

# **ALEA MOUVEMENTS DE TERRAIN LIES AU KARST : CONTEXTES, METHODE ET CAS TYPE TRAITES EN VUE D'UN GUIDE NATIONAL**

## **KARST COLLAPSE HAZARD : GEOLOGICAL SETTINGS, METHODOLOGY AND CASE STUDIES TOWARDS FRENCH NATIONAL GUIDELINES**

Gildas NOURY<sup>1</sup>, Emeric VEDIE<sup>2</sup>, Frédéric CLEMENT<sup>2</sup>, Eglantine HUSSON<sup>1</sup>, Cyril RESPAUD<sup>2</sup>, Pierre AZEMARD<sup>3</sup>, Ludovic DORE<sup>4</sup>, Sylvain HAUSSARD<sup>5</sup>, Jérôme PERRIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Bureau de Recherches Géologiques et Minières (Brgm), Orléans, France*

<sup>2</sup> *Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema), Bordeaux, France*

<sup>3</sup> *Cerema, Aix-en-Provence, France*

<sup>4</sup> *Cerema, Blois, France*

<sup>5</sup> *Cerema, Autun, France*

**RÉSUMÉ** – Le Brgm et le Cerema collaborent pour proposer pour la première fois une méthode d'évaluation de l'aléa mouvements de terrain lié au karst. Un guide technique exposera d'ici 2021 les spécificités des contextes karstiques et la démarche proposée (analyse multicritère). Les cartographies prédictives pouvant ainsi être obtenues seront utiles aux réflexions locales d'urbanisme.

**ABSTRACT** – Brgm and Cerema work together on an innovative methodology for evaluating the karst collapse hazard. Guidelines will explain for 2021 the characteristics of karstic settings and the proposed approach (multi-criteria analysis). The resulting predictive hazard maps can be integrated in the local urban planning.

### **1. Introduction**

Les cavités souterraines génèrent un risque de mouvements de terrain pouvant remettre en cause la sécurité des biens et des personnes se trouvant en surface. Les cavités anthropiques (mines, carrières, caves, sapes de guerre, etc.) font l'objet de nombreux documents techniques pour la gestion de ce risque, depuis leur détection jusqu'à leur mitigation, et ce à toutes les échelles d'étude. Les cavités naturelles présentent quant à elles des particularités impliquant d'adapter les raisonnements et les pratiques. Les risques liés à la dissolution du gypse ont ainsi récemment fait l'objet d'un guide édité par l'Ineris et le Cerema (Charmoille et al., 2018).

Les roches carbonatées karstiques sont le siège de phénomènes encore différents pouvant aboutir, suivant divers processus, à des effondrements ou des affaissements. La compréhension de ces instabilités impose une analyse pluridisciplinaire. L'histoire géologique en est en effet la clé d'entrée (présence/absence de cavités, configuration des vides et du substratum), mais elle ne suffit pas à elle seule à expliquer les mouvements observés en surface. Il faut pour cela également prendre en compte le comportement géotechnique des matériaux remplissant ou recouvrant la roche carbonatée et le rôle de l'eau, que ce soit celle présente à la surface, ou celle baignant le sol et/ou le sous-sol.

Dans le cadre des politiques de prévention des risques coordonnée par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (Direction Générale de la Prévention des Risques), le Brgm et le Cerema finalisent actuellement un guide méthodologique pour l'évaluation de l'aléa mouvements de terrain lié au karst. Son édition est prévue pour 2021. L'objectif est de fournir aux acteurs du risque (services de l'état, collectivités, bureaux d'étude, aménageurs) la possibilité d'évaluer cet aléa à différentes échelles (a priori aux échelles

correspondant au « porté à connaissance » et au PPR : 1/10 000 et 1/5 000, mais aussi, si besoin, à l'échelle régionale (1 /50 000 ou à l'échelle du site).

Le présent article constitue un résumé de ce futur guide (il en suit d'ailleurs la trame). La complexité des phénomènes en jeu implique tout d'abord un panorama des particularités karstiques, non seulement au niveau géologique (§ 2 du présent article) mais aussi d'un point de vue géotechnique, avec une présentation des processus et de leurs conséquences en surface (§ 3). La méthode choisie pour l'évaluation de l'aléa est ensuite détaillée : l'analyse multicritère présente l'avantage d'être prédictive, lisible et robuste (voir § 4). Deux cas d'étude, menés à différentes échelles sont enfin proposés à titre d'illustration (§ 5).

Le travail présenté est le fruit de la concertation d'une dizaine de géologues, géotechniciens et spécialistes en risques naturels issus des deux organismes (les auteurs). Il s'inspire bien sûr des références, via une analyse bibliographique, et se base sur le partage de retour d'expériences issues de travaux préexistant au groupe de travail.

