

# Guide Versant rocheux sous-cavé Caractérisation et Evaluation

Journée technique versant rocheux sous-cavé

17/10/2019



## Objectif

Etablir une **méthodologie opérationnelle** d'évaluation de l'aléa pour les « versants sous-cavés »

## Interrogation

Comment combiner l'aléa mouvement de terrain lié à un « éboulement de falaise » et celui lié à une « cavité souterraine » ?

## Plan du guide

- / Les versants rocheux : contexte et problématique
  - / Configuration des désordres et des phénomènes associés
  - / Recensement et traitement des données nécessaires à la caractérisation de l'aléa
  - / Evaluation de l'aléa versant rocheux sous-cavé
- + Glossaire et Annexes



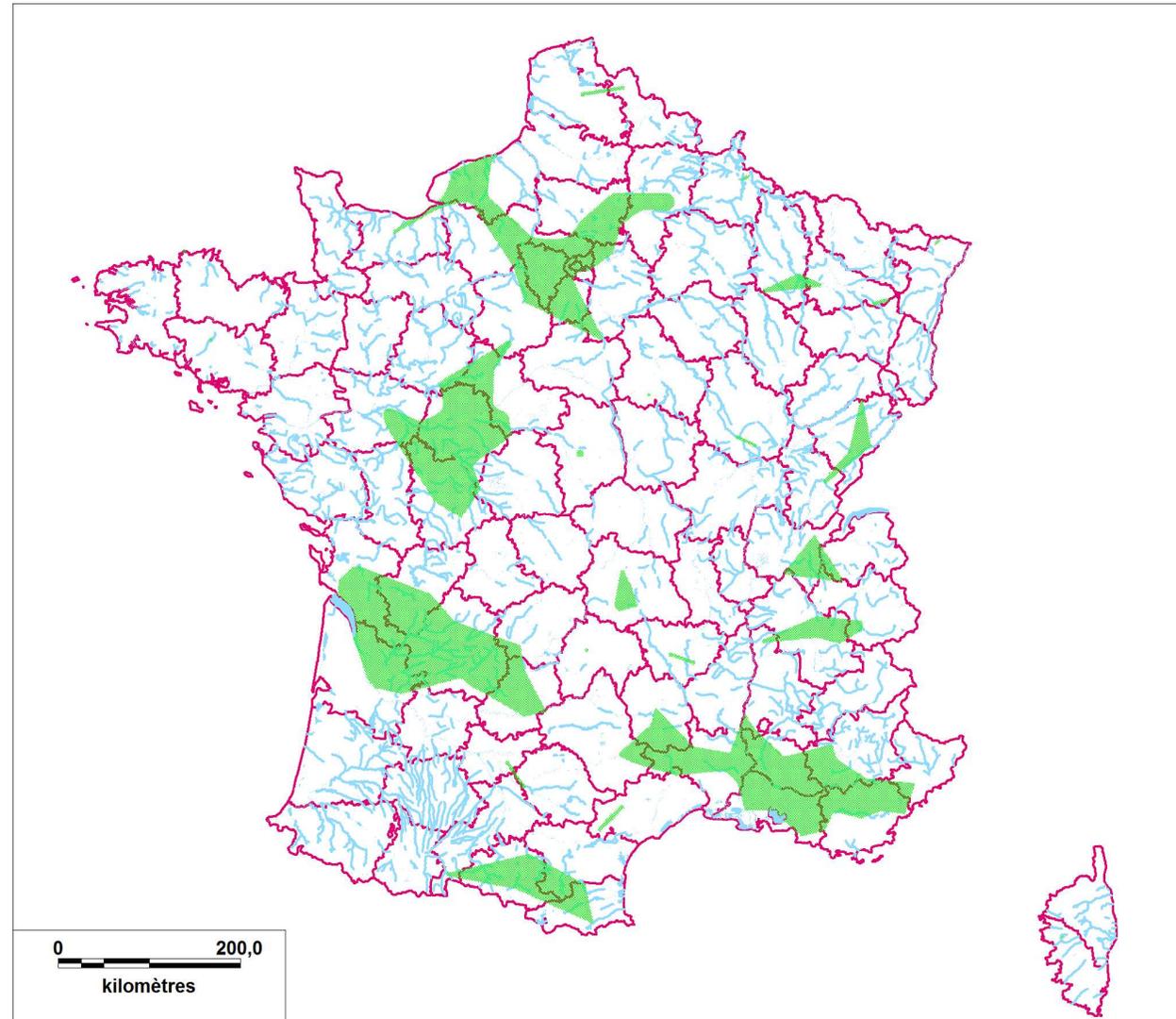
# Contexte et problématique

## Origine et utilisation actuelle :

- / Origine **anthropique** (troglodytisme, entrées de carrière souterraine, tunnels routiers ou ferroviaires...);
- / Origine **naturelle** (cavités de dissolution, de suffosion, volcaniques, ...).

## Répartition géographique :

**Fonction de la géologie** : formations carbonatées (craies, craies impures [tuffeau], calcaires, calcaires sableux) → Formations exploitées pour la pierre de taille, assez tendres, faciles à excaver et avec une porosité non négligeable.



# Contexte et problématique

## Accidentologie :

- / Vieillesse naturelle accéléré par des facteurs externes ;
- / Enjeux permanents ou temporaires.

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 troglodyte



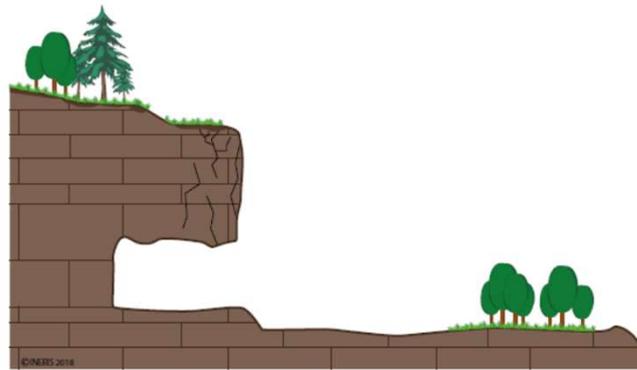
# Configurations

## Caractéristiques générales :

- / Hauteur inférieure ou égale à 30 mètres ;
- / Sauf les versants côtiers (facteurs marins non étudiés) ;
- / Sauf les versants de haute montagne (géologie et géomorphologie spécifiques).

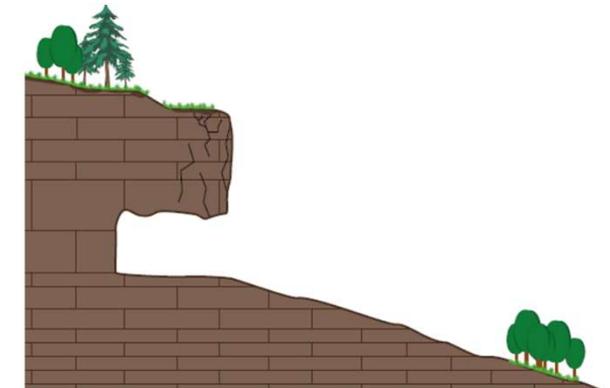
## Type de sous-cavage :

- / **Falaise** sous-cavée ;
- / **Coteau** sous-cavé ;
- / Sous-cavage **multi-cavités**.



