



**HAL**  
open science

## Critères de détermination de l'aléa versant rocheux sous-cavé

Auxane Cherkaoui, Marwan Al Heib

► **To cite this version:**

Auxane Cherkaoui, Marwan Al Heib. Critères de détermination de l'aléa versant rocheux sous-cavé. Journées Aléa Gravitaire (JAG), Sep 2013, Grenoble, France. ineris-00973708

**HAL Id: ineris-00973708**

**<https://ineris.hal.science/ineris-00973708>**

Submitted on 4 Apr 2014

**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.

# Critères de détermination de l'aléa versant rocheux sous-cavé

A. Cherkaoui & M. Al Heib

Direction des Risques du Sol et du Sous-sol, INERIS, France.

(Contact : [auxane.cherkaoui@ineris.fr](mailto:auxane.cherkaoui@ineris.fr))

**RESUME :** Le paysage français est caractérisé par une grande variété de mouvements de terrain répartis sur l'ensemble du territoire. La problématique des « versants rocheux sous-cavés » est un aléa naturel qui en réalité en rassemble deux : l'aléa éboulement de falaise (ou instabilité de versant rocheux) et l'aléa cavité souterraine. Il existe une influence réciproque des aléas "versants rocheux" et "cavités souterraines". Du fait de la multiplicité des mécanismes à l'origine des instabilités rocheuses, une étude plus fine de la phénoménologie est indispensable pour améliorer la gestion du risques naturel des falaises sous-cavées. Une méthodologie d'évaluation de l'aléa «versant rocheux sous-cavé» rendant possible la délimitation et la qualification de zone à risque a été élaborée. L'aléa « versant rocheux sous-cavé » a été décomposé en deux aléas. Au-delà d'une certaine distance entre le front rocheux et la cavité, les méthodologies de détermination de l'aléa «versant rocheux» et l'aléa «cavités souterraines» sont appliquées de manière indépendante. Cette distance (D) a été estimée à partir de relations simples et analytiques. Lorsque la cavité et le front rocheux sont suffisamment proches, les deux aléas doivent être couplés. Parmi les différentes solutions étudiées, la plus appropriée est de considérer le paramètre «cavité souterraine» comme un facteur aggravant de l'aléa « versant rocheux ». Ainsi, nous obtenons différents cas selon que la cavité débouche ou non sur le front rocheux, qu'elle soit comblée ou non, qu'une structure de type maison troglodyte soit présente ou non. L'exemple présenté de la falaise de Montsoreau (49) nous a permis d'appliquer la méthodologie proposée. Il ressort de cet exemple que la méthodologie est applicable à condition qu'une description très détaillée du site soit réalisée et particulièrement de la zone d'épandage et des cavités souterraines.

## 1 INTRODUCTION ET CONTEXTE

L'aléa naturel « versants rocheux sous-cavés » est un aléa complexe qui en réalité en rassemble deux : l'aléa mouvement de terrain-éboulement de falaise (ou instabilité de versant rocheux) et l'aléa cavité souterraine (voir figure 1). Il existe une influence réciproque de ces deux aléas. Pour déterminer dans quelle mesure cette réciprocity se retrouve au niveau de la gestion des risques, il est nécessaire d'élaborer une méthodologie de détermination de cet aléa de versant rocheux sous-cavé prenant en compte la diversité des mécanismes à l'origine des instabilités.

Figure 1 : Ancienne carrière à Conflans-Sainte-Honorine (78)



La formation d'un versant de falaise est la conséquence d'une décompression ou d'une relaxation des contraintes. La disparition d'une partie du massif rocheux empêche la compensation des contraintes latérales. Le déséquilibre des contraintes latérales implique le phénomène d'« appel du vide » à l'origine de la fracturation et de glissement : les contraintes résultantes tendent à provoquer un déplacement de la paroi vers la partie disparue du massif. Le phénomène d'« appel du vide » des versants rocheux facilite l'ouverture de fissures dites de décompression en arrière du front de falaise. Elles permettent l'action des agents atmosphériques (eau, gel) et désorganisent progressivement la roche. Il existe divers mécanismes de rupture en fonction de la configuration du versant rocheux : le basculement d'un bloc, la rupture au pied du front rocheux, le fauchage des têtes de bancs uniquement pour les versants rocheux présentant un pendage sub-vertical orienté vers l'intérieur du massif, le flambage pour les versants avec des couches suffisamment minces et pentées et les glissements rocheux.

