HAL
open science

Caractérisation et évaluation de l'aléa versant rocheux sous-cavé

Auxane Cherkaoui, Margaret Herbaux, Jean-Marc Watelet, Nathalie Berenger, Charles Kreziak, David Mathon, Véronique Berche

To cite this version:

Auxane Cherkaoui, Margaret Herbaux, Jean-Marc Watelet, Nathalie Berenger, Charles Kreziak, et al.. Caractérisation et évaluation de l'aléa versant rocheux sous-cavé. 9. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur (JNGG 2018) "Ressources et aménagement : quelles limites ?", Jun 2018, Marne la Vallée, France. ineris-01863351

HAL Id: ineris-01863351

https://ineris.hal.science/ineris-01863351v1

Submitted on 28 Aug 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CARACTERISATION ET EVALUATION DE L'ALEA VERSANT ROCHEUX SOUS-CAVE

CHARACTERISATION AND EVALUATION OF MINED ROCKY CLIFFS

Auxane CHERKAOUI[1], Margaret HERBAUX[2], Jean-Marc WATELET[1], Nathalie BERENGER[2], Charles KREZIAK[2], David MATHON[2], Véronique BERCHE[2]
[1] *Ineris, Verneuil-en-Halatte, France*
[2] *Cerema*

RÉSUMÉ – Lorsque des falaises présentent des cavages donnant accès à des cavités souterraines, on parle de versants sous-cavés. L'aléa mouvement de terrain doit alors prendre en compte l'interaction entre le versant et la cavité. Or, il n'existe pas de méthodologie spécifique pour déterminer l'aléa versant rocheux sous-cavé. L'Ineris et le Cerema se sont donc associés pour proposer une approche méthodologique commune.

ABSTRACT – When cliffs have mines giving access to underground cavities, we speak of mined cliffs. The ground movement hazard must then take into account both the cliff and the cavity. There is no specific methodology for determining the mined rocky cliff. In view of this, Ineris and Cerema have joined forces to propose a common methodology for evaluating the mined cliff hazard.

1. Introduction

De manière générale, un aléa se définit comme le croisement entre la prédisposition du site aux instabilités et l'intensité potentielle de ses dernières. Sur un site de versant rocheux sous-cavé, l'interaction entre l'aléa « versant rocheux » et l'aléa « cavité souterraine » a une influence sur la stabilité mécanique, ce qui justifie une méthodologie adaptée :

- par rapport à l'aléa « versant rocheux » : dans une falaise classique quasi-verticale, il y a une forte concentration de contraintes en pied. La présence d'une excavation à cet endroit modifie complètement et défavorablement l'équilibre mécanique ;
- par rapport à l'aléa « cavité » : la proximité de la paroi modifie le report du poids du recouvrement autour de la cavité. Par exemple, s'il y a des piliers, ils peuvent être moins chargés verticalement mais ils sont soumis à des contraintes obliques, ce qui est plutôt défavorable.

La méthodologie de caractérisation de l'aléa versant rocheux sous-cavé traite l'aléa « versant rocheux » et l'aléa « cavité souterraine » de manière conjointe.

La première étape consiste à découper le site ou le secteur à cartographier en tranches, chacune ayant ses caractéristiques. La caractérisation de l'aléa sera réalisée dans chaque tranche. La deuxième étape est de vérifier qu'il existe une interaction entre les deux phénomènes, autrement dit que les marges d'influence (M1 et M2) des deux aléas se recoupent (Figure 1).

La marge M_1 est définie comme la distance d'influence mécanique de la cavité sur le massif environnant. Pour une première approche et en se basant sur le retour d'expérience des données utilisées pour le creusement des tunnels, il est proposé que la marge M_1 soit égale au maximum, à 5 fois la hauteur de la cavité (H_c). La marge M_2 est défini comme la distance d'influence mécanique du versant sur le massif environnant. Pour la marge M_2, il est proposé qu'elle soit égale à la distance Hf (hauteur du front de

falaise). La distance D est définie comme la distance entre la cavité et le front de falaise. L'évaluation de ces marges M1 et M2 peut, en tout état de cause, être ajustée au cas par cas à l'issue de la phase de collecte des données (retours d'expérience, évènement historique, …) (Cherkaoui et Thoraval, 2014).

