GUIDE



Ineris 17-164712-08773A

Aléa versant rocheux sous-cavé

Caractérisation et évaluation

Cerema

INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable

Ce document s'inscrit dans le cadre de la mission d'appui de l'Ineris au ministère de la Transition écologique et solidaire. Pour le Cerema, il s'inscrit dans le cadre de l'opération de recherche PRECAS (prévention du risque d'effondrement des cavités souterraines). Cette action est conduite par ces deux entités pour le BRNT/SRNH (bureau des risques naturels terrestres au sein du services des risques naturels et hydrauliques) de la DGPR (Direction générale de la prévention des risques).

Il a été établi sur la base de l'expérience respective de l'Ineris et du Cerema et des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives au sein des deux organismes. Il a fait l'objet d'une relecture par des administrations, professionnels et collectivités susceptibles d'utiliser ou de diffuser ce document.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent document intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

Rédacteurs :

- Auxane Cherkaoui (Ineris)
- Margaret Herbaux (Cerema Île-de-France)

Comité de rédaction :

- Véronique Berche (Cerema Nord-Picardie)
- Nathalie Bérenger (Cerema Méditerranée)
- Charles Kreziak (Cerema Île-de-France)
- David Mathon (Cerema Normandie-Centre)
- Jean-Marc Watelet (Ineris)

Avec la contribution de :

- Alexandre Philippe (Cavités 37)
- Emeric Védie (Cerema Sud-Ouest)

Relecteurs :

- Séverine Bernardie, Gildas Noury (BRGM)
- Pascal Bigarré, Christian Franck (Ineris)
- Stéphanie Detourbe, Charline Tissier (Cerema Normandie Centre)
- Jean-Louis Durville, ingénieur général honoraire des ponts, des eaux et des forêts
- Sandrine Fauchet, Stéphanie Mahé, Nejwa Regragui (BRNT/SRNH de la DGPR (MTES))
- Jean-Claude Hippolyte (DDT49)
- Cédric Lefebvre (Cerema Nord Picardie)
- Cyrille Thomaidis (Bureau des carrières - Conseil général de Gironde)

Sommaire

1. INTRODUCTION 7

2. LES VERSANTS ROCHEUX SOUS-CAVÉS : CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE 9
2.1 Origine et utilisation actuelle 9
2.2 Répartition géographique 11
2.3 Accidentologie 12

3. CONFIGURATIONS ET DESCRIPTION DES DÉSORDRES ET DES PHÉNOMÈNES ASSOCIÉS 17
3.1 Description du type de sous-cavage 17
3.2 Configurations types 17
3.3 Facteurs d'instabilité des versants sous-cavés 20
3.4 Typologie des désordres et des mécanismes de rupture 23

4. RECENSEMENT ET TRAITEMENT DES DONNÉES NÉCESSAIRES À LA CARACTÉRISATION DE L'ALÉA VERSANT ROCHEUX SOUS-CAVÉ 29
4.1 Type d'étude possible et périmètre pertinent 29
4.2 Données de base nécessaires pour déterminer l'aléa 29

5. ÉVALUATION DE L'ALÉA VERSANT ROCHEUX SOUS-CAVÉ 33
5.1 Caractérisation de l'intensité de l'aléa 34
5.2 Caractérisation de la probabilité d'occurrence de l'aléa 36
5.3 Caractérisation de l'aléa 40
5.4 Définition de l'extension de la zone d'aléa 40
5.5 Cas spécifique : versants rocheux sous-cavés par des cavités superposées 44

6. CONCLUSION 49

7. GLOSSAIRE 51

8. BIBLIOGRAPHIE 53

ANNEXES 54

1 INTRODUCTION

Le paysage français est exposé à une grande variété de mouvements de terrain répartis sur l'ensemble du territoire. Parmi eux, on recense notamment les fronts rocheux susceptibles de générer des instabilités : chutes de pierres et de blocs, *éboulements*[1] ou *écroulements* de falaise. Lorsque ces falaises présentent des *cavages* donnant accès à des cavités souterraines, anthropiques ou naturelles, potentiellement sources d'*affaissements* ou d'*effondrements*, on parle de versants sous-cavés. L'aléa mouvement de terrain doit alors prendre en compte à la fois le versant et la cavité.

Alors que l'aléa mouvement de terrain lié aux cavités souterraines et celui lié aux versants rocheux disposent de méthodes de caractérisation et d'identification adaptées, il n'existe pas de méthodologie spécifique pour déterminer l'aléa versant rocheux sous-cavé. Actuellement, chaque site de versant sous-cavé est considéré et traité comme un cas paticulier. Dans certaines études, les aléas mouvements de terrain liés au versant et ceux liés à la cavité sont évalués de manière indépendante puis superposés pour obtenir l'aléa final. D'autres études choisissent plutôt de conserver l'aléa majorant comme aléa final. Au vu de ce constat, l'Ineris et le Cerema se sont associés pour partager leur expertise dans le domaine des mouvements de terrain et proposer une méthodologie commune d'évaluation de l'aléa versant rocheux sous-cavé.

Ce rapport méthodologique est composé d'une première partie décrivant l'origine des versants rocheux sous-cavés, leur répartition géographique et les enjeux concernés. La deuxième partie propose des configurations types de versants sous-cavés (les plus classiquement rencontrées) et décrit les facteurs d'instabilités internes et externes propres à ces sites. Les typologies des désordres ainsi que les mécanismes de rupture sont aussi explicités. La troisième partie décrit les données nécessaires et la manière de les traiter dans le but de caractériser cet aléa. Enfin, la quatrième partie, constituant le corps du rapport, décrit la méthodologie d'évaluation de l'aléa et le zonage de celui-ci. Les annexes illustrent l'application de la méthodologie sur trois sites de versant sous-cavé.

Le présent document technique s'adresse aux bureaux d'études amenés à réaliser des études d'aléas de versants rocheux sous-cavés, ainsi qu'aux services de l'État et aux collectivités en charge de la mise en œuvre et de l'application de la politique de prévention des risques sur des territoires présentant cet aléa.

Il est conçu pour faciliter l'identification des facteurs d'instabilité de ces sites et évaluer le plus précisément possible un aléa versant rocheux sous-cavé prenant en compte à la fois le versant rocheux et la cavité souterraine. La méthodologie présentée s'applique à la qualification de l'aléa dans le cadre de la réalisation d'un PAC (Porter à connaissance) et/ou d'un PPR (Plan de prévention des risques) et/ou d'une étude d'aléa amont. Cependant, les principes exposés peuvent être utiles pour des études plus spécifiques comme des diagnostics de stabilité. En outre, cette méthodologie doit permettre de disposer d'une base commune de détermination de critères d'intensité et de prédisposition à l'aléa versant sous-cavé et de pouvoir homogénéiser le vocabulaire utilisé sur certains sites.

Même si des sites de versants sous-cavés sont présents dans différents pays, ce guide s'intéresse uniquement au contexte français. Les principes abordés dans ce guide pourront néanmoins être adaptés au contexte international.

Les aspects réglementaires ne seront pas traités dans le cadre de ce document. En revanche, le lecteur désirant des informations sur la réglementation pourra se référer aux documents suivants : les fiches techniques et les lettres d'information de Cavités 37 (http://cavites37.com/publications/), le guide *La gestion du risque cavités souterraines - Guide à l'attention des collectivités* (disponible sur http://www.certu-catalogue.fr/la-gestion-du-risque-cavites-souterraines.html), le *Guide pratique Versants rocheux : phénomènes, aléas, risques et méthodes de gestion* ([17] téléchargeable sur http://www.georisques.gouv.fr/) et les fiches pratiques du *Memento du Maire* (http://www.mementodumaire.net/).

1 - Les termes en italique et de couleur verte sont définis à la fin du rapport dans le glossaire.

2 LES VERSANTS ROCHEUX SOUS-CAVÉS : CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

Les fleuves et rivières français traversent les bassins sédimentaires, notamment des formations carbonatées, en y creusant de larges vallées souvent urbanisées et industrialisées. Les bords de ces vallées sont caractérisés, sur des secteurs localisés, par des fronts de falaise de quelques dizaines de mètres de hauteur en moyenne. Ils sont potentiellement instables, en raison, souvent, de la faiblesse des caractéristiques géomécaniques des massifs rocheux mis à nu (lithologie et fracturation naturelle) et de l'érosion.

Nombre de ces falaises ont été [ou sont] les lieux d'activités ou d'occupations anthropiques qui ont pu se traduire par le creusement de cavités.

Au niveau des phénomènes qui peuvent s'y produire, il faut donc considérer à la fois ceux inhérents aux versants et ceux liés aux cavités souterraines. Ainsi, à l'aléa « versant rocheux » vient s'ajouter l'aléa « cavité souterraine ».

Cette première partie présente de manière générale les différentes origines et contextes de ces sites et analyse les enjeux pouvant être affectés. Elle précise aussi les types de versants sous-cavés qui sortent du champ d'application du guide.

2.1. Origine et utilisation actuelle

2.1.1. Versant sous-cavé d'origine anthropique

La typologie des cavités anthropiques en bordure de versant est très variée. Excepté les exploitations de matériaux (ciel ouvert et entrées en cavage), l'homme a mis à profit ces fronts rocheux pour y creuser et/ou réutiliser des cavités de tailles très variables (de la simple cave de quelques m³ à des réseaux de galeries complets sur plusieurs niveaux).

Une grande partie des cavités de bord de versants relève du troglodytisme, défini comme une occupation humaine dans des excavations naturelles ou artificielles. Ce mode d'occupation particulier est très présent dans certains territoires français, notamment en bord de Loire (régions Centre-Val de Loire et Pays de la Loire). La forte densité et la grande variété de ces sites troglodytiques font de ce territoire le premier site en France et un des premiers en Europe. Cependant, d'autres régions sont également concernées : par exemple de larges linéaires de fronts rocheux en bord des fleuves et rivières Seine, Oise, Lot, Tarn, Rhône, Durance, Dordogne ou Garonne font également l'objet de ces occupations.

Dans le cas le plus courant dit du « troglodytisme horizontal », le front rocheux naturel est aménagé ou creusé à l'horizontale (habitation, garage, cave…) (Figure 1). Les activités humaines ne restent pas limitées au domaine souterrain et s'étendent en surface sous le front rocheux (extension des maisons, cours, accès et rues…).



Figure 1 : exemple de troglodytisme horizontal (© Fotolia/Pictures news)

L'habitat troglodytique de plaine est un type de troglodytisme particulier : il s'agit de la création d'un versant dans un plateau (troglodytisme vertical). Des hommes ont d'abord terrassé de grandes cours, sortes de carrières à ciel ouvert, puis, à partir des fronts de taille ainsi créés, ont creusé en souterrain leurs habitations (Figure 2).



Figure 2 : exemple de troglodytisme vertical, Rochemenier (49) (Source : https://www.anjou-tourisme.com/fr ; © S. Bonniol/Visuelles)

Il existe également le semi-troglodytisme horizontal. Sa particularité est qu'aucune cavité n'a été creusée ou exploitée, le bâtiment fait juste l'économie du quatrième mur puisqu'il est adossé à la falaise (Figure 3). Il sort de l'application de ce guide car l'aléa cavité n'y existe pas. L'habitat est exposé à l'aléa lié à la présence du versant.



Figure 3 : exemple d'habitat semi-troglodytique dans le grès du Parc naturel régional des Vosges du Nord, maisons de Graufthal à Eschbourg (67) (© V. Renaud)

Les autres configurations susceptibles d'impacter la stabilité d'un coteau (au niveau du versant et en profondeur) sont les *carrières souterraines*, utilisées à l'origine pour l'exploitation de matériaux. Elles regroupent pour l'essentiel l'extraction des matériaux de construction (calcaires, gypse, argiles, sables, ardoises…). Les parties proches des entrées en cavage sont souvent les plus exploitées et donc les plus instables. En outre, ces secteurs sont aujourd'hui abandonnés et se dégradent inéluctablement, constituant un facteur aggravant pour la stabilité générale du versant.

D'autres cavités d'origine anthropique peuvent sous-caver les falaises et les versants rocheux. Il s'agit des tunnels routiers ou ferroviaires. Bien entendu, l'aléa y est plus élevé pour ceux où les voies sont en corniche (parallèle au versant, Figure 4). Le rôle et l'enjeu de ces ouvrages civils étant très importants (ces types d'ouvrages sont souvent les seuls à permettre l'accès à des vallées de haute montagne), le soutènement en place a fait l'objet d'études approfondies. Ces tunnels en activité sont en général correctement dimensionnés et contrôlés périodiquement. Le présent document ne traite pas de ces ouvrages particuliers, qui sont de la responsabilité de leur gestionnaire.



Figure 4 : tunnel parallèle au versant rocheux (© Fotolia/Dom)

2.1.2. Versant sous-cavé d'origine naturelle

Les cavités naturelles sont aussi très présentes en France. Il peut s'agir de :

- cavités de dissolution : dissolution de matière (*karsts*, évaporites…) par la circulation d'eau (rivières souterraines, *résurgences*…) ;
- cavités de suffosion : érosion de matière (formations sédimentaires meubles) par circulation d'eau avec entrainement des particules fines (entrainement/lessivage de matériaux) ;
- cavités volcaniques : elles se forment en même temps que la roche encaissante du fait de la circulation rapide du magma.

Ces cavités naturelles peuvent ensuite être aménagées par l'homme (cavités troglodytiques et abris sous roche). Toutes ces cavités d'origine naturelle peuvent sous-caver totalement ou partiellement des falaises.

Les falaises côtières peuvent aussi être sous-cavées par l'érosion marine. Il s'agit de grandes falaises (souvent crayeuses ou calcaires voire granitiques) d'une hauteur pouvant aller jusqu'à 100 m, sous-cavées par de petites cavités le plus souvent naturelles. Ces falaises sont soumises à des facteurs marins et continentaux (Figure 5). L'interaction de la falaise sous-cavée avec les facteurs marins n'a pas été étudiée dans ce rapport. Le lecteur pourra se référer au guide méthodologique *Plan de prévention des risques littoraux* (MEDDE, 2014) pour comprendre les mécanismes d'instabilité liés exclusivement aux falaises côtières, le cas du sous-cavage n'étant pas abordé.





Figure 5 : exemples de falaises côtières sous-cavées : pointe de Suzac, commune de Saint-George-de-Didonne, en haut, et pointe de Chay, commune d'Angoulins-sur-Mer, en bas (Charente-Maritime) (Source : Cerema)

2.2. Répartition géographique

Il n'existe pas de base de données recensant les sites de versants sous-cavés à l'échelle nationale. Une partie des cavités souterraines est néanmoins recensée (http://www.georisques.gouv.fr/dossiers/cavites-souterraines/#/) mais, outre la limite liée à l'aspect non exhaustif du recensement, il reste souvent difficile de distinguer celles qui sous-cavent un versant rocheux. En effet, lorsque les carrières souterraines sont enregistrées dans la base de données, il n'y a pas ou très peu de mentions relatives à la présence de versants rocheux, ni même d'indication spéciale précisant une configuration de sites troglodytiques ou une entrée de la carrière en cavage.

Étant donné qu'il existe plusieurs milliers de cavités souterraines en France, il est probable qu'un pourcentage non négligeable d'entre elles se situe à proximité d'un versant rocheux qu'elles sous-cavent. Une première analyse non exhaustive dénombre un nombre important de sites de versants sous-cavés.

Une approche cartographique des sites de versants sous-cavés par des carrières souterraines, des cavités naturelles ou troglodytiques a été réalisée. Il faut toutefois préciser que cette carte (Figure 6) n'a pas pour objectif d'identifier tous les sites de versants sous-cavés mais de situer les zones où cette problématique est largement présente. Elle est basée sur des retours d'expérience et la consultation de bases de données.

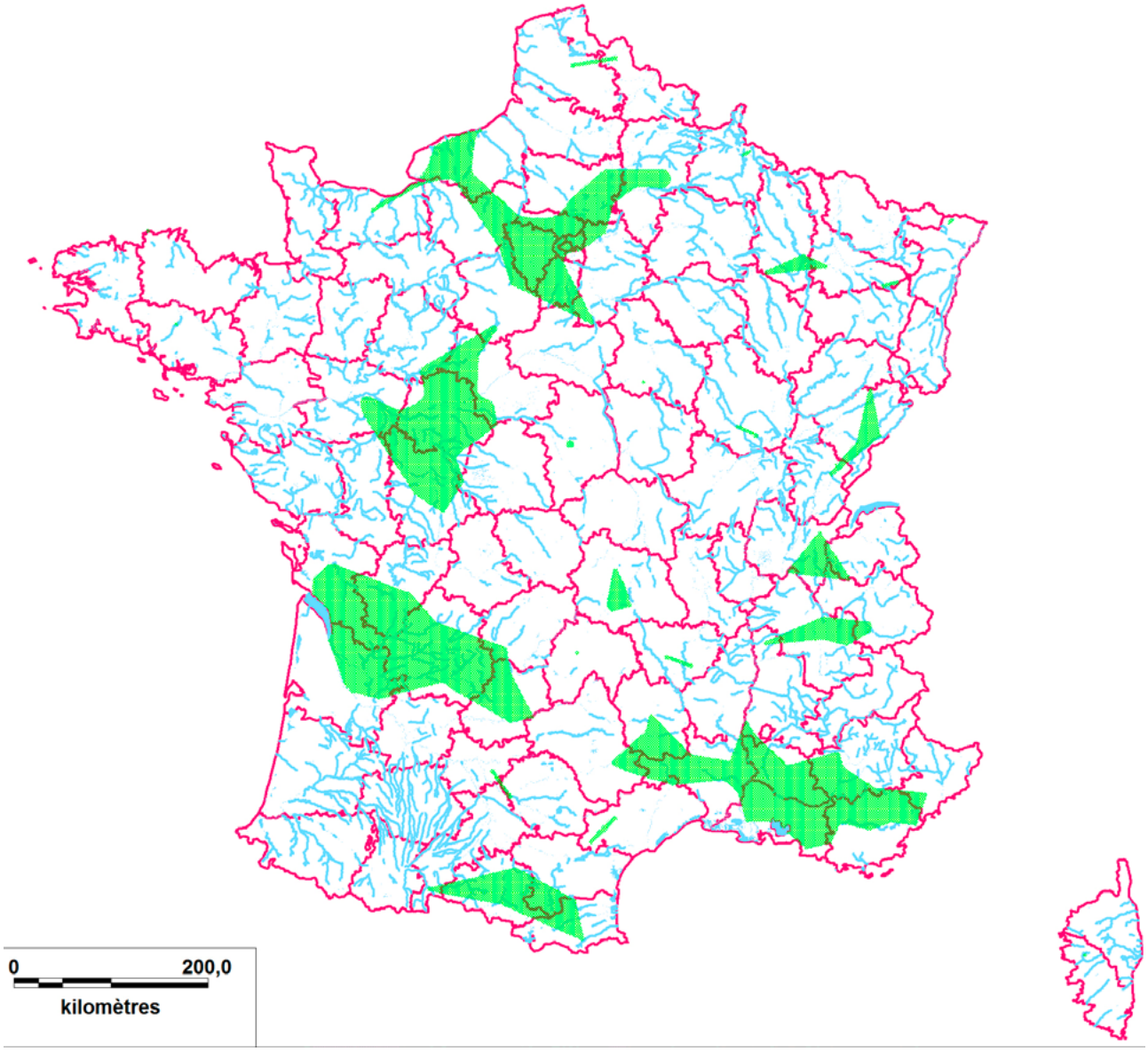


Figure 6 : approche cartographique des sites de versant rocheux sous-cavé en France (zones vertes sur la carte)

En ce qui concerne les cavités naturelles ou troglodytiques, les données ont été collectées à partir de recherches sur Internet (www.troglos.com, sites d'agences immobilières spécialisées dans l'habitat troglodytique, sites de gîtes ruraux troglodytiques, etc.) et d'ouvrages spécialisés : *Voyage dans la France des troglodytes* [21], *Troglodytes du Val-de-Loire* [22], *Habitat creusé. Le patrimoine troglodytique et sa restauration* [2], *Le monde souterrain de l'Anjou* [20], rapports BRGM ([3], [14], [23]). Plusieurs centaines de communes, pouvant être concernées par cette problématique, ont ainsi pu être identifiées. Certaines comprennent à elles seules plus de 400 sites sous-cavés sur leur territoire.

La carte met en évidence des territoires privilégiés où la densité de sites de versants sous-cavés est importante. Outre le territoire du Val de Loire précédemment évoqué, différentes zones apparaissent notamment la Normandie, le Sud-Ouest autour des vallées de la Garonne et de la Dordogne, le Sud-Est, etc.

La répartition géographique des cavités peut aussi s'expliquer au regard de la carte géologique (cf. www.infoterre.brgm.fr). En effet, ce sont les formations carbonatées qui sont concernées : craies, craies impures (tuffeau), calcaires, parfois sableux... Il s'agit de formations en général exploitées pour la pierre de taille, assez tendres, faciles à excaver et avec une porosité non négligeable. Associées à des versants naturels, la perméabilité initiale du matériau augmente et sa résistance diminue, ce qui conduit à une certaine accidentologie présentée dans la partie suivante.

2.3. Accidentologie

Avec le vieillissement naturel des versants et des cavités souterraines, souvent accéléré par des facteurs externes, des instabilités se créent et peuvent mener à des mouvements de terrain plus ou moins importants. Or des enjeux permanents ou temporaires et plus ou moins vulnérables peuvent être présents : personnes, habitations, commerces, infrastructures, lieux de stockage, etc.

Plusieurs sites sous-cavés par des carrières souterraines, des aménagements troglodytiques ou des cavités naturelles ont fait l'objet d'un ou plusieurs accidents (45 mouvements de terrain enregistrés sur la seule commune de Rochecorbon (Indre-et-Loire) entre 1780 et 1986 [3]), pour certains parfois mortels. Le tableau ci-dessous (Tableau 1) synthétise quelques accidents recensés par l'Ineris [19] [7], le Cerema, Cavités 37 et le BRGM [3] [14] [23] ayant occasionné des victimes.

Tableau 1 : accidents recensés liés à un mouvement de terrain d'un versant sous-cavé impliquant des victimes

Site	Date	Matériau	Bilan	Type
Rochecorbon (37)	1720	Tuffeau[2]	17 morts	écroulement falaise sur habitat (Pierre tombée)
Chinon (37)	1798	Tuffeau	1 mort	écroulement falaise sur habitat troglo
Lussault-sur-Loire (37)	1812	Tuffeau	2 morts	chute de blocs
Rochecorbon (37)	1819	Tuffeau	14 morts	chutes de blocs sur habitat
Rochecorbon (37)	29/01/1820	Tuffeau	11 morts	écroulement falaise sur habitat
Vouvray (37)	09/1824	Tuffeau	1 mort	désordre en cave
Chinon (37)	04/1827	Tuffeau	2 morts	désordre dans cave troglo
Seuilly (37)	01/1842	Tuffeau	2 morts	écroulement
Villaines-les-Rochers (37)	05/1873	Tuffeau	1 blessé	chute de pierres

2 - Le tuffeau est un calcaire crayeux, une roche calcaire tendre, poreuse aussi appelée tuf ou craie turonienne (roche blanche).

