**Modélisation 3D par imagerie LIDAR et analyse structurale de la Salle du Dôme des Grottes de Han-sur-Lesse (Belgique, Ardenne)**

*3D mapping of the “Salle de Dôme” in the Han-sur-Lesse Cave (Belgium, Ardennes) for a structural analysis*

**Elise Kazmierczak, Stéphane Jaillet, Sara Vandycke et Sophie Verheyden**

[Résumé](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#abstract) | [Index](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#entries) | [Plan](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#toc) | [Notes de la rédaction](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#ndlr) | [Texte](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#text) | [Bibliographie](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#bibliography) | [Annexe](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#annexe) | [Illustrations](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#illustrations) | [Citation](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#quotation) | [Auteurs](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#authors)

Résumés

[Français](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#abstract-14912-fr)[English](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#abstract-14912-en)

La Salle du Dôme, au sein du réseau karstique des Grottes de Han-sur-Lesse, est la plus grande cavité reconnue en termes de volume souterrain en Belgique. Un pli-faille de grande ampleur affecte son plafond. En février 2016, un modèle 3D haute résolution de la Salle du Dôme a été réalisé par acquisition lasergrammétrique (LIDAR terrestre). Ce modèle a abouti à une représentation visuelle complète de la cavité. Pour une analyse structurale quantitative des fractures et discontinuités des roches dans une cavité karstique, l’imagerie LIDAR est un outil très efficace, car il permet de capturer avec acuité les morphologies des parois des grottes, objets souvent peu accessibles directement. L’acquisition topographique haute résolution a permis l’analyse de la fracturation de la Salle du Dôme dans les 3 dimensions de l’espace. Celle-ci est ensuite intégrée à l’histoire tectonique régionale. À partir du logiciel de rétro-ingénierie *3DReshaper*©, la visualisation géométrique du pli-faille est obtenue par la mise en place d’une succession de plans créés à partir de minimum trois points sur les plans de stratification. La direction et le pendage de chaque plan sont déterminés par trigonométrie à partir des coordonnées des normales, calculées par le programme de visualisation. Sur la base du modèle 3D, un canevas structural du plafond est proposé. À terme, l’analyse structurale à partir d’une imagerie LIDAR aboutit à mieux cerner la géométrie et la dynamique d’une structure régionale qui joue un rôle indéniable dans l’évolution de la karstogenèse de la cavité.

[Haut de page](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#article-14912)

Entrées d’index

**Mots-clés :**

[Modélisation 3D](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14917), [karst](https://journals.openedition.org/geomorphologie/7526), [Han-sur-Lesse](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14922), [LIDAR](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14927), [pli-faille](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14932), [géologie structurale](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14937)

**Keywords :**

[3D mapping](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14942), [karst](https://journals.openedition.org/geomorphologie/7521), [Han-sur-Lesse](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14947), [LIDAR](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14952), [fold thrust](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14957), [structural geology](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14962)

[Haut de page](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#article-14912)

Plan

[**1. Introduction**](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#tocto1n1)

[**2. Cadre géographique et géologique régional**](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#tocto1n2)

[**3. Le pli-faille de Sorotchinsky**](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#tocto1n3)

[**4. Méthodologie**](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#tocto1n4)

[**5. Résultats**](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#tocto1n5)

[5.1 Le pli](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#tocto2n1)

[5.2 L’accident tectonique](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#tocto2n2)

[5.3 Volumétrie de la Salle du Dôme](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#tocto2n3)

[**6. Discussion**](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#tocto1n6)

[**7. Conclusion**](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#tocto1n7)

[Haut de page](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#article-14912)

*Notes de la rédaction*

Reçu le 08 juin 2020, reçu sous forme révisée le 11 octobre 2020, définitivement accepté le 06 novembre 2020

Texte intégral

PDF 4,4M

[Signaler ce document](mailto:?subject=Mod%C3%A9lisation%203D%20par%20imagerie%20lidar%20et%20analyse%20structurale%20de%20la%20Salle%20du%20D%C3%B4me%20des%20Grottes%20de%20Han-sur-Lesse%20%28Belgique%2C%20Ardenne%29&body=Mod%C3%A9lisation%203D%20par%20imagerie%20lidar%20et%20analyse%20structurale%20de%20la%20Salle%20du%20D%C3%B4me%20des%20Grottes%20de%20Han-sur-Lesse%20%28Belgique%2C%20Ardenne%29%20%0AG%C3%A9omorphologie%20%3A%20relief%2C%20processus%2C%20environnement%20%0Ahttp%3A%2F%2Fjournals.openedition.org%2Fgeomorphologie%2F14912%20%0A%0ALa%20Salle%20du%20D%C3%B4me%2C%20au%20sein%20du%20r%C3%A9seau%20karstique%20des%20Grottes%20de%20Han-sur-Lesse%2C%20est%20la%20plus%20grande%20cavit%C3%A9%20reconnue%20en%20termes%20de%20volume%20souterrain%20en%20Belgique.%20Un%20pli-faille%20de%20grande%20ampleur%20affecte%20son%20plafond.%20En%20f%C3%A9vrier%202016%2C%20un%20mod%C3%A8le%203D%20haute%20r%C3%A9solution%20de%20la%20Salle%20du%20D%C3%B4me%20a%20%C3%A9t%C3%A9%20r%C3%A9alis%C3%A9%20par%20acquisition%20lasergramm%C3%A9trique%20%28lidar%20terrestre%29.%20Ce%20mod%C3%A8le%20a%20abouti%20%C3%A0%20une%20repr%C3%A9sentation%20visuelle%20compl%C3%A8te%20de%20la%20cavit%C3%A9.%20Pour%20une%20analyse%20structurale%20quantitative%20des%20fractures%20et%20discontinuit%C3%A9s%20des%20roche...%20%0A%0AElise%20Kazmierczak%2C%20St%C3%A9phane%20Jaillet%2C%20Sara%20Vandycke%20et%20Sophie%20Verheyden%2C%20%C2%AB%20Mod%C3%A9lisation%203D%20par%20imagerie%20lidar%20et%20analyse%20structurale%20de%20la%20Salle%20du%20D%C3%B4me%20des%20Grottes%20de%20Han-sur-Lesse%20%28Belgique%2C%20Ardenne%29%20%C2%BB%2C%20%20G%C3%A9omorphologie%20%3A%20relief%2C%20processus%2C%20environnement%20%5BEn%20ligne%5D%2C%20Articles%20sous%20presse%2C%20mis%20en%20ligne%20le%2020%20novembre%202020%2C%20consult%C3%A9%20le%2008%20janvier%202021.%20URL%20%3A%20http%3A%2F%2Fjournals.openedition.org%2Fgeomorphologie%2F14912%20%0A%0A)

*Les résultats présentés ici sont issus d’un stage de mobilité au Laboratoire Edytem de l’Université Savoie Mont-Blanc dans le cadre d’un Master en Sciences Géologiques à l’Université libre de Bruxelles. L’acquisition des données cartographiques par LIDAR terrestre a été faite dans le cadre d’une collaboration entre la S.A. Grottes de Han et l’Institut royal des Sciences naturelles de Belgique en vue de valoriser les aspects scientifiques du domaine des Grottes de Han. Les auteurs remercient les responsables de la S.A. Grottes de Han pour les autorisations d’accès et leur soutien à ce travail. S. Vandycke est Chercheur qualifié du FNRS (Fonds National de la Recherche Scientifique belge).*

[**1. Introduction**](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#tocfrom1n1)

1Le développement actuel des outils topographiques à haute résolution comme les technologies LIDAR (*LIght Detection And Ranging*) offre désormais la possibilité d’observer les structures topographiques d’objets naturels jusqu’alors difficilement accessibles, et dont l’acquisition haute-densité reste encore trop rare.

2L’étude structurale d’un objet géologique nécessite parfois un grand nombre de mesures, notamment pour valider la fiabilité du résultat. Le travail de terrain n’est pas toujours aisé, et l’accès à certains affleurements reste souvent difficile, voire même impossible. Dans les cavités souterraines, et en particulier les grottes, l’obscurité constitue un obstacle naturel supplémentaire et participe à la difficulté d’étude et d’observation de ce milieu.

3Avec leurs galeries développées sur près de 14 kilomètres, les Grottes de Han-sur-Lesse représentent le plus grand réseau karstique belge et en font un site touristique de premier ordre. Elles appartiennent au Géopark Famenne-Ardenne labellisé par l’UNESCO comme UNESCO Global Géopark en 2018 (https://www.geoparcfamenneardenne.be/​).

