

Le concept d'horizon d'inception comme base pour la cartographie du danger d'effondrement

Jonathan Vouillamoz¹, Pierre-Yves Jeannin¹, Lionel Kopp², Renaud Chantry²

Abstract: The office for natural hazards of the Vaud canton (Switzerland) is interested for a pragmatic approach to map sinkhole hazards in karst areas. A team was created by merging resources from a geoengineering company (CSD) and a karst specialist (SISKA).

Large areas in Vaud territory are limestone karst in which collapse hazards are essentially related to the collapse of soft-rocks covering underground cavities, rather than to the collapse of limestone roofs or underground chambers. This statement is probably not valid for cases in gypsum and salt. Thus, for limestone areas, zones of highest danger are voids covered by a thin layer of soft-sediments. The spatial distribution of voids and cover-thickness should therefore both be assessed for the hazards evaluation.

Void assessment: Inception features (IF) are millimetre to decimetre thick planes (mainly bedding but also fractures) showing a mineralogical, a granulometrical or a physical contrast with the surrounding formation that make them especially susceptible to karst development (FILIPPONI et al., 2009). The analysis of more than 1500 km of cave passage showed that karst conduits are mainly developed along such discrete layers within a limestone series. The so-called Karst-ALEA method (FILIPPONI et al., 2011) is based on this concept and aims at assessing the probability of karst conduit occurrences in the drilling of a tunnel. This approach requires as entries the identification of IF, the recognition of paleo-water-table (PWT), and their respective spatial distribution in a 3D geological model. We suggest the Karst-ALEA method to be adjusted in order to assess the void distribution in subsurface as a basis for sinkhole hazard mapping. Inception features (horizons or fractures) and paleo-water-tables (PWT) have to be first identified using visible caves and dolines. These features should then be introduced into a 3D geological model. Intersections of IF and PWT located close to landsurface are areas with a high probability of karst occurrence.

Assessment of the soft-sediment cover: Classical geological investigations (mapping, DEM analysis, drilling, etc.) are used to establish a map of the thickness of soft-sediment on top of the limestone. This can also be included in the 3D model. The combination of the void and soft-sediment information in the 3D model makes it possible to derive the sinkhole hazard map. This is currently being developed and applied in the Vaud canton and first results are presented in the paper.

Mots clefs: Horizons d'inceptions, dolines, effondrements, couverture meuble

Introduction

Les dangers naturels liés au karst sont nombreux (crues, inondations, laves torrentielles, glissements de terrain, effondrements) et paradoxalement peu de méthodes d'évaluation leurs sont dédiées. Une compréhension globale des systèmes karstiques, tenant compte de la spéléogénèse, de la géologie et de l'hydrologie apporte de nombreuses réponses au regard de ces dangers, (VOUILLAMOZ & JEANNIN, 2011).

Le Jura vaudois présente une superficie de 917 km² pouvant être sujette aux dangers d'effondrements liés à des vides karstiques (CHAMPOD, 2011). Le karst s'y

développe principalement dans les formations du Malm (Séquanien, Kimméridgien, Portlandien) et certaines formations du Crétacé (Pierre jaune d'Hauterive, Urgonien blanc). Sur la majeure partie du territoire, ces vides karstiques se développent sous une faible couverture meuble. Un nombre important d'effondrements est également visible dans les combes marneuses.

En milieu calcaire, la dissolution est relativement lente et les cas de ruptures de voutes calcaires suite à leur amincissement par dissolution progressive sont rares. Dans le Jura vaudois, essentiellement calcaire, les cas d'effondrement résultent principalement de l'effondrement d'une couverture meuble (sol, moraine, molasse) qui recouvre un vide dans le calcaire et est progressivement lessivée dans le karst, jusqu'à se rompre. L'évaluation du danger d'effondrement passe donc principalement par l'évaluation de l'emplacement de vide et de l'épaisseur de la couverture meuble.