Chinon (37)	06/12/1875	Tuffeau	1 mort	chutes de pierre dans cave troglo
Amboise (37)	02/1879	Tuffeau	2 morts	glissement sur habitat troglo
Ports (37)	11/08/1880	Craie	26 morts, 8 blessés	écroulement carrière puis falaise sur le carreau des fours à chaux
Chancelade (24)	25/10/1885	Calcaire	13 morts	effondrement de carrière sur 7 maisons
Turquant (49)	Juin 1887	Tuffeau	2 morts et 1 blessé	écroulement de la falaise
Loches (37)	1910	Tuffeau	1 blessé	effondrement sur habitat troglo
Château-Landon (77)	21/01/1910	Craie	7 morts	écroulement carrière avec effondrement du coteau sur habitat
Poce-sur-Cisse (37)	02/1910	Tuffeau	1 blessé	chute de blocs, habitat troglo
Thizay (37)	03/1910	Tuffeau	1 blessé	chute de pierres, habitat troglo
Cinq-Mars-la-Pile (37)	19/05/1931	Tuffeau	2 morts, 1 blessé	écroulement falaise sur habitat troglo
Rochecorbon (37)	16/01/1933	Tuffeau	3 morts, 2 blessés	écroulement falaise sous-cavée
Cangey (37)	1942	Tuffeau	1 mort	désordre dans une cave troglo
Dampierre-sur-Loire (49)	1955	Tuffeau	2 morts	effondrement de la voute d'une ancienne carrière
Saumur (49)	1957	Tuffeau	1 blessé	chute de blocs
Luynes (37)	08/02/1958	Tuffeau	1 mort	écroulement falaise
Vernou-sur-Brenne (37)	13/01/1962	Tuffeau	1 blessé	écroulement falaise sur cave
Azay-le-Rideau (37)	01/01/1964	Tuffeau	1 blessé	effondrement sur habitat troglo
Chançay (37)	12/1968	Tuffeau	1 mort	désordre dans cave troglo
Nazelles-Negron (37)	29/08/1972	Tuffeau	1 mort	chute de blocs
Faye-la-Vineuse (37)	13/01/1975	Tuffeau	1 mort	effondrement sur habitat troglo

Charge (37)	21/02/1976	Tuffeau	1 mort, 1 blessé	chute de blocs dans cave troglo
Cravant-les-Coteaux (37)	15/07/1985	Tuffeau	1 blessé	chute de blocs dans cave troglo
Cravant-les-Coteaux (37)	23/08/1986	Tuffeau	2 morts	chute de blocs dans cave troglo
Montsoreau (49)	18/02/2000	Tuffeau	1 mort	
Le Coudray-Macouard (49)	2004	Tuffeau	1 mort	chute de blocs en cave suite à des travaux
Le Lude (72)	2008	Craie sableuse	1 mort	ouverture d'un fontis
Montlouis-sur-Loire (37)	2008	Tuffeau	1 mort	chute de blocs en cave suite à des travaux
Montoire-sur-le-loir (41)	23/12/2012	Tuffeau	1 mort	chute de bloc sur habitation troglodyte
Villaines-les-Rochers (37)	14/02/2014	tuffeau	1 blessé	écroulement d'habitation troglodytique

Il existe en outre de nombreux autres cas de désordres (avec ou sans dommages matériels) pour lesquels aucune victime n'a été à déplorer.

Pour certains cas, le nombre élevé de victimes suite à des mouvements de terrain s'explique par l'aspect brutal et inattendu de ces phénomènes. De plus, les accidents recensés se sont tous produits avec des cavités d'origine anthropique et non d'origine naturelle. Quelques exemples récents sont illustrés dans le Tableau 2. Enfin, l'analyse de l'accidentologie a permis de constater que la cavité devient un facteur de plus en plus aggravant vis-à-vis du risque « versant rocheux sous-cavé » dès lors que son volume est important (plusieurs centaines de m^3) et/ou que son extension est importante dans les zones en bordure de versant, déconsolidées par d'autres facteurs.

Tableau 2 : illustrations d'effondrements récents (Source : Cavités 37)

Lieux et dates	Illustrations
Chinon (37), 2015	
Saint-Épain (37), 2016	 

Lieux et dates	Illustrations
La Croix-en-Touraine (37), 2013	
Villaines-les-Rochers (37), 2014	 

3 CONFIGURATIONS ET DESCRIPTION DES DÉSORDRES ET DES PHÉNOMÈNES ASSOCIÉS

3.1. Description du type de sous-cavage

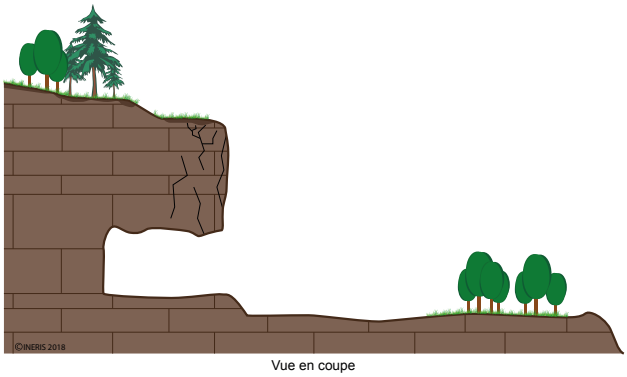
Le sous-cavage peut être d'origine anthropique ou d'origine naturelle. Un descriptif détaillé des différents types de sous-cavage est proposé dans la partie 2 de ce rapport.

L'objectif ici est d'identifier des configurations types de versants sous-cavés (celles les plus classiquement rencontrées) pour pouvoir ensuite appliquer une démarche cohérente et adaptée de caractérisation de l'aléa. Ces configurations ne dépendent pas de l'origine du sous-cavage et se veulent généralisables à des contextes différents : l'opérateur doit pouvoir, dans la majorité des cas, attribuer une configuration type à un cas rencontré. Les particularités du site seront ensuite traitées, si elles entrent en jeu dans le cadre de la caractérisation de l'aléa, comme des facteurs aggravant l'instabilité ou améliorant la stabilité.

3.2. Configurations types

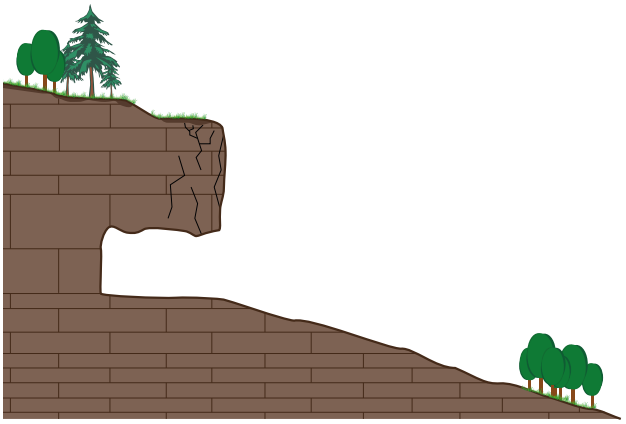
3.2.1. Falaise sous-cavée

La configuration de type A « Falaise sous-cavée » représente un front rocheux sub-vertical à vertical pouvant aller jusqu'à une trentaine de mètres de hauteur[3] avec une cavité plus ou moins développée et débouchant sur le front ou non. Cette cavité peut être vide ou habitée, s'étendre dans le massif sur quelques mètres ou plusieurs kilomètres (carrières). Le front de falaise proprement dit, du fait de sa verticalité, est en général peu ou pas végétalisé et peut avoir plusieurs origines : naturelle (lié à l'érosion) ou anthropique (lié aux activités humaines, notamment des extractions à ciel ouvert). La zone en pied de versant est soit quasi-horizontale (sur une distance au moins équivalente à la hauteur du front), configuration de type A1, soit possède une pente, configuration de type A2 (Figure 7).



Vue en coupe

Configuration Type A1



Vue en coupe

Configuration Type A2

Figure 7 : représentation schématique de la configuration de type A1 et A2 « Falaise sous-cavée »

3 - Cette limite de trente mètres a été fixée par le retour d'expérience sur plusieurs sites de versants sous-cavés, exclusion faite des versants montagneux et côtiers (cf. 2.1.2. et 3.2.3.).

Cette configuration, illustrée en Figure 8, regroupe de nombreux cas de versants sous-cavés.



Figure 8 : exemples de versants sous-cavés de la configuration de type A1 « falaise sous-cavée » :
a : entrée de carrière à Saumur (49),
b : entrée de carrière à Conflans-Sainte-Honorine (78),
c : maisons troglodytiques à Gouvieux (60) (Source : Ineris)

3.2.2. Coteau sous-cavé

La configuration « Coteau sous-cavé » représente un versant rocheux penté (en forme de butte), plus ou moins végétalisé, pouvant admettre des dénivelés de plusieurs dizaines de mètres. Ce type de relief naturel, très commun le long des vallées fluviales, peut avoir fait l'objet de creusement en profondeur.

La cavité creusée peut être abandonnée ou occupée, s'étendre sur quelques mètres ou plusieurs kilomètres (anciennes carrières). La zone en pied de versant est soit quasi-horizontale (sur une distance au moins équivalente à la hauteur du front), configuration de type B1, soit possède une pente, configuration de type B2 (Figure 9).

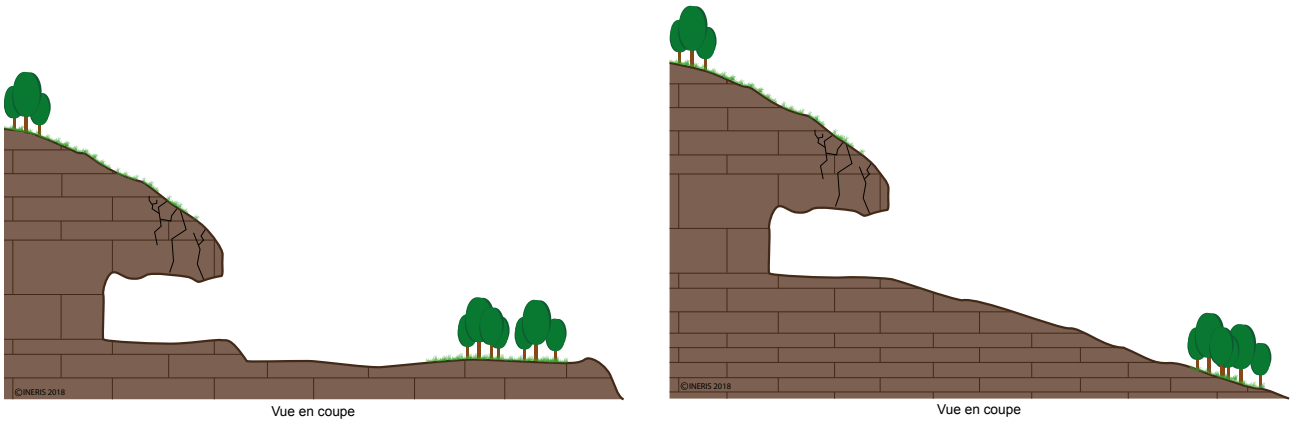


Figure 9 : représentation schématique de la configuration de type B1 et B2 « Coteau sous-cavé »

Cette configuration est illustrée par la Figure 10.



Figure 10 : exemple de versant sous-cavé de la configuration de type B1 « coteau sous-cavé » : deux entrées de cave à Creil (60) (Source : Ineris)



Figure 11 : éperons de craie de la boucle de Moisson (95) illustrant un renfoncement sur un versant (Source : Cerema)

3.2.3. Cas spécifiques

Un versant peut être sous-cavé par plusieurs cavités superposées les unes par rapport aux autres. Ce cas de « multi-cavités » est examiné à part dans la partie 5.5.

Si le *mur* de la cavité sous-cavant le versant est constitué d'un matériau déformable (couche d'argile par exemple), ce paramètre sera étudié comme facteur d'instabilité interne (voir partie 3.3.1.1) et considéré comme un facteur aggravant.

En revanche, les cas suivants ne seront pas pris en compte dans le cadre de ce document :

- un éperon au sein d'un versant : un renfoncement est visible en dessous de cet éperon, formant un surplomb assimilable à une petite cavité (Figure 11). Ce cas sera traité comme un versant classique avec une masse instable en son sommet. Le lecteur se référera au *Guide pratique Versants rocheux : phénomènes, aléas, risques et méthodes de gestion* [17] ;
- les entrées de carrières souterraines à flanc de versant montagneux (type ardoisière, mine…) ou de versants de très grande hauteur (type Gorges ou bordures de Causses) (Figure 12) : ces versants sous-cavés montagnards, très spécifiques de par leur géologie (roches plutôt dures) et leur géomorphologie (versants de très grande hauteur, plusieurs centaines de mètre parfois) ne sont pas pris en compte dans ce guide. Le lecteur pourra se référer aux Guides techniques LCPC [12] et [13] et au *Guide pratique Versants rocheux : phénomènes, aléas, risques et méthodes de gestion* [17].



Figure 12 : entrée d'une ardoisière (Morzine, 74) (Source : Ineris)

3.3. Facteurs d'instabilité des versants sous-cavés

Les instabilités de versant rocheux résultent souvent de la combinaison d'un ou plusieurs paramètres défavorables (facteurs internes) et de l'occurrence de facteurs externes susceptibles de modifier les conditions d'équilibre du milieu et d'accélérer la rupture. Ces facteurs peuvent être naturels ou anthropiques.

3.3.1. Facteurs internes

Ces facteurs sont propres au site. Ils permettent de définir précisément les caractéristiques des versants et de juger des mécanismes de dégradation potentiels.

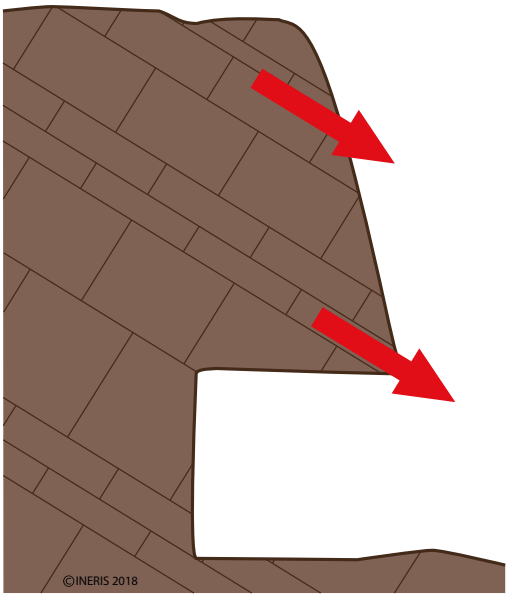
3.3.1.1. La lithologie

La lithologie du massif désigne la nature des roches le constituant. Elle joue un rôle important dans la stabilité du versant sous-cavé car elle détermine en partie sa résistance mécanique : un massif calcaire compact ne va pas réagir de la même façon aux contraintes qu'un *faciès* plus tendre (craie par exemple) ou qu'une formation composée d'alternance de niveaux résistants et tendres (marnes par exemple). La nature des *terrains de couverture*, du *massif encaissant* et des formations situées au pied des versants constituera également un élément important pour la stabilité d'un site.

3.3.1.2. Le contexte structural

Le *pendage* des couches géologiques doit être pris en compte. Selon l'inclinaison des couches par rapport au versant et par rapport à la cavité, des instabilités peuvent être favorisées comme l'illustre la Figure 13.

La fracturation du massif (*failles, fractures, diaclases, joints de stratification* et *schistosité*) a une influence prépondérante sur la stabilité d'un versant. Les fractures, qui se développent dans le massif ou le long des éléments structuraux du massif, sont des points de faiblesse du massif pouvant évoluer vers la rupture et donc en zones de départ de désordres. L'eau peut facilement y circuler, détériorant ou agrandissant davantage la *discontinuité*.



Vue en coupe

Figure 13 : illustration de l'influence du pendage des couches géologiques sur la stabilité du versant sous-cavé (glissement banc sur banc lorsque le pendage est dans le sens de la pente)

L'observation sur le versant et dans la cavité de l'origine structurale de la fracturation (d'origine tectonique ou liée à la décompression du massif), de la longueur des fractures, de la densité de fracturation, de l'écartement des fractures, de la nature du remplissage, de l'humidité, de leur direction et leur inclinaison par rapport au front de falaise sont autant d'indices qui permettent d'évaluer la stabilité du versant sous-cavé. En effet, la zone en bordure de versant combine la fracturation due à la décompression du front rocheux (phénomène d'appel au vide) et un champ de contraintes dévié (lié à la pente du versant) pouvant provoquer un cisaillement des ouvrages souterrains ; ce cisaillement sera particulièrement visible (présence de fractures inclinées) au sein des cavités (sur les piliers des cavités si celles-ci en comportent et/ou sur les parois).

3.3.1.3. La morphologie du site

La morphologie du versant sous-cavé se définit principalement par ses caractéristiques géométriques. Pour le versant, il s'agit de sa hauteur, sa forme et l'inclinaison de sa pente. Pour la cavité, il faut s'intéresser à ses dimensions (extension et volume), sa position dans le front de falaise et sa hauteur de *recouvrement*. La détermination de la morphologie du versant sous-cavé va permettre d'estimer, entre autres, le volume mobilisable de matériaux en cas de désordre.

Une description précise de l'aval du versant sous-cavé, notamment du talus en pied de versant (longueur, angle, nature) permet pour sa part de mieux caractériser la propagation des blocs rocheux.

La configuration de la cavité est définie par la géométrie du vide et le mode d'extraction s'il s'agit d'une cavité anthropique. Le mode d'extraction ou de creusement d'une cavité sont des paramètres importants pour la stabilité :

- l'utilisation d'explosifs fragilise le massif et peut donc favoriser davantage l'apparition d'instabilités dans le massif rocheux environnant que l'extraction manuelle ;
- le mode d'exploitation, notamment dans des zones proches des cavages : une carrière en chambres et piliers par exemple peut provoquer des désordres plus étendus que des vides isolés (caves, galeries filantes...).

Le paramètre le plus important reste toutefois la géométrie du vide : la dimension (hauteur, largeur, profondeur), la configuration (position dans le massif) et la profondeur du vide (épaisseur de recouvrement) permettent d'évaluer la résistance à la rupture. Un sous-dimensionnement des piliers (élancement du pilier trop important ou nombre de piliers insuffisant) dans une *carrière souterraine* ou une mauvaise superposition de niveaux d'exploitation peuvent entrainer l'apparition d'instabilités. Le *taux de défruitement* donne une première estimation de cette géométrie.

Pour une caractérisation plus détaillée d'une cavité souterraine, le lecteur se référera aux guides suivants :

Guide méthodologique – Plan de prévention des risques naturels – Cavités souterraines abandonnées [18] et *Guide méthodologique – Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées* [10].

3.3.2. Facteurs externes

Il s'agit de l'ensemble des paramètres extérieurs au versant et à la cavité qui peuvent aggraver l'instabilité du versant sous-cavé, si leurs effets ne sont pas maîtrisés.

3.3.2.1. L'eau

L'eau constitue le facteur externe prépondérant dans la déstabilisation des versants rocheux sous-cavés.

On distingue :

- les eaux d'origine naturelle : eaux météoriques (pluie, neige) qui s'infiltrent directement dans le massif, qui sont collectées par ruissellement ou au travers des eaux souterraines (*nappe*) ;
- les eaux d'origine anthropique ou parasites (mauvaise réalisation et/ou défaut d'entretien des ouvrages de drainage, des dispositifs de collectes et d'évacuation d'eau, imperméabilisation des surfaces urbaines, pratiques agricoles…).

La variation des teneurs en eau d'une roche, liée à sa porosité, peut influencer sa résistance mécanique. L'augmentation de la teneur en eau peut ainsi provoquer une surcharge temporaire.

Les écoulements d'eau peuvent engendrer des phénomènes de ruissellement importants, ceux-ci entraînant un lessivage de la paroi et la création et/ou l'agrandissement des discontinuités (fracturations naturelles, fissurations, contacts lithologiques). Ils augmentent également le risque de *glissement* des formations meubles en crête de front.

3.3.2.2. Les phénomènes climatiques et naturels

Ils peuvent modifier la stabilité d'un versant sous-cavé au travers[4] :

- du cycle de gel/dégel : les périodes de froid intense peuvent engendrer des phénomènes de gel qui accentuent l'éclatement de la roche et l'expansion des fissures. Ce phénomène peut être observé sur le versant mais aussi sur les premiers mètres du sous-cavage (les entrées en cavage larges et propices aux circulations d'air peuvent laisser apparaître des écaillages dus aux cycles de gel/dégel) ;
- des variations de température : une augmentation des températures peut assécher le sol et affecter les propriétés mécaniques de la roche. Les variations de température vont aussi influencer la nature et la densité de la végétation et donc la stabilité du versant (cf. 3.3.2.3). Enfin, la température est un facteur qui entre en jeu dans les processus d'*altération* de la roche. De fortes variations de température vont amplifier ces processus [4] ;
- du vent : un mouvement mécanique des racines dû à un fort vent dans la partie supérieure d'un arbre peut engendrer des instabilités (phénomène de bras de levier). De manière plus rare, un vent fort peut éroder un versant nu ;
- des mouvements de terrain : les séismes naturels peuvent favoriser les instabilités, même si leur impact n'est pas encore quantifié.

3.3.2.3. La végétation

La croissance des racines de la végétation à hautes tiges[5] contribue à élargir les fissures et ainsi favorise les infiltrations d'eau et la désagrégation locale de la roche. En crête de front, les racines favorisent également les phénomènes d'éclatement de la roche et peuvent être à l'origine de chutes de pierres et de petits blocs. Les racines pivotantes entrainent de fortes dégradations alors qu'un réseau racinaire traçant n'entraine qu'une dégradation plus limitée (Figure 14).



Figure 14 : réseau racinaire traçant dans une carrière à gauche et des racines pivotantes sur un versant à droite (Source : Cavités 37)

4 - Le facteur eau est abordé dans le paragraphe précédent (cf. 3.3.2.1).
5 - Il s'agit d'arbres dont le tronc atteint 1,8 à 2 m de hauteur et dont la ramure se développe 4 à 5 m au-dessus (https://www.rustica.fr/articles-jardin/arbre-haute-tige,3209.html).

En revanche, la végétation rase en crête permet le maintien des sols en place, limite le ravinement de ceux-ci et réduit l'infiltration de l'eau.

De plus, la présence de racines peut modifier les conditions physico-chimiques des roches (les racines ont tendance à acidifier le milieu et pourraient provoquer une réaction chimique avec les minéraux des roches constituant le massif). L'impact de ce phénomène sur l'instabilité des versants rocheux sous-cavés est toutefois difficilement quantifiable.

3.3.2.4. La faune

L'action des oiseaux ou des animaux fouisseurs peut accélérer les processus de dégradation en tête et en pied de versant (terriers) ainsi que sur le versant (enlèvement progressif de matière par les oiseaux) (Figure 15).

