



## L'image topographique du karst et des grottes : représentations 2D et technologies 3D, entre réalité et imaginaire

*Karst and cave topographic images: 2D representations and 3D technologies,  
between reality and imagination*

**Stéphane Jaillet, Jean-Jacques Delannoy, Kim Génuite, Fabien Hobléa et  
Julien Monney**

---



### Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/geomorphologie/13488>  
DOI : 10.4000/geomorphologie.13488  
ISSN : 1957-777X

### Éditeur

Groupe français de géomorphologie

### Édition imprimée

Date de publication : 31 décembre 2019  
Pagination : 191-205  
ISBN : 978-2-913282-85-8  
ISSN : 1266-5304

Ce document vous est offert par Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne



### Référence électronique

Stéphane Jaillet, Jean-Jacques Delannoy, Kim Génuite, Fabien Hobléa et Julien Monney, « L'image topographique du karst et des grottes : représentations 2D et technologies 3D, entre réalité et imaginaire », *Géomorphologie : relief, processus, environnement* [En ligne], vol. 25 - n° 3 | 2019, mis en ligne le 09 décembre 2019, consulté le 16 juin 2023. URL : <http://journals.openedition.org/geomorphologie/13488> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.13488>

---



## L'image topographique du karst et des grottes : représentations 2D et technologies 3D, entre réalité et imaginaire

### *Karst and cave topographic images: 2D representations and 3D technologies, between reality and imagination*

Stéphane Jaillet <sup>a\*</sup>, Jean-Jacques Delannoy <sup>a,b</sup>, Kim Génuite <sup>a</sup>, Fabien Hobléa <sup>a</sup>, Julien Monney <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire Edytem, Université Savoie Mont-Blanc – pôle Montagne, 73376 le Bourget-du-Lac, France.

<sup>b</sup> Centre of Excellence for Australian Biodiversity and Heritage – Institut universitaire de France.

#### RÉSUMÉ

Si la plupart des reliefs externes peuvent être saisis, d'un « seul » coup d'œil, pour peu que l'on se place au bon endroit, une grotte au contraire ne peut jamais être vue dans sa totalité. Parcourue et mesurée, la grotte – et par extension l'endokarst – ne peut être perçue que par bribes qui, une fois assemblées, construisent une représentation factuelle : une topographie, une carte ou une image. Toute représentation d'une grotte est ainsi une image construite depuis un parcours nécessairement souterrain, donc intérieur. Les premières représentations des milieux souterrains mêlent vues cavalières et écorchés puis, à partir du XIX<sup>e</sup> siècle, des principes de plus en plus normalisés ont conduit à l'établissement de plans, de coupes et de sections. Au cours du XX<sup>e</sup> siècle, des essais ont permis de rendre compte de la complexité du karst (maquettes 3D, perspectives). Les topographies (coupe, carte morphogénique, etc.) restent, quant à elles, très codifiées pour analyser l'emboîtement des morphologies et des processus souterrains. À la fin du XX<sup>e</sup> siècle, l'arrivée des technologies 3D (topographie spéléologique numérique, lasergrammétrie, photogrammétrie) a permis la production de nouvelles images, parfois véritables clones numériques des grottes. Ces images souvent spectaculaires, ne sont pas codifiées. Pour autant, elles fascinent en ce sens qu'elles offrent des représentations de la réalité, empruntant dans leur construction aux technologies de la réalité virtuelle et de l'animation 3D. Très techniques, ces représentations sont paradoxalement le support de nouveaux imaginaires qui vont parfois bien au-delà des limites posées par les concepteurs de ces images. Finalement, les observateurs du karst et des grottes n'ont cessé de produire des images qui mettent en scène un paysage, sont le support de discours et qui, toujours et encore, fascinent.

**Mots clés :** karst, grottes, topographie souterraine, images 3D, lasergrammétrie.

#### ABSTRACT

Contrary to external topography, which can be considered through a single and well-positioned viewpoint, a cave can never be viewed entirely. We can walk inside, we can measure it, but the inner characteristics of the endokarst can be only partially perceived and described. The sum of those perceptions is used to build topographies, maps and images. Every cave representation is thus a construction that is partially derived from our inner perception of the endokarstic system. The first cave representations were a blend of informal and cutaway views. Classical cross-sections and planar representations appeared in the 19<sup>th</sup> century. Then, standardization of subterranean topographic representation led to cross-sections and plan-based visualizations. During the 20<sup>th</sup> century, some attempts were made to represent karst complexity (3D scaled models and perspective views), but topographies remained codified in order to analyze morphologies and subterranean processes. At the end of the 20<sup>th</sup> century, the 3D technologies boom (speleological topography, lasergrammetry, photogrammetry) led to new images being made, which are sometimes considered as digital clones of the caves. These spectacular representations are not codified, but they still fascinate people by offering a feeling of reality with the use of virtual reality technologies and 3D animation. Such highly technical representations paradoxically inspire new ways of imagining, which often go beyond the limits set by the image maker. In the end, karst and caves never cease to produce images offering new insights into the understanding of their landscape. While those images act as support for scientific explanations and explorations, they at the same time fascinate and stir up the imagination.

**Keywords:** karst, caves, subterranean topography, 3D image, lasergrammetry.

#### INFORMATION SUR L'ARTICLE

Article soumis le 29 juillet 2019.

Reçu sous sa forme révisée le 5 novembre 2019.

Définitivement accepté le 13 novembre 2019.

\*Auteur correspondant. Tél : +33 (0)4 79 75 86 73  
Courriels :

[stephane.jaillet@univ-smb.fr](mailto:stephane.jaillet@univ-smb.fr) (S. Jaillet)

[jean-jacques.delannoy@univ-smb.fr](mailto:jean-jacques.delannoy@univ-smb.fr) (J.-J. Delannoy)

[Kim.Genuite@univ-smb.fr](mailto:Kim.Genuite@univ-smb.fr) (K. Génuite)

[fabien.hoblea@univ-smb.fr](mailto:fabien.hoblea@univ-smb.fr) (F. Hobléa)

[julien.monney@univ-smb.fr](mailto:julien.monney@univ-smb.fr) (J. Monney)

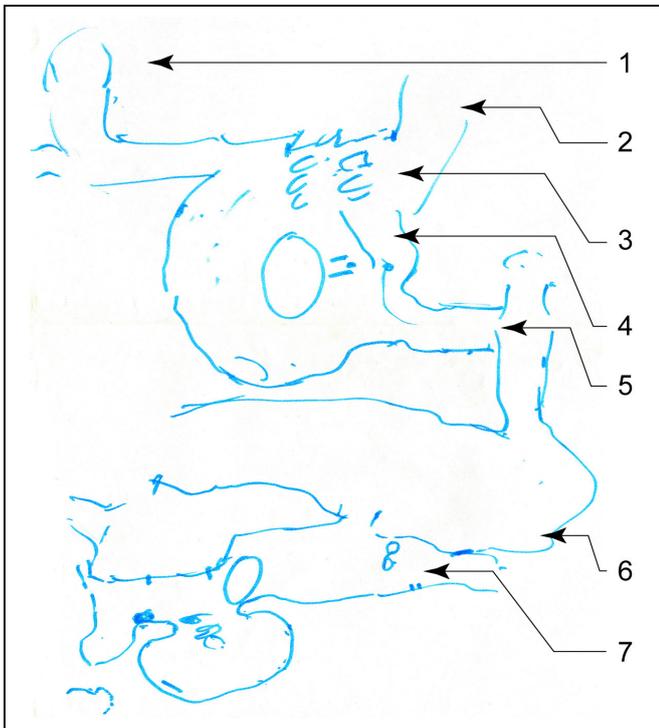
## 1. Introduction

Lorsqu'à la fin de l'année 1994, Jean-Marie Chauvet et ses compagnons explorent en Ardèche la grotte désormais célèbre qui porte son nom, ils parcourent des galeries dans un espace

totalemment vierge dont la géométrie, les directions et les dimensions sont totalement inconnues. Au sortir de la grotte, Jean-Marie Chauvet dessine à main levée et de mémoire, le parcours effectué sous terre (fig. 1). On y retrouve les premières

salles (Bauges, Brunel), le grand soutirage dans la salle Hillaire et même le panneau des Chevaux. Sans le savoir, il produit la première image jamais sortie de la grotte depuis plus de 30 000 ans et cette image est une topographie, ici un croquis. Avant même les photographies des célèbres œuvres pariétales, une représentation spatialisée de la caverne est produite. Par ce geste, il construit une représentation imagée de la grotte Chauvet et rend visible un objet jusqu'à présent inconnu et par nature non perceptible entièrement.

Car s'il est un objet naturel qui ne peut être perçu en totalité, c'est bien le karst et en particulier les grottes ! Le truchement d'images cartographiques permet d'offrir une représentation totale de la cavité, nécessairement parcourue de l'intérieur. Sans possibilité de vision globale d'une grotte, il n'existe donc que des visions singulières dépendantes des individus qui vont sous terre et qui parcourent les conduits. De fait, il n'existe donc que des images construites des mondes souterrains et ces constructions imagées ne sont que le produit des individus qui les réalisent. Selon les époques, les cultures, les projets, ces images construites des grottes et du karst vont changer, évoluer et conduire à des représentations bien différentes.



**Fig. 1 – Croquis de mémoire, exécuté au lendemain de la découverte par Jean-Marie Chauvet, l'un des inventeurs de la grotte éponyme.**

Ce plan (muet et complété ici par les toponymes essentiels), qui est une représentation spatialisée de la grotte, est le premier document iconographique produit sur la cavité. Il précède tous les dessins, films, photos et autres images que la grotte n'a cessé de susciter depuis. 1. Galerie des Croisillons ; 2. Vers fond et galerie du Mégacéros ; 3. Panneaux des Chevaux ; 4. Salle Hillaire ; 5. Le Seuil ; 6. Salle des Bauges ; 7. Salle Brunel. Dessin J.-M. Chauvet, coll. D. André.

**Fig. 1 – First sketch of the Chauvet Cave, made from memory by one of the discoverers (Jean-Marie Chauvet) the day after their first incursion into the cave.**

*This map (unnamed and supplemented here), which is the first topography of the cave, is also the first iconographic document produced, before all other drawings, films, photographs and other images that were made. 1. Gallery of the Crosshatching; 2. Toward Megaloceros Gallery; 3. Horses Panel; 4. Hillaire Chamber; 5. The Seuil; 6. Bauges Chamber; 7. Brunel Chamber. Sketch by J.-M. Chauvet, coll. D. André.*

Représenter la grotte revient à réaliser une image (une photographie, une gravure, une topographie). Dans le cas d'une topographie, le but est bien de produire une image distancée (au sens propre) de l'objet investi. En effet, alors que le monde souterrain se parcourt de l'intérieur et que les levés topographiques sont réalisés dans les conduits même du karst, l'image topographique qui en résulte est une image externalisée de la cavité depuis un point de vue en hauteur, un point de vue par nature impossible, car au-dessus du plafond de la grotte. Il existe donc une posture topographique que propose la représentation du monde souterrain et celle-ci impose un effort intellectuel de distanciation : on sort de la grotte pour proposer une image vue de l'extérieur de la grotte et un choix, une position, un regard orienté par la volonté du topographe dans la représentation qu'il propose. Ces choix sont sources de diversité.