¹ Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, Rue de la Serre 68, CP 818, CH-2301 La Chaux-de-Fonds

² CSD Ingénieurs, Chemin de Montelly 78, CP 60, CH-1000 Lausanne 20

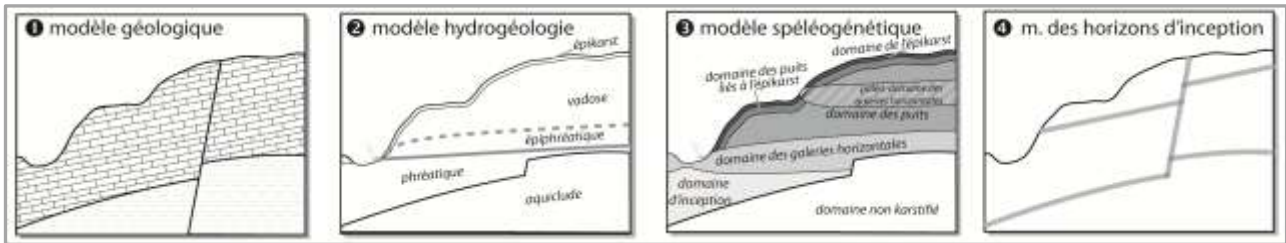


Fig. 1: Modèles nécessaires à l'application de la méthode KarstALEA, d'après FILIPPONI et al. (2012).

Une partie de la méthode KarstALEA vise à évaluer la densité de conduit karstique dans un volume de roche donné. Elle est principalement appliquée à l'évaluation des risques lors du percement d'un tunnel en milieu karstique. Comme le montre la Figure 1, la mise en place de cette méthode nécessite quatre différents modèles : (i) un modèle géologique, (ii) un modèle hydrogéologique, (iii) un modèle spéléogénétique et (iv) un modèle des horizons d'inceptions. La combinaison des facteurs identifiés dans ces quatre modèles permet d'évaluer d'une part des zones de danger au sein d'un massif karstique et d'y caractériser le danger (vide, taille, forme, sédiments, eau...) et la densité probable de conduits karstiques. Les bases scientifiques de cette méthode proviennent de FILIPPONI, 2009 et la méthode en tant que telle est explicitée dans FILIPPONI et al., 2011 et fait l'objet d'un rapport ASTRA (FILIPPONI et al., 2012).

Le principe de base de la méthode résulte du constat que les conduits karstiques ne sont pas distribués de

manière aléatoire dans le massif, mais qu'ils sont fortement contraints par :

- Certains niveaux stratigraphiques (horizons d'inception stratigraphique) ;
- Les fractures (horizons d'inception structural) ;
- Les paléo-niveaux phréatiques (horizons d'inception spéléogénétiques).

Evaluation de l'emplacement des vides karstiques en subsurface

L'approche consiste à évaluer les endroits où les horizons d'inception atteignent la surface ou la base des formations meubles couvrant le rocher.

Il existe deux approches pour identifier les horizons d'inceptions : l'observation des éléments morphologiques en surface et l'exploration spéléologique.

