

RAPPORT D'ÉTUDE
DRS-13-135675-12706A

15/01/2014

Les versants sous-cavés

**Contraintes réglementaires, caractérisation
détaillée de site et validation de la
méthodologie d'évaluation de l'aléa.**

Les versants sous-cavés

Contraintes réglementaires, caractérisation détaillée de site et validation de la méthodologie d'évaluation de l'aléa.

PREAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport 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.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédigé par	Vérifié par	Approuvé par
NOM	Auxane CHERKAOUI	Marwan AL HEIB	Mehdi GHOREYCHI
Fonction	Ingénieur de l'unité RNOS à la Direction des Risques du Sol et du sous-sol	Ingénieur de l'unité RNOS à la Direction des Risques du Sol et du sous-sol	Directeur des Risques du Sol et du sous-sol
Signature			

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	7
2. CONTRAINTES RÉGLEMENTAIRES LIÉES À LA POSSESSION D'UN VERSANT ROCHEUX SOUS-CAVÉ.....	9
2.1 Rappel de la réglementation	9
2.2 Assurance	12
2.3 Entretien du bien	12
2.4 Recommandations	13
3. DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE À LA CARACTÉRISATION D'UN VERSANT SOUS-CAVÉ.....	15
3.1 Principe	15
3.2 Exemple d'application	16
3.2.1 Site de Creil	16
3.2.1.1 Présentation du site.....	16
3.2.1.2 Apport d'informations supplémentaires par l'utilisation du scanner laser 3D.....	18
3.2.1 Site de Saumur.....	19
3.2.1.1 Présentation du site.....	19
3.2.1.2 Apport d'informations supplémentaires par l'utilisation du scanner laser 3D.....	21
3.3 Résultat et application.....	29
4. VALIDATION DE LA MÉTHODOLOGIE DE DETERMINATION DE L'ALÉA VERSANT ROCHEUX SOUS-CAVÉ.....	31
4.1 Rappel de la méthodologie d'évaluation de l'aléa versant sous-cavé	31
4.1.1 Intensité de l'aléa versant sous-cavé.....	32
4.1.1.1 Intensité à L'origine du front (I_0)	32
4.1.1.2 Intensité en zone d'épandage (I_e).....	32
4.1.1.3 Intensité en amont (I_a)	32
4.1.2 Probabilité de l'aléa versant sous-cavé	32
4.1.2.1 Probabilité d'occurrence en zone de départ (P_0)	32
4.1.2.2 Probabilité d'occurrence en zone d'épandage (P_e)	33
4.2 Validation de la méthodologie sur des cas réels	34
4.2.1 Site de Creil	34

4.2.1.1	Détermination de l'intensité de l'aléa	34
4.2.1.2	Détermination de la probabilité de l'aléa	35
4.2.1.3	Détermination de l'aléa.....	38
4.2.2	Site de Saumur	38
4.2.2.1	Détermination de l'intensité de l'aléa.....	38
4.2.2.2	Détermination de la probabilité de l'aléa	40
4.2.2.3	Détermination de l'aléa.....	40
4.3	Conclusions.....	41
5.	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	43
6.	BIBLIOGRAPHIE	45

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Formulaire de l'état des risques naturels, miniers et technologiques	10
Figure 2 : Scanner laser 3D Trimble TX5 utilisé pour les sites présentés	15
Figure 3 : Schéma de principe d'utilisation du scanner laser3D avec plusieurs stations	16
Figure 4 : Ensemble photographique du coteau de Creil avec ses caves en tuf	17
Figure 5 : Représentation en 3D du coteau de Creil avec ses deux caves	18
Figure 6 : Représentation 3D des caves du coteau de Creil avec mise en évidence d'une remontée de toit	19
Figure 7 : Arche en aval de la falaise (photo de gauche) et entrée de la carrière (photo de droite)	20
Figure 8 : Piliers de la carrière en ruine	20
Figure 9 : Repérage en rouge des fractures au toit du sous-cavage et de la carrière	21
Figure 10 : Représentation stéréographique de la fracturation de l'entrée de la carrière	23
Figure 11 : Pilier présentant de nombreuses fractures et des écailles de roche	25
Figure 12 : Pilier avec une fracturation au cœur en forme de croix.....	26
Figure 13 : Représentation des coupes successives du pilier centrale d'une des salles de la carrière.....	27
Figure 14 : Représentation schématique d'un front sous-cavé	31
Figure 15 : Représentation schématique d'un versant sous-cavé où D, la distance entre la cavité et le versant, est nulle.....	33
Figure 16 : Décollement de matière observable sur le front de coteau	34
Figure 17 : Mise en évidence du talus au pied du coteau	36
Figure 18 : Front de falaise du site de Saumur (47).....	39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Evaluation du niveau de probabilité d'occurrence en zone de départ	35
Tableau 2 : Paramètres de caractérisation du versant.....	37
Tableau 3 : Critères de remplacement dans le cas d'un versant sous-cavé	37
Tableau 4 : Détermination de l'aléa sur le coteau de Creil.....	38
Tableau 5 : Détermination de l'aléa sur le versant de Saumur.....	41
Tableau 6 : Caractérisation et détermination de la sensibilité dans le cas d'un versant en matériau meuble	42

1. INTRODUCTION

Dans chaque pays, de nombreux moyens sont mis en œuvre pour protéger la population des phénomènes naturels. Parmi les risques existants, les mouvements de terrain arrivent à une place importante en France. Les mouvements de terrain associés aux « versants¹ sous-cavé » font partie des mouvements les plus importants car ils concernent à la fois les falaises et les cavités.

Cette problématique a déjà été abordée dans les rapports de l'INERIS « Etat des connaissances relatif à l'aléa des versants rocheux sous-cavés », référencé DRS-11-117684-04378A et « Développement d'une méthodologie pour la détermination de l'aléa « versant rocheux sous-cavé - Vérification sur un cas réel », référencé DRS-12-126057-11849A. Ce dernier rapport a permis d'élaborer une méthodologie d'évaluation de cet aléa en énumérant les différents cas de figure pouvant se présenter sur les sites naturels comme par exemple le sous-cavage donnant directement sur le front de falaise, l'habitat troglodytique ou encore le vide souterrain existant mais non visible du front de falaise. L'application de la méthodologie sur la falaise de Montsoreau a permis de confronter cette méthodologie à la réalité.

L'objectif de ce rapport est triple : d'une part, identifier les contraintes liées à la possession d'un versant sous-cavé. Outre le côté typique et culturel que peut revêtir un versant sous-cavé, il existe un grand nombre de bonnes pratiques et de règles garantissant la pérennité d'un tel bien naturel. Ces informations seront décrites et celles manquantes mises en évidence pour garantir une bonne gestion de tel site. D'autre part, pour appliquer la méthodologie de l'évaluation de l'aléa, une description détaillée du versant sous-cavé est nécessaire. Nous avons donc testé un nouvel outil, le scanner laser 3D, sur deux sites pour déterminer si la numérisation du site ainsi obtenue pouvait être une base pour une analyse et un diagnostic de stabilité plus fiables et plus précis. Enfin, le troisième objectif est l'amélioration de la méthodologie par son application sur deux sites aux caractéristiques très différentes.

Ce rapport s'inscrit dans le cadre du programme d'appui aux pouvoirs publics EAT-DRS02 « Analyse, prévention et maîtrise des risques mouvements de terrain liés à la présence de cavités souterraines et de versants rocheux instables » sous le thème « Versants sous-minés ».

¹ L'expression « versants » sera préférée à « versants rocheux », ce dernier terme étant trop précis sur le matériau du site.

2. CONTRAINTES RÉGLEMENTAIRES LIÉES À LA POSSESSION D'UN VERSANT ROCHEUX SOUS-CAVÉ

2.1 RAPPEL DE LA RÉGLEMENTATION

Plusieurs articles du Code Civil s'appliquent aux versants sous-cavés (Besson et Saily, 2013) comme :

- l'article 552 : la propriété du sol emporte le dessus et le dessous sauf s'il existe un titre de propriété du dessous ;
- l'article 640/641 : chacun est responsable de la maîtrise des eaux ;
- l'article 1384 : on est responsable des choses que l'on a sous sa garde (par exemple un bloc instable appartenant à la paroi rocheuse de notre propriété) ;
- l'article 1382 : tout dommage causé par une personne oblige celui par qui la faute est arrivée à le réparer.

Généralement, à l'achat, le propriétaire est informé des particularités de son bien et des contraintes liées à son entretien. Cela est indispensable lorsque la propriété contient une cavité souterraine ou d'un front rocheux. Le propriétaire d'un versant rocheux sous-cavé est dans l'obligation, sous certaines conditions, de le signaler au moment de la vente ou de la location de son bien. En effet, la loi du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages a créé dans son article 77 (codifié à l'article L 125-5 du code de l'environnement) une obligation d'information de l'acheteur ou du locataire de tout bien immobilier (bâti et non bâti) situé soit en zone de sismicité soit dans un plan de prévention des risques prescrit ou approuvé. A cet effet sont établis directement par le vendeur ou le bailleur deux documents (<http://www.risquesmajeurs.fr/>).

Le premier est un "état des risques naturels, miniers et technologiques (ERNMT)" établi avant la date de conclusion du contrat de vente ou de location, en se référant aux informations arrêtées par chaque préfet de département. Ces informations sont consultables en préfecture, sous-préfecture ou mairie du lieu où se trouve le bien, ainsi que sur Internet (Figure 1).

Etat des risques naturels, miniers et technologiques

en application des articles L 125 - 5 et R 125 - 26 du Code de l'environnement

1. Cet état, relatif aux obligations, interdictions, servitudes et prescriptions définies vis-à-vis des risques naturels, miniers ou technologiques concernant l'immeuble, est établi sur la base des informations mises à disposition par arrêté préfectoral
n° _____ du _____ mis à jour le _____

Informations relatives au bien immobilier (bâti ou non bâti)

2. Adresse
_____ code postal _____ commune _____
ou code Insee _____

3. Situation de l'immeuble au regard d'un ou plusieurs plans de prévention de risques naturels [PPR n]

> L'immeuble est situé dans le périmètre d'un PPR naturels **prescrit** ¹ oui non
L'immeuble est situé dans le périmètre d'un PPR naturels **appliqué par anticipation** ¹ oui non
L'immeuble est situé dans le périmètre d'un PPR naturels **approuvé** ¹ oui non

¹ si oui, les risques naturels pris en compte sont liés à :

inondation <input type="checkbox"/>	crue torrentielle <input type="checkbox"/>	mouvements de terrain <input type="checkbox"/>	avalanches <input type="checkbox"/>
sécheresse <input type="checkbox"/>	cyclone <input type="checkbox"/>	remontée de nappe <input type="checkbox"/>	feux de forêt <input type="checkbox"/>
séisme <input type="checkbox"/>	volcan <input type="checkbox"/>	autres <input type="text"/>	

extraits des documents de référence joints au présent état et permettant la localisation de l'immeuble au regard des risques pris en compte

> L'immeuble est concerné par des prescriptions de travaux dans le règlement du ou des PPR naturels ² oui non
² si oui, les travaux prescrits par le règlement du ou des PPR naturels ont été réalisés oui non

4. Situation de l'immeuble au regard d'un plan de prévention de risques miniers [PPR m]
en application de l'article L 174-5 du nouveau code minier.