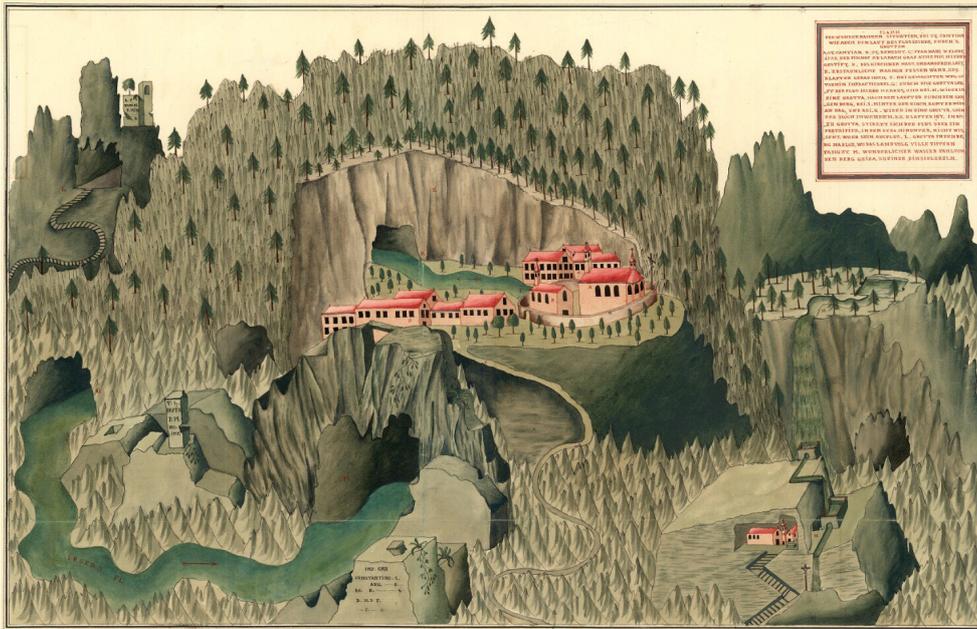
Après une analyse rapide de l'histoire de ces images souterraines, nous verrons comment les techniques de topographie en grotte se sont peu à peu formalisées au fil du temps pour aboutir à des représentations toujours plus codifiées, plus riches mais tout aussi variées. L'apparition et surtout la démocratisation des technologies 3D ont, par la suite, conduit à un renouvellement profond des modes de représentation des mondes souterrains. Quel projet pour celui qui produit une image 3D ? Quelle perception pour celui qui la reçoit ? Nous verrons qu'entre image construite et image perçue, il existe une dialectique du même ordre qu'entre réalité interprétée et imaginaire suscité. Entre le projet d'une représentation de la grotte et sa réception par le lecteur se glisse ainsi un espace similaire à celui qui existe entre réalité et imaginaire. Les grottes, objets naturels complexes, essentiellement parcourus par une frange limitée de la population cristallisent, nous le verrons, cette dualité des représentations imagées.

## 2. Une histoire des représentations du karst et des grottes

Au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle, le document « *Plann der wunderbahren situation, bei St. Cantiam (...) durch 3 Grotten* » (Geyer činný, entre 1751 et 1760) propose une vue cavalière du site de Skocjan (perte de la Reka, karst classique, Slovénie) avec une volonté de représenter à la fois les éléments souterrains (succession de pertes et de résurgences, entrées des galeries) et les éléments de surface (reliefs, forêts et bâti) (fig. 2). Cette vue cavalière, plus ou moins écorchée, est assez originale. Elle traduit bien la difficulté de représenter sur un même document la totalité des éléments constitutifs du paysage karstique. Peu à peu, au cours du XIX<sup>e</sup> siècle les représentations en plan, coupes et sections se généralisent et se substituent aux représentations cavalières (Jaillet et al., 2014).

### 2.1. Des plans, des coupes et des sections

Dès la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, les premiers explorateurs du monde souterrain ont recours au plan, à la coupe et peu à peu aux profils de conduits (Shaw, 1992). **Le document topographique le plus ancien connu est celui de la glacière de Chauz-les-Passavant (1740) qui présente déjà un plan et une coupe.** Le cas de la grotte de Miremont à Rouffignac (Dordogne), connu aussi sous le nom de Cro de Grandville, est à ce titre assez éloquent. Cette cavité labyrinthique de plus de 4 km de longueur et aux multiples ramifications a très vite



**Fig. 2 – Plann der wunderbahren situation, bei St. Cantiam wie auch den Lauf des Flusiesero, durch 3 Grotten (Geyer činný, entre 1751 et 1760).**

Extrait de 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, entrées des galeries) et des éléments de surface (reliefs, forêts, bâti).

**Fig. 2 – Plann der wunderbahren situation, bei St. Cantiam wie auch den Lauf des Flusiesero, durch 3 Grotten (Geyer činný, entre 1751 et 1760).**

Extract from Moll's map collection (Moll-0090.900, AA.T.XV, 8G). This perspective view of the Skocjan site (Reka sinkhole, classical karst) is an attempt to represent underground aspects (succession of sinkholes and resurgences, gallery entrances) and surface aspects (landforms, forests, buildings).

été l'objet de relevés topographiques. Elle compte à ce titre parmi les premières grottes topographiées et la succession des documents topographiques réalisés offrent une opportunité intéressante pour en analyser les évolutions (Bouchereau, 1967 ; Gauchon et al., 2013). La figure 3 présente quatre documents s'étalant de 1765 à 1893. Dans le premier (fig. 3A), la représentation en plan est proche des représentations actuelles et les éléments essentiels (directions et longueurs) sont respectés. Des détails (bâti en surface, accès à la rivière souterraine) sont cependant représentés de manière étonnante mêlant des vues de profil et, pour l'eau, un écoulement circulaire. Le second document (fig. 3B), estimé entre 1765 et 1778 (Gauchon et al., 2013), présente une vue en plan toute aussi satisfaisante avec cette fois une série de 28 coupes en travers offrant en outre une représentation de la surface topographique et donc de la profondeur et de la hauteur des conduits en fonction de la position sous le plateau. Il s'agit d'un cas extrêmement précoce d'une représentation déjà très aboutie de la complexité des développements souterrains sous la surface. Il n'existe, à notre connaissance, pas d'équivalent pour la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle et le document suivant (fig. 3C), datant de 1824, pour esthétique qu'il soit, ne parvient pas à ce niveau de justesse. Lorsqu'en 1893, **Edouard-Alfred Martel** vient à Rouffignac, pas moins de cinq documents topographiques préexistent. Il produit, en deux jours (Martel, 1894), un nouveau plan, accompagné de sections (fig. 3D) et prend le soin de glisser en cartouche le très bon plan levé par l'ingénieur Brémontier édité en 1822 (Shaw, 1992).

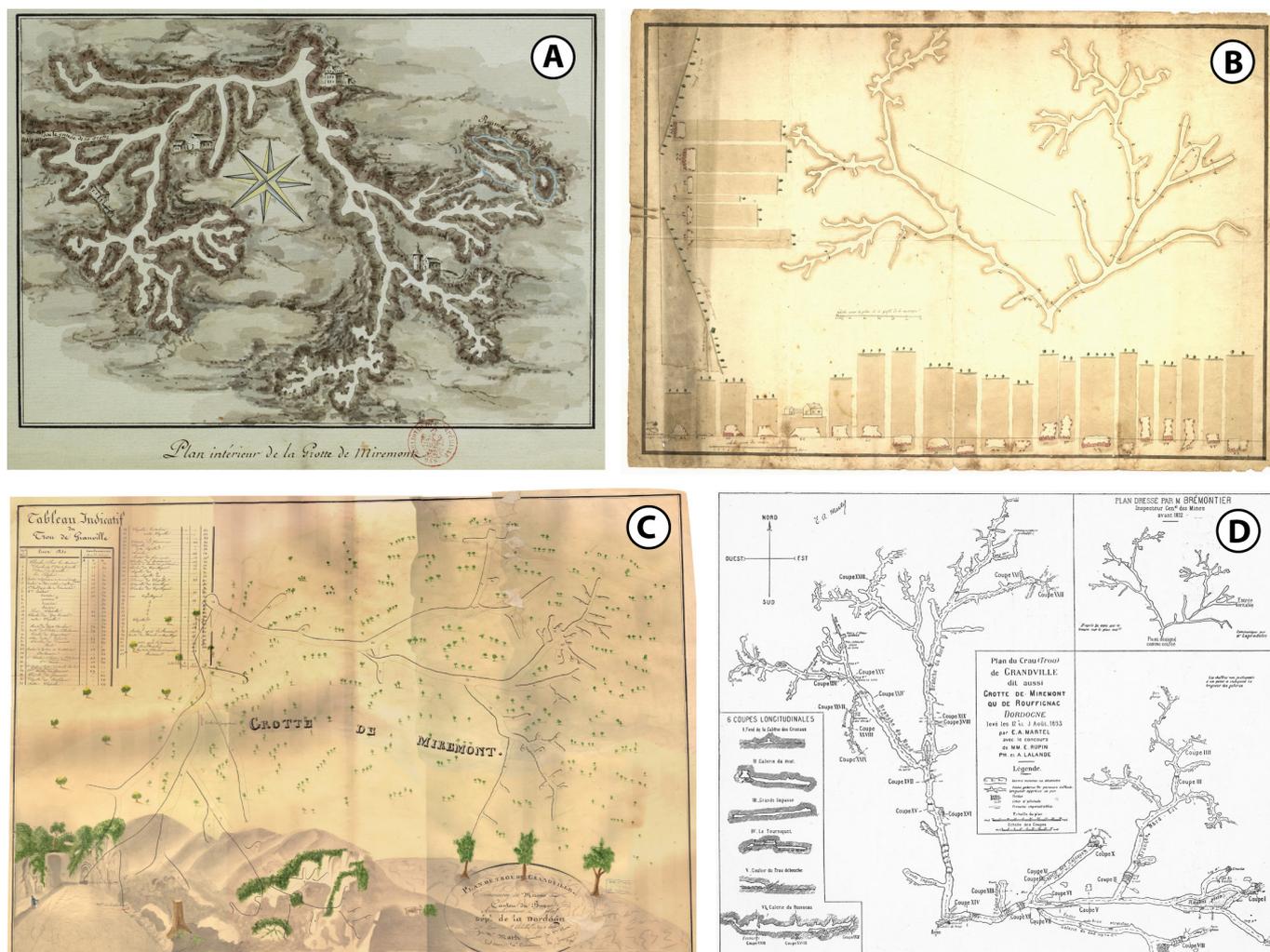
**Sans être le premier topographe souterrain, Martel a cependant contribué à formaliser une certaine façon de représenter les grottes.**

La présence systématique d'une orientation, d'une échelle fixe, de coupes et de sections, l'ajout systématique de cartouches de renseignements (date, auteurs, etc.), d'éléments toponymiques et descriptifs, font de ses documents des images de nature scientifique et technique. Ainsi, la répétabilité d'une méthode, mais aussi l'homogénéisation des échelles, des tracés et des légendes, ont concouru à faire entrer peu à peu la topographie souterraine dans le champ des cartes géographiques que la science organise.