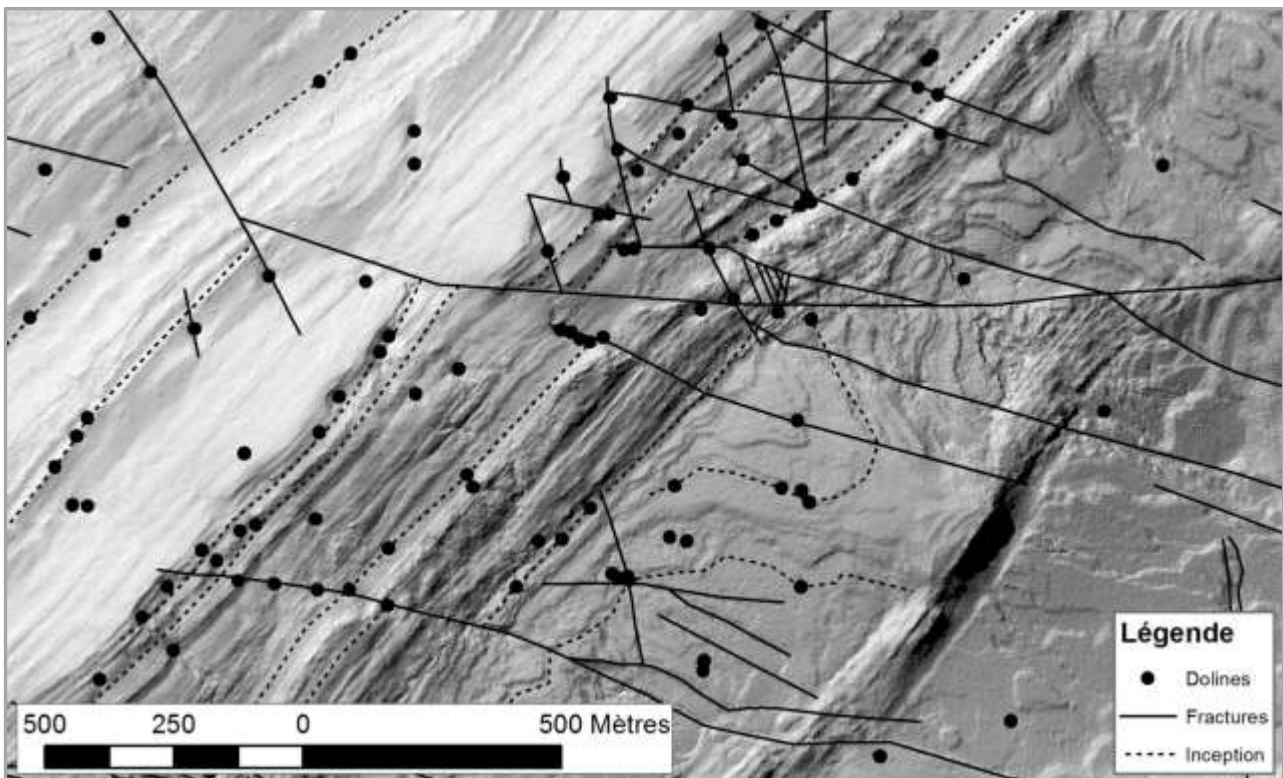


Fig. 2: Positions des dolines digitalisées manuellement et leurs relations avec les fractures et certains niveaux stratigraphiques spécifiques (horizons d'inception).

Identification des horizons d'inception par l'observation de surface

Sur l'ensemble du Jura vaudois, une digitalisation manuelle des dolines visibles sur la base de plusieurs ombrages du MNT-1 m a été menée (VOUILLAMOZ et al., 2012). Elle a permis d'identifier plus de 10'000 objets (KOPP et al., 2012). Les dolines digitalisées se répartissent principalement dans les formations karstiques et dans les formations marneuses dans lesquelles les alignements sont très prononcés, comme ceci a également été observé notamment par DOCTOR et al. (2008) et HYLAND et al. (2006). Les occurrences sont localisées pour la plupart sur des niveaux géologiques spécifiques et/ou sur des fractures qui les uns comme les autres peuvent être suivis précisément sur l'ombrage du MNT-1 m (Figure 2).

Identification des horizons d'inceptions par l'exploration spéléologique

Les topographies spéléologiques permettent de construire un modèle 3D des conduits explorés. Ce modèle 3D sert de base à l'identification des horizons d'inception. En insérant le modèle 3D des conduits karstiques dans un modèle 3D géologique, il est possible d'identifier la position relative de chaque conduit par rapport à un niveau stratigraphique de référence. Ceci permet de calculer la proportion de conduits karstiques par rapport à un référentiel stratigraphique (Figure 3). De cette façon, les horizons d'inceptions peuvent être identifiés et leur spécificité peut de plus être observée en détail dans les galeries.

Application au danger d'effondrement

A la différence de la question du creusement de tunnels, qui traite de la densité de conduits karstiques dans le massif, la problématique des effondrements porte sur la position des entrées de cavités en surface. C'est donc l'intersection des horizons d'inception avec le toit du

rocher qui sera l'objet de la recherche. Afin de permettre la cartographie de cette intersection, un modèle 3D géologique est nécessaire. Il permet d'une part de positionner les horizons d'inceptions dans la série stratigraphique et d'autre part d'évaluer l'épaisseur de la couverture meuble.

De cette façon il est possible d'une part, de caractériser la situation de danger et d'autre part, de cartographier ces situations sur l'ensemble du territoire. La Figure 4 montre un exemple de situation de danger liée à un horizon d'inception (niveau gris foncé). L'analyse tient également compte de l'épaisseur de la couverture meuble (niveau gris clair). L'intersection entre l'horizon d'inception et la base de la couverture meuble permet de cartographier une situation de danger.

L'approche proposée ci-dessus a été appliquée à quelques endroits très limités du Jura vaudois à titre d'essai. Elle devrait être plus largement utilisée dans les mois et années à venir.