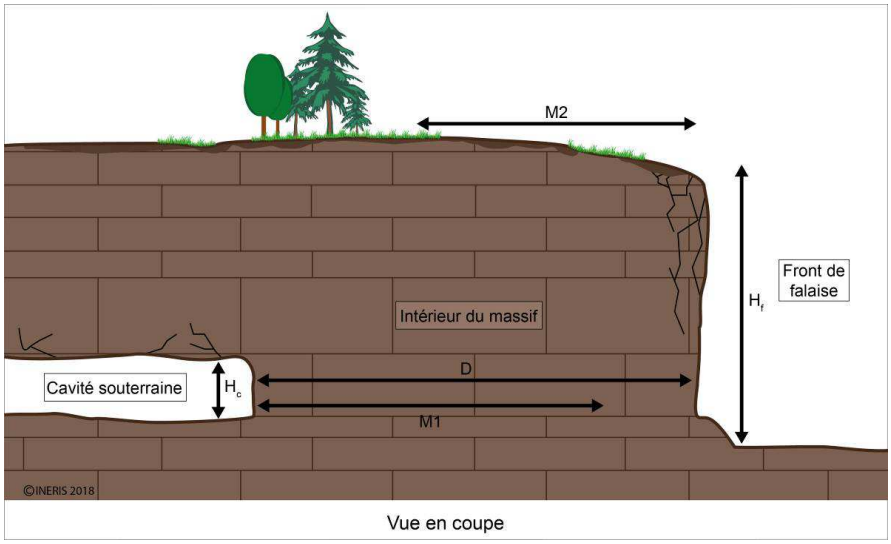

Figure 1. *Représentation schématique d'un massif avec un front de falaise et une cavité*

La méthodologie ne s'applique que dans la zone d'interaction des marges M1 et M2. Pour les autres zones, des méthodologies appropriées seront appliquées telles que celle de l'évaluation de l'aléa cavité ou celle de l'évaluation de l'aléa versant rocheux.

2. Caractérisation de l'intensité

Il a été choisi de caractériser l'intensité des phénomènes d'instabilités des versants sous-cavés par des paramètres physiques. L'objectif est d'évaluer l'énergie induite par la chute d'un élément rocheux. Ainsi, les critères physiques que sont le volume et la hauteur de chute d'éléments potentiellement instable ont été considérés (MEDDE et al., 2014), selon la classification suivante :

- la **hauteur des éléments potentiellement instables observables sur le front** : inférieure à 5 m, entre 5 et 10 m, entre 10 et 15 m, supérieure à 15 m ;
- le **volume des éléments potentiellement instables observables sur le front :** pas d'élément instable visible (visibilité du versant mais aucune instabilité constatée), pierres et petits blocs (<1 dm^3), blocs (1 dm^3 à 1 m^3), gros blocs (1 m^3 à 10 m^3), masses (supérieur à 10 m^3 et jusqu'à plusieurs centaines de m^3).

Un troisième critère peut venir aggraver le niveau d'intensité résultant du croisement des 2 critères précédents. Plus le recouvrement est important au-dessus du niveau de la cavité souterraine, plus le **volume de matériaux mobilisables** est important, en considérant la possibilité d'un effondrement global de la cavité et du versant. Plus ce volume des matériaux mobilisables est important et plus l'intensité est élevée. Deux cas de figures peuvent se présenter. Tout d'abord, toutes les dimensions de la cavité sont connues (profondeur, largeur, hauteur). Il sera donc possible de calculer quantitativement le volume de matériaux mobilisables dans la zone d'application de la méthodologie. A partir de la valeur calculée, l'opérateur devra évaluer si ce volume est faible, moyen ou important (Figure 2). Dans le second cas où toutes les dimensions de la cavité ne sont pas connues, le volume de matériaux mobilisable est estimé en calculant le ratio entre la

hauteur de la cavité (H_c)[1] et la hauteur entre le plancher de la cavité et le sommet du front (H_m)[2] (Figure 3).

