



**HAL**  
open science

# Méthodologie pour la gestion du risque versant sous-cavé

Auxane Cherkaoui, Marwan Al Heib

► **To cite this version:**

Auxane Cherkaoui, Marwan Al Heib. Méthodologie pour la gestion du risque versant sous-cavé. Colloque "Stabilité des versants rocheux. Rock Slope Stability" (RSS 2014), Apr 2014, Marrakech, Maroc. pp.497-506. ineris-01862254

**HAL Id: ineris-01862254**

**<https://ineris.hal.science/ineris-01862254>**

Submitted on 27 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.

---

# Méthodologie pour la gestion du risque versant sous-cavé

**Cherkaoui<sup>1</sup> Auxane, Al Heib<sup>2</sup> Marwan.**

<sup>1</sup> INERIS, Parc technologique Alata, 60550 Verneuil-en-Halatte, France, tél. 03.44.61.82.81, [auxane.cherkaoui@ineris.fr](mailto:auxane.cherkaoui@ineris.fr)

<sup>2</sup> INERIS, Campus ARTEM, 54042 Nancy, France, tél. 03.55.66.28.82, [marwan.alheib@ineris.fr](mailto:marwan.alheib@ineris.fr)

---

*RÉSUMÉ. L'aléa « versant sous-cavé » est un aléa complexe qui en rassemble deux : l'aléa éboulement de falaise et l'aléa cavité souterraine. Il existe une influence réciproque entre ces deux aléas si la distance les séparant n'excède pas une distance caractéristique. Une méthodologie d'évaluation de l'aléa « versant sous-cavé » rendant possible la délimitation et la qualification de zones à risque a été élaborée et appliquée sur plusieurs sites. Parallèlement, un outil a été utilisé, le scanner laser 3D, permettant d'avoir une numérisation et une vision en trois dimensions du site. Il est alors possible de mesurer l'écartement des fractures, de calculer le volume de matériaux instables, voire de surveiller l'évolution du site si un scan est répété à intervalles réguliers. Cet outil associé à la méthodologie de l'évaluation de l'aléa permet ainsi une gestion efficace du risque d'instabilité rocheuse.*

*ABSTRACT. The hazard "under-mined slope" is a complex hazard that combines two: the cliff collapse hazard and the underground cavity hazard. There is a reciprocal influence between these two hazards if their distance does not exceed a characteristic distance. An assessment methodology of "under-mined slope" hazard making possible the delineation and characterization of risk area has been developed and implemented at several sites. Meanwhile, a tool was used, the 3D laser scanner, to allow having a site scanning and a three-dimensional vision of the site. It is then possible to measure the spacing of fractures, calculate the volume of unstable materials or to monitor the evolution of the site if this process is repeated at regular intervals. This tool associated with the methodology enables effective management of the instability risk.*

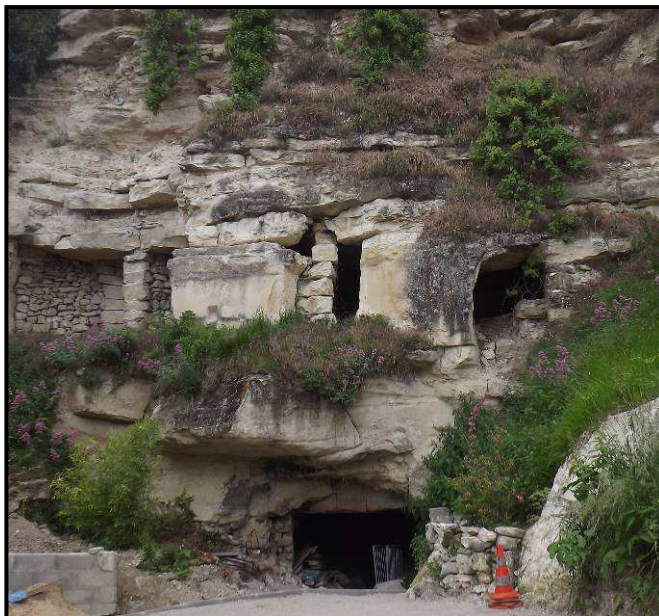
*MOTS-CLÉS: versant, cavité, aléa, méthodologie, gestion, surveillance.*

