

Synthèse sur les techniques d'instrumentation en cavités souterraines

22 septembre 2023

Catherine PINON et Jean-Marc WATELET

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé dans le cadre du projet INTERREG RISSC, soutenu financièrement par le Fonds Européen de Développement Régional, la Région Wallonne et les opérateurs du projet.

Ce rapport a pour but de synthétiser les observations et actions menées en lien avec le module de travail concerné.

La responsabilité des auteurs ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, les auteurs ne peuvent pas être tenus responsables en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par les auteurs dans le cadre du projet, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur éventuel. Par conséquent, la responsabilité des auteurs ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective.

L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. Les auteurs dégagent également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet du projet.

TABLE DES MATIÈRES

1	Contexte	6
2	Objectifs.....	7
3	Notions sur la surveillance.....	8
	A. Principe de la surveillance	8
	B. Quand et pourquoi surveiller ?.....	9
	C. Que surveiller ?.....	10
	D. Quelles options et techniques de surveillance ?	11
4	Les questions à se poser avant d'envisager une surveillance.....	12
	A. Quel phénomène redoute-t-on ?	12
	1. Les effondrements localisés	13
	2. Les affaissements et effondrements en masse	16
	B. Combien de temps faut-il surveiller ?.....	19
	1. Situation ponctuelle.....	19
	3. Situation temporaire	19
	4. Situation durable	20
	C. Que permet l'environnement d'un site ?	20
	1. Accessibilité	20
	2. Faisabilité technique liée à l'environnement du site.....	21
	D. Quelques éléments-guides de pertinence d'une surveillance.....	22
5	Comment élaborer le projet de surveillance	23
	A. Que surveiller ?.....	23
	1. Les relevés visuels directs ou assistés.....	24
	2. Les mesures de déplacement	25
	3. Les mesures de pression.....	27
	4. Les mesures d'ondes acoustiques et microsismiques	28
	B. Comment dimensionner la surveillance ?	29
	1. Rechercher le meilleur rapport coût/avantage	29
	2. Tenir compte de l'étendue de l'ouvrage à surveiller	30
	3. Tenir compte de la contrainte d'accessibilité à l'ouvrage souterrain.....	30
	4. Tenir compte des contraintes environnementales du site à surveiller	30
	5. S'adapter à la durée de surveillance.....	31
	6. Redondance et complémentarité des mesures.....	31
	C. Comment s'assurer du bon fonctionnement du dispositif ?	33
	D. Comment gérer les données de surveillance ?.....	33
	1. L'acquisition des données.....	33

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

2.	La gestion des données.....	35
E.	Comment identifier une situation anormale ?	39
F.	Comment se préparer à la gestion de crise ?	39
G.	Comment maintenir le système de surveillance instrumentée ?	41
6	RISSC et la surveillance de cavités	41
A.	Caractéristiques du site instrumenté et phénomènes redoutés	41
B.	Instrumentation déployée	42
1.	Instrumentation pré-existante	42
2.	Instrumentation du projet RISSC à visée démonstrative	43
C.	Constats	45
7	Quelles évolutions possibles pour la surveillance des cavités ?	47
8	Conclusions.....	48
9	Pour aller plus loin	49
10	Annexes	50

TABLE DES FIGURES

Figure 1 :	Place de la surveillance dans la prévention du risque lié aux cavités souterraines.....	8
Figure 2 :	Utilisation d'un scanner laser 3D pour une opération-test de surveillance dans la carrière souterraine de la Malogne (Belgique)	9
Figure 3 :	Un exemple de pilier dégradé dont l'évolution pourrait être suivie (Hauts-de-France)	10
Figure 4 :	Les différents types de surveillance.....	11
Figures 5 :	Exemples de manifestation de fontis en surface (en Belgique à gauche et en Hauts-de-France à droite)	13
Figure 6 :	Schéma d'évolution d'un fontis (Ineris).....	14
Figure 7 :	Remontée de voûte observée en souterrain dans la carrière de la Malogne (Mons, Belgique).....	14
Figure 8 :	Pilier très dégradé n'assurant plus sa fonction de maintien dans une carrière de la région lilloise.....	14
Figure 9 :	Schéma de principe d'une cuvette d'affaissement.....	16
Figure 10 :	Effondrement généralisé au droit de la carrière souterraine de la Malogne (Mons, Belgique).....	17
Figures 11 :	Illustration de deux carrières souterraines de conditions d'acheminement opposées (aisé à gauche dans une carrière de calcaire de l'Oise, difficile et dangereux à droite dans une carrière de la région lilloise)	21
Figure 12 :	Tableau de pertinence d'une surveillance	22
Figures 13 :	Exemples d'indicateurs de suivi (témoins, bâche, peinture) dans des carrières de Wallonie et des Hauts-de-France	24
Figure 14 :	Suivi par photogrammétrie dans la carrière de la Malogne	25
Figures 15 :	Surveillance d'une montée de voûte par comparaison des images 3D	25
Figures 16 :	Exemples de capteurs de déplacement utilisés dans le cadre de la surveillance de cavités a) canne de convergence avec comparateur ; b) fissuromètre ; c) extensomètre en forage.....	26
Figure 17 :	Variation du niveau de la nappe dans la carrière d'Hellemmes (France) entre mai 2019 et mai 2023 – mise en place dans le cadre du projet RISSC	27

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

Figure 18 : Dispositif de mesure acoustique dans la carrière souterraine d'Hellemmes (France) – mise en place dans le cadre du projet RISSC.....	29
Figure 19 : Exemple de station de mesure réunissant cannes de convergence et extensomètres.....	32
Figure 20 : Capteur électrique doublé par un comparateur.....	32
Figure 21 : Extrait d'une carte de levés géotechniques dans une carrière souterraine (figurés rouge et orange : montées de voûte ou piliers fracturés, en bleu : venues d'eau...)	34
Figure 22 : Site web mobile pour inspection géotechnique	34
Figure 23 : Unité d'acquisition installée à Hellemmes (France) dans le cadre du projet RISSC.....	35
Figure 24 : Mesures de déplacement relatif dans une carrière de pierre de taille (août 2010 – octobre 2016) : les auteurs attribuent les fluctuations des déplacements relatifs entre -0,05 et 0,05, enregistrés par les capteurs aux variations saisonnières de température	36
Figures 25 : Accélération simultanée de la convergence sur plusieurs stations [21]	37
Figure 26 : Exemple de centre de traitement et de partage de données en ligne et en temps réel (e.cenaris).....	38
Figure 27 : Logigramme de suivi de la carrière d'Hellemmes dans le cadre du projet RISSC	40
Figure 28 : Localisation du site instrumenté (étoile rouge) parmi les carrières souterraines recensées en Hauts-de-France et Wallonie (sources : SPW, Géorisques et EGDI)	42
Figure 29 : Carte de situation des capteurs déployés par la MEL (étoiles jaunes) et dans le cadre du projet RISSC (étoiles rouges) dans la carrière souterraine d'Hellemmes	43
Figures 30 : Zone de prélèvement du gaz et radar distancemètre à gauche ; capteurs de gaz installés dans une centrale d'acquisition en surface à droite.....	44
Figure 31 : Page web-monitoring e.cenaris mise en place dans le cadre du projet RISSC	44
Figure 32 : Variation de la température dans la carrière d'Hellemmes (France) entre mai 2019 et mai 2023 – mise en place dans le cadre du projet RISSC	46
Figure 33 : Valeurs enregistrées par le radar P dans la carrière d'Hellemmes (France) entre mai 2019 et mai 2023 – mise en place dans le cadre du projet RISSC	46

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

Résumé :

Le module 4 du projet RISSC a pour objectifs d'analyser et de développer des solutions adaptées pour réduire le risque lié aux cavités souterraines, à l'échelle transfrontalière France-Belgique (Hauts-de-France – Wallonie).