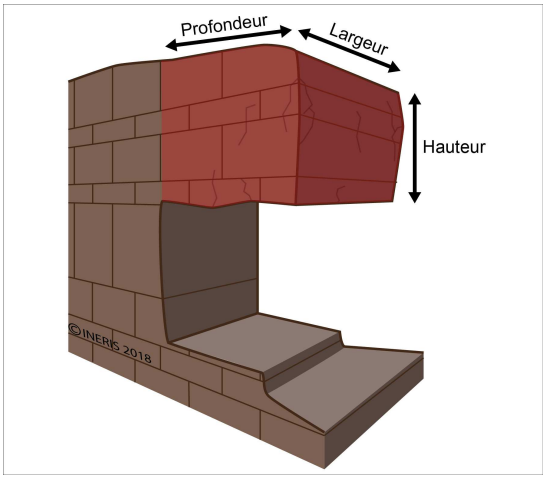

Figure 2. *Représentation schématique du volume de matériaux mobilisables*

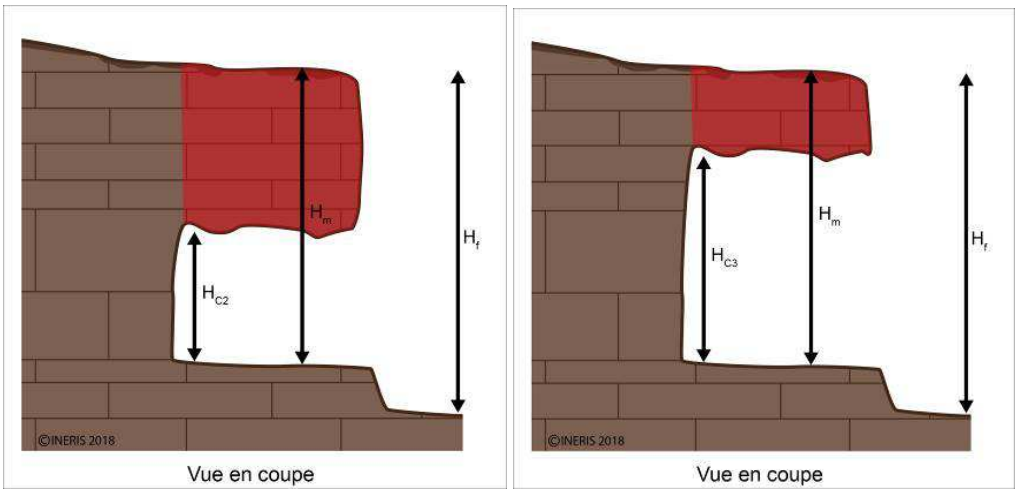

Figure 3. *Présentation de trois cas de figure pour illustrer le volume des matériaux mobilisables*

Le tableau suivant (Tableau 1) propose de définir ensuite ce troisième critère de manière qualitative en établissant une correspondance entre le rapport H_c/H_m et trois niveaux d'évaluation du volume de matériaux mobilisables (faible, moyen et important).

Tableau 1. *Evaluation qualitative du critère « volume estimé de matériaux mobilisables »*

Rapport H_c/H_m	**Volume estimé de matériaux mobilisables**
Supérieur à 2/3	Faible
Entre 2/3 et 1/3	Moyen
Inférieur à 1/3	Important

Dans le cas d'une cavité réduite (profondeur et largeur inférieure au mètre) l'approche par le rapport H_c/H_m n'est pas pertinente. L'intensité de l'aléa versant sous-cavé ne dépendra que des deux premiers critères.

[1] Si la cavité est de hauteur variable, la hauteur minimale sera prise.

[2] Il est à noter que H_m est égale à H_f si la cavité se trouve à la base du versant.