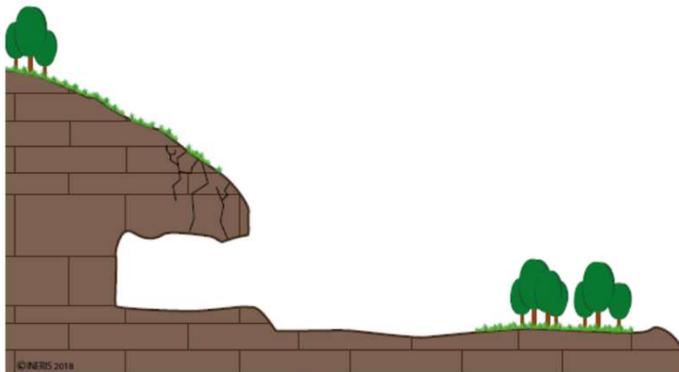
Vue en coupe

Configuration Type A1



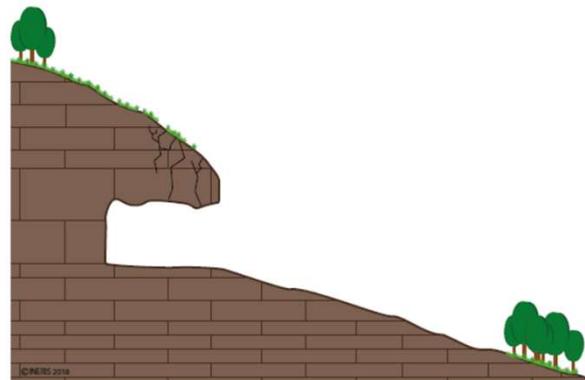
Vue en coupe

Configuration Type A2



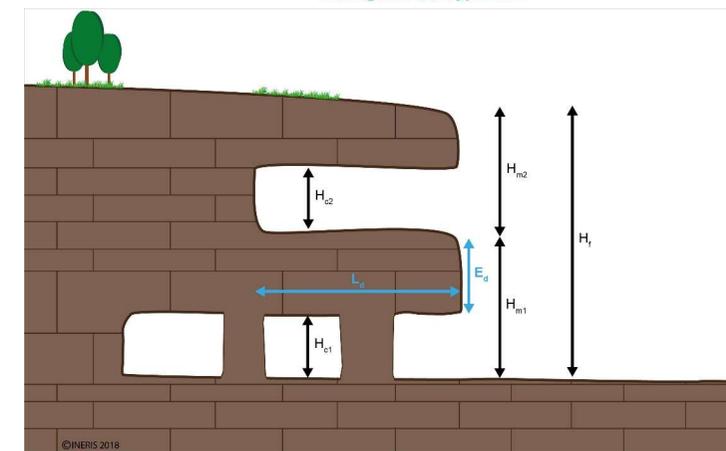
Vue en coupe

Configuration Type B1



Vue en coupe

Configuration Type B2



Vue en coupe

# Facteurs d'instabilité

Les instabilités : combinaison de **plusieurs paramètres défavorables (facteurs internes)** et de l'occurrence de **facteurs externes** susceptibles d'accélérer la rupture

Facteurs internes :

## / La lithologie

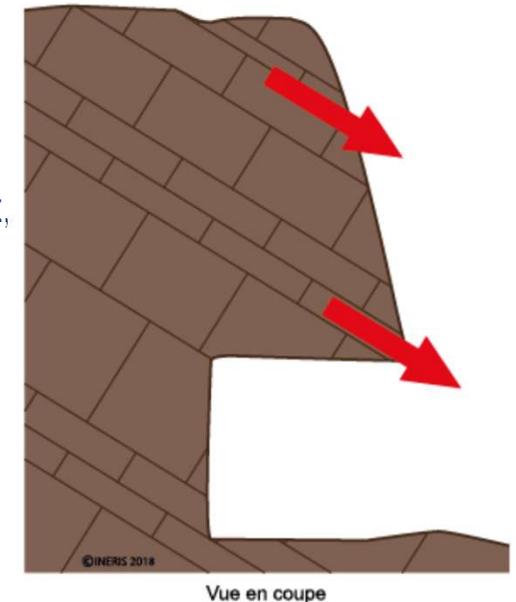
- La **nature des roches** constituant le massif (massif calcaire compact, craie tendre, formation alternant niveaux résistants et niveaux tendres)
- Les **terrains de couverture** ;
- Les **formations en pied de versant**.

## / Le contexte structural

- Le **pendage** des couches ;
- La **fracturation du massif** (longueur, densité, écartement, remplissage, direction) → zone en bordure du versant combine la fracturation due à la décompression du front rocheux et un champ de contrainte dévié (pente du versant) : **cisaillement** des piliers dans les ouvrages souterrains.

## / La morphologie du site

- Les caractéristiques géométriques du **versant** (hauteur, forme, pente...)
- Les caractéristiques géométriques de la **cavité** (géométrie du vide, position dans le massif [recouvrement], mode d'extraction) ;
- Les caractéristiques de l'**aval** du versant.



# Facteurs d'instabilité

## Facteurs externes :

### / L'eau

- D'origine **naturelle** (infiltrations, remontée de nappe) ;
- D'origine **anthropique** ou eaux parasites (pratiques agricoles, mauvais entretien des ouvrages de drainage...)

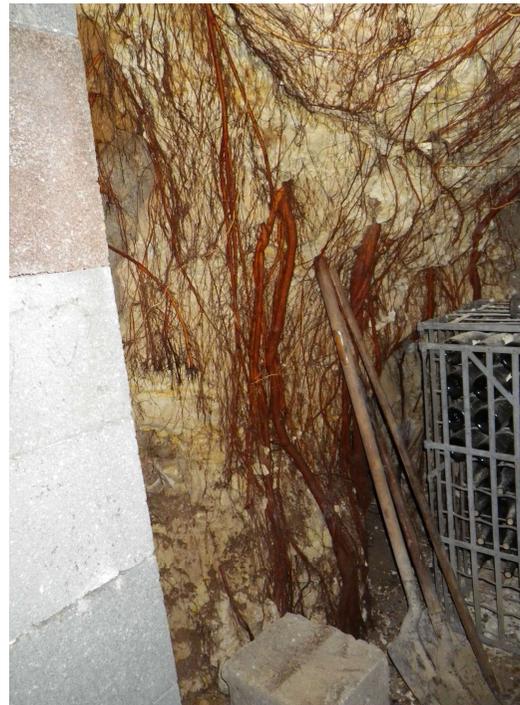
→ Création ou agrandissement de discontinuités, perte de résistance du massif...

### / Les phénomènes climatiques et naturels

- Cycles de gel/dégel ;
- Variation de température ;
- Vent.