Ce document de synthèse établi dans le cadre de l'activité 2 du module 4, intitulée « Evaluation de l'instrumentation pour le suivi des cavités », est à destination des décideurs locaux (administration, élus, maîtres d'ouvrages) et des maîtres d'œuvre confrontés au choix de l'emploi de la surveillance en évoquant notamment les questions qu'il convient de se poser avant d'envisager une surveillance des cavités pour prévenir le risque. Il ne constitue pas un catalogue exhaustif des techniques de surveillance existantes.

Dans un premier temps, il convient de bien évaluer le phénomène d'instabilité redouté, puis de s'interroger sur la durée de la surveillance, en situation d'urgence, à court terme, ou de manière plus durable, dans l'attente de décisions plus pérennes sur la gestion du risque. Les possibilités et les conditions d'accès aux sites, les contraintes de sécurité et les conditions de transmission sont ensuite évaluées pour permettre d'orienter le choix vers une méthode de surveillance adaptée et optimale.

Une fois ces questions bien appréhendées, différents types de dispositifs de surveillance sont possibles et présentés dans ce document. Pour illustration, certains ont été mis en place, dans le cadre du module 4 du projet Interreg RISSC, dans une carrière souterraine abandonnée des Hauts-de-France.

Mots-clés :

Cavités souterraines, Surveillance, Mouvements de terrain.

Pour citer ce document :

Synthèse sur les techniques d'instrumentation en cavités souterraines, PINON C. et WATELET JM., 2023, Rapport de synthèse du Module 4 - activité 2 du projet INTERREG RISSC, ineris-174384-2760653-v2.0

1 Contexte

Le risque d'instabilité de cavités souterraines d'origine anthropique (créées par la main de l'Homme) ou naturelle (karst) concerne un territoire étendu et des dizaines de communes en Wallonie et dans les Hauts-de-France. S'il existe des solutions de traitement pérennes, comme le comblement ou le confortement des ouvrages, la surveillance des espaces souterrains fait partie des mesures de prévention pouvant être utilisées pour gérer un site souterrain présentant un risque.

Les solutions de surveillance mises en œuvre par les acteurs du risque de part et d'autre de la frontière offrent un panel varié. Si les inspections visuelles sont largement favorisées, l'instrumentation des cavités souterraines est parfois nécessaire pour comprendre l'évolution du massif ou suivre au plus près l'évolution des dégradations.

D'une manière générale, ces solutions alternatives doivent assurer un suivi dans le temps et la détection d'accélération de la déformation, précurseurs de phénomènes brutaux. Elles interviennent au regard d'autres mesures peu envisageables techniquement ou économiquement.

Les partenaires wallons et français ont ainsi examiné et comparé les dispositifs de mesure utilisés de part et d'autre de la frontière. Ce document présente ainsi une analyse des dispositifs mis en œuvre (type, pérennité, qualité...). Des techniques innovantes (acoustique, radar, scanner laser 3D...) ont également été évaluées et proposées ponctuellement sur un site en France et un autre en Wallonie.

Ce document de synthèse n'est pas un catalogue exhaustif des techniques de surveillance existantes, certaines sont d'ailleurs inadaptées aux ouvrages situés de part et d'autre de la frontière. Il est à destination des décideurs locaux (administration, élus, maîtres d'ouvrages) et des maîtres d'œuvre confrontés au choix de l'emploi de la surveillance en évoquant notamment les questions qu'il convient de se poser avant d'envisager une telle mesure de prévention.

Dans un premier temps, il convient de bien évaluer le phénomène d'instabilité redouté, puis de s'interroger sur la durée de la surveillance, en situation d'urgence, à court terme, ou de manière plus durable, dans l'attente de décisions plus pérennes sur la gestion du risque.

Les possibilités et les conditions d'accès aux sites, les contraintes de sécurité et les conditions de transmission sont ensuite présentées pour permettre d'orienter le choix vers une méthode de surveillance adaptée.

Une fois ces questions préliminaires bien appréhendées, différents types de dispositifs de surveillance sont possibles et sont présentés de façon synthétique dans ce document.

Ce document s'inspire de guides déjà établis (Bennani M., Bouffier C. & Franck C., 2016 : Guide de surveillance des cavités souterraines d'origine anthropique. Rapport Ineris DRS-16-156834-00810B, 127 p, notamment). Il est enrichi d'exemples et d'illustrations spécifiques aux contextes des carrières et cavités wallonnes ou des Hauts-de-France ; il intègre également des éléments d'application issus de l'observation expérimentale menée sur le site de la carrière d'Hellemmes au cours du projet RISSC.

2 Objectifs

Les cavités souterraines d'origine anthropique ou naturelle, peuvent, en devenant instables, occasionner en surface des mouvements de terrain qui peuvent être préjudiciables en présence d'enjeux : habitations, bâtiments, infrastructures (souterraines ou aériennes).

La surveillance des cavités souterraines est l'une des solutions permettant d'assurer la sécurité des personnes et des biens situés à proximité. Dans la plupart des cas, cette solution doit cependant rester palliative, dans l'attente de travaux de mise en sécurité ou d'autres moyens de remédiation. Elle peut toutefois se prolonger dans le temps lorsqu'elle est jugée avantageuse, au regard d'autres solutions peu envisageables techniquement ou économiquement.

Le présent document technique a pour objectifs de présenter les bonnes pratiques générales pour évaluer la pertinence et les modalités d'une surveillance et d'aborder les points importants pour qu'elle puisse être déployée et gérée de manière optimale, notamment dans le contexte des sites souterrains wallons ou situés dans les Hauts-de-France.

Il s'adresse en particulier à un public de maîtres d'ouvrages ou de collectivités pouvant être confrontés au choix de son emploi.