> L'immeuble est situé dans le périmètre d'un PPR miniers **prescrit** ³ oui non
L'immeuble est situé dans le périmètre d'un PPR miniers **appliqué par anticipation** ³ oui non
L'immeuble est situé dans le périmètre d'un PPR miniers **approuvé** ³ oui non

³ si oui, les risques miniers pris en compte sont liés à :

mouvements de terrain <input type="checkbox"/>	autres <input type="text"/>
--	-----------------------------

extraits des documents de référence joints au présent état et permettant la localisation de l'immeuble au regard des risques pris en compte

> L'immeuble est concerné par des prescriptions de travaux dans le règlement du PPR miniers ⁴ oui non
⁴ si oui, les travaux prescrits par le règlement du PPR miniers ont été réalisés oui non

5. Situation de l'immeuble au regard d'un plan de prévention de risques technologiques [PPR t]

> L'immeuble est situé dans le périmètre d'étude d'un PPR technologiques **prescrit** et non encore approuvé ⁵ oui non
⁵ si oui, les risques technologiques pris en compte dans l'arrêté de prescription sont liés à :

effet toxique <input type="checkbox"/>	effet thermique <input type="checkbox"/>	effet de surpression <input type="checkbox"/>
--	--	---

> L'immeuble est situé dans le périmètre d'exposition aux risques d'un PPR technologiques **approuvé** oui non
extraits des documents de référence joints au présent état et permettant la localisation de l'immeuble au regard des risques pris en compte

> L'immeuble est concerné par des prescriptions de travaux dans le règlement du PPR technologiques ⁶ oui non
⁶ si oui, les travaux prescrits par le règlement du PPR technologiques ont été réalisés oui non

6. Situation de l'immeuble au regard du zonage réglementaire pour la prise en compte de la sismicité
en application des articles R 563-4 et D 563-8-1 du Code de l'environnement

> L'immeuble est situé dans une commune de sismicité zone 5 zone 4 zone 3 zone 2 zone 1
forte moyenne modérée faible très faible

7. Information relative aux sinistres indemnisés par l'assurance suite à une catastrophe naturelle, minière ou technologique
en application de l'article L 125-5 (IV) du Code de l'environnement

> L'information est mentionnée dans l'acte authentique constatant la réalisation de la vente oui non

vendeur/bailleur – acquéreur/locataire

8. Vendeur - Bailleur
rayer la mention inutile
Nom _____ Prénom _____

9. Acquéreur - Locataire

10. Lieu / Date à _____ le _____

Figure 1 : Formulaire de l'état des risques naturels, miniers et technologiques

(Source : <http://www.paris.pref.gouv.fr/La-prefecture-et-vous/Particuliers/Prevention-et-risques/Information-Acquereurs-Locataires-Etat-des-risques-naturels-miniers-et-technologiques-ERNMT>)

Les communes dans lesquelles s'applique l'information relative à l'état des risques sont celles situées :

- dans une zone de sismicité de 2 à 5 (faible à forte) : le décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010, entré en vigueur le 1^{er} mai 2011, établit un zonage sismique de la France avec cinq zones de sismicité croissante, pour l'application des règles de construction parasismiques et pour l'information des populations : une zone 1 de sismicité très faible, où il n'y a pas de prescription parasismique particulière. L'état des risques naturels et technologiques n'est pas obligatoire dans cette zone, sauf si le bien est situé dans le périmètre d'un PPR. Quatre zones où l'application de règles de construction parasismique est justifiée (zone 2 de sismicité faible, zone 3 de sismicité modérée, zone 4 de sismicité moyenne, zone 5 de forte sismicité, limitée aux départements de la Guadeloupe et de la Martinique)
- dans la zone couverte par un plan de prévention des risques technologiques, ou par un plan de prévention des risques miniers, ou par un plan de prévention des risques naturels prévisibles, prescrit ou approuvé.

Tous les biens immobiliers, bâtis ou non, quelle que soit leur destination, situés dans ces communes sont concernés par cet état des risques qui est à la charge des vendeurs et bailleurs. L'état des risques signé est valable 6 mois. Si un délai plus long s'écoule entre la promesse et la vente effective, un nouvel état des risques devra être joint à l'acte de vente. Cet état des risques ainsi constitué doit être joint à la promesse de vente et à l'acte de vente, et dans le cas des locations, à tout contrat écrit de location. En cas de vente, il doit être à jour lors de la signature du contrat, en application de l'article L271-5 du code de la construction.

Le second document est une information écrite précisant les sinistres sur le bien ayant donné lieu à indemnisation au titre des effets d'une catastrophe naturelle ou technologique, pendant la période où le vendeur ou le bailleur a été propriétaire ou dont il a été lui-même informé par écrit lors de la vente du bien. Le vendeur ou le bailleur doit déclarer les sinistres qui ont fait l'objet d'une reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle ou technologique et subis par le bien pendant la période où il a été propriétaire ou dont il a été lui-même informé. Cette déclaration est obligatoire dans toutes les communes ayant fait l'objet d'au moins un arrêté de reconnaissance de l'état de catastrophes naturelles ou technologiques, soit la quasi-totalité de la France. Les sinistres concernés sont ceux ayant donné lieu au versement d'une indemnité au titre de la garantie nationale contre les effets des catastrophes technologiques ou naturelles constatées par arrêté interministériel, soit au profit du propriétaire vendeur ou bailleur, soit au profit d'un précédent propriétaire de l'immeuble concerné, dans la mesure où le vendeur ou le bailleur en a été lui-même informé. Seuls les immeubles bâtis ayant subis un sinistre sont concernés.

Au vu des précisions réglementaires ci-dessus, il est possible que la présence de versants sous-cavés sur une propriété ne fasse pas l'objet de déclaration au moment de la vente ou de la location dans le cas où :

- le site n'est situé ni en zone sismique ni n'est couvert par un PPR : il n'y a pas d'obligation de fournir un ERNMT ;
- l'habitat troglodytique n'a subi aucun sinistre jusqu'à présent : il n'y a pas de déclaration de sinistre ;
- le versant sous-cavé a subi un sinistre mais aucune construction à proximité n'a été impactée : il n'y a pas de déclaration de sinistre.

Il est donc envisageable que des acheteurs ou des loueurs se retrouvent en présence d'un versant sous-cavé sans en avoir été pleinement informés. Cette situation n'est pas hypothétique : plusieurs personnes ayant dans leur propriété un versant sous-cavé ont été interrogées. La majorité révèle qu'à l'achat, l'acte de vente ne fait que signaler succinctement cette particularité voire même ne la mentionne pas du tout.

2.2 ASSURANCE

Même si l'assurance habitation n'est obligatoire que pour le locataire, elle est généralement souscrite aussi par le propriétaire. Selon les options choisies et les cotisations payées, elle couvre les sinistres liés aux incendies, explosions, dégâts des eaux, vols, etc. sur les biens immobiliers et les objets de valeurs. Elle couvre aussi, au titre de la responsabilité civile, la réparation des dommages corporels et matériels causés par le propriétaire du bien, sa famille et ceux dont il a la garde (personnel, animaux, etc.).

Par contre, ce contrat peut préciser des exclusions. C'est typiquement le cas pour une propriété contenant un versant sous-cavé. En effet, lorsqu'une personne possède ou loue un tel terrain, il ne sera obligé de l'assurer que si des personnes ou des biens peuvent être directement impactés, généralement dans le cas d'un habitat troglodytique et non lorsqu'il s'agit d'un simple versant sous-cavé naturel.

Cependant, même pour assurer un habitat troglodytique, les propriétaires rencontrent des difficultés. L'INERIS s'est mis à la place d'un nouveau propriétaire qui venait d'acquérir un habitat troglodytique et a contacté plusieurs compagnies d'assurance. La plupart ont refusé d'assurer le bien. Deux ont accepté, mais en imposant des clauses très contraignantes comme la non-couverture des dommages liés au risque effondrement/éboulement et au risque infiltration d'eau. Dans tous les cas, les cotisations sont plus élevées et le risque effondrement/éboulement n'est pas pris en compte alors qu'il s'agit du principal risque encouru par un habitat troglodytique.

2.3 ENTRETIEN DU BIEN

Dans le cas d'un versant rocheux sous-cavé, et particulièrement lorsqu'il s'agit d'une maison troglodytique, trois principes sont absolument à prendre en compte pour préserver la durabilité du bien :

- le taux d'humidité étant toujours important, l'aération et la ventilation sont indispensables ;

- tout vide ayant tendance généralement à vouloir se refermer, des fractures peuvent apparaître nécessitant une expertise rapide, de la surveillance régulière et des travaux de confortement² ;
- l'entretien du coteau par une végétation adaptée va permettre de fixer les sols et limiter les infiltrations.

Notre recherche bibliographique sur des documents détaillés donnant des conseils sur l'entretien de ce bien s'est avérée peu fructueuse. La majorité des documents émanent de deux entités. L'association CATP (Carrefour Anjou Touraine Poitou) qui produit des guides conseils d'accès libre et gratuit comme le « Carnet de santé des caves », « Cavités souterraines, des risques, des réponses... » et « Conseils pratiques aux propriétaires » ainsi qu'une liste mise à jour des professionnels de la réhabilitation en milieu troglodytique (<http://www.catp-asso.org/web/sr17-conseils.html>). Le Syndicat Intercommunal pour la surveillance des cavités souterraines et des masses rocheuses d'Indre et Loire, appelé « Cavité 37 », donne des avis techniques et produit des lettres d'informations synthétiques et précises, constituant une source d'information précieuse pour les propriétaires de versant sous-cavé (<http://www.cavites37.fr/>).

2.4 RECOMMANDATIONS

Comme constaté auprès de propriétaires de versant sous-cavé, l'information en matière de réglementation, d'assurance, d'entretien et de méthodes de mise en sécurité est insuffisante. Beaucoup achètent ce type de bien sans savoir les contraintes qui y sont liées.

Un guide sur l'utilisation des versants sous-cavés, en traitant le cas particulier de l'habitat troglodytique, devrait être réalisé en coopération avec tous les organismes impliqués. Il préciserait :

- la réglementation en vigueur et ses conditions d'application ;
- la surveillance à mettre en place selon le type de versants sous-cavés (particulièrement lorsqu'il s'agit d'une maison troglodytique) ;
- les travaux d'aménagement qui peuvent être réalisés et les matériaux qui peuvent être utilisés sans augmenter l'instabilité du site.

En outre, une demande particulière devrait être adressée aux assurances pour préciser les éléments nécessaires dont ils ont besoin pour établir un contrat d'assurance habitation. L'objectif est que d'une part l'habitation soit assurée complètement, y compris pour le risque effondrement, et que, d'autre part les compagnies d'assurance puissent avoir des garanties nécessaires. Cela peut demander la mise en place de mesures préalables au contrat d'assurance comme une évaluation de risque du site, une demande de mise en sécurité, la mise en place d'un dispositif de surveillance, etc. Ces démarches nécessiteront peut-être un accompagnement du secteur public car elles peuvent être lourdes économiquement pour un particulier.

² Différentes méthodes de confortement peuvent être proposées selon l'instabilité considérée (ancrage, maçonnerie, grillage...).

