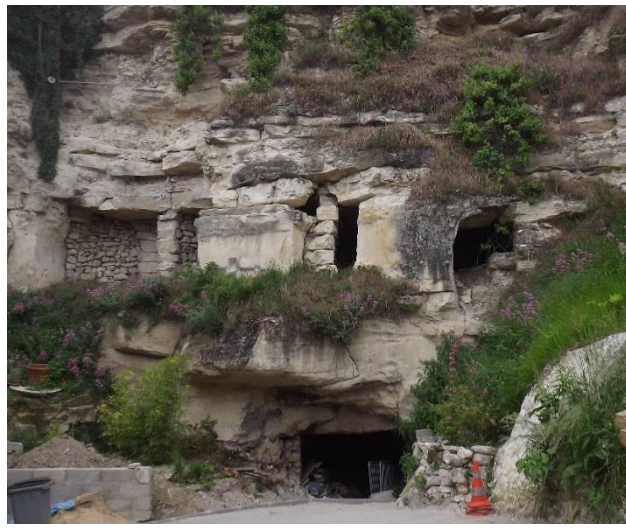




Aléa versant rocheux sous-cavé

Caractérisation et évaluation

[Auxane CHERKAOUI](#), Jean-Marc WATELET



Objectif : Déterminer l'aléa sur ce type de site en prenant en compte la cavité souterraine et le versant (interaction et homogénéité).

Durée d'élaboration : 2016-2018 ;

Partenariat : Cerema-Ineris ;

Relecteurs : Cerema, Ineris, BRGM, BRNT, DDT, Bureau des carrières, Cavités37, ...

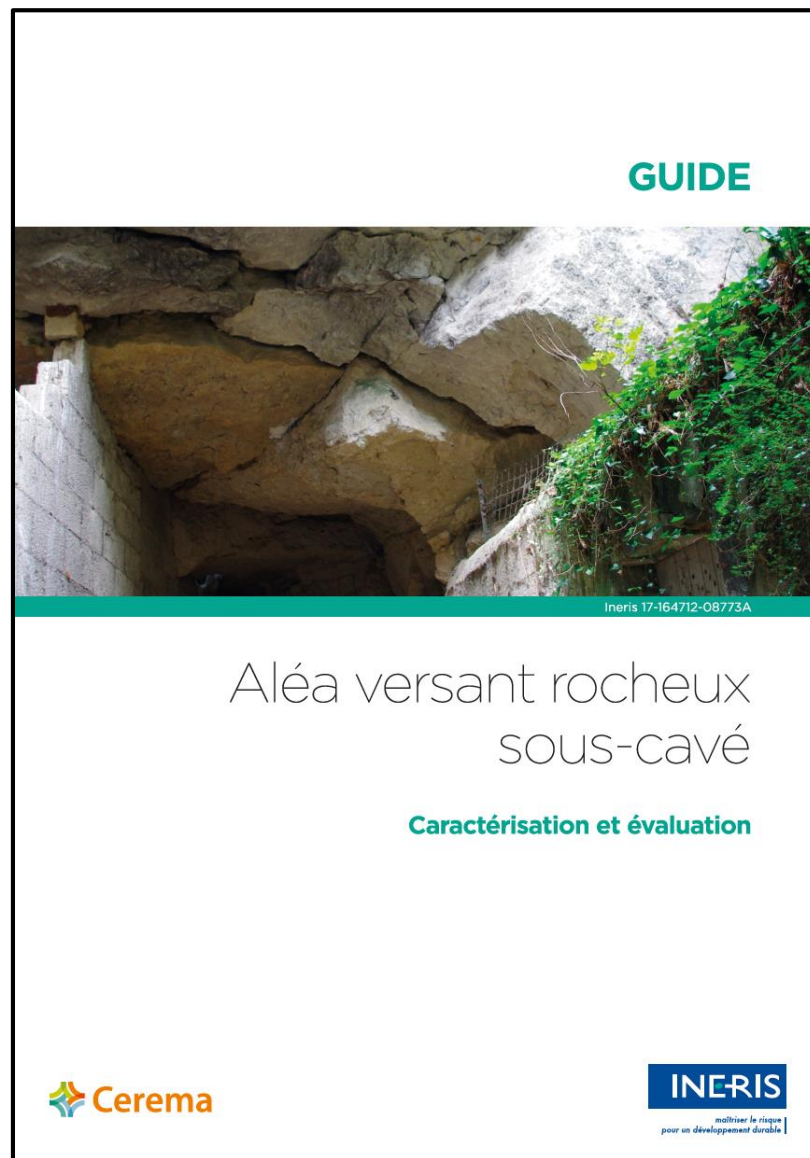
Version téléchargeable : www.ineris.fr

Démarche de validation du guide

- Les études de 3 sites ;
- Les relectures.

Chapitres du guide

- Les versants rocheux sous-cavés : Contexte et problématique
- Configuration et description des désordres et des phénomènes associés
- Recensement et traitement des données nécessaires
- Evaluation de l'aléa



1- Les versants rocheux sous-cavés : Contexte et problématique

Origine et utilisation actuelle

Origine anthropique :

- Troglodytisme horizontal ;
- Troglodytisme de plaine ;
- Carrières souterraines ;
- Tunnels routiers ou ferroviaires.



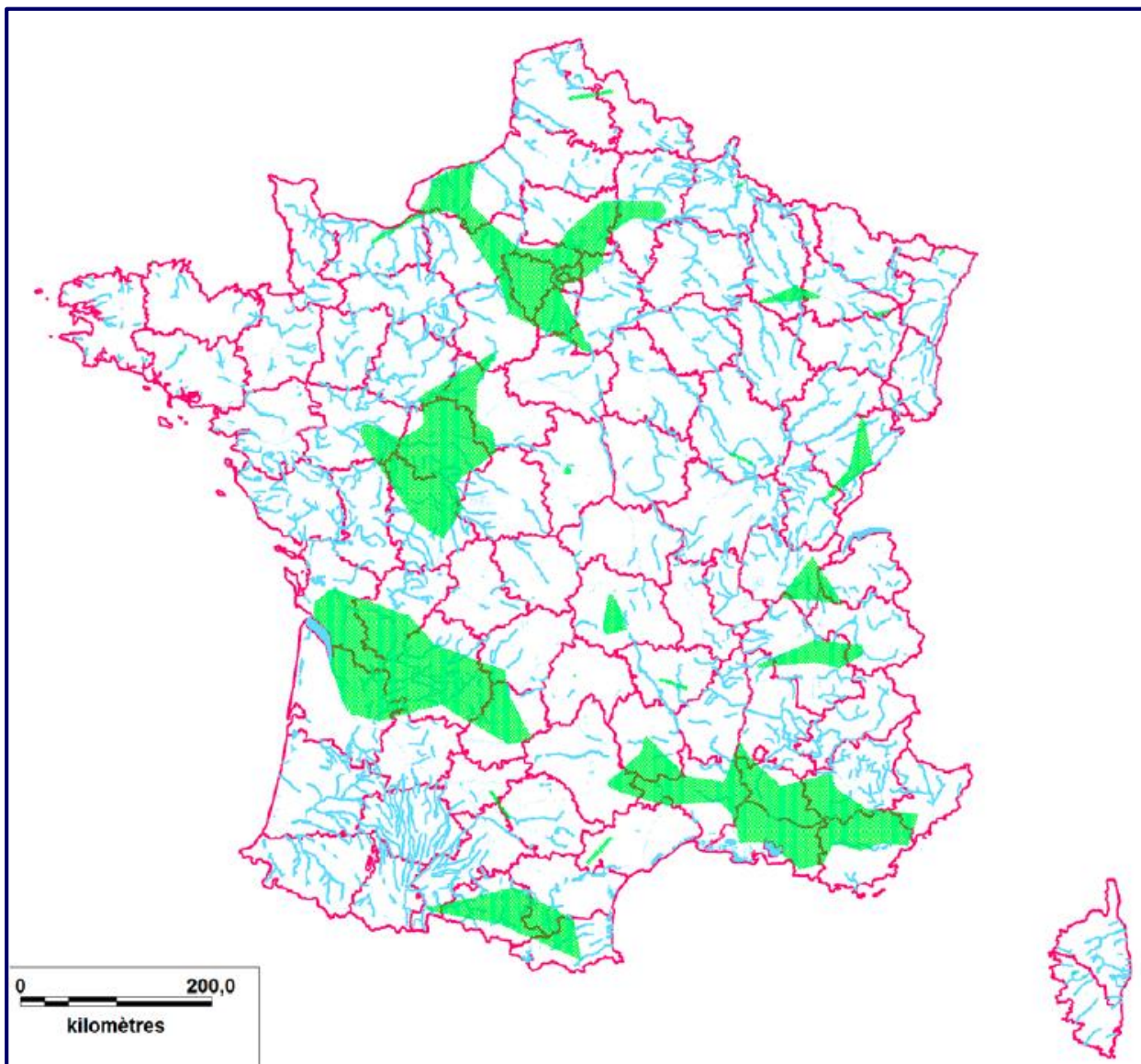
Origine naturelle :