Il nous a donc paru important, plutôt que d'établir un catalogue exhaustif de toutes les techniques et technologies disponibles, de proposer des éléments de réponse aux questionnements posés lorsque ces acteurs seront confrontés à des cas de cavités souterraines instables, permettant ainsi de les guider sur la pertinence et le choix d'une solution de surveillance.

Une surveillance opérationnelle réussie étant celle permettant de maîtriser l'ensemble des éléments qui la constituent (les mesures, leur analyse, la transmission et la gestion des données, les alertes mises en place, la maintenance dans le temps du dispositif), l'ensemble du processus est abordé en explicitant chacun de ces maillons et en définissant les points importants à appréhender.

Un glossaire est consultable en annexe pour connaître les définitions des termes les plus employés et, le cas échéant, pour apporter des précisions techniques.

NB : ce document technique vise en particulier les cavités souterraines anthropiques. Il n'a pas été conçu et élaboré dans le contexte spécifique des cavités d'origine minière (régies par le Code Minier en France), bien que dans certains cas, la problématique et les solutions techniques soient très proches, voire identiques.

3 Notions sur la surveillance

A. Principe de la surveillance

La surveillance est une composante de la prévention du risque (ici lié à l'instabilité de cavités souterraines) qui a pour but d'avertir ou d'alerter d'un danger, sans s'opposer au développement de cette instabilité. Ainsi la surveillance contribue à assurer la sécurité des personnes exposées en surface, au droit ou à proximité des cavités souterraines (Figure 1).

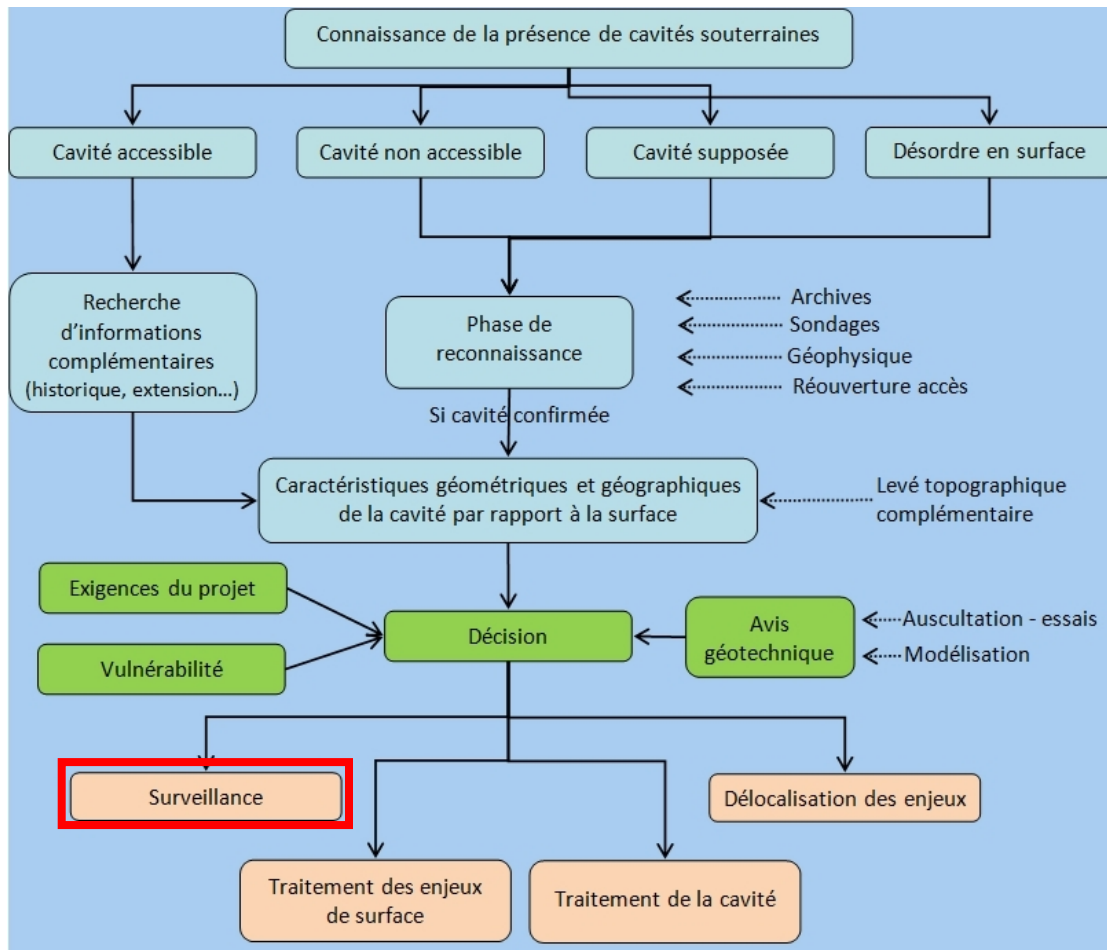


Figure 1 : Place de la surveillance dans la prévention du risque lié aux cavités souterraines

La surveillance fait appel à des méthodes dont le principe est de détecter et suivre l'initiation et l'évolution des mécanismes de mouvements de terrain pour permettre de prendre suffisamment tôt les mesures de sécurité qui s'imposent en cas d'instabilité redoutée ou avérée.

En outre, la surveillance permet également de confirmer (ou d'infirmer) un diagnostic géotechnique donné sur des cavités souterraines, de mieux comprendre le comportement du massif rocheux où se trouvent ces cavités, éventuellement des terrains qui les recouvrent et ainsi optimiser le suivi.

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

C'est la notion de suivi dans le temps qui caractérise la surveillance. Elle se distingue en cela de l'auscultation, terme fréquemment employé et regroupant les techniques visant à mieux caractériser physiquement les cavités souterraines. Cela n'empêche pas que des techniques d'auscultation puissent être utilisées dans le cadre d'une surveillance, par le suivi de certains paramètres physiques mesurés dont l'évolution est jugée pertinente.

B. Quand et pourquoi surveiller ?

La surveillance peut être mise en œuvre lorsque des enjeux (habitations, bâtiments, ouvrages et/ou réseaux aériens ou souterrains) peuvent être affectés par une instabilité liée à des cavités souterraines. La nature de ces enjeux et leur vulnérabilité aux phénomènes redoutés peut influencer sur le choix des mesures à mettre en œuvre.

Rappelons que la surveillance est dans la plupart des cas une solution palliative, qui consiste à prévenir et maîtriser le risque dans l'attente de mesures pérennes permettant de l'éradiquer (confortement ou comblement des cavités, traitement ou déplacement des bâtiments et infrastructures en surface).

La surveillance peut par ailleurs être mise en œuvre lorsqu'il s'agit de parfaire le diagnostic de stabilité des cavités. Celui-ci peut s'avérer favorable à terme, les vides souterrains étant jugés stables, auquel cas la surveillance peut ne pas être poursuivie, ou tout du moins être allégée (Figure 2).