### / La végétation

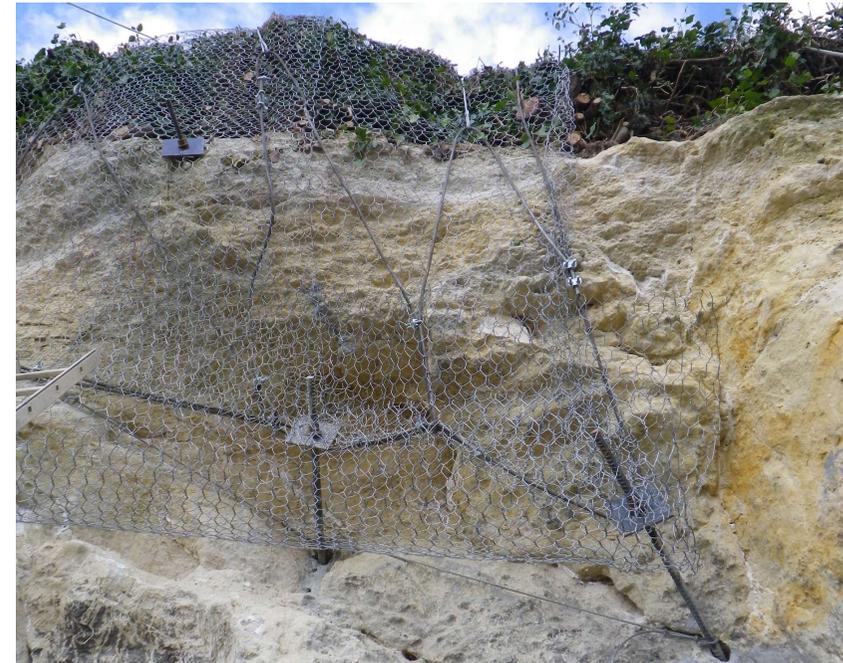
- Rôle **négatif** ou **positif**.



# Facteurs d'instabilité

## Facteurs externes :

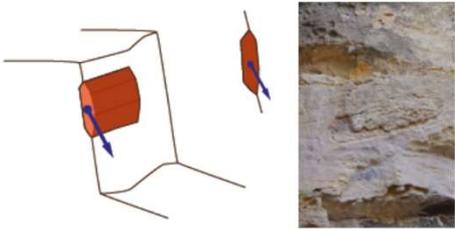
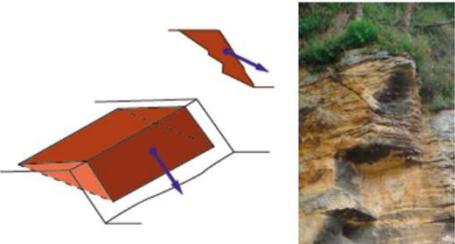
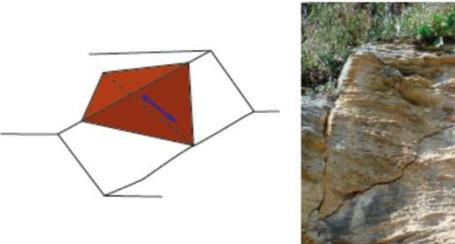
- / La faune
- / Les mauvaises pratiques anthropiques
  - Terrassement en pied de versant ;
  - Surcharge statique ;
  - Confortements mal dimensionnés et/ou mal réalisés et/ou non entretenus ;
  - Vibrations ;
  - Mauvaises pratiques en cavité (suppression d'un pilier, mauvaise ventilation, purge excessive, ...).

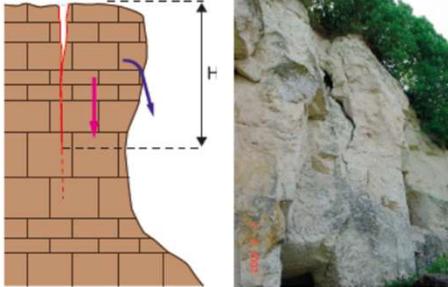
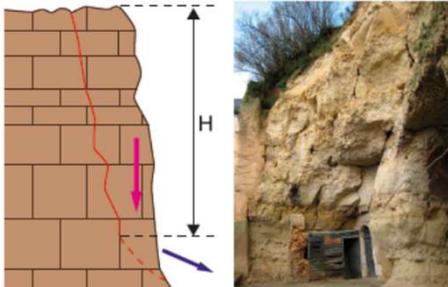


# Typologie des désordres

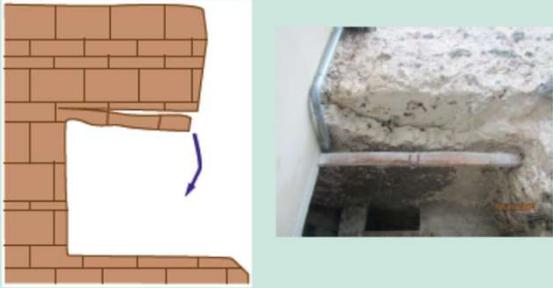
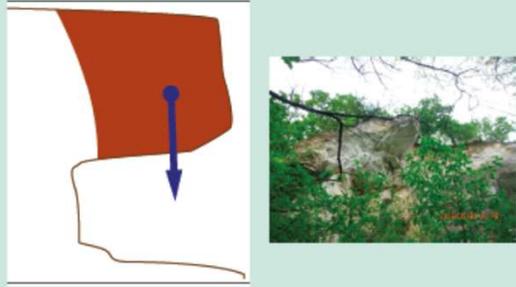


# Mécanismes de rupture (versant)

<p><b>Dégradations superficielles</b></p>		<p>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...</p>	<p>Écaillage, délitage...</p>
<p><b>Glissement plan</b></p>		<p>Mouvement de translation sur une discontinuité plane avec rupture lorsque les forces motrices dépassent la résistance au cisaillement des discontinuités.</p>	<p>Ouvertures de fissures « arrières ».</p>
<p><b>Glissement dièdre</b></p>		<p>Mouvement de translation combinée sur deux discontinuités formant un dièdre, avec rupture lorsque les forces motrices dépassent la résistance au cisaillement des discontinuités.</p>	<p>Ouvertures de fissures arrières et latérales.</p>

<p><b>Basculement de bloc, déversement</b></p>		<p>Processus progressif de déplacement d'une colonne, sous l'effet de la gravité et d'une chute de résistance du pied.</p>	<p>Ouvertures de fissures arrières et latérales. Fissuration de la base, écaillage coté vide. Déformation d'ensemble.</p>
<p><b>Rupture de pied de colonne</b></p>		<p>Rupture avec glissement vers l'extérieur de la base d'une colonne.</p>	<p>Ouvertures de fissures arrières.</p>

# Mécanismes de rupture (cavité)

<p><b>Décollement de dalle de toit (rupture en traction)</b></p>	 <p>The diagram shows a cross-section of a brick wall with a rectangular opening. A blue arrow points downwards from the top edge of the opening, indicating the direction of the tensile force causing the delamination. The photograph shows a similar opening in a real structure, with a concrete slab above it that has partially detached, revealing the internal structure.</p>	<p>Décollement de bancs stratigraphiques du toit, suivi à plus ou moins long terme par une chute de la première dalle du toit.</p>	<p>Indice de décollement, fléchissement des bancs.</p>
<p><b>Rupture en compression d'un pilier</b></p>	 <p>The diagram shows a cross-section of a brick wall with a rectangular opening. The brickwork above the opening is shown with vertical cracks, indicating failure under compression. The photograph shows a real pillar in a cave or underground structure, which is heavily eroded and shows signs of structural failure.</p>	<p>Écrasement par excès de contrainte : pilier soumis à une charge excédant la résistance à la compression du matériau le constituant.</p>	<p>Dégradation du pilier (écaillage, fissures, forme de diablo...), rupture brutale.</p>
<p><b>Rupture de surplomb</b></p>	 <p>The diagram shows a red rectangular block representing an overhang. A blue arrow points downwards from the center of the block, indicating the direction of the force causing the failure. The photograph shows a real overhang of a rock mass, which has fractured and is falling away from the main rock face.</p>	<p>Rupture par traction et cisaillement d'une masse rocheuse en surplomb.</p>	<p>Peu perceptible à l'examen visuel. Fracture de décompression active.</p>