4Ce site remarquable a fait l’objet de nombreuses études concernant sa karstogenèse (Quinif et Bastin, 1986), son fonctionnement hydrogéologique (Graulich, 1983 ; Bonniver, 2011), l’origine, la datation et l’intérêt paléoclimatique de ses concrétions (Dricot, 1969 ; Quinif, 1991 ; Quinif et Bastin, 1994 ; Genty et al., 1994, 1997 ; Verheyden et al., 2006 ; Van Rampelbergh et al., 2014) et plus récemment des liens étroits sont aussi établis entre la formation par éboulement de certaines salles et la séismicité modérée de la région (Camelbeeck et al, 2018).

5Cet article, issu d’un travail de Master, présente les apports de la cartographie 3D par méthode LIDAR de la Salle du Dôme (Grottes de Han-sur-Lesse, Belgique) dans l’analyse structurale détaillée d’une fracture majeure connue : le *Pli-Faille de Sorotchinsky*. En effet, le plafond de cette Salle du Dôme est affecté par un accident tectonique documenté depuis le début du XXe siècle (Sorotchinsky, 1939). La modélisation 3D précise la géométrie de cet accident tectonique et permet de valider certaines observations plus anciennes. Le contexte de formation du pli-faille est ensuite discuté vis-à-vis de la géodynamique régionale et plusieurs hypothèses sont proposées.

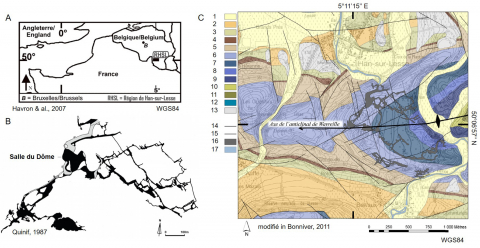
[**2. Cadre géographique et géologique régional**](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#tocfrom1n2)

6La région de Han-sur-Lesse se situe en Belgique à environ 60 kilomètres au sud-est de Namur, en Ardenne belge (fig. 1A). Les paysages y sont contrastés, alternant vallées et collines, pentes douces et à-pic rocheux. Le paysage de la région de Han-sur-Lesse est composé de collines dont les sommets culminent entre 250 m et 280 m d’altitude et de vallées établies à 200 m d’altitude voire moins. Sur la carte géologique, ces deux éléments de relief sont soulignés par des lithologies différentes. Les collines sont principalement des affleurements de calcaires et les vastes dépressions sont creusées au détriment de pélites. Deux rivières épigénétiques (la Lesse et le Ry d’Ave) traversent ce paysage du sud au nord (Havron et al., 2007). La colline du Bois de Boine borde le sud du village de Han-sur-Lesse et constitue le Massif de Han-sur-Lesse. Ce massif s’intègre dans la région géomorphologique de la Calestienne étendue au bord septentrional de l’Ardenne sur une dizaine de kilomètres de large.

7Un trait important de la région de Han-sur-Lesse est son importante karstification. La région de Han-sur-Lesse en Ardenne belge est connue pour être une région karstique de tout premier ordre (Havron et al., 2007 ; Quinif et Bastin, 1986, 1994 ; Quinif, 1994). Les Grottes de Han-sur-Lesse sont creusées dans les calcaires givétiens, selon un réseau karstique perte-résurgence bien développé (fig. 1B).

8Modelée par l’orogenèse hercynienne, la région est principalement affectée par une série de grands plis E-W globalement cylindriques (Delvaux de Fenffe, 1985 ; Havron et al., 2007 ; Lacquement, 2001). Les flancs des plis sont par ailleurs souvent affectés de failles secondaires E-W inverses et normales. Dans le Massif de Han-sur-Lesse, l’anticlinal de Wavreille, pli majeur hercynien, est ainsi perturbé par un chevauchement repéré par un pli-faille NNE-SSW de dimension considérable (Sorotchinsky, 1939) (fig. 1C). Parallèlement, la présence d’une vaste zone de décrochement dextre est établie notamment par un ensemble de failles dextres transversales aux couches.

**Fig. 1 - Cartes de localisation.  
*Fig. 1 - Location maps.***

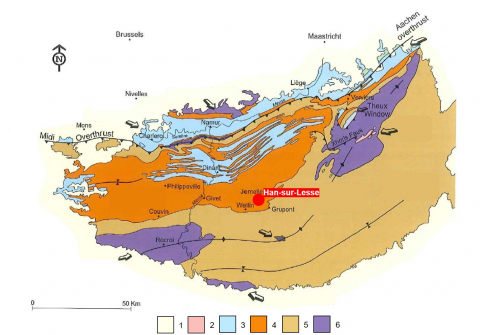
[](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-1-small580.jpg)

[Agrandir](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-1-small580.jpg) [Original (jpeg, 980k)](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-1.jpg)

A : Localisation de la région de Han-sur-Lesse (in Havron et al., 2007). B : Plan général de la grotte de Han-sur-Lesse avec la localisation de la Salle de Dôme (modifié d’après Quinif, 1987). C : Extrait de la nouvelle carte géologique de Wallonie – Houyet – Han-sur-Lesse 59/1-2 (Blockmans et Dumoulin, 2010) indiquant les formations géologiques affleurant au sein de l’Anticlinal de Wavreille datées du Dévonien moyen et supérieur (à l’exception des alluvions quaternaires). 1. Alluvions ; 2. Formation de Neuville et Matagne ; 3. Formation des Grands Breux (Membre de Boussu en Fagnes) ; 4. Formation des Grands Breux (Membre de Bieumont) ; 5. Formation de Nismes et de Moulin Liénaux ; 6. Formation de Fromelennes ; 7. Formation du Mont d’Haurs ; 8. Formation des Terres d’Haurs ; 9. Formation de Trois Fontaines ; 10. Formation de Hanonet ; 11. Formation de la Lomme ; 12. Formation de Jemelle ; 13. Dépôts récents ; 14. Failles affleurantes ; 15. Failles sous couverture ; 16. Réseau karstique souterrain ; 17. Lesse (modifié de Bonniver, 2011).  
*A: Location of the region of Han-sur-Lesse (in Havron et al., 2007). B: General map of the Han-sur-Lesse Cave with the location of the “Salle du Dôme” (modified from Quinif, 1987). C: Extract of the new geological map of Wallonia - Houyet - Han-sur-Lesse 59/1-2 (Blockmans and Dumoulin, 2010) showing the geological formations in Wavreille anticline dated from middle and upper Devonian (excepted quaternary alluvial deposits). 1. Alluvial deposits; 2. Formation of Neuville and Matagne ; 3. Formation of Grands Breux (Member of Boussu en Fagnes); 4. Formation of Grands Breux (Member of Bieumont); 5. Formation of Nismes and Moulin Liénaux.; 6. Formation of Fromelennes ; 7. Formation of Mont d’Haurs ; 8. Formation of Terres d’Haurs ; 9. Formation of Trois Fontaines ; 10. Formation of Hanonet ; 11. Formation of the Lomme ; 12. Formation of Jemelle ; 13. Recent deposits; 14. Outcropping faults; 15. Under cover faults, 16. Underground karstic network; 17. Lesse River (modified in Bonniver, 2011).*

9Enfin, il faut noter également que la région de Han-sur-Lesse est proche d’une zone de virgation des couches paléozoïques. Celle-ci est bien marquée sur la carte géologique (fig. 2) par le changement de direction de la bande des calcaires dévoniens : globalement E-W à l’ouest de Han-sur-Lesse, les couches géologiques prennent une direction NE-SW plus à l’est (Delvaux de Fenffe, 1985 ; Forir, 1897 ; 1900, Lacquement, 2001).

