Collection EDYTEM

Numéro 12 - Année 2011

Coordination : Stéphane Jaillet Estelle Ployon Thierry Villemin

IMAGES et MODÈLES 3D en MILIEUX NATURELS





Numéro 12 - Année 2011

Images et modèles 3D en milieux naturels

Coordination de l'ouvrage : Stéphane Jaillet, Estelle Ployon et Thierry Villemin

















Comité éditorial de la Collection EDYTEM : Laurent ASTRADE (dir.), Jean-Jacques DELANNOY, Mélanie DUVAL-MASSALOUX, Marc DZIKOWSKI, Dominique GASQUET, Christophe GAUCHON, André PAILLET, Yves PERRETTE, Magali ROSSI, Georges-Marie SAULNIER.

Comité de rédaction du présent numéro : Stéphane JAILLET, Estelle PLOYON, Thierry VILLEMIN.

Comité de lecture du présent numéro : Laurent ASTRADE, Xavier BODIN, William CASTAINGS, Philip DELINE, Dominique GASQUET, Christophe GAUCHON, Pierre GRUSSENMEYER (Insa, Strasbourg), Stéphane JAILLET, Laure NUNINGER (Chrono Environnement, Besançon), Estelle PLOYON, Antoine RABATEL (LGGE, Grenoble), Ludovic RAVANEL, Pierre - Jérôme REY, Xavier RODIER (Citeres, Tours), Georges-Marie SAULNIER, Thierry VILLEMIN.

Mise en page : André PAILLET.

Les personnes ci-dessus, citées sans indication de structure d'appartenance, sont membres du laboratoire EDYTEM.

NB : Les points de vue et conclusions développés dans les articles n'engagent que leurs auteurs.

La publication de ce volume a été réalisé dans le cadre de l'école thématique CNRS n° 1111093 «*Images et modèles 3D en milieux naturels* » qui a eu lieu du 14 au 17 juin 2011 au Bourget du Lac, soutenue par les structures suivantes :

Institut Écologie et Environnement (INEE), les instituts INSHS, INSU et INS2I, l'Université de Savoie et son UFR CISM, le laboratoire EDYTEM, Université de Savoie/CNRS, la structure fédérative Vulnérabilités des Ouvrages aux Risques (VOR), la Société Française de Photogramétrie et de Télédétection (SFPT), l'Association Française de Topographie (AFT), l'Association Française de Karstologie (AFK).

Imprimé par : Groupe Albert Brailly, ZI des Dragiez, 110 rue des Vergers, 74800 La Roche-sur-Foron.

Exemplaires disponibles au Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie, Campus scientifique, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex, France, ou auprès de : sec-edytem@univ-savoie.fr

Site web du laboratoire : http://edytem.univ-savoie.fr/

On trouvera à la fin de cet ouvrage la présentation de l'ensemble des publications du Laboratoire EDYTEM

Dépôt légal : juin 2011

ISSN: 1762-4304 - ISBN: 978-2-918435-04-4 - EAN: 9782918435044

TOPOGRAPHIE, REPRÉSENTATION ET ANALYSE MORPHOLOGIQUE 3D DE DRAINS, DE CONDUITS ET DE PAROIS DU KARST

TOPOGRAPHY, 3D REPRESENTATION AND MORPHOLOGICAL ANALYSIS OF DRAINS, CONDUITS AND WALLS OF KARST

STÉPHANE JAILLET¹, BENJAMIN SADIER^{1, 2}, JUDICAËL ARNAUD³, MARC AZÉMA⁴, ELISA BOCHE^{1, 5}, DIDIER CAILHOL¹, MARCO FILIPPONI⁶, PATRICK LE ROUX⁷, ERIC VARREL⁸

¹ Laboratoire Edytem, Université de Savoie/CNRS, Campus scientifique, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex, France. ² Cabinet Perazio, 137 rue du Mayoussard, 38430 Moirans, France.

³ Comité départemental de Spéléologie de l'Ardèche, les Blaches, 07120 Chauzon, France.

⁴ Laboratoire TRACES, Université de Toulouse 2 le Mirail /CNRS, Maison de la Recherche Bât 26, 5, 31058 Toulouse Cedex 9, France.

⁵ Centre national de la Préhistoire, 38 rue du 26^e Régiment d'Infanterie, 24000 Périgueux, France.

⁶ GEOLEP, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL), Station 18, CH 1015, Lausanne, Suisse.

⁷ Groupe de Recherches Biospéléologiques, 13 impasse Le Roux, 29000 Quimper, France.

⁸ ATM3D Rhône-Alpes, Route de Saint Sylvestre, Le trolliet, 01150 Sainte-Julie, France.

