualisation animée du nuage de points de la grotte Chauvet.

11. On lira avec intérêt l'ouvrage réalisé sur la grotte Chauvet à partir d'images 3D (Lima, 2014).

12. L'expression s'entend ici au sens « regard d'en haut », « regard total » ou « regard absolu », pas forcément au sens de l'évangile selon Saint Jean (regard miséricordieux).

13. Cette diversité de production iconographique sur les grottes peut être appréciée par la richesse de l'épaisseur topographique que certaines grottes ont pu accumuler. C'est le cas de Rouffignac (Gauchon et al., 2013), d'Orgnac (Gauchon et al., 2012) ou de Chauvet (Jaillet et al., à paraître).

puis à la « nature de la grotte », dans une perspective strictement naturaliste. C'est donc bien la nature de la grotte qu'il faut représenter et produire ainsi une image qui donne sens à la grotte. Ce sens donné à la grotte est à la fois celui d'une certaine justesse mathématique, on l'a dit, mais aussi d'une justesse de l'image dessinée ou produite par infographie. Là encore, le constat soulève le paradoxe d'un beau dessin qui fait consensus et n'est pas remis en cause même si le bouclage topographique est mauvais. Or l'approche 3D et ses images produisent une iconographie spectaculaire qui annihile de fait la critique sur la justesse.

On retrouve ici l'importance d'une image fautive (la vue en perspective ou en 3D qui, comme une photographie, ne respectent pas les angles), mais est satisfaisante pour l'esprit *a contrario* d'une image juste (un plan de géomètre correctement coté) mais difficilement intelligible. Ce paradoxe du vrai illisible, du faux lisible et finalement celui d'une image qui supplante le réel, nous renvoie aux idées de Baudrillard [1985] sur l'hyperréalité et la place de l'image et du faux dans nos sociétés.

Aller de la vue cavalière du site de Skocjan vers 1750 (figure 1) jusqu'à l'image 3D drapée de Lascaux (figure 16), c'est effectuer un parcours de deux cent cinquante années de représentation externalisée des grottes et du karst. Produire l'image 3D de la grotte, c'est en somme construire une représentation du monde souterrain, projeter ses propres images et toucher au cœur des relations qui nous unissent aux cavernes. Au final, donner une représentation à la fois juste et per-



Photo 7 : Une mise en abyme de l'image 3D en grotte, celle du modèle 3D total, un clone numérique (numérisation par lasergrammétrie, maillage, texturage colorimétrique) généré sur une imprimante 3D et emporté dans la cavité. Cliché S. Jaillet. A "mise en abyme" of the 3D image in cave. Here the 3D complete model, a digital clone (by laser scanning, mesh, color texturing) generated on a 3D printer, and carried into the cavity. Photo S. Jaillet.

sonnalisées de ces grottes, n'est-ce pas chercher à contrôler en partie ce monde qui nous fascine (photo 7) ?

Remerciements

Ce travail est le fruit de nombreuses discussions, mais nous tenons à remercier tout particulièrement Christophe Gauchon (Edytem, Université de Savoie) pour ses éclairages sur les topographies anciennes, en particulier au cours des XVIII^e et XIX^e siècles, Guillaume Thibault (EDF R&D) pour ses informations sur les premières expériences de relevés scanner en grotte, notamment à Cosquer, Fabien Hobléa (Edytem, Université de Savoie), pour les informations sur la Balme à

Collomb et Christine Maury (Edytem, CNRS) pour son aide précieuse dans la recherche bibliographique.

Liste des logiciels cités :

123Dcatch, 3Dipsos, 3DReshaper, 3DSmax, Arc3D, Auriga, Autocad, Blender, CaSuDaAn, Cave3D, CaveRender, CloudCompare, Compass, CyberTopo, Cyclone, DPTopo, DStrecht, Geo3D, GHTopo, IGN MicMac, ImageJ, MeshLab, PhotoModeler Scanner, Photoscan, PMVS, PocketTopo, Polyworks, Realworks, Scene, Survex, Thérion, Topo Calc'R, TopoDroid, TopoDroid 3D sketching, Toporobot, Tunnel, TurboTopo, Visual SFM, Visual Topo, Walls, Winkarst.