**Fig. 2 - Carte géologique de l’Ardenne (modifié d’après Bultynck et Dejonghe, 2001).  
*Fig. 2 - Geological map of the Ardennes (modified from Bultynck and Dejonghe, 2001).***

[](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-2-small580.jpg)

[Agrandir](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-2-small580.jpg) [Original (jpeg, 228k)](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-2.jpg)

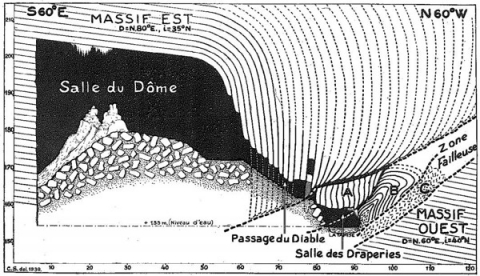
1. Couverture tabulaire cénozoïque et mésozoïque ; 2. Permien ; 3. Carbonifère ; 4. Dévonien moyen et supérieur ; 5. Dévonien inférieur ; 6. Silurien, Orcivicien et Cambrien.  
*1. Tabular cover Cenozoic and Mesozoic; 2. Permian; 3. Carboniferous; 4. Middle and Upper Devonian; 5. Lower Devonian; 6. Silurian, Orcivician et Cambrian.*

[**3. Le pli-faille de Sorotchinsky**](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#tocfrom1n3)

10Au plafond de la Salle du Dôme de la Grotte de Han-sur-Lesse, se trouve donc une structure particulière alliant un pli géologique anticlinal reconnu régionalement et une faille qui affecte en partie les séries dévoniennes calcaires (Delvaux de Fenffe, 1985). Les bancs affectés par ce pli-faille sont notamment d’âge givétien. Sorotchinsky le décrit déjà en 1939 comme un accident tectonique de grande ampleur au sein de l’Anticlinal de Wavreille dans le massif calcaire de Han-sur-Lesse. Ce pli-faille apparaît au plafond de la Salle du Dôme de la grotte de Han-sur-Lesse, sous la forme d’une grande faille de direction NNW-SSE, recoupant le flanc ouest de l’anticlinal (fig. 3). Pour Sorotchinsky (1939), cette structure serait à l’origine de la formation de la Salle du Dôme. Il est possible que le chaos des blocs de roche et les éboulements, en lien probable avec une activité sismique, aient pu générer la gigantesque Salle du Dôme (Camelbeeck et al., 2018).

11En 1939, Sorotchinsky le décrit comme ceci : *« On aperçoit cet accident tectonique sur toute la longueur du côté ouest de la Salle du Dôme : la zone de déformation tectonique, épaisse de 40 m environ et plongeante à 45º vers l’est, est dirigée du nord au sud. Cette zone est donc transversale au grand Anticlinal de Wavreille (fig. 1C). Cet accident est alors de second ordre et nettement postérieur au plissement général de la région ».*

**Fig. 3 - Coupe schématique du pli-faille du plafond de la Salle du Dôme (d’après Sorotchinsky, 1939).  
*Fig. 3 – Cross-section scheme of the fold thrust in the “Salle du Dôme” roof (after Sorotchinsky, 1939).***

[](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-3-small580.jpg)

[Agrandir](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-3-small580.jpg) [Original (jpeg, 112k)](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-3.jpg)

12Au sein de l’accident tectonique, il faut distinguer trois différentes zones. Le flanc est de l’anticlinal est constitué de couches calcaires massives à pendage de 30° à 35º vers le nord. Celles-ci se courbent jusqu’à former un crochet à angle droit contre la zone failleuse. Ce « crochet » a été recourbé jusqu’au renversement des bancs et biseauté contre la faille de chevauchement. La zone failleuse, atteignant 40 m de large, est composée de plusieurs lambeaux, séparés par des plans de failles, tordus et broyés. Le massif ouest, qui a résisté à la déformation, montre à nouveau un pendage de 35 à 40° vers le nord pour les couches calcaires de ce flanc de l’anticlinal(fig. 3)(Sorotchinsky, 1939).

13Cette étude s’intéressera principalement à cet accident tectonique, dans le but de réaliser une analyse structurale de la Salle du Dôme par le biais de l’analyse d’un modèle 3D.

14Si l’interprétation de Sorotchinsky est précise quant à la géométrie de l’accident, il n’en est pas de même pour l’interprétation du mécanisme de formation. Ce n’est d’ailleurs que plus tard que la notion de pli-faille est associée au pli de Sorotchinsky (Quinif et Bastin, 1986). L’analyse structurale à partir des données LIDAR montre que la structure au plafond de la Salle du Dôme est plus complexe qu’un simple pli-faille. Il est cependant à noter que Sorotchinsky émettait déjà l’hypothèse d’un mécanisme en plusieurs étapes.

[**4. Méthodologie**](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#tocfrom1n4)

15La génération du modèle 3D de la cavité de la Salle du Dôme a été réalisée au moyen de la technologie LIDAR terrestre (LIDAR : *LIght Detection And Ran*ging). Le LIDAR utilisé ici était un Leica® HDS 7000 à décalage de phase, optimal pour les cavités souterraines (Jaillet et al, 2014). Ce LIDAR autorise en effet des mesures d’une précision « constructeur » de 2 mm à 50 m, dans des gammes de distances de 1 à 100 m, constituant un rayon d’action suffisant pour capturer correctement la dimension des structures géologiques de la cavité. C’est en outre une acquisition panoramique circulaire c’est-à-dire mesurant dans une fenêtre de 360° en horizontal et 310° en vertical. La vitesse d’acquisition maximale est de 500.000 pts/sec. Les images 3D de la Salle du Dôme ont été acquises en février 2016. Au total, 90 positions de scan ont été réalisées. Afin d’assembler les acquisitions entre elles (la consolidation), des cibles sphériques ont été positionnées dans la grotte, en même temps que les acquisitions lasergrammétriques. Ces cibles servent de référence locale pour l’assemblage du nuage de points final, aboutissant à la création dans un modèle unique. Cette étape de consolidation a été conduite à l’aide du logiciel *Realworks*© (fig. 4).

**Fig. 4 – Acquisition LIDAR du modèle 3D de la Salle du Dôme (2016).  
*Fig. 4 – 3D LIDAR scanning of the “Salle du Dôme” (2016).***

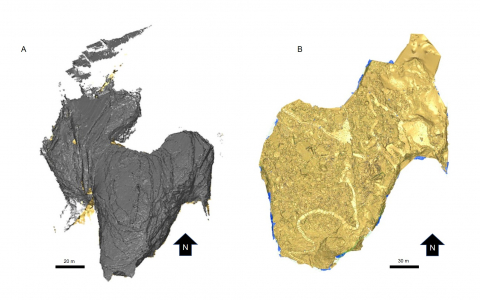
[](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-4-small580.jpg)

[Agrandir](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-4-small580.jpg) [Original (jpeg, 180k)](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-4.jpg)

On peut observer le Leica® HDS 7000 ainsi qu’une des sphères servant de référence locale.  
*We can see on the picture the Leica® HDS 7000 and one of the spheres used as local reference.*

16Le modèle obtenu se présente sous la forme d’un nuage dense de points bruts représentant à la fois le sol et le plafond de la cavité. Il est visualisé directement grâce au logiciel de rétro-ingénierie *3DReshaper*©. Le modèle s’accompagne souvent d’artefacts ou de réflexions parasites, qui doivent être extraites du modèle. Ces points aberrants sont donc nettoyés manuellement par une inspection visuelle fine conduite sur l’ensemble du nuage de points. Afin de faciliter l’analyse, ce dernier est séparé en deux portions, une dédiée au sol et l’autre au plafond de la Salle du Dôme (fig. 5 A-B).

**Fig. 5 – Modèle 3D de la Salle du Dôme, vue en plan XY.  
*Fig. 5 – 3D mapping of the “Salle du Dôme”, XY view.***

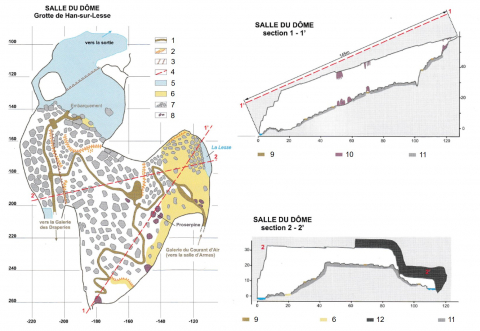
[](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-5-small580.jpg)

[Agrandir](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-5-small580.jpg) [Original (jpeg, 292k)](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-5.jpg)

A : le plafond de la salle ; B : le sol de la salle.  
*A: the room’s roof; B: the room’s floor.*

17Enfin le modèle a été géoréférencé dans un système local à partir des plans topographiques connus (fig. 6). Il n’est donc pas rattaché à un système géographique externe global, mais son échelle, son assiette (horizontalité) et son orientation (par rapport au nord) sont compatibles avec les précédents relevés topographiques, et donc une analyse des structures géologiques.