La caractérisation de l'intensité résulte du croisement de ces différents critères selon le tableau ci-dessous (Tableau 2). Pour obtenir le niveau d'intensité, il est nécessaire de croiser ensemble les deux premiers critères, à savoir la hauteur des éléments instables et le volume des éléments instables. Un niveau d'intensité est ainsi obtenu. Ensuite, le niveau du volume de matériaux mobilisables va venir aggraver ou non le niveau d'intensité déterminé. Ce dernier critère ne pourra en aucun cas diminuer le niveau d'intensité.

Tableau 2. *Évaluation de l'intensité de l'aléa versant sous-cavé*

Intensité		**Volume des éléments instables sur le front**					
		Pas d'élément instable visible	Pierres moins (<dm^3)	Blocs (de 1 dm^3 à 1 m^3)	Gros blocs (de1 m^3 à 10 m^3)	Masse (> 10 m^3)	**Volume de matériaux mobilisables (au-dessus de la cavité)**
Hauteur des éléments instables sur le front	0-5m	Très limitée	Très limitée	Limitée	Limitée	Modérée	Faible
	5-10m	Très limitée	Très limitée	Limitée	Modérée	Elevée	
	10-15m	Limitée	Limitée	Modérée	Élevée	Elevée	Moyen
	+ 15m	Limitée	Modérée	Élevée	Élevée	Elevée	Important

3. Caractérisation de la prédisposition du site vis-à-vis de la rupture

Trois notions importantes doivent être prises en compte dans cette évaluation de la prédisposition : le niveau d'**activité du massif** (dormant, inactif ou peu actif, frais et actif), les **facteurs aggravants** et **l'influence des cavités** (état de stabilité et volume des vides).

3.1 Caractérisation de l'activité du massif

Le degré d'activité est évalué à partir d'indices d'ordre essentiellement géomorphologique lors de la visite de terrain. Ils permettent de qualifier l'aspect et la fraîcheur apparente des structures rocheuses. Cette évaluation se fait uniquement sur le versant rocheux. Les critères pris en compte sont les suivants : les traces morphologiques, les traces mécaniques et les atteintes aux infrastructures ou à l'environnement. Le tableau suivant (Tableau 3) établit le lien entre la qualification du massif (dormant, peu actif, frais, actif) et les indices d'activité. Le site peut ainsi être classé dans une catégorie.

Tableau 3. *Classes d'activité d'un front rocheux (d'après Didier et Tritsch, 1999)*

Qualification du massif	**Principaux indices d'activité**
Dormant	Traces morphologiques estompées, pas d'écaillage superficiel, pas de fracture mécanique, aucune atteinte aux infrastructures et à l'environnement
Inactif ou peu actif	Traces morphologiques d'évolution, quelques légers écaillages superficiels, fractures mécaniques anciennes, pas d'atteinte aux infrastructures et à l'environnement
Frais	Traces morphologiques fraîches, écaillages superficiels, fractures mécaniques développées et atteinte possible aux infrastructures et à l'environnement.
Actif	Traces morphologiques actives, écaillages profonds, fractures mécaniques ouvertes et évolutives et atteintes manifestes aux infrastructures et à l'environnement.

3.2 Facteurs aggravants

Les facteurs aggravants sont des paramètres extérieurs au versant qui peuvent aggraver l'instabilité du versant sous-cavé, si leurs effets ne sont pas maitrisés : l'eau, les cycles de gel/dégel, les variations de température, le vent, la végétation, la faune, les mauvaises pratiques anthropiques... Selon la nature des paramètres et leur association, ils favorisent de manière plus ou moins importante la déstabilisation. Le Tableau 4 établit des critères de cotation en attribuant une note aux facteurs aggravants observés. L'occurrence du phénomène va dépendre de la note attribuée. Plus elle est élevée, plus la prédisposition est majorée.