Bibliographie

ANDRÉ D. et DUTHU H. (dir.), 1999 - *L'homme qui voyageait pour les gouffres*. Actes du colloque de Mende. Archives départementales de la Lozère, 421 p.
ANGÁS J., LE GUILLOU Y. ET MAUDUIT E., 2014 - Vers une normalisation de la documentation 3D de parois ornées : les grottes de Niaux (Ariège) et de Roucadour (Lot), *Karstologia* n°63, p. 21-34.
ATKINSON K.-B., 1968 - The recording of some prehistoric carvings at Stonehenge. *Photogrammetric Record*, 6, pp. 24-31.
AUJOULAT N., 1987 - *Le relevé des œuvres pariétales paléolithiques. Enregistrement et traitement des données*. Document d'Archéologie Française n°9, Ed. Maison des Sciences de l'Homme, Paris, 122 p.
AUJOULAT N., PERAZIO G., FAVERGE D. et PERAL F., 2005 - Contribution de la saisie tridimensionnelle à l'étude de l'art pariétal et de son contexte physique. *Recherches pluridisciplinaires dans la grotte Chauvet*. Journées SPF, Lyon, 11-12 octobre 2003. Société Préhistorique Française, Travaux 6, *Karstologia mémoires* n°11, pp. 189-197.

BAUDRILLARD J., 1985 - *Simulacres et simulations*, Ed. Galilée, 285 p.
BERTHOZ A., 1997 - *Le sens du mouvement*. Ed. Odile Jacob, 345 p.
BESL P.J. & MCKAY N.D., 1992 - A method for registration of 3D shapes. *IEEE transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14, 2, pp. 239-256.
BIRD A.-J., SPRINGER G.-S., BOSCH R.-F. and CURL R.-L., 2009. Effects of surface morphologies on flow behavior in karst conduits. *15th International Congress of Speleology*, pp. 1417-1421.
BLAIS J.-P., CHINAL M., DELLA FAILLE E., LE BOMIN G., LEZENNEC A., MICHAUX M. et PHILIPPE M., 1998 - *La Balme à Collomb, Entremont-le-Vieux (Savoie). Rapport sur l'opération de mécénat technologique et scientifique d'EDF réalisée du 5 au 16 septembre 1998*. site n°71-107-002AP, 94 p. + planches photographiques.
BOCHE E., GAMBERI A. DE C. L., JAILLET S. et SADIÉ B., 2011 - Enregistrement et modélisation 3D de la fouille archéologique et paléontologique du

cône d'entrée d'Orgnac (Ardèche, France), in *Images et modèles 3D en milieu naturel*. Coll. Edytem n°12, pp. 131-136.
BORCHERS P.-B., 1968 - *Stereophotogrammetric recording and interpretation of works of Art and Architecture*. Research Report. Ohio State University Engineering Experiment Station.
BRETZ J.-H., 1942 - Vadose and phreatic features of limestone caverns. *The Journal of Geology*, vol L, n° 6, part II, pp. 675-811.
BUDAJ M. and MUDRÁK S., 2008 - Therion: Digital Cave Maps. *4th European Speleological Congress*, 6p, (<http://therion.speleo.sk/download.php>).
CAPRIOLI M., MINCHILLI M., SCOGNAMIGLIO A. and STRISCIUGLIO G., 2003 - Using photogrammetry and laser scanning in surveying monumental heritage: le grotte di Castellana. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIV, Part 5/W12.
CHABREDIER L., 1966 - Etude méthodologique des relevés d'art pariétal préhistorique. *Bull. de la Soc. Prehis. Fr.* t. 63, pp. 501-512.