En outre, certaines de ces zones se trouvent en domaine public, il est donc nécessaire que les services de l'état (mairies, préfectures, etc.) prennent conscience des risques et des responsabilités auxquels ils sont exposés.

Ce guide pourrait ainsi se révéler une aide précieuse pour l'ensemble des parties prenantes.

3. DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE À LA CARACTÉRISATION D'UN VERSANT SOUS-CAVÉ

La partie précédente a montré qu'il est important de mettre en place des moyens pour bien connaître et gérer le risque lié au versant sous-cavé. L'étape préalable passe par une bonne évaluation de l'aléa grâce à l'application de la méthodologie réalisée. Pour ce faire, une connaissance détaillée des caractéristiques du versant sous-cavé est indispensable. Un nouvel outil de caractérisation du massif a donc été testé, il est présenté dans cette partie.

3.1 PRINCIPE

Le scanner laser 3D fonctionne à l'image d'un lasermètre en mesurant la distance avec le point d'impact (Figure 2). En multipliant des millions de fois sur 360° ces mesures de distance, un volume en trois dimensions peut être modélisé. Le nuage de points obtenu peut être couplé à un appareil photo intégré afin d'avoir un rendu en couleur.



Figure 2 : Scanner laser 3D Trimble TX5 utilisé pour les sites présentés

(Source : <http://www.trimble.com/3d-laser-scanning/tx5.aspx?dtID=overview&>)

Le scanner laser utilisé lors des tests peut mesurer jusqu'à 976 000 points par seconde avec une portée effective de 120 mètres. Il a un champ de vision de 360° à l'horizontal et de 300° à la verticale. Un « scan » correspond à une position donnée de l'appareil. Afin de numériser un volume parfois important, il peut être nécessaire de réaliser un nombre important de mesures. Dans le but de raccorder facilement et rapidement plusieurs scans entre eux, des « cibles » (sphères ou damiers normalisés) sont installées dans l'environnement à numériser. Les cibles jouent le rôle de points de référence. Il est ainsi nécessaire d'avoir au moins trois cibles en commun pour recoller deux scans (Figure 3).

Pour chaque position de l'appareil, le scanner ne peut numériser que l'environnement « visible ». Autrement dit, il ne numérisera pas un objet si celui-ci est masqué par un autre. Par ailleurs, un cône de « non visibilité » est intrinsèquement lié à l'appareil utilisé et correspond généralement à l'emprise du trépied.

L'acquisition des points est très rapide et dure en moyenne 5 minutes par scan.

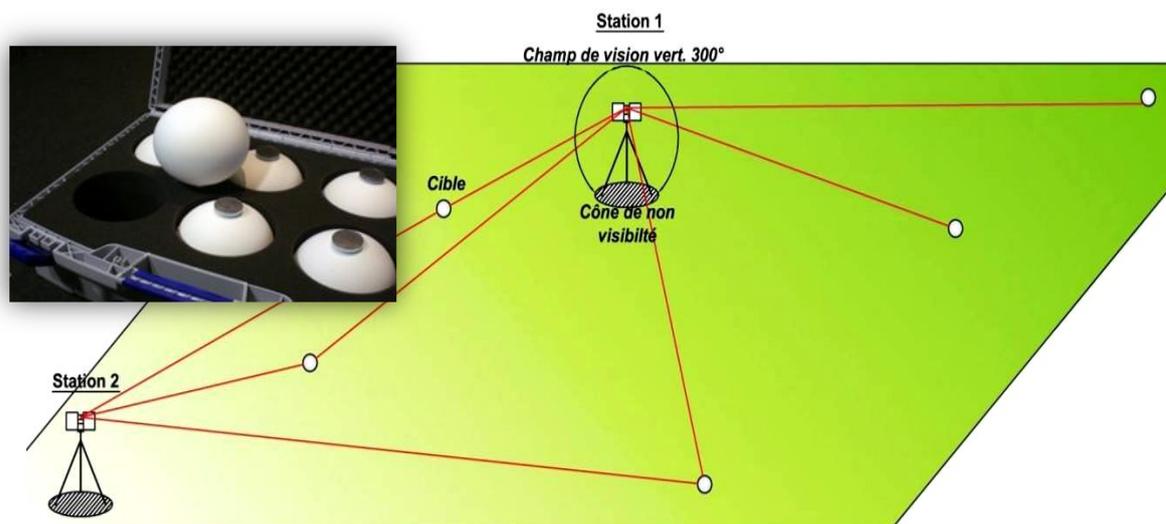


Figure 3 : Schéma de principe d'utilisation du scanner laser 3D avec plusieurs stations

Le traitement des données du scanner est ensuite réalisé à l'aide d'un logiciel de traitement de nuages de points. Il est alors possible de calculer les dimensions caractéristiques du site, le volume du vide, de réaliser un plan précis du secteur, de visualiser la fracturation de la roche et de surveiller un secteur sensible en identifiant les évolutions entre deux périodes de numérisation (comparaison possible de deux scans entre eux, réalisés sur deux périodes différentes avec mise en évidence automatique des différences de position)³.

3.2 EXEMPLE D'APPLICATION

3.2.1 SITE DE CREIL

3.2.1.1 PRÉSENTATION DU SITE

Dans la ville de Creil, rue du Plessis-Pomeraye, un coteau en tuf surplombe de nombreuses maisons. Chez l'une d'entre elles (Figure 4), on observe deux caves parallèles de direction perpendiculaire au coteau, creusées par l'homme. La première fait 6 m de longueur par 3,5 m de large et 2 m de hauteur. Le deuxième fait 12 m de longueur par 2 m de largeur et 2 m de hauteur. Elle a un renforcement de 5 m sur un des côtés.

³ Pour plus de précisions, voir le rapport **Scanner Laser 3D – Compte-rendu des tests réalisés en carrières souterraines**, (Richard T., 2013), référencé INERIS DRS-13-135667-07822A.



Figure 4 : Ensemble photographique du coteau de Creil avec ses caves en tuf

Le tuf (roche calcaire) est ici très friable avec la présence au toit de la cavité de racines et de petites dépressions. Un bloc et du matériau sableux sont présents près de l'entrée de la cave 2, ils proviennent du toit de la cave. La cave 1 est plus saine mais on note la présence de roche de couleur verdâtre au toit (certainement due à l'humidité) ainsi que de bloc solide au toit entouré par des renforcements de roche friable.

Sur le côté droit du coteau, une partie s'est décollée il y a moins de deux ans selon le propriétaire. En amont du front, une zone semble être affaissée. Cela est particulièrement visible au niveau du mur en parpaing fait il y a un ou deux ans selon le propriétaire. La courbure du mur est visible au niveau des joints (Figure 4).

3.2.1.2 APPORT D'INFORMATIONS SUPPLÉMENTAIRES PAR L'UTILISATION DU SCANNER LASER 3D

La présence d'une végétation importante sur ce site a plutôt été un inconvénient pour distinguer correctement le coteau (Figure 5).

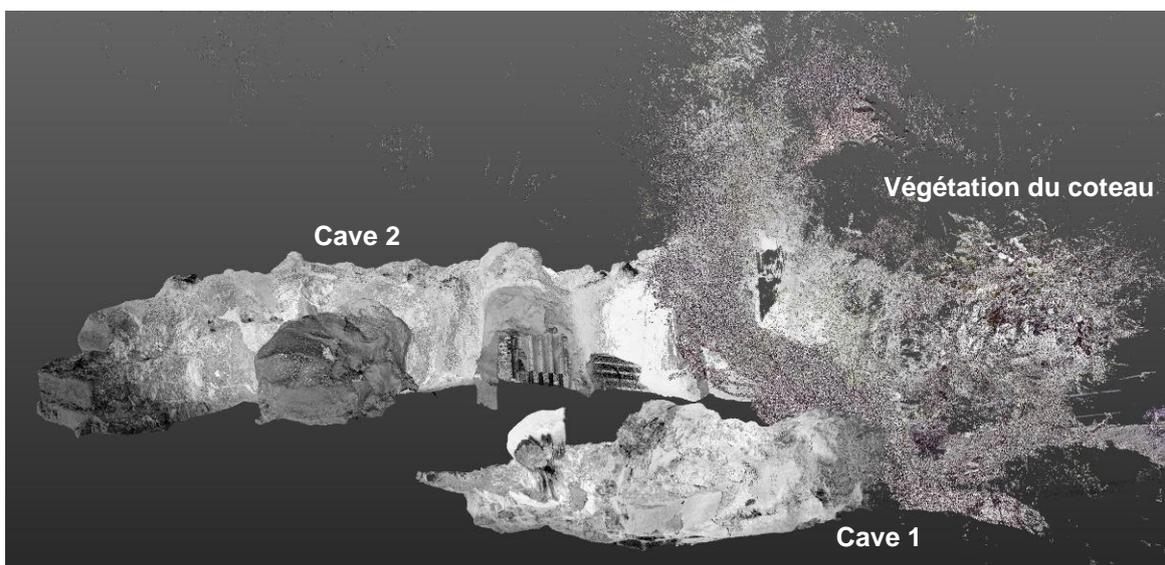


Figure 5 : Représentation en 3D du coteau de Creil avec ses deux caves

Par contre, après suppression des points générés par la présence de la végétation, les deux caves se voient facilement (Figure 6). Il est possible de distinguer leur forme et leur dimension (volume, distance, surface...). Ce qui est particulièrement visible en vue de côté sont les chutes de matériaux au toit (représenté par un cercle rouge sur la Figure 6). La forme de cette chute de toit est de type « champignon » ce qui explique sa représentation « parachute » par numérisation grâce au scanner laser 3D. En effet, les points dans le renforcement n'ont pas été relevés par le scanner, ils ne sont pas dans son champ de visibilité, alors que de la matière est bel est bien présente.