Résumé

L'analyse morphologique des drains, des conduits et des parois du karst passe traditionnellement par des représentations graphiques 2D (plan et coupes) qui ne rendent pas toujours compte de la complexité géométrique de cet objet éminemment 3D. L'apparition et la démocratisation d'outils informatiques, de traitement et de rendu 3D permettent aujourd'hui de revisiter cette analyse morphologique. Les relevés souterrains filaires (coordonnées polaires successives) sont désormais traités en squelette 3D. De même les relevés lasergrammétriques permettent maintenant de générer des modèles denses de portion de conduits ou de parois. Après avoir présenté les différents modes de discrétisation de l'espace souterrain, nous proposons trois exemples d'application à trois échelles différentes : (i) à l'échelle du massif, avec le réseau de Foussoubie où un modèle à maille décamétrique permet de rendre compte de la géométrie des drains ; (ii) à l'échelle d'un conduit avec le réseau de Midroï où un relevé laser dense à échelle pluri-centimétrique permet de reconstituer les étapes du remplissage sédimentaire et enfin (iii) à l'échelle du panneau avec le réseau de Baume Latrône où un modèle dense à échelle millimétrique permet d'analyser la géométrie des vagues d'érosion mis en place en régime noyé.

Mots-clés : lidar terrestre, modèle 3D, karst, endokarst, Foussoubie, Midroï, Baume Latrône.

Abstract

Morphological analysis of drains, conduits and walls of karst traditionally uses 2D graphical representations (plan and sections) that do not always reflect the complex geometry of the object in 3D. The development and availability of tools, processing and 3D rendering shows that it is now possible to revisit this type of morphological analysis. Topographic wireline surveys (coordinate successive polar) are now treated in 3D. Similarly, scanned dense-point clouds (terrestrial lidar) now allow us to generate models of portions of drains or walls. After presenting the different modes of underground space representation, we offer three examples of application to three different scales: (i) at the system scale, with the network model "Foussoubie", which can account for the geometry of the drains; (ii) at the conduit scale, with the high resolution TIN model of "Midroï cave", which allows us to reconstruct the stages of infilling; and finally (iii) at the wall scale, using data from "Baume Latrone cave", where a dense millimetre-scale model was used to analyze the geometry of erosional scallops generated in the phreatic zone.

Keywords: terrestrial lidar, 3D model, karst, underground karst, Foussoubie, Midroï, Baume Latrône.

INTRODUCTION

Par l'organisation de ses formes comme par la géométrie de ses conduits, le karst est par nature un objet éminemment 3D. Dès le 19^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 aux profils de conduits (Shaw, 1992 ; Gauchon, 1997). Cependant, si ce mode de représentation, toujours d'actualité, permet en effet de représenter une partie importante des informations contenu dans le karst, elle oblige à un effort intellectuel difficile dans la perception de la troisième dimension.

C'est pourquoi très tôt, certains ont eu recours à la maquette pour représenter cette complexité des conduits, maquette qu'ils pouvaient même enrichir au fur et à mesure du développement des recherches spéléologiques dans tel ou tel réseaux.

Le premier qui a représenté le karst en 3D fut peut être Stanislas Meunier (1902). Avec de l'eau acide, il avait réalisé des avens dans des blocs de calcaire. Martel cite ce travail dans sa « *Spéléologie au XX^{ème} siècle* ». Martel ensuite, 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 plâtre (Daniel André, communication personnelle).

Plus tard, une méthode de présentation des volumes souterrains par les anaglyphes est proposée et au moins 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 lunette rouge et bleu, les anaglyphes de grottes constituent une méthode précoce de représentation du volume en 3D (Photo 1). Elle sera suivie plus tard par des modes de représentation basée sur la stéréoscopie.



Photo 1 - Les deux éditions des anaglyphes de grotte à la fin des années 1930. Un premier mode de représentation des volumes souterrains en relief, par l'utilisation de lunettes bleu et rouge et de couples de photographies.

En 1942, J. Harlen Bretz publie un volumineux article dans lequel il décrit un certain nombre de formes de l'endokarst. A plusieurs reprises, il a recours au blocdiagramme 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.

Pierre Chevalier (1944 a) a réalisé une maquette, en fil de fer, à l'échelle du 1/1000 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 alors quant à la spéléogenèse des conduits du karst (Chevalier, 1944b). Dans un esprit similaire, les « Drabons et Chieures de Méaudre » ont réalisé en 1988 une maquette en plexiglas à 1/1000 du Trou qui Souffle (Lismonde, 1991). De même, le Groupe Spéléo Valentinois (Garnier, 2008) à réalisé une maquette en 3D (à base de fil de cuivre) de la grotte de la Luire (44 km de développement), toujours visible sur le site. Accompagné de schémas en perspective (Garnier, 2008), elle constitue un support à la réflexion sur le fonctionnement hydrologique de ce très grand réseau du Vercors.



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, en 1952.

On l'aura compris à travers ces différents exemples, la réalisation de modèles analogiques, de représentation en perspective ou de maquettes 3D, sans se substituer aux topographiques classiques de cavités, constitue un complément visuel, support indéniable des réflexions géomorphologiques. C'est dans cet esprit que se situe la présente note. Profitant conjointement des développements informatiques et métrologiques des vingt dernières années, on a vu apparaître en effet une gamme de logiciels adaptés à la visualisation 3D ainsi que des outils de mesures laser de plus en plus rapides et performants (lidar terrestre notamment). Ces développements autorisent aujourd'hui à revisiter quelques peu l'image du monde souterrain, ceci à différentes échelles, ce que les technologies précédentes ne permettait pas.