**Fig. 6 – Plan de la Salle du Dôme (Quinif, 1994).  
*Fig. 6 – Map of the “Salle du Dôme”(Quinif, 1994).***

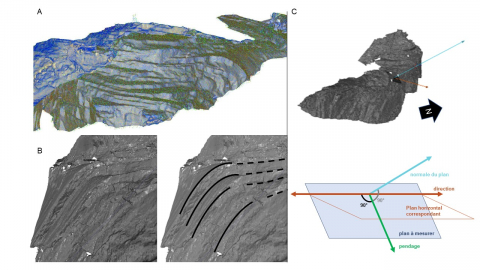
[](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-6-small580.jpg)

[Agrandir](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-6-small580.jpg) [Original (jpeg, 292k)](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-6.jpg)

1. Chemin touristique ; 2. Escarpement ; 3. Stratification verticale ; 4. Plan des coupes ; 5. Rivière ; 6. Sédiments fins ; 7. Éboulis ; 8. Stalagmites ; 9. Coupe du chemin touristique ; 10. Stalagmites et stalactites ; 11. Éboulis ; 12. Pli-faille de Sorotchinsky. *1. Tourist path; 2. Escarpment; 3. Vertical stratification; 4. Cross-sections axis; 5. River; 6. Fine sediments; 7. Rocky scree; 8. Stalagmites; 9. Tourist path cross-section; 10. Stalagmites and stalactites; 11. Rocky scree; 12. Sorotchinsky’s fold thrust.*

18Finalement, le modèle 3D de la Salle du Dômepermet de distinguer clairement les plans de stratification des couches calcaires du plafond (fig. 7 A-B) ainsi que les plans de faille de l’accident tectonique affectant le côté ouest de la cavité.

**Fig. 7 – Visualisation de la stratification des couches calcaires sur le modèle 3D de la Salle du Dôme (Grottes de Han-sur-Lesse).  
*Fig. 7 – Viewing of limestone layers stratification on the 3D model of the “Salle du Dôme” (Han-sur-Lesse Cave).***

[](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-7-small580.jpg)

[Agrandir](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-7-small580.jpg) [Original (jpeg, 192k)](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-7.jpg)

A : Coupe dans le plafond de la Salle du Dôme ; B : Vue sur le pli de Sorotchinsky ; C : Direction et pendage d’un plan obtenu à partir de la normale du plan.  
*A: Cross section in the roof of the “Salle du Dôme”; B: View on the Sorotchinsky’s fold; C: Direction and dip of a plan computed from its normal.*

19L’analyse géométrique du pli-faille de Sorotchinsky, à partir du modèle, est obtenue par une succession de plans ajustés sur le nuage de points. Ces plans sont obtenus à partir d’un minimum de trois points positionnés sur les différents plans de stratification. Ces points de référence sont choisis par un opérateur capable d’apprécier visuellement la pertinence des points retenus de la même manière qu’un géologue le ferait en prenant une mesure à la boussole sur le terrain. Chaque plan ainsi ajusté possède une normale dont les coordonnées x, y, et z peuvent être extraites. La génération de plans est ainsi dépendante de la résolution et de la représentativité topographique du modèle 3D mais aussi et surtout du travail de l’opérateur sur le modèle 3D. Cet ajustement du plan par rapport au nuage de points est directement indiqué par le programme *3DReshaper*© par une distribution gaussienne représentant son degré de concordance avec les parois du modèle. C’est l’opérateur qui estimera à terme la fiabilité de la donnée. Ces données (coordonnées de la normale au plan) ne sont pas compatibles avec les données classiquement acquises sur le terrain par un opérateur qui conduit l’analyse structurale d’un affleurement. En effet, c’est généralement la direction du plan, c’est-à-dire en tectonique l’orientation d’une ligne horizontale de ce plan, puis le pendage, c’est-à-dire l’angle de pente perpendiculaire à cette ligne, qui sont mesurées sur le terrain. Sur le modèle, la direction et le pendage de chaque plan sont calculés par trigonométrie à partir des formules suivantes et en fonction des coordonnées 3D des normales aux plans (fig. 7C) :

20

[](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-8.png)

[Agrandir](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-8.png) [Original (png, 1,8k)](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-8.png)

21ou Jd est la direction du plan ; x et y correspondent aux coordonnées normales de J.

22

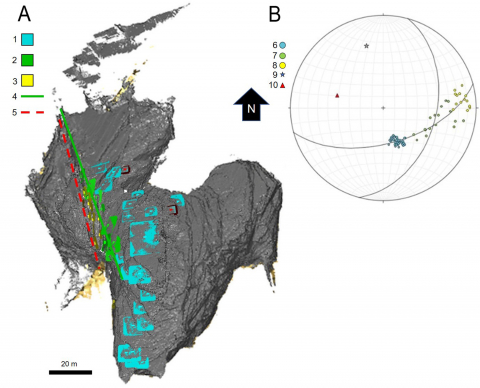
[](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-9.png)

[Agrandir](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-9.png) [Original (png, 2,5k)](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-9.png)

23ou Jp est le pendage du plan ; x, y, et z correspondent aux coordonnées normales de J

24Au total, 200 plans ont ainsi été générés et référencés à partir du modèle 3D du plafond de la Salle du Dôme. Ce travail, conduit manuellement, reste chronophage mais il a pu être entrepris sur la totalité du secteur investi et sur l’entièreté des parois de la cavité de la Salle du Dôme, du sol au plafond (fig. 8).

**Fig. 8 – Visualisation sur le modèle 3D de l’accident tectonique de Sorotchinsky.  
*Fig. 8 – Visualization on the 3D mapping of Sorotchinsky’s fault.***

[](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-10-small580.jpg)

[Agrandir](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-10-small580.jpg) [Original (jpeg, 684k)](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-10.jpg)

A : Axe du pli et quelques plans tracés sur la stratification des flancs du pli de Sorotchinsky ; B : Stéréogramme correspondant. 1. Plans tracés sur la stratification du flanc long ; 2. Charnière ; 3. Flanc court du pli de Sorotchinsky ; 4. Axe du pli ; 5. Faille de Sorotchinsky ; Pôles de plans tracés sur la stratification du flanc long (6), de la charnière (7), et du flanc court (8) du pli de Sorotchinsky ; 9. Axe du pli ; 10. Pôle du plan de faille. Tous les stéréogrammes sont utilisés avec la projection de Schmidt sur l’hémisphère inférieur, grâce au programme *Stéréonet*©.  
*A: Fold axis and some plans drawn on the stratification of Sorotchinsky’s fold layers; B: Stereogram of the fold. 1. Planes drawn on stratification of the long flank; 2. Hinge; 3. Short flank of the Sorotchinsky’fold; 4. Fold axis; 5. Sorotchinsky’s fault; Poles of planes drawn on stratification of the long flank (6), the hinge (7) and the short flank (8) of Sorotchinsky fold; 9. Fold axis; 10. Fault plane pole.* *All stereograms are drawn on the lower hemisphere using Schmidt projection, with Stéréonet© software.*

25Ce nombre de plans est suffisant pour traiter les données des plans de stratification et ainsi obtenir une représentativité statistique pour l’étude du pli et des plans de faille, dans le cadre d’une étude tectonique. Ces données sont ajoutées dans un canevas de Schmidt dans le programme *Stéréonet*©. Tous les stéréogrammes créés sont utilisés avec la projection de Schmidt sur l’hémisphère inférieur.

[**5. Résultats**](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#tocfrom1n5)

[**5.1 Le pli**](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#tocfrom2n1)

26Les directions et pendages des plans de stratification des flancs du pli de Sorotchinsky compilés dans un canevas de Schmidt permettent de connaître l’orientation de l’axe du pli ainsi que celle des compressions tectoniques hercyniennes à son origine, qui lui sont perpendiculaires (fig. 9A). L’axe du pli est orienté NNW-SSE. Il est représenté par un point blanc dans la Figure 9A et 9C. Il est facilement repérable dans le stéréogramme car il constitue l’intersection des plans de stratifications, représentés par les courbes noires dans la Figure 9A. Son écartement apparent du bord du stéréogramme correspond dans la réalité à une inclinaison de trente degrés Nord par rapport à l’horizontale. En outre, ces données renseignent sur l’angle d’ouverture du pli, correspondant dans le stéréogramme à l’écartement entre les deux pôles de plans les plus éloignés. Il est évalué à environ cent degrés. Ainsi, selon la classification des plis en fonction du plongement de l’axe d’un pli et du pendage du plan axial (Fleuty, 1964), le pli du plafond de la Salle du Dôme est qualifié de « pli en genou plongeant » avec un angle d’ouverture d’une centaine de degrés. Ce travail confirme de manière qualitative l’organisation structurale de la voûte de la Salle du Dôme observée et déjà qualifiée en ces termes par Sorotchinsky en 1939.