- CHAILLOUX D., 1994** - Grottes et gouffres en relief. Les Devenirs Visuels, 30 p.
- CHAZALY B., SAILLANT M. et VARREL E., 2010** - La lasergrammétrie, un nouvel outil pour cartographier les cavités. Actes du colloque AFK - Pierre-St.-Martin 2007, *Karstologia Mémoires*, 17, 93-101.
- CHEVALIER A., 2004** - *Guide du dessinateur industriel*, Hachette, 336 p.
- CHEVALIER P., 1944a** - Problèmes et hypothèses d'hydrologie souterraine. *Les Études rhodaniennes*. Vol. 19 n°3-4, 1944. pp. 228-234.
- CHEVALIER P., 1944b** - Distinction morphologique entre deux types d'érosion souterraine. *Revue de Géographie Alpine*, t XXXII, fasc. 3, pp. 475-492.
- CLOUTEN N., 1974** - The application of Photogrammetry to Recording rock art, *Australian Institute of Agorininal Studies, Newsletter 1*, pp. 33-39.
- CLOUTEN N., 1977** - The Photogrammetric recording of Australian aboriginal rock art. *Search 7*, pp. 276-277.
- DELANNOY J.-J., SADIÉ B., JAILLET S., PLOYON E. et GENESTE J.-M., 2010** - Reconstitution de l'entrée préhistorique de la grotte Chauvet-Pont d'Arc (Ardèche, France): les apports de l'analyse géomorphologique et de la modélisation 3D. *Karstologia* n° 56, p.17-34.
- EGELS Y., 2011** - La photogrammétrie, principes généraux et terminologies, in *Images et modèles 3D en milieu naturel*. Coll. Edytem n°12, pp. 41-50.
- FABRE G. et AUDETAT M., 1978** - *Signes spéléologiques conventionnels*. UIS / AFK.
- FAUCHER M. & MAUTREF A., 1991** - *Spéléographie*. 334 p.
- FILIPPONI M. & DICKERT A., 2007** - Verstehen der Speläogenese durch 3D-Analyse - Fallbeispiel des Lachenstock-Karstes. 12. Nat. Cong. of Speleology, Switzerland, 46-55.
- FILIPPONI M. and JEANNIN P.-Y., 2008** - What makes a bedding plane favourable to karstification? - The role of the primary rock permeability. Actes Congrès Vercors 2008, *Spelunca Mémoires* n°33, version complète dans *Spéléoscope* n°32/33, décembre 2008, pp. 22-27.
- FLOCON A. & TATON R., 1963** - *La Perspective*, P.U.F., coll. « Que sais-je ? » n° 1050, 128 p. Dernière édition: 2005.
- FOUCAULT A., RAOULT J.-F., CECCA F. et PLATEVOET B., 2014** - *Dictionnaire de Géologie*. Hors collection, Dunod, 416 pages.
- FRITZ C., TOSELLO G., AZÉMA M., MOREAU O., PERAZIO G. et PÉRAL J., 2012** - Restauration virtuelle de l'art pariétal paléolithique: le cas de la grotte de Marsoulas. *In Situ*, 13, mis en ligne le 16 avril 2012, consulté le 15 octobre 2013. URL: <http://insitu.revues.org/6774>; DOI:10.4000/insitu.6774.
- GARNIER J.-J., 2008** - *Grotte de la Loire (1896 - 1996) un siècle d'explorations, l'aventure continue*. 2^e éd. complétée, 512 p.
- GAUCHON C., 1997** - Des cavernes et des hommes, Géographie souterraine des montagnes françaises, *Karstologia Mémoires*, 7, 248 p.
- GAUCHON C., JAILLET S. et PRUD'HOMME F., 2012** - Dynamique de la construction topographique et toponymique à l'aven d'Orgnac, in *Karsts, paysages et préhistoire*, Coll. Edytem, n° 13, 157-176.
- GAUCHON C., BOCHE E. et JAILLET S., 2013** - A masterpiece of historic cave surveying: several representations of Miremont-Rouffignac cave (Dordogne, France, XVIII-XIXth centuries). Actes *UIS Congress Brno*, History of Speleology and Karst Research, pp. 47-50.
- GONZÁLEZ-AGUILERA D., MUÑOZ-NIETO A., GÓMEZ-LAHOZ J., HERRERO-PASCUAL J. & GUTIÉRREZ-ALONSO G., 2009** - 3D digital surveying and modelling of cave geometry: Application to paleolithic rock art. *Sensors*, 9(1), 1108-1127. doi:10.3390/s90201108
- GROSSENBACHER Y., 1992** - *Höhlenvermessung*. SGH-Kurs Nr. 4.
- GRUSNEMEYER P. & LANDES T., 2011** - Lasergrammétrie terrestre. In *Images et Modèles 3D en milieux Naturels*, coll. Edytem n°12, 11-28.