## 2. Définitions des systèmes karstiques et contexte français

Le karst désigne un paysage comprenant des formes superficielles (dolines, poljés, canyons, vallées sèches...) et des formes souterraines (grotte, galeries, réseaux...) associé à un régime hydrologique spécifique, l'ensemble résultant de la dissolution des roches carbonatées ou évaporitiques.

L'organisation essentiellement verticale du karst (épi-, endo-karst) est l'aboutissement de la karstification, ensemble de processus évolutifs, associant altération physico-chimique et altération mécanique, qui élargissent les vides initiaux de la roche encaissante pour parvenir progressivement à la formation de structures de drainage organisées le long de chemins préférentiels d'écoulements souterrains. Les facteurs, et leur interaction, qui contrôlent la karstification se répartissent entre paramètres passifs (lithologiques, tectoniques...) et conditions aux limites (hydrodynamique entre la surface et le sous-sol...).

Vu depuis la surface du sol, le karst est soit nu (formation karstique à l'affleurement), soit « couvert » (altérites), soit sous-couverture (autre formation géologique) : Figure 1.

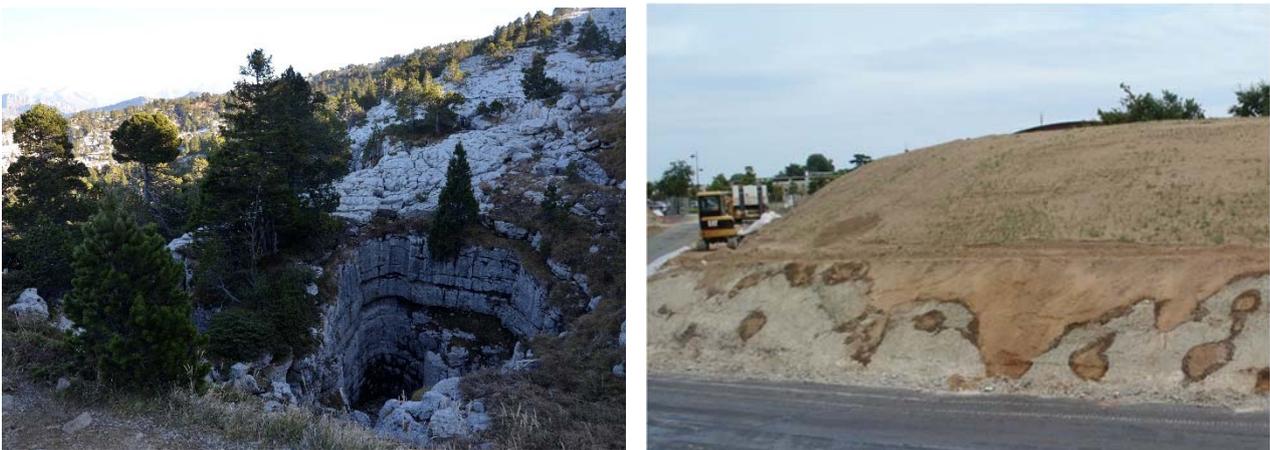


Figure 1. Karst nu au Parmelan (74) et sous couverture à Orléans (45) – clichés BRGM

En France, le karst s'étend sur environ 40% de la superficie métropolitaine et est également présent à quelques endroits en outre-mer.

### 3. Description des phénomènes et des processus d'instabilité liés au karst

A l'instar des autres types de cavités souterraines, les mouvements de terrain liés au karst prennent la forme, en surface, soit d'effondrement (rupture brutale et marquée), soit d'affaissement (déformation plus souple), avec une forme très souvent circulaire.



Figure 2. Exemples d'effondrements liés au karst – clichés Cerema et Brgm

Les dimensions de ces événements sont généralement décrites en terme de diamètre et de profondeur. Elles varient toutes les deux de quelques décimètres à plusieurs mètres. Les diamètres maximums observés restent inférieurs à ceux associés aux cavités souterraines anthropiques (effondrement généralisé des carrières et mines) ou au gypse : en France, ils atteignent dans quelques secteurs la vingtaine de mètre. Les diamètres moyens au sein d'une zone géographique sont de quelques mètres (inférieurs à 10 m).