[**5.2 L’accident tectonique**](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#tocfrom2n2)

27La structure plissée de la Salle du Dôme est accompagnée de nombreux plans de failles ou plans de déplacement banc sur banc striés regroupés dans la « zone failleuse ». Celle-ci est directement visualisable sur le modèle 3D de la Salle et semble présenter une orientation continue (fig. 8). Le plan global de la faille et son pôle sont représentés sur la Figure 9B-C. L’orientation du plan global de la faille et son écartement par rapport au bord du canevas indique une direction et un pendage différent que celui de l’axe du pli. L’analyse quantitative de ces plans de déplacement révèle une orientation globale NNE-SSW et un pendage d’environ cinquante degrés Est (fig. 9 B-C). Les plans de faille striés affectent essentiellement le flanc ouest du plafond de la Salle indiquant sans doute une déformation cassante plus conséquente dans cette partie du pli.

[**5.3 Volumétrie de la Salle du Dôme**](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#tocfrom2n3)

28Indépendamment de l’analyse structurale, le modèle complet, composé du sol et du plafond (fig. 5), a été maillé en 3D par la méthode de la triangulation de Delaunay (Delaunay, 1934 ; Boissonat et Geiger, 1993 ; Verhoeven, 2017), à l’aide du logiciel *3DReshaper*©. Cette méthode d’interpolation linéaire permet de convertir efficacement les nuages de points en information surfacique représentant en détail la structure topographique de la cavité. Le modèle triangulé ainsi généré est dit « haute-densité ». Très lourd à manipuler, il est ensuite réduit en un modèle RTI (Réseau de Triangles Irréguliers, ou « TIN » pour *Triangular Irregulated Network*), plus léger, et qui permet de conserver une justesse dans la représentation topographique. Le modèle RTI possède ainsi une résolution variable. La taille des triangles n’est pas une constante, ce qui permet de conserver au mieux le relief et la rugosité de l’objet étudié tout en limitant le nombre de ces triangles. Le modèle 3D finalisé, sans trou, permet en outre de calculer le volume et la surface au sol de la Salle du Dôme bien plus précisément que les estimations déjà réalisées sur le terrain. Ainsi, à partir de ce modèle 3D on évalue le volume de la Salle de Dôme à 119 812 m3 et la surface au sol à 10 657 m2.

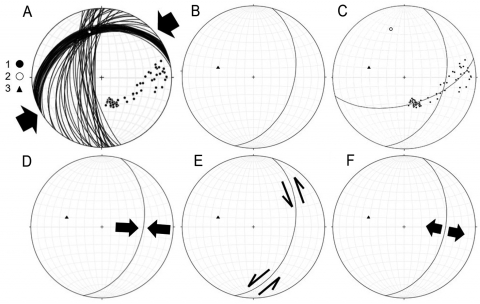
[**6. Discussion**](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#tocfrom1n6)

29La mesure de l’orientation du pli obtenue par l’analyse du modèle 3D est caractéristique du relief plissé de la région d’origine hercynienne. En effet, la bande de roches calcaires de la Calestienne est caractérisée par des plis globalement cylindriques d’orientation E-W à l’est et d’orientation NE-SW à l’ouest (Delvaux de Fenffe, 1985 ; Lacquement, 2001). La zone de Han-sur-Lesse est située dans cette virgation des couches (Havron et al, 2007).

30Généralement, un pli-faille se développe lors d’une déformation plicative non cylindrique engendrant une déformation disproportionnée d’un des flancs du pli l’amenant jusqu’à la rupture (Foucault et al, 2014). Suite à ce mécanisme, on conclut que la faille présente une orientation et un pendage parallèle à l’axe du pli vu qu’elle est issue de la même dynamique de raccourcissement. Selon cette définition et les résultats de notre analyse, montrant que l’axe de pli est orienté NNW-SSE et que la faille est globalement orientée NNE-SSW (fig. 9C), le « pli-faille de Sorotchinsky » ne correspondrait donc pas à un pli-faille au sens commun du terme. Dans le contexte tectonique régional, quatre hypothèses sur la formation de celui-ci peuvent être discutées.

31Selon une première hypothèse, la faille résulterait d’une compression globalement E-W considérée comme un mouvement orogénique tardif de l’orogenèse hercynienne responsable du plissement général de la région (fig. 9D) (Sorotchinsky, 1939 ; Delvaux de Fenffe, 1985). Une deuxième hypothèse proposerait que la faille soit issue d’un décrochement sénestre post-plicatif d’orientation NNE-SSW (fig. 9E). Il pourrait donc s’agir d’une structure d’accommodation tardi-hercynienne issue de la virgation de l’axe de pli principal lors de la collision avec l’obstacle du Parautochtone brabançon (Lacquement, 2001). En troisième hypothèse, la faille serait normale et donc probablement issue d’une phase d’extension cénozoïque. En effet, cette zone est affectée par des phases extensives suite à la formation du graben du Rhin (fig. 9F) (Havron, 2007). Enfin, en dernière hypothèse, cette faille d’ampleur pourrait avoir été générée sur l’extrados du pli, et ne serait donc qu’une faille secondaire. Cette dernière hypothèse, elle, n’a jamais été mentionnée dans la littérature et découle de cette nouvelle analyse géométrique à partir du modèle 3D de la Salle du Dôme.

**Fig. 9 – Stéréogrammes exposant la géométrie.  
*Fig. 9 – Stereograms showing the geometry.***

[](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-11-small580.jpg)

[Agrandir](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-11-small580.jpg) [Original (jpeg, 593k)](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-11.jpg)

A : Pli et orientation des compressions à l’origine ; B : de la faille ; C : du pli et de la faille du plafond de la Salle du Dôme ; D : Tenseurs de contraintes = faille en régime compressif tardi-hercynien ; E : Tenseurs de contraintes = faille en régime décrochant ; F : Tenseurs de contraintes = faille en régime extensif. 1. Pôle des plans de stratification ; 2. Axe du pli ; 3. Pôle du plan de la faille. Tous les stéréogrammes sont tracés dans la projection de Schmidt sur l’hémisphère inférieur, grâce au programme *Stéréonet*©.  
*A: Fold and the oriented shortening at the origin; B: of the fault; C: of the fold and the fault of the “Salle du Dôme” roof; D: Stress tensors = fault in a dynamic of late-Hercynian compression; E: Stress tensors = fault in a strike-slip dynamic; F: Stress tensors = fault in a dynamic of extension. 1. Stratification plane pole; 2. Fold axis; 3. Fault plane pole. All stereograms are drawn in Schmidt projection, on the lower hemisphere, using Stéréonet© software.*

32Cependant, il n’est pas inconcevable de penser que cette structure ait joué un rôle dans plusieurs des mouvements tectoniques mentionnés ci-dessus. Seule une analyse détaillée des stries de glissement pourrait préciser cette théorie.

[**7. Conclusion**](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#tocfrom1n7)

33Cette étude structurale centrée sur l’accident tectonique du plafond de la Salle du Dôme, le pli de Sorotchinsky, précise l’histoire tectonique de la région de Han-sur-Lesse par le biais d’une méthode innovante permettant d’effectuer des mesures sur des surfaces karstiques inaccessibles.

34Les résultats obtenus à partir de mesures prises directement sur une cartographie tridimensionnelle donnent des résultats en adéquation avec les précédentes études réalisées à partir des données de terrain (Sorotchinsky, 1939 ; Havron et al, 2007). Désormais, la dynamique du pli de Sorotchinsky est finement établie. En particulier, il s’avère qu’il existe une dynamique en extension révélée par des structures à l’extrados au sommet du pli.