Conclusion / Take-home-message (à retenir)

Les cas d'effondrements liés au karst dans le Jura vaudois résultent majoritairement de l'effondrement d'une couverture meuble sur un vide existant. Les principes énoncés dans la méthode KarstALEA (FILIPPONI et al., 2012) peuvent servir de base pour évaluer l'emplacement possible des conduits karstiques sous la couverture meuble. Pour ce faire un modèle 3D géologique est nécessaire et permet également d'évaluer l'épaisseur de la couverture meuble. Finalement, les critères influençant la situation de danger peuvent être quantifiés, caractérisés et cartographier afin de permettre la mise en place d'une carte de danger d'effondrement présentant non seulement les cas avérés, mais également les zones d'effondrement potentiel.

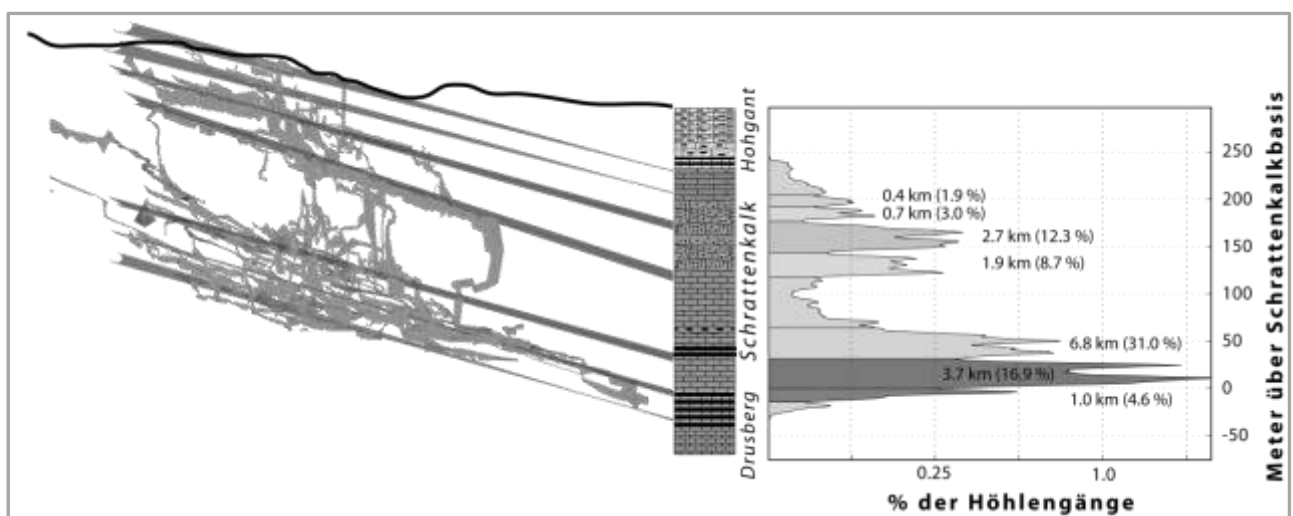


Fig. 3: Identification des horizons d'inceptions à partir des topographies spéléologiques. Tiré de FILIPPONI et al. (2009).