3.3.2.5. Les mauvaises pratiques anthropiques

Elles peuvent modifier la stabilité d'un versant sous-cavé. Voici quelques exemples[6] :

- le terrassement en pied de versant : le creusement du massif par l'homme pour constituer des abris ou exploiter la roche engendre un affaiblissement local du massif au niveau des zones sous-cavées ;
- la surcharge statique : la mise en place d'une charge statique (bâti, remblai) en tête de versant peut avoir une influence sur la stabilité du versant rocheux ;
- les confortements s'ils sont mal dimensionnés et/ou non entretenus (Figure 16) ;
- les vibrations : elles pourraient avoir un rôle aggravant dans certaines configurations instables, mais leurs effets sont à ce jour très mal connus et non quantifiés (sismicité induite). Les vibrations d'origine anthropique

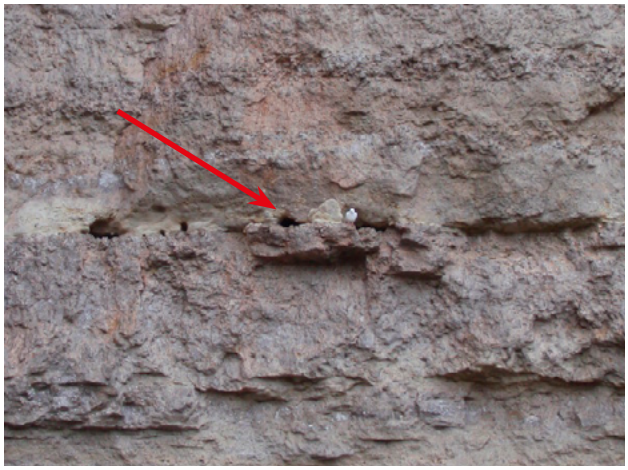




Figure 15 : zone de roche plus tendre picorée par les pigeons à gauche et terriers de blaireau au sommet du front à droite (Source : Cavités 37)

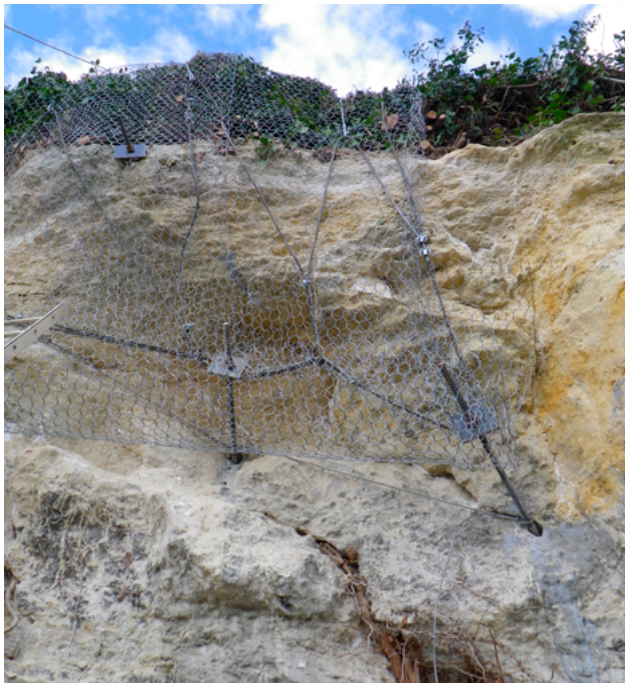




Figure 16 : exemples de boulonnage mal dimensionné à gauche (soit le boulon est trop long soit le trou foré n'est pas assez profond) et de mauvaise cimentation du boulon à droite (non présence de coulis sur toute la longueur du boulon) (Source : Cavités 37)

6 - Les mauvaises pratiques anthropiques liées à l'eau sont traitées dans la partie 3.3.2.1.

peuvent avoir plusieurs causes : circulation environnante (routière, ferroviaire), utilisation de certains engins de chantier (compacteurs, brise roche hydraulique), etc. ;

- les mauvaises pratiques en cavité : ce terme regroupe des actions anthropiques défavorables diverses comme la suppression d'un pilier dans une carrière souterraine, son mauvais entretien, sa mauvaise ventilation, la purge excessive du *toit de carrière*, l'ouverture de passage entre deux cavités limitrophes, etc.

Il est également intéressant de rappeler ici les facteurs anthropiques favorables à la stabilité, même si l'objet de cette partie n'est pas de les décrire en détail ([17], [13])[7] :

- la présence de bâtiment en butée contre le versant dans le cas où ce dernier présente une structure rigide ;
- les confortements bien dimensionnés et en bon état : grillage, clous… ;
- la gestion efficace des eaux de ruissellement et d'infiltration en tête de versant ou sur le plateau arrière ;
- la gestion de la végétation : plantation de végétation rase pour maintenir les terrains et élimination de celle à racines pivotantes.

3.4. Typologie des désordres et des mécanismes de rupture

3.4.1. Typologie des désordres

Les chutes de pierres, les chutes de blocs et les éboulements en masse sont des mouvements gravitaires qui affectent les massifs rocheux sous-cavés présentant de forts reliefs (falaises ou versants raides). Les masses rocheuses prédécoupées par des discontinuités donnent lieu à des instabilités pouvant mettre en jeu des volumes importants de roche, allant de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètre cubes.

Parmi les désordres recensés au niveau du front, il faut distinguer :

- **les chutes de pierres et de petits blocs** (Figure 17a) : les volumes concernés sont inférieurs ou de l'ordre du décimètre cube ;
- **les chutes de blocs** (Figure 17b) : les volumes concernés sont supérieurs au décimètre cube mais restent inférieurs au mètre cube ;
- **les chutes de gros blocs** (Figure 17c) : les volumes concernés sont supérieurs au mètre cube et inférieurs à dix mètres cube ;
- **les éboulements de masses rocheuses** (Figure 17d) : les volumes concernés sont supérieurs à dix mètres cube et peuvent aller jusqu'à des centaines de mètres cube.
- **les éboulements complexes :** les grands mouvements de versant sous-cavé dont les mécanismes sont



Figure 17 : illustration de la typologie des désordres : en a pierres et petits blocs, Mousseaux-sur-Seine (78) ; en b chute de blocs, Mousseaux-sur-Seine (78), en c éboulement de gros blocs, Auvers-sur-Oise (95) et en d effondrement de plusieurs dizaines de m³, Saint Epain (37) (Source : Cerema et Cavités 37)

7 - Le lecteur pourra aussi se référer au *Guide sur les solutions de mise en sécurité des cavités souterraines abandonnées d'origine anthropique* (Ineris, 2015).

parfois complexes et les processus physiques difficiles à modéliser peuvent se traduire par des propagations de matériaux sur de grandes distances selon des processus relativement analogues aux écoulements fluides. L'éboulement catastrophique du coteau sous-cavé à Château-Landon (77) peut être cité en exemple d'un éboulement complexe (Figure 18) : il a enseveli plusieurs maisons, causé la mort de 7 personnes et obstrué le canal du Loing.

- **les glissements de terrain superficiels :** aux phénomènes de rupture dans les massifs rocheux cités précédemment peuvent s'ajouter des instabilités de pentes (glissements de terrain) qui affectent principalement les formations superficielles. Les glissements de terrains intéressent une masse de terrain plus ou moins bien délimitée. Ils peuvent être avec rupture (défaut de résistance au cisaillement sur une surface le long de laquelle les déformations se localisent) ou sans rupture (*glissement de type reptation*, *solifluxion*, *fluage* concernant les terrains meubles). Les matériaux déplacés peuvent évoluer de façon très variée suivant leur nature et les volumes en cause. Ces phénomènes peuvent être associés à des mouvements de versants rocheux sous-cavés de configuration de type B (coteau sous-cavé) avec une forte épaisseur de couverture de type colluvion ou altérites (Figure 19). Cette typologie de désordre sort du domaine d'application de ce guide [9].

3.4.2. Mécanismes de rupture

L'origine d'une chute de blocs ou d'un éboulement peut être variée. Des plans de discontinuités délimitent des compartiments pouvant évoluer vers la rupture en fonction de facteurs déclenchants externes ou internes, d'origine naturelle ou anthropique, ainsi que des forces motrices et résistantes mises en jeu.

La typologie des instabilités est résumée dans le Tableau 3 (voir p. 25). Il s'agit de mécanismes déjà décrits dans la littérature ([10], [12] et [13]) et rappelés ici. Généralement, sur un site de versant sous-cavé, il n'est pas observé un seul type d'instabilité mais la conjonction de plusieurs. La colonne du tableau « Indices d'évolution et signes précurseurs » permet à l'observateur de l'instabilité de l'identifier et de statuer sur son avancement lors de l'observation du site (voir § 5.2).



Figure 19 : couverture de type colluvion sur un site de coteau sous-cavé (ardoisière de Morzine, 74) (Source : Ineris)

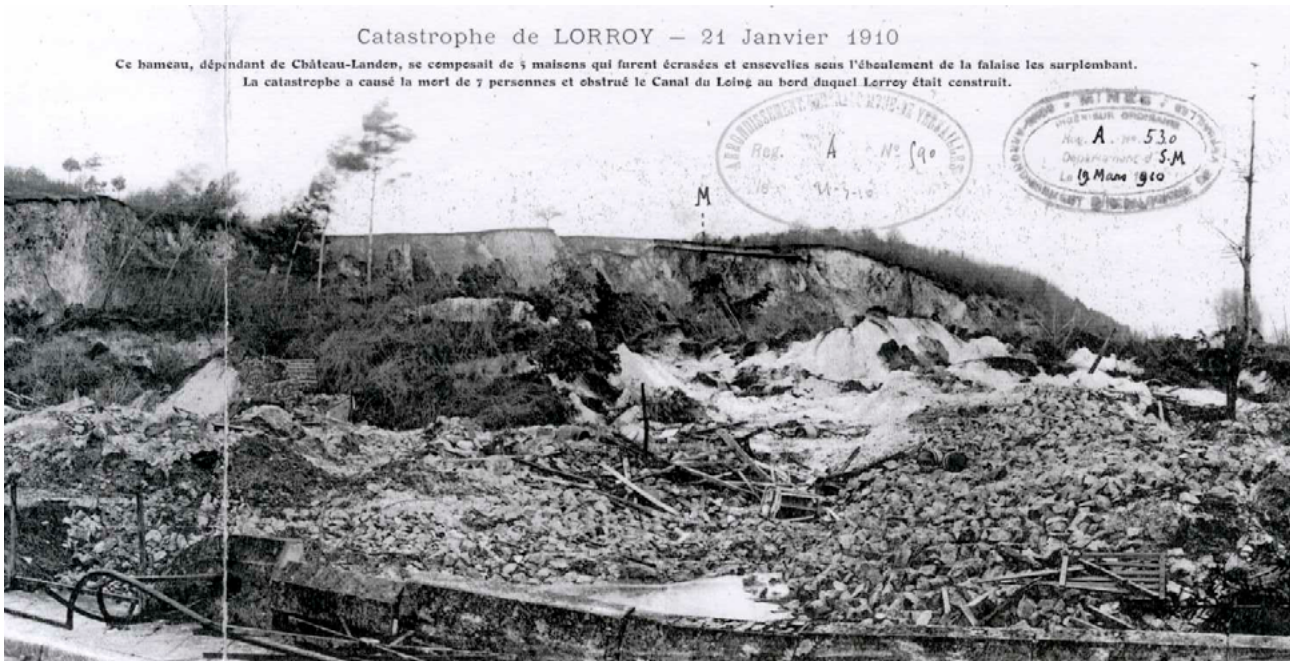
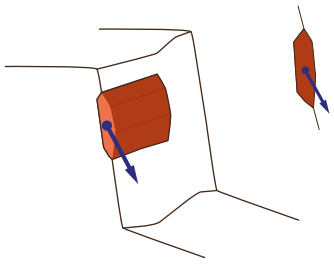
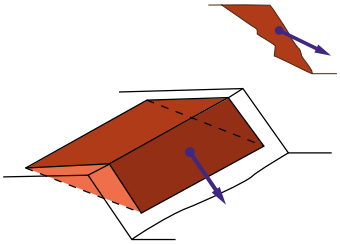
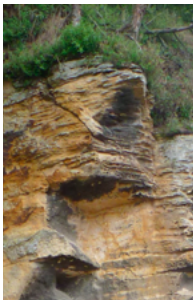
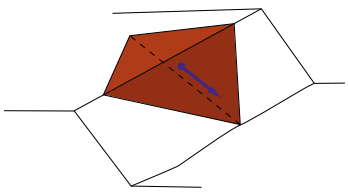
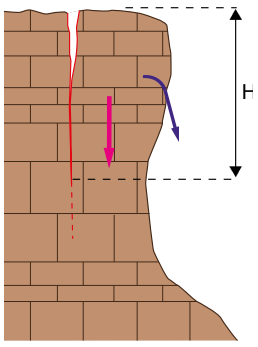
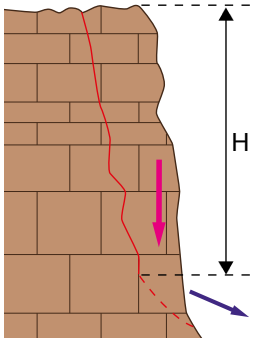
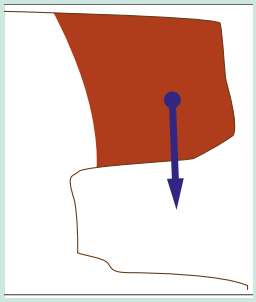
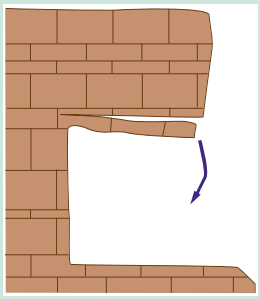
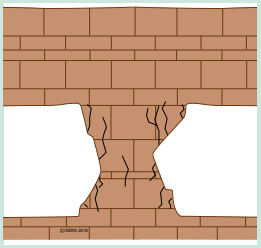


Figure 18 : éboulement de terrain de Château-Landon (77) – Carte postale (Source : archives départementales)

Tableau 3 : mécanismes d'instabilités des versants sous-cavés et indices d'évolution (la première partie du tableau sur fond blanc s'applique au versant et la deuxième partie du tableau sur fond vert s'applique à la cavité) (Source : Ineris et Cerema).

Instabilités	Configuration	Processus	Indices d'évolution et signes précurseurs
Dégradations superficielles	 	Décollement et rupture de petits fragments de roche, occasionnant des chutes de pierres liées à l'altération de la roche par les venues d'eau, le gel...	Écaillage, délitage...
Glissement plan	 	Mouvement de translation sur une discontinuité plane avec rupture lorsque les forces motrices dépassent la résistance au cisaillement des discontinuités.	Ouvertures de fissures « arrières ».
Glissement dièdre	 	Mouvement de translation combinée sur deux discontinuités formant un dièdre, avec rupture lorsque les forces motrices dépassent la résistance au cisaillement des discontinuités.	Ouvertures de fissures arrières et latérales.

Instabilités	Configuration	Processus	Indices d'évolution et signes précurseurs
Basculement de bloc, déversement	 	Processus progressif de déplacement d'une colonne, sous l'effet de la gravité et d'une chute de résistance du pied.	Ouvertures de fissures arrières et latérales. Fissuration de la base, écaillage coté vide. Déformation d'ensemble.
Rupture de pied de colonne	 	Rupture avec glissement vers l'extérieur de la base d'une colonne.	Ouvertures de fissures arrières.
Rupture de surplomb	 	Rupture par traction et cisaillement d'une masse rocheuse en surplomb.	Peu perceptible à l'examen visuel. Fracture de décompression active.

Instabilités	Configuration	Processus	Indices d'évolution et signes précurseurs
Décollement de dalle de toit (rupture en traction)	 	Décollement de bancs stratigraphiques du toit, suivi à plus ou moins long terme par une chute de la première dalle du toit.	Indice de décollement, fléchissement des bancs.
Rupture en compression d'un pilier	 	Écrasement par excès de contrainte : pilier soumis à une charge excédant la résistance à la compression du matériau le constituant.	Dégradation du pilier (écaillage, fissures, forme de diabolo…), rupture brutale.

4 RECENSEMENT ET TRAITEMENT DES DONNÉES NÉCESSAIRES À LA CARACTÉRISATION DE L'ALÉA VERSANT ROCHEUX SOUS-CAVÉ

4.1. Type d'étude possible et périmètre pertinent

Le niveau d'étude, qui conditionne le niveau de détails des données analysées ainsi que l'échelle du travail, est fixé en fonction de la demande initiale. Il est donc important de vérifier l'adéquation entre l'objectif de l'étude et le rendu cartographique (échelle de restitution retenue) du document final.

Le support de restitution de l'aléa peut être par exemple le SCAN25® ou la BD ORTHO® de l'IGN, un plan topographique, voire le cadastre ou une photographie aérienne. Le choix du support est ainsi conditionné par le cahier des charges, qui doit décrire précisément l'objectif, le contenu de l'étude et les résultats attendus (en termes notamment d'échelle de restitution).

Les types d'étude possibles et leurs périmètres sont décrits ci-dessous, des plus généraux aux plus détaillés :

1/ une cartographie informative à l'échelle du département ou pluri-communale (échelles allant de 1/10 000 à 1/25 000) qui peut alimenter le DDRM (dossier départemental sur les risques majeurs) ainsi que les documents de planification territoriale de bassins de vie (regroupant plusieurs communes) tel que le SCOT (schéma de cohérence territorial) ;

2/ l'étude d'aléa à l'échelle d'une commune (voire d'un quartier de commune) ou de quelques communes (bassin de risque) sera rendue à des échelles pouvant varier entre 1/1000 (sur les secteurs urbanisés) à 1/10 000. Elle peut servir de base aux documents réglementaires ou de planification : le PPRn (plan de prévention des risques naturels), le DICRIM (document d'information communal sur les risques majeurs), le PAC (porter à connaissance), le PLU (plan local d'urbanisme) et la CC (carte communale) ; cette étude d'aléa peut être utilisée également pour l'instruction des autorisations d'urbanisme (permis de construire notamment), en conformité avec le RNU (règlement national d'urbanisme) ;

3/ l'étude de projet à la parcelle (échelles allant de 1/500 à 1/1 000) peut être demandée par un PPRn ou une étude particulière. Elle est réalisée lorsqu'un propriétaire ou une commune souhaite connaître le risque pour les biens et les personnes exposés, ou lorsqu'un aménageur souhaite apprécier la faisabilité et les possibilités d'adaptation de son projet au phénomène naturel. Cette étude vise à évaluer le risque généré par le versant rocheux sous-cavé et à proposer des mesures techniques de mise en sécurité de l'existant ou du projet.

Plus l'étude sera précise, plus les moyens mis en œuvre seront importants, notamment pour la phase de collecte des données (cf. § 4.2).

La méthodologie d'évaluation de l'aléa développée dans ce présent document ne s'applique qu'à une étude d'aléa à l'échelle d'une commune ou de quelques communes (point 2 ci-avant). Cependant, les principes développés dans la méthodologie pourront être utilisés pour d'autres types d'étude.

4.2. Données de base nécessaires pour déterminer l'aléa

La phase de recherche de données, également appelée « phase informative », a pour objectif de collecter l'ensemble des informations disponibles. Elle comprend l'analyse historique, la synthèse des données physiques du site (topographie, géologie, hydrogéologie, géométrie, végétation, données climatiques, mécanismes d'évolution des versants et des cavités souterraines, etc.), le recueil et l'analyse de nouvelles données (par des reconnaissances de terrain, de la photo-interprétation, des enquêtes, des investigations spécifiques, etc.) et leur exploitation et synthèse. Cette phase est indispensable car elle regroupe l'ensemble des éléments qui permettront de définir et justifier le type de phénomène attendu, son intensité, sa prédisposition et finalement le niveau d'aléa. La phase informative demande donc du temps et des compétences spécifiques (géologue, géographe, photo-interprète, etc.) pour obtenir un maximum de données pertinentes et utilisables.

4.2.1. Collecte et analyse des données existantes

Aucune source d'information ne doit être négligée, même si certaines seront consultées en priorité car elles apportent généralement plus d'informations. Comme souligné dans la partie 2.2, il n'existe pas de base de données spécifique au versant sous-cavé. Il faudra donc croiser les données de versants avec celles de cavités souterraines.

Pour obtenir ces informations, il sera généralement nécessaire de s'appuyer sur :

- les inventaires locaux existants, le DDRM (dossier départemental sur les risques majeurs), les archives de la DDTM (direction départementale des Territoires et de la Mer) et/ou de la DREAL (direction régionale de l'écologie, de l'aménagement et du logement) ;
- les archives départementales (cartes postales anciennes (Figure 20, voir p. 30), monographies, plans anciens de carrières[8], anciens cadastres, etc.)

8 - Il est à noter que les plans anciens de cavités souterraines ne correspondent pas toujours à l'extension actuelle de la cavité. Il est donc conseillé de vérifier l'emprise cartographique de la cavité souterraine si cela est possible (cavité accessible, rapport d'études…).

- les services communaux (les inventaires existants, le DICRIM (dossier d'information communal sur les risques majeurs) ;
- les inventaires nationaux (l'inventaire national cavités et l'inventaire des événements historiques relatifs aux mouvements de terrain (dont les effondrements)), la liste des arrêtés de catastrophes naturelles par commune et par type d'aléa (il faut ensuite s'adresser à la préfecture ou aux communes concernées pour obtenir le dossier complet) sont disponibles sur le site www.georisques.gouv.fr/ ;
- les services spécialisés pouvant exister dans certains départements et communes comme les inspections générales des carrières de Paris et de Versailles, les services spécifiques de Gironde, le syndicat intercommunal Cavités 37, l'inspection des carrières de la ville de Laon, etc. ;
- les organismes spécialisés (Cerema, Ineris, BRGM) qui peuvent posséder des archives (cartes et rapports d'étude) ;
- la presse locale (recherche de compte-rendus d'accidents dans leurs archives) ;
- les associations de sociétés savantes, de spéléologues ou d'histoire du patrimoine : elles sont amenées à réaliser des photos, des levés de souterrains et elles ont généralement une bonne connaissance du contexte local ;
- le site internet www.infoterre.brgm.fr/ du BRGM qui permet la consultation de cartes géologiques et des notices correspondantes : de précieux renseignements sur la géologie, la tectonique, les terrains de recouvrement, les nappes souterraines de la zone sont ainsi disponibles ;
- les sites internet www.cadastre.gouv.fr/ et www.geoportail.gouv.fr/ permettent dans certains cas de connaitre la position des entrées des cavités ;
- les applications sur internet (comme Google Street, Google Maps, Google Earth) permettent une première approche du site grâce aux photographies aériennes.