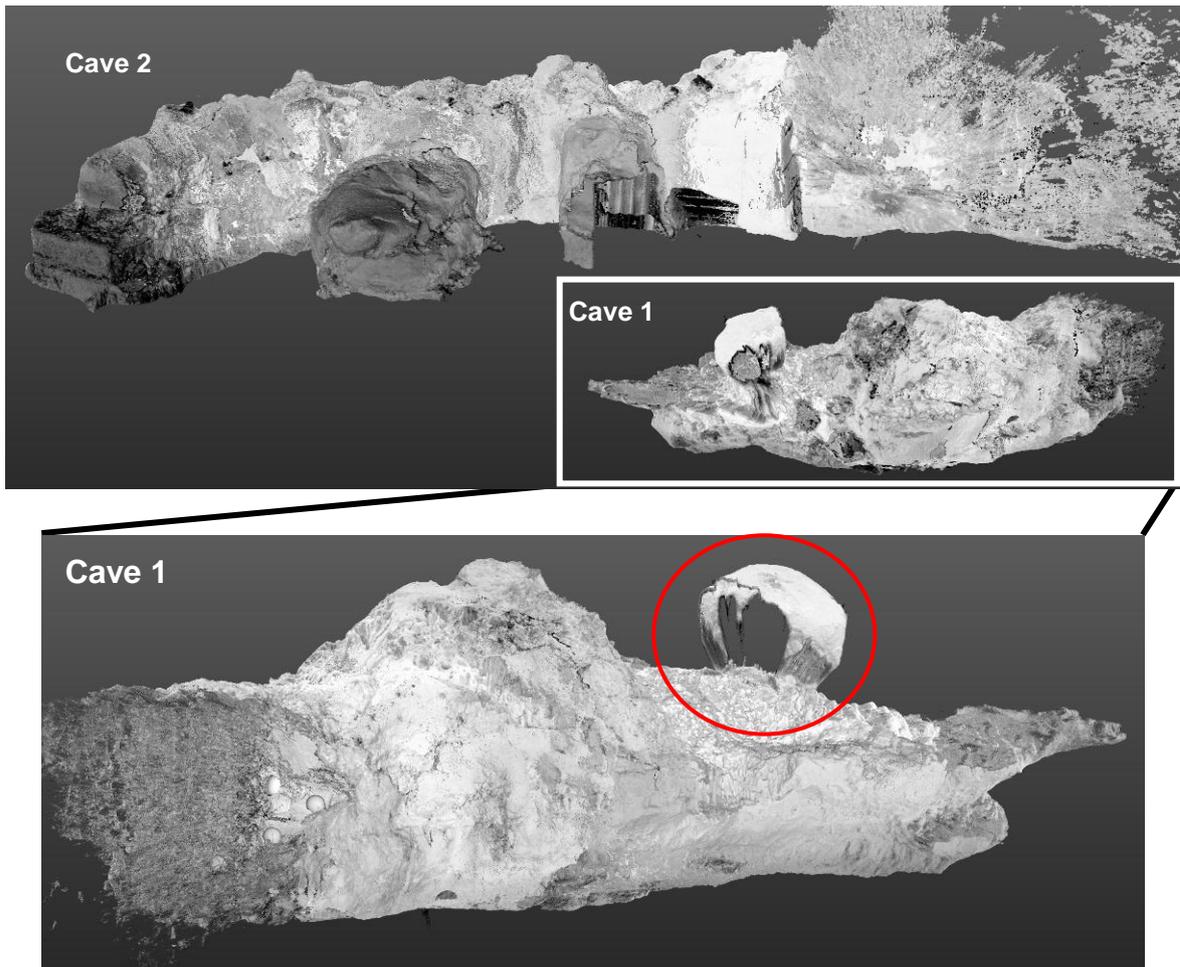


Figure 6 : Représentation 3D des caves du coteau de Creil avec mise en évidence d'une remontée de toit

Pour ce site, l'utilisation du scanner laser 3D va permettre de garder en mémoire la configuration du site particulièrement celle des caves. En effet, du fait de la végétation importante, le flan de coteau est peu visible. En revanche, l'utilisation de cet outil s'avère pertinente pour effectuer de la surveillance et appuyer l'analyse géotechnique. Si un scan de ces deux caves est réalisé à nouveau dans quelques mois, il permettrait, en respectant les contraintes associées à la réalisation de scan, par comparaison avec celui déjà réalisé, de déterminer les différences de position des matériaux du toit et des parements qui pourraient s'effondrer dans cette période de temps. Une surveillance en continue ne semble pas nécessaire car le site ne présente a priori pas de péril imminent.

3.2.1 SITE DE SAUMUR

3.2.1.1 PRÉSENTATION DU SITE

La cave Poitevin se situe sur la Route de Montsoreau, entre Saumur et Montsoreau. Il s'agit de l'entrée d'une ancienne carrière de calcaire en domaine privé⁴.

⁴Le propriétaire coopère avec la Mairie pour trouver une solution à la gestion de ce site.

L'inspection visuelle nous donne quelques indications : la hauteur du front rocheux où se situe l'entrée est de 8 m environ, il a été formé suite à un effondrement d'une galerie il y a longtemps d'où le passage sous une arche avant d'arriver au front de falaise (Figure 7).



Figure 7 : Arche en aval de la falaise (photo de gauche) et entrée de la carrière (photo de droite)

Le sous-cavage de l'entrée de la carrière est très dégradé avec de nombreuses fractures ouvertes. Après une progression d'une cinquantaine de mètres depuis le front de falaise, l'intérieur de la carrière est en très mauvais état avec de nombreux piliers en ruine (Figure 8).

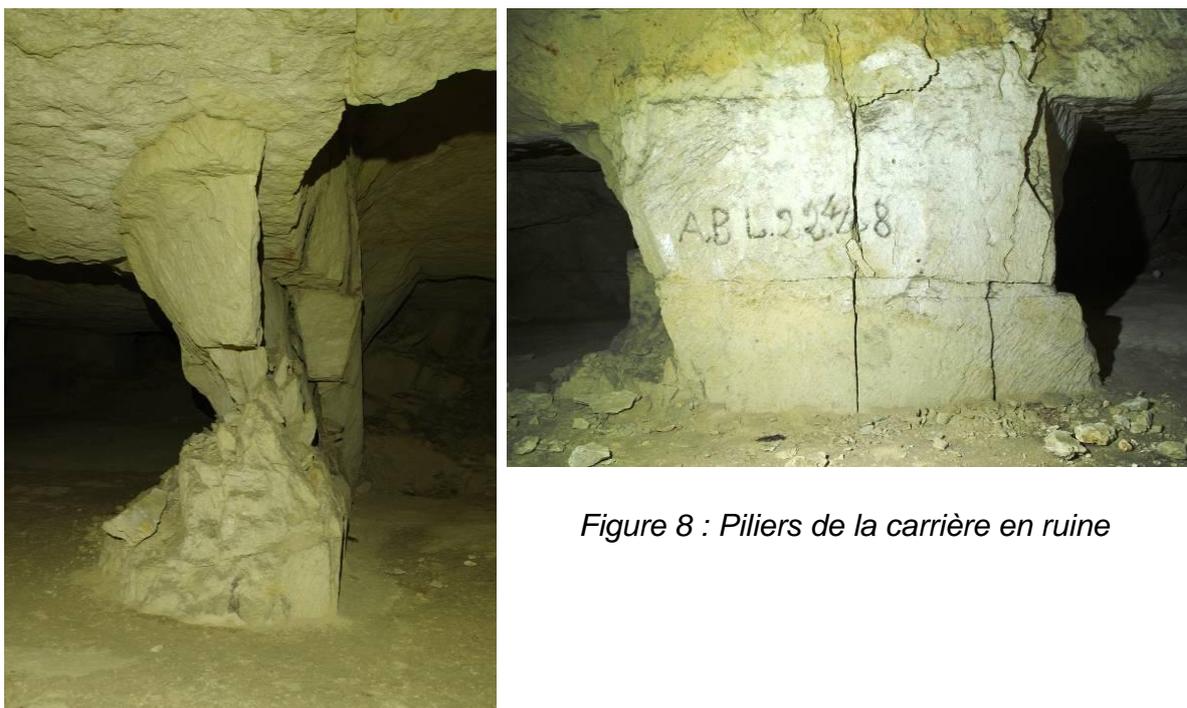


Figure 8 : Piliers de la carrière en ruine

3.2.1.2 APPORT D'INFORMATIONS SUPPLÉMENTAIRES PAR L'UTILISATION DU SCANNER LASER 3D

Dimension

Après traitement des scans, nous avons pu mesurer plusieurs paramètres grâce au logiciel associé de visualisation 3D :

- Hauteur du front : entre 9,3 m et 10,7 m (le front n'étant pas régulier).
- Ouverture à l'entrée : entre 3,8 m et 4,2 m de hauteur et 2,5 m de large.
- Recouvrement : entre 5,1 m et 6,9 m.
- Avancée instable : 9 m.

Fracturation

La fracturation du massif est facilement repérable grâce aux scans effectués, particulièrement en vue de dessus. Les fractures au toit ont été ainsi mises en évidence (Figure 9).

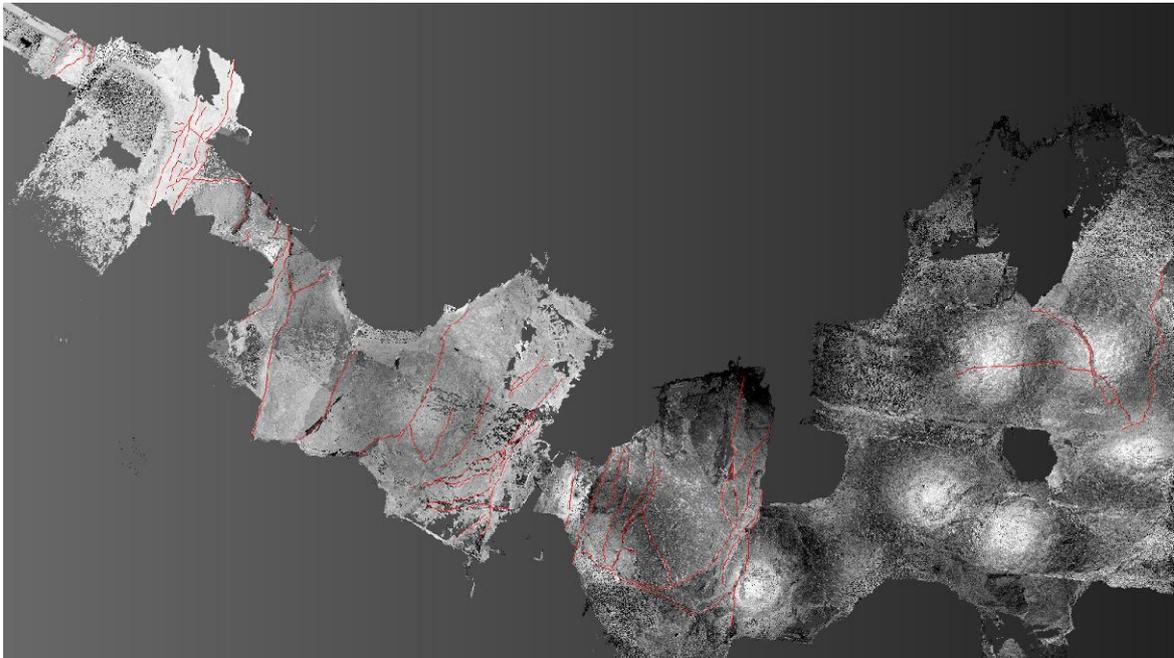
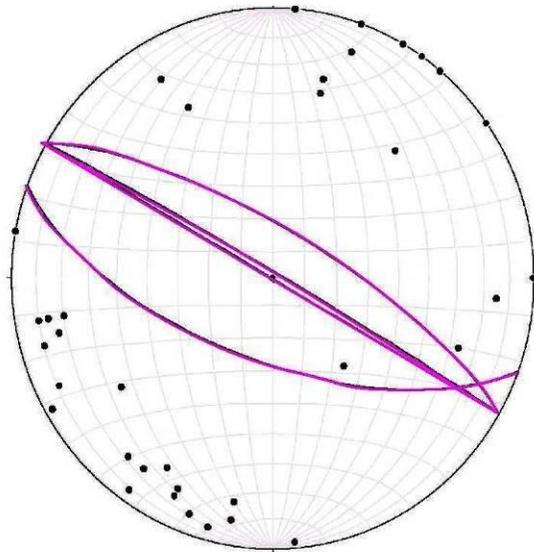


Figure 9 : Repérage en rouge des fractures au toit du sous-cavage et de la carrière

Leur direction et leur pendage ont pu donc être calculé. Cette caractérisation des fractures a été reportée dans un cercle stéréographique (Figure 10).