Ces mouvements de la surface du sol sont le résultat d'une déstabilisation souterraine impliquant différents processus. A l'inverse des formations évaporitiques (Charmoille et al., 2018), la dissolution des roches carbonatées est un processus lent considéré comme n'aboutissant pas, à l'échelle d'une vie humaine, à des changements pouvant remettre en cause la sécurité des biens et des personnes (à l'exception des zones densément fracturées). Quatre processus de déstabilisation sont à l'œuvre ici : 1) La suffosion/soutirage des matériaux de couverture (Figure 3) ; 2) Le débouillage (vers le bas) d'un conduit karstique colmaté (Figure 4) ; 3) La rupture rocheuse au-dessus d'une cavité calcaire (Figure 5) ; 4) L'extrusion (vers le haut) d'un conduit colmaté (Figure 6).

Ces quatre processus peuvent avoir lieu en contexte de karst couvert et de karst sous couverture. Concernant le karst nu, seuls le débouillage, la rupture ainsi que l'extrusion peuvent se produire.

La cohérence entre les retours d'expériences (Brgm et Cerema) et la bibliographie permet de graduer la sensibilité des configurations de surface, ainsi que l'importance relative des processus. Les karsts couverts et sous-couverture apparaissent ainsi davantage exposés (d'un facteur 5 à l'échelle nationale – voir étude statistique de Perrin et al., 2014) aux mouvements de terrain, ces derniers étant essentiellement liés soit au processus de soutirage/suffosion, soit à celui de débouillage. Même si la rupture rocheuse (naturelle) au-dessus d'une cavité est généralement considérée comme rare à l'échelle d'une vie humaine (agrandissement des vides rocheux surtout lié à la lente dissolution de la roche), elle nécessite une attention particulière étant donné que ce processus peut être à l'origine de désordres de forte intensité. L'extrusion peut en première approche paraître anecdotique (configuration spécifique à certaines régions), mais les dommages potentiels imposent là-aussi de le prendre en considération.