Tableau 4. *Critères de cotation pour les facteurs aggravants*

Niveau de cotation	Facteurs aggravants observés
Aucun	Bonnes pratiques anthropiques
1	Végétation défavorable (racines pivotantes, arbres) ou présence de traces liées à la faune (terriers, écaillage du massif par des oiseaux) ou phénomène climatique défavorable (vent, gel/dégel, variation de température)
2	Eau ou confortement en mauvais état
3	Plusieurs facteurs aggravants qui se superposent ou mauvaise pratique anthropique

3.3 État de stabilité et volume de la cavité

La prédisposition du site à la rupture va dépendre enfin de l'état de stabilité de la cavité croisé avec son volume (appelé « volume de vide »).

Parmi les approches possibles (LCPC, 2004 ; MEDDE, 2012), l'état de stabilité de la cavité en bordure de coteau peut être défini de la façon suivante :

- **cavité stable** : cavité d'apparence saine, discontinuités d'origine lithologique ou mécanique anciennes, peu développées, non actives, pas ou peu d'eau, absence de racine, de matériaux au sol décrochés du toit ou des parements. S'il s'agit d'une carrière souterraine étendue, les piliers proches de l'entrée sont en bon état : pas d'écaillage, fractures mécaniques anciennes et non actives, taux de défruitement acceptable ;
- **cavité instable** : cavité présentant des discontinuités d'origine lithologique ou mécanique évolutives, présence d'eau et/ou de racines par endroit, présence de blocs instables au toit et/ou au sol (récemment tombés), montées de voûte , présence de débourrages partiels de karst ou de puits remblayés à proximité du versant, décollement faible de dalle de toit (rupture en traction). S'il s'agit d'une carrière souterraine, l'état des piliers est inégal : certains sont en bon état alors que d'autres présentent des signes d'écaillage et des fractures mécaniques, le taux de défruitement a une valeur limite ;
- **cavité très instable** : cavité en très mauvais état présentant de nombreuses discontinuités d'origine lithologique ou mécanique ouvertes et évolutives, présence d'eau et/ou de racines, présence de nombreux blocs instables au toit et/ou au sol (récemment tombés), présence de cheminées de fontis importantes et évolutives, présence de débourrages importants de karst ou de puits remblayés à proximité du versant, décollement important de la dalle de toit (rupture en traction). S'il s'agit

d'une carrière souterraine s'étendant en profondeur, les piliers sont dégradés et présentent de nombreux signes d'écaillage et des fractures mécaniques ouvertes et évolutives, le taux de défruitement est très faible (surexploitation).

L'état de stabilité de la cavité est déterminé dans la zone d'application de la méthodologie.

Le volume des vides, calculé dans la zone d'application de la méthodologie, est un paramètre important. En effet, plus le volume de vide est important et plus la cavité est instable, plus l'occurrence du phénomène est considérée élevée. Deux cas de figures peuvent se présenter. Tout d'abord, toutes les dimensions de la cavité sont connues (profondeur, largeur, hauteur). Il sera donc possible de calculer quantitativement le volume des vides dans la zone d'application de la méthodologie. A partir de la valeur calculée, l'opérateur devra évaluer si ce volume est faible, moyen ou important (Figure 4).

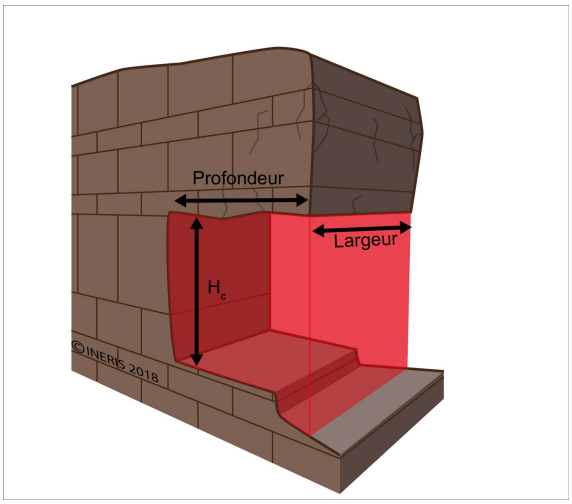

Figure 4. *Représentation schématique du volume des vides*

En revanche, si toutes les dimensions de la cavité ne sont pas connues, le volume des vides est estimé par le ratio entre la hauteur de la cavité (H_c)[3] et la hauteur maximale du front (H_f) (Figure 5). Le Tableau 5 établit, de manière qualitative, une correspondance entre le rapport H_c/H_f et trois niveaux d'évaluation (faible, moyen et important) du volume de vide.