De manière identique, une excavation souterraine d'origine naturelle ou anthropique modifie les contraintes initiales peut être à l'origine de mécanismes de rupture ou les conséquences sont visibles en surface en fonction de la configuration du vide et des caractéristiques du site. Parmi les plus rencontrés, il faut citer l'effondrement en masse, l'effondrement localisé (fontis, débouillage de puits...) et l'affaissement progressif.

Dans le cas d'un versant rocheux sous-cavé, l'ensemble des mécanismes décrits ci-dessus peut se produire.

## 2 CRITERES DE DETERMINATION DE L'ALEA

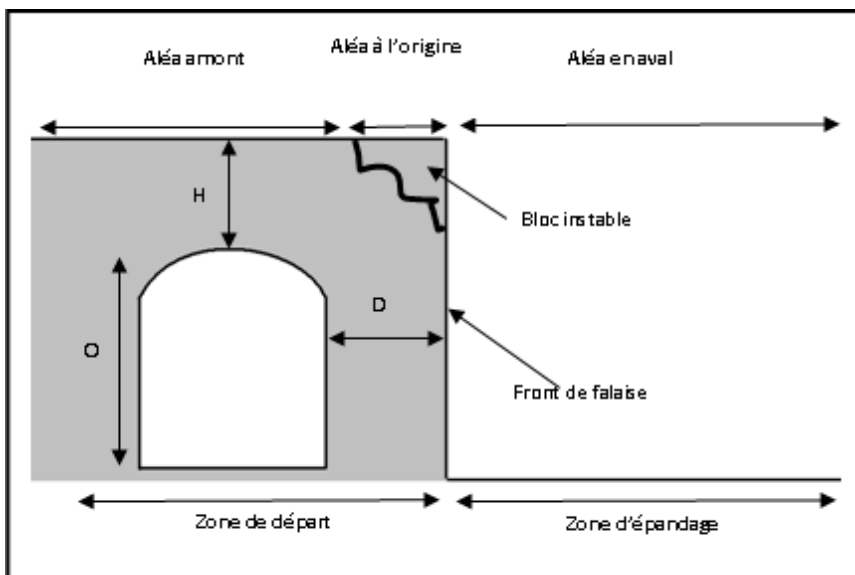
### 2.1 Morphologie d'un versant rocheux sous-cavés

La morphologie schématisée d'un versant rocheux sous-cavé est représentée par la figure 2 s'appuyant sur les observations de terrain (voir figure 1 notamment). Une cavité souterraine de forme « fer à cheval » est considérée avec un rapport hauteur sur largeur proche de un. **H** désigne la hauteur du massif rocheux entre le sommet de la cavité et la surface (hauteur de recouvrement). **D** désigne la plus faible distance entre la cavité et le front de falaise et **O** (hauteur) désigne l'ouverture de la cavité souterraine.

L'aléa désigne un phénomène naturel lorsqu'il peut être qualifié ou hiérarchisé en croisant son intensité, ou sa gravité potentielle, avec sa probabilité d'occurrence. Dans le cas d'un versant rocheux sous-cavés, il faut considérer 3 types d'aléas :

- l'**aléa à l'origine**, qui correspond à l'éroulement de la falaise proprement dit ;
- l'**aléa amont**, où des phénomènes sont susceptibles de se produire consécutivement à l'éboulement du front rocheux. La zone d'origine de l'éboulement et la zone amont qui s'y rattache constituent la zone de départ ;
- l'**aléa en aval (aléa de propagation)**, c'est-à-dire dans la zone d'épandage où les blocs chutent et se propagent.

