

RISQUES LIES AUX CAVITES A ORLEANS : PREDISPOSITIONS, GESTION ET INTERET DU SCAN 3D PORTATIF « ZEB-REVO »

COLLAPSE HAZARD IN ORLEANS : KEY FACTORS, RISK MANAGEMENT AND UTILITY OF THE 3D CARTOGRAPHIC TOOL “ZEB-REVO”

Mylène FROIDEVAUX¹, Gildas NOURY¹, Imed KSIBI², Silvain YART¹, Thomas DEWEZ¹

¹ BRGM, Orléans, France

² Orléans Métropole, Orléans, France

RÉSUMÉ – Dans le cadre du projet SICAVOR (Système d'information contextuel sur les caves d'Orléans), le BRGM et Orléans Métropole ont réalisé une action commune visant à évaluer les risques de mouvements de terrain pouvant affecter les cavités orléanaises. Le Zeb-Revo, outil de cartographie 3D, ouvre des perspectives dans la gestion de ce risque.

ABSTRACT – During the SICAVOR project (Contextual Information System on the Orléans Cellars), BRGM and Orléans Metropole surveys carried on a global risk assessment of underground movements. The 3D mapping tool “Zeb-Revo” opens interesting perspectives to manage these hazards.

1. Introduction

Tous deux partenaires du projet SICAVOR, le BRGM (Direction des Risques et de la Prévention) et Orléans Métropole (Direction de l'Environnement et de la Prévention des Risques) ont réalisé, en 2017, une action commune visant à évaluer les risques de mouvements de terrain pouvant affecter les cavités orléanaises. Dans un contexte urbain particulièrement dense, la ruine partielle ou totale des aménagements souterrains peut en effet conduire à des effondrements dommageables pour les enjeux en surface et pour le patrimoine architectural souterrain. Après avoir présenté le contexte géologique, la gestion opérationnelle du risque par Orléans Métropole est expliquée. Des développements du scanner 3D Zeb-Revo réalisés par le BRGM sont enfin détaillés.

2. Contexte géologique

Les calcaires de Beauce formant le substratum rocheux de l'orléanais datent de l'Aquitainien (de -23,0 à -20,5 millions d'années). La lithologie et la répartition spatiale de ces formations lacustres et palustres sont particulièrement variables et hétérogènes, aussi bien horizontalement que verticalement (Lorain, 1972 – Mégnien, 1980 - Ménillet, 1980/1981). Les faciès observés sont essentiellement calcaires (pâteux, compact ou bréchique) mais aussi siliceux (meulière en banc ou en lentille) et parfois argileux (argile verte intercalée dans les bancs de calcaires pâteux).

Les calcaires de Beauce ont été exploités comme matériau de construction dès l'époque romaine (pont d'Averdon), puis au Moyen-Âge (tour de Châteaudun) et jusque l'époque actuelle (Angot et al., 1973). Généralement exploité en carrière à ciel ouvert, ce matériau l'a aussi été de manière souterraine, en particulier dans le secteur d'Orléans (Figure 1).