## 2.2. Une formalisation de la production topographique souterraine

Le XX<sup>e</sup> siècle n'est que le prolongement de cette codification de la topographie souterraine. Pour représenter l'endokarst, le choix de plans associés à des coupes s'impose. Dans les faits, tout projet topographique d'une grotte constitue un projet de discrétisation de l'espace souterrain (Jaillet et al., 2014). Il s'agit de passer d'un monde continu, celui que nous propose la nature, à un monde discret où le continuum de la surface de la caverne est remplacé par une succession de points. Cette procédure de discrétisation se heurte à deux problèmes, indépendants de l'échelle : celui de la résolution spatiale et celui de la précision. La résolution est 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, quant à elle, 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 et les mesures angulaires (pente, direction) sont données au degré près (parfois au demi-degré) (Faucher et Mautref, 1991). Les levés réalisés par station totale (tachéomètre) ou par scanner laser correctement référencé peuvent approcher une précision millimétrique. *In fine*, en topographie spéléologique, 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 représenter les contours de la grotte plus ou moins correctement. Le *British Cave Research Association* distingue ainsi des cotations topographiques selon un code double (chiffre et lettre) qui permet d'apprécier la qualité du levé topographique en distinguant l'aspect géométrique de l'habillage (Day, 2002). Cet habillage est lui-même formalisé selon des codes de représentations conventionnels (Fabre et al., 1978 ; Häuselmann, 2002, 2011) plus ou moins respectés.



**Fig. 3 – La grotte de Miremont (Rouffignac, Dordogne) est une des cavités les plus et le plus précocement topographiées.**

Ces quatre représentations s'étalant du XVIII<sup>e</sup> à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle montrent à la fois la constance des représentations en plan et l'évolution des vues de côté (perspectives, coupes et sections). A : Plan anonyme (22 x 16.5 cm, non daté, bibliothèque nationale de France, Paris) ; B : Plan Duvaucelle avec 28 sections et un profil de l'entrée (73 x 51.8 cm, 1765-1778, archives départementales de Périgueux) ; C : Plan coloré de Fayard, Marty et Fayolle (71 x 50 cm, 1824, bibliothèque municipale de Périgueux) ; D : Topographie de Martel (1893), publié dans *Les Abîmes* en 1894.

**Fig. 3 – The cave of Miremont (Rouffignac, Dordogne) is one of the first caves ever mapped.**

These four representations ranging from the 18th to the end of the 19th century show both the consistency in representations of mapping and the evolution of the side views (perspectives and cross-sections). A: Anonymous map (22 x 16.5 cm, no date - French National Library, Paris); B: Duvaucelle map with 28 cross-sections and one of the entrance (73 x 51.8 cm, 1765-1778 - Archives Départementales, Périgueux); C: Fayard, Marty and Fayolle colored map (71 x 50 cm, 1824 - Périgueux Public Library); D: Martel map of Miremont-Rouffignac (1893) in *Les Abîmes* (1894).

Depuis les années 1990, des solutions informatiques ont permis d'automatiser et d'accélérer un certain nombre de procédures dans le traitement et le rendu des données acquises en milieu souterrain. Des logiciels dédiés formalisent la saisie des sept données de base des levés spéléologiques (longueur, direction, pente caractérisant la polygonale et les quatre longueurs encadrant le point de mesure pour l'habillage). Ces logiciels automatisent les calculs et proposent des solutions mathématiques aux bouclages des conduits, répartissant d'autant les erreurs matérielles ou de mesure. Citons-en quelques-uns pour mesurer la richesse de ces développements toujours en cours : *TurboTopo*, *Toporobot*, *Visual Topo*, *DPTopo*, *GHTopo*, *CyberTopo*, *Topo Calc'R*, *Thérion*, *Compass*, *Winkarst*, *Survex*, *Walls*, *CaveRender*, *Tunnel*, *Auriga*, *PocketTopo*, *TopoDroid*, *Cave3D*, etc. (Jaillet et al., 2014).

### 2.3. Des documents à usages variés

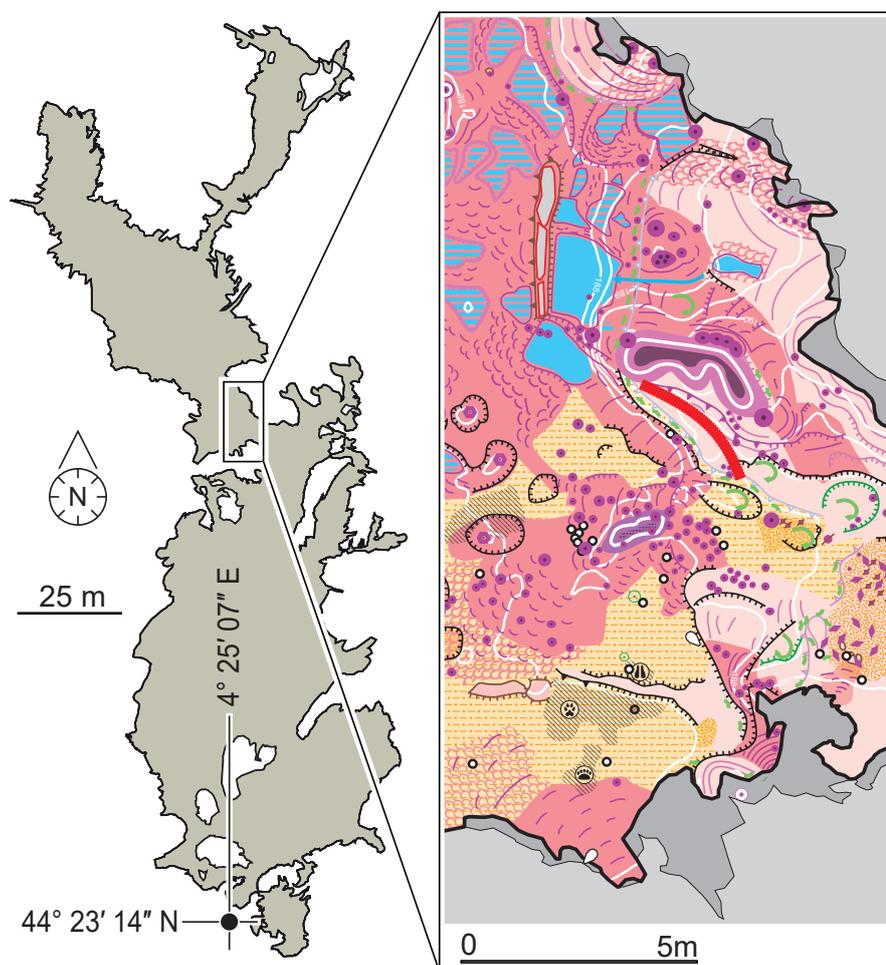
Vers la fin du XX<sup>e</sup> siècle, l'usage des images topographiques de grottes se diversifie. En fonction du projet (aménagement technique, support aux études scientifiques, médiation et partage, etc.), la grotte est représentée selon des codes sémiologiques et une iconographie adaptée. À l'avènement d'Orgnac 1 (Ardèche), il a été montré qu'en 75 ans, une très grande diversité de plans topographiques supporte une même diversité de discours (Gauchon et al., 2012). À Chauvet (Ardèche) sur une période plus courte (20 ans), une vingtaine de documents topographiques (originaux ou reprises partielles) se succède, exprimant aussi un besoin de diversité des représentations selon les projets invoqués (Jaillet et al., 2020). Dans tous les cas, les représentations peuvent être classées en quatre catégories d'acteurs : (i) spéléologues, (ii) géomètres, (iii) scientifiques, et (iv) médiateurs. À Orgnac,

les quatre catégories coexistent mais la dernière prédomine eu égard au caractère touristique et emblématique de la cavité. À Chauvet, les géomètres et les scientifiques prédominent dans la production topographique mais les deux autres catégories sont présentes. Dans tous les cas, on semble percevoir des cycles de représentation voyant se succéder d'abord les spéléologues (ce sont eux qui pénètrent, en général, en premier dans la cavité), puis les géomètres et scientifiques (lorsque la cavité se prête à des études ou à des aménagements) et enfin les médiateurs, lorsque les usages de la grotte sont affectés au tourisme (cas d'Orgnac) ou au contraire lorsqu'elle n'est pas visitable (cas de Chauvet).

Dans le domaine des sciences souterraines, l'image topographique prend une place particulière. Pour beaucoup de disciplines, comme la biologie, l'archéologie ou la paléontologie, elle est essentiellement le support cartographique à la localisation des phénomènes et objets étudiés. Mais pour la géomorphologie, elle est le support à la réflexion essentielle sur la position, la succession, l'emboîtement des éléments constitutifs du paysage souterrain. Tout comme une carte IGN à 1/25 000<sup>e</sup> est le support d'une analyse topographique, une carte géomorphologique rend compte de toute la richesse de l'emboîtement des objets étudiés et de la dynamique des processus. Dans le domaine souterrain, depuis les années 1970, diverses études ont permis de proposer des légendes cartographiques détaillées (Delannoy, 1982) qui se sont affinées et formalisées ensuite (Delannoy et al.,

2001 ; Nehme et al., 2009). L'intention qui guide ces modes de représentations est celui d'une cartographie très détaillée en plan. Comme dans toute carte géomorphologique, les formes et les processus (fluviaux, gravitaires, etc.) sont cartographiés selon une iconographie et une codification colorimétrique. De même, les dépôts sont cartographiés avec un code sémiologique détaillé permettant, par la couleur et les trames, d'atteindre parfois un très grand niveau de détail. À la grotte Chauvet, l'exercice a été réalisé à l'échelle 1/50<sup>e</sup> pour une édition à 1/100<sup>e</sup>. L'atlas cartographique (Delannoy et Geneste, 2020) qui en résulte constitue un cas éloquent de cartographie souterraine avec un tel souci du détail sur une cavité d'assez grande taille (fig. 4). Récemment, d'autres cavités ont d'ailleurs fait l'objet d'approches similaires, comme la grotte du Mas d'Azil (Pallier et al., 2016), la grotte de Fronsac (Dandurand et al., 2017) ou la grotte de Bruniquel (Camus, 2019).

Ce mode de représentation avec généralement un plan, une coupe et des profils en travers, permet de représenter l'essentiel des informations contenues dans les conduits du karst, parfois avec un très haut niveau de détail. Cependant, il oblige à un effort intellectuel de reconstruction géométrique pour la perception effective de la troisième dimension (le volume). Cette troisième dimension n'apparaît que par l'appariement intellectuel que réalise le lecteur des deux types de documents généralement fournis (plan d'une part, coupe et sections de l'autre). L'arrivée de la 3D va redéfinir ce type de représentation.



**Fig. 4 - Extrait de la carte géomorphologique détaillée de la grotte Chauvet dans le secteur du Seuil.**

Le niveau de détail des levés réalisés sur le terrain à 1/50<sup>e</sup> autorise une cartographie totale des formes, des dépôts et des processus en œuvre sous terre. La légende très détaillée et non représentée sur cet extrait est inspirée des cartes géomorphologiques et adaptée aux grottes. Les couleurs renvoient à des types de dépôts (rose : calcite ; orange à jaune : détritiques) ou à des processus (vert : fluvial ; brun : gravitaire ; rouge : anthropique) (Atlas de la grotte Chauvet, sous la dir. Delannoy et Geneste, 2020).