*KEYWORDS: slope, cavity, hazard, methodology, management, monitoring.*

---

## 1. Introduction et contexte

L'aléa naturel « versant sous-cavé » peut être décomposé en deux aléas : l'aléa instabilité de versant (ou éboulement de falaise) et l'aléa cavité souterraine. Il existe une interaction réciproque entre ces deux aléas. Pour déterminer dans quelle mesure cette réciprocité se retrouve au niveau de la gestion des risques, il est nécessaire d'élaborer une méthodologie de détermination de l'aléa de versant sous-cavé prenant en compte la diversité des mécanismes à l'origine des instabilités (Figure 1).



**Figure 1.** *Versant présentant un sous-cavage à des niveaux superposés sur la commune de Conflans-Sainte-Honorine (78) en France*

La formation d'un versant 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 au 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 au vide » des versants facilite l'ouverture de fissures dites de décompression en arrière du front de falaise. Ces fissures permettent l'action des agents atmosphériques (eau, gel) et désorganisent progressivement la roche. De manière identique, une excavation souterraine d'origine naturelle ou anthropique modifie les contraintes initiales provoquant des mécanismes de rupture avec des conséquences visibles en surface et en souterrain.

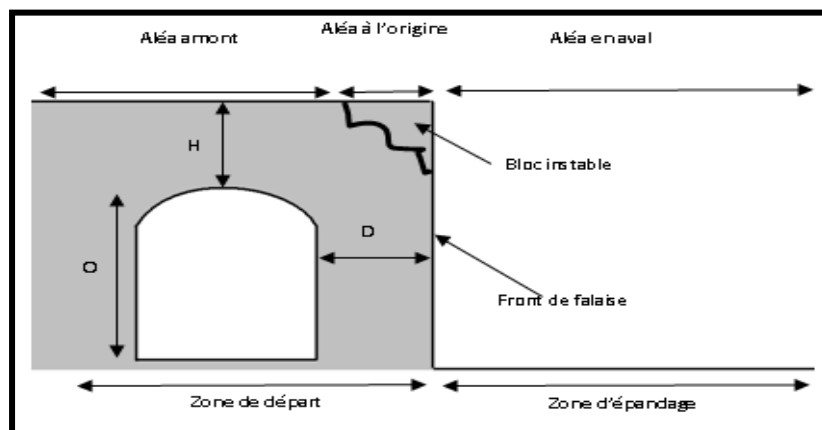
Les mécanismes de rupture recensés, à l'échelle de massif, sont variés. Pour un versant, il peut s'agir de basculement d'un bloc, de rupture du pied du front rocheux, de fauchage des têtes de bancs pour les versants rocheux présentant un pendage sub-vertical orienté vers l'intérieur du massif, de flambage pour les versants avec des couches suffisamment minces et pentées ou des glissements rocheux. Pour les cavités souterraines, parmi les plus rencontrés, il faut citer l'effondrement en masse, l'effondrement localisé (fontis, débouillage de puits...) et l'affaissement progressif notamment pour des cavités à grande profondeur et d'une extension importante.

Dans le cas d'un versant sous-cavé, l'ensemble des mécanismes décrits ci-dessus peut se produire voire interagir entre eux pour donner des mécanismes plus complexes.