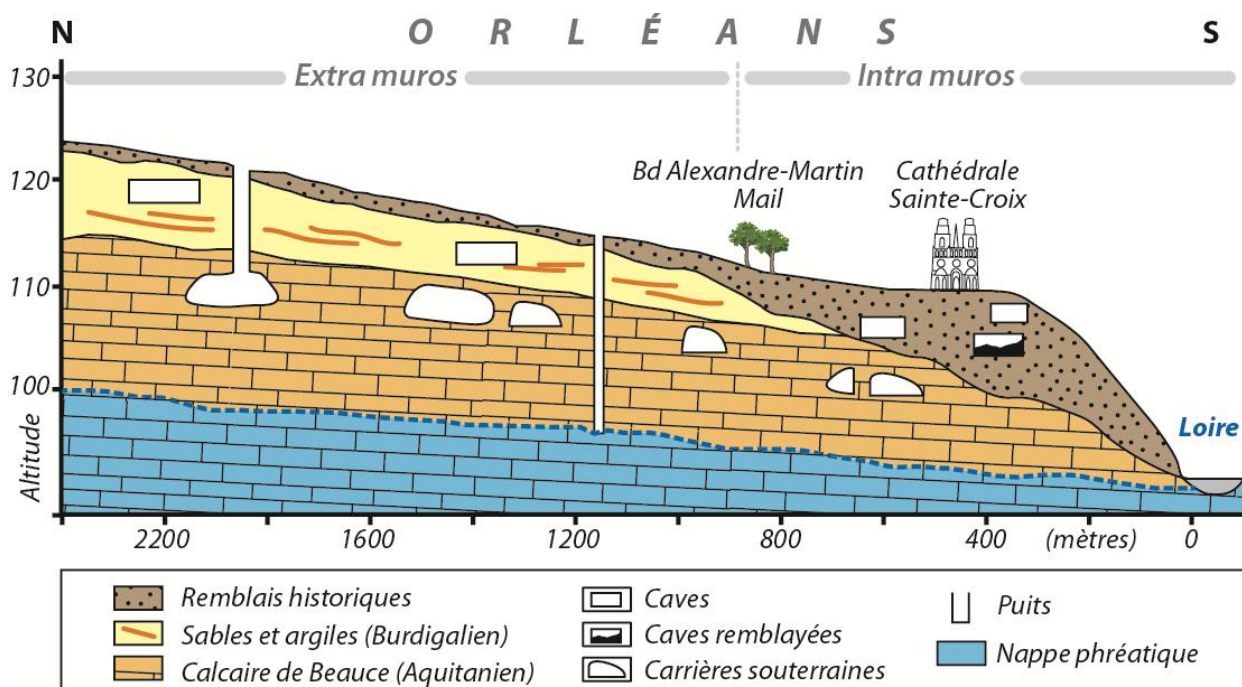


Figure 1 : Coupe géologique synthétique d'Orléans (source : Charles, 2015)

3. La gestion actuelle des risques liés aux cavités par Orléans Métropole

L'actuelle Direction de l'Environnement et de la Prévention des Risques (DEPR) d'Orléans Métropole informe et renseigne la population (construction, achat ou vente – information acquéreurs locataires, soutien lors de sinistre) et les entreprises (réponses aux DT et DICT¹). Il procède également à l'inventaire, à la cartographie et à la surveillance des cavités, à la réalisation de travaux de sondages, de comblement ou de traitement de sol, en particulier lorsque ceux-ci concernent le domaine public.

L'inventaire² a recensé environ 700 cavités anthropiques à Orléans, soit en moyenne 60/km² (moyenne en France : 0,3/km²). Les zones d'anciennes carrières se concentrent au cœur de la ville (intra-mails), secteur où elles ont fréquemment été converties en caves, et le long des grands axes de faubourgs (Figure 2) : Bannier, Madeleine, Saint-Jean, Saint-Vincent, Bourgogne et quartiers Murlins et Saint-Marc.

Une trentaine d'interventions sur le terrain sont réalisés en moyenne chaque année par la DEPR. Ces visites de terrain mettent souvent à contribution, via une convention nouée avec la ville, les spéléologues du Comité Départemental de Spéléologie du Loiret. Ces visites donnent lieu à l'établissement de plans topographiques des cavités et éventuellement à un diagnostic de risque.

¹ Déclarations de Travaux et Déclarations d'Intention de Commencement de Travaux

² Deux sources : archives de la défense passive, enquêtes auprès des riverains



Figure 2 : Carte de probabilité de présence de carrières souterraines (source : Orléans Métropole)

4. Analyse du risque par le BRGM dans le cadre du projet SICAVOR

4.1. Des cavités aux configurations contraintes par les caractéristiques géologiques locales

Les pratiques des carrières orléanaises étaient similaires à celles des marnières normandes et des catiches du Nord. L'absence de vallons marqués empêchait en effet les entrées en cavage. Les extractions se faisaient depuis la surface du plateau, par l'intermédiaire de puits ou de descenderies. En plus de contraindre les rendements, cette difficulté technique participait à la multiplication des carrières artisanales. On s'approche ici d'une extraction quasi-généralisée à l'échelle d'un territoire.

L'hétérogénéité du calcaire de Beauce empêchait toute véritable planification de l'exploitation : la qualité du gisement était découverte à l'avancement. Le carrier suivait les bancs les plus résistants alors que les « mauvais » matériaux (poches d'argile par exemple) étaient laissés en place. L'exploitation se faisait en galeries filantes et/ou en piliers tournés (Figure 3). Les galeries étaient rarement rectilignes, les chambres et les piliers de roche laissés en place étaient toujours de dimensions variables. La hauteur des vides était en revanche relativement constante : de l'ordre de 2 à 3 m. La largeur de galerie et la section des piliers restaient guidées par les contraintes géotechniques liées à cette pratique. Le dimensionnement des cavités se faisait de manière empirique : on imitait ce que faisaient les voisins et on tirait leçons des inévitables accidents générés par des extractions trop « gourmandes ». Doté d'une résistance mécanique souvent médiocre, surtout dans les faciès les plus « pâteux » (résistance à la compression comprise entre 0,2 et 1,5 MPa – Waschowski, 1972), le ciel des galeries prenait souvent la forme d'une voûte, seule possibilité dans ce contexte de limiter les chutes du toit sans

procéder à de coûteux confortements. De tels renforcements étaient entrepris dans une seconde vie de l'ouvrage (reconversion pour des activités de stockage).