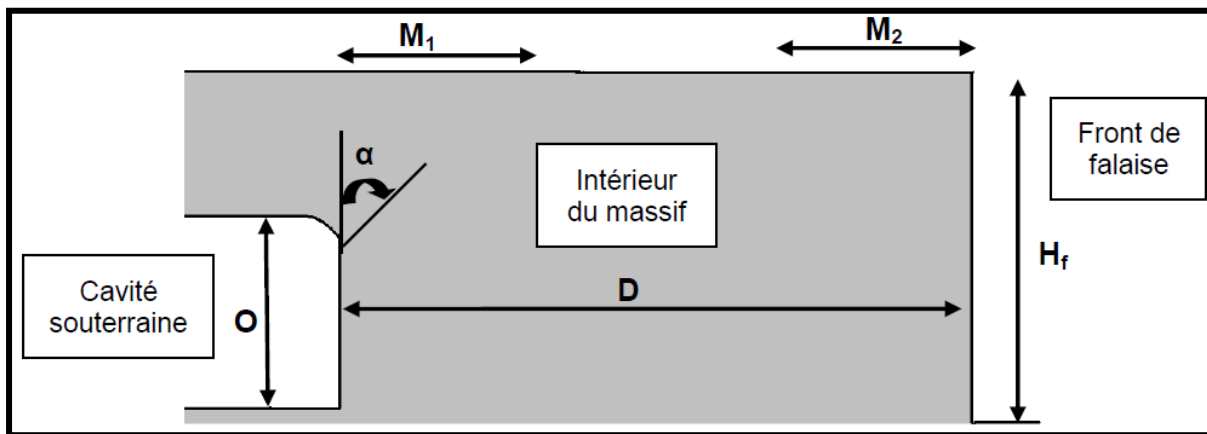
Figure 2 : Représentation schématique d'un front rocheux sous-cavé



## 2.2 Indépendance des aléas

Une première hypothèse de la méthodologie envisagée consiste à considérer l'aléa «versant rocheux» et l'aléa «cavité souterraine» de manière indépendante. Pour ce faire, il faut qu'il existe aucune interaction entre les deux phénomènes autrement dit que les marges d'influence ( $M_1$  et  $M_2$ ) des deux aléas soient dissociées (voir figure 3). On se basera dans la suite sur l'approche de Terzaghi (1943) souvent adopté en géotechnique. Dans cette approche, l'angle d'influence  $\alpha$  de la cavité est donné par  $(45-\varphi/2)^\circ$  avec  $\varphi$  l'angle de frottement du matériau. Dans le cas extrême où le sol est sans frottement (formation meuble),  $\alpha$  est égal à  $45^\circ$ . Avec une telle valeur d'alpha, on obtient une marge d'influence de la cavité souterraine égale à l'ouverture  $O$  (Marge cavité =  $O \tan 45^\circ$ ). Lorsqu'il s'agit de formation dure (roche), il est nécessaire de prendre en compte la fracturation existante qui aura tendance à augmenter cette marge d'influence. Le rapport de Renaud, 2011 arrive à la conclusion théorique suivante : « il n'y a quasiment aucune influence mécanique [entre la cavité et le versant rocheux] dès lors que cette distance est supérieure à 5 fois le diamètre équivalent de la cavité ».

Figure 3 : Représentation schématique d'un massif avec front de falaise et cavité souterraine



Pour une première approche, nous prendrons la marge d'influence de la cavité égale à 5 fois le diamètre équivalent de l'excavation. Dans le cas où nous ne connaissons que l'ouverture  $O$  de l'excavation, nous prendrons le diamètre équivalent de la cavité égale à l'ouverture  $O$ . Pour la marge d'influence du versant rocheux, nous considérerons qu'elle est égale à la distance  $H_f$  (hauteur du front de falaise), autrement dit, l'aléa «versant rocheux» n'a plus d'influence au-delà de cette distance.