**Fig. 4 - Excerpt from the detailed geomorphological map of the Chauvet cave in the «Seuil» area.**

The level of detail of the field mapping at 1:50 allows for total mapping of the underground landforms, deposits and processes. Its very detailed legend, not shown here, is inspired by geomorphological maps and was adapted to the cave environment. The colors refer to the types of deposits (pink: calcite; orange to yellow: detrital) or to processes (green: fluvial; brown: gravity; red: anthropic). (Chauvet Cave Atlas, Delannoy and Geneste (dir.), 2020).

### 3. L'arrivée de la 3D constitue-t-elle une révolution ?

Le karst et les grottes se prêtent éminemment bien aux représentations 3D. Les replis de la caverne, les étagements des différents conduits, la superposition entre les éléments de la surface et les éléments souterrains invitent à l'imagerie 3D.

#### 3.1. Des maquettes et des vues cavalières

Dès le début du XX<sup>e</sup> siècle, certains ont eu recours à la construction de maquettes pour représenter cette complexité des conduits comme celle produite en 1924 par Robert Oedl (1898-1978) d'une partie de Skocjanske jame (la zone d'entrée) à l'échelle 1/500<sup>e</sup>. Edouard-Alfred Martel (1859-1938) lui-même, 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 en 1936, a présenté des maquettes en relief, réalisées en plâtre (André, comm. pers.). Plus tard, Pierre Chevalier a réalisé une maquette en fil de fer, à l'échelle du 1/1 000<sup>e</sup> de la Dent de Crolles en Chartreuse (14 km de développement à cette date, plus de 50 km aujourd'hui). Elle a été présentée à la Société de Géographie le 6 mai 1944. Cette image 3D est le support de ses observations et constitue un élément important des idées qu'il développe sur la spéléogenèse des conduits karstiques (Chevalier, 1944). Dans les années 1980, des clubs de spéléologie ont de même réalisé de telles maquettes pour des cavités complexes : les clubs Drabons et Chieures de Méaudre en ont réalisé une du Trou qui Souffle (Isère), avec des baguettes de plexiglas ; le Groupe Spéléo Valentinois une autre, à base de fil de cuivre pour la grotte de la Luire (Drôme).

Toujours dans le domaine des topographies spéléologiques, on note un mode de représentation qui a, durant les années 1970 et 1980, permis de représenter des gouffres en vue cavalière. Ces vues sont directement inspirées des normes du dessin technique (ou dessin industriel). En effet, la perception de la troisième dimension impose parfois le recours à ce type de vue en perspective (Flocon et Taton, 1963). La perspective réalisée par Bernard Peigné sur la partie supérieure du Trou qui Souffle en est un bon exemple (fig. 5). Cette vue n'a pas vocation à donner les cotes exactes de l'objet (les angles et souvent les dimensions ne sont pas respectés) mais à faciliter la lecture et notamment le passage d'une vue à une autre (plan, coupes). Ce type de représentation est donc considéré comme un complément à la topographie spéléologique, mais pas comme un document complet (Faucher et al., 1991). L'intérêt est avant tout d'en faciliter la lecture. Bien qu'assez esthétique, l'image souffre de deux inconvénients : le point de vue est imposé par le dessinateur et la conservation des angles et des longueurs n'est pas respectée (sauf pour les longueurs en cas de perspective axonométrique et non conique, ce qui est le cas ici) (fig. 5). À partir des années 1990, l'apparition des images 3D générées par les technologies LiDAR et photogrammétriques va supplanter ces vues axonométriques originales des grottes.

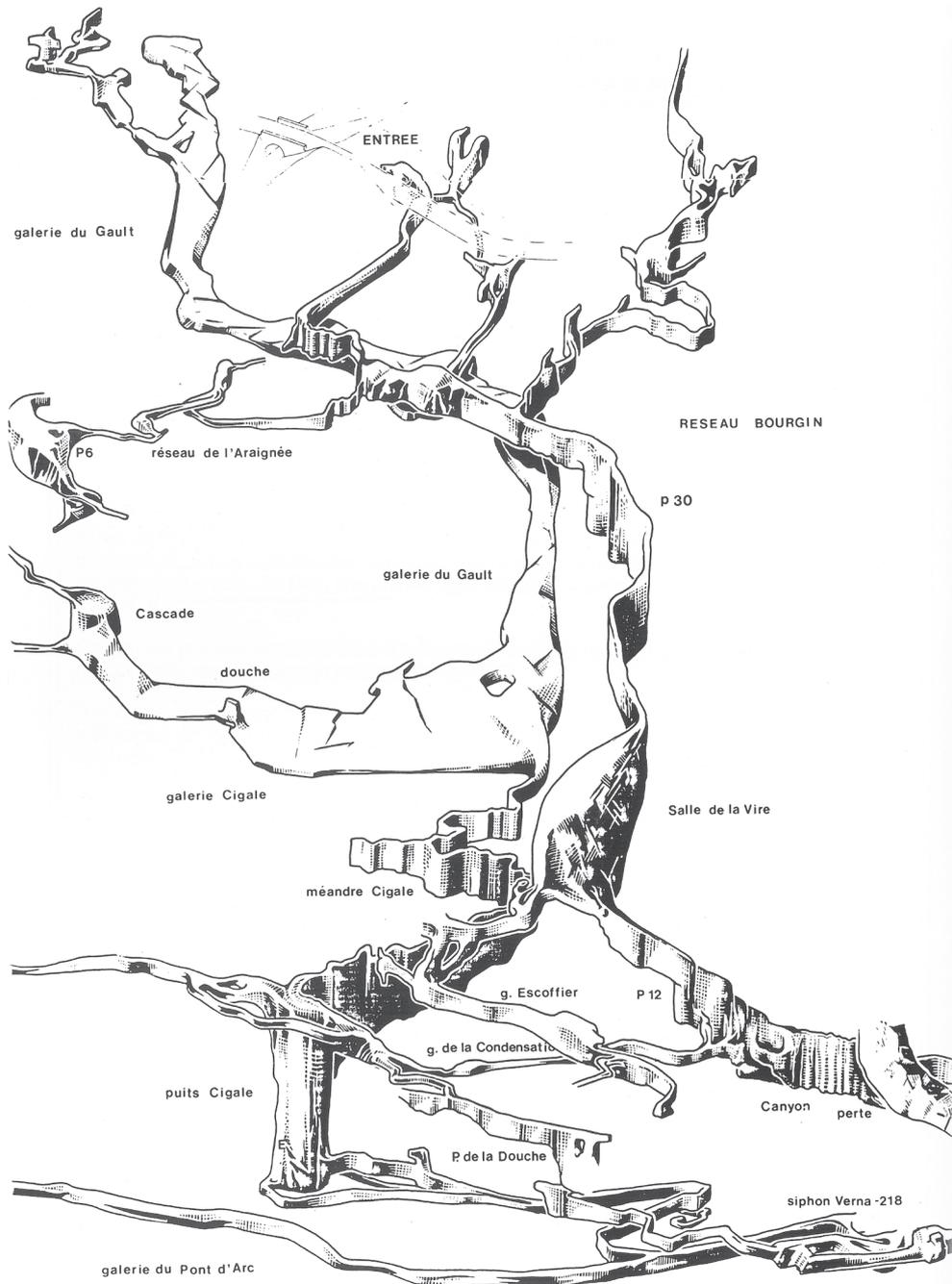
#### 3.2. Technologies LiDAR et photogrammétrie

En grotte, la photogrammétrie a essentiellement été appliquée dans un premier temps au relevé de parois ornées, technique consistant à reproduire, tout en les interprétant, les tracés anthropiques

pariétaux. En France, c'est sans doute Michel Lorblanchet qui, le premier, a mis en œuvre la technique sur la Frise noire de la grotte du Pech Merle (Lot) dans les années 1970 (Lorblanchet, 1982). Plus récemment, elle a aussi été employée à Lascaux pour la réalisation du fac-similé de Lascaux 2 (Lima, 2012) ou encore pour celle du modèle 3D d'une cavité dans son intégralité, comme pour le cas de la grotte du Morne Rita (Fouéré et al., 2011). Désormais, les relevés photogrammétriques 3D sont traités sous des logiciels de multi-corrélations d'images et permettent de proposer des images 3D correctes, manipulables, orthorectifiées et visualisées en 3D, comme par exemple à la grotte aux Points en Ardèche (Monney, 2018). L'arrivée des scanners laser au milieu des années 1990 a profondément redéfini l'acquisition et la représentation 3D de la topographie du milieu souterrain (Jaillet et al., 2014).

Le LiDAR (*Light Detection And Ranging*) est un principe d'acquisition à distance (télé-détection) basé sur les propriétés d'un faisceau de lumière renvoyé à l'émetteur. En 1994, à Vielmouly (Dordogne), 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 sous terre le capteur Soisic de la société Mensi (Aujoulat et al., 2005). Peu après, un scanner est introduit dans la grotte Cosquer (Marseille) et l'opération est renouvelée en 1998 dans une cavité de montagne : la Balme à Collomb en Savoie. Depuis, la technologie s'est considérablement démocratisée et on ne compte plus les grottes qui ont fait l'objet d'un tel relevé 3D. En outre, il n'est désormais plus rare que le projet de numérisation 3D d'une grotte dépasse plusieurs milliards de points (Oludare Idrees et al., 2016) et les projets afférents à ces relevés sont de plus en plus variés. Ainsi, la salle de la Verna (Pyrénées Atlantiques), le plus grand volume karstique français, a-t-elle été scannée pour les besoins d'implantation d'une conduite forcée (Chazaly et al., 2010). Majlis al Jinn (Sultana d'Oman), une des plus grandes salles souterraines du monde, a été scannée pour un projet d'aménagement touristique (Chazaly et al., 2010). Les grandes salles souterraines sont scannées pour mieux évaluer les volumes et des scanners mobiles permettent de relever des zones complexes (Zlot et Bosse, 2014). Plusieurs études archéologiques en grotte font dorénavant appel à la modélisation 3D, comme pour la grotte Chauvet (Ardèche) (Jaillet et al., 2020), la grotte Parpalo (Espagne) (Lerma et al., 2010), la grotte des Fraux (Burens-Carozza et al., 2011) ou pour l'art pariétal (González-Aguilera et al., 2009 ; Fritz et al., 2012 ; Angas et al., 2014). La grotte de Castellana (Caprioli et al., 2003) a fait l'objet d'un levé 3D sur les stalagmites comme à la salle 2 d'Orgnac (Hajri et al., 2009). 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 (MacFarlane et al., 2015). Ces travaux ont en commun les possibilités qu'offrent cette technologie toujours en évolution : (i) un travail sur la totalité de l'objet analysé et non uniquement sur une de ses parties (notion de complétude), (ii) l'accession à des objets peu atteignables (hauteur, sécurité), et (iii) un report de l'analyse sur station informatique pour limiter le temps de présence sur site (conservation, préservation du site, disponibilité des équipes sur le terrain).

Ces approches visent à construire, non une représentation imagée de la grotte, mais véritablement une copie informatique, un double virtuel, un clone numérique.



**Fig. 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.

**Fig. 5 – Axonometric perspective produced by Bernard Peigné, on the upper part of “Le Trou qui Souffle” (Lismonde 1991).**

The parallels are respected (but not the angles), and there is no change in the scale of the objects. This kind of 3D representation met with some success in the 1970s and 1980s.