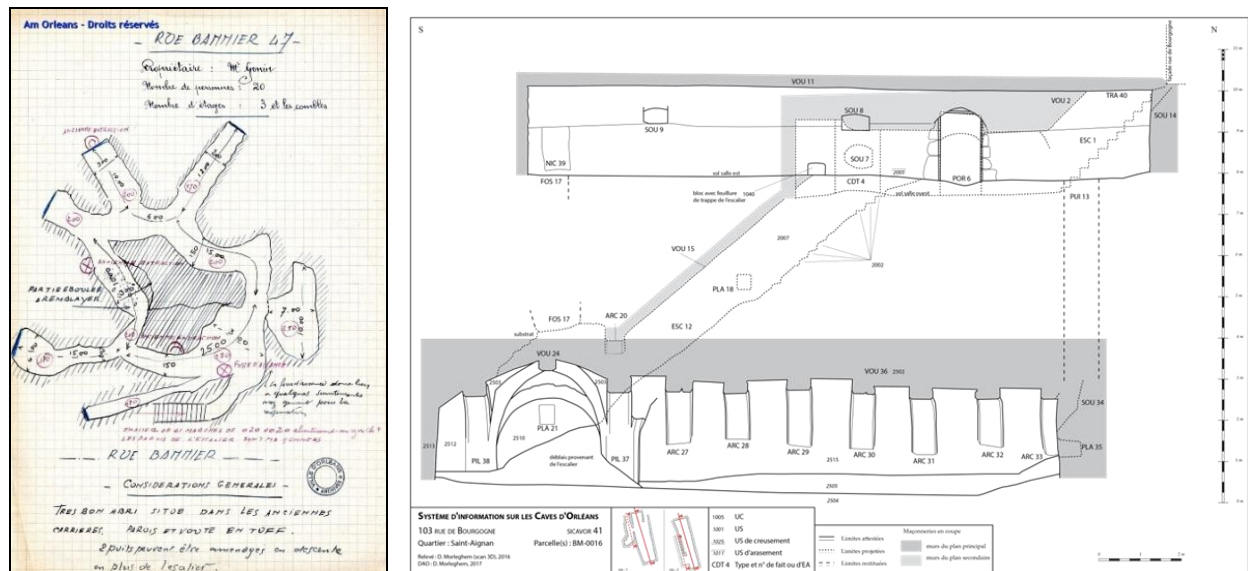


Figure 3 : Vues illustrant les modes d'exploitation (à gauche : plan établi par la Défense Passive, source : Archives Municipales d'Orléans – à droite : coupe établie par le Pôle d'Archéologie)

La profondeur de la partie basse des carrières se situe généralement entre 8 et 20 m, sans jamais s'approcher de la nappe phréatique calcaire, obstacle insurmontable à l'extraction artisanale de matériaux. La surface moyenne des carrières varie entre 100 et 2 500 m². Rares sont les carrières historiquement comblées, car la réglementation locale allant dans ce sens ne fut édictée que vers 1880. La fin officielle des autorisations d'exploitation fût décrétée en 1910.

4.2. Les mouvements de terrain liés aux cavités

A Orléans, les désordres de surface les plus courants sont des affaissements et des fontis d'intensité généralement limitée à modérée (diamètre inférieur à 10 m). Peu d'accidents graves sont recensés à Orléans, mais les dommages aux biens restent possibles (Figure 4).



Fontis (diamètre 6 m, profondeur 11 m) Effondrement d'une maison
Figure 4 : Désordres liés à des effondrements de cavités souterraines (photographies DEPR)

Traversant des terrains de surface sans réelle tenue (remblais, alluvions, roche altérée), les ouvrages de descente (puits, descenderies) sont maçonnés. La fatigue des mortiers voire celle des moellons, accélérée par les infiltrations d'eau, par l'absence

d'aérage ou par le manque d'entretien peuvent à terme aboutir à la rupture de ces murs, ce qui provoque des désordres aux structures les surplombant, voire l'apparition d'un fontis.