Données de base nécessaires pour déterminer l'aléa :

- / PÉRIMÈTRE DE L'ÉTUDE (cartographie informative à l'échelle du département, étude d'aléa à l'échelle de la commune, étude de projet à la parcelle)
- / Collecte et analyse des données existantes
  - **Phase informative importante ;**
  - Ne négliger aucune source (archives, inventaires locaux et nationaux, les services spécialisés, les associations...);
  - Les enquêtes sur site.
- / Acquisition et analyse de nouvelles données
  - Les données de terrain (reconnaissance du site [facteurs internes et externes]) ;
  - La photo-interprétation, photogrammétrie, scanner laser 3D, des essais laboratoire, des outils de calculs...
- / Restitution cartographique
  - Carte informative.

# Evaluation de l'aléa versant rocheux sous-cavé

L'interaction entre l'aléa « versant rocheux » et l'aléa « cavité souterraine » a une **influence sur la stabilité mécanique** :

- / Par rapport à l'aléa « versant rocheux » : dans une falaise classique, **forte concentration de contraintes en pied** (présence d'une excavation modifie 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.

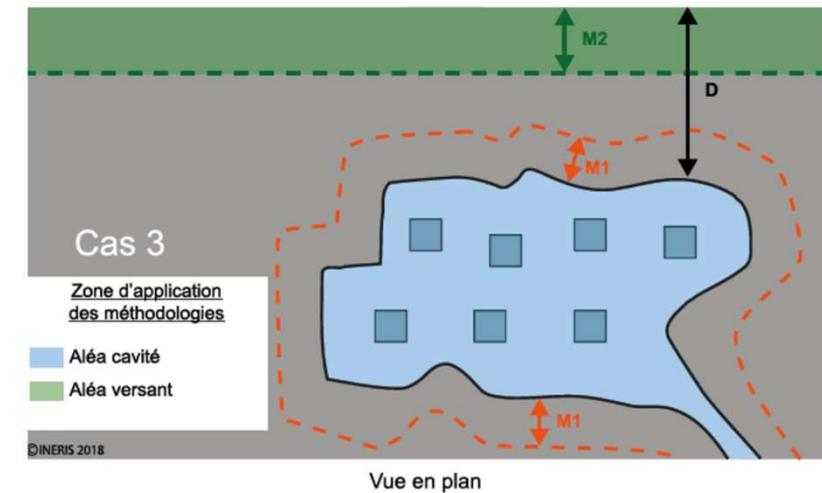
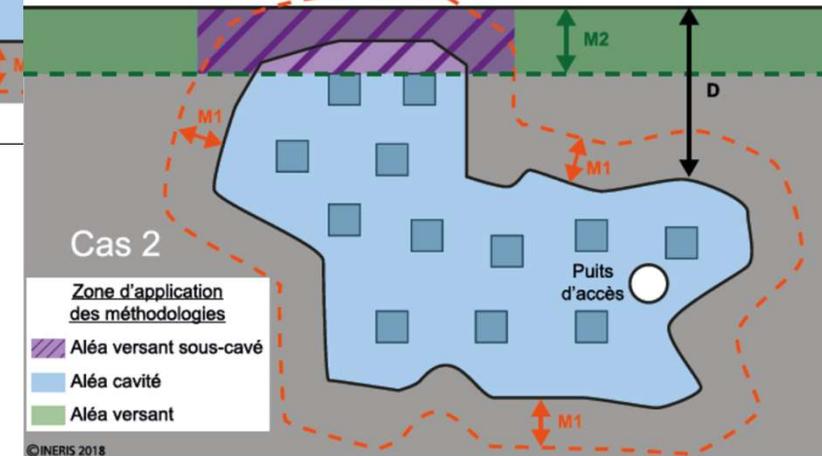
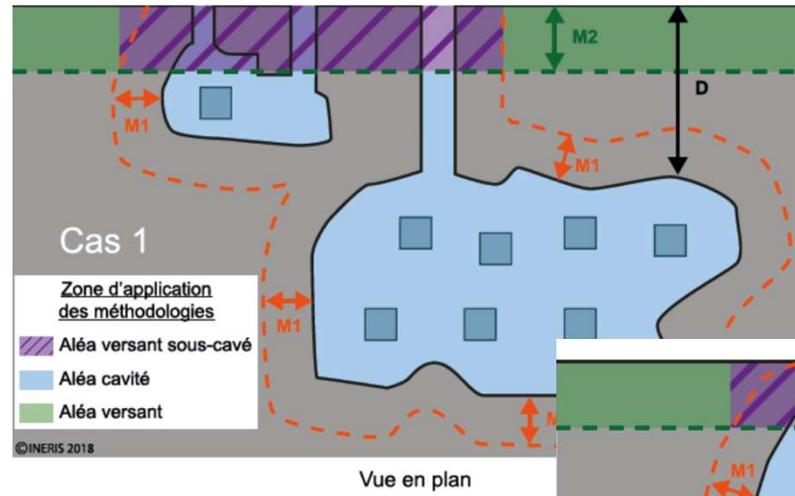
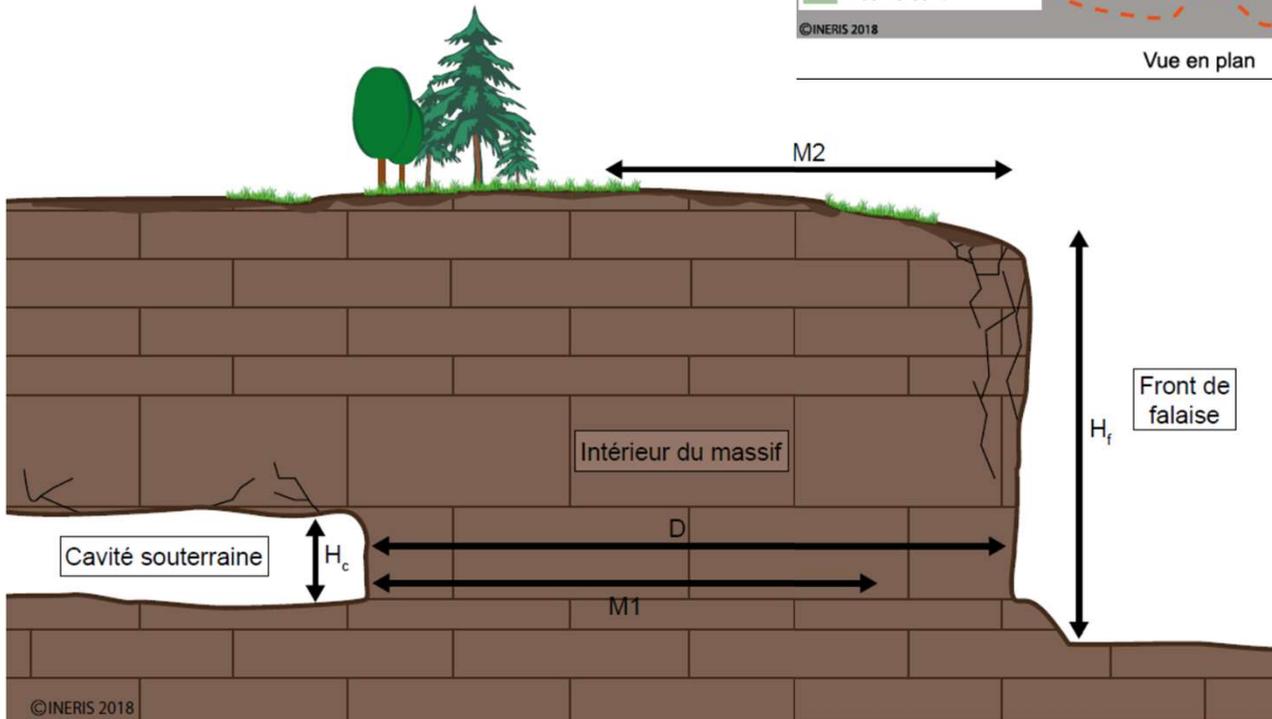
Application de la méthodologie :