### 3.3. Vers le clone numérique de la grotte

Le nuage de points dense (fig. 6) est la première des étapes pour la réalisation du clone numérique. Une fois ce nuage assemblé, consolidé, nettoyé et validé, la suite de l’opération consiste à le mailler pour obtenir un modèle RTI (Réseau Triangulaire Irrégulier, TIN en anglais) (Jaillet et al., 2011). Cette opération permet de réduire la quantité de points acquis tout en conservant le même niveau d’information morphologique. Les surfaces planes sont décrites par moins de triangles que les surfaces plus rugueuses permettant également l’accélération des procédures d’affichage et de traitement. On transforme ainsi le nuage de points en une « peau numérique » continue avec création de nouveaux sommets, reliés par des arêtes. La texture est obtenue ensuite par le drapage (*matching*) de photos

sur le modèle surfacique. Cette opération réalisée photo par photo est extrêmement chronophage et implique de texturer une à une chaque portion de la cavité et de répéter l’opération des centaines voire des milliers de fois. Aujourd’hui, on cherche plutôt à créer un modèle assez dense par lasergrammétrie et un modèle plus dense encore par multi-corrélation d’images. La qualité géométrique du modèle final (échelle, orientation et horizontalité) est garantie par le relevé LiDAR tandis que la densité et la colorimétrie sont obtenues par la photogrammétrie. La tendance est donc de ne plus opposer les deux méthodes, mais plutôt de les croiser pour produire une image 3D de la grotte, juste et pertinente pour les usages qui en sont attendus.

Très peu de projets de relevés 3D en grotte atteignent véritablement le rang de clone numérique. Nous considérons que ce rang n’est atteint que si le projet répond à au moins trois critères : (i) complétude du

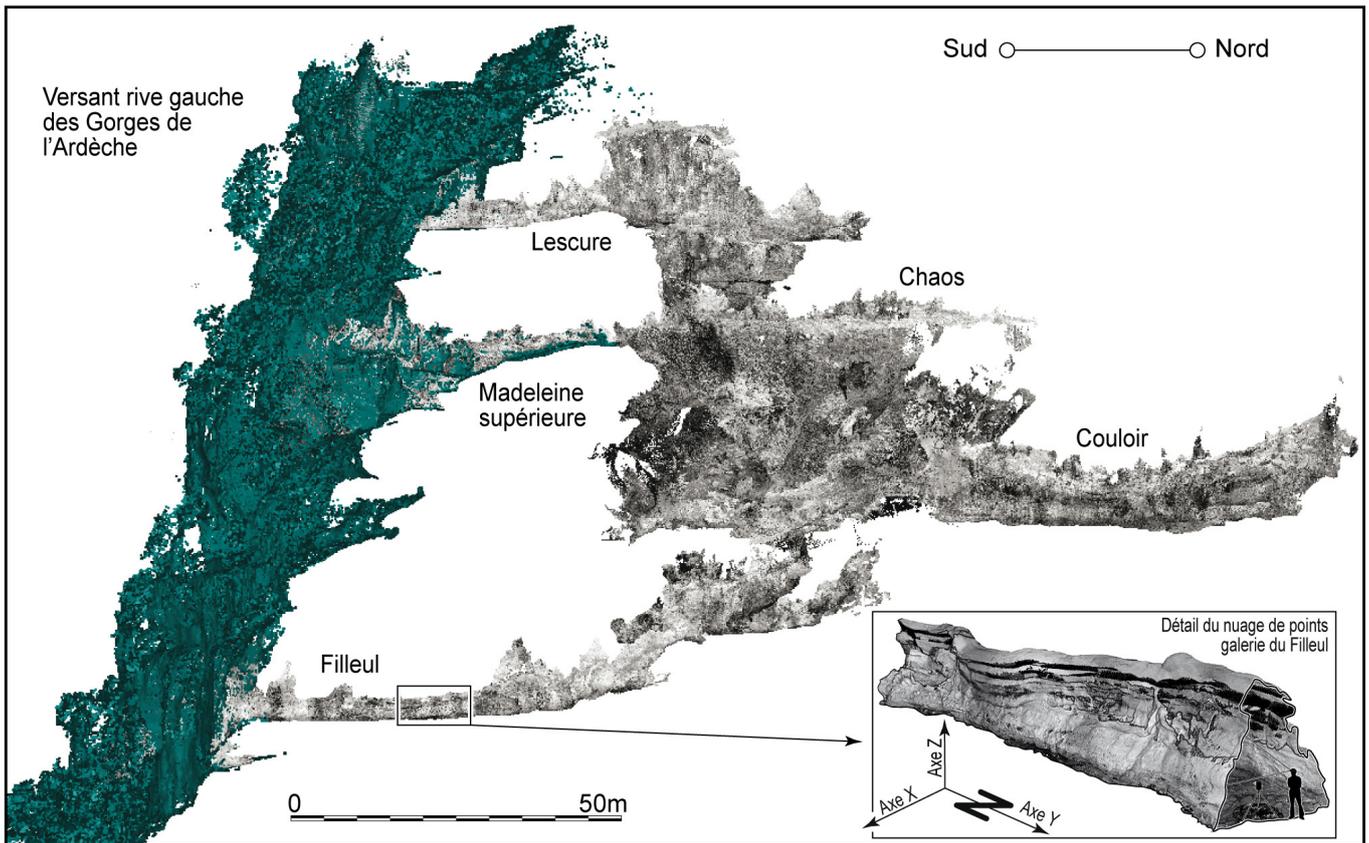


Fig. 6 – Vue 3D du nuage de points de la grotte de la Madeleine (Ardèche) et de la paroi des Gorges de l'Ardèche.

Plusieurs millions de points autorisent ici une compréhension détaillée des morphologies de la grotte : étagement des drains à l'échelle de la cavité, analyse fine des formes pariétales à l'échelle du drain, etc.

Fig. 6 – 3D point-cloud view of the Madeleine Cave (Ardèche) and the «Gorges de l'Ardèche» canyon walls.

Here, several million points allow for detailed understanding of the morphologies of the cave: drain tiers in the cave, fine-scale analysis of the wall forms, etc.

projet, la grotte est relevée en totalité ; (ii) maillage complet sans trou et triangles du modèle RTI toujours inférieur à dix fois la maille moyenne du nuage de points ; (iii) texturage (colorimétrie RGB) complet du modèle par des texels (plus petit élément d'une texture appliquée à une surface), eux-mêmes d'une taille inférieure aux triangles du modèle RTI. Le clone numérique de Lascaux (Dordogne) répond à ces critères (fig. 7) et offre une image nouvelle de cette cavité emblématique. La paroi d'une grotte étant considérée sans épaisseur (elle représente une simple surface) et le calcaire n'étant pas modélisé, on obtient une image étonnante où l'œil du spectateur est à l'extérieur de la cavité, dans la masse rocheuse, et où la paroi apparaît comme transparente. Les œuvres pariétales sont alors vues depuis une position impossible : dans l'encaissant de la roche.

C'est la force des images topographiques des grottes et en particulier des images produites par les technologies 3D : celle de nous proposer un regard renouvelé sur les mondes souterrains. Ce regard, produit de représentations construites, est-il cependant toujours perçu de manière univoque ?

#### 4. Des représentations construites aux images perçues

En effet, si les images construites sont diverses, quelle peut être la réception de ces images souterraines par un public lui-même varié (aménagement, scientifiques, touristes, etc.) ?

#### 4.1. Une construction imagée du réel

Toute production imagée des grottes et du karst, si elle vise à représenter les mondes souterrains réels, n'en reste pas moins une image construite par un auteur. Spéléologue, scientifique, géomètre, médiateur, chacun propose une image du réel dans une sphère de communauté culturelle à laquelle il appartient. L'image 3D – et *a fortiori* le clone numérique de grotte – se voudrait une image totale, non interprétée du réel. On revient ainsi vers une forme de construction d'images, justes géométriquement, mais non codifiées et ne relevant pas des choix sémiologiques (tout est là, non trié, non interprété). Mais paradoxalement, ces images le sont tout autant. Les choix opérés sous terre lors de l'acquisition des données (géométriques et photographiques) et, plus encore, les choix d'angles de vues et de perspectives proposés pour les restitutions 2D effectuées à partir des modèles 3D, impliquent des images contrôlées, donc construites (fig. 7). Dans les faits, le niveau de technicité nécessaire à l'établissement de ces images 3D implique qu'une petite communauté soit réellement actrice de cette production imagée, tandis qu'une masse de personnes n'en constitue que les spectateurs passifs, prisonniers des choix des premiers quant aux images produites. Dans certains cas cependant, la mise en ligne de modèles 3D sur des plateformes de consultation libre (par exemple : <https://sketchfab.com/3d-models>) offrent l'opportunité au spectateur de redevenir un acteur de la production



**Fig. 7 – Une vue texturée du modèle 3D de Lascaux.**

Sur ce modèle, les œuvres pariétales sont reproduites sur l'enveloppe externe et sont vues de l'extérieur, à travers la paroi, comme si celle-ci était en verre. Le modèle montre la grotte et ses peintures dans leur intégralité et permet à l'observateur de manipuler l'image librement. Levés scanners, traitements et réalisation : Perazio Engineering (Jaillet et al., 2017).

**Fig. 7 – Textured 3D model of Lascaux cave.**

*In this model, the paintings are seen from outside the cave, "through" its walls, as if they were made of glass. As well as showing the cave and its paintings in their entirety, the model allows the observer to freely manipulate the image and to view the paintings. Acquisition, processing and production: Perazio Engineering (Jaillet et al., 2017).*

imaginée en choisissant lui-même ses angles de vues, ses zooms, ses éclairages et en produisant ainsi partiellement ses propres représentations.

Ces modèles 3D servent aussi de support à des analyses géomorphologiques. Dans ce domaine, l'intégration d'observations de terrain dans le modèle (limites de dépôts, affleurements, etc.), permet de segmenter les différents éléments et de produire une véritable cartographie 3D. Le cas de la paléo-entrée de la grotte Chauvet est à ce titre assez éloquent. L'effondrement qui a clôt la paléo-entrée a été daté (Sadier et al., 2012). L'analyse géomorphologique interne et externe du dépôt (Delannoy et al., 2010) et des travaux de géophysique (en cours) ont permis de proposer une paléo-géométrie à la fois pour l'escarpement (Sadier, 2013) et pour la paléo-ouverture (Jaillet et al., 2017). Il a été ainsi possible de proposer, au travers d'un travail d'infographie, un modèle 3D rendant compte d'une paléo-géométrie pour l'entrée de la cavité. La nouvelle image ainsi produite s'appuie sur les levés topographiques 3D et est cohérente avec les données scientifiques de terrain (fig. 8). Mais elle va aussi au-delà d'un enregistrement topographique pour offrir la représentation d'une interprétation scientifique. Comprise trop fréquemment comme une reconstitution du passé, elle se veut plus modestement une construction actuelle de la vision que nous avons de la géométrie de la grotte avant l'écroulement. Demain, de nouvelles données de terrain permettront sans doute de l'affiner. Ce n'est donc pas une reconstitution, mais bien une image actuelle d'une interprétation présente d'un objet dans une situation passée. C'est aussi le support à des expressions plus esthétiques comme le propose la vue d'artiste (fig. 8) qui, elle, se veut une représentation contemporaine des fréquentations aurignaciennes de la grotte Chauvet. Mais quelle image est vraiment comprise par celui qui la reçoit ? Quel discours véhicule-t-elle véritablement ? Une interprétation scientifique encadrée d'incertitude et de prudence ou une reconstitution qui affirmerait ce qui a été à l'instar d'une photo (Barthes, 1980) ?