## **2. Méthodologie d'évaluation de l'aléa "versant sous-cavé"**

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 [WAT 87]. Dans le cas d'un versant sous-cavé, il faut considérer 3 types d'aléas (Figure 2) :

- l'aléa à l'origine, qui correspond à l'éroulement de la falaise ;
- l'aléa amont, où des phénomènes sont susceptibles de se produire consécutivement à l'éboulement du front de falaise ;
- 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 versant sous-cavé

Lorsqu'une cavité souterraine est assez proche du front de falaise (l'hypothèse choisie qui se base sur l'approche empirique de Terzaghi [TER 43] considère une distance inférieure à cinq fois le diamètre équivalent de la cavité), elle joue un rôle

de facteur aggravant dans les critères de détermination de l'aléa versant. 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.

## **2.1. Intensité de l'aléa versant sous-cavé**

### *1.1.1. Intensité à l'origine du front ( $I_o$ )*

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, il est nécessaire d'estimer au mieux le volume de la cavité et la hauteur de matériaux rocheux entre le sommet de la cavité et la surface pour en déduire les volumes de matériaux instables susceptibles de se mettre en mouvement.

### *1.1.2. 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 en zone de d'épandage.

### *1.1.3. Intensité en amont ( $I_a$ )*

L'intensité des phénomènes susceptibles de se produire en amont de la falaise (basculement de blocs, glissements...) consécutivement à l'éboulement d'un versant, 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.

## **2.2. Probabilité de l'aléa versant sous-cavé**

### *2.2.1. 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 » des différents versants [DID 99]. 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 d'observations essentiellement géomécaniques et structurales servant à caractériser le massif (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.

### 2.2.2. Probabilité d'occurrence en zone d'épandage ( $P_E$ )

Il est souvent intéressant d'évaluer la probabilité de propagation 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 pied du versant) et la distance séparant le front de falaise de la zone aval.

Plusieurs cas de figures peuvent se présenter :

- La cavité est au bord immédiat de la falaise. La distance  $D$  entre la cavité souterraine et le versant est nulle et la cavité est vide (schéma de gauche de la Figure 3).

Au lieu de considérer les paramètres classiques de l'aléa d'un versant seul 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 ( $H_f$ ) et l'ouverture ( $O$ ). En effet, plus  $A$  est grand plus la probabilité d'occurrence  $P_E$  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 versant est nulle et la cavité n'est pas vide (schéma du milieu et de droite de la Figure 3).

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 3), les données concernant l'angle et la longueur du talus seront prises sur l'éboulis (angle  $\alpha$  et longueur  $L$ ). Dans le cas de la maison troglodyte (schéma de droite de la Figure 3) 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.

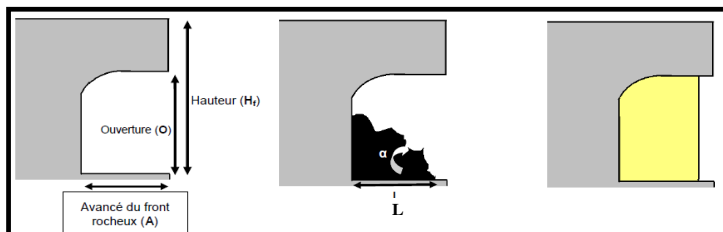


Figure 3. Représentation schématique d'un versant sous-cavé avec une distance  $D$  nulle

Le croisement du niveau d'intensité et de probabilité de chaque zone (à l'origine, amont, en aval) donne le niveau d'aléa pour chaque zone selon la Figure 4.

Probabilité d'occurrence	$P_{(\alpha)0}$ négligeable	$P_{(\alpha)1}$ faible	$P_{(\alpha)2}$ moyenne	$P_{(\alpha)3}$ forte
$I_{(\alpha)0}$ Chute de pierres < 1 m <sup>3</sup>	négligeable	faible	faible	moyen
$I_{(\alpha)0}$ Chutes de blocs 1 à 10 m <sup>3</sup>	faible	faible	moyen	moyen
$I_{(\alpha)0}$ Eboulements 10 à 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	faible	moyen	moyen	fort
$I_{(\alpha)0}$ Eboulement majeur > 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	moyen	moyen	fort	fort

**Figure 4.** Détermination de l'aléa en zone de départ et en zone d'épandage avec  $I$  (Intensité) et  $P$  (Probabilité) à indexer selon les zones considérées

Une cartographie de l'aléa est ensuite réalisée pour délimiter au mieux les zones d'aléa [DUR 09]. L'application de cette méthodologie nécessite une caractérisation détaillée du versant sous-cavé. Pour cela, un nouvel outil a été développé qui garantit une vision globale mais précise du massif.