- 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 entraînement des particules fines (entraînement/lessivage de matériaux) ;
- cavités volcaniques : elles se forment en même temps que la roche encaissante du fait de la circulation rapide du magma.



1- Les versants rocheux sous-cavés : Contexte et problématique

Répartition géographique



Territoires privilégiés :

- le Val de Loire,
- la Normandie,
- le bassin Parisien,
- le Sud-Ouest autour des vallées de la Garonne et de la Dordogne,
- le Sud-Est, etc.

Carte géologique :

Les formations carbonatées qui sont concernées : craie, 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.

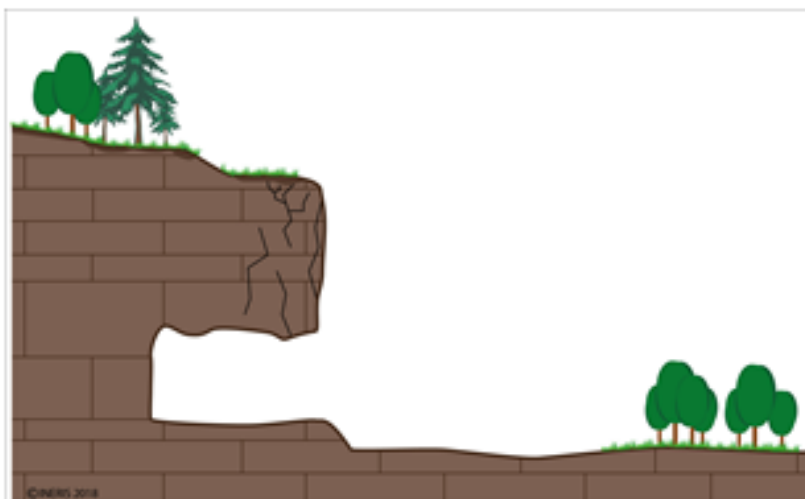
1- Les versants rocheux sous-cavés : Contexte et problématique

Accidentologie



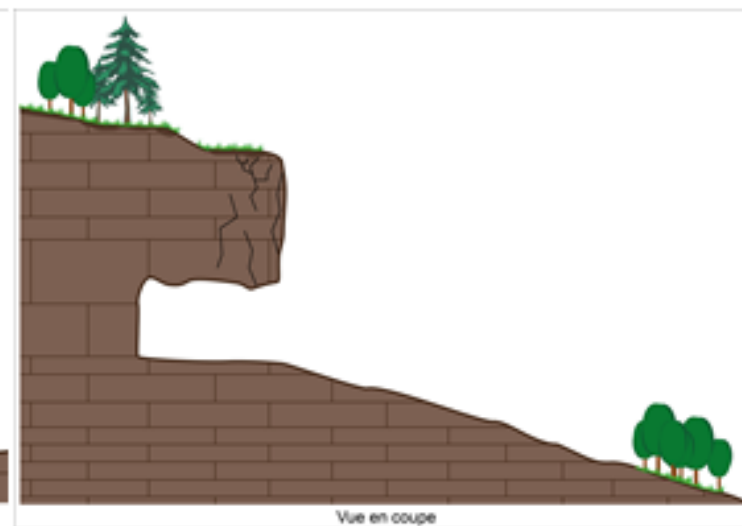
2- Configuration et description des désordres et des phénomènes associés