I - UNE DISCRÉTISATION DU MONDE SOUTERRAIN

Représenter l'endokarst c'est donc, dans un premier temps, faire des plans et des coupes. C'est aussi discrétiser l'espace souterrain, c'est-à-dire adapter le mode de représentation à l'échelle de travail. C'est aussi être capable d'intégrer la troisième dimension.

1 - De la 2D à la 3D

En cartographie « classique », la dimension de l'altitude a toujours été représentée par des hachures ou des courbes de niveau. On utilise par exemple, des MNT, à maille régulière ou non, dans lesquels le z est l'expression de l'altitude. Pour autant, il ne s'agit pas véritablement de 3D, mais plutôt de 2,5D. Dans le domaine de l'endokarst, les formes sont repliées sur elles-mêmes, elles se superposent, générant une information géométrique que les représentations 2,5D (type raster) ne permettent pas de démêler. Ce type de représentation en 2D ou 2,5D s'est donc très tôt heurté à la complexité des volumes souterrains, complexité qui apparaît (i) à l'échelle de l'ensemble des drains (étagement des conduits les uns sur les autres, multiplicité des connexions, variabilité des dimensions...) mais aussi (ii) à l'échelle des formes elles-mêmes (morphologie pariétale) ou des dépôts. Or ces formes et formations de l'endokarst constituent, quelle qu'en soit l'échelle, un support informationnel qui est au cœur des travaux de géomorphologie endokarstique notamment pour les reconstitutions paléogéographiques.

Pour autant les solutions de représentations en plan et coupes sont toujours en vigueur aujourd'hui (Figure 1) et, depuis une quinzaine d'années, le recours aux solutions informatiques a permis d'automatiser et d'accélérer un certain nombre de procédures dans le traitement et le rendu de ces 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). Cependant, l'acquisition proprement dite n'a guère changé. Les tronçons de conduits sont toujours assimilés à un squelette filiforme (Faucher et Mautref, 1991). Les stations sont acquises les unes derrière 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 2). Il s'agit véritablement d'une discrétisation des volumes souterrains



Figure 1 - Représentation topographique classique en plan coupe et section d'un drain spéléologique.



Photo 3 - Matériel de topographie classique en spéléologie : main gauche, un compas (ici couplé à un clinomètre) pour la mesure des angles (direction et pente) et main droite, un distance-mètre laser pour la mesure des longueurs. La précision angulaire est de l'ordre du demi-degré, celle des longueurs est centimétrique et la précision du positionnement des stations est décimétrique (Photo Stéphane Jaillet).

Figure 2 (ci-dessous) - Discrétisation spéléologique à maille métrique à décamétrique et visualisation 3D sur des gammes de logiciels dédiés à la spéléologie (ici Visual Topo).



à des mailles fréquemment pluri-métriques et c'est la qualité des dessins levés sous terre qui, s'appuyant sur le squelette, permet de véritablement rendre compte des morphologies et des dépôts à grande échelle.

Ce type d'acquisition numérique s'avère très satisfaisante 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 alti 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-niveau de base ou pour l'indentification de niveaux référentiels de karstification (Martineau, 2003 ; Filipponi et Dickert, 2007 ; Filipponi *et al.*, 2008).

2 - Lasergrammétrie endokarstique

Passer à une échelle plus fine implique une discrétisation plus fine des objets investigués. Le recours aux lidars terrestres constitue alors une solution intéressante. Bien que coûteuse et impliquant le recours à 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. Différents scanners, actuellement sur le marché autorisent des vitesses d'acquisition variant de 2 000 à plus de 500 000 points par seconde. La procédure d'acquisition des points sur le terrain est la suivante : mise en station de l'appareil, multiplication des positions de scan, défini-



tion des fenêtres de scan, choix du pas angulaire déterminant la densité du nuage de points (Figure 3). 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 présentent l'avantage d'être une forme pure sur laquelle un ajustement mathématique sur un nuage de points donne toujours le même centroïde quelques soit la position de scan (Photo 4). Ces sphères permettent d'assembler les scènes par ajustement de leurs centres. En complément, des méthodes par best-fit (reconnaissance de formes sur le nuage de points, basée sur une minimisation des distances en 3D sont parfois utilisées. Photo 4 - Mise en œuvre d'un scanner 3D courte portée (Leica HDS 6000) avec référencement local par des sphères (Photo Stéphane Jaillet).

La qualité des mesure 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). Le pas du levé est fonction de la problématique de recherche. Il n'est pas constant, il 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, nettoyer, filtrer et trianguler le nuage de points brut. Il subsiste en effet fréquemment quelques points aberrants dans la scène liés à des problèmes de réflexion ou à des effets de bord (voile de mariée par exemple qui sont la marque des points mal positionnés, car tangents aux objets scannés). Ces points sont la plupart du temps éliminés « à la main ». De plus, 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,



Figure 3 - Procédure de scannerisation 3D sur le terrain par différentes stations successives. Les sphères servent au référencement et à l'assemblage des scènes 3D entre elles. Des logiciels de retro-ingénierie type 3DReshaper sont utilisés pour le maillage et pour l'inspection du modèle. Ici le modèle de Midroï.