Entre construction scientifique et proposition imaginée, il existe finalement un espace laissant une certaine liberté à la perception des représentations du réel et nourrissant de fait l'imaginaire des grottes.

#### 4.2. Une perception laissant place à l'imaginaire

Cet imaginaire est nourri à la fois des images produites par les scientifiques mais aussi par l'invisibilité de l'objet. C'est le cas ici (fig. 8) puisque la grotte elle-même n'est pas visible pour le plus grand nombre et *a fortiori* pour la paléo-entrée de Chauvet qui appartient au passé. La construction proposée de cette paléo-entrée, sur des critères géomorphologiques, produit finalement des images dont l'usage ou l'appropriation vont au-delà du cercle des chercheurs, reléguant au second plan les réserves contenues dans le discours scientifique.

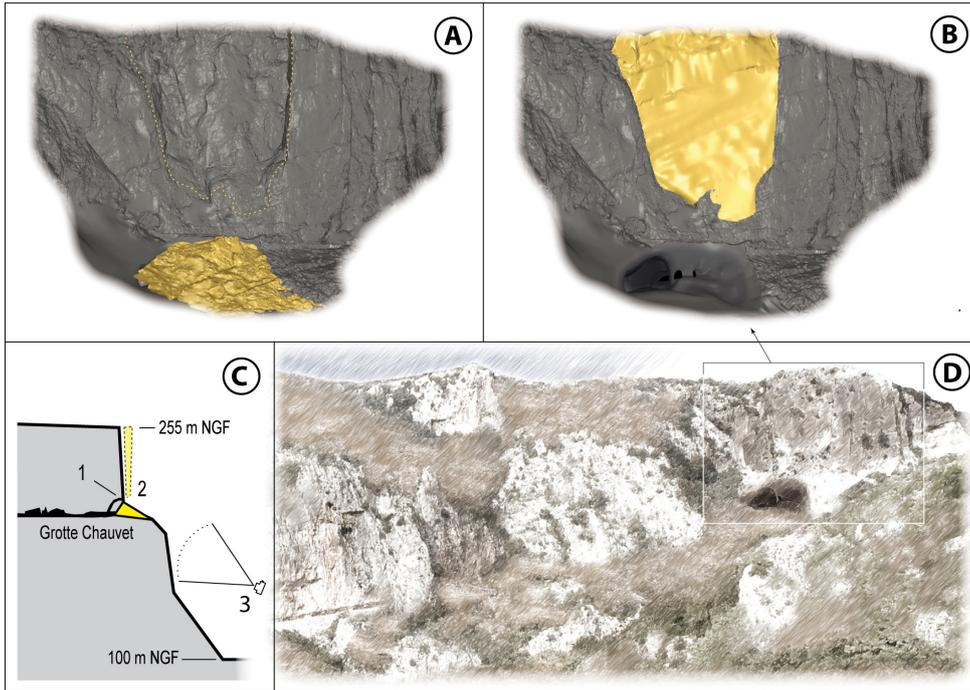
Car l'image attendue en matière de production iconographique de la grotte n'est pas forcément et uniquement celle d'une justesse mathématique. Comme dans tout projet cartographique et imagé, l'objectif est de passer de la « nature » (la grotte est ici la « nature ») à une « image de la nature » voire à la « nature de la grotte », comme ce fut le cas en peinture à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle dans une perspective de représentation naturaliste. Ainsi en est-il par exemple des peintures de Gustave Courbet qui, pour réalistes qu'elles soient (il travaillait pour le géologue Jules Marcou), n'en restent pas moins empruntes de liberté au service de la cause picturale (Fumey, 2007). Un des enjeux du naturalisme est, en effet, de rendre compte des choses telles qu'elles sont. C'est donc bien les aspects sensibles propres à la grotte qu'il s'agit d'imager pour produire une représentation qui donne sens à la grotte. Ce sens est certes le produit d'une certaine justesse mathématique, mais aussi et surtout d'une justesse de l'image dessinée (ou produite par infographie dans le cas de la 3D). On note ici un certain paradoxe : un dessin esthétique aisément appréhendable fait consensus et n'est pas remis en cause. Il rend compte de la nature de la grotte, même si le cheminement topographique est imprécis. Une polygonale mathématique extrêmement bien soignée, mais sans soin quant à la richesse picturale du monde souterrain, restera sans saveur et ne rendra pas compte de certains aspects sensibles propres à une expérience de la grotte. Les technologies 3D produisent des images spectaculaires mais dont la puissance annihile toute critique quant à leur justesse géométrique. C'est le cas de bien des modèles 3D produits hâtivement par multi-corrélation d'images sans contrôle géométrique. Esthétiques, impressionnants et continus, ils fascinent,

mais parfois sont totalement faux géométriquement parlant, sans échelle, sans orientation, sans contrôle de la déformation.

On comprend ici qu'une image géométriquement fautive (une vue en perspective ou une vue en 3D, comme une photographie, ne respecte pas les angles) peut être satisfaisante pour l'esprit *a contrario* d'une image mathématiquement et géométriquement juste (un plan de géomètre correctement coté et orienté) mais difficilement intelligible. Ce paradoxe est intéressant. Il montre que l'image du réel supplante parfois le réel et que le modèle d'origine (la grotte) peut en partie être dépassé par les signes de son existence : ici

son image, même faussée ou déformée (Baudrillard, 1981)

Dans cet espace des représentations des grottes et du karst, il reste donc une place à l'imaginaire, non pas compris en tant qu'image fautive des mondes souterrains, mais en tant qu'image crédible et intelligible, et donc différente. À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, l'imaginaire des grottes et leurs représentations scientifiques coexistent déjà. Vouloir comparer les lithogravures de Jules Férat ou d'Édouard Riou (illustrateurs de Jules Verne) et les topographies ou lithogravures, pourtant contemporaines d'Édouard-Alfred Martel, revient à commettre l'erreur de confronter dans une



**Fig. 8 – Une image 3D fascinante : la paléo-entrée de la grotte Chauvet.**

A : Modèle 3D maillé et segmenté (actuel) ; B : Image 3D reconstituée (avant l'effondrement) issue de l'analyse géomorphologique de terrain. C : Coupe simplifiée du site étudié : 1. Entrée actuelle ; 2. Paléo-entrée ; 3. Point de vue de l'artiste ; D : Vue d'artiste (actuelle) proposée pour un paysage du passé (période aurignacienne) : malgré la force de vérité que porte toute image, il s'agit bien ici de la représentation d'une interprétation scientifique et non d'une image du passé en tant que telle (Jaillet et al., 2017).

**Fig. 8 – A fascinating 3D image: the paleo-entrance of the Chauvet cave.**

A: Current 3D model, segmented and analyzed; B: Reconstructed 3D image (before the collapse) as deduced from geomorphological field observations; C: Simplified section of the study site: 1. Present-day entrance; 2. Paleo-entrance; 3. Viewpoint of the artist; D: Current artist view proposed for a past landscape (Aurignacian period): although this possible paleo-landscape is shown with an artist's view, it is an image produced from scientific interpretation (Jaillet et al., 2017).



**Fig. 9 – Les mondes souterrains sont fréquemment évoqués en bande dessinée avec parfois des représentations assez crédibles comme ici un lac souterrain et des concrétions.**

Yoko Tsuno – tome 1, page 8 (1972) – « Le Trio de l'Étrange » par Roger Leloup. © Dupuis, 1972.

**Fig. 9 – Subterranean worlds are frequently conjured up in comic strips, with sometimes accurate representations such as the underground lake and concretions here.**

From Yoko Tsuno, « Le Trio de l'Étrange » (The Curious Trio), tome 1, page 8, by Roger Leloup. © Dupuis, 1972.

même ontologie deux projets différents, mais complémentaires, de représentation des mondes souterrains. Aujourd'hui plus qu'hier, ces différentes représentations des grottes et du karst coexistent toujours : topographie spéléologique de grottes, plan de géomètre, modélisation 3D, clone numérique, réalité virtuelle, iconographie touristique, bande dessinée, etc. (fig. 9). De toutes les images qui forgent notre représentation des mondes souterrains, n'est-ce finalement pas la dernière qui, présente dès l'enfance, y participe le plus ?

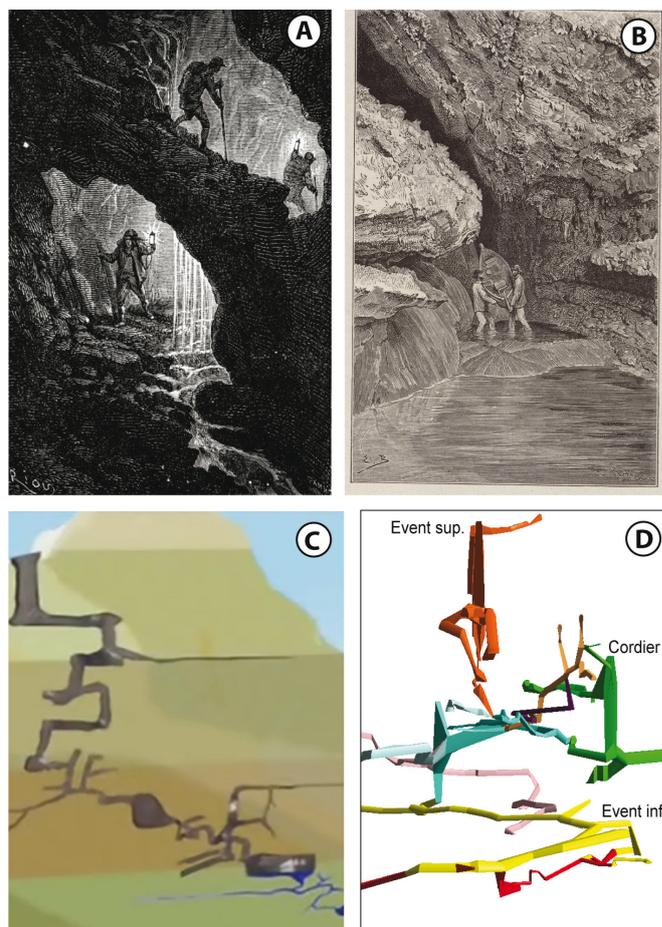
## 5. Conclusion

Dans cet article, notre objectif était d'analyser les représentations topographiques des mondes souterrains et d'en montrer les particularités, la richesse et la diversité. Depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle et jusqu'à nos jours, les techniques ont évolué mais des invariants perdurent. Certes, les méthodes d'arpentage sont plus fines, la justesse mathématique est meilleure, les technologies 3D se démocratisent, mais dans les faits, toute production topographique des grottes et du karst conduit à une image distanciée, perçue depuis l'extérieur de la grotte et parfois selon des vues impossibles sur le terrain : l'œil dans la roche. Il n'existe pas, rappelons-le, de photographies d'une grotte dans sa totalité. Les clones numériques 3D de grottes, images totales non interprétées, répondent à cette ambition, mais les cas sont si rares.