Type de sous-cavage



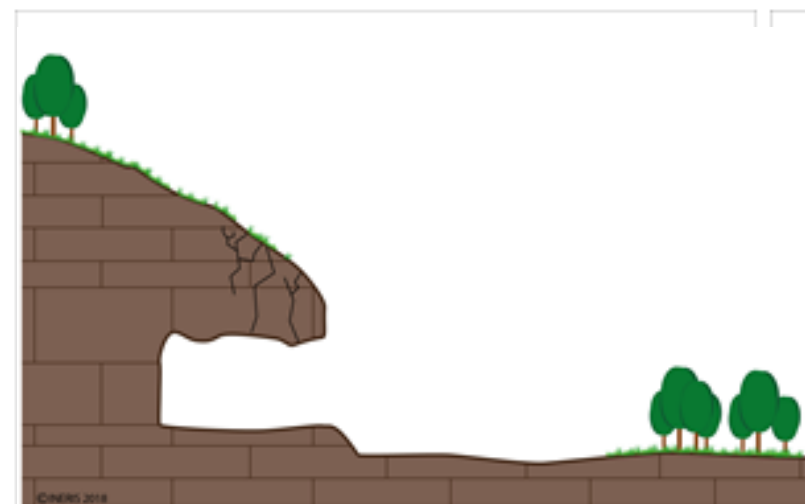
Vue en coupe

Configuration Type A1



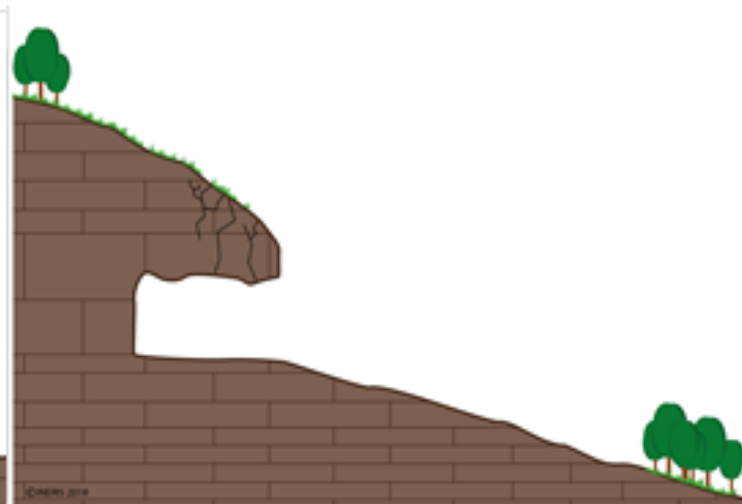
Vue en coupe

Configuration Type A2



Vue en coupe

Configuration Type B1



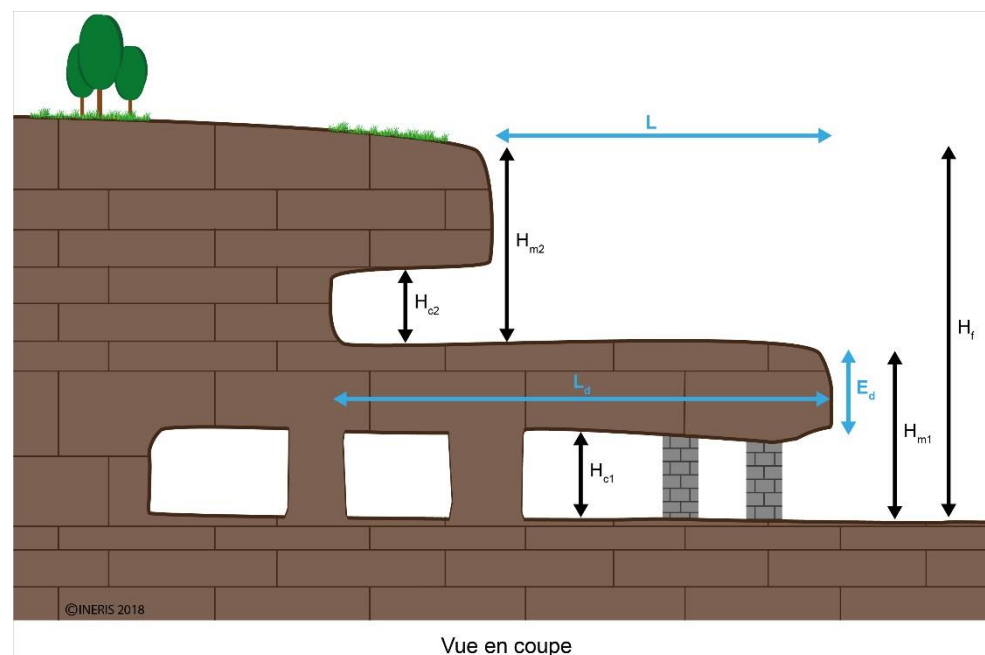
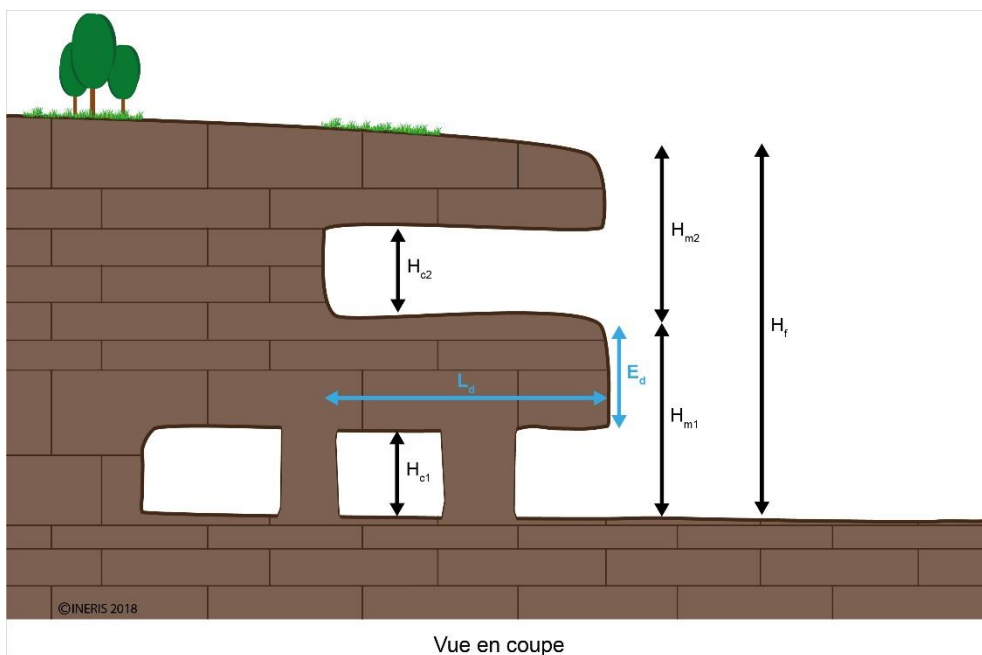
Vue en coupe

Configuration Type B2

Cas particulier des cavités superposées

Cas **multi-cavités** superposés : au départ, il était traité comme un **facteur aggravant**.

Cavités 37 : appui et échanges avec eux pour adapter au cas multi-cavités superposées.



Limites de la méthodologie : la méthodologie ne s'applique pas au-delà de deux niveaux de cavités

Notions ajoutées :

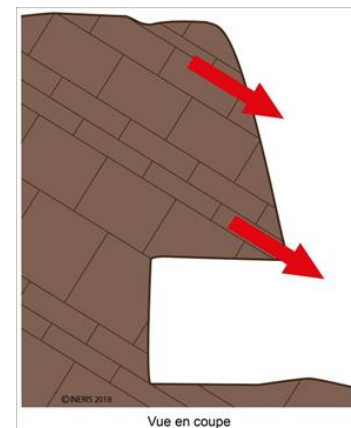
- Stabilité différenciée de la cavité supérieure et inférieure ;
- Rôle important de la dalle intermédiaire (épaisseur et longueur)

2- Configuration et description des désordres et des phénomènes associés

Facteurs d'instabilités

Facteurs internes : facteurs propres au site

- La lithologie du massif : la nature des roches le constituant
- Le contexte structural : pendage des couches et fracturation du massif (longueur, densité, écartement, nature du remplissage, l'humidité, direction et inclinaison...)
- La morphologie du site : caractéristiques géométriques du versant (hauteur, forme, pente, talus en pied...) et de la cavité (géométrie du vide et mode d'extraction)



Facteurs externes : paramètres extérieurs au versant et à la cavité qui aggravent l'instabilité

- L'eau : origine naturelle et anthropique
- Les phénomènes climatiques et naturels : cycle de gel/dégel, variations de température, vent, mouvements de terrain (séisme)
- La végétation : rôle positif et négatif



2- Configuration et description des désordres et des phénomènes associés

Facteurs d'instabilités

Facteurs externes : paramètres extérieurs au versant et à la cavité qui aggravent l'instabilité

- La faune : processus de dégradation ;
- Les mauvaises pratiques anthropiques (terrassement en pied de versant, la surcharge statique, les confortements mal dimensionnés et/ou non entretenus, les vibrations, les mauvaises pratiques en cavité).