Figure 2 : Utilisation d'un scanner laser 3D pour une opération-test de surveillance dans la carrière souterraine de la Malogne (Belgique)

Certains cas particuliers nécessitent une surveillance durable dans le temps. Ce sont par exemple les cavités souterraines réutilisées et aménagées (intitulées Etablissements Recevant du Public-ERP, côté Hauts-de-France) pour lesquelles une surveillance est nécessaire pour garantir la fréquentation des lieux en toute sécurité.

Il peut s'agir également d'espaces souterrains très étendus et de volumes importants, pour lesquels les solutions de traitement/comblement sont complexes ou considérées comme

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

économiquement inenvisageables. Toutefois, une surveillance mise en place comme moyen palliatif peut s'avérer plus onéreuse que le traitement si elle devait se poursuivre sur le très long terme.

Il convient de ne pas perdre de vue la notion de responsabilité, non seulement de l'opérateur qui met en place la surveillance, mais également du maître de l'ouvrage qui a en charge la gestion du risque dans la durée. Cette notion de responsabilité de l'opérateur implique que celui-ci soit expérimenté, apte à la fois à connaître le milieu souterrain et son évolution attendue, à maîtriser l'ensemble des maillons de la chaîne de la surveillance et à définir des alarmes pertinentes.

C. Que surveiller ?

Selon le cas considéré et notamment l'état d'avancement constaté des dégradations, la surveillance doit permettre le suivi d'un mouvement de terrain pouvant s'initier au sein des cavités souterraines, se propager vers la surface et s'y manifester (Figure 3).

Le mécanisme qui anime le mouvement de terrain doit être identifié – a minima suspecté – par l'étude géotechnique du site, qui constitue un préalable incontournable à toute démarche de mise en place d'une surveillance.



Figure 3 : Un exemple de pilier dégradé dont l'évolution pourrait être suivie (Hauts-de-France)

Le suivi de l'initiation et de la progression d'un mécanisme d'instabilité vise à apprécier, en des points considérés sensibles, l'évolution du massif rocheux avant sa rupture. Cette évolution peut être favorisée par des facteurs externes susceptibles de survenir ou de subir des modifications au sein des cavités.

Comme son nom l'indique, le suivi de la propagation du mouvement de terrain vise à connaître l'évolution du mécanisme au niveau de la cavité et depuis celle-ci vers la surface. Des facteurs aggravants, favorisant et accélérant le phénomène, peuvent être également suivis (arrivées d'eau, taux de saturation des terrains...).

D. Quelles options et techniques de surveillance ?

Différentes options et techniques existent pour la surveillance (Figure 4). Elles doivent être adaptées aux configurations du site, à la situation de risque et aux objectifs de suivi énoncés ci-avant.

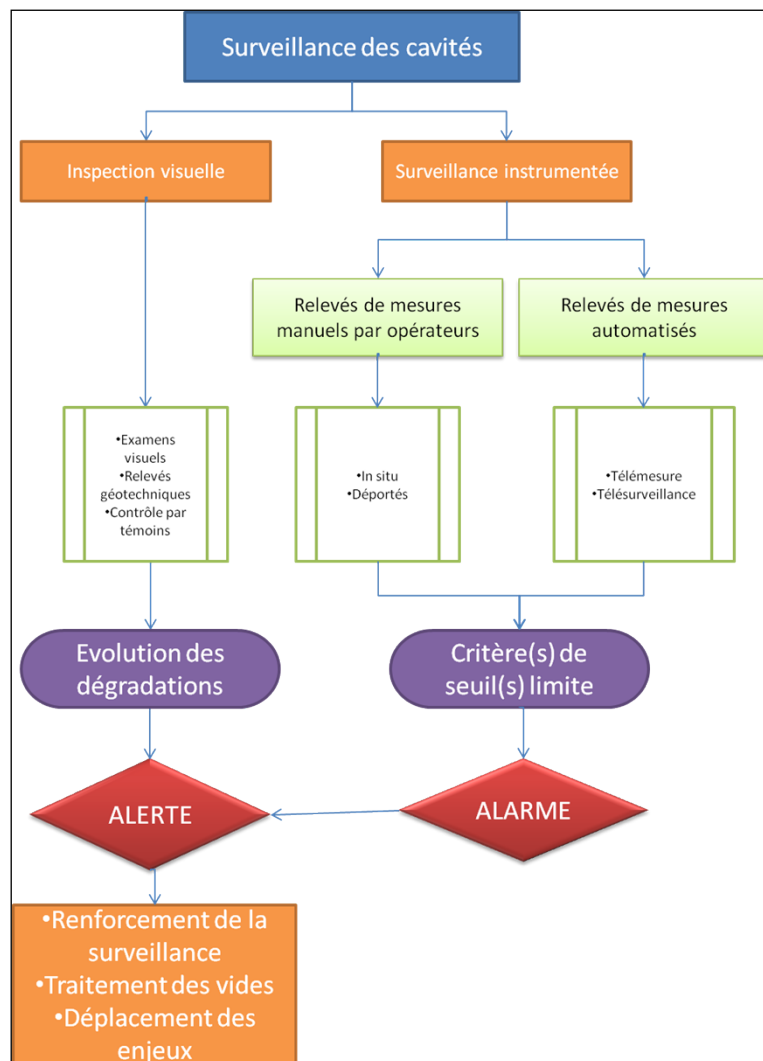


Figure 4 : Les différents types de surveillance

Les options de surveillance doivent être choisies en fonction de la durée de celle-ci et des capacités qu'elle offre pour maîtriser l'alerte en cas d'évolution désastreuse du mouvement de terrain. Ces capacités dépendent notamment de la fréquence de suivi qui découle du choix du mode de récupération, de transmission et d'analyse des données de surveillance.

Il convient notamment de considérer les difficultés d'accès, pour les opérateurs, aux secteurs souterrains surveillés, selon leur éloignement et/ou leur dangerosité. La transmission automatisée peut être envisagée lorsque les conditions de site le permettent (électricité, accès...) ou lorsque les technologies employées permettent de la garantir (panneaux solaires, couverture 5G...).

L'analyse des données doit pouvoir déboucher sur un diagnostic clair, généralement fondé sur des dépassements de seuils. Ceci permet l'application de mesures appropriées telles que renforcer la vigilance ou éventuellement déclencher l'alarme.

On distingue les différents types de surveillance suivants (Figure 4) :

- l'inspection par examen visuel de l'évolution des désordres. Celui-ci peut être complété par la pose de témoins ou d'indicateurs lorsque la simple observation semble a priori insuffisante ;
- le suivi de l'évolution des grandeurs physiques caractéristiques (par exemple un déplacement, une déformation, une pression, un niveau d'eau...), par des mesures relevées in situ par un opérateur ;
- la mesure à distance de ces grandeurs et leur télétransmission à un centre de traitement et d'analyse des données, permettant notamment de suivre un nombre plus important de points et d'augmenter la fréquence des mesures.