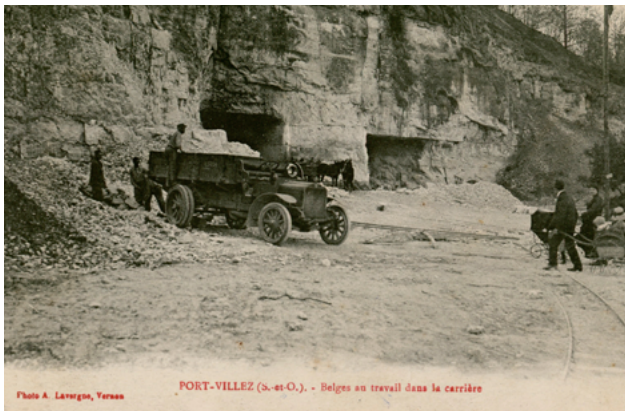


Figure 20 : exemple de carte postale ancienne trouvée dans les archives départementales

Les données géologiques et hydrologiques vont apporter des éléments sur la nature des terrains constituant le versant et les circulations d'eau souterraine.

Les données historiques vont renseigner sur l'évolution du site au cours du temps, les désordres, les modalités d'extraction des matériaux de la cavité si elle est d'origine anthropique (plan d'exploitation, incidents éventuels, effondrements, chutes de blocs…) et les éventuels travaux de consolidation effectués.

Les données issues de la cartographie donnent des indications sur le relief (cartes topographiques et cartes des pentes), la localisation du versant et des secteurs sous-cavés par rapport aux emprises foncières (plan cadastraux).

Si elles existent, il est possible d'utiliser les caractéristiques géomécaniques du massif : les résultats d'essais mécaniques provenant d'études antérieures et issus du même contexte (géologie, géométrie et environnement identiques) peuvent être retenus mais leur utilisation devra être justifiée (avis d'expert, impossibilité de prélèvement sur la zone, matériaux remobilisés, etc.).

Enfin, les enquêtes sur site, qui peuvent être initiées voire réalisées lors de la phase de collecte de données existantes, sont l'occasion de recueillir des informations auprès des populations locales. Les « sachants » locaux (« Anciens », riverains, occupants des terrains…) connaissent généralement bien leur environnement de vie et peuvent fournir des renseignements oraux, voire d'anciens plans ou documents non disponibles dans les archives publiques. Dans le cas des secteurs urbanisés avec des terrains privatifs en pied de coteau, ces visites sont aussi l'occasion de repérer les zones complexes où il peut y avoir « co-propriété » d'un versant rocheux sous-cavé et de rencontrer les populations exposées pour leur expliquer l'importance de la prise en compte du risque et l'intérêt de favoriser l'accès des experts à leur parcelle [17].

4.2.2. Acquisition et analyse de nouvelles données

4.2.2.1. La photo-interprétation

Une étude de photo-interprétation (stéréoscopie sur photographies aériennes de campagnes IGN établies à plusieurs époques et, éventuellement, de missions aériennes spécifiques) peut être, suivant les contextes, réalisée pour repérer des indices utiles à l'analyse (anciens désordres, effondrements, évolution de la crête du versant, modifications de l'environnement…). Mais dans certains cas, comme par exemple dans les zones boisées ou fortement urbanisées, peu d'informations pourront être tirées de la photo-interprétation. Les références des photographies aériennes disponibles à l'achat sont consultables sur le site internet de l'IGN et, pour les plus anciens clichés, à la photothèque de Saint-Mandé ou sur le site internet de l'IGN « Remonter le temps » (https://remonterletemps.ign.fr/).

4.2.2.2. Les données de terrain

Il est aussi indispensable d'effectuer une reconnaissance approfondie du site d'étude, lorsque l'accessibilité et les conditions de sécurité l'autorisent. La reconnaissance en surface, qui peut avoir, suivant le niveau d'étude retenu, été initiée lors de la phase de recueil des données existantes, permet de recenser et caractériser les traces de mouvements de terrain passés, localiser les accès aux cavités et mettre en évidence l'existence de facteurs aggravants (écoulements d'eau, végétation…). Toutes ces informations nécessitent d'être localisées précisément (utilisation d'un système GPS recommandée). L'inspection en souterrain donne pour sa part des informations essentielles sur la configuration des vides (extension, mode d'extraction, état…), les phénomènes d'instabilité naissants, la présence d'eau dans les galeries, etc.

Ces inspections permettent aussi de préciser la nature des critères géologiques ou hydrogéologiques importants pour l'analyse des mécanismes : la lithologie, le contexte structural, la morphologie du site (cf. 3.3.1), la nature et la densité du couvert végétal, etc. D'une manière générale, les facteurs d'instabilité décrits dans la partie 3.3 devront particulièrement être recherchés et relevés sur le terrain. Il est aussi intéressant de noter les enjeux majeurs présents sur le site. À titre d'illustration, des fiches de terrain sont présentées en annexe : la première partie de la fiche permet de relever les données de terrain (la deuxième partie de la fiche applique la méthodologie développée dans la partie 5).

Pour certaines études spécifiques, des outils complémentaires peuvent être utilisés au cours de l'inspection de terrain, en plus de l'examen visuel :

- pour obtenir un plan de la cavité et du versant et localiser les instabilités :
  - le scanner laser 3D ou lidar : il permet de numériser un versant et la cavité souterraine attenante pour déterminer l'enveloppe du site sous-cavé (si le plan n'est pas disponible), de repérer les grandes directions de fracturation, le niveau d'interaction possible entre des instabilités en souterrain et en surface et, le cas échéant, de suivre dans le temps l'évolution du versant et de la cavité (Figure 21) ;
  - la photogrammétrie est aussi un outil de levé précieux et rapide pour la cavité et le versant (visualisation de cassures récentes de matériaux et des racines, visualisation de l'étendue et la continuité horizontale et verticale des fractures…). Il est toutefois moins bien adapté au milieu souterrain ;
  - le levé par des géologues (boussole, lasermètre) ou géomètres qui donne une première approche de la géométrie en 2D.
- pour déterminer les propriétés du massif (résistance à la compression, cohésion, angle de frottement…), lorsque les résultats issus de la bibliographie semblent insuffisants ou non adaptés : des essais en laboratoire et *in situ* (échantillons prélevés sur le site par carottage, sondage…) ;
- pour déterminer la stabilité d'une entrée en cavage ou d'un surplomb : des outils de calcul.

Ces études spécifiques correspondent par exemple au cas d'un diagnostic de stabilité ponctuel tel que décrit au point 3 du paragraphe 4.1. Cependant, si ces données existent et sont accessibles, elles pourront être utilisées dans la phase informative et serviront à qualifier l'aléa.



Figure 21 : exemple de scanner laser 3D d'une falaise sous-cavée, à gauche la photographie et à droite le résultat d'un levé par scanner 3D (Source : Ineris)

4.2.3. Restitution cartographique

La carte informative est un outil de compréhension et de communication important : elle doit être synthétique, mais recenser néanmoins l'ensemble des informations qui sont utiles à la démarche d'identification et d'évaluation des aléas et à l'explication de cette démarche. Elle doit aussi être adaptée à son échelle (Figure 22).

La carte informative doit faire clairement ressortir les éléments essentiels à l'évaluation de l'aléa (instabilités en souterrain et en surface, désordres passés, données géologiques et géotechniques, plans d'exploitation, etc.). Elle doit être accompagnée de plusieurs tableaux de données : un traçant l'origine des diverses informations et leur niveau de fiabilité, un autre les dates des désordres et les emplacements exacts lorsqu'ils sont connus, etc.

L'utilisation d'un fond ortho-photo constitue une bonne base pour indiquer l'ensemble des informations : plus le positionnement des données sera précis (entrée en cavage, limite du front de falaise, emprise des désordres, etc.), plus l'établissement du zonage sera de qualité et reconnu par la population exposée. Lors des reconnaissances de terrain, l'utilisation d'un GPS, de précision adaptée à l'échelle de restitution de la carte, est fortement conseillée. Le fonds cartographique est bien souvent constitué par un plan cadastral, notamment au cœur des agglomérations. Le front rocheux (ou la crête du versant) n'y est pas nettement indiqué ou correspond parfois à tort aux limites de parcelles. En revanche, certaines entrées en galeries sont parfois notées en pointillés. Il est alors indispensable de bien souligner ces éléments topographiques qui vont se répercuter sur la position des ouvrages et à terme sur le zonage d'aléa.

Si des plans de cavités souterraines sont disponibles, il sera nécessaire de les caler avec le fond cartographique utilisé pour la carte informative. Il faudra donc identifier des éléments de calage communs entre le souterrain et les plans d'archive retrouvés (anciennes entrées, éléments de surface reportés sur le plan d'exploitation, etc.) pour superposer au mieux les fonds cartographiques et déterminer une incertitude de calage.

Le choix de l'échelle doit être un compromis entre le niveau d'étude demandé (cf. § 4.1), la précision des données et les supports cartographiques disponibles sur la zone et compatibles avec des systèmes d'information géographique (SIG).

Pour obtenir d'autres informations sur la phase informative, le lecteur se reportera aux documents suivants : le *Guide pratique Versants rocheux : phénomènes, aléas, risques et méthodes de gestion* [17], le *Guide méthodologique – Diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées* [10] et le *Guide technique – Études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux* [12].

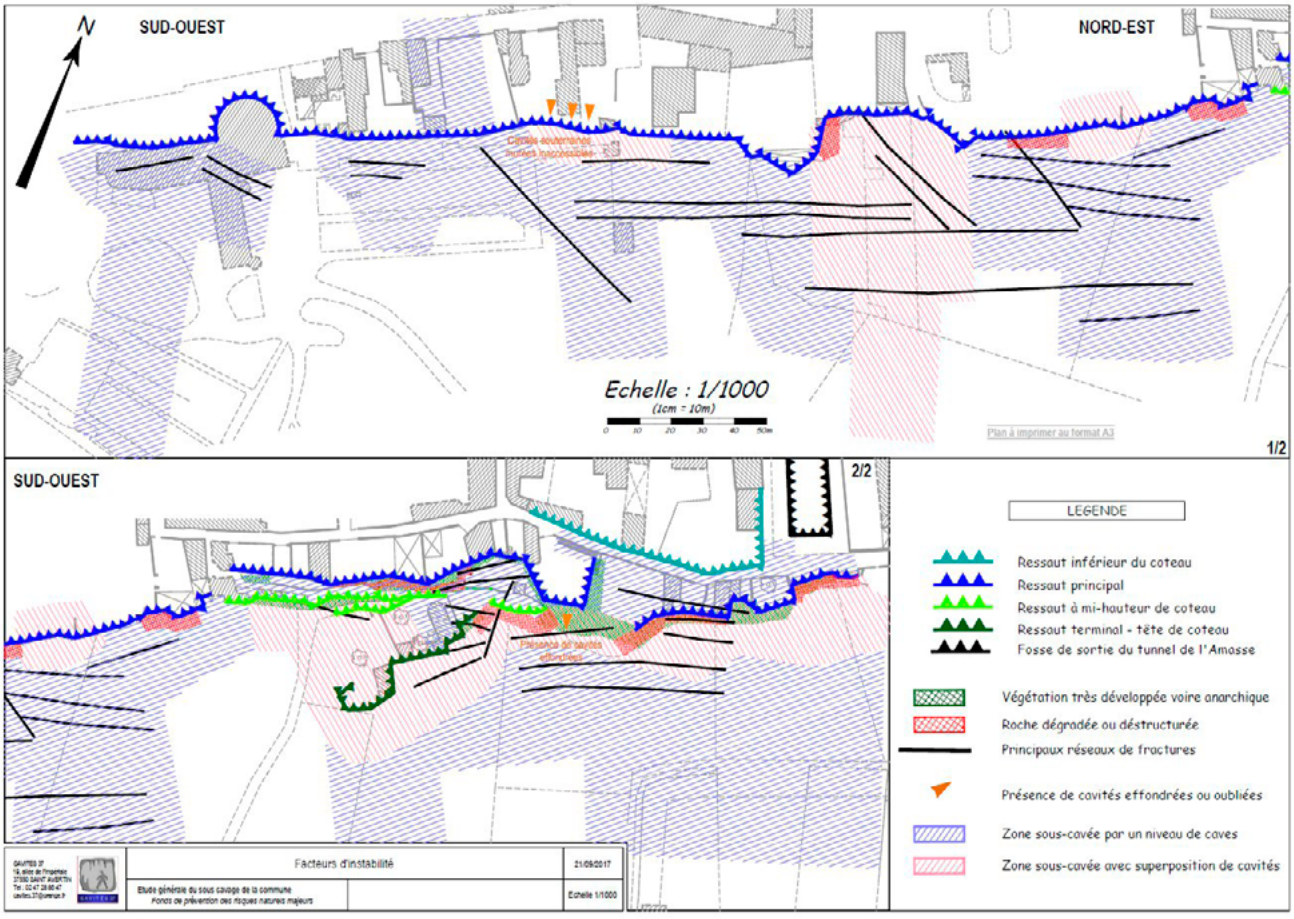


Figure 22 : exemple de carte informative (Source : Cavités 37)

5 ÉVALUATION DE L'ALÉA VERSANT ROCHEUX SOUS-CAVÉ

De manière générale, un aléa se définit comme le croisement entre la prédisposition du site aux instabilités et l'intensité potentielle de ces 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 (cf. § 3.3.1.2), 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 (M_1 et M_2) des deux aléas se recoupent (Figure 23).

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 M_1 et M_2 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…) [5].

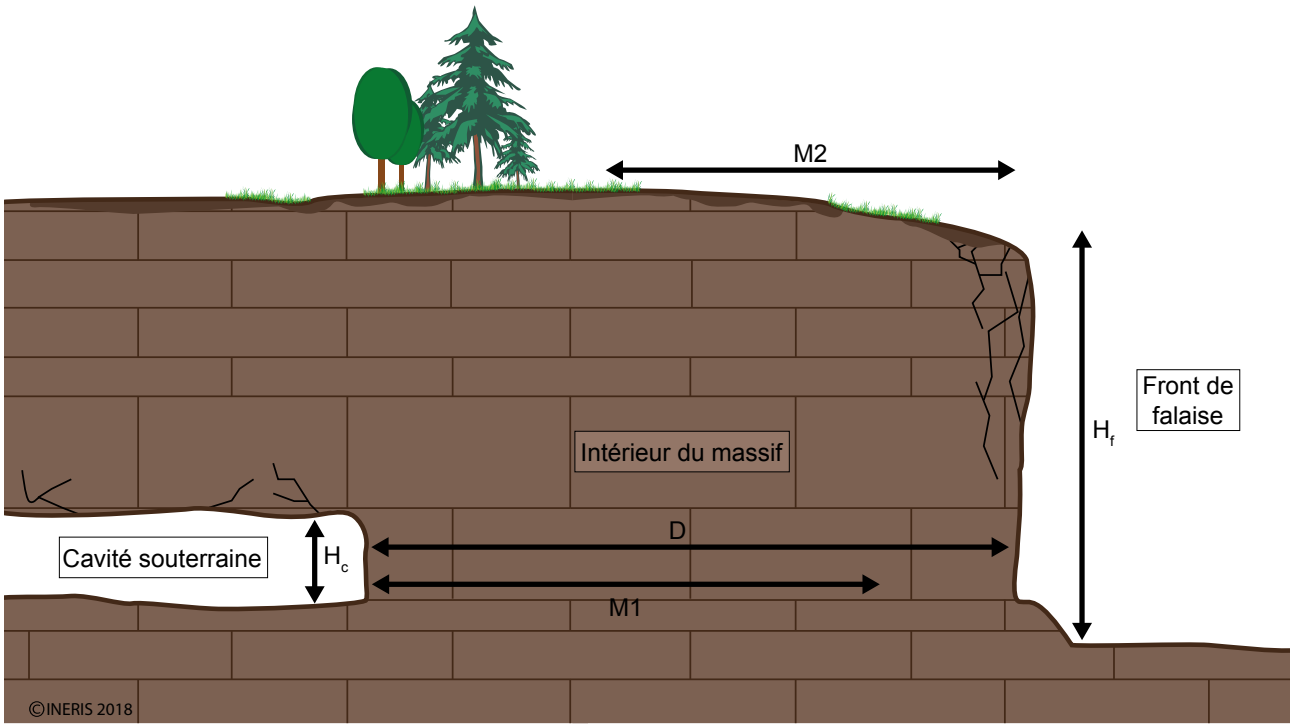


Figure 23 : représentation schématique des marges d'influence dans un massif avec un front de falaise et une cavité souterraine

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. Trois cas de figure peuvent être alors envisagés (Figure 24) :

- le cas 1 où D = 0 : l'entrée du vide souterrain se fait en cavage. Un aléa de type versant rocheux sous-cavé est pris en compte dans la zone d'interaction M_1 et M_2 (zone violette de la Figure 24) ;
- le cas 2 où D ≠ 0 et D< M_1+M_2 : une cavité est proche du versant sans que cela soit visible de l'extérieur. Un aléa de type versant rocheux sous-cavé doit être considéré dans la zone d'interaction M_1 et M_2 (zone violette de la Figure 24) ;
- le cas 3 où D ≠ 0 et D> M_1+M_2 : un aléa de type versant rocheux sous-cavé n'est pas à prendre en compte.

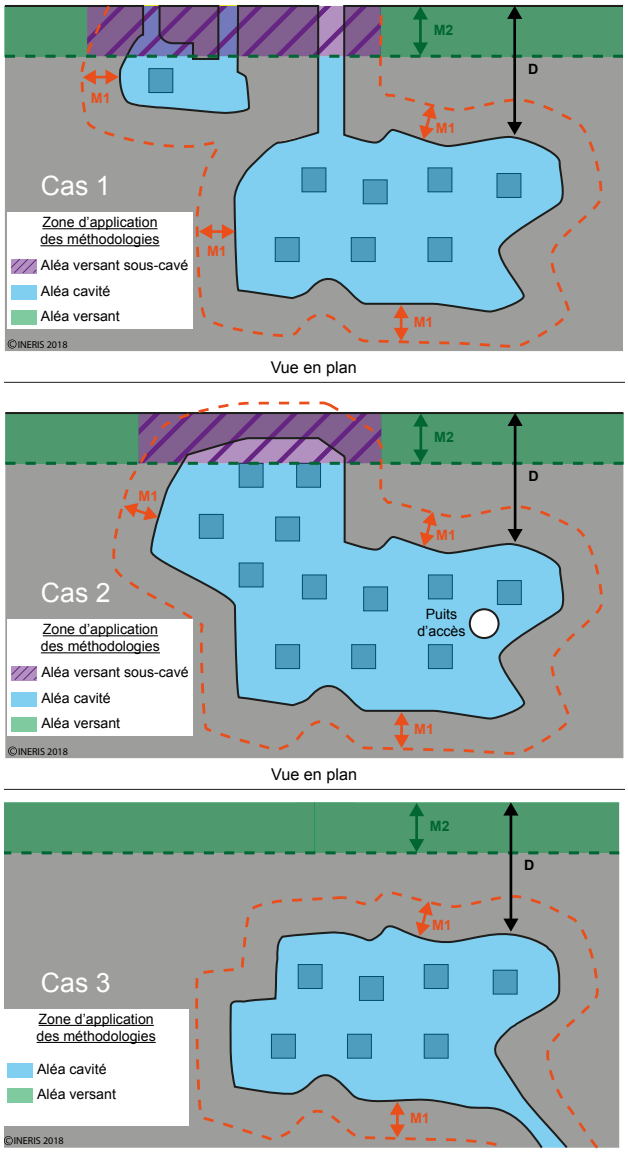


Figure 24 : représentation schématique des trois cas envisagés selon la valeur de la distance front-cavité et zone d'application des méthodologies (vue en plan)

5.1. Caractérisation de l'intensité de l'aléa

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 (pierre, bloc, masse), celle-ci traduisant la capacité destructrice du phénomène.

Ainsi, les critères physiques que sont le volume et la hauteur de chute ont été considérés. La caractérisation de l'intensité va donc reposer sur les critères suivants (Tableau 5, voir p. 36) :

- **la hauteur des éléments instables observables sur le front :**
  - inférieure à 5 m ;
  - comprise entre 5 et 10 m ;
  - comprise entre 10 et 15 m ;
  - supérieure à 15 m.
- **le volume des éléments instables observables sur le front :**
  - pas d'élément instable visible (visibilité du versant mais aucune instabilité constatée) ;
  - pierres et petits blocs (< à 1 dm^3) ;
  - blocs (1 dm^3 à 1 m^3) ;
  - gros blocs (1 m^3 à 10 m^3) ;
  - masses (> 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 deux 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 (Figure 25).

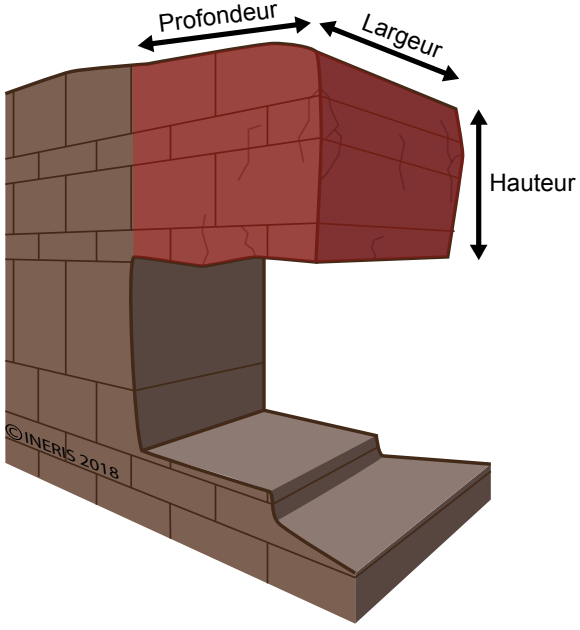


Figure 25 : représentation schématique du volume de matériaux mobilisables

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. À partir de la valeur calculée, l'opérateur devra évaluer si ce volume est faible, moyen ou important.

Dans le second cas où toutes les dimensions de la cavité ne sont pas connues, le volume de matériaux mobilisables est estimé en calculant le ratio entre la hauteur de la cavité (H_c)[9] et la hauteur entre le plancher de la cavité et le sommet du front (H_m)[10] (Figure 26).