(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© et 3DReshaper©, deux logiciels de retro-ingénierie fréquemment utilisés pour ce type de traitement.

3 - 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) (Figure 3). 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 fondamentale pour la suite des traitements, notamment l'identification des ruptures 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.

La constitution d'un modèle 3D en milieu souterrain résulte donc d'une véritable chaîne opératoire. Si elle est menée à l'échelle d'un réseau karstique, c'est la succession des mesures polaires et des informations inhérentes à chaque station qui constitue le squelette et qui assemblé, permet la construction du modèle à des mailles larges (métriques à décamétriques). A une échelle plus fine, le relevé lasergrammétrique et la triangulation permettent de constituer des modèles 3D fins de drain, de carrefours ou de parois à des mailles bien plus fines (millimétriques à décimétriques). Différentes échelles d'investigations impliquent différentes techniques d'acquisitions et des suites logicielles variées pour les traitements. Pour les travaux à petite échelle, citons Toporobot, Visual Topo, DPTopo ou Therion, tous libres (Heller, 1983; Budaj et Mudrák, 2008). Pour les maillages et l'inspection des modèles 3D, citons 3DReshaper, Realworks, Polyworks ou MeshLab, ce dernier étant libre.

II - DES PROBLÉMATIQUES NÉCESSITANT LE RECOURS À LA 3D

Nous présentons ici trois exemples de travaux géomorphologiques où le recours à la 3D a permis de répondre à une question sur l'endokarst que des investigations « classiques » n'aurait pas pu (ou difficilement) résoudre sans cette opportunité. Ces exemples sont déclinés selon trois échelles : (i) celle du massif karstique avec le système de Foussoubie (Ardèche), (ii) celle du drain avec un carrefour dans le réseau de Midroï (Ardèche) et enfin (iii) celle d'une portion de paroi avec Baume Latrone (Gard).

Pour chacun de ces exemples, nous précisons les conditions d'acquisition des données sur le terrain, présentons une analyse ou un ajustement 3D réalisé sur le modèle et montrons en quoi le traitement apporte un éclairage intéressant et complémentaire aux travaux traditionnellement réalisés sur le terrain.

1 - Une application à l'échelle du massif karstique : exemple du système de Foussoubie

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 km. Son fonctionnement est caractérisé par des crues importantes ennoyant une majeure partie des conduits. Ceux-ci présente d'ailleurs des morphologies caractéristiques de la zone épinoyée (Photo 5) avec profil en montagnes russes et disparité spatiale des remplissages (Häuselmann, 2010). Réseau encore mal étudié du fait de ces crues et de ces mises en charges qui en limitent l'accès, Foussoubie n'en reste pas moins une cavité



Photo 5 - Le système karstique de Foussoubie (Ardèche) est un drain caractéristique de la zone épinoyée. D'un développement de plusieurs kilomètres, entre la perte (la goule) à l'amont et la zone des exutoires en rive droite de l'Ardèche, il présente une morphologie générale en montagnes russes avec une disparité spatiale des remplissages, associés aux crues et mises en charges dont il est l'objet. L'analyse 3D des 23 kilomètres du réseau montre le rôle fondamental de la structure (fracture et stratification) sur la géométrie des drains (Photo Stéphane Jaillet).



Figure 4 - Vue 3D synthétique du système de Foussoubie dans son contexte topographique, géologique et géomorphologique. L'analyse morphologique 3D permet d'identifier le rôle des contacts géologiques sur l'organisation des conduits.

passionnante. Sa topographie, débutée dans les années 1960 a été finalisée dans les années 1980 (Le Roux, 1984) sous la forme d'un document papier au 1/2 500 ° et de planches au 1/500 °. Récemment, l'ensemble des données chiffrées acquises durant deux décennies de topographie souterraine a été saisi sous *Visual Topo* pour la production d'un modèle 3D complet de 31 960 sommets et 59 916 faces, correspondant à 2 668 visées sur le terrain et 22 855 m de développement. La longueur moyenne des visées est de 8,56 m ce qui donne une idée de la maille du modèle. Généré sous *Visual Topo*, puis exporté sous *DPTopo*, le modèle est ensuite exploité sous format *.wrml sous *MehLab*, sous *3DSMax* ou sous des logiciels internes de traitements statistiques. Le modèle 3D a ensuite été intégré à un modèle topographique et géologique plus vaste couvrant la totalité du réseau et une partie du bassin versant d'alimentation. L'analyse morphologique de l'organisation des conduits en 3D couplée à la géométrie des plans géologiques (stratification, failles et fractures) offre une lecture intéressante du système karstique. Il est ainsi possible d'analyser comment le réseau se comporte dans la masse karstique urgonienne (Figure 4). Dans la partie amont du réseau, il se développe au-dessus de la vire marneuse v3, dans les calcaires urgoniens N4c, puis à la faveur d'une faille, il passe sous cet ensemble et se développe dans les calcaires N4b. Plus à l'aval, le réseau se complexifie au droit de la zone des exutoires et présente, sur plus d'une centaine de mètres de dénivellation, un



Figure 5 - Analyse 3D du système de Foussoubie. Le traitement statistique du modèle 3D permet d'identifier ici les directions majeurs des conduits (associées au contexte tectonique local) et l'étagement de ceux-ci (associé aux variations de niveau de base du réseau hydrographique dont il est affluent).