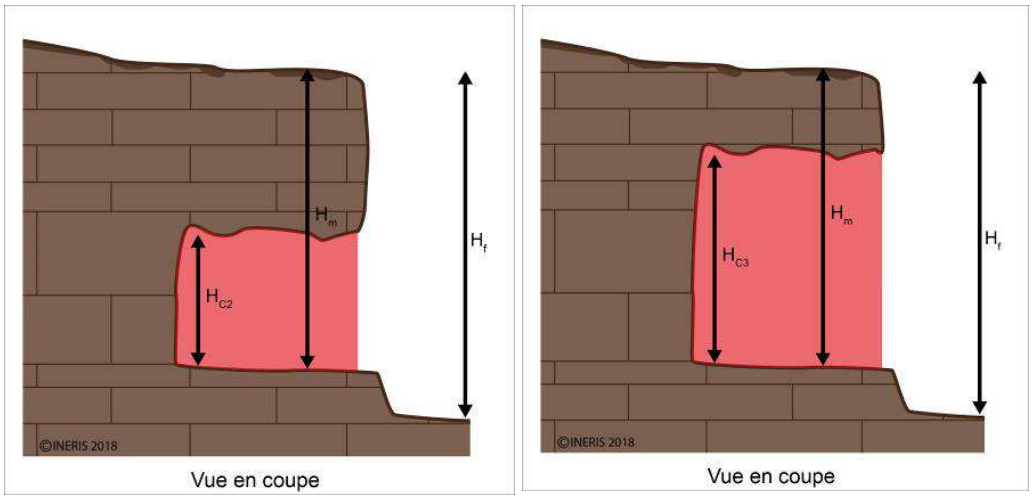

Figure 5. Représentation schématique du volume des vides

[3] Si la hauteur de la cavité est variable, la hauteur maximale sera considérée.

Tableau 5 : Evaluation qualitative du critère « volume estimé des vides »

Rapport H_c/H_f	**Volume estimé des vides**
Inférieur à 1/3	Faible
Entre 1/3 et 2/3	Moyen
Supérieur à 2/3	Important

Il est alors proposé de croiser l'état de stabilité de la carrière avec le volume de vide pour obtenir 4 niveaux traduisant l'influence de la cavité sur la prédisposition à la rupture, selon le Tableau 6.

Tableau 6. *Croisement de l'état de stabilité de la cavité avec le volume des vides*

Influence de la cavité		Volume des vides		
		Faible	Moyen	Important
Etat de stabilité de la cavité	Stable	Très faible	Faible	Moyen
	Instable	Faible	Moyen	Elevée
	Très instable	Moyen	Elevée	Elevée

Dans le cas d'une cavité réduite (profondeur et largeur inférieure au mètre) l'approche par le rapport H_c/H_f n'est pas pertinente. L'influence de la cavité sera donc définie comme faible à très faible selon l'état de stabilité de la cavité.

La caractérisation de la prédisposition résulte du croisement de ces différents critères selon le tableau ci-dessous (Tableau 7). Pour obtenir le niveau de prédisposition, il est nécessaire, dans un premier temps, de croiser ensemble les deux premiers critères, à savoir l'activité du massif et le niveau évalué pour les facteurs aggravants. Un niveau de prédisposition est ainsi obtenu. Ensuite, l'influence de la cavité va venir aggraver ou non le niveau de prédisposition déterminé. Ce dernier critère ne pourra en aucun cas diminuer le niveau de prédisposition.