Ainsi, les deux méthodologies d'évaluation des aléas de cavités et de versants pourront être appliquées de manière indépendante si la distance entre la cavité et le front rocheux est supérieure à 5 fois le diamètre équivalent de la cavité. Cette distance dépend sans doute des conditions géologiques (fracturation) et hydrologiques du site étudié. L'expert pourrait modifier cette distance selon le retour d'expérience.

## 2.3 Détermination de l'intensité et de la probabilité de l'aléa

Lorsqu'une cavité souterraine est présente à une distance inférieure à 5 fois le diamètre équivalent de la cavité, elle joue un rôle de facteur aggravant dans les critères de détermination de l'aléa versant rocheux. En effet, la cavité peut augmenter localement la densité des fractures et peut réduire la résistance du massif. Son impact se retrouve au niveau de l'intensité et de la probabilité de l'aléa.

### 2.3.1 Intensité de l'aléa versant rocheux sous-cavés

#### 2.3.1.1 Intensité à l'origine du front ( $I_0$ )

La détermination de l'intensité du phénomène correspond ici à une classification des éboulements (i.e. les volumes pouvant être mis en jeu à la suite d'un mécanisme d'instabilité). Cela dépend si le front de falaise est plutôt massif, subvertical, peu affecté par des réseaux de fracturation naturels ou artificiels ou si le front de falaise est découpé, présentant une succession de saillants et de rentrants dans la topographie générale. Outre une observation du front rocheux, il est nécessaire d'estimer au mieux le volume de la cavité et la hauteur de matériau rocheux entre le sommet de la cavité et la surface ( $H$ ) pour en déduire les matériaux instables susceptibles de se mettre en mouvement.

### 2.3.1.2 Intensité en zone d'épandage ( $I_e$ )

Il s'agit ici de la qualification des éboulis. L'appréciation des volumes de masses instables à l'origine permet de déterminer, en y intégrant la notion d'extension spatiale, le volume et donc la classe d'intensité des phénomènes d'éboulis prévisibles.

### 2.3.1.3 Intensité en amont ( $I_a$ )

L'intensité des phénomènes susceptibles de se produire en amont, consécutivement à l'éboulement d'un front rocheux, dépend essentiellement de la géologie des terrains surmontant la falaise et de la pente de la surface d'arrachement. La présence ou non de vide souterrain n'influe pas ce paramètre.

## 2.3.2 Probabilité de l'aléa versant rocheux sous-cavés

### 2.3.2.1 Probabilité d'occurrence en zone de départ ( $P_o$ )

Nous raisonnons ici en classes de prédisposition du site (très peu sensible, peu sensible, sensible, très sensible) vis-à-vis d'un type de phénomène en déterminant les facteurs défavorables à la stabilité de l'édifice.

Deux facteurs principaux sont retenus pour caractériser l'état du site : l'activité des mouvements affectant le site et la sensibilité « sensibilité » des différents fronts rocheux. Le premier facteur est évalué à partir d'indices d'ordre essentiellement géomorphologique (l'aspect et la fraîcheur apparente des structures rocheuses, les traces morphologiques, l'altération du massif, les traces mécaniques, les atteintes aux infrastructures ou à l'environnement et la végétation). Le deuxième facteur est déterminé à partir de l'évaluation d'observations essentiellement géomécaniques et structurales servant à caractériser le massif rocheux (évaluation du pas et de la longueur de fracturation, de l'écartement et l'humidité des fissures, de la direction des fractures...).

Là encore, il est nécessaire d'ajouter des critères propres aux cavités souterraines pour qualifier le massif. Si la cavité est accessible, il faudra relever : l'état de fracturation des piliers et du toit (fractures récentes, présence de chute de blocs, montée de voute...), l'infiltration d'eau dans la cavité (traces d'humidité récente, débit d'eau dans la cavité variable selon les précipitations...), la présence de végétation dans la cavité (racines, ...). La sensibilité du site peut aussi être affectée par l'orientation de la galerie (ou de la cavité) qui influe sur la fracturation du massif notamment en favorisant la formation de blocs isolés.