étagement de conduits, associé aux variations passées du niveau de l'Ardèche (Bigot, 2002 ; Mocochain et *al.*, 2010).

Le modèle a ensuite été traité avec CaSuDaAn (Cave Survey Data Analyser) développé par M. Filipponi. Cette analyse 3D des 23 kilomètres du réseau permet de dégager les directions de conduits et montre le rôle fondamental de la structure géologique (fracture et stratification) sur la géométrie des drains (Figure 5). Deux directions prédominent, l'une NE, associée aux terminaisons septentrionales du fossé d'effondrement d'Alès et l'autre conjuguée, SSE. Plus intéressant, le traitement permet une classification de l'étagement des conduits. On identifie ainsi clairement le niveau epiphréatique principale correspondant au fonctionnement en crue du réseau souterrain et présentant le plus de développement spéléologique. Le niveau des circulations pérennes n'étant pratiquement pas connu, il n'apparaît pas. Deux autres niveaux sub-fossiles sont identifiés, l'un correspondant à l'importante galerie des Pyjamas (et d'autres conduits) et l'autre moins marqué, correspondant à des conduits intermédiaires moins bien identifiés pour l'instant et qu'il conviendra de rechercher (Figure 5).

L'intérêt majeur de ce type d'analyse repose ici sur la reconnaissance et l'identification statistique et automatique de directions ou de niveaux de conduits. Replacés dans un contexte tectonique, structural et de variations des niveaux de base, ces données constituent un support pertinent à l'interprétation géologique et géomorphologique de la genèse et de l'évolution du système. En outre, ce type d'analyse impose et permet à la fois l'étude de la totalité de l'objet karstique investigué, validant d'autant les résultats, tout en accélérant les traitements.



2 - Une application à l'échelle du drain : exemple du drain de Midroï

Passer à une échelle plus fine impose un changement de technique dans l'acquisition des données de terrain. Pour une analyse à cette échelle, c'est-à-dire celle d'un drain, nous avons fait le choix de travailler sur le site du carrefour à l'aval du siphon de Midroï. Le système karstique Rochas-Midroï-Guigonne est un réseau majeur de la rive gauche de l'Ardèche (Drouin, 1993), présentant un développement total de 7950 m pour une dénivellation de 215 m. Dans la partie épinoyée de Midroï, proche du niveau de base, on observe des morphologies éloquentes d'une genèse paragénétique (Photo 6). Ce processus, associant de manière synchrone aggradation sédimentaire endokarstique et corrosion de la voûte est caractéristique d'un écoulement en régime noyé (Renault, 1970), plutôt en période de remontée de niveau de base. Les banquettes limites de remplissages constituent une forme qui subsiste sur les parois du drain après la vidange du remplissage et leur étude permet de reconstituer les phases de mise en place du drain.

Il semblait donc fécond de chercher à reconstituer cette aggradation sédimentaire, en 3D, sur une portion de ce drain. De premières observations géomorphologiques menées sur le site (Bes *et al.*, 2007) avaient montré l'intérêt du secteur pour ce type de reconstitution et une recherche similaire (Jaillet *et al.*, 2010), entreprise sur les Salles Rouges de l'aven d'Orgnac a déjà permis de reconstituer ce type de séquence. L'intérêt est ici d'étudier le phénomène à une échelle plus fine, sur un carrefour et avec une multiplication des banquettes étagées.

Pour cela, un nuage de points dense a été relevé sur le terrain avec un lidar Leica HDS 6000. Six positions de scan ont été réalisées et ont permis d'obtenir un nuage de plus de 30 millions de points assemblés sous Cyclone. Le nuage a été ensuite triangulé sous 3DReshaper puis réduit afin d'obtenir un modèle de 251725 sommets et 499919 faces (Figure 3). La taille générale du modèle peut être approché par la diagonale de la plus petite boite englobante, ici 34,4 m. La surface du modèle est de 790 m². Quelques trous ont été bouchés ponctuellement. La suite du traitement consiste à identifier sur le modèle 3D les discontinuités topographiques des banquettes. Un traitement semi automatique sur 3DReshaper permet de générer une cartographie 3D de la courbure moyenne et d'identifier plus facilement ces ruptures. Les polylignes sont alors digitalisées à l'écran sur chacune des parois du modèle. Sur ce carrefour les groupes de polylignes sont ensuite assemblées par trio (trois parois) selon un choix réalisé par l'opérateur. Chaque ensemble de polylignes est

Photo 6 - Banquettes-limites étagées et très inclinées dans les conduits fossiles du réseau de Midroï, Ardèche (Photo Gérard Cazes).