35La méthode développée ici s’est avérée particulièrement efficace. Elle offre des résultats très précis, permet d’accéder à la totalité de l’objet et non pas seulement aux zones à hauteur d’homme. Elle limite les désavantages du terrain (obscurité, temps de présence limité, accessibilité délicate, hauteur limitée, etc.) en permettant d’accéder « numériquement » à des plans de la paroi et du plafond situés à une dizaine de mètres de hauteur. Au-delà de ces aspects de sécurité, le modèle 3D offre l’opportunité d’une certaine complétude dans l’analyse entreprise. Pour la suite, nous proposerions un géoréférencement absolu de la Salle du Dôme afin d’intégrer le modèle dans un cadre géométrique plus vaste (LIDAR de surface par exemple). De même une augmentation de la résolution de l’imagerie 3D sur certaines zones de la paroi et leur colorisation par techniques photogrammétriques (Triantafyllou et al., 2019), permettrait d’ajouter à notre analyse celles des microstructures telles que les joints karstifiés ou les stries de glissement et leur patine présentes sur les plans de faille afin de restreindre les hypothèses proposées. La Salle du Dôme, plus vaste volume karstique de Belgique, connue pour son intérêt paysager, touristique et géomorphologique, confirme ici son potentiel pour l’analyse 3D d’une structure géologique singulière.

\*Auteur correspondant : Tel : +32 (0)2 650 46 17  
[elise.kazmierczak@ulb.ac.be](mailto:elise.kazmierczak@ulb.ac.be) (Elise Kazmierczak)

[Haut de page](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#article-14912)

Bibliographie

Des DOI (Digital Object Identifier) sont automatiquement ajoutés aux références par Bilbo, l'outil d'annotation bibliographique d'OpenEdition.  
Les utilisateurs des institutions abonnées à l'un des programmes freemium d'OpenEdition peuvent télécharger les références bibliographiques pour lesquelles Bilbo a trouvé un DOI.

**Blockmans S., Dumoulin V**. **(2010)** - Houyet – Han-sur-Lesse 59/1-2. Carte géologique de Wallonie. Edit. Ministère de la Région Wallonne.

**Boissonnat J.D., Geiger B. (1993)** - Three-dimensional reconstruction of complex shapes based on the Delaunay triangulation. Biomedical Image Processing and Biomedical Visualization, International Society for Optics and Photonics, 1905, 964-975.

[DOI : 10.1117/12.148710](https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/1905/0000/Three-dimensional-reconstruction-of-complex-shapes-based-on-the-Delaunay/10.1117/12.148710.short?SSO=1)  
DOI : [10.1117/12.148710](http://dx.doi.org/10.1117/12.148710)

**Bonniver I. (2011) -** Etude hydrogéologique et dimensionnement par modélisation du « système-traçage » du réseau karstique de Han-sur-Lesse (Massif de Boine-Belgique). Thèse de doctorat, UNamur-Université de Namur, 325p.

**Bultynck P., Dejonghe L. (2001)** - Devonian lithostratigraphic units (Belgium). Geologica belgica, 4 (1-2), 39-69.

**Camelbeeck T., Quinif Y., Verheyden S., Vanneste K., Knuts E. (2018)** - Earthquakes as collapse precursors at the Han-sur-Lesse Cave in the Belgian Ardennes. Geomorphology, 308, 13-24.

[DOI : 10.1016/j.geomorph.2018.01.030](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X18300424)  
DOI : [10.1016/j.geomorph.2018.01.030](http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.01.030)

**Delaunay, B. (1934)** - Sur la sphere vide. *Izv. Akad. Nauk SSSR,*Otdelenie Matematicheskii i Estestvennyka Nauk, 7(793-800), 1-2.

**Delvaux de Fenffe D. (1985)** - Géologie et tectonique du Parc de Lesse et Lomme au bord sud du Bassin de Dinant (Rochefort, Belgique). Bulletin de la Société belge de Géologie, 94 (1), 81-95.

**Dricot J.M. (1969) -** Etude sédimentaire à l’entrée du gouffre de Belvaux (Grotte de Han-sur-Lesse, Province de Namur). Bulletin de la Société belge de Géologie, Paléontologie Hydrologie, 78, 7-20.

**Fleuty M.J. (1964)** - The description of folds. Proceedings of the Geologists' Association, 75, 461-492.

**Forir H. (1897)** - Carte géologique de la Belgique « Houyet – Han-sur-Lesse » (n°185). Commission géologique de Belgique.

**Forir H. (1900)** – Carte géologique de la Belgique « Pondrôme – Wellin » (n°194). Commission géologique de Belgique.

**Foucault A., Raoult J. F., Cecca F., Platevoet B. (2014)** - Dictionnaire de Géologie. 8ème Edition : Tout en couleur-5000 définitions-Français/Anglais, Dunod.

**Genty D., Quinif Y., Deflandre G. (1994)** - Microséquences de lamines annuelles dans deux stalagmites du massif de Han-sur-Lesse. Speleochronos, 6, 9-22.

**Genty D., Deflandre G., Quinif Y., Verheyden S. (1997)** - Les lamines de croissance des spéléothèmes: origine et intérêt paléoclimatique. Bulletin de la Société belge de Géologie, 106, 63-77.

**Graulich J. (1983)** - Evaluation des pertes de la Lesse dans sa traversée des grottes de Han. In Bulletin de la Société belge de Géologie, 92 (3), 177-180.

**Havron C., Vandycke S., Quinif Y. (2007)** - Interactivité entre tectonique méso-cénozoïque et dynamique karstique au sein des calcaires dévoniens de la région de Han-sur-Lesse (Ardennes, Belgique). Geologica Belgica, 10 (1-2), 93-108.

**Jaillet S., Sadier B., Perazio G., Delannoy J.-J. (2014)** - Une brève histoire de la 3D en grotte. Karstologia, 63, 3-20.

**Lacquement F. (2001) -** L’Ardenne Varisque. Déformation progressive d’un prisme sédimentaire pré-structuré, de l’affleurement au modèle de chaîne. Publication de la Société géologique du Nord, 29, 285 p.

**Quinif Y., Bastin B. (1986)** - Le système karstique de Han-sur-Lesse (Belgique). Actes 9ème Congr Int Espeleol Barcelona, 1, 158-161.

**Quinif Y. (1987)**– Le système karstique de Han-sur-Lesse. Livret-guide du Colloque International de Sédimentologie Karstique (CISK) : 19-26, Han-sur-Lesse, Belgique. Centre Belge d’Etudes Karstologiques.

**Quinif Y. (1991)** - La série stalagmitique de la galerie des Verviétois (Han-sur-Lesse). Spéléochronos, 3, 29-42.

**Quinif Y. (1996)** - La série stalagmitique de la galerie des Verviétois (Han-sur-Lesse). Spéléochronos, 7, 11-20.

**Quinif Y. (1994)** - La Salle du Dôme. In Equipe Spéléo du Centre et de Mons (Eds.) :Un inventaire choisi des plus beaux phénomènes karstiques souterrains de Wallonie : TOP 15 : le Patrimoine souterrain Wallon*,*Lapiaz (hors-série), 10-11.

**Quinif Y., Bastin B. (1994)** - Datation uranium/thorium et analyse pollinique d'une séquence stalagmitique du stade isotopique 5 (Galerie des Verviétois, Grotte de Han-sur-Lesse, Belgique). Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2. Sciences de la terre et des planètes, 318 (2), 211-217.

**Sorotchinsky C. (1939)** - Un accident tectonique éclairant la genèse de la Salle du Dôme dans les grottes de Han. Annales de la Société Scientifique de Bruxelles, 97-106.

**Triantafyllou A., Watlet A., Le Mouélic S., Camelbeeck T., Civet F., Kaufmann O., Quinif Y., Vandycke S. (2019)** - 3-D digital outcrop model for analysis of brittle deformation and lithological mapping (Lorette cave, Belgium). Journal of Structural Geology, 120, 55-66.

[DOI : 10.1016/j.jsg.2019.01.001](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0191814118303687)  
DOI : [10.1016/j.jsg.2019.01.001](http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2019.01.001)

**Van Rampelbergh M., Verheyden S., Allan M., Quinif Y., Keppens E., Claey, P. (2014)** - Monitoring of a fast-growing speleothem site from the Han-sur-Lesse cave, Belgium, indicates equilibrium deposition of the seasonal δ18O and δ13C signals in the calcite. Climate of the Past, 10 (5), 1871-1885.

[DOI : 10.5194/cp-10-1871-2014](https://cp.copernicus.org/articles/10/1871/2014/)  
DOI : [10.5194/cp-10-1871-2014](http://dx.doi.org/10.5194/cp-10-1871-2014)

**Verhoeven G. J. (2017)** - Mesh is more - using all geometric dimensions for the archaeological analysis and interpretative mapping of 3D surfaces. Journal of Archaeological Method and Theory, 24 (4), 999-1033.