- / 1<sup>er</sup> étape : **découper en tranches** le site, chaque tranche ayant des caractéristiques communes ;
- / 2<sup>ème</sup> étape : vérifier qu'il existe une **interaction**.

# Evaluation de l'aléa versant rocheux sous-cavé

Distance d'influence M1 et M2 :

- /  $D=0$
- /  $D \neq 0$  et  $D < M1+M2$
- /  $D \neq 0$  et  $D > M1+M2$



## Hauteur des éléments instables observables sur le front :

- / Inférieure à 5 m ;
- / Entre 5 et 10 m ;
- / Entre 10 et 15 m ;
- / Supérieure à 15 m.

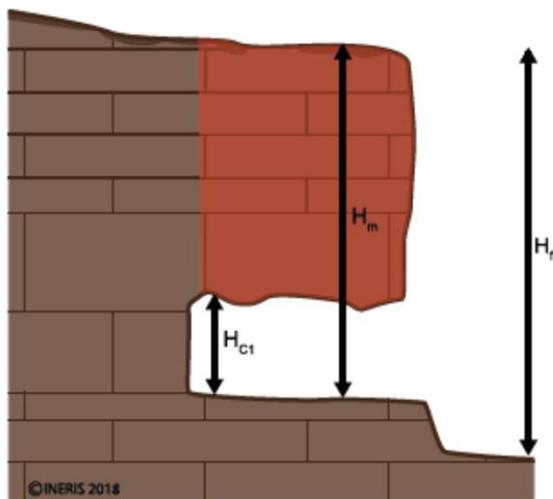
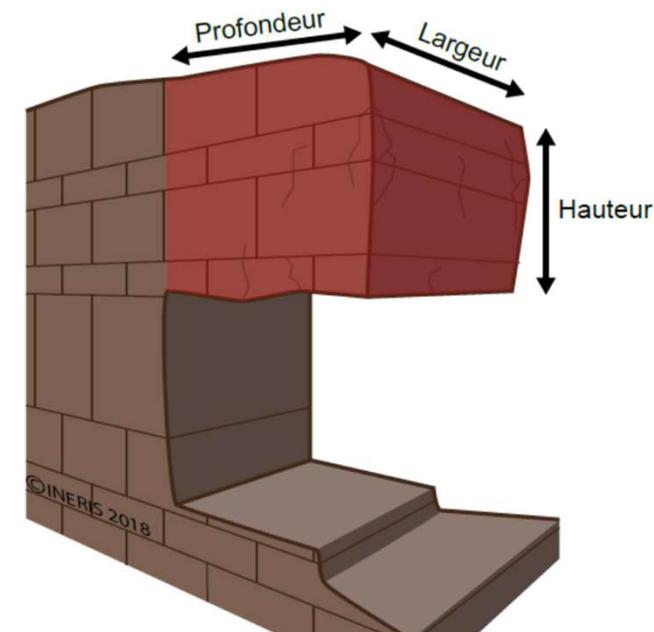
## Volume des éléments instables observables sur le front :

- / Pas d'élément instable visible ;
- / Pierres et petits blocs ( $< 1 \text{ dm}^3$ ) ;
- / Blocs ( $1 \text{ dm}^3$  à  $1 \text{ m}^3$ ) ;
- / Gros blocs ( $1 \text{ m}^3$  à  $10 \text{ m}^3$ ) ;
- / Masses ( $>10 \text{ m}^3$  et jusqu'à plusieurs centaines de  $\text{m}^3$ ).

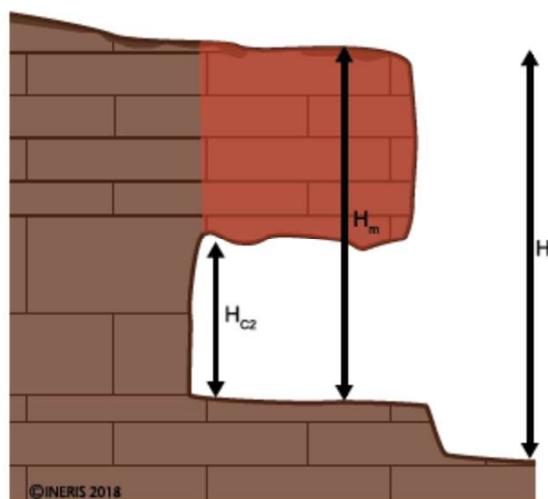
# Caractérisation de l'intensité

Volume de matériaux potentiellement mobilisables :

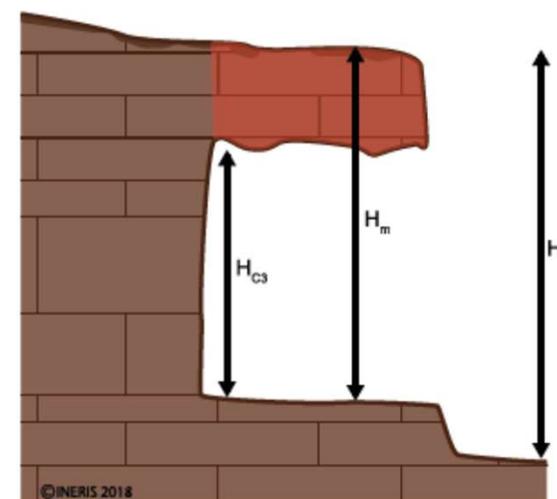
Rapport $H_c/H_m$	Volume estimé de matériaux mobilisables
Supérieur à 2/3	Faible
Entre 2/3 et 1/3	Moyen
Inférieur à 1/3	Important



Vue en coupe



Vue en coupe



Vue en coupe

# Caractérisation de l'intensité

Intensité		Volume des éléments instables sur le front					Volume de matériaux mobilisables (au-dessus de la cavité)
		Pas d'élément instable visible	Pierres moins (<dm <sup>3</sup> )	Blocs (de 1 dm <sup>3</sup> à 1 m <sup>3</sup> )	Gros blocs (de 1 m <sup>3</sup> à 10m <sup>3</sup> )	Masse (> 10m <sup>3</sup> )	
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

Annotations : 1 (sur la cellule 5-10m, Pierres moins), 2 (sur la cellule +15m, Important), 3 (sur la cellule +15m, Modérée).