Figure 6 - Ajustement 3D de banquettes limites de remplissage sur le drain de Midroï. Noter la succession aggradante des banquettes et l'augmentation de la pente au cours de cette évolution ascendante. Noter en outre la déconnexion, en fin d'évolution du conduit principal, de la dernière surface de remplissage présente uniquement dans les deux autres branches du carrefour.

alors maillé et restitue une surface gauche correspondant à une étape de l'aggradation sédimentaire.

Cinq surfaces (numérotée de A à E) ont ainsi pu être générées (Figure 6). Etagées du bas vers le haut, elles constituent une pile morphologique correspondant à la pile sédimentaire aujourd'hui évidée et disparue. Plusieurs banquettes intermédiaires ont pu être reconnues mais elles sont trop discontinues pour constituer un support pertinent à ce type d'ajustement. Des coupes sont automatiquement générées (Figure 6) entre lesquelles il est possible de réaliser quelques mesures fines (pente du toit de chaque phase de remplissage). L'analyse du modèle traité de Midroï fait finalement ressortir les informations suivantes : (i) dans le tronçon principal, la pente des surfaces (toit du remplissage) croît au cours du temps (4 à 12°) puis se stabilise autour de cette valeur. Cela peut être la marque d'une accommodation géométrique du remplissage, au cours de l'aggradation, à mettre en relation avec le régime des écoulements ou avec la charge sédimentaire en transit ; (ii) la dernière surface (E) est uniquement présente dans les deux autres branches du carrefour. Le tronçon principal est réduit à un chenal de voûte de fin de paragenétisme associé à des écoulements noyés indigents qui marque son abandon.

Cette première analyse 3D d'un tronçon de conduit montre qu'il est possible de proposer des reconstitutions génétiques très fines. La géométrie des surfaces ajustées en 3D constitue ici une entrée originale dans la compréhension de la dynamique sédimentaire dans un site où justement la totalité des dépôts endokarstiques a disparu. Le dernier exemple va confirmer la richesse de ce type d'information.



Photo 7 - Panneau de coup de gouges en rive gauche du collecteur souterrain de Gournier (Vercors). Noter le caractère homométrique des formes traduisant bien une vitesse nominale de mise en place, ici en période de crue de la rivière souterraine (Photo Stéphane Jaillet).

3 - Une application à l'échelle d'un panneau : exemple d'une paroi à coup de gouges

Il s'agit ici d'analyser en détail une portion de paroi (un panneau) de la grotte de Baume Latrône où des vagues d'érosion (coups de gouges) ont été identifiés. Ces sont des formes centimétriques à métriques qui se mettent en place, par dissolution, en régime nové ou vadose sur les parois de cavités (Photo 7). Déjà Bretz (1942) avait noté l'intérêt de ces formes souterraines pariétales pour reconnaître la direction et le sens des paléo-écoulements d'un drain fossile. Curl (1966) a mis en évidence une relation entre la longueur d'onde de ces formes et la vitesse des écoulements ayant permis leur genèse (on trouvera dans Horoi (2001) une synthèse bibliographique de ces différents travaux.). Blumberg et Curl (1974) utilisent des modèles analogiques en plâtre puis Bird et al. (2009) des modèles 3D de ces modèles analogiques pour déterminer les conditions hydrauliques de circulation et ensuite déduire des lois qui permettent de retrouver la vitesse des écoulements qui ont prévalu à la mise en place de ces formes.

Le site a été scanné en 3D avec un Riegl LMS 390i pour les besoins d'une étude archéologique sur les parois ornées de cette grotte (Azéma *et al.*, 2010) et il

était pertinent de reprendre une portion du modèle 3D généré sous *Polyworks*, pour analyser plus en détail un panneau riche en coups de gouges et vagues d'érosion. Cette portion de modèle (11,2 m²) est constituée au départ de 274 697 sommets et 546 251 faces, modèle que nous avons réduit à 68 571 sommets et 134 244 triangles tout en conservant le même niveau d'information en terme de rugosité et de morphologie. Pour analyser cette morphologie, nous avons réalisé un traitement semi automatique sur 3DReshaper permettant de générer une cartographie 3D de la courbure moyenne. Ce traitement a permis d'identifier avec plus d'acuité les crêtes séparant chacune des vagues d'érosion qui ont ensuite été digitalisées par deux points (départ et arrivée). La géométrie de ces segments 3D caractérise les paramètres essentiels (longueur, pente, orientation) de la forme investiguée (Figure 7). Il a été fait 76 mesures et le Tableau 1 présente les résultats des vitesses de paléo-écoulements qui ont parcouru le conduit au moment de sa genèse. Une analyse de la totalité de drain permettrait ici de proposer des gammes de paléo-débits lors de sa genèse, paléo-débits qu'il serait fécond de comparer avec la taille du bassin d'alimentation supposé du système karstique.

L'intérêt d'une telle approche et de pouvoir multiplier rapidement les mesures et d'en restituer une analyse statistique (moyenne et écart-type) et en 3D, donnant ainsi une orientation et une pente qui n'est jamais prise en compte sur le terrain. La rapidité de l'acquisition *in situ* et le post traitement informatique limitent d'autant le temps de présence dans la cavité ce qui est important dans les cavités où les questions de conservation sont prégnantes, ce qui était le cas ici.