### 2.3.2.2 Probabilité d'occurrence en zone d'épandage ( $P_e$ )

Il est souvent intéressant d'évaluer la probabilité d'extension de la masse rocheuse mise en mouvement. En effet, cette dernière est bien souvent susceptible de se propager sous différentes formes le long de la pente et peut affecter ainsi les zones situées en aval du front. La probabilité pour qu'une zone située en aval soit atteinte par la propagation des blocs éboulés dépend de deux critères : le versant (nature, profil et sa base) et la distance séparant le front de falaise de la zone aval.

Plusieurs cas de figures peuvent se présenter :

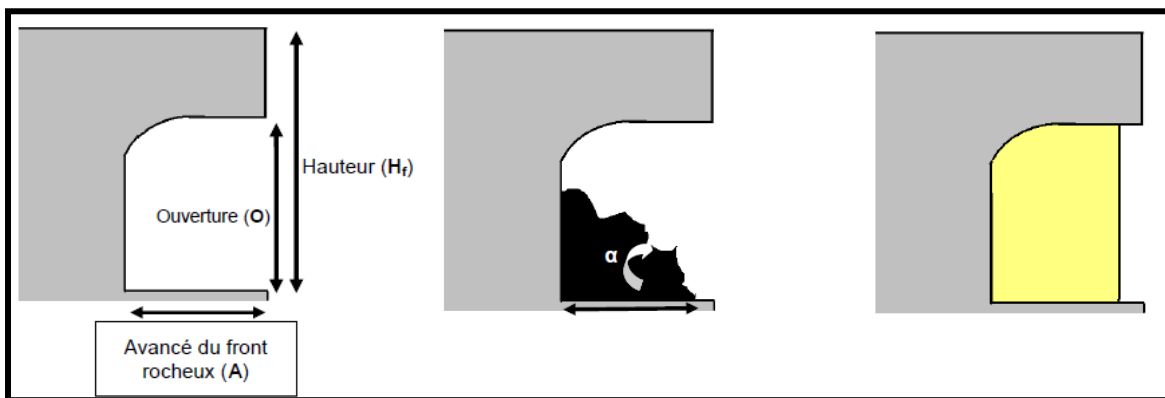
- La distance  $D$  entre la cavité souterraine et le front rocheux est nulle et la cavité est vide (schéma de gauche de la figure 4).

Au lieu de considérer les paramètres classiques de l'aléa front rocheux qui sont l'« angle et la longueur du talus en pied de falaise », on considère de nouveaux paramètres : l'« avancé du front rocheux » ( $A$ ) et le rapport entre la « hauteur du front ( $H_f$  est égale à la somme du recouvrement ( $H$ ) et de l'ouverture ( $O$ )) et l'ouverture ( $O$ ) ». En effet, plus  $A$  est grand plus  $P_e$  est petite et plus le rapport  $O/H_f$  est inférieur à 1 plus  $P_e$  est grande.

- La distance  $D$  entre la cavité souterraine et le front rocheux est nulle et la cavité n'est pas vide

La situation se présente lorsqu'il y a des éboulis, du remblai à l'intérieur de la cavité ou lorsqu'il y a une maison troglodyte. Dans le cas de l'éboulis (schéma du milieu de la figure 4), les données concernant l'angle et la longueur du talus seront prises sur l'éboulis (angle  $\alpha$  et longueur). Dans le cas de la maison troglodyte (schéma de droite de la figure 4) et pour déterminer cette probabilité en zone d'épandage, les paramètres classiques de l'aléa front rocheux qui sont l'« angle et la longueur du talus en pied de falaise » seront pris à partir du mur extérieur de la construction troglodytique.