# Caractérisation de la probabilité d'occurrence

## Activité du massif :

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

## Facteurs aggravants :

- / Nature
- / Association

Niveau de cotation	Facteurs aggravants observés
<b>Aucun</b>	Bonnes pratiques anthropiques
<b>1</b>	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)
<b>2</b>	Eau ou confortement en mauvais état
<b>3</b>	Plusieurs facteurs aggravants qui se superposent ou mauvaise pratique anthropique

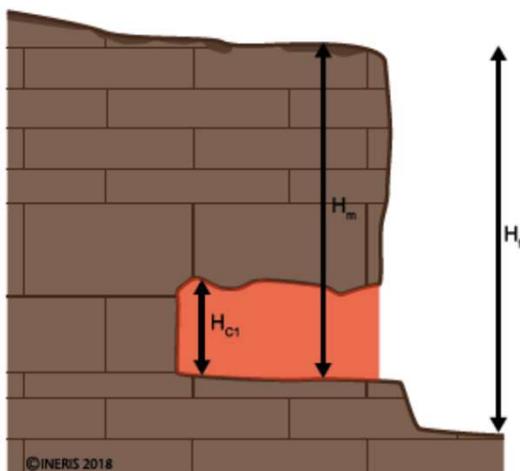
# Caractérisation de la probabilité d'occurrence

## Etat de stabilité et volume de la cavité :

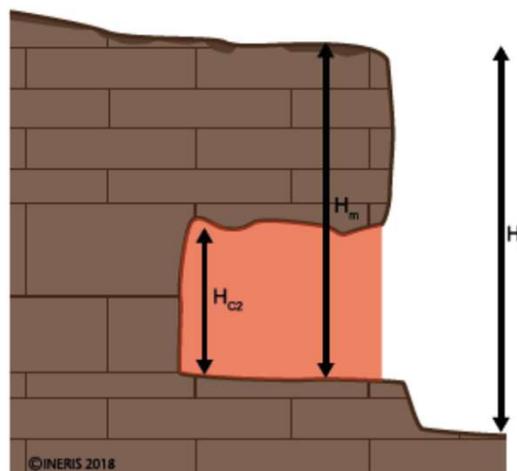
### / Etat de stabilité :

Cavité stable, Cavité instable, Cavité très instable.

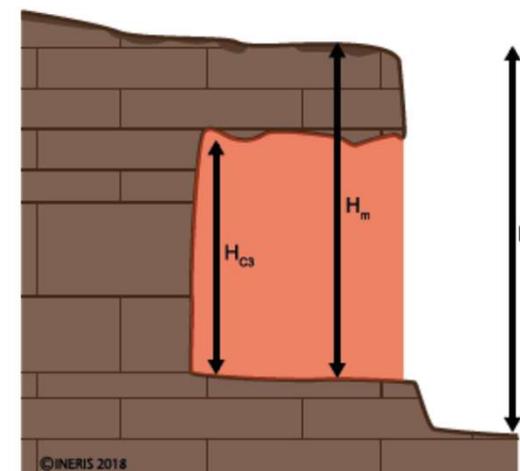
### / Volume de la cavité



Vue en coupe



Vue en coupe



Vue en coupe

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

# Caractérisation de la probabilité d'occurrence

Influence de la cavité :

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

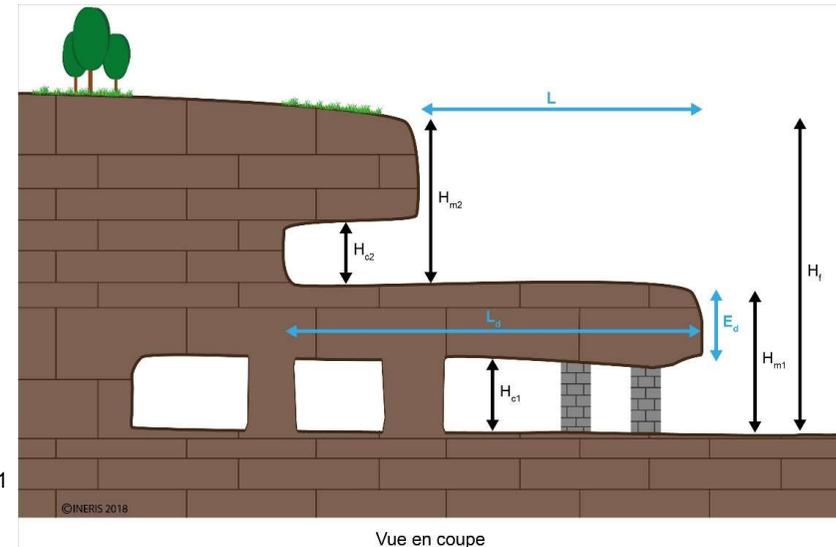
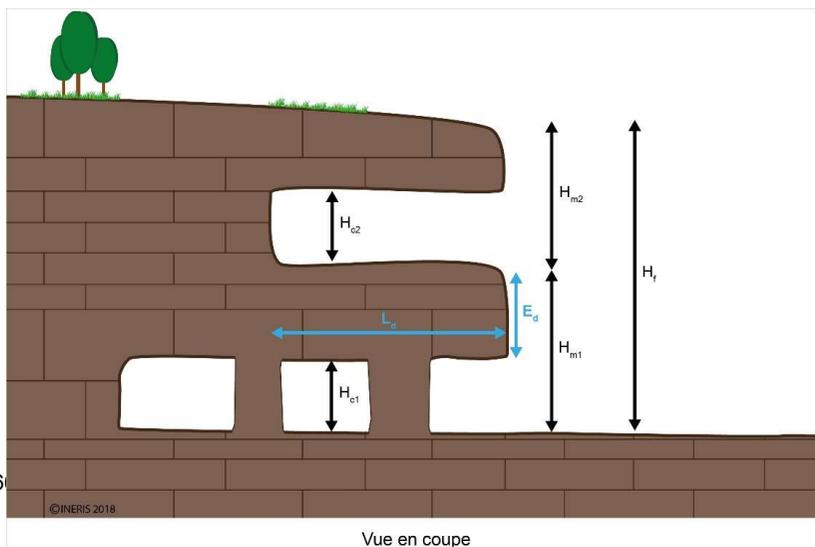
Prédisposition		Niveau de cotation des facteurs aggravants			Influence de la cavité
		1	2	3	
Activité du massif	Dormant	Peu sensible	Peu sensible	Sensible	Très faible
	Inactif ou peu actif	Peu sensible	1 Sensible	Sensible	Faible
	Frais	Sensible	3 Très sensible	Très sensible	Moyen 2
	Actif	Très sensible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