[DOI : 10.1007/s10816-016-9305-z](https://link.springer.com/article/10.1007/s10816-016-9305-z)  
DOI : [10.1007/s10816-016-9305-z](http://dx.doi.org/10.1007/s10816-016-9305-z)

**Verheyden S., Baele JM., Keppens E., Genty D., Cattani O., Cheng H., Lawrence E., Zhang H., Van Strijdonck M., Quinif Y. (2006) -** The Proserpine stalagmite (Han-Sur-Lesse Cave, Belgium): preliminary environmental interpretation of the last 1000 years as recorded in a layered speleothem.Geologica Belgica, 9 (3-4), 245-256.

[Haut de page](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#article-14912)

Annexe

Abridged English Version.

The « Salle du Dôme », located in the middle of the karstic network of the Han-sur-Lesse Cave, is the biggest known cavity in terms of underground volume in Belgium. A large fold thrust can be seen across its roof. This is a well-known structure, and it has already been described in the literature from 1939 by Sorotchinsky (1939) (fig. 3).

In February 2016, a high resolution 3D model of the « Salle du Dôme » was generated, using lasergrammetry acquisition (terrestrial LIDAR). This model resulted in a complete visual representation of the cavity. LIDAR images are very useful to perform structural quantitative analysis of the fractures and discontinuities of rocks in a karstic cavity, because the cave walls are usually difficult to access. The analysis of the fractures of the « Salle du Dôme » was then integrated into the regional tectonic history. Thanks to the reverse engineering software *3D Reshaper*©, it became possible to create a geometrical viewing of the fold thrust by a succession of planes created with at least three points on the stratification or fault planes. The direction and dip of each plane are determined with trigonometric calculations, based on the coordinates of their normals, which are available thanks to the viewer software. On the basis of the 3D model, it is possible to present a structural pattern of the roof (fig. 8).

The fold axis is oriented NNW-SSE and shows a dip of 30°N. Its opening angle is around 100° (fig. 9A). The fault is oriented NNE-SSW with a dip of 50°E (fig. 9B). As the two structures do not show the same orientation, it seems they do not result from the same tectonic episode (fig. 9C). We know for a fact that the fold is a result of the Hercynian shortening. However, due to the difference in orientation, the roof of the “Salle du Dôme” cannot be considered like a fold thrust in the usual sense of the term.

Four assumptions are raised regarding the origin of the fault. The first one suggests the fault results from a late-Hercynian shortening roughly oriented E-W (fig. 9D) (Sorotchinsky, 1939; Delvaux de Fenffe, 1985). The second one suggests the fault results from a senestrial stick-slip motion oriented NNE-SSW (fig. 9E). It could therefore be a late-hercynian accommodation structure resulting from the bend of the main fold axis due to the collision with the “Parautochtone brabançon” obstacle (Lacquement, 2001) . The second one argues that it is a normal fault created during the Cenozoïc, due to of the extension of the Rhine Graben (fig. 9F) (Havron, 2007). The last one, never mentioned in the literature, is the result of a new structural analysis of the 3D model of the « Salle du Dôme ». It suggests that the fault could have been created in the fold’s upper surface and would be a secondary fault.

Nevertheless, is it possible that this structure was created from the combination of some of the tectonic motions mentioned above. Furthermore, this 3D model has provided a better estimation of the floor’s surface (10 657 m2) and the volume (119 812 m3) of the « Salle du Dôme ».

Finally, the structural analysis based on LIDAR images helps to better understand the geometry and dynamics of a regional structure which plays an undeniable role in the evolution of the karstogenesis of the cavity.

[Haut de page](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#article-14912)

Table des illustrations

|  |
| --- |
|  |
| Titre | **Fig. 1 - Cartes de localisation. *Fig. 1 - Location maps.*** |
| Légende | A : Localisation de la région de Han-sur-Lesse (in Havron et al., 2007). B : Plan général de la grotte de Han-sur-Lesse avec la localisation de la Salle de Dôme (modifié d’après Quinif, 1987). C : Extrait de la nouvelle carte géologique de Wallonie – Houyet – Han-sur-Lesse 59/1-2 (Blockmans et Dumoulin, 2010) indiquant les formations géologiques affleurant au sein de l’Anticlinal de Wavreille datées du Dévonien moyen et supérieur (à l’exception des alluvions quaternaires). 1. Alluvions ; 2. Formation de Neuville et Matagne ; 3. Formation des Grands Breux (Membre de Boussu en Fagnes) ; 4. Formation des Grands Breux (Membre de Bieumont) ; 5. Formation de Nismes et de Moulin Liénaux ; 6. Formation de Fromelennes ; 7. Formation du Mont d’Haurs ; 8. Formation des Terres d’Haurs ; 9. Formation de Trois Fontaines ; 10. Formation de Hanonet ; 11. Formation de la Lomme ; 12. Formation de Jemelle ; 13. Dépôts récents ; 14. Failles affleurantes ; 15. Failles sous couverture ; 16. Réseau karstique souterrain ; 17. Lesse (modifié de Bonniver, 2011).*A: Location of the region of Han-sur-Lesse (in Havron et al., 2007). B: General map of the Han-sur-Lesse Cave with the location of the “Salle du Dôme” (modified from Quinif, 1987). C: Extract of the new geological map of Wallonia - Houyet - Han-sur-Lesse 59/1-2 (Blockmans and Dumoulin, 2010) showing the geological formations in Wavreille anticline dated from middle and upper Devonian (excepted quaternary alluvial deposits). 1. Alluvial deposits; 2. Formation of Neuville and Matagne ; 3. Formation of Grands Breux (Member of Boussu en Fagnes); 4. Formation of Grands Breux (Member of Bieumont); 5. Formation of Nismes and Moulin Liénaux.; 6. Formation of Fromelennes ; 7. Formation of Mont d’Haurs ; 8. Formation of Terres d’Haurs ; 9. Formation of Trois Fontaines ; 10. Formation of Hanonet ; 11. Formation of the Lomme ; 12. Formation of Jemelle ; 13. Recent deposits; 14. Outcropping faults; 15. Under cover faults, 16. Underground karstic network; 17. Lesse River (modified in Bonniver, 2011).* |
| URL | [http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-1.jpg](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-1.jpg) |
| Fichier | image/jpeg, 980k |
|  |  |  |
| Titre | **Fig. 2 - Carte géologique de l’Ardenne (modifié d’après Bultynck et Dejonghe, 2001).*Fig. 2 - Geological map of the Ardennes (modified from Bultynck and Dejonghe, 2001).*** |
| Légende | 1. Couverture tabulaire cénozoïque et mésozoïque ; 2. Permien ; 3. Carbonifère ; 4. Dévonien moyen et supérieur ; 5. Dévonien inférieur ; 6. Silurien, Orcivicien et Cambrien.*1. Tabular cover Cenozoic and Mesozoic; 2. Permian; 3. Carboniferous; 4. Middle and Upper Devonian; 5. Lower Devonian; 6. Silurian, Orcivician et Cambrian.* |
| URL | [http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-2.jpg](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-2.jpg) |
| Fichier | image/jpeg, 228k |
|  |  |  |
| Titre | **Fig. 3 - Coupe schématique du pli-faille du plafond de la Salle du Dôme (d’après Sorotchinsky, 1939).*Fig. 3 – Cross-section scheme of the fold thrust in the “Salle du Dôme” roof (after Sorotchinsky, 1939).*** |
| URL | [http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-3.jpg](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-3.jpg) |
| Fichier | image/jpeg, 112k |
|  |  |  |
| Titre | **Fig. 4 – Acquisition Lidar du modèle 3D de la Salle du Dôme (2016). *Fig. 4 – 3D lidar scanning of the “Salle du Dôme” (2016).*** |
| Légende | On peut observer le Leica® HDS 7000 ainsi qu’une des sphères servant de référence locale.*We can see on the picture the Leica® HDS 7000 and one of the spheres used as local reference.* |
| URL | [http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-4.jpg](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-4.jpg) |
| Fichier | image/jpeg, 180k |
|  |  |  |
| Titre | **Fig. 5 – Modèle 3D de la Salle du Dôme, vue en plan XY.*Fig. 5 – 3D mapping of the “Salle du Dôme”, XY view.*** |
| Légende | A : le plafond de la salle ; B : le sol de la salle.*A: the room’s roof; B: the room’s floor.* |
| URL | [http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-5.jpg](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-5.jpg) |
| Fichier | image/jpeg, 292k |
|  |  |  |
| Titre | **Fig. 6 – Plan de la Salle du Dôme (Quinif, 1994). *Fig. 6 – Map of the “Salle du Dôme”(Quinif, 1994).*** |
| Légende | 1. Chemin touristique ; 2. Escarpement ; 3. Stratification verticale ; 4. Plan des coupes ; 5. Rivière ; 6. Sédiments fins ; 7. Éboulis ; 8. Stalagmites ; 9. Coupe du chemin touristique ; 10. Stalagmites et stalactites ; 11. Éboulis ; 12. Pli-faille de Sorotchinsky.*1. Tourist path; 2. Escarpment; 3. Vertical stratification; 4. Cross-sections axis; 5. River; 6. Fine sediments; 7. Rocky scree; 8. Stalagmites; 9. Tourist path cross-section; 10. Stalagmites and stalactites; 11. Rocky scree; 12. Sorotchinsky’s fold thrust.* |
| URL | [http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-6.jpg](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-6.jpg) |
| Fichier | image/jpeg, 292k |
|  |  |  |
| Titre | **Fig. 7 – Visualisation de la stratification des couches calcaires sur le modèle 3D de la Salle du Dôme (Grottes de Han-sur-Lesse).*Fig. 7 – Viewing of limestone layers stratification on the 3D model of the “Salle du Dôme” (Han-sur-Lesse Cave).*** |
| Légende | A : Coupe dans le plafond de la Salle du Dôme ; B : Vue sur le pli de Sorotchinsky ; C : Direction et pendage d’un plan obtenu à partir de la normale du plan.*A: Cross section in the roof of the “Salle du Dôme”; B: View on the Sorotchinsky’s fold; C: Direction and dip of a plan computed from its normal.* |
| URL | [http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-7.jpg](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-7.jpg) |
| Fichier | image/jpeg, 192k |
|  |  |  |
| URL | [http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-8.png](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-8.png) |
| Fichier | image/png, 1,8k |
|  |  |  |
| URL | [http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-9.png](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-9.png) |
| Fichier | image/png, 2,5k |
|  |  |  |
| Titre | **Fig. 8 – Visualisation sur le modèle 3D de l’accident tectonique de Sorotchinsky.*Fig. 8 – Visualization on the 3D mapping of Sorotchinsky’s fault.*** |
| Légende | A : Axe du pli et quelques plans tracés sur la stratification des flancs du pli de Sorotchinsky ; B : Stéréogramme correspondant. 1. Plans tracés sur la stratification du flanc long ; 2. Charnière ; 3. Flanc court du pli de Sorotchinsky ; 4. Axe du pli ; 5. Faille de Sorotchinsky ; Pôles de plans tracés sur la stratification du flanc long (6), de la charnière (7), et du flanc court (8) du pli de Sorotchinsky ; 9. Axe du pli ; 10. Pôle du plan de faille. Tous les stéréogrammes sont utilisés avec la projection de Schmidt sur l’hémisphère inférieur, grâce au programme *Stéréonet*©.*A: Fold axis and some plans drawn on the stratification of Sorotchinsky’s fold layers; B: Stereogram of the fold. 1. Planes drawn on stratification of the long flank; 2. Hinge; 3. Short flank of the Sorotchinsky’fold; 4. Fold axis; 5. Sorotchinsky’s fault; Poles of planes drawn on stratification of the long flank (6), the hinge (7) and the short flank (8) of Sorotchinsky fold; 9. Fold axis; 10. Fault plane pole.* *All stereograms are drawn on the lower hemisphere using Schmidt projection, with Stéréonet© software.* |
| URL | [http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-10.jpg](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-10.jpg) |
| Fichier | image/jpeg, 684k |
|  |  |  |
| Titre | **Fig. 9 – Stéréogrammes exposant la géométrie. *Fig. 9 – Stereograms showing the geometry.*** |
| Légende | A : Pli et orientation des compressions à l’origine ; B : de la faille ; C : du pli et de la faille du plafond de la Salle du Dôme ; D : Tenseurs de contraintes = faille en régime compressif tardi-hercynien ; E : Tenseurs de contraintes = faille en régime décrochant ; F : Tenseurs de contraintes = faille en régime extensif. 1. Pôle des plans de stratification ; 2. Axe du pli ; 3. Pôle du plan de la faille. Tous les stéréogrammes sont tracés dans la projection de Schmidt sur l’hémisphère inférieur, grâce au programme *Stéréonet*©.*A: Fold and the oriented shortening at the origin; B: of the fault; C: of the fold and the fault of the “Salle du Dôme” roof; D: Stress tensors = fault in a dynamic of late-Hercynian compression; E: Stress tensors = fault in a strike-slip dynamic; F: Stress tensors = fault in a dynamic of extension. 1. Stratification plane pole; 2. Fold axis; 3. Fault plane pole. All stereograms are drawn in Schmidt projection, on the lower hemisphere, using Stéréonet© software.* |
| URL | [http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-11.jpg](https://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/14912/img-11.jpg) |
| Fichier | image/jpeg, 593k |