Les acteurs de la construction de ces images topographiques sont variés. Sur des sites à haute valeur patrimoniale (Orgnac, Chauvet, etc.), on a pu montrer que se succèdent spéléologues, scientifiques, géomètres et médiateurs. Dès lors, on aurait pu penser que les premiers produiraient des images justes bien que difficilement intelligibles, et les autres des images belles mais parfois fausses. La séparation n'est pas si nette. La production des images 3D par des scientifiques offrent des représentations « au plus près » de la réalité. Elles résultent certes d'une problématique précise mais avec des choix d'exhaustivité qui portent sur les sols, les parois ou les plafonds et surtout, elles empruntent dans leur construction aux technologies de la réalité virtuelle et de l'animation 3D. De fait, plus faciles à comprendre, surtout lorsqu'elles sont animées, elles acquièrent un statut qui leur confère une proximité avec la réalité qu'une carte interprétée et défendue scientifiquement n'atteint pas forcément. Mais ces images échappent parfois aux scientifiques qui les établissent, surtout lorsque l'on touche à des représentations de la topographie passée des lieux, aujourd'hui disparue. Accompagnées de textes prudents du type « proposition de reconstitution » ou bien « interprétation possible selon l'état des connaissances », les images connaissent ensuite leur propre destin dans des cercles connexes ou médiatiques où les discours d'accompagnement disparaissent souvent au profit d'une vérité reconstruite.

À l'inverse, il existe des images 3D produites dans un cadre imaginaire qui, empruntant aux mêmes technologies, parviennent à des niveaux iconographiques similaires. Le film *Sanctum*, blockbuster américano-australien sorti en 2011, narre une exploration souterraine assez dramatique. Au début du film, le réalisateur (Alister Grierson) choisit de présenter une topographie 3D animée de la cavité qui va être le théâtre du drame. Nulle possibilité de montrer la cavité par une photo, il a donc recours à l'animation 3D et le résultat est très similaire à ce que produisent

les scientifiques lors de l'analyse géométrique des drains du karst (fig. 10). Sur cette figure, on présente quatre vignettes. Les deux vues de gauche (A et C) sont totalement imaginaires, l'une est réalisée par un illustrateur de Jules Verne (ici, *Voyage au Centre de la Terre*) et l'autre dans le cadre du film précité. À droite (B et D), une image dessinée à partir d'une photographie illustre la description de la rivière de Padirac par Edouard-Alfred Martel en 1889-1890 (André et Duthu, 1999) et enfin un modèle 3D rend compte du système karstique de Foussoubie (Ardèche, Jaillet et al., 2011).



**Fig. 10 – Quatre représentations de mondes souterrains.**

A : Edouard Riou, 1864 in : Jules Verne, *Voyage au centre de la Terre* ; B : Edouard-Louis Boudier, 1889-1890, in : E-A Martel, *Le Gouffre du Puits de Padirac, 1889-1890* (FAS\_01\_001\_012A – Dessin p. 11 © E. Boudier / SES de Padirac); C : Alister Grierson, 2011, *Film Sanctum* ; D : Synthèse topographique du système Goule / Événement de Foussoubie, in Jaillet et al., 2011. À gauche (A, C), des vues imaginaires de grottes « inventées » et à droite (B, D) des représentations scientifiques de grottes existantes (Padirac, Foussoubie). En haut (A, B) des représentations illustrant une progression souterraine et en bas (C, D) des représentations illustrant une géométrie 3D du karst. Les codes de représentation et l'iconographie retenue dans ces quatre cas, permettent de montrer l'évolution des images souterraines au cours du temps (fin XIX<sup>e</sup> / début XXI<sup>e</sup>) mais ne permettent pas de distinguer ce qui relève de l'imaginaire ou du réel.

**Fig. 10 – Four representations of underground worlds**

A : Edouard Riou, 1864 in : Jules Verne, *Voyage au centre de la Terre*; B : Edouard-Louis Boudier, 1889-1890, in : E-A Martel, *Le Gouffre du Puits de Padirac, 1889-1890* (FAS\_01\_001\_012A – Drawing p. 11 © E. Boudier / SES de Padirac); C : Alister Grierson, 2011, *Film Sanctum*; D : *Topographic synthesis of the Foussoubie karst system*, in Jaillet et al., 2011. On the left (A, C), imaginary views of « invented » caves and, on the right (B, D), scientific representations of existing caves (Padirac, Foussoubie). The images on top (A, B) show speleological progression representations, while those on the bottom (C, D) illustrate the 3D karst geometry. The representation codes and the iconography used in these four cases make it possible to show the evolution of underground images (here late 19<sup>th</sup> / early 21<sup>st</sup> century) but do not make a distinction between imagination and reality.

Les deux images de droite sont des représentations scientifiques de réseaux karstiques réels, les deux images de gauche sont des constructions imaginaires de mondes souterrains. Et pourtant, que de similitudes entre ces représentations. Les deux images du bas comme les deux du haut semblent appartenir aux mêmes répertoires iconographiques. Pourtant, la séparation entre imaginaire et réel est une lecture de la droite à la gauche. N'est-ce pas la preuve qu'entre les deux, il n'est qu'une mince frontière, plus faible que la variabilité des images au cours du temps (ici entre la fin du XIX<sup>e</sup> et le début du XIX<sup>e</sup> siècle) ? Finalement, n'y a-t-il pas autant dans les représentations imaginaires que dans les représentations construites du réel souterrain, nos propres perceptions, projections et appréhensions des images des grottes et du karst ?

## Remerciements

Nous tenons à remercier Daniel André pour la remise du croquis de Jean-Marie Chauvet et ses informations sur E.-A. Martel ainsi que Christophe Gauchon pour ses précieux éclairages sur la spéléologie au cours des XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles. Nous remercions de même les éditions Dupuis pour la reproduction de la case de bande dessinée de Yoko Tsuno et la Padiracothèque (SES de Padirac) pour l'autorisation de reproduction d'Édouard-Louis Boudier. Enfin, nous remercions Grégory Dandurand et Nathalie Vanara pour leurs relectures attentives.

## Références

- André D., Duthu H. (1999)** – L'homme qui voyageait pour les gouffres. Actes du colloque de Mende. Archives départementales de la Lozère, 421 p.
- Angas J., Le Guillou Y., Mauduit E. (2014)** – Vers une normalisation de la documentation 3D de parois ornées : les grottes de Niaux (Ariège) et de Roucadour (Lot). *Karstologia*, 63, 21-34.
- Aujoulat N., Perazio G., Faverge D., 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. Société Préhistorique Française, 6, *Karstologia mémoires*, 11, 189-197.
- Barthes R. (1980)** – La chambre claire : Note sur la photographie. Éditions de l'Étoile, Gallimard, Le Seuil, Paris, 192 p.
- Baudrillard J. (1981)** – Simulacres et simulations. Éditions Galilée, Paris, 285 p.
- Bird A.-J., Springer G.-S., Bosch R.-F., Curl R.-L. (2009)** – Effects of surface morphologies on flow behavior in karst conduits. Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Congress of Speleology, 1417-1421.
- Bouchereau J. (1967)** – La grotte de Miremont en Périgord. *Spelunca Mémoires*, 5, 116-126.
- Burens-Carozza A., Grussenmeyer P., Guillemin S., Carozza L., Bourrillon R., Petrognani S. (2011)** – Numérisation 3D de la grotte ornée des Fraux, Saint-Martin-de-Fressengeas, dordogne, France - approche multiscalaire. Collection EDYTEM. Cahiers de géographie, Laboratoire EDYTEM, 183-189.
- Camus H. (2019)** – Comprendre les cavités naturelles et leurs remplissages par l'approche karstologique. Actes du colloque Paul Ambert « Paysages pour l'Homme », Ass. Cult. des Amis de Cabrières, 45-60.
- Caprioli M., Minchilli M., Scognamiglio A., Strisciunglio G. (2003)** – Using photogrammetry and laser scanning in surveying monumental heritage : le grotte di Castellana. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34 (5/W12), 107-110.
- Chazaly B., Saillant M., 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 P. (1944)** – Distinction morphologique entre deux types d'érosion souterraine. *Revue de Géographie Alpine*, 22 (3), 475-492.  
DOI : 10.3406/rga.1944.5068
- Day A. (2002)** – Cave Surveying [Cave Studies Series 11]. British Cave Research Association, Buxton, 40 p.
- Dandurand G., Paillet P., Man-Estier E. (2017)** – Spéléogénèse et évolution géomorphologique de la grotte ornée de Fronsac (Dordogne, France). *Karstologia*, 70, 15-22.
- Delannoy J.-J. (1982)** – La karstographie souterraine. *Revue Belge de Géographie*, 1, 61-68.
- Delannoy J.-J., Debard E., Ferrier C., Kervazo B., Perrette Y. (2001)** – La cartographie morphologique souterraine : apports aux reconstitutions paléogéographiques et paléoenvironnementales. Application à la grotte Chauvet (Ardèche - France). *Quaternaire*, 12 (4), 235-248.  
DOI : 10.3406/quate.2001.1696
- Delannoy J.-J., Sadier B., Jaillet S., Ployon E., 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*, 56, 17-34.  
DOI : 10.3406/karst.2010.2679
- Delannoy J.-J. et Geneste J.-M. (dir.) (2020)** – Atlas de la grotte Chauvet-Pont d'Arc. Volume 1 de la Monographie de la grotte Chauvet-Pont d'Arc. Documents d'archéologie française – Éditions de la Maison des sciences de l'Homme, Paris, 368 p.
- Fabre G., Audetat M., Cigna A.A. (1978)** – Signes spéléologiques conventionnels. Mémoire du centre d'études et de recherches géologiques et hydrogéologiques, Montpellier, 44 p.
- Faucher M., Mautref A. (1991)** – Spéléographie. Chez les auteurs, Cachan, 334 p.
- Flocon A., Taton R. (1963)** – La Perspective. PUF, coll. « Que sais-je ? » n° 1050, Paris, 128 p.,
- Fouéré P., Bailon S., Bonnissent D., Chancerel A., Lenoble A., Grouard S., Mora P., Pinçon K., Queffelec A. (2011)** – Capesterre-de-Marie-Galante : Grotte du Morne-Rita. Bilan scientifique de la région Guadeloupe, SRA Guadeloupe, Pointe-à-Pitre, 34-37.
- Fritz C., Tosello G., Azéma M., Moreau O., Perazio G., Peral J. (2012)** – Restauration virtuelle de l'art pariétal paléolithique : le cas de la grotte de Marsoulas. In Situ [en ligne], 13.  
DOI : 10.4000/insitu.6774
- Fumey G. (2007)** – Courbet, peintre du calcaire. *Karstologia*, 50, 49-51.  
DOI : 10.3406/karst.2007.2611
- Gauchon C., Jaillet S., Prud'homme F. (2012)** – Dynamique de la construction topographique et toponymique à l'aven d'Orgnac.