Plus bas, une fois atteint les roches en place, la stabilité initiale est généralement meilleure. Les faciès calcaires « pâteux » et pulvérulents restent problématiques : leur faible résistance à la compression ainsi que l'absence de ciment naturel franc entre les éléments rocheux empêchent une bonne tenue du ciel et des bords de la carrière. Ces zones sont alors taillées sous forme de voûte. Des bancs de meulière viennent parfois « charpenter » l'ensemble. A contrario, des poches de matériaux sensibles à l'eau peuvent fragiliser le cœur de la carrière. Ces poches peuvent être argileuses (marnes et argiles du Burdigalien) ou sableuses (remplissage de cavités karstiques). La situation est dangereuse lorsque ces poches communiquent avec la surface : leur débouillage dans la carrière suture brutalement les matériaux depuis le fond de la cavité jusqu'en surface (fontis). Des murs maçonnés sont ponctuellement mis en place devant ces poches d'argile. Des voûtes d'ogives viennent également renforcer les ciels, il est vraisemblable que ces voûtes maçonnées aient été aménagées en vue d'une nouvelle vie de l'ouvrage.

Les puits constituent une zone de faiblesse préférentielle. Ces ouvrages interceptent en effet les eaux de surface ou celles circulant dans le sol. Ces venues d'eau accélèrent le vieillissement des maçonneries de surface et peuvent à terme venir saper leur assise. Ces effondrements se limitent généralement à la tête du puits (diamètre de 1-2 m). Même s'ils ne sont pas très étendus, ces désordres sont dans tous les cas particulièrement dangereux car ils descendent jusqu'en bas de la carrière.

4.3. La sécurisation des cavités : de la surveillance au confortement

Même si un entretien dans les règles de l'art (gestion des eaux et aération de la cavité) ralentit les phénomènes, la surveillance attentive des ouvrages ne permet pas toujours d'éviter de coûteux confortements. Cette sécurisation commence par une bonne évaluation des aléas et des enjeux : quelles sont les zones instables ? quels phénomènes s'y produisent ? quelles incidences en surface ? L'état particulièrement dégradé de certaines cavités nécessite parfois un comblement intégral. Des solutions alternatives au béton sont désormais éprouvées (par exemple comblement par billes d'argile cimentées au coulis sous pression). Au-delà de ces traitements à gérer au cas par cas, une politique globale de prévention et d'information du public permet de gérer au mieux ce risque.

5. Les apports du scan laser 3D Zeb-Revo

Les méthodes topographiques « classiques » sont souvent contraintes en milieu souterrain : absence de signal GPS, progression lente en raison de la « circonvolution » des galeries, objets géologiques pas toujours maîtrisés par les intervenants, etc. La mise sur le marché récente d'un scanner laser 3D mobile offre des potentiels jusqu'alors insoupçonnés (Zlot et al., 2014 – Dewez et al., 2016 – Dewez et al., 2017) : acquisition à grand rendement (jusqu'à 10 fois plus rapide que les techniques classiques), génération de cartes 3D reliant surface et sous-sol, localisation facilitée des enjeux en surface, estimation de l'épaisseur des terrains de recouvrement, etc. Ce matériel a été testé dans le cadre du programme de recherche SICAVOR.

5.1. Le matériel

Le ZEB-REVO est un scanner laser 3D mobile, portable à la main. Cet appareil relève jusqu'à 40 000 points par seconde.

5.2. Méthodologie de cartographie

Une observation préalable de la carrière organise le lever (longueur, obstacles). Une fois initialisé, le manipulateur prend l'appareil à la main et marche. Des boucles fermées ne dépassant pas 25 minutes évitent la dérive des mesures. L'instrument se géoréférence automatiquement en utilisant les points venant d'être relevés. Pour une cavité de grande taille, plusieurs boucles et une zone commune entre elles sont nécessaires. Des repères complémentaires (plots, cônes) aident non seulement l'instrument à se repérer mais servent aussi, au post-traitement, à recalcr les boucles.

Un logiciel de traitement de nuage de points (par exemple CloudCompare[®]) aboutit à une cartographie 3D complète. Par la suite, ce rendu sert à la compréhension, à l'évaluation du risque et à la recherche de solutions si besoin (calcul de volume).