2- Configuration et description des désordres et des phénomènes associés

Typologie des désordres



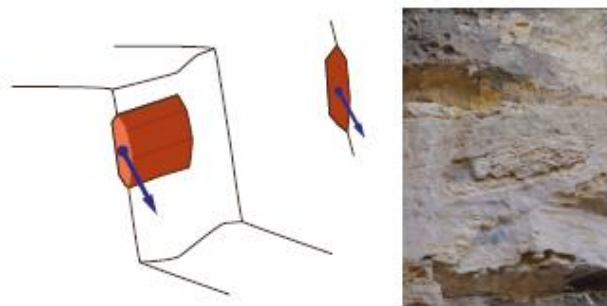
- a) les chutes de pierres et de petits blocs** : les volumes concernés sont inférieurs ou de l'ordre du décimètre cube ;
- b) les chutes de blocs** : les volumes concernés sont supérieurs au décimètre cube mais restent inférieurs au mètre cube ;
- c) les chutes de gros blocs** : les volumes concernés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



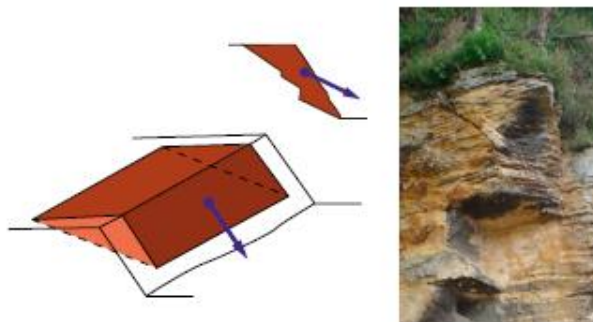
2- Configuration et description des désordres et des phénomènes associés

Mécanismes de rupture

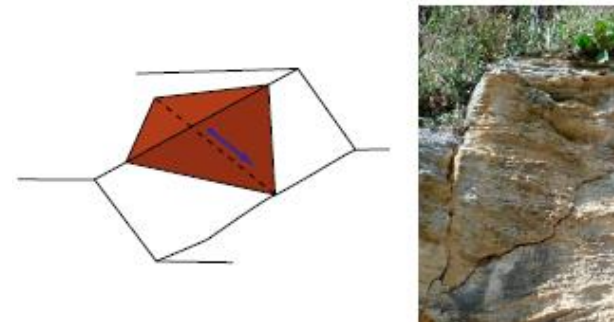
Dégradation superficielle



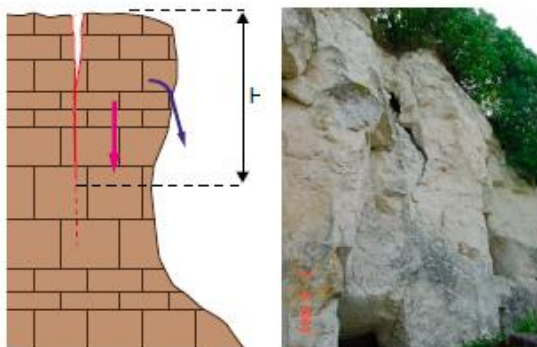
Glissement plan



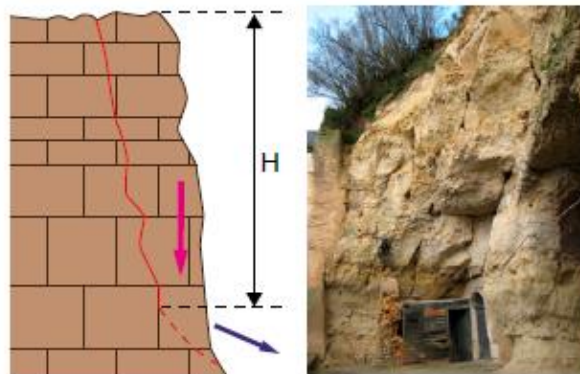
Glissement dièdre



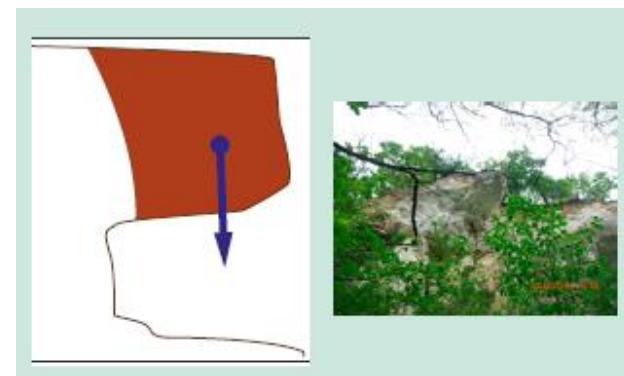
Basculement de bloc



Rupture de pied de colonne



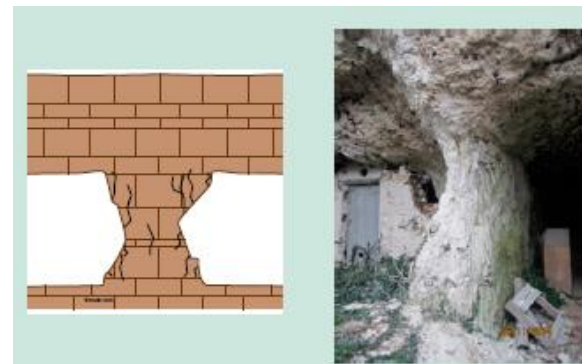
Rupture de surplomb



Décollement de la dalle de toit



Rupture en compression d'un pilier



3- Recensement et traitement des données nécessaires à l'évaluation de l'aléa

Type d'étude possible et données nécessaires

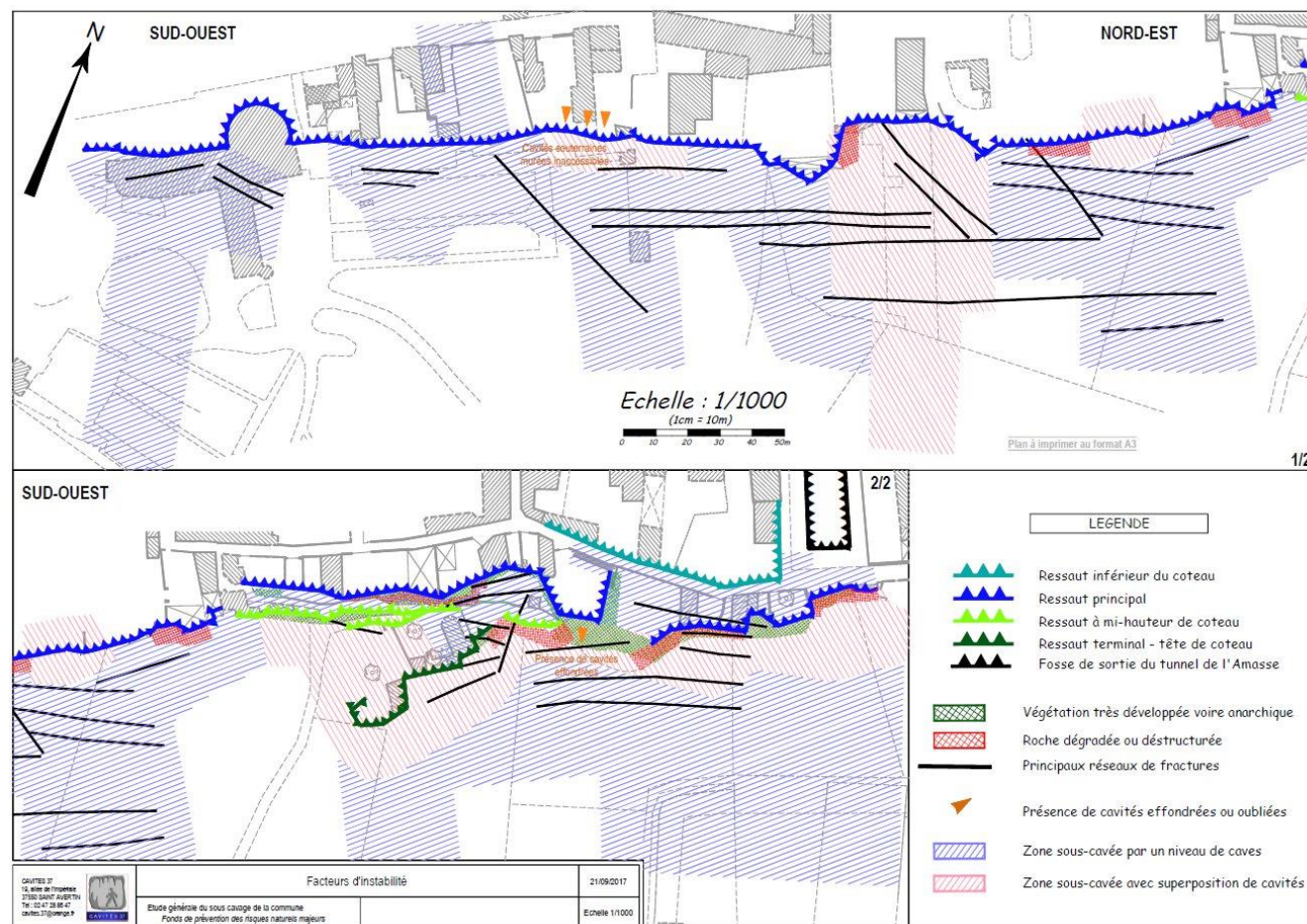
Cadre : étude d'aléa à l'échelle d'une commune ou de plusieurs communes (en vu de PPRn, DICRIM, PAC, PLU, CC...)