FALAISES SOUS-CAVÉS
Fracturation du massif rocheux
- SAUMUR -

**Projection stéréographique des plans des principales fractures
présentes au ciel**



- Projection des plans des fronts de falaise
- Projection des pôles des fractures

20.000 m

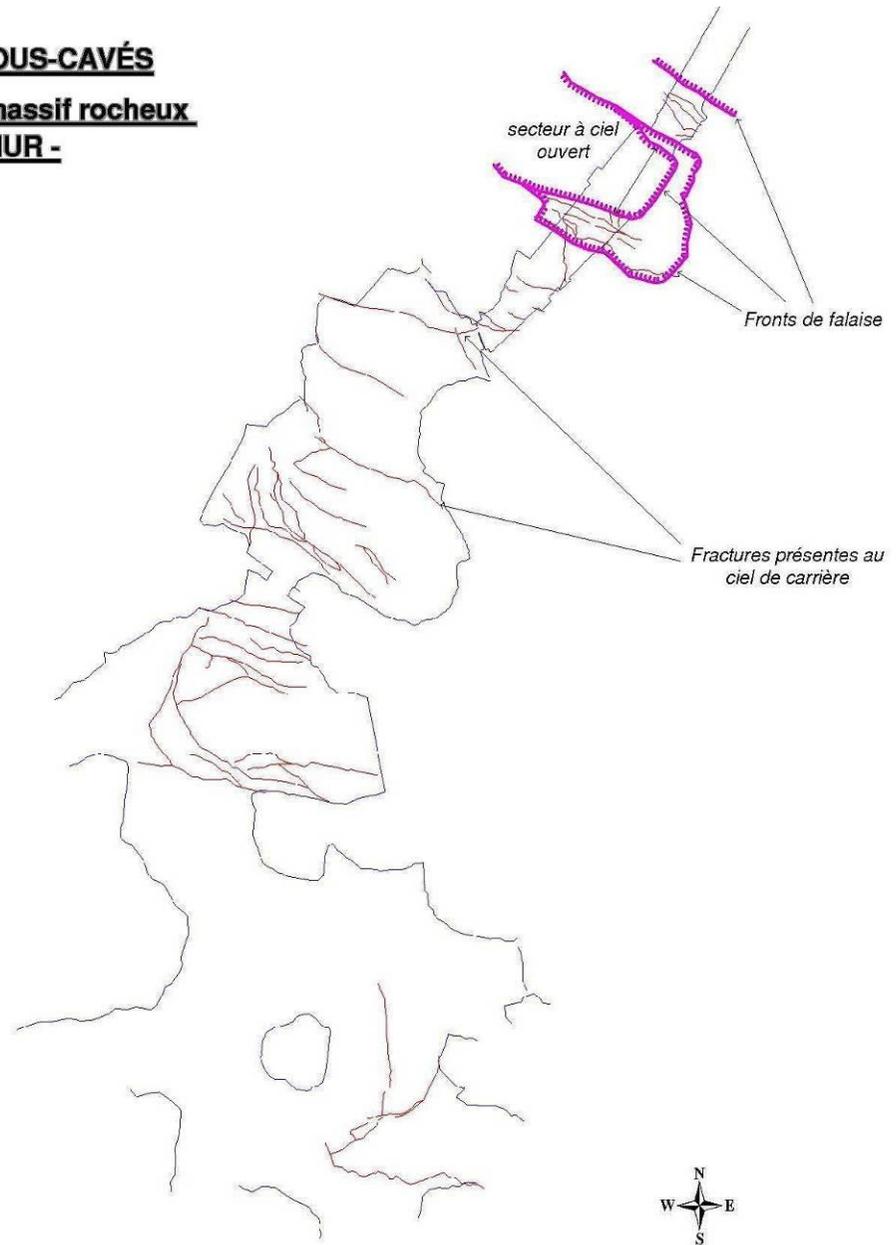


Figure 10 : Représentation stéréographique de la fracturation de l'entrée de la carrière

La Figure 10 montre une présence importante des fractures au toit sur les cinquante cinq premiers mètres à partir de l'entrée. Le changement de pendage dans les fronts de falaise visible sur le cercle stéréographique (représenté par les traits violet) est dû aux irrégularités du front dont la forme globale s'apparente schématiquement à un « escalier » en vue de profil.

Le front principal est orienté N113°E avec un pendage de 65°SO. Le front global a une forme d'arc de cercle, il présente donc une autre orientation : N57°O avec un pendage compris entre 75° et 90°NE. Nous pouvons distinguer deux familles de fractures :

- a. d'une part, celles orientées entre N95°E et N180°E avec un pendage SO compris entre 75° et 90°;
- b. d'autre part, celles orientées entre N10°O et N80°O avec un pendage orienté NE compris entre 75° et 90°.

Les premières (a) ont un pendage élevé dans la même direction que le pendage du front principal, favorisant le glissement de blocs instables. La deuxième catégorie de fractures (b) a une direction de pendage opposée à la première catégorie. Cependant, leur pendage étant très élevé (7 d'entre elles ont un pendage vertical), le glissement de blocs instables est aussi favorisé dans le plan du front principal. Les longueurs des fractures sont comprises entre 8 et 11 m pour les fractures de catégorie (a) et de 2,5 à 7 m pour les fractures de catégorie (b). Le pas de fracturation est très variable selon les zones. L'entrée reste la zone la plus fracturée avec un pas de 0,35 m entre chaque fracture, ce pas augmentant plus on s'enfonce dans la carrière.

Passés les cinquante cinq premiers mètres, la fracturation au toit devient pratiquement inexistante. On atteint une zone en chambre et pilier avec une portée comprise entre 5,4 et 7 m et une hauteur sous plafond comprise entre 2 et 3 m. La majorité des fractures se retrouve au niveau des piliers. Sur plusieurs piliers, des écailles de roche sont visibles sur les parois latérales ainsi que sur le sol au pied des piliers (Figure 11). De plus, une fracturation caractéristique à 90° (forme de croix) est visible, montrant ainsi un endommagement au cœur du pilier (Figure 12).

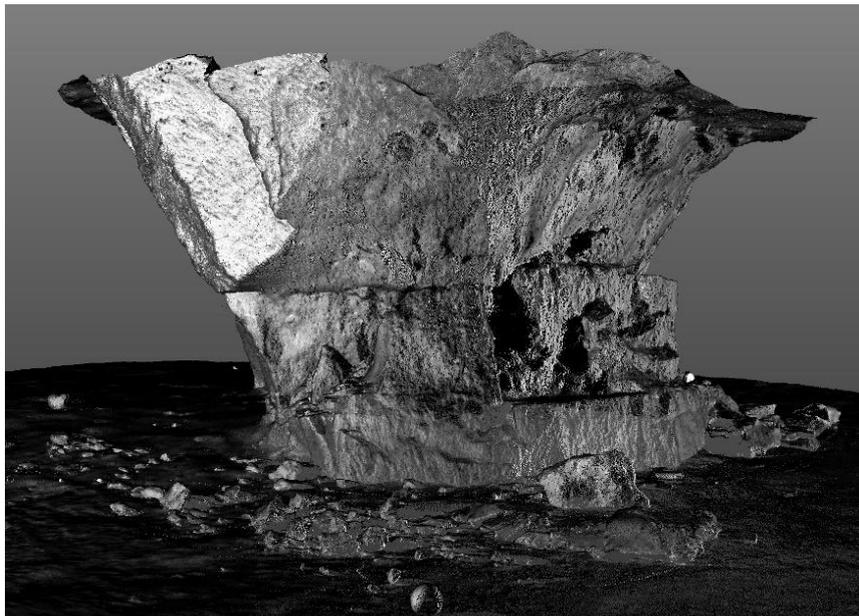


Figure 11 : Pilier présentant de nombreuses fractures et des écailles de roche

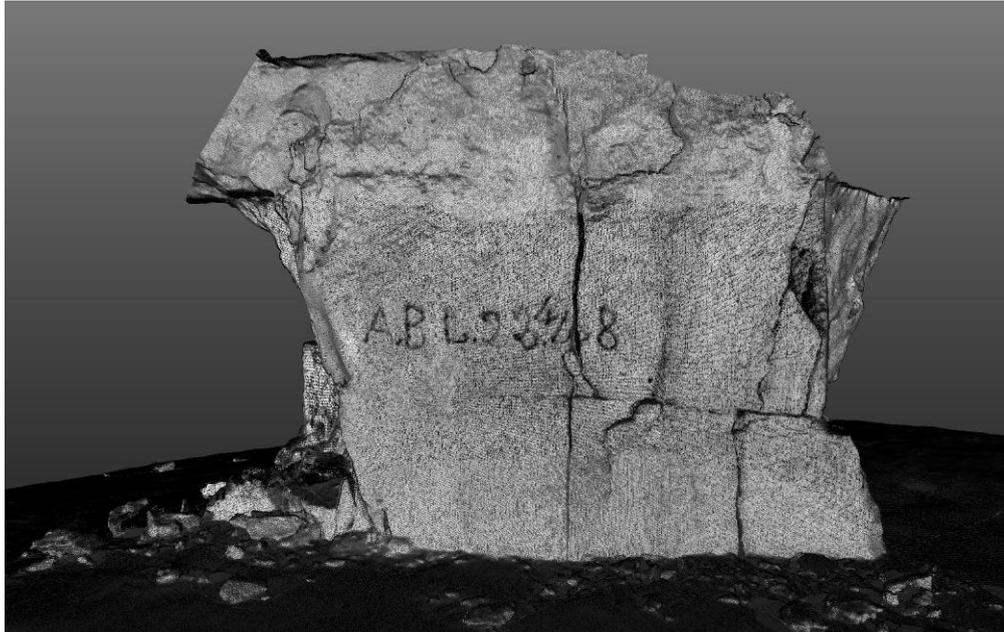


Figure 12 : Pilier avec une fracturation au cœur en forme de croix

Des coupes successives est-ouest d'un pilier ont été réalisées grâce au logiciel d'analyse du scanner laser 3D (Figure 13). Vue de profil, ce pilier prend une forme de « diabolo » et de nombreuses fractures sont présentes au cœur du pilier. D'après cette coupe est-ouest, ce pilier devait faire à l'origine 4,5 m de large alors que sa largeur est de 2,9 m à l'endroit le plus étroit. Sa hauteur est comprise entre 2,3 et 2,9 m. Il peut être qualifié de « pilier en ruine ». De nombreux piliers observés dans cette zone sont dans un état similaire.