Le tableau suivant (Tableau 4) 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 4 : évaluation qualitative du critère « volume estimé de matériaux mobilisables »

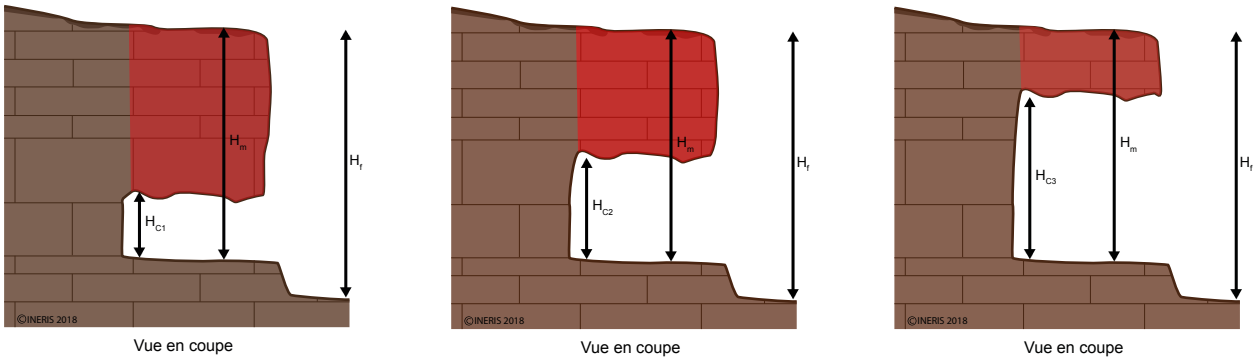
Rapport H_c/H_m	Volume estimé de matériaux mobilisables
Supérieur à 2/3	Faible
Entre 2/3 et 1/3	Moyen
Inférieur à 1/3	Important

Dans le cas où une cavité est proche du versant sans que cela soit visible de l'extérieur (Figure 24, cas 2), le volume de matériaux mobilisables prend en compte les matériaux de recouvrement mais aussi les matériaux entre la cavité et le versant, potentiellement mobilisables. Si les dimensions de la cavité ne sont pas connues, le volume est estimé par défaut à important, le rapport H_c/H_m n'étant pas calculable.

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.

La caractérisation de l'intensité résulte du croisement de ces différents critères selon le Tableau 5 (voir page suivante). 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.

Les valeurs d'intensité du Tableau 5 pourront être adaptées au cas par cas à l'issu de la phase de collecte des données en justifiant les choix réalisés (évènements de référence par exemple). Le Tableau 5 est donné de façon indicative.



$$H_{C1} / H_m < H_{C2} / H_m < H_{C3} / H_m$$

Matériaux mobilisables 1 > Matériaux mobilisables 2 > Matériaux mobilisables 3

Volume 1 > Volume 2 > Volume 3

Volume important > Volume moyen > Volume faible

Figure 26 : présentation de trois cas de figure pour illustrer le volume des matériaux mobilisables

9 - Si la cavité est de hauteur variable, la hauteur minimale sera prise.
10 - Il est à noter que H_m est égale à H_f si la cavité se trouve à la base du versant.

Tableau 5 : 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 (<dm³)	Blocs (de 1 dm³ à 1 m³)	Gros blocs (de 1 m³ à 10m³)	Masse (> 10m³)	**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	Élevée	
	10-15m	Limitée	Limitée	Modérée	Élevée	Élevée	Moyen
	+ 15m	Limitée	Modérée	Élevée	Élevée	Élevée	Important

Considérons un exemple pour illustrer le principe du Tableau 5. Il s'agit d'un versant avec :

1. des éléments instables (pierres) présents à 4 m de hauteur. L'intensité obtenue est très limitée.
2. la hauteur totale du versant est de 10 m et la cavité, située à la base du versant, fait 2 m de hauteur. Le ratio H_c/H_m est de 0,2. Le volume de matériaux mobilisables est important d'après le Tableau 4.
3. l'intensité passe à modérée.

Prenons un autre exemple : pour un versant avec des éléments instables (gros blocs) présents à 11 m de hauteur, l'intensité est élevée. Si la hauteur H_m est de 12 m et la hauteur de la cavité de 8 m, le ratio H_c/H_m est de 0,7. Dans ce cas-là, le volume de matériaux mobilisables est faible d'après le Tableau 4. L'intensité ne diminue pas mais reste élevée.

Dans le cas où la caractérisation du versant et/ou de la cavité du site est impossible (bâti accolé, végétation trop dense, accès à la parcelle impossible…), l'intensité est présumée et extrapolée sur la base des observations des parcelles encadrant le site. Dans le cas où aucune donnée n'est disponible et observable, une intensité élevée sera choisie par défaut.

5.2. Caractérisation de la probabilité d'occurrence de l'aléa

La détermination de la probabilité d'occurrence de mouvements de terrain renvoie au problème de la prévision dans le temps de la rupture des massifs rocheux. Si une approche probabiliste semble adaptée aux séismes et aux inondations qui restent des phénomènes récurrents, les mouvements de terrain sont, au contraire, des phénomènes non périodiques qui évoluent de manière quasi imperceptible durant de longues périodes avant de subir une accélération soudaine. Ils sont donc très difficilement prévisibles. Plutôt que d'estimer une probabilité d'occurrence correspondant à une période de retour donnée (annuelle, décennale, centennale…), qui laisserait une grande place à la subjectivité et à l'incertitude, l'approche de ce concept est menée en termes de prédisposition du site vis-à-vis de la rupture. À ce titre, 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** ;
- **l'influence des cavités** (état de stabilité et volume des vides)

5.2.1. 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 :** elles correspondent, par exemple, à la fraîcheur des faces de blocs en paroi, la présence d'éboulis récents, des déplacements de blocs, des écaillages superficiels, l'apparition de crevasses, etc. ;
- **les traces mécaniques :** elles correspondent à l'apparition ou à l'évolution manifeste d'une fracturation d'ordre mécanique ou à l'ouverture de fissures préexistantes dans le massif rocheux ;
- **les atteintes aux infrastructures ou à l'environnement :** elles peuvent s'évaluer à partir des fissures ou des ruptures de clôtures, de murets ou de murs, de poteaux de tous types, des affaissements de sols, de chemins, des dégradations mécaniques sur le bâti ou des atteintes sur l'environnement comme le basculement d'arbres et la désorganisation de réseaux.

Tableau 6 : classes d'activité d'un front rocheux (d'après [6])

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.

Le tableau 6 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.

5.2.2. Facteurs aggravants

Les instabilités de versant rocheux résultent de la combinaison d'une ou plusieurs configurations défavorables (facteurs internes) et de l'occurrence des facteurs externes (facteurs aggravants ou déclenchants) susceptibles de modifier les conditions d'équilibre du milieu et d'accélérer la rupture (cf § 3.3). Ceux-ci peuvent être naturels ou anthropiques.

Les facteurs aggravants ont été décrits précédemment (cf § 3.3.2). Selon la nature des facteurs et leur association, ils favorisent de manière plus ou moins importante la déstabilisation. Le Tableau 7 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 probabilité d'occurrence est majorée.

Tableau 7 : 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

5.2.3. État de stabilité et volume de la cavité

L'occurrence du phénomène va dépendre enfin de l'état de stabilité de la cavité croisé avec son volume (appelé « volume de vide »).

Parmi les approches possibles[11], 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, plus la cavité est instable, plus l'occurrence du phénomène est considérée élevée.

11 - Le lecteur pourra se référer au *Guide méthodologique – Plan de prévention des risques naturels – Cavités souterraines abandonnés* [18], le *Guide méthodologique – Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées* [10] ou encore le rapport *Impact du changement climatique sur la stabilité des cavités souterraines* [1] pour avoir une vision plus détaillée des instabilités liées aux cavités souterraines.

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. À partir de la valeur calculée, l'opérateur devra évaluer si ce volume est faible, moyen ou important (Figure 27).

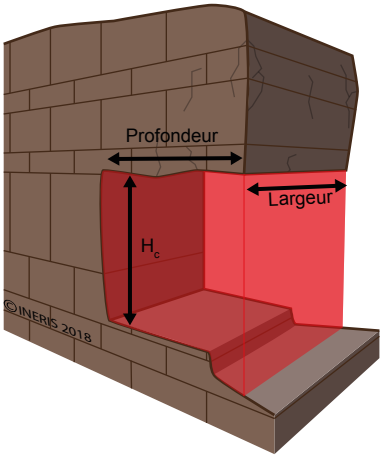


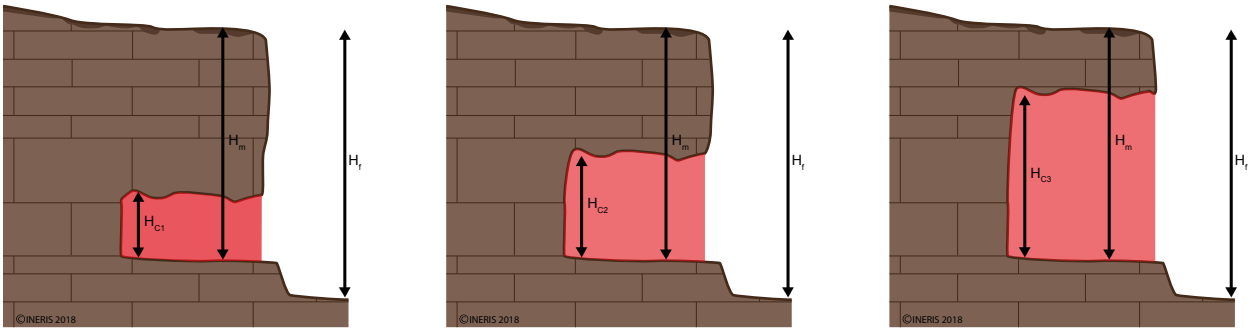
Figure 27 : représentation schématique du volume des vides

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)[12] et la hauteur maximale du front (H_f) (Figure 28). Le Tableau 8 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.

Tableau 8 : évaluation 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

Dans le cas où une cavité est proche du versant sans que cela soit visible de l'extérieur (Figure 24, cas 2) et que les dimensions de la cavité sont inconnues, le rapport H_c/H_f n'est pas calculable. Le volume de vide est estimé comme important pour se placer du côté de la sécurité.



$$H_{C1} / H_f < H_{C2} / H_f < H_{C3} / H_f$$

Volume des vides 1 < Volume des vides 2 < Volume des vides 3

Volume 1 < Volume 2 < Volume 3

Volume faible < Volume moyen < Volume important

Figure 28 : présentation de trois cas de figure pour illustrer le volume des vides

12 - Si la hauteur de la cavité est variable, la hauteur maximale sera considérée.

Il est alors proposé de croiser l'état de stabilité de la carrière avec le volume de vide pour obtenir quatre niveaux traduisant l'influence de la cavité sur la prédisposition à la rupture, selon le Tableau 9.

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.

Si les cavités ne sont pas accessibles pour établir le diagnostic ou s'il y a présomption de présence de vide sans moyen de le vérifier, la détermination de leur état de stabilité se basera sur l'état des cavités voisines ainsi que les informations historiques et techniques (cf § 4.2).

La caractérisation de la prédisposition résulte du croisement de ces différents critères selon le Tableau 10. 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.

Pour illustrer le principe du Tableau 10, prenons l'exemple suivant :

1. un massif peu actif avec la présence d'eau (niveau 2) : le niveau de prédisposition est sensible ;
2. le massif possède une cavité instable avec un volume de vide moyen : l'influence de la cavité est de niveau moyen d'après le Tableau 9 ;
3. la prédisposition augmente et passe à très sensible.

Si la cavité avait été stable avec un volume faible, l'influence de la cavité aurait été très faible d'après le Tableau 9. La prédisposition aurait conservé son niveau sensible et n'aurait pas été diminuée à peu sensible.

De la même façon que pour l'intensité, dans le cas où la caractérisation du versant et/ou de la cavité du site est impossible (bâti accolé, végétation trop dense, accès à la parcelle impossible…), la prédisposition est présumée et extrapolée sur la base des observations des parcelles encadrant le site. Dans le cas où aucune donnée n'est disponible et observable, une prédisposition de niveau très sensible sera choisie par défaut.

Tableau 9 : croisement de l'état de stabilité de la cavité avec le volume des vides

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

Tableau 10 : 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	1 Sensible	Sensible	Faible
	Frais	Sensible 3	Très sensible	Très sensible	Moyen 2
	Actif	Très sensible	Très sensible	Très sensible	Elevée

5.3. Caractérisation de l'aléa

Comme indiqué en introduction de ce chapitre, l'aléa résulte du croisement de l'intensité et de la prédisposition de ce phénomène, ces deux critères ayant été définis ci-dessus.

Quatre classes d'aléas sont à distinguer :

- aléa faible ;
- aléa moyen ;
- aléa fort ;
- aléa très fort.

Dans une démarche de cartographie de PPR, l'aléa de référence correspond à l'événement historique connu le plus important dans le site étudié, sauf si l'analyse du site conduit à considérer comme vraisemblable à échéance centennale un événement potentiel pertinent d'une ampleur encore plus grande. Et inversement, si l'événement historique est considéré comme exceptionnel (l'effondrement catastrophique de Château-Landon par exemple), un événement de moindre ampleur peut être choisi comme aléa de référence. Cet aléa de référence correspondra au niveau d'aléa le plus élevé sur le site [16].

Pour des études ne rentrant pas dans une démarche de cartographie PPR, la définition d'un aléa de référence n'est pas nécessaire.

Ces classes d'aléa sont définies selon le tableau de croisement (Tableau 11), le niveau d'aléa s'accroissant avec les niveaux d'intensité et de prédisposition.

Tableau 11 : 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

5.4. Définition de l'extension de la zone d'aléa

Le zonage de l'aléa va présenter deux marges d'extension :

- une en crête du versant rocheux susceptible d'être emportée par l'effondrement (zone de recul) ;
- une en pied du versant rocheux susceptible d'être touchée par l'éboulement (zone d'épandage).

Ces deux zones d'extension se verront affectées du même aléa que celui estimé sur le front.

Les quatre configurations définies dans la partie 3.2 sont à distinguer pour déterminer l'extension de l'aléa amont et aval (Figure 29).

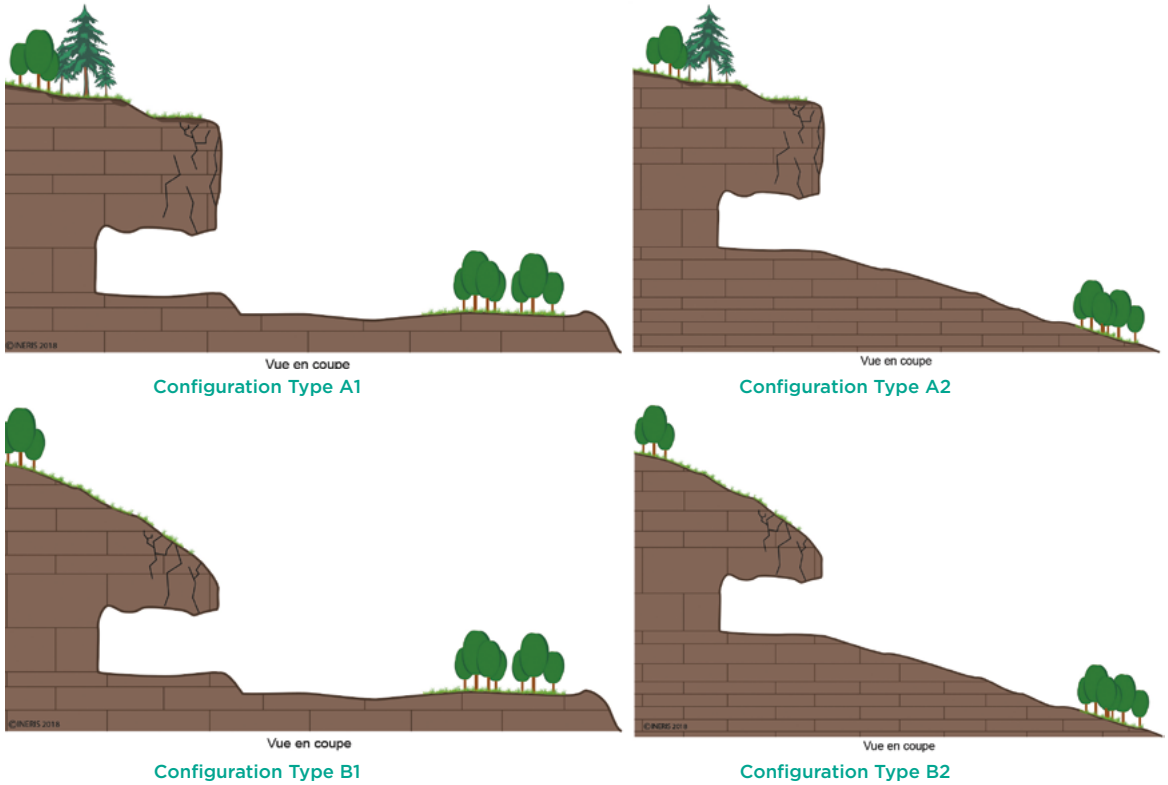


Figure 29 : rappel des quatre configurations de versant sous-cavé définies (falaise sous-cavée type A, coteau sous-cavé type B)

5.4.1. Définition de la zone de recul

En tête de falaise, la **zone de recul** va directement dépendre du volume des blocs instables pour les instabilités localisées.

Dans le cas des configurations de type A (falaise sous-cavée), pour une instabilité générale du pan de falaise en liaison avec les fractures de décompression de versant (fractures parallèles à la vallée), le recul peut être délimité approximativement par la position au sein du massif de la dernière fracture de décompression de la falaise (celle la plus éloignée du front). À noter que ce recul est directement définissable si l'on peut visiter une cavité dans le versant, par la position de cette fracture dans le toit et les parois de la cavité et en mesurant son pendage apparent. Une marge de sécurité supplémentaire peut être appliquée pour tenir compte du pendage de la fracture de décompression (s'il n'est pas visible), ou du risque que des masses situées en arrière de la fracture soient entraînées dans la chute initiale.

Les retours d'expérience régionaux permettent raisonnablement de fixer cette marge à $H_m/2$.[13] (Figure 30).

Dans le cas où les champs de fractures le long du front ou dans la cavité ne sont pas observables, le recul en tête peut être calculé en fonction des propriétés intrinsèques de la roche et notamment son angle de frottement, qui détermine l'angle de rupture du matériau sous contrainte. En première approche, la marge de recul peut toutefois être assimilée à H_m.

Dans le cas des configurations de type B (coteau sous-cavé), la zone de recul va dépendre d'un angle *alpha* à calculer en fonction de la nature des terrains de recouvrement (10° par rapport à la verticale pour un terrain raide et continu et jusqu'à 45° pour un terrain non cohérent) et à partir de la dernière fracture de décompression ou de la marge M2 (Figure 31). Cette approche ne tient pas compte d'une possible fracturation majeure en profondeur dans le massif.

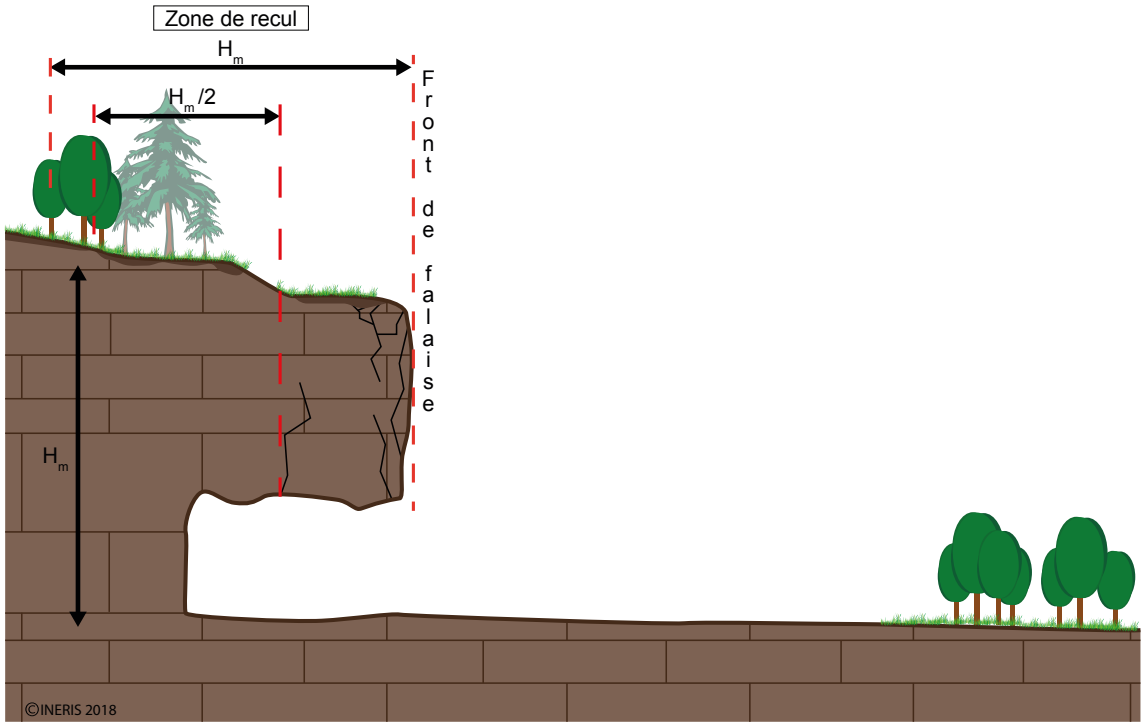


Figure 30 : schéma illustrant la zone de recul pour les configurations de type A (d'après [15])

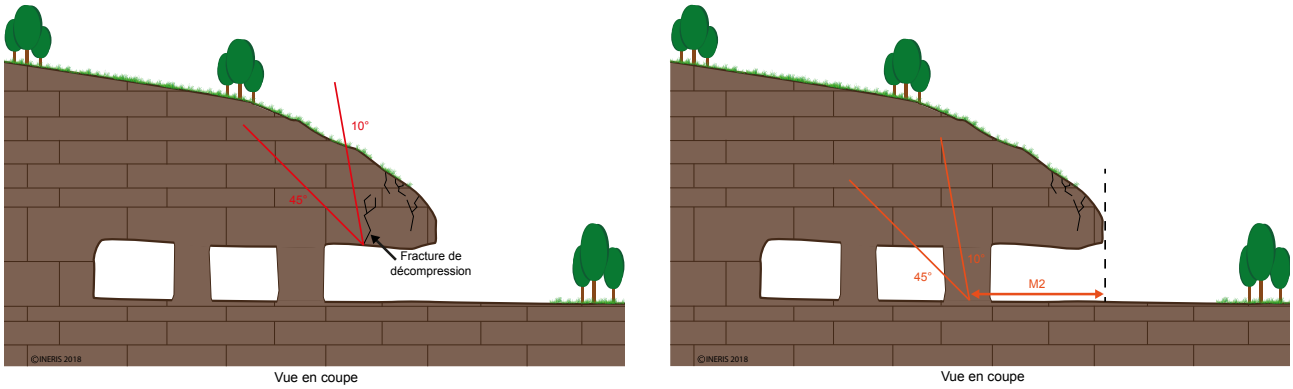


Figure 31 : schémas illustrant la limite de la zone de recul pour les configurations de type B :
à gauche à partir de la dernière fracture de décompression et à droite à partir de la marge M2

13 - Si la cavité est en pied de versant, H_m (hauteur entre le plancher de la cavité et le sommet du front) est égale à la hauteur du versant.