Tableau 7. *Évaluation de la prédisposition de l'aléa versant sous-cavé*

Prédisposition		**Niveau de cotation des facteurs aggravants**			
		1	2	3	**Influence de la cavité**
Activité du massif	Dormant	Peu sensible	Peu sensible	Sensible	Très faible
	Inactif ou peu actif	Peu sensible	Sensible	Sensible	Faible
	Frais	Sensible	Très sensible	Très sensible	Moyen
	Actif	Très Sensible	Très sensible	Très sensible	Elevée

4. Caractérisation de l'aléa

Comme indiqué en introduction de ce chapitre, l'aléa résulte classiquement du croisement de l'intensité et de prédisposition, ces deux critères ayant été définis ci-dessus. Quatre classes d'aléas ont été distinguées : faible, moyen, fort et très fort.

Ces classes d'aléa sont définies selon le tableau de croisement ci-dessous (Tableau 8), le niveau d'aléa s'accroissant avec les niveaux d'intensité et de prédisposition.

Tableau 8. *Évaluation de l'aléa versant sous-cavé*

Aléa		Intensité			
		très limitée	limitée	modérée	élevée
Prédisposition	Peu sensible	faible	faible	moyen	moyen
	Sensible	faible	moyen	fort	fort
	Très sensible	moyen	moyen	fort	très fort

5. Conclusion

Les versants rocheux sous-cavés sont des configurations morphologiques complexes qui peuvent être à l'origine d'instabilités susceptibles d'impacter des enjeux. En effet, sur un site de versant rocheux sous-cavé, l'interaction entre l'aléa « versant rocheux » et l'aléa « cavité souterraine » a une influence sur la stabilité mécanique, ce qui justifie une méthodologie adaptée : dans une falaise classique quasi-verticale, il y a une forte concentration de contraintes en pied. La présence d'une excavation à cet endroit modifie complètement et défavorablement l'équilibre mécanique. Et par rapport à une cavité souterraine classique, la proximité de la paroi modifie le report du poids du recouvrement autour de la cavité, avec l'apparition de contraintes obliques ce qui est défavorable.

Cette méthodologie versant rocheux sous-cavé se base sur la connaissance combinée de la prédisposition du site aux instabilités et de l'intensité potentielle de ses dernières. L'intensité de l'aléa se détermine en fonction de la hauteur des éléments instables et de leur volume. Elle peut être aggravée par le volume des éléments mobilisables lié à la présence et aux caractéristiques de la cavité. La prédisposition du site vis-à-vis de la rupture, dépend de nombreux facteurs d'instabilités regroupés en deux catégories : le niveau d'activité du massif et les facteurs aggravants. Le niveau d'activité du massif est évalué à partir de facteurs d'ordre essentiellement géomorphologique comme la lithologie, le contexte structural et la morphologie du site qui permettent de qualifier l'état des structures rocheuses. Les facteurs aggravants, comme l'eau, les phénomènes climatiques, la végétation et les actions anthropiques sont quant à eux susceptibles de modifier les conditions d'équilibre du milieu et d'accélérer la rupture. Le croisement de ces deux catégories permet d'obtenir le niveau de prédisposition. Il peut être alors éventuellement aggravé par l'influence de la cavité sur le massif estimé par le croisement entre l'état de stabilité de la cavité souterraine et le volume des vides créé par l'excavation.

Le croisement de l'intensité et de la prédisposition permet d'évaluer l'aléa selon quatre classes (faible, modéré, fort et très fort).

6. Références bibliographiques

Cherkaoui A et Thoraval A. (2014). Versant sous-cavé – Modélisation de l'effet d'une cavité souterraine sur un versant. Rapport INERIS DRS-14-141874-11213A du 27/11/2014, 81 p

Didier C., Tritsch JJ. (1999). Recherche et développement de méthodes de mise en sécurité des falaises sous-minées instables. Rapport INERIS référencé SSE-99-21EP04/R03.

LCPC (2004). Guide technique –Etudes spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux. 86 pages.

MEDDE (2012). Guide méthodologique – Plan de prévention des risques naturels – Cavités souterraines abandonnées. 81 pages.

MEDDE, INERIS, Cerema (2014). Guide pratique Versants rocheux : Phénomènes, aléas, risques et méthodes de gestion. 81 pages.