Collecte et analyse des données existantes : les inventaires locaux et nationaux, les archives, les organismes spécialisés, la presse, internet, musées, locaux,...

Acquisition et analyse de nouvelles données : la photo-interprétation, les données de terrain, scanner laser 3D ou lidar, photogrammétrie, propriétés du massif, (fiches de terrain)

Restitution cartographique

Phase informative : étape indispensable à la qualité de l'évaluation d'aléa !

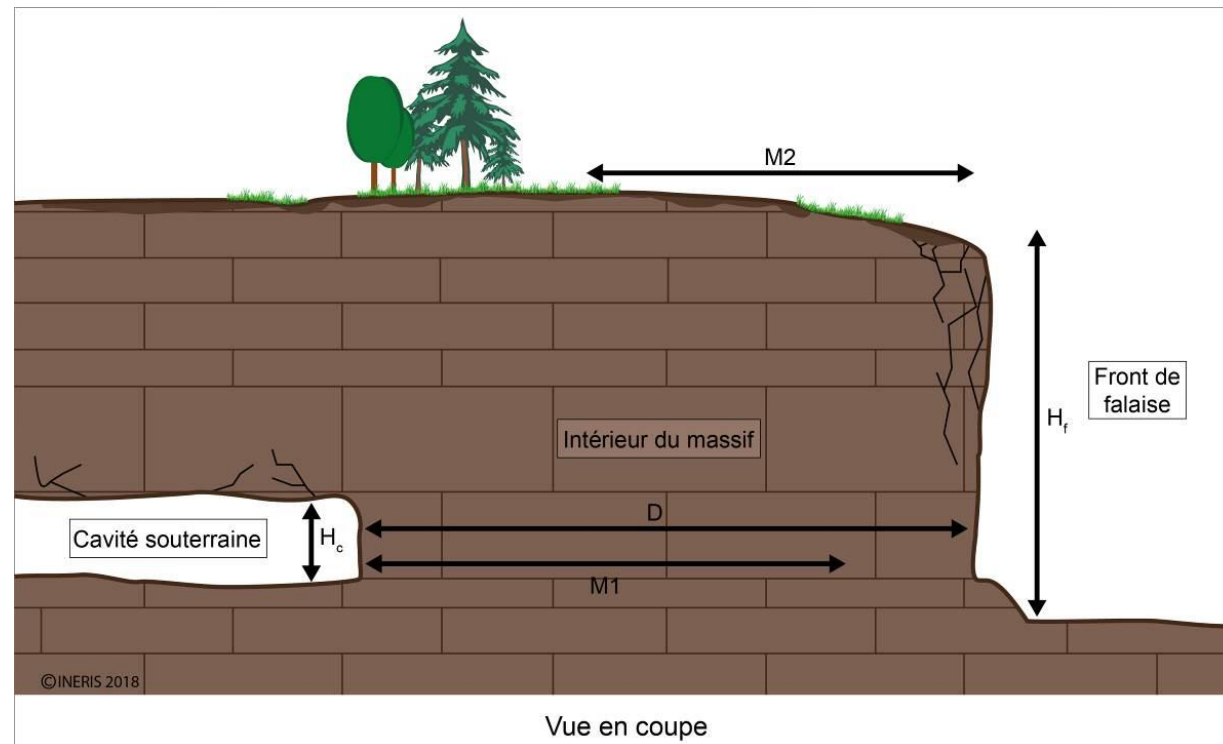


4- Evaluation de l'aléa versant rocheux sous-cavé

Généralités

Méthodologie adaptée appropriée :

- dans une falaise classique quasi-verticale : forte concentration de contraintes en pied. La présence d'une excavation à cet endroit modifie complètement et défavorablement l'équilibre mécanique ;
- 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.



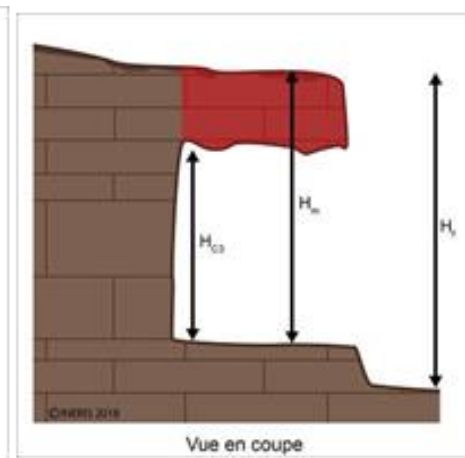
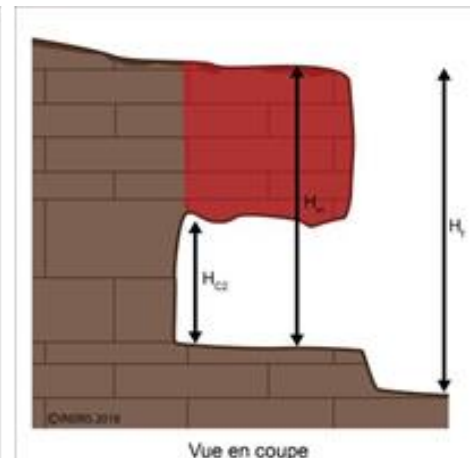
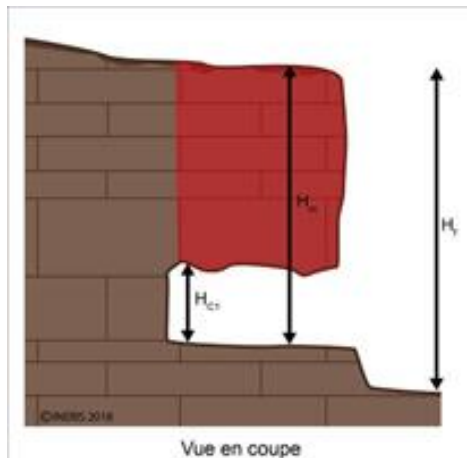
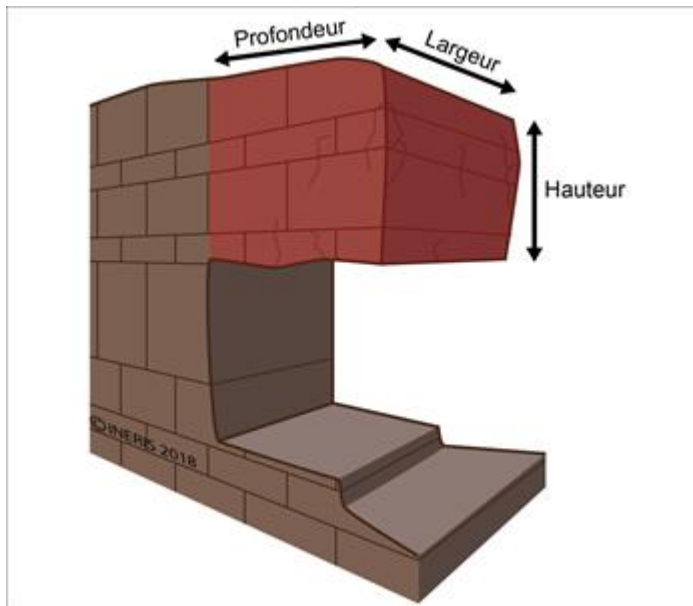
Caractérisation de l'intensité de l'aléa

- 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 ($<1 \text{ dm}^3$) ;
 - blocs (1 dm^3 à 1 m^3) ;
 - gros blocs (1 m^3 à 10 m^3) ;
 - masses (supérieur à 10 m^3 et jusqu'à plusieurs centaines de m^3).