5.4.2. Définition de la zone d'épandage

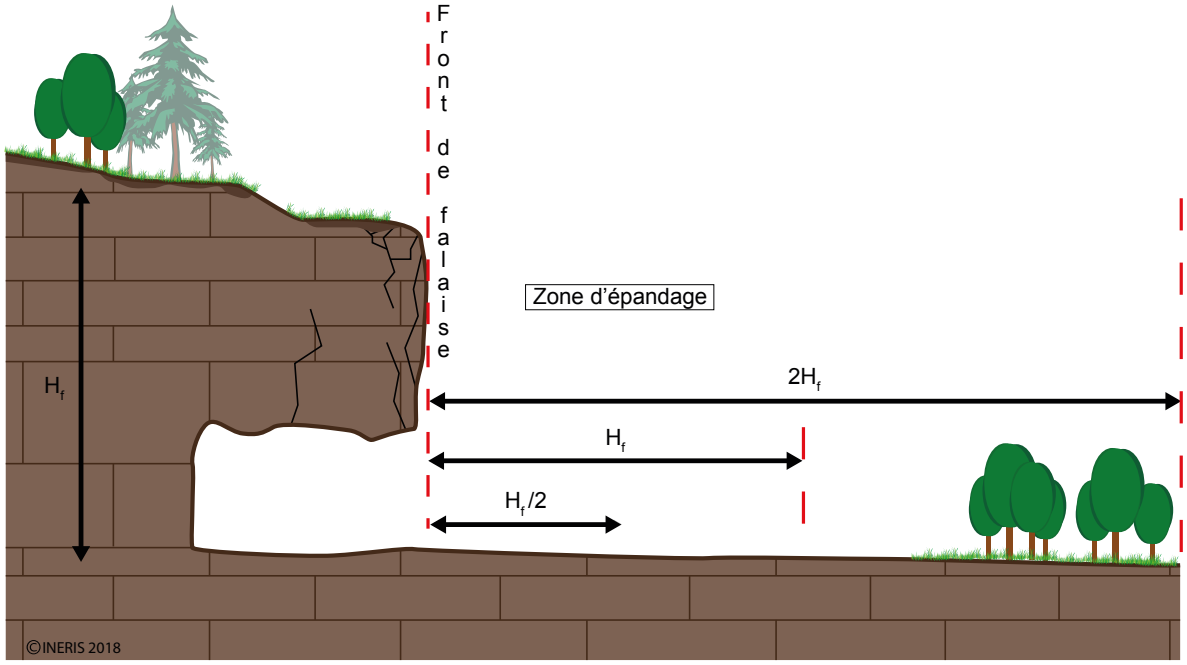
En pied, il s'agit de définir la propagation maximale que peut avoir le phénomène (zone d'épandage des blocs). Cette distance de propagation est fonction de la hauteur de front et de la morphologie du pied de versant. Elle doit prendre en compte également la distance de propagation des désordres pour les événements déjà connus sur la commune.

Dans le cas des configurations A1 et B1 (sans pente en aval) et lorsqu'il s'agit d'une instabilité de type rupture de pied d'une colonne rocheuse ou rupture de surplomb ou glissement, une **zone d'épandage** correspondant à la moitié de la hauteur totale du versant peut être définie. Cette approche doit néanmoins rester en cohérence avec les retours d'expérience régionaux[14]. Dans le cas d'un phénomène de type basculement de blocs ou de colonne rocheuse, la zone d'épandage pourra être étendue à la hauteur du versant[15]. Dans le cas d'un phénomène de type effondrement en masse, la zone d'épandage sera généralement prise au double de la hauteur du versant (Figure 32).

Dans le cas des configurations A2 et B2 (présence d'une pente en aval), il est nécessaire d'effectuer une étude spécifique de propagation[16]. Cette étude qui a pour but d'évaluer ou de préciser l'extension des zones menacées par la propagation de blocs à l'aide d'outils de calculs informatiques n'entre pas dans le champ d'action de ce guide.

Il est cependant rappelé que pour réaliser une étude spécifique de propagation, il convient (cf. *Guide pratique Versants rocheux : phénomènes, aléas, risques et méthodes de gestion* [17] et *Guide technique – Études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux* [12]) :

- d'apprécier la nature physique du versant rocheux ;
- d'identifier et de quantifier les volumes susceptibles de se propager ;
- de définir les formes des éléments rocheux concernés ;
- de quantifier la hauteur de chute initiale et la topographie du versant ;
- de localiser et de définir les obstacles éventuels.



Vue en coupe

Figure 32 : schéma illustrant la limite en pied (d'après [15])

14 - En effet, si un accident passé montre que H/2 est une distance insuffisante, il faudra prendre la valeur du retour d'expérience.
15 - Dans certains cas et notamment en zone urbanisée, une marge de sécurité pourra être ajoutée afin de tenir compte du risque de propagation d'éboulis rocheux de petites tailles (pierres). Cette marge de sécurité est définie au cas par cas à partir des observations de terrain, de la hauteur du coteau et des désordres connus.
16 - Il est aussi possible d'utiliser des données historiques si elles existent et sont jugées fiables pour déterminer l'extension en aval.

Enfin, pour les fronts non observables (versant revêtu, masqué par la végétation ou une habitation, accès impossible…), trois solutions sont proposées :

- définition d'une zone d'épandage et d'une zone de recul tenant compte de la réalité du terrain grâce aux observations réalisées sur les parcelles proches : **les zones sont extrapolées sur la base des pans de versant observables situés à proximité et encadrant le pan de versant étudié** ;
- définition d'une zone de recul tenant compte de la réalité du terrain grâce à la visite d'une cave proche non revêtue se développant suffisamment loin dans le pan de coteau : **le diagnostic de stabilité de l'entrée de la cave et la position de la dernière fracture de décompression sont alors utilisés** ; la zone d'épandage est estimée en fonction de la pente et de la hauteur du coteau ;
- si aucune donnée de terrain proche n'est disponible, une zone d'épandage et une zone de recul maximales seront définies par défaut.

Le tableau de synthèse suivant (Tableau 12) résume les distances proposées pour les zones de recul et d'épandage pour les différentes configurations.

Tableau 12 : évaluation de la zone de recul et de la zone d'épandage pour les différentes configurations

<table>
<tr><th></th><th>Zone de recul</th><th colspan="3">Zone d'épandage</th></tr>
<tr><th></th><th>Éboulement du front et de la cavité</th><th>Rupture en pied ou Rupture de surplomb ou Glissement</th><th>Basculement de blocs ou de colonne rocheuse</th><th>Effondrement en masse</th></tr>
<tr><td>Configuration A1</td><td rowspan="2">Position de la fracture de décompression + $H_m/2$
ou
Position du versant + H_m</td><td>H_f /2 (+ marge de sécurité)[17]</td><td>H_f (+ marge de sécurité)[17]</td><td>$2H_f$ (+ marge de sécurité)[17]</td></tr>
<tr><td>Configuration A2</td><td colspan="3">Étude spécifique de propagation ou évènement historique représentatif</td></tr>
<tr><td>Configuration B1</td><td rowspan="2">Position de la dernière fracture de décompression ou de la marge M2 + angle α de 10° à 45°</td><td>H_f /2 (+ marge de sécurité)</td><td>H_f (+ marge de sécurité)[17]</td><td>$2H_f$ (+ marge de sécurité)[17]</td></tr>
<tr><td>Configuration B2</td><td colspan="3">Étude spécifique de propagation ou évènement historique représentatif</td></tr>
</table>

17 - Une marge de sécurité éventuelle pourra être appliquée au cas par cas en fonction des observations de terrain (voir note n°15).

5.5. Cas spécifique : versants rocheux sous-cavés par des cavités superposées

Le cas spécifique « multi-cavités » (versant sous-cavé par une superposition de plusieurs cavités) est complexe car de nouveaux paramètres entrent en jeu : la configuration des superpositions, le nombre de niveaux de cavités superposés, l'épaisseur et la longueur de la dalle intermédiaire entre les niveaux de cavités, etc. Sur certains sites, il a été dénombré jusqu'à neuf niveaux superposés. Dans le but de conserver une approche simple et adaptable à plusieurs sites, nous nous limiterons, dans le cadre de ce guide, à l'application de la méthodologie d'évaluation de l'aléa à un versant rocheux sous-cavé par deux niveaux de cavités (Figure 33).

5.5.1. Configurations et description des désordres et des phénomènes associés

Pour traiter le sous-cavage de deux niveaux de cavités, deux configurations types ont été considérées. Celles-ci se différencient par la longueur de la dalle intermédiaire.

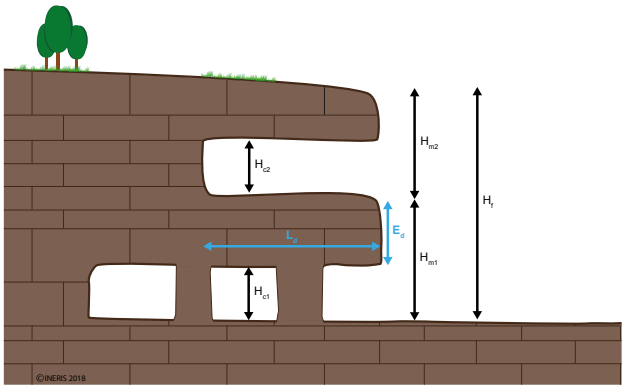
La configuration C est un versant sous-cavé par deux niveaux de cavités superposés, C_1 et C_2. La dalle intermédiaire s'arrête à l'aplomb du versant (Figure 34).

La configuration D représente un versant sous-cavé par deux niveaux de cavités avec une dalle intermédiaire qui ne s'arrête pas à l'aplomb du versant (Figure 35).

Ce type de site est soumis aux mêmes facteurs d'instabilités internes et externes que ceux décrits dans la partie 3.3. Il est cependant nécessaire d'ajouter, concernant la géométrie des vides (cf. § 3.3.1.3), qu'une faible épaisseur de la dalle intermédiaire entre les deux niveaux de cavités favorise l'instabilité de ces sites. Pareillement, la typologie des désordres et les mécanismes de rupture décrits dans la partie 3.4 peuvent s'appliquer à ces sites. Dans le cas spécifique multi-cavités, la dégradation de la dalle intermédiaire entre les deux niveaux de cavités s'ajoute aux critères d'instabilité du site. Cela est visible notamment par la présence de fractures au toit de la cavité inférieure et au mur de la cavité supérieure.

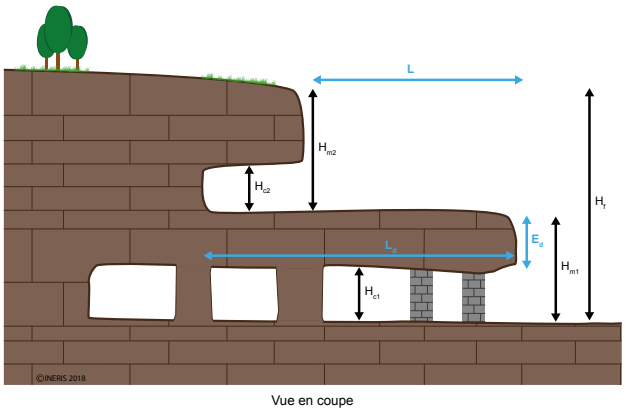


Figure 33 : exemple de versant sous-cavé sur deux niveaux (Yvelines)



Vue en coupe

Figure 34 : versant rocheux sous-cavé par deux niveaux superposés de cavités (Configuration C)



Vue en coupe

Figure 35 : versant rocheux sous-cavé par deux niveaux superposés de cavités avec une dalle intermédiaire extérieure au versant (Configuration D)

5.5.2. Évaluation de l'aléa versant rocheux sous-cavé par deux niveaux superposés de cavités

La méthodologie ne s'applique que dans la zone d'interaction des marges M1 et M2 (cf. § 5.1). 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.

Dans la configuration D, selon la longueur de la dalle intermédiaire, deux cas de figure peuvent se présenter. La partie de la dalle, extérieur au versant, est de longueur L. Si L est supérieure à H_{m1} (Figure 36) :

- la méthodologie d'aléa versant rocheux sous-cavé s'applique à la partie L < H_{m1} en considérant un niveau de cavité ;
- la méthodologie d'aléa cavité souterraine s'applique à la partie L > H_{m1} ;
- le double niveau de sous-cavage est considéré à partir de l'aplomb de la cavité 2 (ce cas sera traité comme la configuration C).

Si L< $H_{m1,}$ la méthodologie de l'aléa versant sous-cavé sera appliquée en considérant la superposition de deux niveaux de cavités.

5.5.2.1. Caractérisation de l'intensité

La superposition de deux niveaux de cavités va modifier seulement le troisième critère : l'estimation du volume de matériaux mobilisables.

Si toutes les dimensions des deux cavités sont connues (profondeur, largeur, hauteur), il sera possible de calculer quantitativement le volume de matériaux mobilisables (sans oublier le volume de la dalle intermédiaire) dans la zone d'application de la méthodologie. À partir de la valeur calculée, l'opérateur devra évaluer si ce volume est faible, moyen ou important.

Dans le second cas où toutes les dimensions des cavités ne sont pas connues, le volume de matériaux mobilisables est estimé en calculant le ratio entre les hauteurs des cavités[18] (H_{c1} + H_{c2}) et les hauteurs entre le plancher des cavités et le sommet du front ou du niveau supérieur[19] (H_{m1} + H_{m2}). Il est nécessaire ensuite d'utiliser le Tableau 4 pour établir une correspondance entre le rapport (H_{c1} + H_{c2}) / (H_{m1} + H_{m2}) et trois niveaux d'évaluation du volume de matériaux mobilisables (faible, moyen et important).

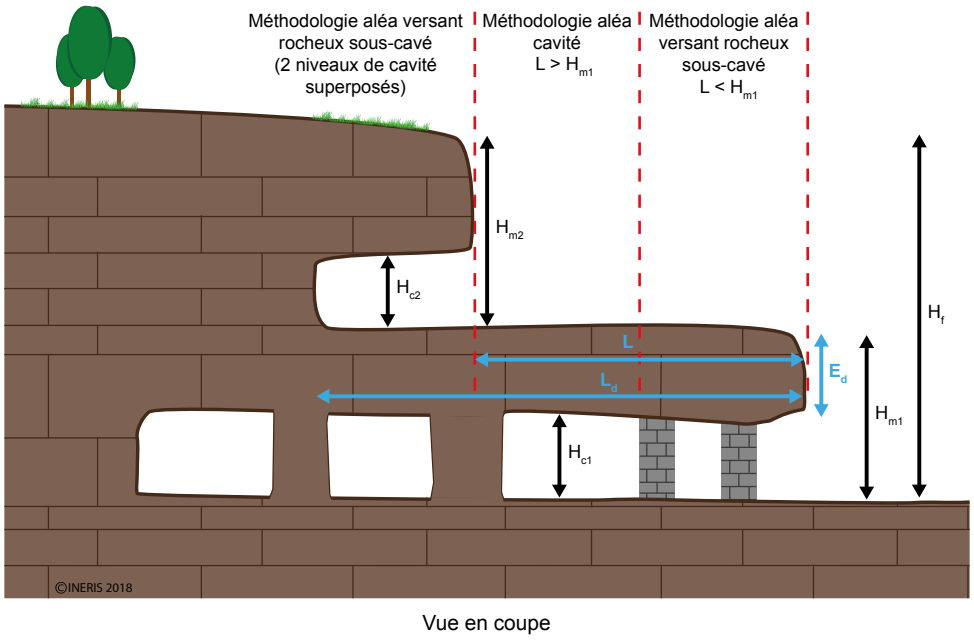


Figure 36 : zone d'application des méthodologies dans le cas de la configuration D et si L>H_{m1}

18 - Si les cavités sont de hauteur variable, les hauteurs minimales seront prises.
19 - Il est à noter que Hm_1 + Hm_2 est égale à H_f si la cavité se trouve à la base du versant.

5.5.2.2. Caractérisation de la probabilité d'occurrence

La superposition de deux niveaux de cavités va modifier la troisième étape de la méthodologie qui vise à caractériser l'état de stabilité et le volume des vides du massif.

La stabilité des deux cavités est déterminée de manière indépendante selon les critères donnés dans le paragraphe 5.2.3. Pour obtenir un état global du site, la stabilité des cavités est croisée selon le Tableau 13. Les valeurs du Tableau 13 pourront être adaptées au cas par cas à l'issue de la phase de collecte des données en justifiant les choix. Le Tableau 13 est donné de façon indicative.

La géométrie de la dalle intermédiaire (longueur (L_d) et épaisseur(E_d)) entre les deux niveaux de cavités peut modifier la stabilité de l'ensemble. Pour cela, le Tableau 14 permet de déterminer l'impact de cette dalle intermédiaire en faveur de l'instabilité selon trois niveaux : faible, moyen ou fort.

L'impact de la dalle intermédiaire va venir aggraver ou non l'état de stabilité globale déterminée par le Tableau 13. Ce dernier critère ne pourra en aucun cas diminuer le niveau de stabilité globale (Tableau 15).

Pour illustrer le fonctionnement du Tableau 15, prenons un exemple :

1. une cavité C_1 est très instable et une autre C_2 est stable. Le croisement donne un état de niveau instable.
2. cependant, la dalle intermédiaire a un impact de niveau moyen.
3. l'état global de stabilité du site passe à un niveau très instable.

Tableau 13 : état global de stabilité tenant compte des deux cavités superposées

État de stabilité global	**Cavité inférieure (C_1)**		
Cavité supérieure (C_2)	**Stable**	**Instable**	**Très instable**
Stable	Stable	Instable	Instable
Instable	Stable	Instable	Très instable
Très instable	Instable	Instable	Très instable

Tableau 14 : impact de la dalle intermédiaire sur l'instabilité

Dalle intermédiaire	**Épaisseur (E_d)**		
Longueur (L_d)	**Supérieur à 1/2 (H_{m1}+H_{m2})**	**Entre 1/4 (H_{m1}+H_{m2}) et 1/2 (H_{m1}+H_{m2})**	**Inférieur à 1/4 (H_{m1}+H_{m2})**
Inférieur à (H_{m1}+H_{m2})/2	Faible	Faible	Moyen
Supérieur à (H_{m1}+H_{m2})/2	Faible	Moyen	Fort

Tableau 15 : état global de stabilité du site prenant en compte la géométrie de la dalle intermédiaire

Etat global de stabilité	**Cavité inférieure (C_1)**			
Cavité supérieure (C_2)	**Stable**	**Instable**	**Très instable**	**Dalle intermédiaire**
Stable	Stable	Instable	Instable ❶	Faible
Instable	Stable	Instable	Très instable ❸	Moyen ❷
Très instable	Instable	Instable	Très instable	Fort

Le volume des vides est calculé dans la zone d'application de la méthodologie si toutes les dimensions des cavités sont connues (profondeur, largeur, hauteur). À partir de la valeur calculée, l'opérateur évaluera si ce volume de vide est faible, moyen ou important.

En revanche, si toutes les dimensions des cavités ne sont pas connues, le volume des vides est estimé par le ratio entre la hauteur des cavités[20] ($H_{c1} + H_{c2}$) et la hauteur maximale du front (H_f). Le Tableau 8 établit, de manière qualitative, une correspondance entre le rapport ($H_{c1} + H_{c2}$) / H_f et trois niveaux d'évaluation (faible, moyen et important) du volume de vide.

Le croisement de la stabilité globale du site et du volume des vides est réalisé à l'aide du Tableau 9 (cf. § 5.2.3).

5.5.2.3. Extension de la zone d'aléa

Le tableau de synthèse suivant (Tableau 16) résume les distances proposées pour les zones de recul et d'épandage pour les configurations C et D. L'évaluation de la zone d'épandage est la même que celle exposée dans la partie 5.4.2. Par contre, la zone de recul intègre les deux niveaux de cavités superposés.

Tableau 16 : évaluation de la zone de recul et de la zone d'épandage pour les différentes configurations

<table>
<tr><th></th><th>Zone de recul</th><th colspan="3">Zone d'épandage</th></tr>
<tr><th></th><th>Éboulement du front et de la cavité</th><th>Rupture en pied ou Rupture de surplomb ou Glissement</th><th>Basculement de blocs ou de colonne rocheuse</th><th>Effondrement en masse</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Configuration C avec terrain plat en aval</td><td rowspan="2">Position du versant + (H_{m1} + H_{m2})</td><td>H_f/2 (+ marge de sécurité)[21]</td><td>H_f (+ marge de sécurité)[21]</td><td>2H_f (+ marge de sécurité)[21]</td></tr>
<tr><td colspan="3">Étude spécifique de propagation ou évènement historique représentatif</td></tr>
<tr><td>Configuration C avec terrain penté en aval</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>Configuration D avec terrain plat en aval</td><td rowspan="2">Position du versant au niveau de la cavité supérieure + H_{m2} (H_m de la cavité supérieure)</td><td>H_f/2 (+ marge de sécurité)[21]</td><td>H_f (+ marge de sécurité)[21]</td><td>2H_f (+ marge de sécurité)[21]</td></tr>
<tr><td colspan="3">Étude spécifique de propagation ou évènement historique représentatif</td></tr>
<tr><td>Configuration D avec terrain penté en aval</td><td colspan="4"></td></tr>
</table>

20 - Si la hauteur des cavités est variable, les hauteurs maximales seront considérées.
21 - Une marge de sécurité éventuelle pourra être appliquée au cas par cas en fonction des observations de terrain (voir note n°15).

6 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 ces 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 probabilité d'occurrence de l'aléa, ou plutôt ici 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).

Enfin, les zones d'extension de l'aléa en aval et en amont sont définies selon plusieurs paramètres. En zone de recul, elle est prise à la moitié de la hauteur entre le plancher de la cavité et le sommet du front (H_m) à partir de la dernière fracture de décompression si elle est visible ou à partir du front de falaise, pour les configurations de type A (falaise sous-cavée). Pour les configurations de type B (coteau sous-cavé), la zone de recul va dépendre d'un angle *alpha* à calculer en fonction de la nature des terrains de recouvrement et à partir de la dernière fracture de décompression visible au sein de la cavité ou de la marge M2. En zone d'épandage et pour les configurations A1 et B1, elle est prise à la moitié de la hauteur du versant pour une rupture de surplomb, de pied de colonne ou un glissement à la hauteur du versant pour un basculement de blocs ou de colonne et à deux fois la hauteur du versant pour un effondrement en masse. En zone d'épandage et pour les configurations A2 et B2, une étude spécifique de propagation ou un évènement historique représentatif est nécessaire.

Le cas particulier des versants sous-cavés par deux niveaux de cavités superposés a été traité et il en ressort le rôle important de la dalle intermédiaire entre les deux niveaux de cavités dans l'évaluation de l'aléa.

L'application de cette méthodologie d'évaluation d'aléa sur trois sites de versant sous-cavé est présentée en annexe. Il s'agit des versants sous-cavés dans la Gironde (33) (Annexe 1), dans l'Oise (60) (Annexe 2) et dans les Yvelines (78) (Annexe 3). L'application sur ces sites a permis d'une part de mettre en œuvre des exemples types de fiches de terrain (voir annexes 1, 2 et 3) dans lesquelles :

- dans la partie 1, sont portés tous les paramètres nécessaires à renseigner pour disposer des critères d'intensité et de prédisposition ;
- dans la partie 2, un développement de l'approche méthodologique est résumé pour aboutir directement à l'évaluation de l'aléa et à la définition des marges de recul et d'épandage.

La mise en œuvre de la méthodologie sur les trois sites présentés en annexe s'est avéré simple à réaliser à partir des données de terrain et rendant bien compte de l'aléa observé.