	Longueur projetée (m)	Longueur (m)	Pente (°)	Vitesse (m/s)	Direction (°)
Minimum	0,16	0,16	-1	0,15	324
Maximum	0,58	0,63	47	0,04	19
Moyenne	0,31	0,34	24	0,05	347
Ecart Type	0,09	0,10	10	-	11

Tableau 1 - Résultat des traitements semi-automatiques réalisés sur la paroi à coups de gouges de Baume-Latrone (76 mesures).



Figure 7 - Vue 3D d'une paroi à coup de gouges et traitement semi automatique par cartographie 3D de la courbure moyenne. Chaque coup de gouge est digitalisé par deux points (départ et arrivé) dont la géométrie permet de retrouver les paramètres essentiels (longueur, pente, orientation).

III - DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS

A travers ces trois exemples, il a été possible de montrer combien le recours à la 3D peut être fécond dans l'analyse géomorphologique de l'endokarst et ceci à trois échelles différentes.

A l'échelle du massif d'abord où la discrétisation des conduits karstiques d'un grand système spéléologique (23 km), à une maille moyenne inférieur à 10 m, a permis d'obtenir un modèle 3D qu'il a été possible de replacer dans son contexte (i) topographique (surface extérieure), (ii) litho-stratigraphique (rôle du niveau marneux de la vire v3 au sein de la barre des calcaires urgoniens), (iii) tectonique (rôle des fractures dans l'orientation des drains et des failles dans les connexions entre compartiments calcaires) et (iv) géomorphologique (étagement des drains et relation avec les variations du niveau du réseau hydrographique de l'Ardèche). Certes, ce type d'analyse était déjà réalisé auparavant, mais le gain de temps dans les traitements statistiques qui suivent et la possibilité de rendu visuel sans cesse renouvelable justifient le peu de temps qu'implique la saisie des données informatiques sur des logiciels désormais courant.

A l'échelle du drain ensuite où un relevé lidar à haute densité a permis de générer un modèle dense d'un carrefour dont la genèse est associé à un processus paragénétique. L'identification sur le clone numérique de niveaux de banquettes étagées a permis de reconstituer la séquence sédimentaire (et les variations de sa géométrie) de cette aggradation endokarstique disparue. Si les observations de terrain ne sont pas remplaçables, car c'est là que s'effectue le travail du géomorphologue, on comprend ici que le recours à la 3D apporte une plus-value réelle dans la méthode d'investigation du site étudié.

A l'échelle d'une paroi levée aussi par lidar, où une série de vagues d'érosion a pu être semi-automatiquement extraite pour en déduire une analyse statistique des directions, des pentes, des longueurs d'ondes. Des vitesses de paléo-circulation sont proposées et constituent un support possible à de prochaines recherches. Ce type de relevés, réalisés auparavant sur site, posait des problèmes d'accès, de protection mais aussi de répétabilité des mesures, problèmes largement solutionnés par une analyse sur modèle 3D. Quelque soit l'échelle et quelque soit le résultat, dans chacun des cas, le traitement sur modèle 3D a finalement permis :

– de travailler en post-traitement, sur support informatique, en limitant le temps de présence sur le site, ce qui est précieux pour les sites à haute valeur patrimoniale où le temps de séjour est limité par souci de conservation ;

– d'atteindre une certaine complétude dans l'analyse de l'objet, c'est-à-dire de porter un regard statistique sur la totalité des conduits d'un système, sur toutes les micro-formes d'une paroi, ce qu'une investigation de terrain ne permet pas toujours (problème d'échelle, temps de présence, accessibilité physique (hauteur), accessibilité visuelle (éloignement), etc.);

- de porter un regard original sur le vide karstique. Qu'il s'agisse de drains ou de microforme, le géomorphologue pose son analyse sur une forme en creux, sur une matière disparue (ici la matrice calcaire) et sur l'empreinte de cet enlèvement.

On pourra dire qu'une telle analyse 3D éloigne du terrain. Pourtant, parcourir un modèle 3D « à la souris », en analyser les morphologies externe et interne, multiplier les angles de vues impossibles en réalité terrain, tester des outils statistiques, des outils d'extraction, réaliser une série d'ajustements sur des surfaces, n'est ce pas fondamentalement une démarche naturaliste ? La démarche de celui qui, partant de l'objet naturel, cherche à extraire toutes les informations qui pourront expliquer les raisons de sa genèse.

Il y a un siècle la démocratisation de la photographie puis la réalisation des premières cartes à grande échelle ont renouvelé le regard du géomorphologue sur son terrain d'étude sans pour autant l'en éloigner. Aujourd'hui l'apparition, et demain la démocratisation, des outils 3D et de réalité virtuelle, loin de nous éloigner du terrain, nous obligeront à poser un regard renouvelé sur cette nature. Le monde souterrain, le monde de l'endokarst qui nous est si cher, par sa difficulté inhérente à lui porter un regard externe et complet, mérite peut être plus que tout, l'application et le développement de telles investigations.