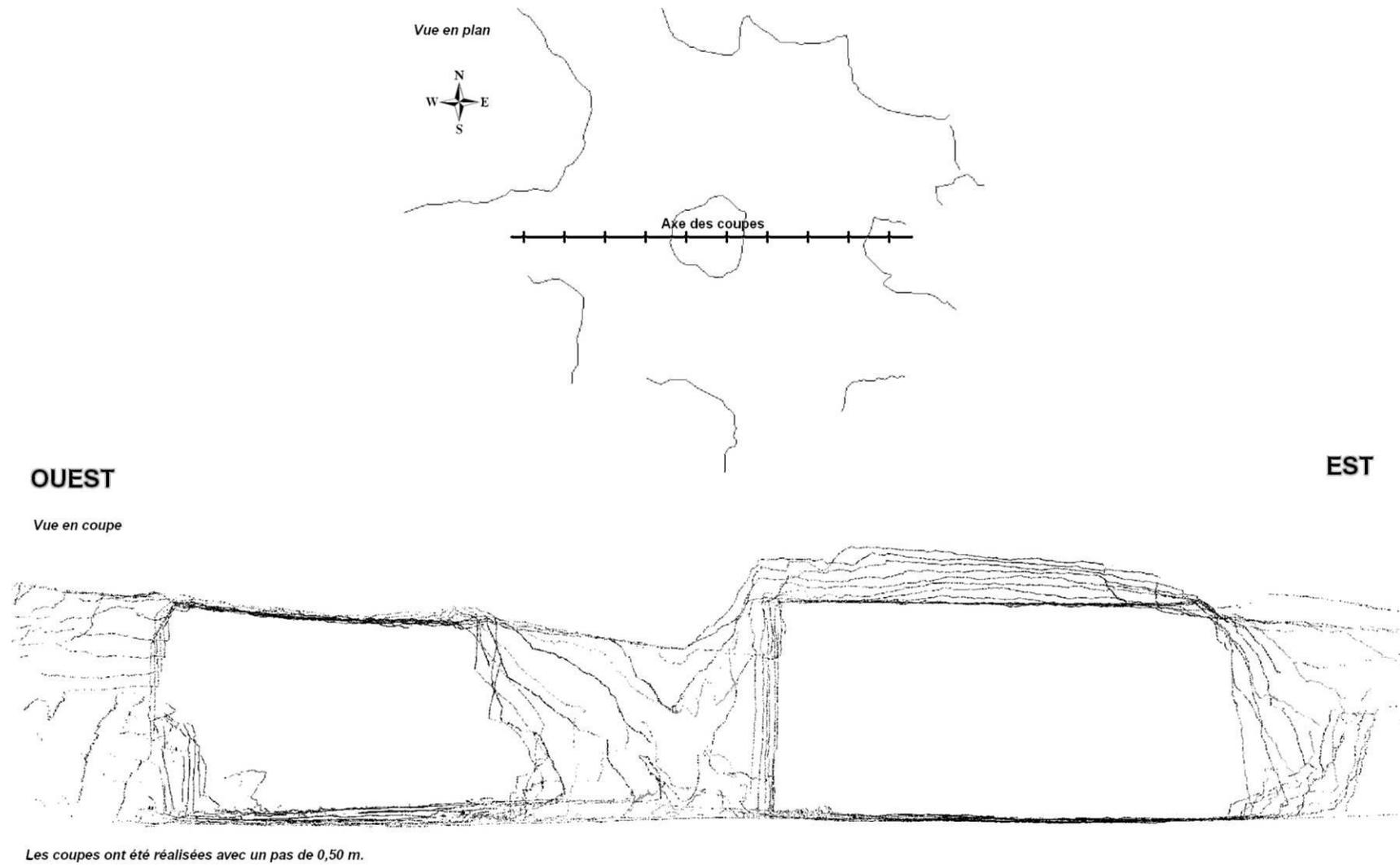


Figure 13 : Représentation des coupes successives du pilier centrale d'une des salles de la carrière

Toute la carrière n'a pas été scannée. Cependant, grâce à l'utilisation du scanner laser 3D, nous pouvons établir un premier diagnostic qui s'avère plus précis et surtout plus détaillé que celui réalisé par inspection visuelle. La densité de fracturation est plus importante près au niveau versant. La carrière semble aggraver l'aléa du versant. L'aléa prépondérant sur la zone des cinquante cinq premiers mètres est l'aléa « chute de bloc » et « remontée de voute » et passée cette zone, l'aléa rencontré sera plutôt l' « effondrement de piliers ».

Une autre campagne de mesure au scanner laser 3D sera réalisée dans quelques mois pour évaluer l'évolution de la fracturation et éventuellement des mouvements de blocs.

3.3 RÉSULTAT ET APPLICATION

L'utilisation du scanner laser 3D sur ces deux sites a permis de mettre en évidence l'adaptabilité et les limites de cet outil pour caractériser les cavités souterraines de falaises sous-cavés.

Pour une observation optimale d'un coteau ou d'un front rocheux par scans successifs, il est préférable qu'il n'y ait pas trop de végétation et d'obstacles. Cette contrainte peut être surmontée par un entretien préalable du versant avant les mesures (débroussaillage) si cela n'impacte pas la stabilité du versant ou par la réalisation de la campagne de mesure en hiver où la végétation se raréfie.

L'acquisition rapide des données de site par cet appareil réduit grandement le temps de terrain tout en augmentant la précision des informations acquises. Les zones inaccessibles, en hauteur et escarpées, où la prise de mesures s'avèrent périlleuses, peuvent être caractérisées facilement. Evidemment, cet outil ne remplace pas l'analyse géotechnique réalisée permettant de conclure sur l'état de stabilité du site mais il constitue une base fiable pour caractériser précisément l'ensemble du site. A cela s'ajoute l'aspect visuel : l'obtention du site numérisé en 3D permet au décideur de comprendre l'analyse de stabilité et d'envisager les mesures à prendre.

D'autres campagnes de mesures seront réalisées sur ces deux sites pour déterminer si le scanner laser 3D permet de surveiller à long terme l'évolution des zones instables par comparaison de scans successifs.

4. VALIDATION DE LA MÉTHODOLOGIE DE DÉTERMINATION DE L'ALÉA VERSANT ROCHEUX SOUS-CAVÉ

Cette partie commencera par un bref rappel de la méthodologie de détermination de l'aléa versant sous-cavé élaborée dans le rapport INERIS intitulé **Développement d'une méthodologie pour la détermination de l'aléa « versant rocheux sous-cavé » - Vérification sur un cas réel** (référéncé DRS-12-126057-11849A). La méthodologie sera ensuite appliquée sur deux autres sites sous-cavés, pour mettre en évidence l'avantage de cette méthodologie par rapport à celle qui ne prend en compte que le versant et non les cavités souterraines.

4.1 RAPPEL DE LA MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DE L'ALÉA VERSANT SOUS-CAVÉ

L'aléa désigne un phénomène naturel lorsqu'il peut être qualifié ou hiérarchisé en croisant son intensité, ou sa gravité potentielle, avec sa probabilité d'occurrence. Dans le cas d'un versant sous-cavés, il faut considérer 3 types d'aléas (Figure 14) :

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

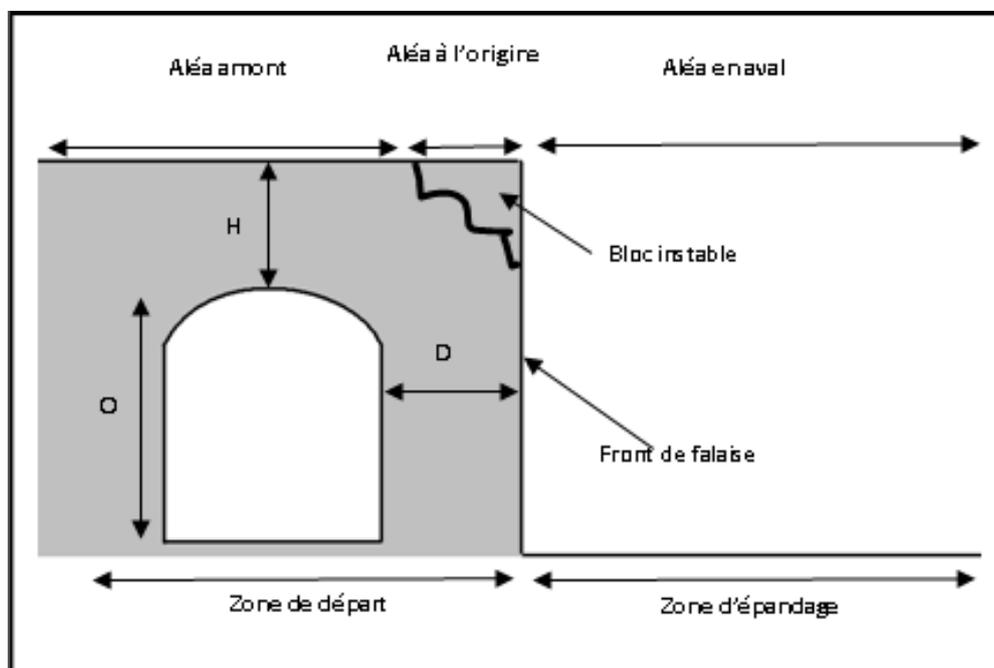


Figure 14 : Représentation schématique d'un front sous-cavé

Lorsqu'une cavité souterraine est présente à une distance inférieure à 5 fois le diamètre équivalent de la cavité, elle joue un rôle de facteur aggravant dans les critères de détermination de l'aléa versant. En effet, la cavité peut influencer sur l'état de fracturation du massif en l'augmentant et ainsi agir indirectement sur la résistance du massif en la réduisant. Son impact se retrouve au niveau de l'intensité et de la probabilité de l'aléa.

4.1.1 INTENSITÉ DE L'ALÉA VERSANT SOUS-CAVÉ

4.1.1.1 INTENSITÉ À L'ORIGINE DU FRONT (I_0)

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

4.1.1.2 INTENSITÉ EN ZONE D'ÉPANDAGE (I_E)

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

4.1.1.3 INTENSITÉ EN AMONT (I_A)

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

4.1.2 PROBABILITÉ DE L'ALÉA VERSANT SOUS-CAVÉ

4.1.2.1 PROBABILITÉ D'OCCURRENCE EN ZONE DE DÉPART (P_0)

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

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

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

4.1.2.2 PROBABILITÉ D'OCCURRENCE EN ZONE D'ÉPANDAGE (P_E)

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

Plusieurs cas de figures peuvent se présenter :

- La distance D entre la cavité souterraine et le versant est nulle et la cavité est vide (schéma de gauche de la Figure 15).

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

- La distance D entre la cavité souterraine et le versant est nulle et la cavité n'est pas vide (schéma du milieu et de droite de la Figure 15).

La situation se présente lorsqu'il y a des éboulis, du remblai à l'intérieur de la cavité ou lorsqu'il y a une maison troglodyte. Dans le cas de l'éboulis (schéma du milieu de la Figure 15), les données concernant l'angle et la longueur du talus seront prises sur l'éboulis (angle α et longueur). Dans le cas de la maison troglodyte (schéma de droite de la Figure 15) et pour déterminer cette probabilité en zone d'épandage, les paramètres classiques de l'aléa front rocheux qui sont l'«angle et la longueur du talus en pied de falaise» seront pris à partir du mur extérieur de la construction troglodytique.