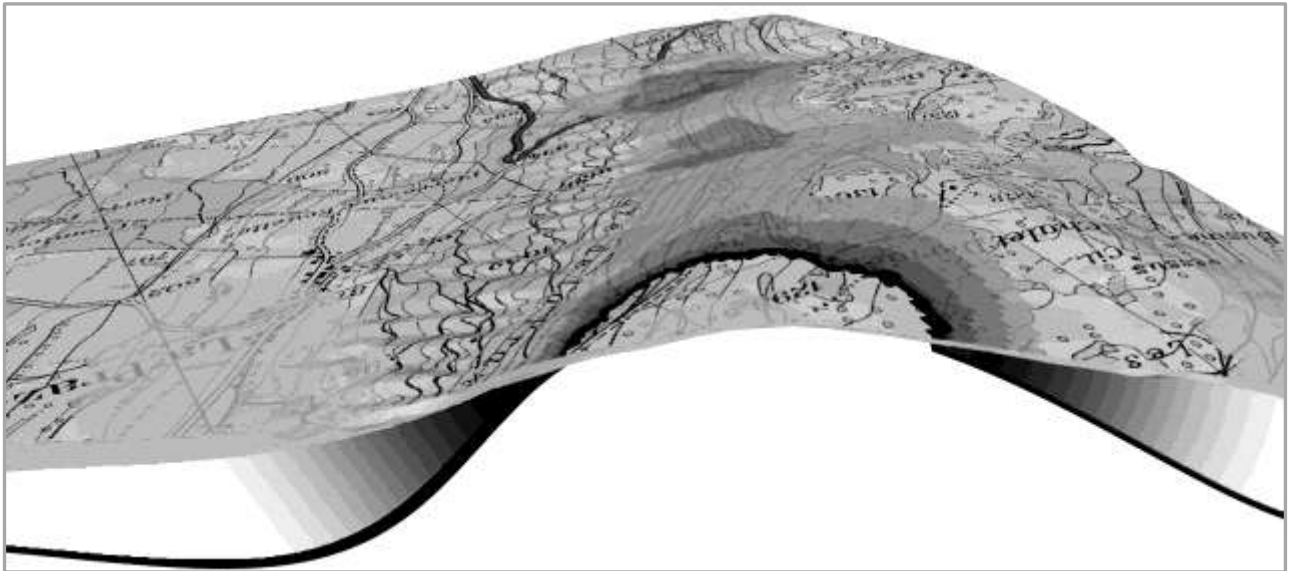


Fig. 4: Vue 3D présentant l'intersection d'un horizon d'inception (gris foncé) avec le toit du rocher (gris clair). Une zone de danger (dégradé de gris sur la carte topographique) est délimitée au droit de l'intersection.

Références

- CHAMPOD E. (2011): Carte Indicative du Danger d'Effondrement (CID-EFF) - Méthodologie développée pour le Jura et le Chamblais Vaudois. Rapport technique non-publié : Canton de Vaud, Département de la sécurité et de l'environnement, Cellule de projet CDN-VD, 1014 Lausanne, Suisse.
- DOCTOR D. H., WEARY D. J., ORNDORFF R. C., HARLOW G. E., KOZAR M. D., NELMS, D.L. (2008): Bedrock structural controls on the occurrence of sinkholes and springs in the northern Great Valley karst, Virginia and West Virginia. Proc. Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, Proceedings of the Eleventh Multidisciplinary Conference. p. 12-22.
- FILIPPONI M. (2009): Spatial Analysis of Karst Conduit Networks and Determination of Parameters Controlling the Speleogenesis along Preferential Lithostratigraphic Horizons. Thèse de doctorat : Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Suisse.
- FILIPPONI M., JEANNIN, P., TACHER, L. (2009): Evidence of inception horizons in karst conduit networks. *Geomorphology*, 106, 86-99.
- FILIPPONI M., SCHMASSMANN S., JEANNIN P. Y., PARRIAUX A. (2011): Karst - ALEA - Method of a risk assessment method of karst for tunnel projects: Application to the Tunnel of Flims (GR, Switzerland). Proc. 9th conference on limestone hydrogeology. Besançon, France. p. 181-184.
- FILIPPONI M., SCHMASSMANN S., JEANNIN P. Y., PARRIAUX A. (2012): KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau - Forschungsprojekt FGU 2009/003 des Bundesamt für Strassen ASTRA. Rapport technique non-publié : Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, Zürich, Schweiz.
- HYLAND S. E., KENNEDY L. M., YOUNOS T., PARSON S. (2006): Analysis of sinkhole susceptibility and karst distribution in the northern shenandoah valley, Virginia: Implication for low impact development (LID) site suitability models. Rapport technique non-publié : Virginia Polytechnic Institut and State University, Blacksburg, Virginia, USA.
- KOPP L., CHANTRY R., VOULLAMOZ J., JEANNIN, P. (2012): Etat de Vaud - Dangers naturels gravitaires - Méthodologie pour l'établissement de la carte de danger d'effondrement par dissolution (CD-EFF). Rapport technique : ISSKA - Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, La Chaux-de-Fonds, Suisse; CSD Ingénieurs, Lausanne, Suisse.
- VOULLAMOZ J., JEANNIN, P.Y. (2011): Eléments pour l'évaluation des dangers naturels en milieux karstiques. Proc. 2ième Journée de Rencontre sur les Dangers Naturels - Université de Lausanne - 18 février 2011. p. 31-36.
- VOULLAMOZ J., RICKERL, D., BANCA, C. (2012): Méthodologie pour la digitalisation manuelle de dolines sur le territoire du Jura vaudois. Note technique non-publiée. Pour l'obtenir, s'adresser à : ISSKA - Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, La Chaux-de-Fonds, Suisse; CSD Ingénieurs, Lausanne, Suisse.