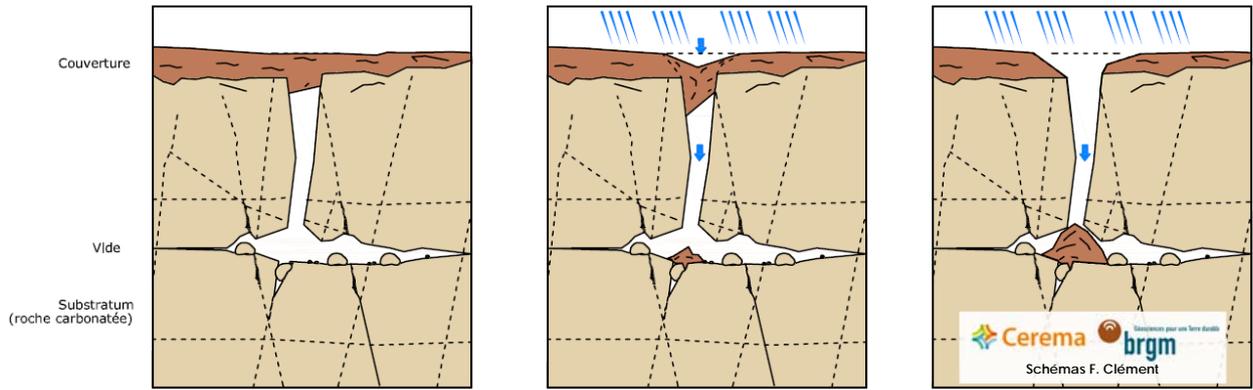


Figure 3. Mouvement par soutirage / suffosion

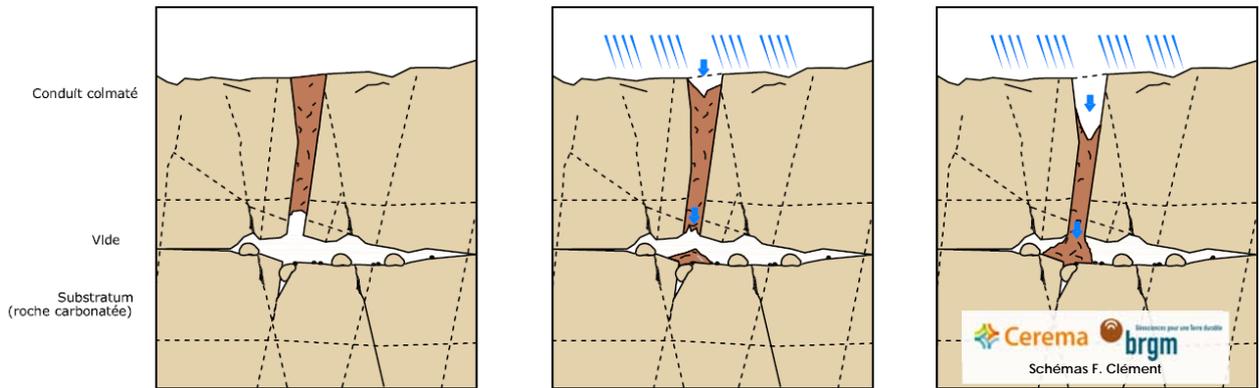


Figure 4. Mouvement par déboufrage d'un conduit colmaté

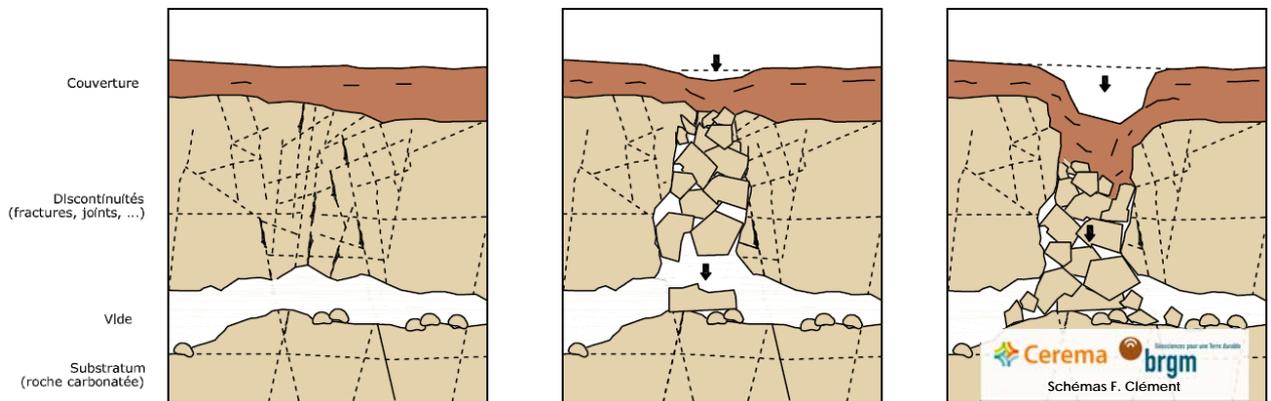


Figure 5. Mouvement par rupture mécanique d'une cavité

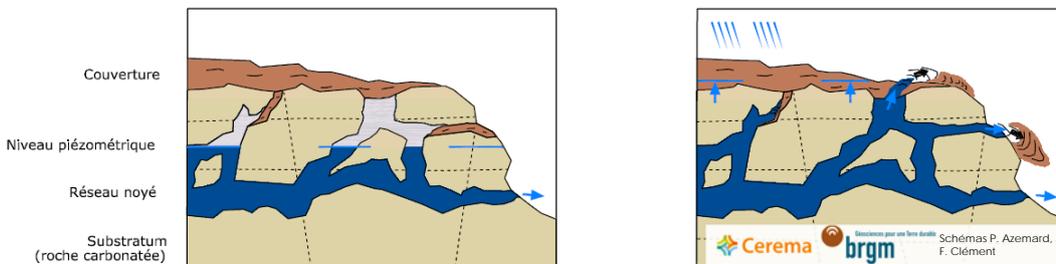


Figure 6. Mouvement par extrusion

## 4. Méthodologie d'évaluation de l'aléa

### 4.1. Caractérisation du secteur étudié

La première étape du travail consiste à collecter le maximum de données possibles : carte géologique, topographique, piézométrique, Modèle Numérique de Terrain, coupe géologique (sondage, affleurement), lever spéléologique, article et ouvrage de référence, inventaire des cavités et des mouvements de terrain, etc. La représentation de ces données se fait classiquement sous la forme d'une ou de plusieurs cartes « informatives » qui serviront ensuite pour les extrapolations / interpolations pour les zones mal renseignées.

### 4.2. Evaluation de la prédisposition aux mouvements de terrain

Même si les mouvements de terrain connus guident la réflexion pour sélectionner les processus a priori à l'œuvre, ils ne sont pas forcément représentatifs de ce qui peut se passer ailleurs sur le secteur. L'analyse multicritère permet de s'affranchir de ce biais en passant en revue l'ensemble des « ingrédients » concourant à la survenue d'un mouvement. Chaque critère est ainsi caractérisé en fonction de son influence sur le processus étudié (par exemple : intensité de la karstification, sensibilité « intrinsèque » à l'érosion interne, intensité des sollicitations hydriques, etc.). Certains sont plus sensibles que d'autres ce qui implique une pondération dans les notations. Ici, 3 pôles ont été retenus, chacun contenant plusieurs critères (Exemple du débouillage en Figure 7).