Remerciements

Nous tenons à remercier Daniel André pour ses éclairages précieux sur les premières représentations 3D de l'endokarst, Hélène Gispert du Groupe d'histoire et de diffusion des sciences d'Orsay pour l'envoi de références, Christophe Gauchon, pour ses réflexions sur l'histoire en spéléologie et toute l'équipe du collectif « Foussoubie » pour le travail en cours sur ce fabuleux réseau ardéchois.

BIBLIOGRAPHIE

- AZÉMA M., GÉLY B., LHOMME D., 2010. La grotte ornée paléolithique de la Baume-Latrone (France, Gard) : la 3D remonte le temps... *in* L'Art Pléistocène dans le monde, Pré-actes du Congrès de l'IFRAO, septembre 2010, Tarascon-sur-Ariège. 18 p.
- BES C., CENTELLES R., VAN STAEYEN R., 2007. Approche géomorphologique du siphon de Midroï. Rapport stage « équipier scientifique 2007 », Féd. Fr. Spéléologie, 47-56.
- BIGOT J.-Y., 2002. Conduits ascendants dans les Gorges de l'Ardèche: les avens Cordier, Rochas et de Noël. Actes de 12^{ème} rencontre d'Octobre, La Bachellerie, 15-19.
- BIRD A.J., SPRINGER G.S., BOSCH R.F., CURL R.L., 2009. Effects of surface morphologies on flow behavior in karst conduits. 15th International Congress of Speleology, 1417-1421.
- BRETZ J.H., 1942. Vadose and phreatic features of limestone caverns. *The Journal of Geology*, L, 6, II, 675-811.
- BUDAJ M., MUDRÁK S., 2008. Therion : Digital Cave Maps. 4th European Speleological Congress, 6 p, (http://therion. speleo.sk/download.php).
- CAPRIOLI M., MINCHILLI M., SCOGNAMIGLIO A., STRISCIUGLIO G., 2003. Using photogrammetry and laser scanning in surveyng monumental heritage : le grotte di Castellana. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,* XXXIV, 5/W12.
- 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 a. Problèmes et hypothèses d'hydrologie souterraine. Les Études rhodaniennes, 19, 3-4, 228-234.
- CHEVALIER P., 1944b. Distinction morphologique entre deux types d'érosion souterraine. *Revue de Géographie Alpine*, XXXII, 3, 475-492.
- CURL R.L., 1966. Scallops and flutes : *Cave Research Group Great Britain*, Trans., 7, 121-162.
- DROUIN P., 1993. Triptyque ardéchois. Rochas-Midroï-Guigonne. Concrétions et siphons à gogo. Spéléo n°11, 3-6 + carte HT.
- 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., 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. http:// environnement.ffspeleo.fr/publications/speleoscope/pdf/ Scope32-33.pdf

- GAUCHON C., 1997. Des cavernes et des hommes, Géographie souterraine des montagnes françaises. *Karstologia Mémoires*, 7, 248 p.
- GOODCHILD M.F., FORD D.C., 1971. Analysis of scallop patterns by simulation under controlling conditions. *Journal of Geology*, 79, 52-62.
- GARNIER J.-J., 2008. Grotte de la Luire, 1896-1996, un siècle d'exploration. Seconde édition GSV, 512 p., carte HT.
- HÄUSELMAN P., 2010. Spéléogenèse dans la zone épinoyée, un nouveau modèle. Grottes et karsts de France. *Karstologia Mémoires*, 19, 46-47.
- HELLER M., 1983. Toporobot, Höhlenkartographie mit Hilfe des Computers. *Stalactite*, 33, 1, 9-27.
- HOROI V., 2001. L'influence de la géologie sur la karstification. Etude comparative entre le Massif d'Obarsia Closani – Piatra Mare (Roumanie) et le Massif d'Arbas (France). Thèse Univ. Toulouse III, 165 pages
- JAILLET S., SADIER 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, 3-8.
- LE ROUX P., 1984. Système Goule/Event de Foussoubie. Historique résumé de son exploration. *SERAHV*, 18, 12-20, carte HT.
- LISMONDE B., 1991. Le Trou qui Souffle. Comité départemental de Spéléologie de l'Isère.
- MARTINEAU F., 2003. Approche géologique de la karstification : état d'avancement des travaux sur la Dent de Crolles. Actes de la 13^{ème} rencontre d'Octobre, St. Christophe la Grotte, 87-93.
- MARTEL E.A., 1905. Spéléologie au XX^e siècle. Spélunca, 568-570.
- MEUNIER S., 1902. Etude expérimentale des puits naturels, des cavernes et des autres cavités où se fait, dans les Causses, la circulation des eaux souterraines. *Rev. A.F.A.S.* (Association Française pour l'Avancement des Sciences), congrès de Montauban, 31^{ème} session, 1^{ère} partie, p. 218.
- SADIER B., JAILLET S., PERRETTE Y., 2006. La topographie 3D haute résolution : un outil pour l'étude des structures karstiques. 8th conference on limestone hydrology, 235-236.
- SHAW T.R., 1992. History of cave science. The exploration and study of limestsones caves, to 1900. The Sydney Speleological Society, second edition, 338 p.