5.3. Comparaison avec les levés au scanner laser FARO[®] Focus 3D

Le lever de la cave-carrière du centre Charles Péguy, rue du Tabour (Figure 5) a été comparé avec celui effectué par le Service d'Archéologie au FARO[®] Focus 3D. Cette comparaison a permis d'évaluer avantages et inconvénients de chacun (Tableau 1).

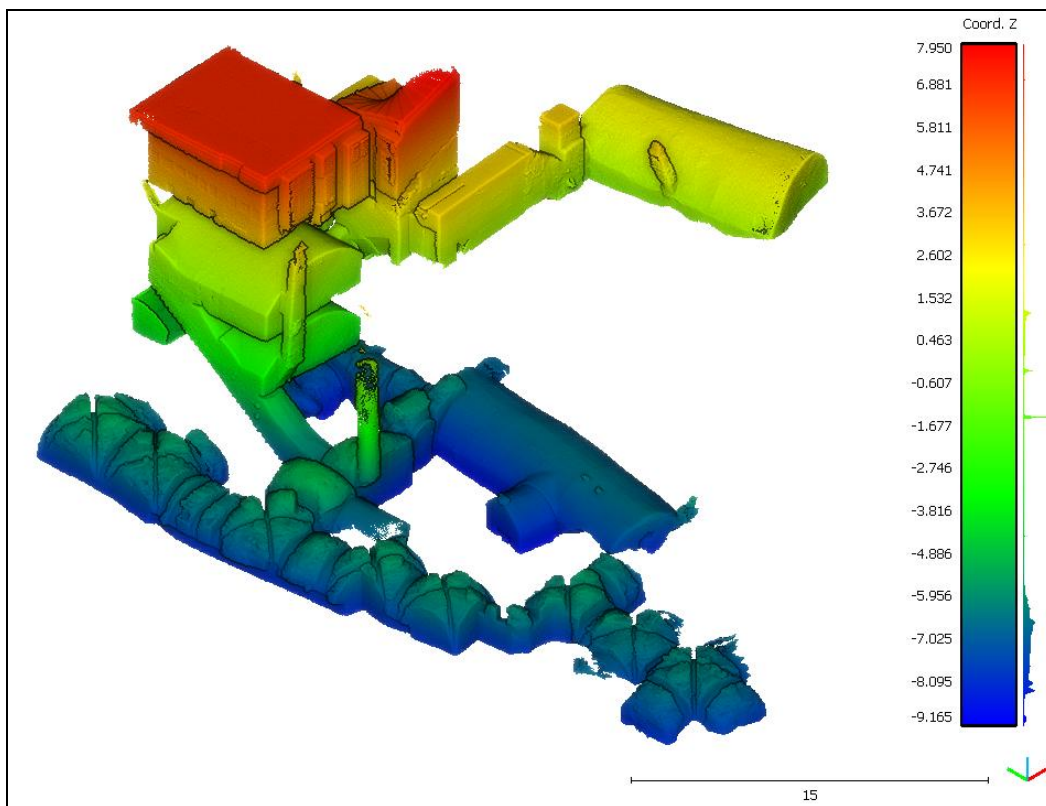


Figure 5 : Représentation 3D des cavités au Centre Charles Péguy (BRGM avec Zeb-Revo)

Le traitement des données Faro[®] a consisté à recalcr les 41 nuages de points. Le traitement des données du Zeb-Revo a consisté à assembler et recalcr 4 boucles. Le nuage de point final du Zeb-Revo est dix fois moins volumineux que celui du Faro[®] (dix fois moins de points). Cette différence se reflète sur les temps d'acquisition et de post-traitement (trois fois plus de temps avec le Faro[®]). La distance entre les deux nuages de

points a été calculée. Elle indique deux zones de dérive d'un appareil par rapport à l'autre :

- Au niveau de certaines voûtes d'ogives, le Faro[®], positionné de manière déportée, ne scanne pas correctement les recoins de ces zones.
- Au niveau d'une zone particulièrement lisse, le Zeb-Revo, semble plus difficilement trouver ses points de repères. La dérive maximale y est de l'ordre de 20 cm.