7 GLOSSAIRE

Affaissement : déformation de surface sans rupture apparente consécutive à l'effondrement d'une cavité.

Altération : modification des propriétés physico-chimiques des minéraux et des roches par les agents atmosphériques, les eaux souterraines et thermales.

Carrière souterraine : cavité creusée dans le sous-sol pour permettre l'extraction de matériaux de construction (calcaire, craie, argiles, etc.).

Cavage : entrée en cavage : entrée d'une carrière ou cavité à flanc de coteau.

Diaclases : plans de discontinuités, d'extension métrique à décamétrique, sans déplacement relatif des compartiments ; elles favorisent un débit en blocs de la roche.

Discontinuité : surface géométrique qui perturbe la continuité d'un milieu géologique (une roche, un sol) ou géomorphologique. Une fracture dans une roche est un exemple de discontinuité.

Éboulement (chutes de pierres et de blocs) : les chutes de masses rocheuses sont des mouvements rapides, discontinus et brutaux résultant de l'action de la pesanteur et affectant des matériaux rigides et fracturés tels que calcaire, grès, roches cristallines, etc.

Écroulement : le terme écroulement est parfois utilisé comme synonyme d'éboulement souvent avec une idée de volume considérable.

Effondrement : mouvements gravitaires à composante essentiellement verticale, qui se produisent de façon plus ou moins brutale. Ils résultent de la rupture des appuis ou du toit d'une cavité souterraine préexistante.

Faciès : ensemble de caractères lithologiques ou paléontologiques d'une roche qui renseigne sur ses conditions de dépôts et de formation.

Faille : fracture avec déplacement relatif des compartiments, d'extension variable, engendrée par la rupture des roches sous contraintes tectoniques.

Fracture : terme général désignant toute cassure avec ou sans déplacement des terrains, des roches. La fracturation est la combinaison d'actions qui conduisent à l'apparition de fractures.

Glissement : déplacement généralement lent (quelques millimètres par an à quelques mètres par jour) sur une pente, avec ou sans plan de rupture, d'une masse de terrain cohérente, de volume et d'épaisseur variables.

Glissement par solifluxion : phénomène d'écoulement lent des sols. Il concerne les sols à matrice fine (argileuse ou silteuse) et à teneur en eau marquée, sur une épaisseur de l›ordre d'un mètre, sans surface de rupture nette.

Glissement par reptation : glissements très lents vers l'aval, des sols et des formations superficielles sur un versant à pente modérée à forte.

Glissement par fluage : mouvement lent de matériaux plastiques sur faible pente, qui résulte d'une déformation gravitaire continue d'une masse de terrain non limitée par une surface de rupture clairement identifiée.

Joints de stratification : dans les massifs sédimentaires, discontinuités assez régulières de grande extension, associées à la formation de la roche, elles découpent le massif en bancs parallèles d'épaisseur variable.

Karst, Karstification : forme d'érosion spécifique due à la dissolution des massifs calcaires par les eaux souterraines et caractérisée notamment par des galeries souterraines.

Massif encaissant : massif dans lequel est creusé la cavité souterraine.

Mur de cavité : plancher de la cavité.

Nappe (d'eau souterraine) : accumulation d'eaux souterraines remplissant entièrement les interstices d'un terrain poreux et perméable de telle sorte qu'il y ait toujours liaison par l'eau entre les pores.

Pendage : angle d'une couche géologique ou d'une discontinuité dans l'espace et par rapport à l'horizontal.

Recouvrement : ensemble des terrains rencontrés au-dessus d'une carrière.

Résurgence : réapparition à l'air libre d'une nappe d'eau ou d'une rivière souterraine sous la forme d'une source importante.

Schistosité : discontinuités structurales caractérisées par une grande densité que l'on rencontre plutôt dans les roches métamorphiques. La roche se présente en feuillets ou en lits parallèles peu épais, et se découpe facilement en plaques.

Taux de défruitement : pourcentage de surface excavée par rapport à la surface totale initiale dans une carrière souterraine.

Terrains de couverture : terrains situés au-dessus de la cavité souterraine.

Toit de carrière : plafond de la carrière souterraine.

8 BIBLIOGRAPHIE

[1] Al Heib M., Gombert P. & Charmoille A. (2008) : *Impact du changement climatique sur la stabilité des cavités souterraines : état des connaissances.* Rapport INERIS DRS-08-95052-11840A, du 18/12/2008.

[2] Bertholon P. et Huet O. (2005) : *Habitat creusé. Le patrimoine troglodytique et sa restauration*. 224 p. Éd. Eyrolles, ISBN 9782212113624.

[3] Bilien E. et Pasquet R. (1991) : *Cartographie des risques prévisibles de mouvements de terrain en Indre-et-Loire. Étude générale*. Rapport BRGM R 32367 CEN 4S/91.

[4] Cherkaoui A (2013) : *Impacts du changement climatique sur la stabilité des versants*. Rapport INERIS DRS-13-135683-09371A du 12/11/2013, 44 p.

[5] 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.

[6] 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.

[7] Gombert P. et Cherkaoui A. (2011) : *Analyse climatologique, hydrologique et hydrogéologique des effondrements survenus à Château-Landon (77) aux XIXe et XXe siècles*. Rapport INERIS DRS-11-117680-00812A du 02/03/2011, 61 p.

[8] IFSTTAR et CEREMA (2016) : *Prise en compte du paysage dans les protections contre les chutes de matériaux rocheux*. Marne-la-Vallée : IFSTTAR, 2016. Techniques et méthodes, GTI2, 196 p., ISBN 978-2-85782-713-9.

[9] IFSTTAR et CEREMA (2016) : *Surveillance des pentes et des falaises instables, Conception et mise en œuvre des dispositifs de mesure Acquisition et traitement de l'information*. Marne-la-Vallée : IFSTTAR, 2016. Techniques et méthodes, guide technique, GT11, 172 p., numéro ISBN 978-2-85782-710-8.

[10] IFSTTAR (2014) : *Guide méthodologique – Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées*. 105 p. http://www.ifsttar.fr/fileadmin/user_upload/editions/lcpc/GuideTechnique/GuideTechnique-LCPC-DIAGCAR.pdf

[11] LCPC (2009) : *Guide technique – Maintenance des ouvrages de protection contre les instabilités rocheuses : Pathologies et gestion des ouvrages*.

[12] LCPC (2004) : *Guide technique – Études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux*. 86 p. http://www.ifsttar.fr/fileadmin/user_upload/editions/lcpc/GuideTechnique/GuideTechnique-LCPC-ALEABOUL.pdf

[13] LCPC (2001) : *Guide technique – Parades contre les instabilités rocheuses : Chutes de pierres, chutes de blocs, éboulements*.

[14] Mathon C. (2000) : *Commune de Turquant (Maine et Loire). Écroulement de falaise près du lieu-dit « Vignole »*. Avis du BRGM. Rapport BRGM RP-50097-FR, 24 p.

[15] Mathon D. (2007) : *Élaboration de PPR en contexte de coteaux sous-cavés – Retour d'expérience et recommandations aux instructeurs*. Rapport CETE Normandie Centre 11136.0 – mai 2007.

[16] MEDDE (2016) : *Guide général – Plan de prévention des risques naturels prévisibles (PPRN).*

[17] MEDDE, INERIS, Cerema (2014) : *Guide pratique Versants rocheux : Phénomènes, aléas, risques et méthodes de gestion*. 81 p. http://www.side.developpement-durable.gouv.fr/exploitation/ACCIDR/Infodoc/ged/viewportalpublished.ashx?eid=IFD_FICJOINT_0018697&search=Selections_exact%20101%20_%20Les%20derni%C3%A8res%20publications%20de%20la%20DGPR

[18] MEDDE (2012) : *Guide méthodologique – Plan de prévention des risques naturels – Cavités souterraines abandonnées*. 81 p. http://www.side.developpement-durable.gouv.fr/exploitation/ACCIDR/doc/IFD/IFD_REFDOC_0514260

[19] Renaud V. (2007) : *Programme EAT-DRS-02. Réalisation d'une base de données des phénomènes d'effondrements brutaux dans les exploitations souterraines et de leurs impacts en surface*. Rapport INERIS DRS-07-86046-00964A du 03/01/2008, 53 p.

[20] Rewerski J. et Gilbert C. (1986) : *Le Monde souterrain de l'Anjou*. Éd. La Nouvelle République du Centre-Ouest, ISBN 2868800446.

[21] Saletta P. (1992) : *Voyage dans la France des Troglodytes*. 307 p. Éd. SIDES, ISBN 2868610773.

[22] Triolet L. (2001) : *Troglodytes du Val de Loire*. 96 p., Éd. Alan Sutton, ISBN 2842536371.

[23] Trouillard-Perrot et Zornette N. (2003) : *Inventaire des cavités souterraines de l'Indre-et-Loire*. Rapport BRGM RP-52318-FR, 126 p.

ANNEXE 1 : VERSANT SOUS-CAVÉ EN GIRONDE (33)

Le site est un versant sous-cavé à plusieurs niveaux, d'une longueur totale d'environ 70 m. Ce site a été numérisé par scanner laser 3D, ce qui a permis d'obtenir le plan détaillé du site. Du fait de sa configuration, ce versant sous-cavé a été divisé en trois tranches : une tranche A à un seul niveau de sous-cavage d'une hauteur importante, une tranche B à deux niveaux de sous-cavage et une tranche C à un seul niveau de sous-cavage d'une hauteur moyenne (Figure 37). La méthodologie a été appliquée pour chacune de ces tranches. Les résultats sont présentés dans les trois fiches de site suivantes. Un zonage de l'aléa est présenté en page 64.

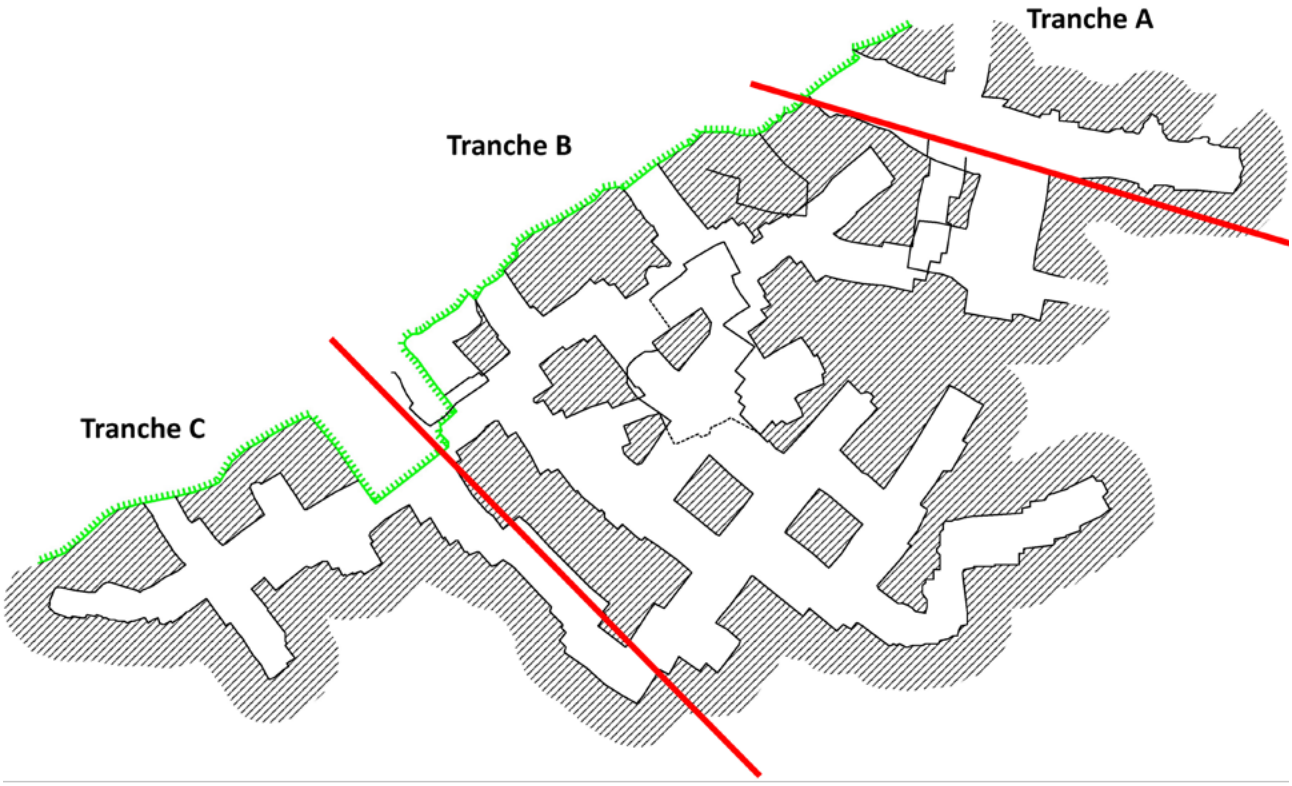


Figure 37 : plan du versant sous-cavé et délimitation des trois tranches

FICHE N° 1 : TRANCHE A
Versant rocheux sous-cavé de Gironde

Partie 1 : données de terrain

Localisation du site	**Région**	Nouvelle-Aquitaine			
	Département	Gironde (33)			
	Commune	xxx			
	Adresse	xxx			
	Coordonnées GPS	xxx			
Description générale	**Matériau exploité**	Calcaire	Craie	Autre	
	Formation géologique	Oligocène moyen			
	Nombre de niveau de sous-cavage	1			
	Nombre de niveau de sous-cavage accessible	1			
	Type de versant sous-cavé	A1	A2	B1	B2
	Hauteur du versant (H_f)	14 m			
	Longueur du versant	9 m			
	Éléments instables	Hauteur : 14 m Volume : quelques dm^3			
	Description du massif	Massif fracturé			
	Facteurs aggravants	Eau	Végétation	Actions anthropiques	Autre
	Photographie				

<table>
<tr><td rowspan="4">Description de la cavité</td><td>Type de cavité</td><td>Carrière</td><td>Galeries</td><td>Habitat troglodytique</td><td>Autre</td></tr>
<tr><td>Dimensions</td><td colspan="4">Hauteur cavité minimale (Hc_{min}) : 12 m
Hauteur cavité maximale (Hc_{max}) : 12 m
Hauteur maximum entre le plancher de la cavité et le sommet du front (Hm) : 14 m
Largeur : 3 à 5 m
Superficie : 109 m^2</td></tr>
<tr><td>Caractéristiques de la cavité</td><td colspan="4">Cavité avec présence de fractures
Pas de blocs à terre</td></tr>
<tr><td>Photographie</td><td colspan="4"></td></tr>
</table>

Partie 2 : évaluation de l'aléa

Intensité de l'aléa	**Hauteur des éléments instables**	0 à 5 m	5 à 10 m	10 à 15 m		+ 15 m
	Volume des éléments instables	Pas d'élément instable visible	Pierres moins (<dm³)	Blocs (de 1dm³ à 1m³)		Masse (+ 1m³)
		Hc_{min} /Hm		0,86		
		Volume des matériaux mobilisables		Faible (sup. à 2/3)	Moyen (entre 1/3 et 2/3)	Important (inf. à 1/3)
	Intensité			**Très limitée**	**Limitée**	**Modérée** / **Elevée**
Probabilité de l'aléa	**Activité du massif**	Dormant	Inactif	Frais		Actif
	Niveau de cotation des facteurs aggravants	1				
	Influence de la cavité	État géotechnique	Stable	Instable		Très instable
		Hc_{max} /Hf	0,86			
		Volume des vides	Faible (inf. à 1/3)	Moyen (entre 1/3 et 2/3)		Important (sup. à 2/3)
		Influence	Très faible	Faible	Moyenne	Elevée
	Probabilité		**Quasi-nulle**	**Peu sensible**	**Sensible**	**Très sensible**
Évaluation de l'aléa			**Négligeable**	**Faible**	**Moyen**	**Fort**
Extension de la zone d'aléa	**Zone de recul**	Configuration du versant sous-cavé	A1	A2	B1	B2
		Position de la fracture de décompression	Non déterminée			
		Valeur de la zone de recul	14 m			
	Zone d'épan-dage	Configuration du versant sous-cavé	A1	A2	B1	B2
		Si A2 ou B2 : étude de trajectographie ou méthode de la ligne d'énergie				
		Phénomène d'instabilité	Rupture en pied ou Rupture de surplomb		Basculement de blocs ou de colonne rocheuse	
		Valeur de la zone d'épandage	Étude nécessaire (trajectographie ou autre méthode)			
Observations						

FICHE N° 1 : TRANCHE B
Versant rocheux sous-cavé de Gironde

Partie 1 : données de terrain

Localisation du site	**Région**	Nouvelle-Aquitaine					
	Département	Gironde (33)					
	Commune	xxx					
	Adresse	xxx					
	Coordonnées GPS	xxx					
Description générale	**Matériau exploité**	Calcaire	Craie	Autre			
	Formation géologique	Oligocène moyen					
	Nombre de niveau de sous-cavage	2					
	Nombre de niveau de sous-cavage accessible	2					
	Type de versant sous-cavé	A1	A2	B1	B2	C	D
	Hauteur du versant (H_f)	15 m					
	Longueur du versant	35 m					
	Éléments instables	Hauteur : 13 m Volume : quelques dm^3					
	Description du massif	Massif avec fractures ouvertes apparentes					
	Facteurs aggravants	Eau	Végétation	Actions anthropiques	Autre		
	Photographie						

<table>
<tr><td rowspan="4">Description de la cavité</td><td>Type de cavité</td><td>Carrière</td><td>Galeries</td><td>Habitat troglodytique</td><td>Autre</td></tr>
<tr><td>Dimensions</td><td colspan="4">Hauteur cavité minimale (Hcmin) : 2,5 m
Hauteur cavité maximale (Hcmax) : 3,5 m
Hauteur maximum entre le plancher de la cavité et le sommet du front (Hm) : 8 m (1er étage), 7 m (rdc)
Largeur : 1,5 m à 5 m
Superficie : 1100 m²
Autre :</td></tr>
<tr><td>Caractéristiques de la cavité</td><td colspan="4">Parement et toit de la cavité très fracturé au 1er étage, présence de karst important
Cavités au rdc en bon état</td></tr>
<tr><td>Photographie</td><td colspan="4"></td></tr>
</table>

Partie 2 : évaluation de l'aléa

Intensité de l'aléa	Hauteur des éléments instables	0 à 5 m	5 à 10 m	10 à 15 m	+ 15 m	
	Volume des éléments instables	Pas d'élément instable visible	Pierres moins ($<dm^3$)	Blocs (de $1dm^3$ à $1m^3$)	Masse (+ $1m^3$)	
		$(H_{c1}+H_{c2})_{min}$ /$(H_{m1}+H_{m2})$		0,3		
		Volume des matériaux mobilisables		Faible (sup. à 2/3)	Moyen (entre 1/3 et 2/3)	Important (inf. à 1/3)
	Intensité			**Très limitée**	**Limitée**	**Modérée**	**Élevée**
Probabilité de l'aléa	Activité du massif	Dormant	Inactif	Frais	Actif	
	Niveau de cotation des facteurs aggravants	1				
	Influence de la cavité	État de stabilité C1 et C2	Stable	Instable	Très instable	
		Impact de la dalle intermédiaire	Faible	Moyen	Fort	
		État global de stabilité	Stable	Instable	Très instable	
		$(H_{c1}+H_{c2})max$ /Hf	0,47			
		Volume des vides	Faible (inf. à 1/3)	Moyen (entre 1/3 et 2/3)	Important (sup. à 2/3)	
		Influence	Très faible	Faible	Moyenne	Élevée
	Probabilité		**Quasi-nulle**	**Peu sensible**	**Sensible**	**Très sensible**
Évaluation de l'aléa			**Négligeable**	**Faible**	**Moyen**	**Fort**
Extension de la zone d'aléa	Zone de recul	Configuration du versant sous-cavé	A1	A2	B1	B2	C	D
		Position de la fracture de décompression	Non déterminée					
		Valeur de la zone de recul	15 m					
	Zone d'épandage	Configuration du versant sous-cavé	Configuration C avec zone pentée en aval					
		Valeur de la zone d'épandage	Étude spécifique de propagation ou évènement historique représentatif					
Observations								

FICHE N° 1 : TRANCHE C
Versant rocheux sous-cavé de Gironde

Partie 1 : données de terrain

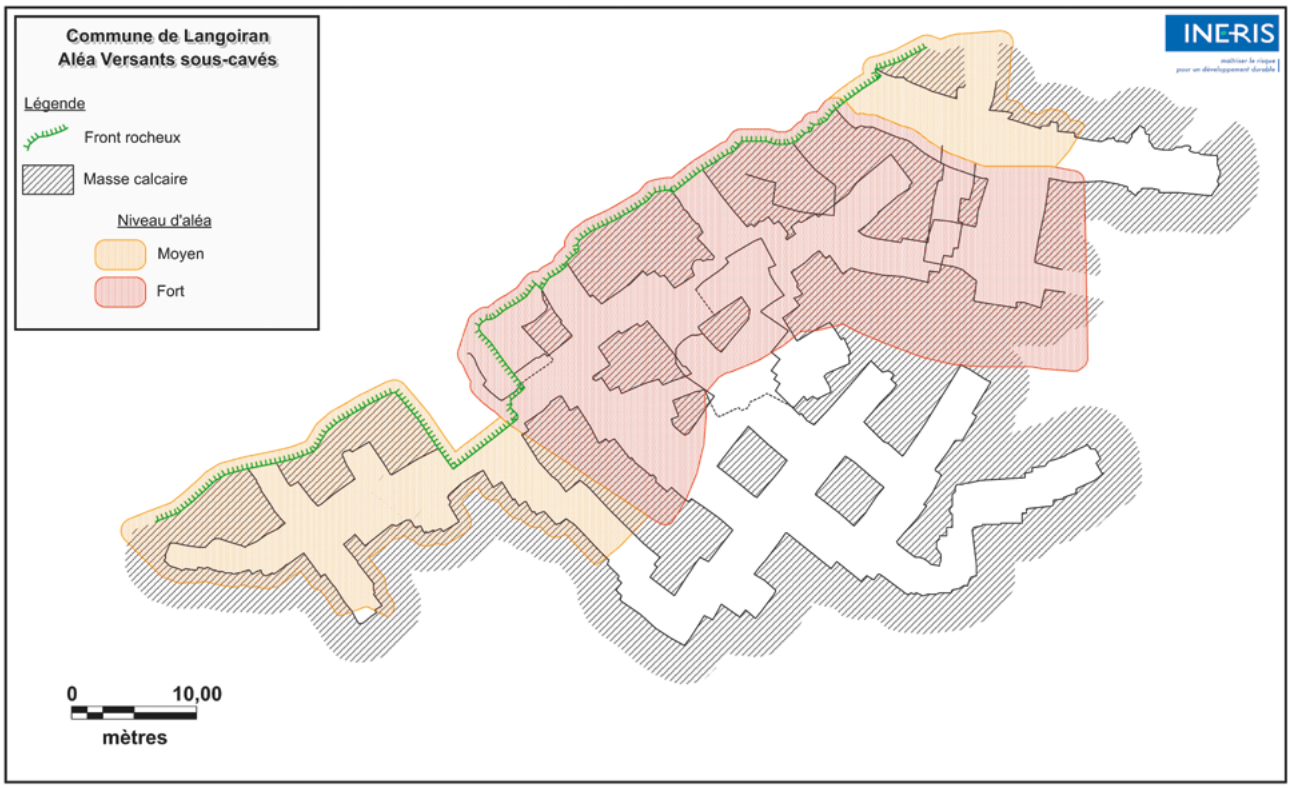
Localisation du site	**Région**	Nouvelle-Aquitaine			
	Département	Gironde (33)			
	Commune	xxx			
	Adresse	xxx			
	Coordonnées GPS	xxx			
Description générale	**Matériau exploité**	Calcaire	Craie	Autre	
	Formation géologique	Oligocène moyen			
	Nombre de niveau de sous-cavage	1			
	Nombre de niveau de sous-cavage accessible	1			
	Type de versant sous-cavé	A1	A2	B1	B2
	Hauteur du versant (Hf)	13 m			
	Longueur du versant	28 m			
	Éléments instables	Hauteur : 12 m Volume : quelques dm^3			
	Description du massif	Massif peu fracturé			
	Facteurs aggravants	Eau	Végétation	Actions anthropiques	Autre
	Photographies				