# Caractérisation de l'aléa versant rocheux 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

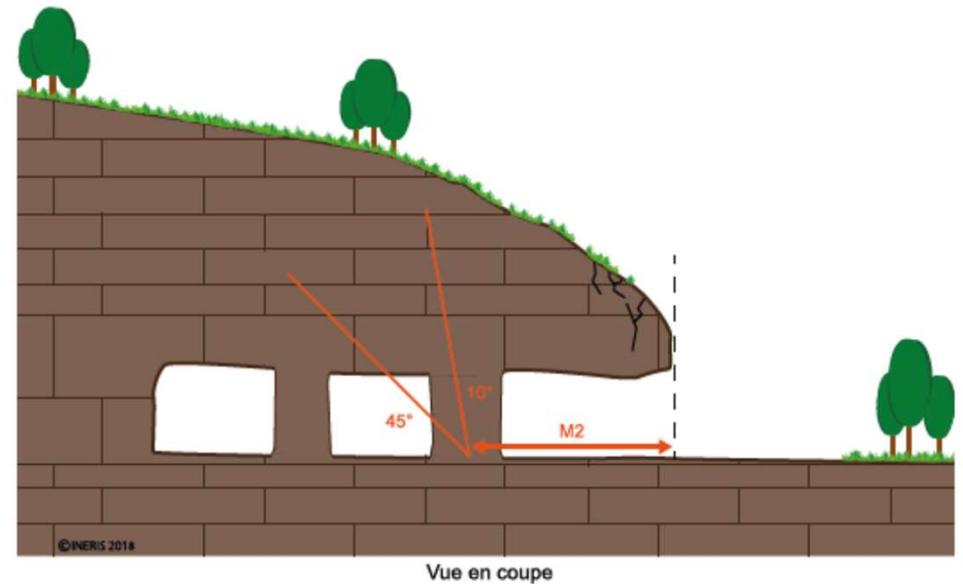
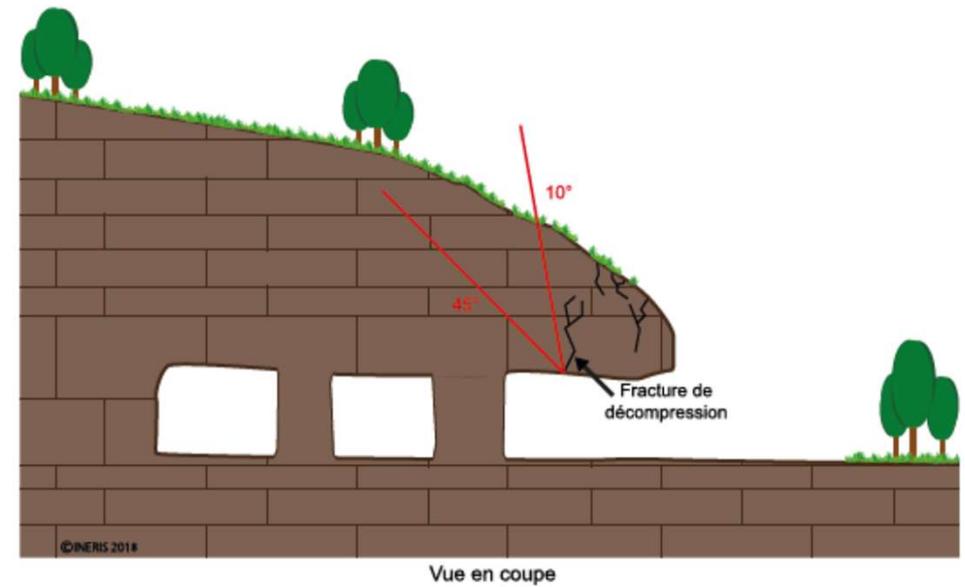
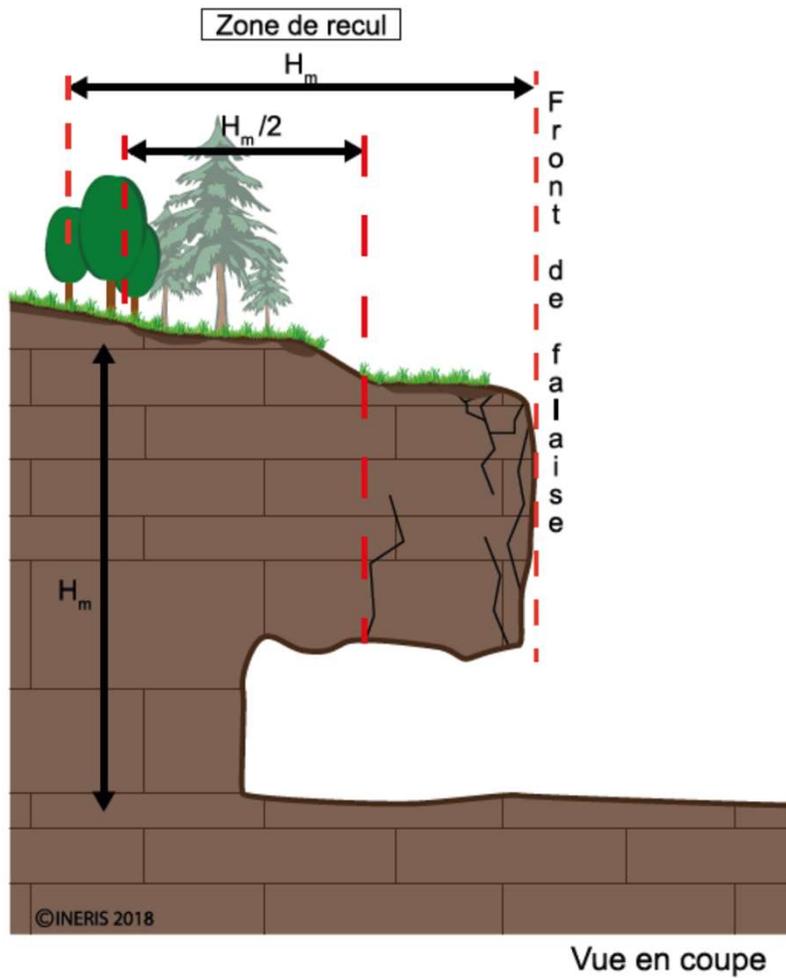
## Cas particulier de multi-cavités : 2 niveaux de cavités

- / Stabilité différenciée de la cavité supérieure et inférieure ;
- / Rôle important de la dalle intermédiaire (épaisseur et portée).