Caractérisation de l'intensité de l'aléa

- le **volume de matériaux mobilisables** : 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.



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

Caractérisation de l'intensité de l'aléa

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 ³)	Blocs (de 1 dm ³ à 1 m ³)	Gros blocs (de 1 m ³ à 10 m ³)	Masse (> 10 m ³)	
Hauteur des éléments instables sur le front	0-5m	Très limitée	Très limitée	Limitée	Limitée	Modérée	Faible
	5-10m	Très limitée	Très limitée	Limitée	Modérée	Elevée	
	10-15m	Limitée	Limitée	Modérée	Élevée	Elevée	Moyen
	+ 15m	Limitée	Modérée	Élevée	Élevée	Elevée	Important

Cas 1 : Éléments instables (pierres) à 4 m de hauteur. La hauteur totale du versant est de 10 m et une cavité à la base du versant de 2 m de hauteur. Ratio H_c/H_m est de 0,2 : le volume des matériaux mobilisables est important.

Cas 2 : Éléments instables (gros blocs) à 11 m de hauteur. La hauteur totale du versant est de 12 m et une cavité à la base du versant de 8 m de hauteur. Ratio H_c/H_m est de 0,75 : le volume des matériaux mobilisables est faible.

Caractérisation de la probabilité d'occurrence

le niveau d'activité du massif : qualifier l'aspect et la fraîcheur apparente des structures rocheuses

- **les traces morphologiques** : la fraîcheur des faces de blocs en paroi, la présence d'éboulis récents, des déplacements de blocs, des écaillages superficiels, etc. ;
- **les traces mécaniques** : l'évolution d'une fracturation d'ordre mécanique, ouverture de fissures, etc. ;
- **les atteintes aux infrastructures ou à l'environnement** : des fissures ou des ruptures de clôtures, de murets ou de murs, des dégradations mécaniques sur le bâti ou des atteintes sur l'environnement comme le basculement d'arbres et la désorganisation de réseaux...

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

Caractérisation de la probabilité d'occurrence

les facteurs aggravants :

Selon la nature des facteurs et leur association, ils favorisent de manière plus ou moins importante la déstabilisation : critères de cotation qui attribuent une note aux facteurs aggravants observés. L'occurrence du phénomène va dépendre de la note attribuée.

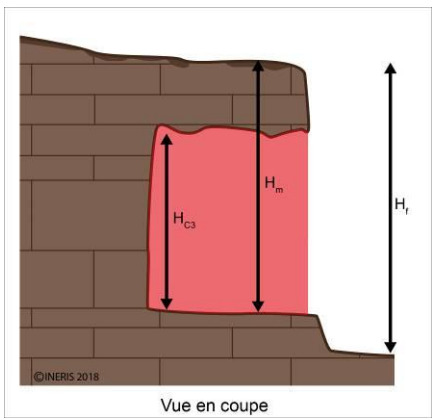
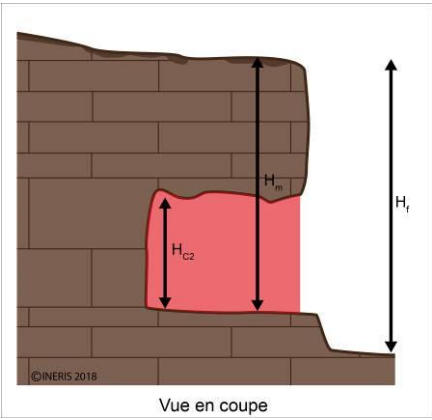
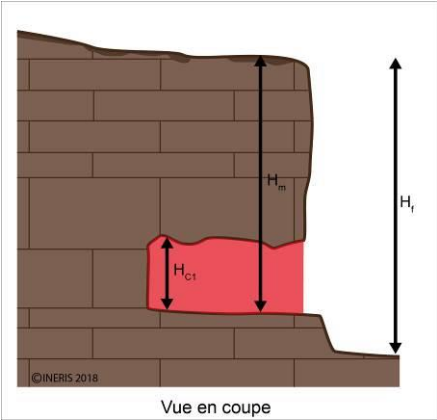
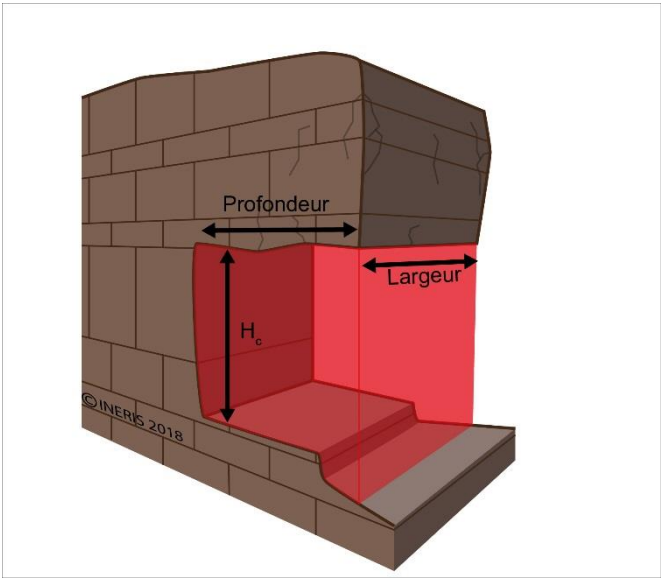
Niveau de cotation	Facteurs aggravants observés
Aucun	Bonnes pratiques anthropiques
1	Végétation défavorable (racines pivotantes, arbres) ou présence de traces liées à la faune (terriers, écaillage du massif par des oiseaux) ou phénomène climatique défavorable (vent, gel/dégel, variation de température)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

l'état de stabilité et le volume de la cavité :

Stabilité de la cavité

- **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 ;
- **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 déboussures partiels de karst ou de puits remblayés à proximité du versant, décollement faible de dalle de toit (rupture en traction) ;
- **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 déboussures importants de karst ou de puits remblayés à proximité du versant, décollement important de la dalle de toit (rupture en traction) ;

le volume de la cavité



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

Croisement de l'état de stabilité avec le volume des vides

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

Caractérisation de la probabilité d'occurrence

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	Sensible	Sensible	Faible
	Frais	Sensible	Très sensible	Très sensible	Moyen
	Actif	Très Sensible	Très sensible	Très sensible	Elevée

Evaluation de l'aléa

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

Avantage de la méthodologie :

- Mise en œuvre simple ;
- Aléa obtenu réaliste ;
- Applicable sur de nombreux sites.