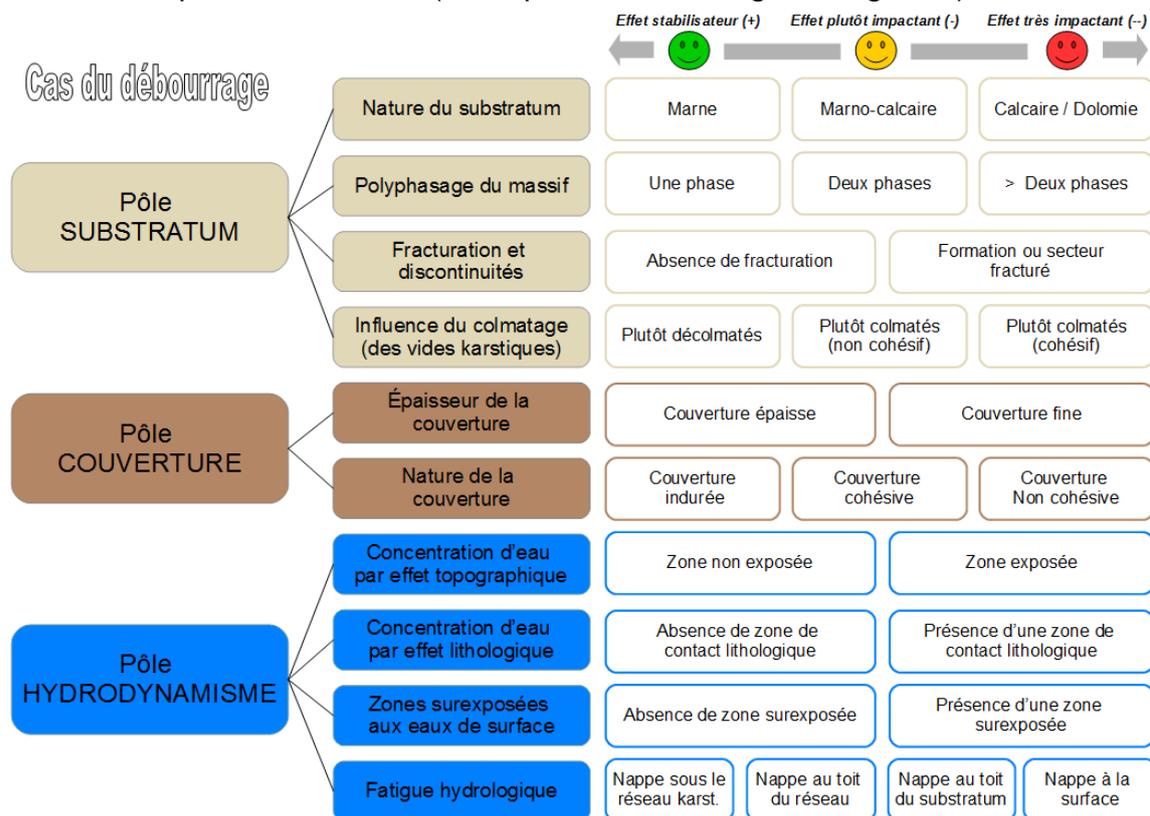


Figure 7. Pôles, critères et paramètres à analyser pour évaluer la prédisposition

### 4.3. Evaluation de l'intensité puis de l'aléa

L'intensité des mouvements de terrain attendus (diamètre) peut s'évaluer suivant la même approche que pour la prédisposition ou via une analyse classique des mouvements connus (définition d'un événement de référence, avec diamètre associé). Le croisement prédisposition / intensité, sous la forme classique d'une matrice, aboutit enfin à l'évaluation de l'aléa.

## 5. Etude de cas

Les résultats d'application de la méthode proposée dans le futur guide sont illustrés par les exemples suivants, qui, parmi d'autres, ont permis d'en affiner les réglages.

### 5.1. Ville de Belfort

La commune de Belfort (17.1 km<sup>2</sup>) s'inscrit à cheval sur trois ensembles géologiques : Au Nord : les contreforts des Vosges (terrains sédimentaires et volcaniques Dévonien→Permien, métamorphisés, visibles en partie au niveau du massif du Salbert). Au Centre, et de façon majoritaire pour la commune : l'extrémité nord du Jura (terrains sédimentaires du Trias et du Jurassique, ressortant au niveau du massif du Mont et du secteur de la citadelle). Au Sud et à l'Est : les terrains sédimentaires du fossé Rhénan (Eocène et Oligocène), recouverts par du lœss quaternaire. La zone d'étude est par ailleurs fortement structurée. La Savoureuse suit ainsi la direction d'une faille orientée N-S, réactivée à plusieurs reprises dans son histoire. Les jeux de cette faille et d'une autre série de failles, a abouti à deux orientations de plongements des terrains mésozoïques.