[Haut de page](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#article-14912)

Pour citer cet article

**Référence électronique**

Elise Kazmierczak, Stéphane Jaillet, Sara Vandycke et Sophie Verheyden, « Modélisation 3D par imagerie LIDAR et analyse structurale de la Salle du Dôme des Grottes de Han-sur-Lesse (Belgique, Ardenne) », *Géomorphologie : relief, processus, environnement* [En ligne], Articles sous presse, mis en ligne le 20 novembre 2020, consulté le 08 janvier 2021. URL : http://journals.openedition.org/geomorphologie/14912

[Haut de page](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#article-14912)

Auteurs

[**Elise Kazmierczak**](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14967)

Université libre de Bruxelles, Laboratoire de Glaciologie (GLACIOL), Campus du Solbosch - CP 160/03, Avenue F.D. Roosevelt, 50, 1050 Bruxelles, Belgique

[**Stéphane Jaillet**](https://journals.openedition.org/geomorphologie/7534)

CNRS, Laboratoire EDYTEM UMR5204, Université de Savoie, Bâtiment « Pôle Montagne », 5 bd de la mer Caspienne, F-73376 Le Bourget du Lac cedex, France

***Articles du même auteur***

* [L’image topographique du karst et des grottes : représentations 2D et technologies 3D, entre réalité et imaginaire](https://journals.openedition.org/geomorphologie/13488) [Texte intégral]

Paru dans *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, [vol. 25 - n° 3 | 2019](https://journals.openedition.org/geomorphologie/13759)

* [Le Pont d’Arc et la grotte des Châtaigniers (Gorges de l’Ardèche, France), indicateurs des processus du recoupement du méandre de la Combe d’Arc](https://journals.openedition.org/geomorphologie/12830) [Texte intégral]

Paru dans *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, [vol. 25 – n° 1 | 2019](https://journals.openedition.org/geomorphologie/13047)

* [La dépression glacio-karstique du Mariet (Bauges occidentales, France) : un marqueur de l’englacement würmien des Alpes françaises du Nord](https://journals.openedition.org/geomorphologie/12139) [Texte intégral]

Paru dans *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, [vol. 24 – n° 2 | 2018](https://journals.openedition.org/geomorphologie/12188)

* [Une analyse 3D de l’endokarst : applications lasergrammétriques sur l’aven d’Orgnac (Ardèche, France)](https://journals.openedition.org/geomorphologie/9594) [Texte intégral]

Paru dans *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, [vol. 17 - n° 4 | 2011](https://journals.openedition.org/geomorphologie/9538)

* [X-ray fluorescence microchemical analysis and autoradiography applied to cave deposits: speleothems, detrital rhythmites, ice and prehistoric paintings](https://journals.openedition.org/geomorphologie/9623) [Texte intégral]

Paru dans *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, [vol. 17 - n° 4 | 2011](https://journals.openedition.org/geomorphologie/9538)

* [Karst: from palaeogeographic archives to environmental indicators](https://journals.openedition.org/geomorphologie/7520) [Texte intégral]

Paru dans *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, [vol. 15 - n° 2 | 2009](https://journals.openedition.org/geomorphologie/7519)

[**Sara Vandycke**](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14972)

Université de Mons, Service Génie Minier, Place du parc 20, 7000 Mons, Belgique

[**Sophie Verheyden**](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14977)

IRSNB - Terre et Histoire de la Vie, Rue Vautier 29, 1000 Bruxelles, Belgique

[Haut de page](https://journals.openedition.org/geomorphologie/14912#article-14912)

Droits d’auteur

© Groupe français