Cas d'études : 3 sites naturels

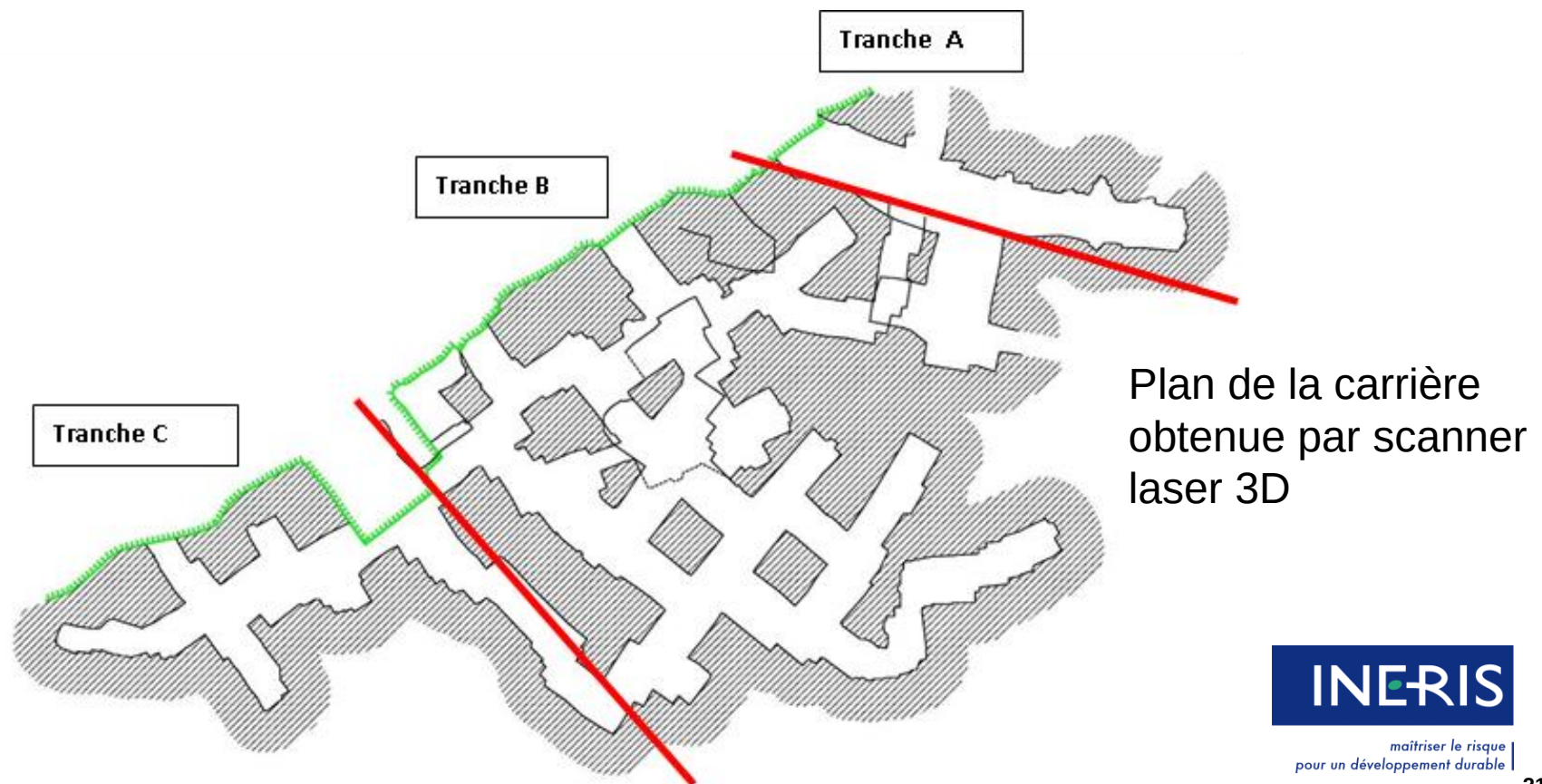
Versant sous-cavé dans l'Oise : site troglodytique ;

Versant sous-cavé dans les Yvelines : entrée d'une carrière souterraine ;

→ **Intensité de l'aléa** : Ajustement des classes pour le paramètre « Hauteur des éléments instables »

Versant sous-cavé en Gironde : cas complexe (cavité simple et multi-cavités superposées)

→ **Découpage en plusieurs tranches**

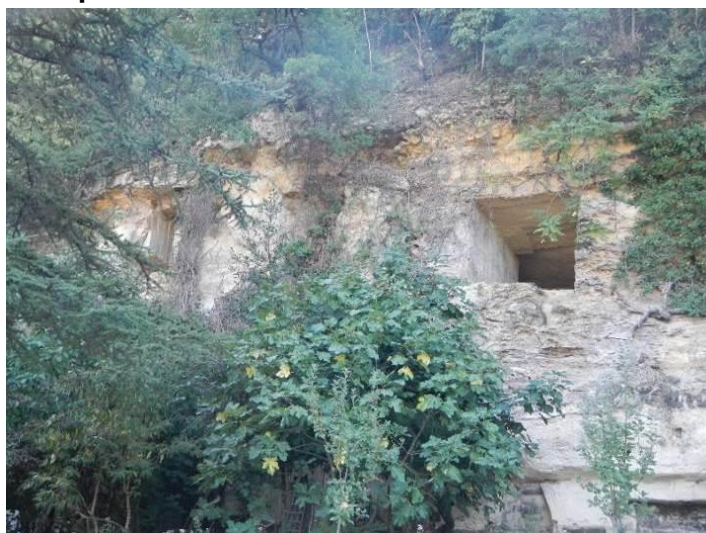


Versant sous-cavé en Gironde

Tranche A : hauteur du versant de 14 m, hauteur de la cavité de 12 m, présence de fractures.



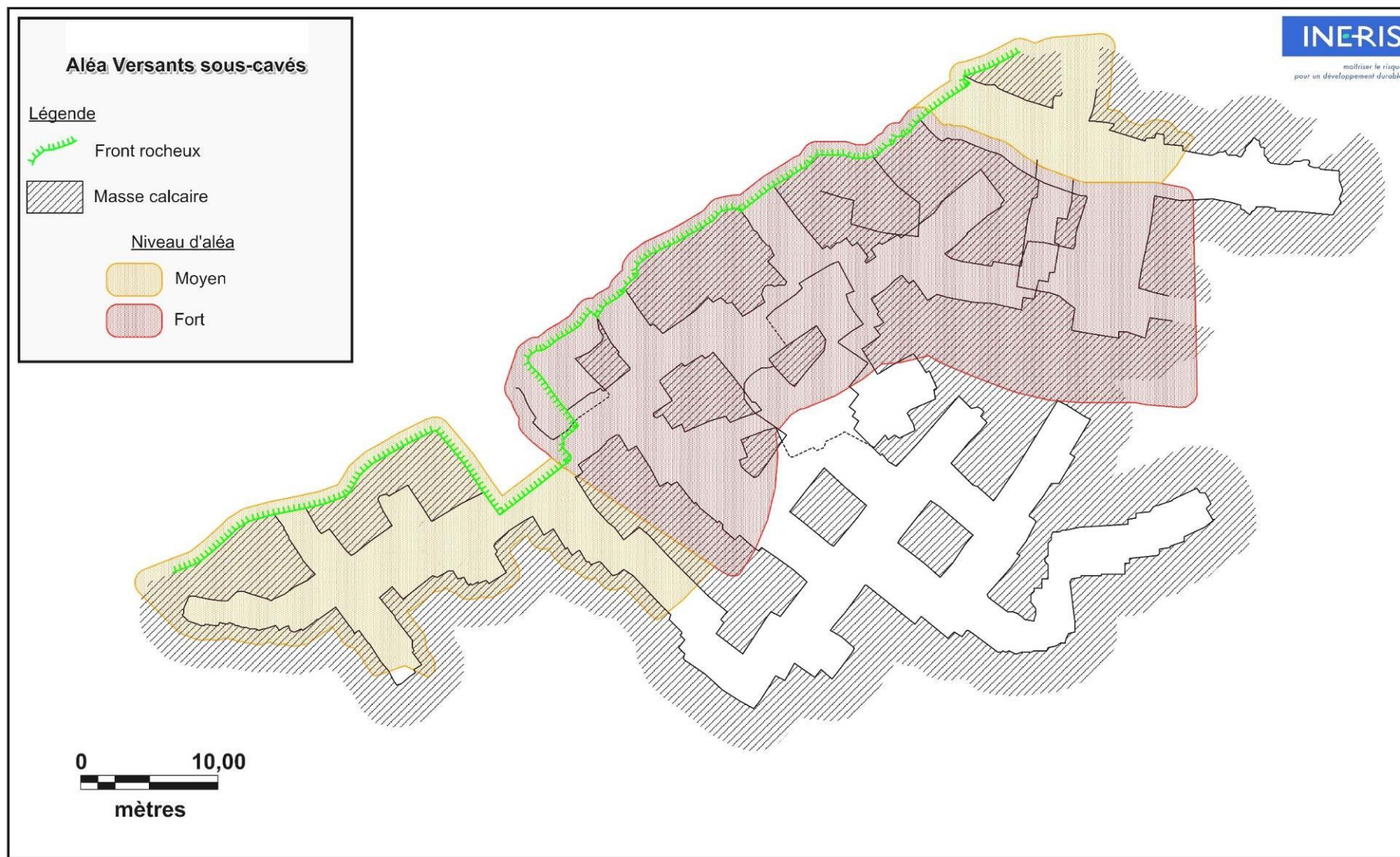
Tranche B : hauteur du versant de 15 m, hauteur de la cavité de 3 m, cavités superposées par endroit, présence de fractures importantes.