# Extension de la zone d'aléa

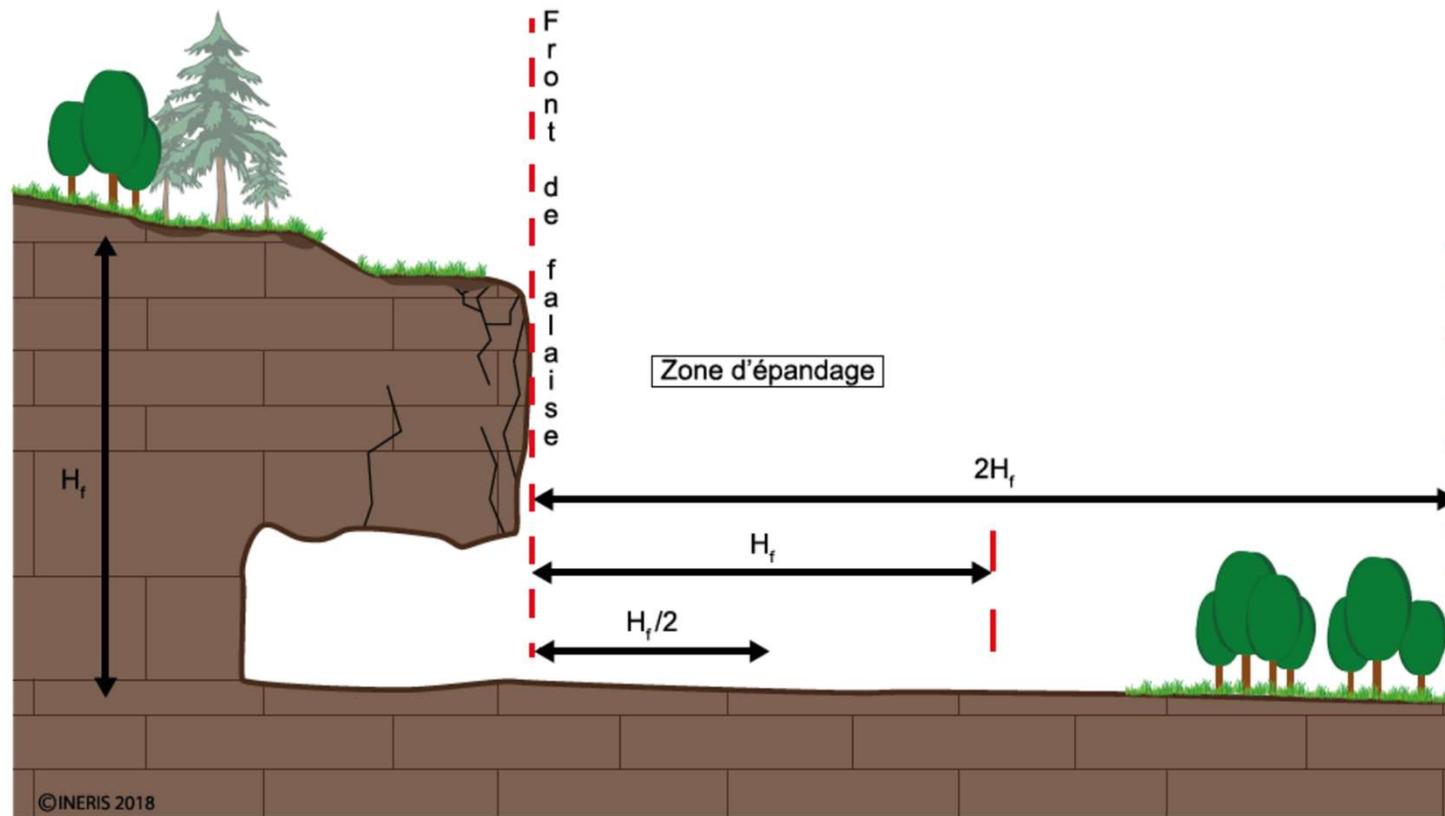
Zone de recul (amont) :



# Extension de la zone d'aléa

## Zone d'épandage (aval) :

- / Configurations A2 et B2 : pente en aval → étude spécifique de propagation ou évènement historique représentatif ;
- / Configurations A1 et B1 : dépend du phénomène attendu.



©INERIS 2018

Vue en coupe

# Extension de la zone d'aléa

	Zone de recul	Zone d'épandage		
	Éboulement du front et de la cavité	Rupture en pied ou Rupture de surplomb ou Glissement	Basculement de blocs ou de colonne rocheuse	Effondrement en masse
Configuration A1	Position de la fracture de décompression + $H_m/2$	$H_f/2$ (+ marge de sécurité) <sup>17</sup>	$H_f$ (+ marge de sécurité) <sup>17</sup>	$2H_f$ (+ marge de sécurité) <sup>17</sup>
Configuration A2	ou Position du versant + $H_m$	Étude spécifique de propagation ou évènement historique représentatif		
Configuration B1	Position de la dernière fracture de décompression ou de la marge M2	$H_f/2$ (+ marge de sécurité)	$H_f$ (+ marge de sécurité) <sup>17</sup>	$2H_f$ (+ marge de sécurité) <sup>17</sup>
Configuration B2	+ angle $\alpha$ de 10° à 45°	Étude spécifique de propagation ou évènement historique représentatif		

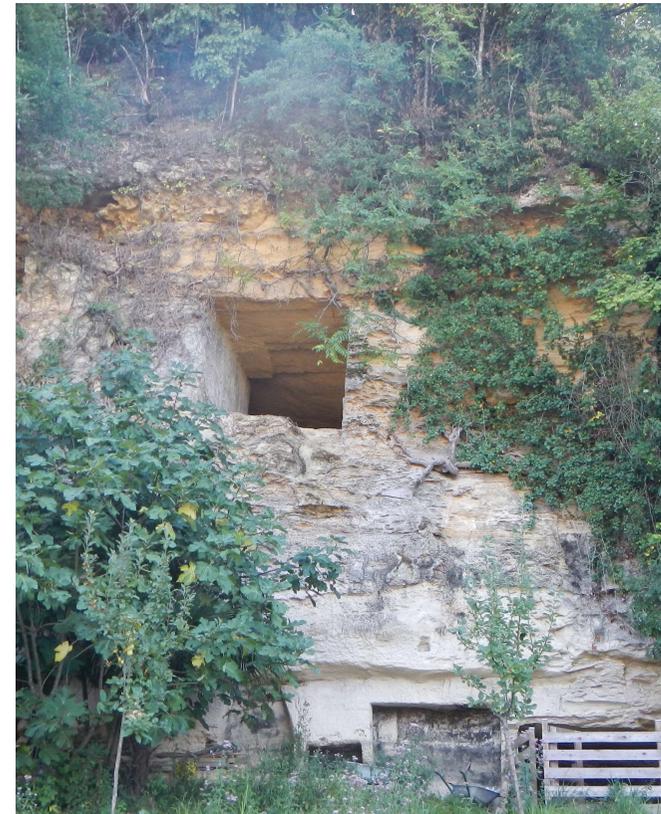
## Apports de ce guide :

- / Description des **désordres et des mécanismes** associés à ce type de site ;
- / Définir une **méthodologie** combinant l'aléa versant rocheux et cavité souterraine ;
- / **Echanges** entre les différents organismes concernés (en tant que participants à la rédaction ou relecteurs) ;
- / **Validation** de la méthodologie sur différents sites (Oise, Yvelines, Gironde) ;
- / Principes énoncés valables pour tous les cas, y compris dans les cas spécifiques ;
- / Proposition de **fiches de terrain**.

## Perspectives :

- / Elaborer un guide sur les **méthodes de mise en sécurité** des versants rocheux sous-cavés.

# Merci pour votre attention !



Pour nous contacter : [auxane.cherkaoui@ineris.fr](mailto:auxane.cherkaoui@ineris.fr) et [nathalie.berenger@cerema.fr](mailto:nathalie.berenger@cerema.fr)