Description de la cavité	**Type de cavité**	Carrière	Galeries	Habitat troglodytique	Autre
	Dimensions	Hauteur cavité minimale (Hc_{min}) : 2 m Hauteur cavité maximale (Hc_{max}) : 2 m Hauteur maximum entre le plancher de la cavité et le sommet du front (H_m) : 9 m Largeur : 2 à 5 m Superficie : 248 m^2 Autre :			
	Caractéristiques de la cavité	Cavité peu fracturée			
	Photographie				

Partie 2 : évaluation de l'aléa

Intensité de l'aléa	Hauteur des éléments instables	0 à 5 m	5 à 10 m	10 à 15 m	+ 15 m	
	Volume des éléments instables	Pas d'élément instable visible	Pierres moins (<dm^3)	Blocs (de $1dm^3$ à $1m^3$)	Masse (+ $1m^3$)	
		Hc_{min} /Hm		0,2		
		Volume des matériaux mobilisables		Faible (sup. à 2/3)	Moyen (entre 1/3 et 2/3)	Important (inf. à 1/3)
	Intensité			**Très limitée**	**Limitée**	**Modérée**	**Élevée**
Probabilité de l'aléa	Activité du massif	Dormant	Inactif	Frais	Actif	
	Niveau de cotation des facteurs aggravants	1				
	Influence de la cavité	État géotechnique	Stable	Instable	Très instable	
		Hc_{max} /Hf	0,15			
		Volume des vides	Faible (inf. à 1/3)	Moyen (entre 1/3 et 2/3)	Important (sup. à 2/3)	
		Influence	Très faible	Faible	Moyenne	Élevée
	Probabilité		**Quasi-nulle**	**Peu sensible**	**Sensible**	**Très sensible**
Évaluation de l'aléa			**Négligeable**	**Faible**	**Moyen**	**Fort**
Extension de la zone d'aléa	Zone de recul	Configuration du versant sous-cavé	A1	A2	B1	B2
		Position de la fracture de décompression	Non déterminée			
		Valeur de la zone de recul	13 m			
	Zone d'épandage	Configuration du versant sous-cavé	A1	A2	B1	B2
		Si A2 ou B2 : étude de trajectographie ou méthode de la ligne d'énergie				
		Phénomène d'instabilité	Rupture en pied ou Rupture de surplomb		Basculement de blocs ou de colonne rocheuse	
		Valeur de la zone d'épandage	Étude nécessaire (trajectographie ou autre méthode)			
Observation						

Partie 3 : Zonage de l'aléa en amont



Remarque : les zones non concernées par l'aléa versant sous-cavé (sans couleur) sont concernées par l'aléa cavité (qui n'a pas été déterminé ici).

ANNEXE 2 : VERSANT SOUS-CAVÉ DANS L'OISE (60)

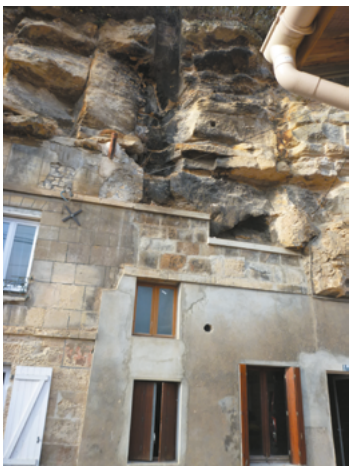
Le site étudié est un versant sous-cavé de type habitat troglodytique (Figure 38). La méthodologie a été appliquée et les résultats sont présentés dans la fiche suivante. Un zonage de l'aléa est présenté à la fin de la fiche.



Figure 38 : vue du site de versants sous-cavés

FICHE N° 2
Versant rocheux sous-cavé dans l'Oise

Partie 1 : données de terrain

Localisation du site	**Région**	Hauts de France			
	Département	Oise (60)			
	Commune	xxx			
	Adresse	xxx			
	Coordonnées GPS	xxx			
Description générale	**Matériau exploité**	Calcaire	Craie	Autre	
	Formation géologique	Lutétien			
	Nombre de niveau de sous-cavage	1			
	Nombre de niveau de sous-cavage accessible	1			
	Type de versant sous-cavé	A1	A2	B1	B2
	Hauteur du versant (H_f)	9,22 m			
	Longueur du versant	13,96 m			
	Eléments instables	Hauteur : 0 à 10 m Volume : Masse (+ 1 m³)			
	Description du massif	Bancs de calcaires décimétriques à métriques comportant de nombreuses diaclases perpendiculaires au front de taille (massif fracturé)			
	Facteurs aggravants	Eau	Végétation	Actions anthropiques	Autre
	Photographie				

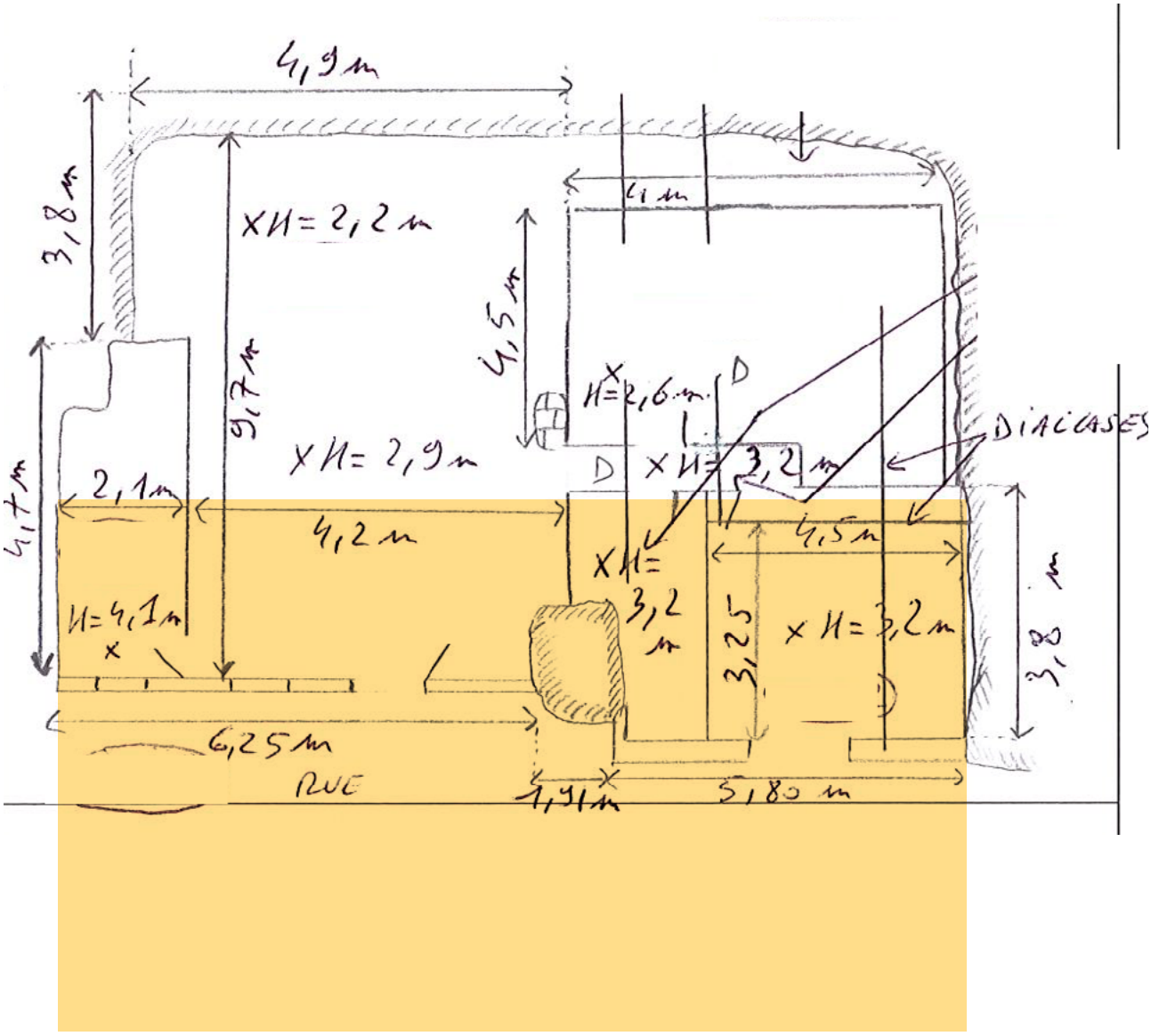
<table>
<tr><td rowspan="4">Description de la cavité</td><td>Type de cavité</td><td>Carrière</td><td>Galeries</td><td>Habitat troglodytique</td><td>Autre</td></tr>
<tr><td>Dimension</td><td colspan="4">Hauteur cavité minimale (Hc_{min}) : 2,60 m
Hauteur cavité maximale (Hc_{max}) : 4,10 m
Hauteur maximum entre le plancher de la cavité et le sommet du front (H_m) : 9,22 m
Largeur : 8,50 m
Longueur : 13,96 m
Superficie :</td></tr>
<tr><td>Caractéristiques de la cavité</td><td colspan="4">Ancienne carrière souterraine reconvertie en habitat troglodyte. Front de taille de 9,22 m de hauteur.</td></tr>
<tr><td>Photographies</td><td colspan="4">
</td></tr>
</table>

Partie 2 : évaluation de l'aléa

Intensité de l'aléa	Hauteur des éléments instables	0 à 5 m	5 à 10 m	10 à 15 m	+ 15 m	
	Volume des éléments instables	Pas d'élément instable visible	Pierres moins (<dm³)	Blocs (de 1 dm³ à 1 m³)	Masse (+ 1 m³)	
		Hc_{min} /Hm		0,28		
		Volume des matériaux mobilisables		Faible (sup. à 2/3)	Moyen (entre 1/3 et 2/3)	Important (inf. à 1/3)
	Intensité			**Très limitée**	**Limitée**	**Modérée**	**Élevée**
Probabilité de l'aléa	Activité du massif	Dormant	Inactif	Frais	Actif	
	Niveau de cotation des facteurs aggravants	1				
	Influence de la cavité	État géotechnique	Stable	Instable	Très instable	
		Hc_{max} /Hf	0,44			
		Volume des vides	Faible (inf. à 1/3)	Moyen	Important	
		Influence	Très faible	Faible	Moyenne	Élevée
	Probabilité		**Quasi-nulle**	**Peu sensible**	**Sensible**	**Très sensible**
Évaluation de l'aléa			**Négligeable**	**Faible**	**Moyen**	**Fort**
Extension de la zone d'aléa	Zone de recul	Configuration du versant sous-cavé	A1	A2	B1	B2
		Position de la fracture de décompression	3,8 m			
		Valeur de la zone de recul	3,8 m			
	Zone d'épandage	Configuration du versant sous-cavé	A1	A2	B1	B2
		Si A2 ou B2 : Étude de trajectographie ou méthode de la ligne d'énergie				
		Phénomène d'instabilité	Rupture en pied ou Rupture de surplomb		Basculement de blocs ou de colonne rocheuse	
		Valeur de la zone d'épandage	3,25 + 4,61 = 7,86 m			
Observations	Masse instable à plus ou moins long terme à 8 m de hauteur sur le front de taille (massif rocheux en saillie anciennement traversé par une cheminée).					

Partie 3 : zonage de l'aléa en amont

Il s'agit ici d'une représentation non précise du zonage de l'aléa basée sur un croquis de terrain.



Niveau d'aléa moyen

ANNEXE 3 : VERSANT SOUS-CAVÉ DANS LES YVELINES (78)

Le site est un versant sous-cavé de type entrée de carrière souterraine (Figure 39). Sa longueur est de 30 m. Le versant possède trois entrées en cavage. La méthodologie a été appliquée pour cette parcelle.

Les données de terrain sont présentées dans la fiche de site suivante. L'application de la méthodologie pour déterminer l'aléa est présentée sous forme d'une succession de tableaux.

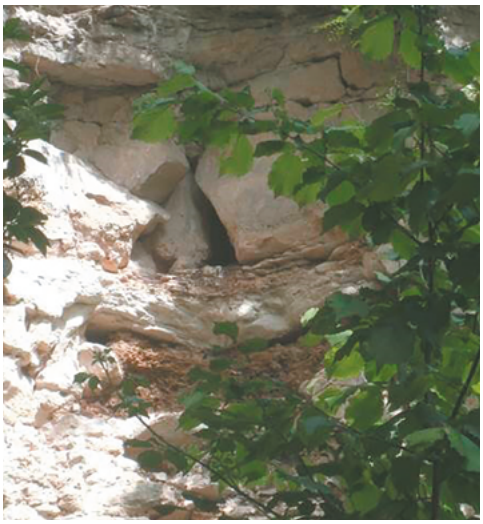
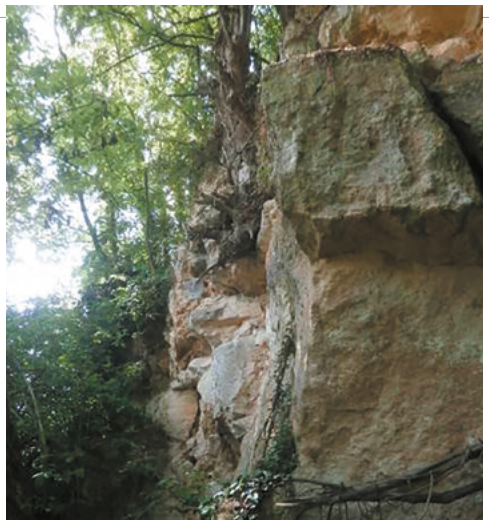


Figure 39 : vue du site de versant sous-cavé

FICHE N° 3
Versant rocheux sous-cavé dans les Yvelines

Partie 1 : données de terrain

Localisation du site	**Région**	Ile-de-France			
	Département	Yvelines (78)			
	Commune	XXX			
	Adresse	XXX			
	Coordonnées GPS	XXX			
Description générale	**Matériau exploité**	Calcaire	Craie	Autre	
	Formation géologique	Calcaire grossier et Marnes et caillasses du Lutécien			
	Nombre de niveau de sous-cavage	1			
	Nombre de niveau de sous-cavage accessible	1			
	Type de versant sous-cavé	A1	A2	B1	B2
	Hauteur du versant (H_f)	20 m			
	Longueur du versant	30 m			
	Eléments instables	Hauteur : 15-20 m Volume : blocs (< 1m^3)			
	Description du massif	Le massif est fortement dégradé : une fracturation prononcée découpe les bancs en blocs prismatiques et des pierres et blocs instables sont visibles. Le volume des éléments instables est supérieur au décimètre cube mais reste inférieur au mètre cube. Les chutes de blocs proviennent essentiellement des parties superficielles et altérées du front rocheux (Marnes et Caillasses) et accessoirement des entrées de cavités. De nombreux karsts (dissolution naturelle) d'ampleur importante et à développement horizontal sont visibles dans le massif rocheux. Ils sont généralement comblés de matériaux argileux ocre à marron. La présence de racines favorise les phénomènes d'éclatement de la roche et peuvent être à l'origine de chutes de pierres et de petits blocs.			
	Facteurs aggravants	Eau	Végétation	Actions anthropiques	Autre

Description de la cavité	**Photographies**	 Entrée en cavage
		 Présence de karst dans le massif
		 Présence de végétation (racines qui contribuent à l'élargissement de fissures et à la chute de pierres et de blocs)

<table>
<tr><td rowspan="3">Description de la cavité</td><td>Type de cavité</td><td>Carrière</td><td>Galeries</td><td>Habitat troglodytique</td><td>Autre</td></tr>
<tr><td>Dimension</td><td colspan="4">Hauteur cavité minimale (Hc_{min}) : 2 m
Hauteur cavité maximale (Hc_{max}) : 5 m
Hauteur maximum entre le plancher de la cavité et le sommet du front (H_m) : 20 m
Largeur : 2 à 6 m
Superficie : 80 m^2
Étendue sous le versant : 20 m</td></tr>
<tr><td>Caractéristiques de la cavité</td><td colspan="4">Entrées en cavage de plain-pied en fond de parcelle de la propriété : 3 entrées en cavage.
Présence d’une fracturation naturelle importante.
Présence de blocs instables au toit et/ou au sol.</td></tr>
<tr><td></td><td>Photographies</td><td colspan="4">Non visitée.
Plan et rapport de visite fournit par l’IGC Versailles.</td></tr>
</table>

Partie 2 : évaluation de l'aléa

Intensité de l'aléa									
Hauteur élément instable	Peu ou pas d'éléments visibles	Pierres < dm^3	Blocs (1 dm^3 à 1 m^3)	Masse > 1 m^3	h_c hauteur de la cavité min.	h_m (= h_f)	Rapport h_c / h_m	volume des matériaux mobi-lisables	Intensité
15-20 m			X		2	20	0,10	Important	Modérée

Probabilité d'occurrence de l'aléa									
Facteurs aggravants (fracturation, végétation défavorable, écoulements d'eau, confortement en mauvais état...)	Niveaux de cota-tion des facteurs aggravants	Activité du massif	h_c hauteur de la cavité max.	h_f hauteur du front max.	Rapport h_c / h_f	Volume de vide	État de stabilité de la cavité	Impact de la cavité	Prédis-position
Végétation, confortement, fracturation	3	Frais	5	20	0,25	Faible	Instable	Faible	Très sensible

Évaluation et extension de l'aléa						
Intensité	Prédisposition	Aléa final	hf (hauteur du front)	Zone de recul (éboulement)	Zone d'épandage (rupture en pied ou rupture de surplomb : h / 2	Zone d'épandage (basculement de blocs ou de colonne rocheuse) : h
Modérée	Très sensible	Fort	20	20	10	20

Crédits photos : Ineris (couverture ; p. 11 ; 17 ; 18 ; 19 ; p. 20 ; 24 ; 25 ; 26 ; 27 ; 31 ; 33 ; 34 ; 35 ; 38 ; 40 ; 41 ; 42 ; 44 ; 45 ; 54 ; 55 ; 56 ; 58 ; 59 ; 62 ; 64 ; 65 ; 66 ; 67 ; 69) • Cerema (p. 10 ; 19 ; 23 ; 70 ; 72) • Cavités 37 (p. 15 ; 16 ; 21 ; 22 ; 23 ; 32) • Fotolia / Pictures news (p. 9) • Fotolia / Dom (p. 10) • Archives départementales (p. 24 ; 30) • S. Bonniol / Visuelles (p. 9) • V. Renaud (p. 9) • Conception-réalisation : O'communication – Les Récréateurs

Ce guide, réalisé conjointement par l'Ineris et le Cerema pour le compte des pouvoirs publics et à destination des acteurs de la gestion des risques naturels, est le résultat de travaux d'expertise et de recherche réalisés depuis plusieurs années.

Le paysage français est exposé à une grande variété de mouvements de terrain répartis sur l'ensemble du territoire. Lorsque des falaises présentent des cavages donnant accès à des cavités souterraines, anthropiques ou naturelles, potentiellement sources d'affaissements ou d'effondrements, on parle de versants sous-cavés. L'aléa mouvement de terrain doit alors prendre en compte à la fois le versant et la cavité. Alors que l'aléa mouvement de terrain lié aux cavités souterraines et celui lié aux versants rocheux disposent de méthodes de caractérisation et d'identification adaptées, il n'existe pas de méthodologie spécifique pour déterminer l'aléa versant rocheux sous-cavé. Au vu de ce constat, l'Ineris et le Cerema se sont associés, avec la collaboration de la DGPR (Direction générale de la prévention des risques) pour proposer une méthodologie commune d'évaluation de l'aléa versant rocheux sous-cavé.

Cette méthodologie se base sur la connaissance combinée de la prédisposition du site aux instabilités et de l'intensité potentielle de ces 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 probabilité d'occurrence de l'aléa, ou plutôt ici 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.

This handbook, produced by Ineris and Cerema for the public authorities and intended for natural risk manager, is the result of studies and research works carried out over the last several years.

The French landscape is exposed to a wide variety of ground movements spread throughout the territory. When cliffs have mines giving access to underground cavities, anthropogenic or natural, potentially sources of subsidence or collapse, we speak of mined cliffs. The ground movement hazard must then take into account both the cliff and the cavity. While the ground movement hazard related to the underground cavities and that linked to the rocky cliffs have suitable characterization and identification methods, there is no specific methodology for determining the mined rocky cliff. In view of this, Ineris and Cerema have joined forces, with the collaboration of the DGPR (General Directorate for Risk Prevention) to propose a common methodology for evaluating the mined cliff hazard.

This methodology is based on the combined knowledge of the site's susceptibility to instabilities and the potential intensity of the latter. The intensity of the hazard is determined by the height of the unstable elements and their volume. It can be aggravated by the volume of mobilizable elements related to the presence and characteristics of the cavity. The probability of occurrence of the hazard, or rather here the susceptibility of the site with respect to the rupture, depends on many factors of instability grouped into two categories: the level of activity of the massif and the aggravating factors. The level of activity of the massif is evaluated from essentially geomorphological factors such as lithology, the structural context and the morphology of the site that qualify the state of the rock structures. Aggravating factors such as water, climatic phenomena, vegetation and anthropogenic actions can modify the conditions of equilibrium of the environment and accelerate the rupture. The crossing of these two categories makes it possible to obtain the level of susceptibility. It can then be possibly aggravated by the influence of the cavity on the massif estimated by the intersection between the state of stability of the underground cavity and the volume of the voids created by the excavation.

Institut national de l'environnement industriel et des risques
Parc technologique Alata - BP 2 - F-60550 Verneuil-en-Halatte
03 44 55 66 77 - ineris@ineris.fr - www.ineris.fr

INERIS
maîtriser le risque pour un développement durable