### 3. Outil d'aide à la caractérisation d'un "versant sous-cavé"

#### 3.1. Principe

Le scanner laser 3D<sup>1</sup> fonctionne comme un lasermètre en mesurant la distance avec un point d'impact. En multipliant des millions de fois sur 360° ces mesures de distance, un volume en trois dimensions peut être modélisé. Le nuage de points obtenu peut être couplé à un appareil photo intégré afin d'avoir un rendu en couleur. Le scanner laser 3D numérise tous les points dans son champ de vision. La numérisation d'un grand volume nécessite de réaliser un nombre important de mesures. Dans le but de raccorder facilement et rapidement plusieurs scans entre eux, des « cibles » (sphères ou damiers normalisés) sont installées dans l'environnement dans la zone à numériser. Les cibles jouent le rôle de points de référence. Le traitement des données du scanner est exécuté ensuite à l'aide d'un logiciel de traitement de nuages de points. Il est alors possible de calculer les dimensions caractéristiques du site, le volume du vide, de réaliser un plan précis du secteur et de visualiser la fracturation du massif.

<sup>1</sup> La scanner utilisé est le modèle TX5 de la marque Trimble.

### **3.2. Exemple d'application : le Site de Creil (60, France)**

#### *3.2.1. Présentation du site*

Dans la ville de Creil (à 50 km de Paris), un coteau de tuf (roche de calcaire tendre) surplombe de nombreuses maisons. Pour l'une d'entre elles (Figure 5), on observe deux cavités parallèles de direction perpendiculaire au coteau, creusées par l'homme. La première cavité fait 6 m de longueur par 3,5 m de large et 2 m de hauteur. La deuxième cavité fait 12 m de longueur par 2 m de largeur et 2 m de hauteur. Elle a un renforcement de 5 m sur un des côtés. Le tuf est ici très friable avec la présence au toit de petites dépressions et au sol de matériaux sableux.



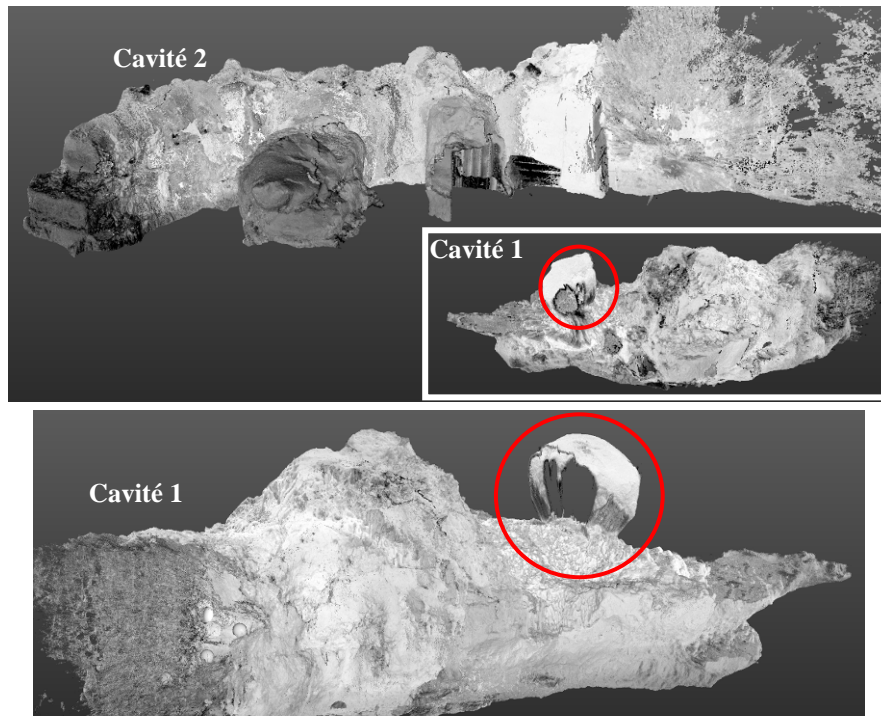
**Figure 5.** *Ensemble photographique du versant avec ses cavités*