- In Delannoy J.-J., Jaillet S., Sadier B. (Eds), Karsts, paysages et préhistoire, Collection Edytem, Cahiers de Géographie, 13, 157-176.
- Gauchon C., Boche E., Jaillet S. (2013)** – A masterpiece of historic cave surveying: several representations of Miremont-Rouffignac cave (Dordogne, France, XVIII-XIX<sup>th</sup> centuries). Proceedings of the 16th International Congress of Speleology, Vol. 1, Brno, 47-50.
- González-Aguilera, D., Muñoz-Nieto, A., Gómez-Lahoz, J., Herrero-Pascual, J., & Gutierrez-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
- Hajri S., Sadier B., Jaillet S., Ployon E., Boche E., Chakroun A., Saulnier G.-M., Delannoy J.-J. (2009)** – Analyse spatiale et morphologique d'une forêt de stalagmites par modélisation 3D dans le réseau d'Ornac (Ardèche, France). *Karstologia*, 53, 1-14.  
DOI : 10.3406/karst.2009.2644
- Häuselmann Ph. (2002)** – UIS Cave symbols: the definitive list. *Acta Carsologica*, 31 (3), 165-178.  
DOI : 10.3986/ac.v31i3.386
- Häuselmann Ph. (2011)** – UIS Mapping Grades. *International Journal of Speleology*, 40 (2), IV-VI.
- Jaillet S., Sadier B., Arnaud J., Azéma M., Boche E., Cailhol D., Filipponi M., Le Roux P., 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, Collection Edytem, 12, 119-130.
- Jaillet S., Sadier B., Perazio G., Delannoy J.-J. (2014)** – Une brève histoire de la 3D en grotte. *Karstologia*, 63, 3-20.
- Jaillet S., Delannoy J.J., Monney J., Sadier B. (2017)** – 3-D Modelling in Rock Art Research. *Terrestrial Laser Scanning, Photogrammetry, and the Time Factor*. In David B., McNiven I.J. (Ed.), *The Oxford Handbook of the Archaeology and Anthropology of Rock Art*, Oxford Handbook, Online Publication.  
DOI : 10.1093/oxfordhb/9780190607357.013.45
- Jaillet S., Boche E., Delannoy J.J., Geneste J.M., Le Guillou Y., Maksud F., Monney J., Perazio G., Sadier B. (2020)** – Chapitre 1. Une image topographique de la grotte Chauvet-Pont d'Arc. In Delannoy J.-J., Geneste J.-M. (Eds), *Atlas de la grotte Chauvet-Pont d'Arc. Volume 1 de la Monographie de la grotte Chauvet-Pont d'Arc. Documents d'archéologie française – Éditions de la Maison des sciences de l'Homme*, Paris, sous presse.
- Lerma J.L., Navarro S., Cabrelles M., Villaverde 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 (3), 499-507.  
DOI : 10.1016/j.jas.2009.10.011
- Lima P. (2012)** – Les métamorphoses de Lascaux. *L'atelier des artistes, de la Préhistoire à nos jours*. Synops Éditions, Montélimar, 156 p.
- Lismonde B. (1991)** – Le trou qui souffle. Comité Dép. de Spéléologie Isère, Grenoble, 148 p.
- Lorblanchet M. (1982)** – Les dessins noirs du Pech-Merle. Congrès préhistorique de France, XXI<sup>e</sup> session, Montauban-Cahors, Société de Préhistoire Française, t.1, 178-207.
- McFarlane D.A., Roberts W., Buchroithner M., Van Rentergem G., Lundberg J., 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.  
DOI : 10.5038/1827-806X.44.2.8
- Martel E.-A. (1894)** – *Les abîmes : les eaux souterraines, les cavernes, les sources, la spéléologie : explorations souterraines effectuées de 1888 à 1893 en France, Belgique, Autriche et Grèce*, Ed. C. Delagrave, Paris, 580 p.
- Monney J. (2018)** – L'art pariétal paléolithique de la grotte aux Points d'Aiguëze : définition d'un dispositif pariétal singulier et discussion de ses implications. *Karstologia*, 72, 45-60.
- Nehme C., Jabbour-Gedeon B., Gerard P.-C., Sadier B., Delannoy J.-J. (2009)** – Reconstitution spéléogénique de la grotte de Kanaan (Antélias, Liban). Contribution à la morphogenèse du nahr Antelias. *Karstologia*, 54, 21-36.  
DOI : 10.3406/karst.2009.2657
- Oludare Idrees M., Pradhan B. (2016)** – A decade of modern cave surveying with terrestrial laser scanning: A review of sensors, method and application development. *International Journal of Speleology*, 45 (1), 71-88.
- Pallier C., Jarry M., Bon F., Camus H., Rabanit M., Bruxelles L. (2016)** – Evolution karstique, enregistrements sédimentaires et occupations humaines de la grotte du Mas d'Azil (Ariège, France). *Karstologia*, 68, 31-38.
- Sadier B., Delannoy J.-J., Benedetti L., Bourlès D., Jaillet S., Geneste J.-M., Lebatard A.-E., Arnold M. (2012)** – Further constraints on the Chauvet cave artwork elaboration. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (21), 8002-8006.  
DOI : 10.1073/pnas.1118593109
- Sadier B. (2013)** – 3D et géomorphologie karstique : La grotte Chauvet et les cavités des Gorges de l'Ardèche. Thèse de Doctorat en Géographie, Université Savoie-Mont-Blanc, 482 p.
- Shaw T.-R. (1992)** – History of cave science. The exploration and study of limestones caves, to 1900. *The Sydney Speleological Society*, second edition, Sidney, 338 p.
- Zlot R., Bosse M. (2014)** – Three-dimensional mobile mapping of caves. *Journal of Cave and Karst Studies*, 76 (3), 191-206.  
DOI : 10.4311/2012EX0287

### Abridged English Version

When Chauvet and his companions explored the now famous Chauvet cave in 1994, they drew a sketch from memory of its shapes and dimensions (fig. 1). This handmade topography was the first image of the cave to have been made in more than 30,000 years.

Topographic representation rules were followed to give an overall vision of the caves, because the karst environment cannot be perceived entirely during exploration or study. However, the image or the topography itself is a distanced interpretation of the cave.



Contrary to its acquisition phase, the topography itself is generally made from an external viewpoint and thus is always a perspective or representation that generates some distance between the reader and the cave.

We start this paper with an analysis of underground images and representations through history and of how cave topography has become formalized with graphical codes. Technological improvements and 3D spreading led to the rethinking of those images of the underground world. Which project is right for the 3D maker? And which perception for the receiver? There are indeed differences between the interpretation of the reality and the generated fantasy of the representations. The gap between the project to represent the cave on the one hand and how it is perceived by the reader on the other is similar to that which exists between reality and imagination.

The difficulty of representing karstic landscape led to informal views and cutaway representations from the middle of the 18<sup>th</sup> century. Those images were already made with a 3D notion, as seen, for example, for the Reka cave in Slovenia (fig. 2).

However, at the end of the 18<sup>th</sup> century, explorers of the underground world gradually started using maps and cross-sections. Caves such as Rouffignac were extensively represented using maps and cross-sections from the very early date of 1824. Martel finally added his own topographies in 1883. Toponyms and cartography methods were by then already established (fig. 3).

The 20<sup>th</sup> century led to codification of subterranean topography as it can still be found today, for example with the British Cave Research Association. Questions such as resolution, precision and accuracy are raised during the survey, as is the process of discretization of a continuous space (the cave reality) to a discrete one (topographical stations). There is always a limit to representativeness in speleological survey resolution, and accuracy is dependent upon the instruments and skills of the topographers. Since the 1990s, computer developments have led to automation of the acquisition and transcription phases of the cave surveys. Numerous software applications can now calculate and propose mathematical solutions for estimating topography errors.

The end of the 20<sup>th</sup> century led to a diversification of cave representations, by different types of users and for multiple purposes. Speleologists, surveyors, scientists and those communicating on the subject are now using cave topographies. In the scientific field of geomorphology, cave topography has a special role because it is the raw support for the subterranean landscape and therefore for its composition and organization. Cartographical codification has thus also been developed for representing the inner morphologies of caves since the 1970s. For the Chauvet cave study, the geomorphological mapping of its surface on a 1:50 scale for a 1:100 edition provides for a density of details that give meaningful expression to subterranean cartography (fig. 4).

Because of their inner 3D morphology, caves are naturally well suited for 3D representation. Scaled models built with plaster and wire frames have been used to represent karst networks since the beginning of the 20<sup>th</sup> century. Perspective-based drawings were also extensively used during 1970s and 1980s, not in order to give the true dimensions of the caves, but to reflect the idea of depth and volume for easier understanding (fig. 5). However, those quite esthetic images do not respect angles and distances.

Since the 1990s, LiDAR-based technologies and the development of

photogrammetry have led to a turning point in karst representation. Photogrammetry began to be applied for recording parietal art. The 3D layouts stemming from it are now mainly processed with image multi-correlation software that developed at the same time as the growing capacity of computer calculation. However, it was the arrival of lasergrammetry at the end of the 1990s that brought about in-depth change in the 3D representation of caves. Its use was launched in 1994, in caves in Viermouly, Dordogne, by Aujoulat. It has been used extensively since then not only for recording rock art and for geomorphology, but also for infrastructure-building projects. LiDAR technology offers the opportunity to survey unreachable areas in caves, with high resolution and accuracy. It can sometimes lead to the production of a clone – a digital copy of the cave itself.

The making of a digital clone is based on a dense point cloud (fig. 6), that is then meshed to obtain a Triangular Irregular Network (TIN) model. The point cloud is thus converted into a digital skin that depicts the cave surface. It can be textured using photographs or with the combination of a LiDAR point cloud (for morphological accuracy) and a photogrammetry one (for RGB colors). Today, only the Lascaux cave in Dordogne meets those criteria; it delivers a new cave image, viewed from the outside, as if we were in the limestone (fig. 7). While those kinds of images are the strength of 3D technologies, are they always perceived in the same way by their users?

As accurate as numerical clones can be, they are still interpretations of reality, because choices are made during fieldwork acquisition. Indeed, as 3D use requires technical knowledge, interpretations are often reduced to views that are delivered by 3D engineers for scientists. Some accessible internet-based viewers such as sketchfab nevertheless do allow spectators to become users of the 3D model and to choose their own views and perspectives.

For geomorphological analysis, 3D models in caves have sustained high-standard scientific discoveries and have become standards for accurate mapping, as they can provide surface topography or highly detailed cross-sections. They have also been used to reshape paleo-topographies in the Chauvet cave using discrete data (fig. 8). Those new images are too often understood as a reconstruction of the past landscape: they should rather be understood as geometrical constructions for one object, based on the knowledge we have at the time of the process, and that further fieldwork could make better. But is this representation really understood by the viewer? Between reconstruction of the reality and a scientific interpretation built considering uncertainties, there is room for freedom in perception of the representations than can fuel one's imagination of the cave world.

The case of the reconstruction of the Chauvet cave paleo-entrance is an interesting one. The use and ownership of its 3D image has spread beyond the circle of scientists who initially built it. It also reveals that the expected image is not always the more accurate one. Indeed, the realistic and naturalistic representation of an object is often accompanied by esthetic criteria. This is unfortunately the case for many photogrammetry models built without geometrical control: they are beautiful but false, and, while often satisfying for the viewer, they are in opposition with the surveyor's model, whose ascetic esthetics can be hard to appreciate.

In the end, imagination plays a role in karst representation, and different topographies, made for different projects, can thus not be

*compared. For example, the many representations of a single karst system are not in opposition but co-exist as 3D numerical clones, virtual reality products, touristic iconographies, speleological topographies, surveyor models, and even comics (fig. 9).*

*This paper seeks to show the diversity of representations of caves in history, and that those images only partially represent the karst*

*system and are built by various kinds of stakeholders who use them for different purposes and thus have different perceptions and acceptance of those images. This is especially the case for the images produced for scientific purposes and taken out of their scientific context and that live a life of their own in other circles, such as those of the media and tourism.*