Quelques cavités naturelles ont été repérées dans le secteur (y compris en sondages géotechniques). Elles sont liées au karst des formations carbonatées (Trias et Jurassique) et à la dissolution du gypse (Trias). Sept mouvements de terrain attribuables au karst ont par ailleurs été recensés sur la commune lors des vingt dernières années, le plus grand ayant atteint un diamètre de 7 m et une profondeur de 5.5 m.

Le processus présenté ici est le soutirage des matériaux de couverture par le karst. Une attention particulière est portée au droit de la seule salle karstique connue sur la commune, la grotte de Cravanche, qui se situe hors secteur urbanisé. Masquée sur une grande partie de la zone urbaine par les alluvions de la Savoureuse (5 à 15 m d'épaisseur), les formations karstifiées ont imposé la réalisation d'un écorché géologique (zones incertaines indiquées dans les cartes de rendu). Dans ces secteurs, l'intensité attendue est modérée. Ailleurs, la faible épaisseur attendue d'altérites au-dessus du karst fait retenir une intensité limitée. La prédisposition, puis l'aléa, sont évalués par combinaison de notes, pondérées suivant les critères étudiés (Figure 8 et Vallet et al., 2019).

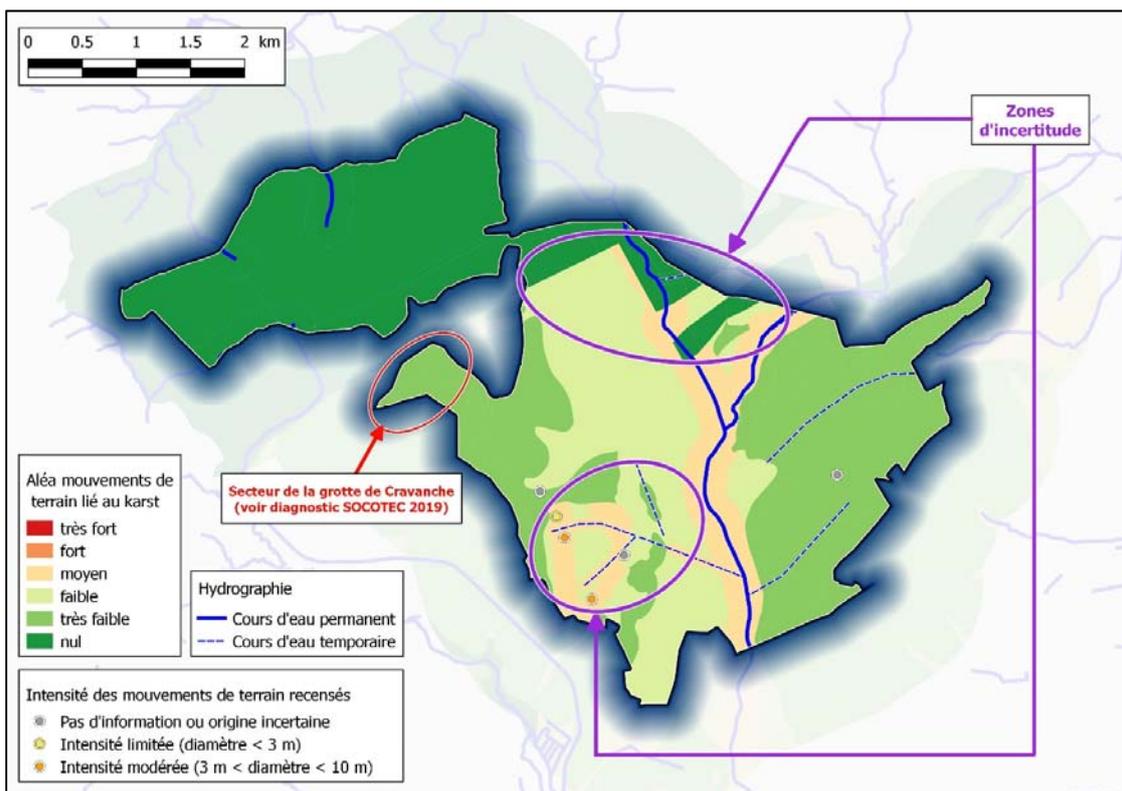


Figure 8. Cartographie de l'aléa MVT karst sur la commune de Belfort (90)