Figure 4 : Représentation schématique d'un front rocheux sous-cavé avec une distance D nulle



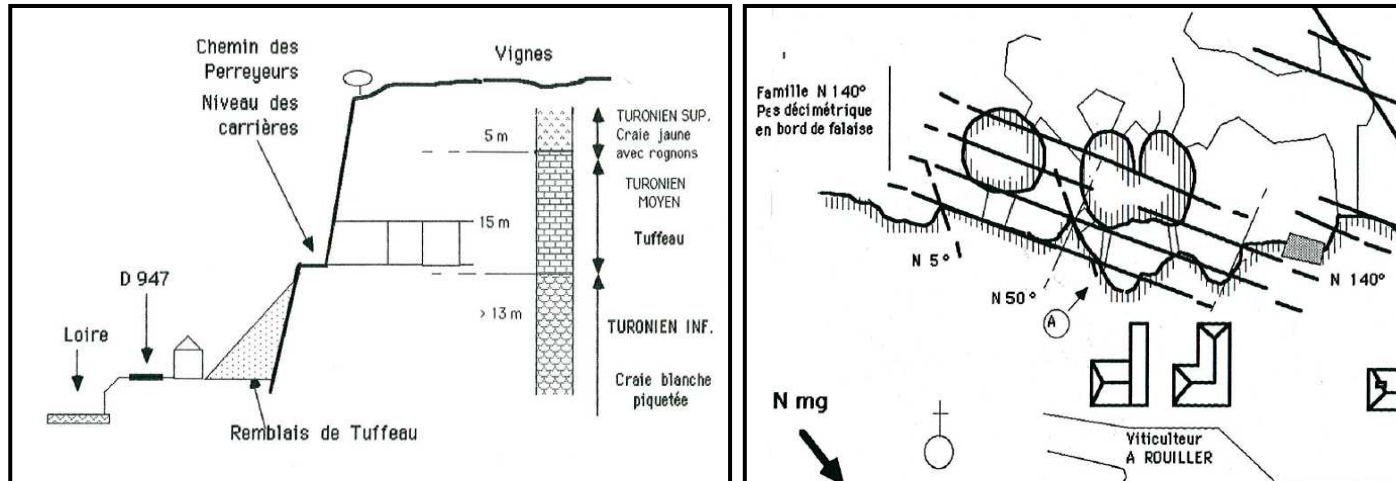
### 3 APPLICATION DE LA METHODOLOGIE SUR LA FALAISE DE MONTSOREAU (49)

Montsoreau (49) est situé en bord de la Loire et présente un réseau de cavités souterraines. L'approche peut donc être appliquée, les cavités présentant un facteur aggravant. La figure 5 fournit une représentation schématique de la falaise étudiée. La route D 947 passe au pied de la falaise. Cette falaise regroupe différents cas d'étude : il existe des zones de front rocheux simple, des zones de versants sous-cavés et des zones de versants sous-cavés mais avec un habitat troglodyte.

Les entrées de carrières qui constituent le niveau sous-cavé de la falaise présentent un taux de défruitement (ratio définissant le taux d'exploitation de la carrière) très élevé et une ouverture importante.

Les principaux plans de fracturation rencontrés sont N 130-140°E / pendage Est et N 0-10° E / pendage Ouest. Il y a aussi un réseau de fracturation secondaire : N 50° sub-vertical. Le pas de la fracturation est décimétrique à métrique en bord de falaise. L'ouverture varie de quelques millimètres à plusieurs décimètres.

Figure 5 : Représentation schématique de la falaise de Montsoreau (49) vue en coupe et en plan



La détermination de l'aléa par la méthodologie élaborée précédemment convient à ce type d'évènement et au site considéré. Le fait de considérer la présence de cavité souterraine comme le demande la méthodologie permet d'ajuster le niveau d'aléa et de réaliser un zonage de l'aléa plus précis qu'en considérant uniquement l'aléa front rocheux.