4 Les questions à se poser avant d'envisager une surveillance

Avant d'envisager une surveillance, le maître d'ouvrage ou la collectivité doit disposer d'un certain nombre d'éléments techniques lui permettant d'appréhender la pertinence de la surveillance et le type de dispositif à mettre en œuvre. Ces éléments peuvent être regroupés selon trois problématiques :

- le phénomène redouté et le mécanisme d'instabilité associé ;
- la durée de la surveillance ;
- les conditions de sites : accès, « surveillabilité », conditions de sécurité.

A. Quel phénomène redoute-t-on ?

L'objectif de toute surveillance est de pouvoir anticiper suffisamment à l'avance un phénomène redouté. Il s'agit donc dans un premier temps de comprendre les mécanismes potentiels dont l'action aboutit à cet événement. Cette compréhension ne peut être acquise qu'au moyen d'une connaissance géologique du massif dans lequel a été creusé la cavité (le comportement d'une craie étant différent de celui d'un calcaire lutétien, par exemple) et en complément, de l'étude géotechnique détaillée du secteur de cavité souterraine en question et de son environnement.

L'étude géotechnique constitue donc une phase préalable incontournable permettant d'identifier le phénomène redouté. Cette notion de « phénomène redouté » englobe ici différents critères. Ceux-ci sont, d'une part, inhérents au(x) mécanisme(s) potentiel(s) d'initiation et de développement de l'instabilité, mais aussi en lien avec des facteurs internes ou externes qui facilitent ou limitent le déclenchement ou l'aggravation du phénomène.

Dans le domaine des cavités souterraines en Wallonie et en Hauts-de-France, les principaux types de mécanismes sont bien connus, de par les retours d'expérience et travaux établis par la communauté scientifique et technique. En revanche, il est parfois difficile d'appréhender

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

et de quantifier les facteurs concourant au déclenchement ou à la propagation de l'instabilité, qui sont souvent des éléments primordiaux pour juger de la pertinence et du type de surveillance à mettre en place.

En Wallonie et en Hauts-de-France, le retour d'expérience a permis de distinguer trois types de phénomènes possibles : les effondrements localisés, les affaissements et les effondrements en masse. Ils sont abordés dans le rapport de synthèse de l'activité 1 du module 3 du projet INTERREG RISSC [10] et rappelés dans les paragraphes qui suivent. De plus, dans le cadre de l'activité 4 de ce même module, une analyse accidentologique a été menée sur la base des désordres recensés en Wallonie et en Hauts-de-France [9].

1. Les effondrements localisés

Les effondrements localisés sont les mécanismes d'instabilité redoutés les plus courants. Ils concernent les cavités souterraines situées à faible profondeur, comme la plupart des carrières. Ils se manifestent en surface par l'apparition soudaine d'un cratère dont l'extension horizontale est généralement de quelques mètres (Figures 5). Dans certains cas, cette extension peut dépasser dix mètres de diamètre.



*Figures 5 : Exemples de manifestation de fontis en surface
(en Belgique à gauche et en Hauts-de-France à droite)*

Les effondrements localisés sont le plus souvent initiés par l'éboulement du toit ou de la voûte d'une cavité [16]. On emploie fréquemment à cet égard le terme de « fontis », qui peut désigner tant le mécanisme de remontée de voûte que le phénomène résultant en surface.

Le développement d'une montée de voûte est un phénomène spontané et lent, qui peut durer plusieurs années ou décennies (Figure 6 et Figure 7). La progression vers la surface est d'autant plus lente que le recouvrement est constitué de bancs rocheux résistants, lorsqu'il n'existe pas de facteurs externes aggravants. La progression peut même être stoppée soit par comblement des vides par les matériaux tombés et foisonnés, soit en atteignant un banc dur au sein du recouvrement. En revanche, lorsque la voûte atteint des formations moins résistantes (roches très altérées, sables, sols, remblais liés à l'activité humaine), le mécanisme peut s'accélérer au point de devenir instantané, notamment dans des terrains saturés d'eau (niveau aquifère, inondation, arrivées d'eau d'origine anthropique). Les conséquences sont différentes selon la taille de la cavité et l'épaisseur et la nature des terrains de recouvrement.

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES
MODULE 4 – ACTIVITE 2

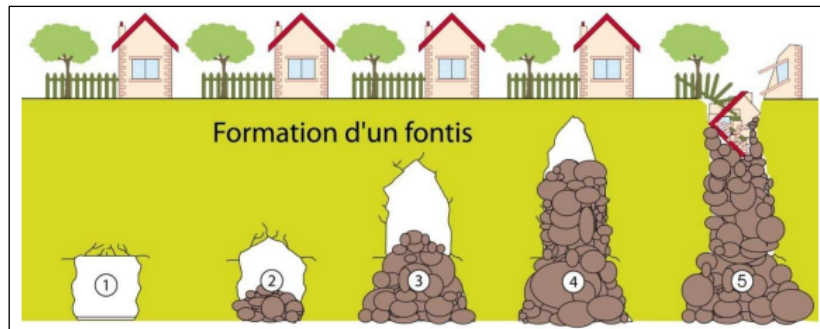


Figure 6 : Schéma d'évolution d'un fontis (Ineris)



Figure 7 : Remontée de voûte observée en souterrain dans la carrière de la Malogne (Mons, Belgique)

Les effondrements localisés peuvent également être provoqués par la rupture d'un ou de quelques piliers isolés (Figure 8) au sein d'une carrière souterraine de type chambres et piliers abandonnés.



Figure 8 : Pilier très dégradé n'assurant plus sa fonction de maintien dans une carrière de la région lilloise

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

Dans ce cas, l'étendue de la zone affectée en surface est généralement plus grande que pour un simple fontis. Les conditions de déclenchement peuvent dans ces cas résulter de la méthode d'exploitation ayant conduit, dans certains secteurs, à des extractions locales trop intensives laissant des piliers sous-dimensionnés, fragilisés ou mal superposés (si les cavités sont organisées en plusieurs niveaux). Elles peuvent aussi résulter d'hétérogénéités géologiques dans le proche environnement du pilier (zones fracturées ou faillées...), du vieillissement/altération de la roche, de venues d'eau...