## 5.2. Etude d'un site du Pays de Serres (Lot-et-Garonne)

Le périmètre d'étude, d'une superficie d'environ 3 km<sup>2</sup>, se situe en rive droite de la plaine de la Garonne, au niveau de la bordure d'un vaste plateau d'assise calcaire, non loin de la ville de Agen, dans le département du Lot et Garonne. Localement, le plateau étudié est légèrement incliné et forme de longues échines ondulées, dont l'altitude moyenne est comprise entre 160 et 190 m NGF. Il est entaillé sur plusieurs kilomètres par une série de vallons parallèles (drainage hydrographique de surface et souterrain) qui s'encaissent jusqu'à la cote altimétrique de 140 m NGF environ. Le paysage est donc marqué par des corniches calcaires sub-verticales dont la hauteur est comprise entre 5 et 10 m.

Les formations géologiques, tabulaires, correspondent principalement à des dépôts continentaux fluvio-lacustres tertiaires (Oligocène et Miocène) entaillés durant le Pliocène puis au cours du Quaternaire. Le substratum carbonaté (et karstifié) correspond à un calcaire blanc micritique. Il est surmonté d'une formation jouant le rôle de couverture (jusqu'à 30 m d'épaisseur localement) de type argiles carbonatées silteuses puis de formations superficielles. Sur le secteur d'étude, le réseau karstique souterrain, non visitable, possède de la fissuration et des conduits subhorizontaux de diamètre décimétrique (plus ou moins colmatés), siège d'un aquifère perché à l'origine de sources (exurgences) en base des bancs calcaires qui alimentent des fontaines (débits de l'ordre de 10 à 30 m<sup>3</sup>/h), ainsi que les nombreux ruisseaux qui s'écoulent dans les fonds de vallon.

Concernant les mouvements de terrain constatés en surface, ils correspondent principalement à des petits effondrements localisés (diamètre inférieur à 1 m) ou à des dolines d'affaissement de grand diamètre. L'intensité des mouvements de terrain sur le secteur d'étude est essentiellement donnée par ces observations, ce qui se traduit par une intensité faible. Une intensité moyenne a par ailleurs été affectée à un thalweg (comportement spécifique avec un événement de référence de 3 m de diamètre) et sur la plupart des exutoires de thalwegs (à dire d'expert).

La prédisposition aux mouvements de terrain (issus du processus de débouillage) a été appréhendée par cartographie puis croisement matriciel des critères impliqués dans leur déclenchement. En raison du contexte géologique relativement simple du secteur d'étude, plusieurs critères ont été considérés comme homogènes à l'échelle du périmètre étudié (critères relatifs au substratum notamment). L'épaisseur de la couverture et le rôle des eaux, aussi bien de surface que souterraines, présentent en revanche des variations spatiales.

La cartographie de l'aléa obtenue par croisement de la prédisposition et de l'intensité aboutit à 3 classes d'aléa (faible, moyen, fort) : voir Figure 9.

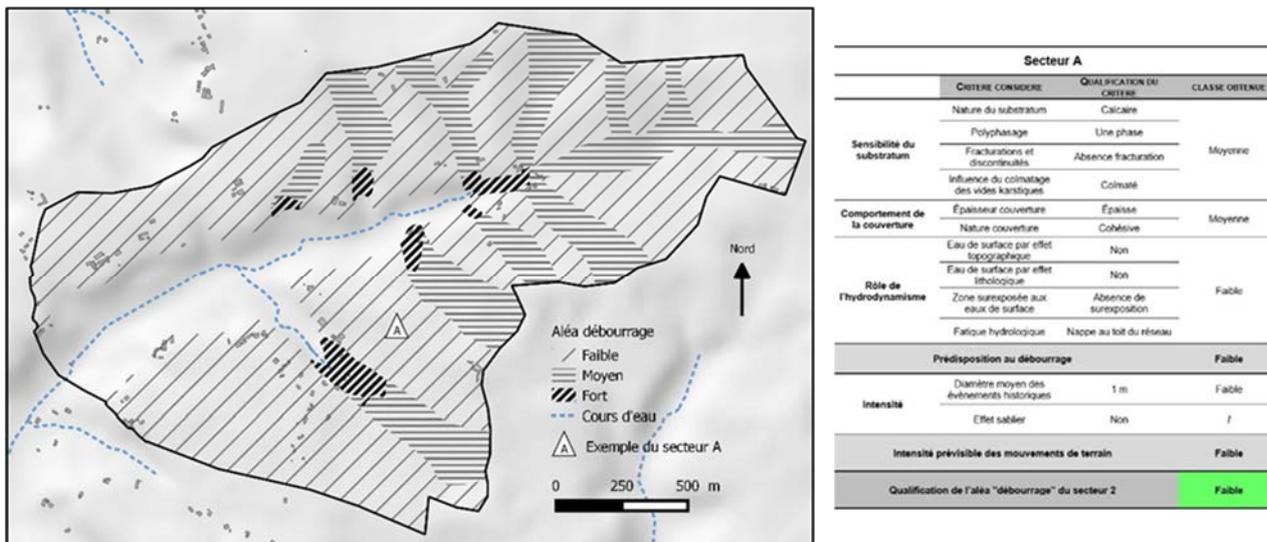


Figure 9 : Cartographie de l'aléa MVT karst sur un site du Pays de Serres (47)