Tableau 1 : Comparaison des caractéristiques et de l'utilisation du FARO[®] et du ZEB-REVO

	Faro [®] Focus 3D	Zeb-Revo
Volume données	≈ 21 Go	≈ 2,1 Go
Nombre points	≈ 1,150 milliard	≈ 110 millions
Durée acquisition	≈ 3 h	≈ 50 min
Post-traitement	≈ 2 h 30	≈ 40 min
Points positifs	<ul style="list-style-type: none"> - Précision (millimétrique) - Grande portée (> 50 m en intérieur) - Nuages de points colorisables 	<ul style="list-style-type: none"> - Précision centimétrique - Portatif et maniable - Acquisition et post-traitement rapide - Même dans zones difficiles d'accès - Relevé en continu
Points négatifs	<ul style="list-style-type: none"> - Trépied indispensable - Multiplication du nombre de scan - Acquisition et post-traitement longs - Volume de données important 	<ul style="list-style-type: none"> - Dérive possible - Pas de contrôle des calculs - Calcul difficile dans zones « lisses » - Portée limitée à 30 m

Cette comparaison confirme les avantages et les défauts des deux technologies :

- pour le Zeb-Revo : grand rendement et précision excellente pour l'approche « risque » mais moyenne pour l'approche « architecturale »,
- pour le Faro[®] : lenteur des levers et qualité généralement « excessive » pour l'approche « risque » mais précision excellente pour l'approche « architecturale ».

6. Conclusion

Le projet SICAVOR a permis au BRGM et aux services de la ville d'Orléans de compléter leurs compétences. Les nombreux cas d'instabilités traités de manière opérationnelle par la DREP ont ainsi alimenté les connaissances scientifiques du BRGM non seulement en matière de processus de mouvements de terrain affectant ces cavités mais aussi en termes de facteurs aggravant. Les visites archéologiques ont, par ailleurs, offert l'opportunité au BRGM et à la DREP de découvrir ou de surveiller plusieurs cavités et d'intégrer leur histoire à une évaluation des risques souvent très technique.

Les perspectives à l'issue de ce travail sont nombreuses. L'intégration d'une description géologique précise dans les comptes rendus de visite améliorerait la connaissance géologique du sous-sol, ce qui à terme aurait un intérêt urbanistique pour les projets de construction. Un traitement statistique des configurations de l'ensemble des cavités permettrait d'aboutir à une évaluation prédictive de l'aléa mouvement de terrain à l'échelle la métropole. L'intégration de la technologie Zeb-Revo dans la cartographie des cavités, servirait, lorsque cela s'y prête, à gagner en précision dans l'évaluation des risques ou à offrir un support tridimensionnel d'une grande qualité visuelle.

7. Références bibliographiques

- Angot D., Chezeaud J.-H., Pitot J., « Le granulat en calcaire de Beauce » dans « Le Calcaire de Beauce. Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées. Spécial U », éd. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1973.
- Charles Nicolas, « Guide géologique du Val de Loire », éd. Omniscience-BRGM, 2015.
- Dewez Thomas J.B., Plat Emmanuelle, Degas Marie, Richard Thomas, Pannet Pierre, Thuon Ysoline, Meire Baptiste, Watelet Jean-Marc, Cauvin Laurent, Lucas, Joël, Dian Graham, « Handheld Mobile Laser Scanners Zeb-1 and Zeb-Revo to map an underground quarry and its above-ground surroundings », 2nd Virtual Geosciences Conference (VGC2016), 22-23 Sept. 2016, Bergen, Norway.
- Dewez Thomas J.B., Thuon Ysoline, Plat Emmanuelle, Pannet Pierre, « Towards cavity collapse hazard maps with Zebedee handheld laser scanner point clouds », The Photogrammetric Record, soumis le 20 janvier 2017.
- IFSTTAR (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux), « Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées – Guide méthodologique », éd. IFSTTAR, 2014.
- INERIS (Institut national de l'environnement industriel et des risques), « Guide sur les solutions de mise en sécurité des cavités souterraines abandonnées d'origine anthropique », éd. INERIS, 2016
- Lorain Jean-Marie, « La géologie du calcaire de Beauce » dans « Le Calcaire de Beauce. Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées. Spécial U », éd. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1973.
- Mégnien Claude, « Synthèse géologique du bassin de Paris », éd. BRGM, 1980.
- Ménillet François, « Les lithofaciès des calcaires de Beauce (Stampien à Aquitanien) du Bassin de Paris (France) », Bulletin du BRGM, section IV, n°1-1980/1981, p. 15-55.
- Waschowski Edwin, « Etudes géotechniques des calcaires de Beauce » » dans « Le Calcaire de Beauce. Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées. Spécial U », éd. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1973.
- Zlot Robert, Bosse Michael, « Three-dimensional mobile mapping of caves », Journal of Cave and Karst Studies, v. 76, n° 3, p. 191–206, 2014.