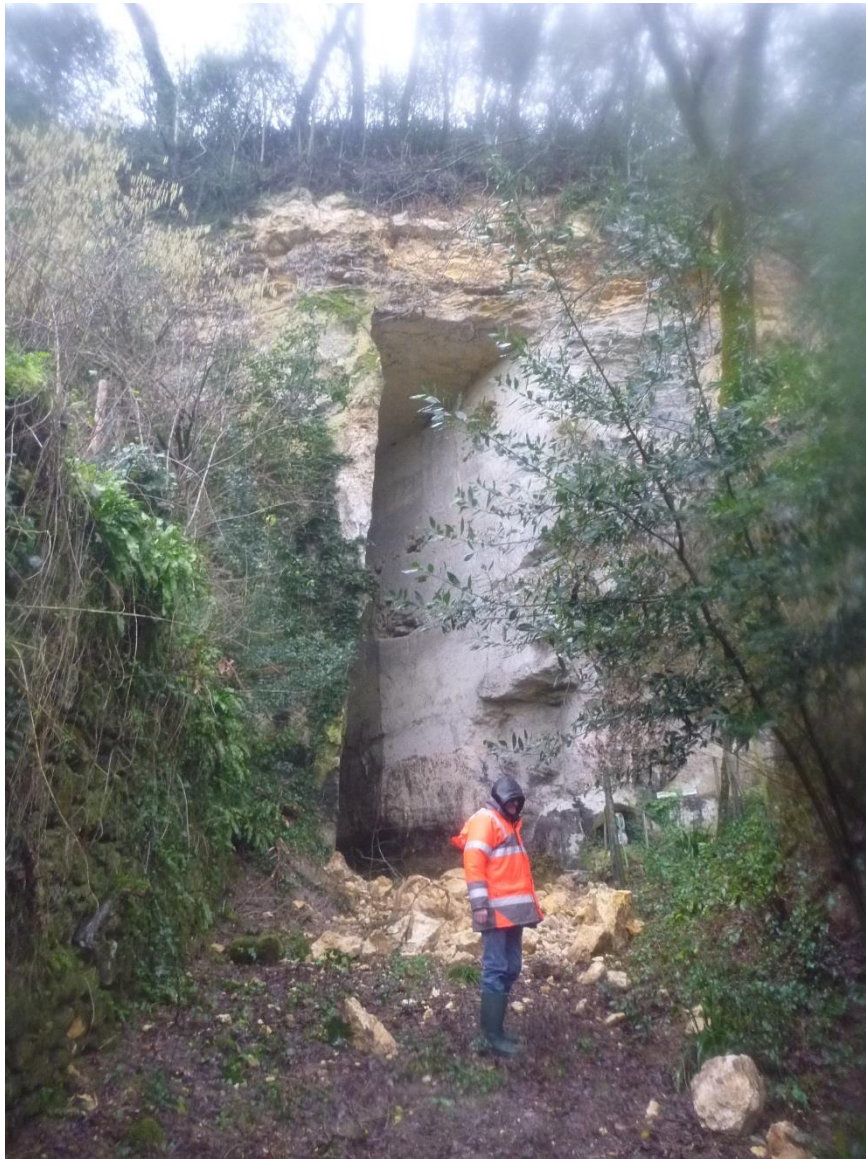
Tranche C : hauteur du versant de 13 m, hauteur de la cavité de 2 m, présence de fractures.



Evaluation de l'aléa sur le site en Gironde

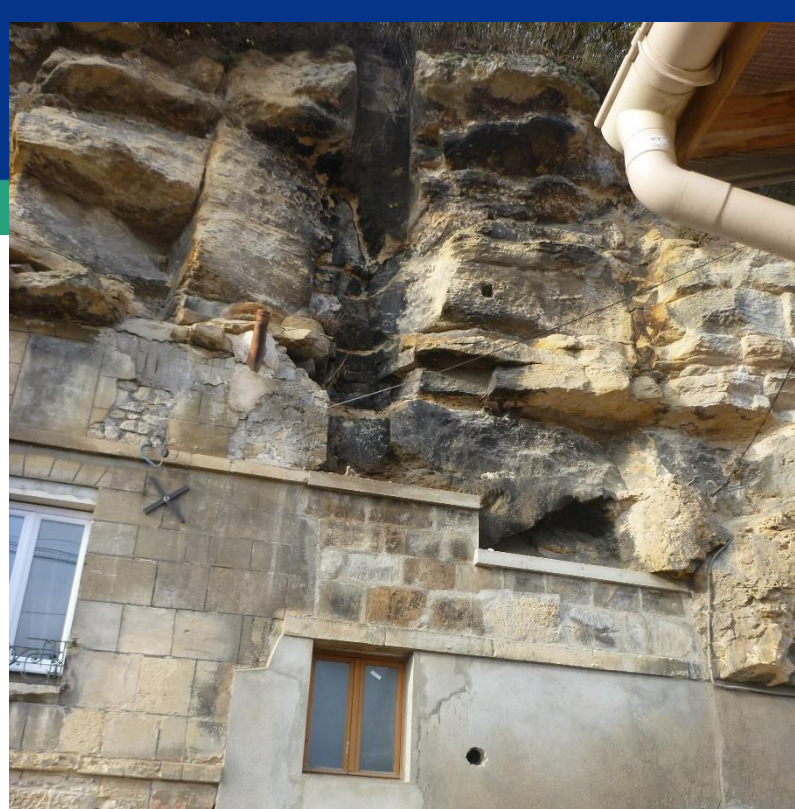


Retour d'expérience sur le site en Gironde



Tranche A : 23 janvier 2018 à 16h.
3 m3 au sol → **aléa moyen**





Merci pour votre attention !