## 6. Conclusions

Assez mal connu voire difficilement compris, l'aléa de mouvements de terrain liés au karst était jusqu'à présent peu traité et se limitait bien souvent à délimiter les formes et effondrements recensés à la surface du sol. Dans le cadre d'une politique nationale de gestion du risque portée par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, le Brgm et le Cerema ont développé une méthodologie permettant d'aller plus loin. Grâce à une présentation pédagogique des phénomènes et de leurs conséquences sur la stabilité des terrains, le futur guide fournit tout d'abord des clés de compréhension. Fort de ces éléments, l'expert peut ensuite caractériser les sites étudiés. Intégrée dans le croisement classique prédisposition / intensité propre aux risques naturels, l'analyse multicritère aboutit à une évaluation prédictive, lisible et robuste de l'aléa. Les cartes obtenues peuvent ainsi être intégrées aux réflexions d'urbanismes (avec une mise à jour facilitée), de manière à orienter les études complémentaires (à l'échelle du site) et de prévoir en amont les adaptations constructives nécessaires. *La présentation prévue à la suite de cet article développera, à travers des exemples, certains aspects de la méthodologie, en particulier la caractérisation des différents critères et leur déclinaison en termes de prédisposition puis d'aléa.*

## 7. Références bibliographiques

- Audra P. (Dir.) 2010. Grottes et karsts de France. Association française de karstologie. Karstologia Mémoires 19: 360 p.
- Charmoille A., Lecomte A., Kreziak C. 2018. Guide – Dissolution naturelle du gypse dans le sous-sol – Analyse et gestion des aléas mouvements de terrain de type affaissement et effondrement. Ineris 17-164710-03375A
- Clément F., Védie E. 2018. Cavité de Camelot (16) – Analyse des enjeux communaux et étude du risque karstique. Cerema-DTerSO-18- 24-FR
- Dörfliger, N. 2010. Guide méthodologique – les outils de l'hydrogéologie karstique. Avec la collaboration de P. Crochet, N. Jozja, B. Marsaud, P-H. Mondain, P. Muet, V. Plagnes. BRGM RP-58237-FR, 246 pp.
- Gilli E. 2011. Karstologie – karsts, grottes et sources. Editions Dunod (Sciences Sup).
- Ministère de l'Ecologie du Développement Durable et de l'Energie 1999. Plan de prévention des risques naturels (PPRN) : Risques de mouvement de terrain : guide méthodologique – La documentation française Paris 1999 ISBN 2-11-004354-7.
- Ministère de l'Ecologie du Développement Durable et de l'Energie 2012. Guide méthodologique Plan de prévention des risques naturels : Cavités souterraines abandonnées : 81 p.
- Perrin J., Noury G., Cartannaz C. 2014a. ALEA-Karst : vers une approche multicritère de l'aléa lié aux cavités karstiques en contexte calcaire. Volume 1 : Trame méthodologique – Rapport BRGM/RP-63771-FR.
- Perrin J., Noury G., Cartannaz C., Gutierrez T., Van Laere A. 2014b. ALEA-Karst : vers une approche multicritère de l'aléa lié aux cavités karstiques en contexte calcaire. Volume 2 : étude de sites - Rapport BRGM/RP-63771-FR, 119 p.
- Perrin J., Noury G., Azémard P., Clément F., Mathon D., Haussard S., Respaud C., Védie E., Zergaoui N. 2016, Réflexions méthodologiques pour une meilleure évaluation de l'aléa mouvements de terrain d'origine karstique. Rapport BRGM/RP-66508-FR.
- Vallet A., Noury G., Rabin M., Husson E. (2019) – Cartographie des aléas effondrement/affaissement lié au karst, glissement de terrain et chute de blocs sur la commune de Belfort (90). Rapport final. BRGM/ RP-69009-FR, 203 p., 66 ill., 8 ann.
- Waltham A.C., Bell F.G., Culshaw M.G. 2005. Sinkholes and Subsidence : karst and cavernous rocks in engineering and construction. Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK : 382 p.