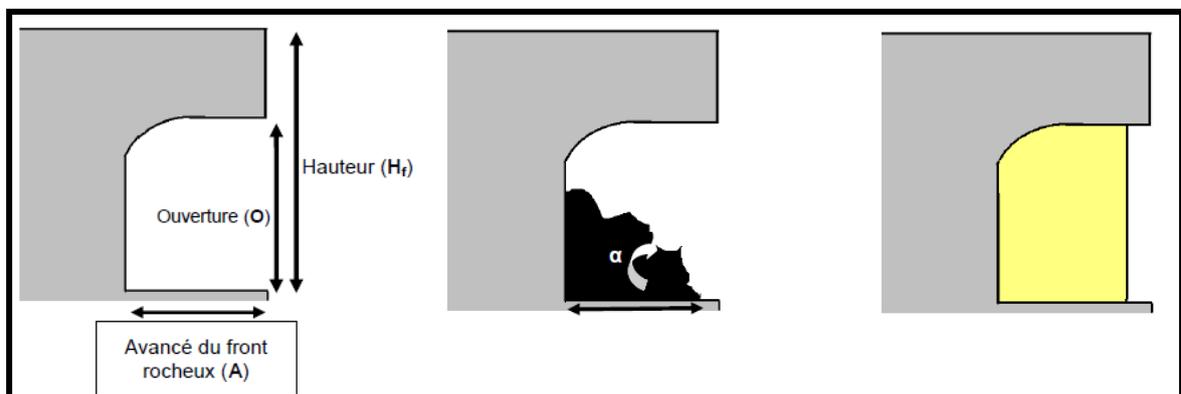


Figure 15 : Représentation schématique d'un versant sous-cavé où D , la distance entre la cavité et le versant, est nulle

4.2 VALIDATION DE LA MÉTHODOLOGIE SUR DES CAS RÉELS

Nous avons choisi deux sites avec une configuration de versants, des matériaux et des caractéristiques propres différents dans le but de savoir si la méthodologie s'adapte à cette disparité rencontrée sur le terrain. L'analyse préalable de ces deux sites a été réalisée dans la partie 3.

4.2.1 SITE DE CREIL

Comme expliqué dans les parties précédentes, le site de Creil est un coteau en tuf, matériaux sablonneux, très friable. La particularité de ce site est donc que la fracturation nette, comme observée sur des falaises rocheuses, est absente.

4.2.1.1 DÉTERMINATION DE L'INTENSITÉ DE L'ALÉA

Intensité à l'origine du front

L'ensemble du front de 5,2 m de hauteur et de 10 m de longueur est plutôt massif avec une végétation importante. Un décollement de matière a été observé par le propriétaire à droite de l'entrée de la cave 2 de moins d'un m³ (Figure 16). Cela correspond à une intensité **très limitée** (**I₀0**).

En tenant compte des caves présentes, dont l'ouverture est de 2 m de hauteur, le recouvrement est d'environ 3 m de hauteur. Le volume des matériaux instables de ce coteau qui sont susceptibles de se mettre en mouvement dépasse le m³. Une intensité **limitée** sera donc choisie (**I₀1**).



Figure 16 : Décollement de matière observable sur le front de coteau

Intensité en amont

La pente du coteau est inférieure à 40° et la formation géologique est plutôt meuble, on peut donc s'attendre à des glissements superficiels. L'intensité correspondante est **I_a1**, une intensité **limitée**, l'absence ou non de cavités souterraines ne modifiant pas cette intensité.

Intensité en zone d'épandage

Elle qualifie les volumes d'éboulis prévisibles qui dépendent des volumes de masses instables à l'origine en y intégrant la notion d'extension. Cela correspond à une intensité **très limitée (I_{e0})**. La même intensité sera choisie en présence ou non de cavités. En effet, même si l'intensité à l'origine est plus importante en présence de cavité, l'extension sera moins importante car les éboulis rempliront déjà une partie des vides souterrains avant de se propager dans la zone d'épandage.

4.2.1.2 DÉTERMINATION DE LA PROBABILITÉ DE L'ALÉA

Probabilité d'occurrence en zone de départ

Elle est obtenue par le croisement de deux critères :

- l'activité des mouvements affectant le site : quelques traces morphologiques de mouvements plus ou moins récents sont observables, avec des zones d'altérations superficielles même si globalement la végétation présente n'est pas perturbée. Le massif sera qualifié de **peu actif**.
- la sensibilité du coteau qualifiée à partir d'observations géomécaniques et structurales. L'application du tableau 7 du rapport méthodologique référencé DRS-12-126057-11849A, ne s'appliquent pas. En effet, une étude détaillée de la fracturation n'est pas possible vu le matériau en présence. On note la présence d'un seul décollement de matériau sur le coteau de dimension restreinte. L'apparence générale du coteau semble donc **favorable** à la stabilité. Lorsqu'on considère la présence des caves, deux informations supplémentaires s'ajoutent : les observations de plusieurs chutes de toit dans les caves 1 et 2 (Figure 6) et aussi la présence d'un affaissement en amont, possible conséquence d'un mouvement souterrain. En tenant compte de ces éléments, la sensibilité du coteau passe à **défavorable**. La méthodologie pourra donc être modifiée pour prendre en compte ce type de matériaux friable ne présentant pas une fracturation nette.

Selon le tableau ci-dessous (Tableau 1), une probabilité d'occurrence en zone de départ **faible (P_{o1})** est obtenue et une probabilité d'occurrence **moyenne (P_{o2})** en tenant compte des caves souterraines.

Tableau 1 : Evaluation du niveau de probabilité d'occurrence en zone de départ

SENSIBILITE	Très favorable	Favorable	Défavorable	Très défavorable
ACTIVITE				
Dormant	Négligeable (P _{o0})	Faible (P _{o1})	Faible (P _{o1})	Moyenne (P _{o2})
Inactif ou peu actif	Faible (P _{o1})	Faible (P _{o1})	Moyenne (P _{o2})	Moyenne (P _{o2})
Frais	Moyenne (P _{o2})	Moyenne (P _{o2})	Forte (P _{o3})	Forte (P _{o3})
Actif	Forte (P _{o3})	Forte (P _{o3})	Forte (P _{o3})	Forte (P _{o3})

Probabilité d'occurrence en zone d'épandage

Avant de pouvoir l'évaluer, il est nécessaire de déterminer la probabilité d'extension de la masse de matériaux potentiellement en mouvement. Elle dépend de la nature et du profil du pied du versant ainsi que de la distance séparant le front du coteau d'une zone choisie, ici la maison du propriétaire située à 10 m en aval du coteau. Le profil du pied du versant est différent selon la zone du coteau considérée comme le montre la Figure 17.



Figure 17 : Mise en évidence du talus au pied du coteau

Selon le tableau ci-dessous (Tableau 2), la partie du versant situé entre les deux 55, soit une configuration **défavorable** (15 (petite végétation) +15 (sol compacté artificiellement) +10 (angle du talus entre 20°et 30°) +10 (hauteur du front entre 5 m et 10 m) + 5 (longueur du talus en pied inférieur à 50 m)).

Présence d'obstacles	Note
- mur de soutènement de bonne qualité, habitat dense	0
- arbres clairsemés, zone pavillonnaire, murs de mauvaise qualité	5
- petite végétation dense (arbustes, ronces...), petits murets	10
- petite végétation	15
- aucun	20
Nature des terrains du pied de falaise	
- fossé prononcé, retenue d'eau, zone marécageuse	0
- sol mou	5
- terre avec herbe	10
- sol compacté artificiellement	15
- route, paroi rocheuse	20
Angle du talus en pied de falaise	
- $\alpha < 10^\circ$	0
- $10^\circ < \alpha < 20^\circ$	5
- $20^\circ < \alpha < 30^\circ$	10
- $30^\circ < \alpha < 40^\circ$	20
- $\alpha > 40^\circ$	25
Hauteur du front de falaise	
- $H < 5$ mètres	5
- $5 < H < 10$ mètres	10
- $10 < H < 20$ mètres	20
- $H > 20$ mètres	25
Longueur du talus en pied de falaise	
- $L < 50$ mètres	5
- $L > 50$ mètres	10
Note totale	/100

Tableau 2 : Paramètres de caractérisation du versant

Pour les zones situées au droit des caves, on remplace les critères « angle du talus » et « longueur du talus » par ceux du Tableau 3. La note est de 65, soit une configuration **défavorable** (15 (petite végétation) +15 (sol compacté artificiellement) +20 (Ouverture/Hauteur du front = 0.4°) + 10 (hauteur du front entre 5 m et 10 m) + 5 (avancé du front supérieure à l'ouverture)).

Tableau 3 : Critères de remplacement dans le cas d'un versant sous-cavé

Rapport entre l'ouverture O et la hauteur du front de falaise H_f	
- $0,75 H_f < O < H_f$	5
- $0,5 H_f < O < 0,75 H_f$	10
- $0,25 H_f < O < 0,5 H_f$	20
- $O < 0,25 H_f$	25
Avancé du front rocheux A et ouverture O	
- $A > O$	5
- $A < O$	10

La probabilité d'extension obtenue est forte pour l'ensemble du coteau si la zone d'atteinte considérée est la maison du propriétaire ou une zone correspondant à une distance inférieure. Cette probabilité est ensuite pondérée par la probabilité d'occurrence à l'origine P_o pour obtenir la probabilité d'occurrence en zone d'épandage :

- en tenant compte uniquement du coteau, une probabilité **faible P_e1** (avec P_o1) est obtenue ;
- en tenant compte des caves, une probabilité **moyenne P_e2** (avec P_o2) est obtenue.

4.2.1.3 DÉTERMINATION DE L'ALÉA

Après croisement de l'intensité et de la probabilité d'occurrence, le résultat montre que la prise en compte des zones sous-cavées rend l'aléa plus élevé d'un niveau en zone de départ mais ne semble pas influencer l'aléa en zone d'épandage (Tableau 4).

Tableau 4 : Détermination de l'aléa sur le coteau de Creil

	Aléa « versants »	Aléa « versants sous-cavés »
Aléa à l'origine	Faible ($I_o0 \times P_o1$)	Moyen ($I_o1 \times P_o2$)
Aléa en amont	Faible ($I_a1 \times P_o1$)	Moyen ($I_a1 \times P_o2$)
Aléa en zone de d'épandage	Faible ($I_e0 \times P_e1$)	Faible ($I_e0 \times P_e2$)

Ainsi, la prise en compte du sous-cavage semble importante car elle modifie l'aléa. En outre, concernant la méthodologie d'évaluation de l'aléa, une modification pourra être apportée : la caractérisation de la sensibilité du coteau servant à déterminer la probabilité en zone de départ ne doit pas se restreindre à des versants de nature « roche cohérente » mais elle doit être étendue à toute sorte de matériaux allant de « cohérent » à « meuble ». Le tableau caractérisant la sensibilité du massif sera donc revu.

4.2.2 SITE DE SAUMUR

A l'opposé du site précédent et comme évoqué dans la partie 3.2.2., le site de Saumur est constitué d'un versant rocheux de calcaire très abrupte et très fracturé.

4.2.2.1 DÉTERMINATION DE L'INTENSITÉ DE L'ALÉA

Intensité à l'origine du front

L'ensemble du front fait 10 m de hauteur sur une longueur de 6 m. Il est fortement découpé par endroit présentant des éperons rocheux (Figure 18). Des chutes de blocs sont possibles, leur volume élémentaire ne dépassant pas le m^3 . L'intensité est donc **limitée (I_o1)**.

En tenant compte de la carrière présente, dont l'ouverture est de 4 m de hauteur environ, on obtient un recouvrement de 6 m de hauteur. Le volume des matériaux instables qui sont susceptibles de se mettre en mouvement dépasse largement le m^3 et pourrait entraîner un éboulement de la carrière avec la falaise. Une intensité **modérée** sera donc choisie (**I₀₂**).