A la lumière de ce premier exemple d'application, la présence des cavités souterraines modifie bien le zonage de l'aléa. En effet, en zone de départ, la présence de cavités souterraines influe sur l'intensité selon la hauteur de recouvrement et sur la probabilité par l'augmentation de la sensibilité du site (augmentation de la fragilisation du surplomb rocheux dans certains cas). De plus, le zonage de l'aléa en amont peut être plus étendu selon la disposition et le volume des cavités souterraines. En revanche, en zone d'épandage, la présence de cavités souterraines ne semble pas modifier de façon significative l'aléa. Dans le cas présent, l'aléa est parfois moins étendu pour des fronts rocheux sous-cavés que lorsqu'il s'agit de front rocheux classiques.

Cet exemple montre aussi la nécessité d'adapter le zonage de l'aléa selon la hauteur du front rocheux, de procéder à un découpage minutieux de l'aléa (l'aléa en zone d'épandage dépend fortement de l'occupation de l'espace devant le front rocheux) et enfin avoir une très bonne connaissance du site en terme de géologie, de géomorphologie et de géomécanique.

#### 4 CONCLUSION ET RECOMMANDATION

La méthodologie d'évaluation de l'aléa «versants rocheux sous-cavé» rend possible la délimitation et la qualification de zone à risque car elle s'avère applicable et opérationnelle sur des fronts rocheux regroupant plusieurs cas de figure tel qu'un vide souterrain débouchant ou non sur le front rocheux, que le vide souterrain soit comblé ou non, qu'une structure de type maison troglodyte soit présente ou non. Des tableaux synthétiques donnant les niveaux d'intensité et de probabilité selon les phénomènes observés permettent d'appliquer la méthodologie sur des sites variés tout en conservant un degré de précision important de délimitation de l'aléa et une rapidité de mise en œuvre.

L'application de la méthodologie à la falaise de Montsoreau (49) a démontré que la présence des cavités souterraines modifie le zonage de l'aléa davantage en zone de départ qu'en zone d'épandage.

En vue d'améliorer et d'affiner cette méthodologie, il est prévu de continuer nos travaux en suivant trois objectifs. Le premier est un travail de modélisation sur le comportement des versants rocheux sous-cavés : l'influence de la cavité (comblée ou non) sur l'aléa en zone d'épandage et la distance minimale d'impact entre le front rocheux et la cavité souterraine. Notre deuxième objectif est d'instrumenter un ou deux sites pour comprendre l'évolution tant du front rocheux que de la cavité souterraine et préciser la corrélation existante entre les deux entités. Enfin, notre réflexion aboutira à proposer des méthodes de surveillance et de traitement appropriées à ces sites particulier pour améliorer la gestion du risque « versant rocheux sous-cavé ».

#### 5 BIBLIOGRAPHIE

- 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.
- Durville JL., 2009. Cartographie de l'aléa mouvement de terrain. Conférence de l'IFORE, 2 février 2009.
- MEDDTL, 2012. Guide méthodologique pour la réalisation de plans de prévention des risques naturels (PPRN) liés à la présence de cavités souterraines abandonnées. Brochure de 81 pages. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/pprn-cavites-201210.pdf>
- MEDDTL, 2012. Prévention des risques naturels. Les mouvements de terrain. Brochure de 28 pages. [http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Mouvements-terrain\\_brochure.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Mouvements-terrain_brochure.pdf)
- Renaud V., 2011. Etat des connaissances relatif à l'aléa des versants rocheux sous-cavés. Programme EAT-DRS-02 « Analyse, prévention et maîtrise des risques de mouvements de terrain liés à la présence de cavités souterraines et de versants rocheux instables ». Rapport INERIS référencé DRS-11-117684-04378A.
- Terzaghi K., 1943. Theoretical soil mechanics. Wiley, New-York, 510 pages.
- Watelet JM, 1987. Stabilité des falaises sous-minées, compte rendu pour les falaises de Montsoreau, février 1987.