Quelques éléments sur les paramètres ou facteurs à appréhender dans le cadre d'une surveillance

Cas d'un fontis

L'initiation de la dégradation est liée à la rupture du toit de la cavité du fait de la structure des terrains de recouvrement (terrains très fracturés et altérés dans les craies du nord par exemple) ou lorsque la résistance mécanique des premiers bancs de toit est inférieure à la contrainte liée au poids des terrains qui s'y exerce. L'observation d'éléments rocheux instables ou tombés ou la présence et l'évolution de fissures au toit constituent des signes précurseurs de cette perte de résistance. Dans le cas d'un toit massif sans fissuration naturelle marquée (par exemple certains grès ou calcaires), de galeries ou chambres d'exploitation de largeur importante, le rapprochement entre le toit et le mur de la cavité (dénommé convergence) ainsi que l'extension de fissures mécaniques au toit peuvent renseigner sur l'occurrence ou l'imminence d'une rupture du toit. La propagation est généralement lente. Une accélération du phénomène va se produire si la cloche d'éboulement atteint des formations meubles ou rendues mobilisables en présence d'eau. L'éboulement peut par ailleurs se propager dans une formation rocheuse contenant une nappe, constituant ainsi une intrusion d'eau problématique pour la stabilité de la cavité et/ou de la surface. La vitesse d'évolution d'une montée de voûte est un paramètre important dans le cadre d'une surveillance. Un cas particulier de fontis en surface est le débouillage d'une cheminée remplie de matériaux meubles, en terrain karstique ou dans le cas d'un ancien puits remblayé.

Cas de rupture de pilier(s)

L'initiation est liée à la rupture du pilier, lorsque sa résistance mécanique est inférieure à la contrainte qui s'y exerce. Cette perte de résistance peut être appréhendée par l'observation de signes précurseurs (écaillage et diminution de section du pilier ou présence de fissures mécaniques, blocs instables ou tombés du parement ou du toit proche). La mesure de convergence entre toit et mur à proximité du pilier ou de l'expansion du pilier (déformation horizontale) sont des éléments permettant d'évaluer s'il assure toujours une action de soutènement.

La propagation vers la surface du sol s'opère à des vitesses variables en fonction de la nature des terrains de recouvrement, mais elle est généralement plus rapide qu'une montée de voûte, voire instantanée. Une accélération peut se produire si la remontée de cet effondrement atteint des formations meubles ou rendues mobilisables en présence d'eau.

2. Les affaissements et effondrements en masse

Les affaissements sont en général des mécanismes observés en surface à l'aplomb de cavités exploitées par foudroyage à grande profondeur. Ils peuvent se produire pour certaines configurations particulières pour des carrières peu profondes, notamment exploitées par la méthode des « hagues et bourrages » présentes localement dans le sud de la région des Hauts-de France.

Un affaissement est un mouvement de terrain continu formant une dépression plus ou moins étendue dans le paysage (cuvette d'affaissement, Figure 9). Ce mouvement est la conséquence de l'exploitation ou de la disparition assez étendue d'une couche géologique ou d'un gisement, du foudroyage de l'espace resté temporairement vide, de la vidange partielle d'une poche karstique et du réarrangement consécutif des terrains surmontant cet espace foudroyé jusqu'en surface.

Contrairement aux effondrements localisés, des affaissements en surface se traduisent ainsi par l'apparition graduelle d'une dépression topographique (cuvette d'affaissement), sans rupture cassante importante (Figure 9).

Les bâtiments et infrastructures de surface situés dans la cuvette d'affaissement sont sensibles aux déformations horizontales et aux pentes qu'elle génère. Ils subissent, selon leur position au sein de la zone d'affaissement, un raccourcissement (zone dite en compression) ou un allongement (zone en traction). L'intensité des désordres est principalement proportionnelle à la mise en pente des terrains.

L'extension d'une cuvette d'affaissement déborde parfois des aplombs de la zone souterraine éboulée, selon un angle dit d'influence (Figure 9), qui varie classiquement entre une dizaine et une quarantaine de degrés (par rapport à la verticale), en fonction de la nature et de l'épaisseur des terrains de recouvrement. La profondeur de cette cuvette est relativement faible par rapport à son extension géographique.

L'existence d'un pendage des couches exploitées influe sur les valeurs de cet angle, tout comme la présence d'accidents géologiques (failles).

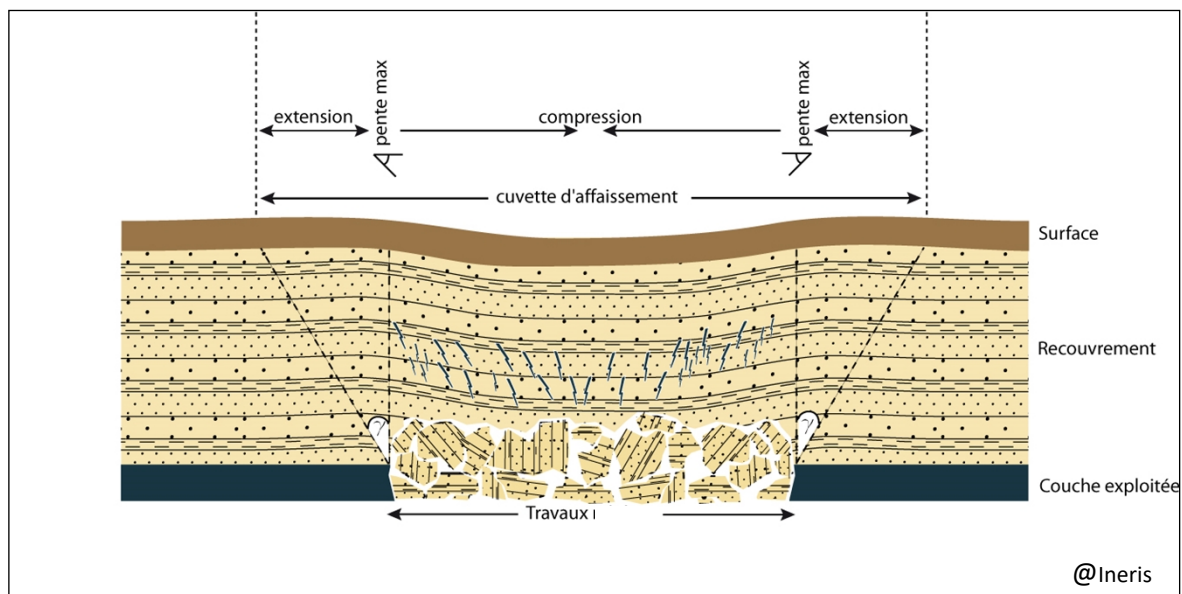


Figure 9 : Schéma de principe d'une cuvette d'affaissement

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

Les effondrements généralisés ou en masse sont issus de mécanismes rares mais dont les conséquences peuvent être désastreuses. Ces effondrements se manifestent par la rupture spontanée ou par saccades, de tout ou partie d'un quartier souterrain, en général liée à une extraction trop intensive.

Les effondrements généralisés résultent souvent de la rupture en chaîne des piliers par écrasement et affectent plus particulièrement les cavités comprenant de nombreux piliers, en général sous-dimensionnés pour le long terme.

La stabilité d'ensemble est conditionnée par une combinaison de celles des piliers et des terrains de recouvrement. C'est le cas notamment en présence de bancs rocheux raides et résistants au sein du recouvrement.