Figure 18 : Front de falaise du site de Saumur (47)

Intensité en amont

La pente de la falaise est supérieure à 40° et la formation géologique est très cohérente, on peut donc s'attendre à des glissements superficiels et des chutes de blocs. L'intensité correspondante est **I_{a1}**, une intensité **limitée**, l'absence ou non de cavités souterraines ne modifiant pas cette intensité.

Intensité en zone d'épandage

Elle qualifie les volumes d'éboulis prévisibles qui dépendent des volumes de masses instables à l'origine en y intégrant la notion d'extension. Cela correspond à une intensité **limitée (I_{e1})** en présence ou non de cavités, une partie des éboulis pouvant remplir les vides souterrains.

4.2.2.2 DÉTERMINATION DE LA PROBABILITÉ DE L'ALÉA

Probabilité d'occurrence en zone de départ

Elle est obtenue par le croisement de deux critères :

- l'activité des mouvements affectant le site : des traces morphologiques de mouvements sont observables, avec des fractures mécaniques développées. Le massif sera qualifié de **frais**.
- la sensibilité du coteau qualifiée à partir d'observations géomécaniques et structurales. L'application du tableau 7 du rapport référencé DRS-12-126057-11849A, exposant la méthodologie, s'applique. L'étude détaillée de la fracturation a été possible grâce à l'utilisation du scanner laser 3D :
 - Pas de fracturation : $PF = 0,35$;
 - Ecartement et rugosité des joints : $E < 5\text{mm}$;
 - Humidité des fissures : plutôt sèche mais c'est une donnée fortement dépendante de la saison) ;
 - Direction structurale par rapport au front (DIR) : entre 5 et 15° ;
 - Inclinaison des fissures par rapport au front : Pendage = -15° à -5° .

Le calcul de l'indice donne un total de 67 (($4(PF=2)+2(ER=2)+(HF=0)+(DIR=2)+2(Pen=3)$))(10/3)), soit une sensibilité **défavorable** à la stabilité.

Lorsqu'on considère la présence de la carrière, de nouveaux éléments apparaissent : une fracturation importante est visible dans les cinquante cinq premiers mètres (Figure 10) puis ensuite un certain nombre de piliers en mauvais état (Figure 11 et Figure 12). En tenant compte de ces éléments, la sensibilité de la falaise va se positionner entre **défavorable à très défavorable** à la stabilité.

Selon le Tableau 1, on obtient une probabilité d'occurrence en zone de départ **forte (P_{o3})** en tenant compte ou pas de la carrière.

Probabilité d'occurrence en zone de départ

Avant de pouvoir l'évaluer, il est nécessaire de déterminer la probabilité d'extension de la masse de matériaux potentiellement en mouvement. Elle dépend de la nature et du profil du pied du versant ainsi que de la distance séparant le front de la falaise d'une zone choisie, ici la zone des 40 premiers mètres sera considérée. Selon le Tableau 2 et Tableau 3, le versant sous-cavé obtient une note de 60, soit une configuration **défavorable** (10 (petits muret) +15 (sol compacté artificiellement) + 20 (Ouverture/Hauteur du front = 0.4°) +10 (hauteur du front entre 5 m et 10 m)+5 (avancé du front supérieure à l'ouverture)).

La probabilité d'extension obtenue est forte pour l'ensemble de la falaise. Cette probabilité est ensuite pondérée par la probabilité d'occurrence à l'origine P_o pour obtenir la probabilité d'occurrence en zone d'épandage qui est **forte (Pe3)** en tenant compte ou pas de la carrière.

4.2.2.3 DÉTERMINATION DE L'ALÉA

Après croisement de l'intensité et de la probabilité d'occurrence, le résultat montre que la prise en compte des zones sous-cavées rend l'aléa à l'origine plus élevé d'un niveau (Tableau 5). En effet, du fait de la prise en compte de cette carrière

aux dimensions importantes et dont l'état est mauvais, l'intensité est augmentée d'un niveau, d'où un aléa à l'origine plus élevé.

Les autres aléas restent identiques même si certaines différences sont visibles au niveau des critères de détermination de l'intensité et de la probabilité. Cependant, ces variations ne sont pas assez importantes pour que l'intensité ou la probabilité et donc l'aléa change de niveau.

Tableau 5 : Détermination de l'aléa sur le versant de Saumur

	Aléa « versants »	Aléa « versants sous-cavés »
Aléa à l'origine	Moyen ($I_{o1} \times P_{o3}$)	Fort ($I_{o2} \times P_{o3}$)
Aléa en amont	Moyen ($I_{a1} \times P_{o3}$)	Moyen ($I_{a1} \times P_{o3}$)
Aléa en zone de d'épandage	Moyen ($I_{e1} \times P_{e3}$)	Moyen ($I_{e1} \times P_{e3}$)

4.3 CONCLUSIONS

L'application de la méthodologie développée par l'INERIS sur ces deux sites très différents a permis de déterminer l'aléa mouvement de terrain lié au versant sous-cavé grâce à une connaissance précise des caractéristiques complètes du site, obtenue principalement par l'exploitation des données provenant du scanner laser 3D.

La prise en compte du sous-cavage semble indispensable pour évaluer précisément le niveau d'aléa d'une falaise sous-cavé. L'aléa en zone de départ semble être le plus sensible à la présence de vides souterrains car il augmente d'un niveau par rapport à la non prise en compte du sous-cavage.

L'aléa en zone d'épandage ne semble pas être modifié par le sous-cavage. Il aurait été possible que l'aléa en zone d'épandage diminue d'un niveau pour les zones sous-cavées en considérant qu'une partie des matériaux mis en mouvement remplisse le vide souterrain au lieu de se propager en aval du front. Cela se produisait pour le site de Montsoreau (cas étudié dans le rapport INERIS référencé DRS-12-126057-11849A) mais ne se retrouve pas dans les deux sites étudiés ci-dessus où l'aléa est identique en tenant compte ou pas des vides souterrains. Cette hypothèse sera donc approuvée ou réfutée par application de la méthodologie sur d'autres versants.

La méthodologie semble adaptée autant pour un coteau en matériau meuble que pour un matériau très cohérent. L'analyse de la fracturation n'est pas toujours possible mais le massif est toujours caractérisable. Certains critères de la méthodologie, notamment la caractérisation de la sensibilité du massif, se basent essentiellement sur une nature cohérente du matériau. Nous proposons de modifier le Tableau 7 intitulé « Caractérisation et détermination de la sensibilité » du rapport référencé DRS-12-126057-11849A présentant la méthodologie. Il reste utilisable dans le cas d'une falaise sous-cavée en matériaux cohérent. Dans le cas d'un versant en matériaux meuble, le tableau ci-dessous (Tableau 6) sera utilisé.

Tableau 6 : Caractérisation et détermination de la sensibilité dans le cas d'un versant en matériau meuble

Très favorable	Favorable	Défavorable	Très défavorable
Aucune zone de décollement de matière sur le versant	Zone restreinte du versant avec un décollement de matière (surface de décollement inférieure au m ²)	Zone importante du versant avec un décollement de matière (surface entre 1 et 3 m ²)	Zone très importante du versant avec un décollement de matière (surface supérieur à 3 m ²)
Sous-cavage sans aucun désordre apparent	Sous-cavage présentant quelques désordres mineurs et non récents	Sous-cavage présentant des désordres récents	Sous-cavage présentant de nombreux désordres récents et présence de zones instables
Aucune venue d'eau	Présence de zone d'humidité	Présence de goutte d'eau au toit du sous-cavage	Venue d'eau courante

5. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La gestion des versants sous-cavés est une problématique rencontrée tant par le particulier que par les services publics. Bien souvent, elle se traduit par de nombreuses contraintes car il existe un manque notable d'information en matière de réglementation, d'assurance, d'entretien et de méthodes de mise en sécurité. Pour palier à ce manque, un guide de bonnes pratiques sur l'utilisation des versants sous-cavés devrait être réalisé en coopération avec tous les organismes impliqués. Il préciserait la réglementation en vigueur et ses conditions d'application, la surveillance à mettre en place selon le type de versants sous-cavés, les travaux d'aménagement qui peuvent être réalisés. Il est aussi indispensable de réfléchir aux éléments nécessaires à l'établissement d'un contrat d'assurance habitation (un diagnostic de stabilité préalable, une mise en sécurité, une surveillance instrumentée...) qui permettent une bonne couverture pour le propriétaire et des garanties pour les compagnies d'assurance.

Une connaissance détaillée du versant sous-cavé semble un préalable essentiel à tout diagnostic ou analyse. Pourtant, les versants sous-cavés présentent souvent des zones inaccessibles en hauteur et escarpées. L'utilisation du scanner laser 3D s'est avérée concluante. En effet, le temps de terrain est grandement réduit tout en augmentant la précision des informations acquises. Evidemment, cet outil ne remplace pas l'analyse géotechnique permettant de conclure sur l'état de stabilité du site mais il constitue une base fiable pour caractériser précisément l'ensemble du site (fracturation, dimension, volume, désordres...). A cela s'ajoute l'aspect visuel, l'obtention du site numérisé en 3D, qui permet au décideur de comprendre l'analyse de stabilité réalisée et d'envisager les mesures à prendre.

Enfin, l'application de la méthodologie sur les sites de Creil et de Saumur, aux caractéristiques très différentes, a montré l'importance de prendre en compte le sous-cavage dans l'évaluation de l'aléa. L'aléa en zone de départ semble être le plus sensible à la présence de vides souterrains car il augmente d'un niveau par rapport à la non prise en compte du sous-cavage. L'aléa en zone d'épandage ne semble pas être modifié par le sous-cavage. Cette dernière hypothèse sera vérifiée par l'application de la méthodologie sur d'autres sites car il serait possible que l'aléa en zone d'épandage diminue d'un niveau pour les zones sous-cavées en considérant qu'une partie des matériaux mis en mouvement remplisse le vide souterrain au lieu de se propager en aval du front.

Au vu de ces conclusions, des travaux futurs restent à mener pour compléter notre vision de la problématique versant sous-cavé :

- réaliser de nouvelles campagnes de mesures sur les deux sites étudiés pour déterminer si le scanner laser 3D permet de surveiller à long terme l'évolution des zones instables par comparaison de scans successifs ;
- créer une présentation de la méthodologie sous forme de fiche à remplir pour faciliter sa mise en œuvre et l'appliquer à de nouveaux sites ;
- modéliser le comportement du versant sous-cavé en caractérisant notamment la distance minimale entre la cavité et le versant pour qu'il existe une interaction entre les deux.

6. BIBLIOGRAPHIE

BESSON et SAILLY, 2013. Cavités souterraines – Ce que vous devez savoir. http://www.catp-asso.org/web/fichiers/a_telecharger/Cavites_souterraines.pdf

RENAUD V., 2011. Etat des connaissances relatif à l'aléa des versants rocheux sous-cavés. Programme EAT-DRS-02 « Analyse, prévention et maîtrise des risques de mouvements de terrain liés à la présence de cavités souterraines et de versants rocheux instables ». Rapport INERIS référencé DRS-11-117684-04378A.

CHERKAOUI, 2013. Développement d'une méthodologie pour la détermination de l'aléa « versant rocheux sous-cavé - Vérification sur un cas réel ». Rapport INERIS référencé DRS-12-126057-11849A.