- HAJRI S., SADIÉ B., JAILLET S., PLOYON E., BOCHE E., CHAKROUN A., SAULNIER G.-M. et DELANNOY J.-J., 2009** - Analyse spatiale et morphologique d'une forêt de stalagmites par modélisation 3D dans le réseau d'Orgnac (Ardèche, France). *Karstologia*, n°53, p. 1-14.
- HAJRI S., JAILLET S., PERRETTE Y., DELANNOY J.-J. et VILLEMEN T., 2010** - Extraction automatique de la discontinuité plane à partir d'une scannerisation laser 3D en milieu rocheux. Actes colloque «Techniques Laser pour l'Etude des environnements naturels et urbains», *Revue SFPT*, 192, 38-43.
- HARMAN J., 2005** - Using decorrelation Stretch to enhance rock art images. *American Rock Art Research Association Annual Meeting*, Reno, mise à jour 2008, en ligne: www.dstretch.com/AlgorithmDescription.html
- HARMAN J., 2015** - Using DStretch for Rock Art Recording. *INORA, Int. Newsletter on Rock art* n° 72, pp. 24 - 30.
- HÄUSELMANN P., 2002** - UIS Cave symbols: the definitive list. *Acta Carsologica* 31 (3), 165-178.
- HÄUSELMANN P., 2011** - UIS Mapping Grades. *Int. Journal of Speleology*, 40 (2): IV-VI.
- HELLER M., 1983** - Toporobot, Höhlenkartographie mit Hilfe des Computers. *Stalactite*, 33 (1), 9-27.
- HELLER M., 1994** - Toporobot, Logiciel d'aide à la topographie. XX^e Congrès Fédération Française de Spéléologie (1992), Saint Gaudens, *Spelunca Mémoires* 21, pp. 75-81.
- HÉRILLON C. ET JAILLET S., 1997** - SATURNE. Vers une nouvelle représentation de l'endokarst. Actes de la 7^e rencontre d'octobre, pp. 58-63.
- HOFMANN C. (dir.), 2012** - *Artistes de la carte. De la Renaissance au XXI^e siècle*. Editons Autrement, 223 p.
- HUBER S., 1999** - Geo3D: Interaktive 3-D-Visualisierung. *Geoprocessing Series*, vol. 36, Dept. of Geography, University of Zurich, 2000, 67 p. en ligne: <http://www.topoi.ch/pa/Geo3D.pdf>
- Institut Géographique National, 1967** - Photogrammétrie architecturale, application des méthodes photogrammétriques au relevé des monuments. IGN, Paris, 33 p.
- JAILLET S., SADIÉ B., DELANNOY J.-J. & PLOYON E., 2010** - Identification de morphologies pariétales en grotte à partir d'un lever laser 3D. Application aux salles rouges de l'Aven d'Orgnac (Ardèche, France). Actes colloque «Techniques Laser pour l'Etude des environnements naturels et urbains», *Revue SFPT*, 191, pp. 3-8.
- JAILLET S., SADIÉ B., HAJRI S., PLOYON E. et DELANNOY J.-J., 2011** - Une analyse 3D de l'endokarst: applications lasergrammétiques sur l'aven d'Orgnac (Ardèche, France). *Géomorphologie: Relief. Processus. Environnement*, 4, p.379-394.
- JAILLET S., SADIÉ B., ARNAUD J., AZÉMA M., BOCHE E., CAILHOL D., FILIPPONI M., LE ROUX P. et VARREL E., 2011** - Topographie, représentation et analyse morphologique 3D de drains, de conduits et de parois du Karst. *Images et modèles 3D en milieux naturels*, Coll. Edytem n°12, 119-130.
- JAILLET S., SADIÉ B. and DELANNOY J.-J., 2013** - 3D researches on conduits and karsts networks. *8th International Conference (IAG) on Geomorphology*, France. Session 59B, pp. 333.
- JAILLET S. et MAURY C., 2014** - 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, sous presse.
- JAILLET S. et al., à paraître** - Une image topographique de la grotte Chauvet. *Monographie de la grotte Chauvet*. Documents d'Archéologie française, sous presse.
- JAVARY A., 1881** - *Traité de géométrie descriptive*, 307p. -<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k28506r>
- KASSER M. & EGELS Y., 2001** - *Photogrammétrie numérique*, Hermès-sciences, 2001, 379 p.
- LAURITZEN S.-E. & LUNDBERG J., 2000** - Solutional and erosional morphology. *Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers*, chap. 6.1, pp. 408-426.
- LEMOZI A., 1929** - *La grotte temple du Pech-Merle: un nouveau sanctuaire préhistorique*. Picard Paris, 124 p.
- LERMA J.L., NAVARRO S., CABRELLES M. and VILLAVEDE V., 2010** - Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science*, 37, 499-507.