Lorsque l'effondrement en surface est brutal – parfois quasi instantané – il s'accompagne de secousses sismiques. La zone effondrée est bordée par des fractures franches, ouvertes et sub-verticales, délimitant des « marches d'escalier » (Figure 10). Les conséquences peuvent s'avérer très dommageables pour les personnes et les biens situés en surface.



Figure 10 : Effondrement généralisé au droit de la carrière souterraine de la Malogne (Mons, Belgique)

Des configurations particulières de site (exploitation sous versant, gisement penté, poinçonnement des piliers liés à une insuffisance de la tenue mécanique du mur, etc.) peuvent engendrer, en induisant des modes de rupture très différents, des effondrements généralisés, voire même dans certains cas des glissements de terrain et/ou des éboulements de falaise.

Quelques éléments sur les paramètres ou facteurs à appréhender dans le cadre d'une surveillance

Dans le cas d'un affaissement ou d'un effondrement en masse, le mécanisme est complexe, lié à la rupture concomitante de piliers, toit, éventuellement du mur ou des intercalaires d'une exploitation souterraine. Il s'agit donc, lors de l'étude de stabilité, d'évaluer le ou les scénarios de rupture et d'enchaînement de ruptures les plus probables.

Il s'agit alors de rechercher la(les) zone(s) la(les) plus favorable(s) au démarrage et au développement de l'instabilité par enchaînement des ruptures (par exemple zone de piliers très endommagés ou de très faible section).

Dans le cas de l'affaissement, les espaces souterrains accessibles sont limités et la surveillance se concentre plutôt sur les terrains de recouvrement ou la surface. L'évolution de ce phénomène en surface est progressive. Les retours d'expérience indiquent des durées de quelques jours à plusieurs années.

Dans le cas de l'effondrement généralisé, plusieurs facteurs sont à prendre en compte pour juger de l'instabilité générale d'une zone, notamment, son extension en tous sens, l'absence de piliers barrière et/ou la présence d'une formation résistante dans le recouvrement. Dans le cas où l'état des piliers est déjà fortement dégradé ou que leurs dimensions sont nettement insuffisantes, la convergence entre le toit et le mur de la cavité peut renseigner sur l'occurrence ou l'imminence d'une rupture de l'ouvrage. La dynamique de ce phénomène vers la surface est rapide, voire instantanée.

Lorsqu'un banc dur est présent au sein des terrains de recouvrement, la vitesse du mécanisme est variable jusqu'à ce que ce banc soit atteint.

B. Combien de temps faut-il surveiller ?

Les situations temporelles classiques de gestion du risque sont abordées ci-après.

1. Situation ponctuelle

Une « situation ponctuelle » fait référence à une surveillance en considérant une durée prévisible de l'ordre du mois.

Ce cas de figure s'applique généralement lorsqu'un mouvement de terrain souterrain est identifié et considéré comme pouvant se développer vers la surface rapidement. Si des bâtiments ou infrastructures se trouvent au droit de la zone instable, il s'agit d'assurer la sécurité des personnes le temps qu'un diagnostic soit effectué et que le risque soit confirmé ou infirmé.

On prendra pour exemple la situation de l'identification d'une zone évolutive à court terme lors d'une visite de cavité souterraine (fontis proche de terrains meubles en surface, quartier très endommagé) sous des habitations ou infrastructures. Autre exemple, la détection par sondages de vides peu profonds, en liaison avec une cavité souterraine, dont on ne connaît pas la vitesse d'évolution vers la surface.

3. Situation temporaire

Une « situation temporaire » fait référence à une surveillance en considérant une durée prévisible de l'ordre de l'année.

Cette situation s'inscrit dans le cas où le risque pour les personnes, bâtiments et/ou infrastructures est avéré, sans caractère d'imminence, mais peut être accéléré sous l'effet d'un facteur aggravant comme, par exemple une intrusion d'eau ou une surcharge passagère. Ce sont alors ces facteurs qu'il peut être aussi judicieux de surveiller.

Cette approche conduira généralement à privilégier la réalisation de travaux de remédiation (confortement, comblement des cavités) ou éventuellement à mettre en place des mesures au niveau des enjeux (évacuation, expropriation, déplacement, confortement du bâti ou des structures...).

Le choix et la mise en œuvre de la solution finale la mieux adaptée pour supprimer le risque nécessitent généralement un délai (études, expertise, marchés, délais légaux, etc.). Le recours à la surveillance offre alors une solution d'attente permettant de préparer la solution définitive, voire d'échelonner sa mise en œuvre au vu de son coût et/ou des difficultés techniques.

Cette situation reste la plus fréquemment rencontrée lorsqu'il s'agit de mettre en place une surveillance. La durée est tributaire de la vitesse évaluée de progression vers la surface des instabilités redoutées, qui doit être confrontée au délai de mise en œuvre des mesures de remédiation.

De très nombreux cas de figure propices à la mise en œuvre d'une surveillance temporaire peuvent être cités, deux cas relativement récurrents sont présentés ici :

- quartier souterrain (piliers, toits) observé ou suspecté très dégradé, avec une évolution vers la surface possible sur quelques années. L'instabilité de ce quartier peut être assujettie à la manifestation d'un facteur défavorable (arrivée d'eau par exemple) qui peut l'accélérer ;

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

- cloche de fontis observée et jugée évolutive mais à vitesse globalement « lente », compatible avec le délai de mise en sécurité.

4. Situation durable

Une « situation durable » fait référence à une surveillance d'une durée prévisible supérieure à la dizaine d'années. Pour les cavités abandonnées, cette situation est rencontrée lorsque le risque est avéré mais non imminent, et lorsque l'évolution du mécanisme d'instabilité redouté offre la possibilité de mettre en œuvre suffisamment à l'avance des mesures de mise en sécurité.

Elle l'est également lorsque les solutions de traitement existantes sont jugées inappropriées ou incertaines en termes de sécurité, ou surtout lorsqu'elles impliquent des coûts jugés inacceptables. Ce cas est généralement associé à la présence d'une cavité souterraine étendue, avec des volumes importants de vides plus ou moins complexes, dont l'instabilité est potentielle en tout point et située au droit de nombreux enjeux de types habitations, bâtiments et infrastructures.

Ces cas impliquent généralement une concertation entre la collectivité/le maître d'ouvrage et les organismes publics (Etat, Région) pour gérer au mieux le risque. Il s'agit de définir et de mettre en œuvre d'autres actions visant à maîtriser, réduire l'aléa, voire déplacer les enjeux. Il est parfois difficile de définir la durée exacte d'une surveillance durable. Plus elle durera, plus on s'approchera du coût des travaux de remédiation ou de délocalisation des enjeux.

Enfin, cette situation s'applique également aux cavités souterraines réutilisées et aménagées pour accueillir du public, pour lesquelles une surveillance est fondamentale pour assurer la fréquentation des lieux en toute sécurité.