#### *3.2.2. Apport d'informations supplémentaires par l'utilisation du scanner laser 3D*

Après traitement des données obtenue par le scanner laser 3D, le volume de deux cavités est facilement apprécié (Figure 6). Il est possible de distinguer leur forme et leur dimension (distance, surface...). Ce qui est particulièrement visible en vue de



côté sont les chutes de matériaux au toit (représenté par un cercle rouge sur la Figure 6). La forme de cette chute de toit est de type « champignon » ce qui explique sa représentation « parachute » par numérisation grâce au scanner laser 3D, les points dans le renfoncement n'ayant pas été relevés par le scanner.



**Figure 6.** Représentation en 3D des cavités avec présence de chutes de toit

### 3.2.3. Conclusion

Le scanner laser 3D a été utilisé sur plusieurs sites (dont celui de Creil) aux caractéristiques différentes et il s'avère un outil efficace de caractérisation des versants sous-cavé. L'acquisition rapide des données de site par cet appareil réduit grandement le temps de présence sur le terrain, tout en augmentant la précision des informations acquises. Les zones inaccessibles, en hauteur et escarpées, où la prise de mesures s'avèrent périlleuses, peuvent ici être caractérisées facilement. A cela s'ajoute l'aspect visuel : l'obtention du site numérisé en 3D permet au décideur de comprendre l'analyse de stabilité et d'envisager les mesures à prendre. D'autres campagnes de mesures peuvent être aussi envisagées sur le même site pour surveiller à long terme l'évolution des zones instables par comparaison de scans successifs.

#### **4. Application de la méthodologie sur le site de Creil**

Une étude comparative a été réalisée pour mettre en évidence l'avantage de cette méthodologie par rapport à celle qui ne prend en compte que le versant et non les cavités souterraines.

##### **4.1. Détermination de l'intensité de l'aléa**

- Intensité à l'origine du front : le versant est plutôt massif (sans fracturation) avec une végétation importante ce qui correspond à une intensité **très limitée (I<sub>0</sub>0)**. Cependant en tenant compte des cavités, dont le recouvrement est d'environ 3 m de hauteur, le volume des matériaux instables de ce coteau susceptibles de se mettre en mouvement dépasse le m<sup>3</sup>. Une intensité **limitée** sera donc choisie pour cette zone (**I<sub>0</sub>1**).
- Intensité en amont : la pente du coteau est inférieure à 40° et la formation géologique est plutôt meuble. L'intensité correspondante est **I<sub>a</sub>1**, une intensité **limitée**, l'absence ou non de cavités souterraines ne modifiant pas cette intensité.
- Intensité en zone d'épandage : elle évalue les volumes d'éboulis prévisibles qui dépendent des volumes de masses instables à l'origine en y intégrant la notion de propagation. Cela correspond à une intensité **très limitée (I<sub>c</sub>0)**. La même intensité sera choisie en présence ou non de cavités. En effet, même si l'intensité à l'origine est plus importante en présence de cavité, l'extension sera moins importante car les éboulis rempliront déjà une partie des vides souterrains avant de se propager dans la zone d'épandage.