- LE ROUX P., 1984** - Système Goule / Event de Foussoubie. Historique résumé de son exploration. *SERAHV* n°18, pp. 12 à 20, carte HT.
- LIMA P., 2012** - *Les métamorphoses de Lascaux. L'atelier des artistes, de la Préhistoire à nos jours*. Ed. Synops, 156 p.
- LIMA P., 2014** - *Chauvet-Pont d'Arc, le premier chef-d'œuvre de l'humanité révélé par la 3D*. Ed. Synops, 208 p.
- LISMONDE B., 1991** - *Le trou qui souffle*. Comité Dép. de Spéléologie Isère, 148 p.
- LISMONDE B., 1997** - *La Dent de Crolles et son réseau souterrain*. Comité Dép. de Spéléologie Isère, 304 p.
- LORBLANCHET M., 1982** - Les dessins noirs du Pech-Merle. *Congrès préhistorique de France*, XXI^e session, Montauban-Cahors, Soc. Préhist. Française, t.1, pp. 178-207.
- LORBLANCHET M., 2010** - *Art Pariétal, grottes ornées du Quercy*. Editions du Rouergue, 448 p.
- MC FARLANE D.A., ROBERTS W., BUCHROITHNER M., VAN RENTERGEM G., JOYCE LUNDBERG J. and HAUTZ S., 2015** - Terrestrial LiDAR-based automated counting of swiftlet nests in the caves of Gomantong, Sabah, Borneo. *International Journal of Speleology*, 44 (2), 191-195.
- MARTINEAU F., 2003** - Approche géologique de la karstification: état d'avancement des travaux sur la Dent de Crolles. Actes de la 13^e rencontre d'Octobre, St. Christophe la Grotte, pp. 87-93.
- MARTEL E.-A., 1905** - Spéléologie au XX^e siècle. *Spelunca*, p.568-570.
- MAUMONT M., 2010** - L'espace 3D: de la photogrammétrie à la lasergrammétrie. *In Situ*, 13 | 2010, mis en ligne le 03 août 2010, consulté le 08 avril 2014. URL: <http://insitu.revues.org/6413>; DOI: 10.4000/insitu.6413
- 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., 1907** - *Catalogue sommaire de la collection de géologie expérimentale du Muséum d'Histoire Naturelle*. Paris, Les fils d'Emile Deyrolle, 176 p.
- MONNEY J. (dir.), 2014** - *Projet datations grottes ornées. Rapport d'activité triennal (2012-2014)* (7^e volet) Grotte aux Points (Aigüeze), 193 p.
- MÜLLER R., 1980** - Symbole für Höhlenpläne. *Beiträge zur Höhlen- und Karstkunde in Südwestdeutschland*, 22, 1980.
- PIERROT-DESEILLIGNY M. et CLERY I., 2011** - Evolutions récentes en photogrammétrie et modélisation 3D par photo des milieux naturels. *Images et modèles 3D en milieux naturels*, Coll. Edytem n°12, pp. 51-66.
- RENAULT P., 1970** - La formation des cavernes. Que sais-je ? n°1400, 127 p.
- RIVETT L., 1977** - Photogrammetry, ist potential applications to problems in australian archeology. *Colloque sur la conservation de l'art rupestre*. Institute for the conservation of Cultural Material, September 1977, Perth, Australia.
- SADIÉ B., JAILLET S. et PERRETTE Y., 2006** - La topographie 3D haute résolution: un outil pour l'étude des structures karstiques. *8th conference on limestone hydrology*, 235-236.
- SADIÉ B., 2013** - *3D et géomorphologie karstique: La grotte Chauvet et les cavités des Gorges de l'Ardèche*. Thèse Géogr. Univ. Savoie, 482 p.
- SERGEANT A., 1978** - Le flash annulaire. *Travaux et recherches. Bull. Fed. Tarn. Spél. Archéol*, 15, pp. 39-37.
- SHAW T.-R., 1992** - *History of cave science. The exploration and study of limestones caves, to 1900*. The Sydney Speleological Society, second edition, 338 p.
- SHAW T., CUK A. and MACQUEEN J., 2010** - *Aspects of the history of Slovene Karst. 1545-2008*. 306 p.
- TATON R., 1960** - *Topographie souterraine*. Eyrolles, 128 p.
- TARRISSE A., 1998** - Utilisation de la photo-section pour l'estimation du stockage d'eau en conduit karstique. Actes de la 8^e rencontre d'Octobre, Avignon, pp. 80-83.
- THIBAUT G., 2001** - Modélisation 3D de la grotte Cosquer par relevé laser. *INORA, Int. Newsletter on Rock art* n° 28, pp. 25-29.