##### **4.2. Détermination de la probabilité de l'aléa**

- Probabilité d'occurrence en zone de départ : l'apparence générale du coteau semble **favorable** à la stabilité en tenant compte de la présence d'un seul décollement de matériau. Lorsqu'on considère la présence des cavités, deux informations supplémentaires s'ajoutent pour l'évaluation de l'aléa : les observations de plusieurs chutes de toit dans les cavités 1 et 2 et aussi la présence d'un affaissement en amont, possible conséquence d'un mouvement souterrain. En tenant compte de ces éléments, la sensibilité du coteau passe à **défavorable**. Une probabilité d'occurrence en zone de départ **faible (P<sub>o</sub>1)** est obtenue et une probabilité d'occurrence **moyenne (P<sub>o</sub>2)** en tenant compte des cavités souterraines.
- Probabilité d'occurrence en zone d'épandage : elle est obtenue en pondérant la probabilité de propagation de la masse de matériaux potentiellement en mouvement (qualifiée de forte pour ce versant) par la probabilité d'occurrence à l'origine P<sub>o</sub>. En tenant compte uniquement du versant, une probabilité **faible P<sub>c</sub>1** (avec une probabilité à l'origine P<sub>o</sub>1) est obtenue et en tenant compte des cavités, une probabilité **moyenne P<sub>c</sub>2** (avec une probabilité à l'origine P<sub>o</sub>2) est obtenue.

### 4.3. Détermination de l'aléa

Après croisement de l'intensité (I) et de la probabilité (P) d'occurrence, le résultat en terme de niveau d'aléa montre que la prise en compte des zones sous-cavées rend l'aléa effondrement plus élevé d'un niveau en zone de départ mais ne semble pas influencer l'aléa en aval (Tableau 1). Ainsi, la prise en compte du sous-cavage semble importante car elle modifie le niveau de l'aléa.

	Aléa « versant »	Aléa « versant sous-cavés »
Aléa à l'origine	Faible ( $I_o0 \times P_o1$ )	Moyen ( $I_o1 \times P_o2$ )
Aléa en amont	Faible ( $I_a1 \times P_o1$ )	Moyen ( $I_a1 \times P_o2$ )
Aléa en aval	Faible ( $I_e0 \times P_e1$ )	Faible ( $I_e0 \times P_e2$ )

**Tableau 1.** Détermination du niveau de l'aléa effondrement sur le versante Creil avec I : intensité, P : probabilité, o : origine, a : amont, e : épandage,

### 5. Conclusion et recommandations

La méthodologie présentée d'évaluation de l'aléa «versants rocheux sous-cavé» rend possible la délimitation et la qualification de zone à risque car elle tient compte du rôle des cavités dans l'évaluation du niveau de l'aléa. Elle est applicable et opérationnelle sur des versants regroupant plusieurs cas de figure. Cette méthodologie s'applique a des sites variés tout en conservant un degré de précision important de délimitation de l'aléa et une rapidité de mise en œuvre même s'il est nécessaire d'avoir une connaissance détaillée du site. L'utilisation du scanner laser 3D s'est avérée concluante par la précision des informations acquises. Après traitement des données, une base fiable pour caractériser précisément l'ensemble du site (fracturation, dimension, volume, désordres...) est obtenue sans compter l'apport visuel en 3D. L'application de la méthodologie sur le site de Creil a montré que l'aléa en zone de départ est plus sensible à la présence de vides souterrains que celui en zone d'épandage. Au vu de ces conclusions, des travaux futurs restent à mener pour compléter la compréhension de la problématique versant sous-cavé et conforter la méthodologie proposée.

### 6. Bibliographie

- [DID 99] 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.
- [DUR 09] DURVILLE JL., 2009. Cartographie de l'aléa mouvement de terrain. *Conférence de l'IFORE*, 2 février 2009.
- [TER 43] TERZAGHI K., 1943. Theoretical soil mechanics. Wiley, New-York, 510 pages.
- [WAT 87] WATELET JM, 1987. Stabilité des falaises sous-minées, compte rendu pour les falaises de Montsoreau, février 1987.