C. Que permet l'environnement d'un site ?

Cette question soulève les interrogations liées aux conditions d'accès et de « surveillabilité » d'un site et de son environnement. Les réponses apportées permettent de juger de la pertinence d'une méthode de surveillance.

1. Accessibilité

L'accessibilité aux cavités souterraines et aux secteurs potentiellement instables est un élément fondamental pour le choix de la surveillance.

Un ouvrage souterrain peut être physiquement inaccessible lorsque ses entrées ont été condamnées (murées, remblayées, éboulées...) ou s'il est envahi par les eaux. Il peut aussi être inaccessible en pratique, en raison d'une atmosphère dangereuse (gaz toxiques, air vicié...) ou s'il est en très mauvais état (risque d'éboulement par exemple).

Les conditions d'accès au site peuvent être considérées comme correctes dès lorsqu'il n'existe pas de contrainte particulière de sécurité pour entrer dans les cavités (absence de gaz, entrée de galerie ne présentant pas de blocs instables, entrée de puits sécurisée...) et que le cheminement vers le site potentiellement instable est court et sans danger. Elles peuvent être considérées comme bonnes lorsqu'au moins une seconde issue permet le retrait en cas de difficulté.

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

L'accessibilité peut être jugée comme dégradée lorsque :

- l'accès depuis la surface (galerie, puits et leurs abords, cheminement pour les atteindre) n'est pas aisé ;
- l'accès à la zone à surveiller nécessite de franchir ou de séjourner dans des secteurs potentiellement dangereux (blocs ou toits instables, émanation de gaz toxiques ou atmosphères viciées, présence d'eau) ou la zone à surveiller est elle-même dangereuse ;
- le cheminement vers la zone potentiellement instable est long et/ou physiquement contraignant (zones de hauteur réduite nécessitant d'évoluer en rampant ou accroupi...), augmentant le risque d'exposition aux dangers précités (Figures 11).



Figures 11 : Illustration de deux carrières souterraines de conditions d'acheminement opposées (aisé à gauche dans une carrière de calcaire de l'Oise, difficile et dangereux à droite dans une carrière de la région lilloise)

En cas d'accessibilité dégradée, l'inspection visuelle des cavités comme mode de surveillance peut être remise en cause. Cette approche visuelle nécessite pour le moins d'être pratiquée par des spécialistes (services carrières, géotechniciens experts, parfois assistés par des services de secours spécialisés en milieu périlleux). On pourra alors privilégier des méthodes de surveillance instrumentale à distance, voire la mise en œuvre d'une instrumentation depuis la surface. La réalisation de la surveillance instrumentale nécessitera dans ce dernier cas des moyens plus « lourds » (réalisation de forages par exemple) dont le surcoût n'est pas négligeable.

2. Faisabilité technique liée à l'environnement du site

Si les conditions d'accès au site représentent un aspect fondamental pour guider un projet de surveillance, d'autres paramètres peuvent entrer en ligne de compte pour évaluer au préalable sa faisabilité.

Ces paramètres sont liés au degré d'isolement de la cavité souterraine et de son environnement au regard des possibilités/de la facilité de récupération et de transmission des données de mesures.

La présence de réseaux électriques, de réseaux internet et téléphoniques facilite bien évidemment la mise en place d'une surveillance de sites où l'on souhaite limiter les

**SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES
MODULE 4 – ACTIVITE 2**

interventions humaines, en raison de conditions de distance de trajet ou de sécurité des opérateurs. L'absence de facilités de communication peut s'avérer rédhibitoire, dans des cas extrêmes, à l'emploi d'une surveillance au regard d'autres modes de maîtrise du risque.

On rappellera qu'un site trop facilement pénétrable n'est pas propice pour mettre en place une instrumentation à demeure. Les vols ou simplement les dégradations des appareils (en souterrain ou en surface) perturbent la continuité de la surveillance et représentent des coûts importants.

D. Quelques éléments-guides de pertinence d'une surveillance

Le tableau ci-après permet de visualiser rapidement la pertinence d'une surveillance en fonction du mécanisme attendu, de la situation temporelle de gestion du risque et des conditions d'accès. Bien entendu, il s'agit là d'un outil de visualisation fondé sur des situations classiques ; il ne peut se substituer à une analyse fine, au cas par cas, de chaque situation.

Pertinence de la surveillance							
Mécanisme et vitesse attendus		Effondrement localisé		Affaissement		Effondrement généralisé	
		Plutôt lent	Plutôt rapide ou indéterminé	Plutôt lent	Plutôt rapide ou indéterminé	Plutôt lent	Plutôt rapide ou indéterminé
Conditions d'accès et temporelles							
Accessible	Situation ponctuelle	X	O	X	O	X	O
	Situation temporaire	O	~	O	O	O	O
	Situation durable	~	X	~	~	~	~
Non accessible	Situation ponctuelle	X		~		X	
	Situation temporaire	~		O		~	
	Situation durable	X		~		~	

O pertinent ~ degré de pertinence variable selon le cas X non pertinent

Figure 12 : Tableau de pertinence d'une surveillance

Quelques éléments explicatifs permettent une meilleure compréhension du tableau :

- les mécanismes et leur vitesse attendue doivent être une des conclusions majeures de l'étude géotechnique. Celle-ci doit également fournir une idée précise des conditions d'accès au secteur à surveiller ;
- un effondrement généralisé qualifié de « plutôt lent » signifie que la dégradation ou la propagation, avant rupture d'un banc raide ou de plusieurs piliers, est progressive et « surveillable » ;

- le degré de pertinence est évalué en considérant non seulement la surveillance en tant que telle, mais également en la comparant à d'autres moyens de gestion du risque jugés plus avantageux. Ainsi il est souvent préférable de procéder à des travaux de comblement ou de traitement d'un effondrement localisé pour éliminer définitivement le risque à des coûts généralement raisonnables, plutôt que de procéder à une surveillance durable – parfois, même temporaire – du mécanisme ;
- concernant les mécanismes d'affaissement et d'effondrement généralisé, les situations durables doivent également privilégier, autant que faire se peut, des moyens de remédiation et/ou de gestion alternatifs. L'emploi de la surveillance peut toutefois être incontournable pour des cas spécifiques ;
- il est attribué la mention « degré de pertinence variable selon le cas » lorsqu'il est difficile de faire la distinction de vitesse pour les cavités non accessibles, du fait de l'impossibilité d'apprécier l'évolution des dégradations qui s'y produisent. Le plus souvent il s'agit d'instabilités et/ou vides qui ont été détectés par sondages, avec éventuellement l'emploi en complément d'inspections caméra, laser ou sonar depuis la surface pour mieux qualifier le vide. Ces investigations sont parfois insuffisantes pour caractériser l'évolution des dégradations.

5 Comment élaborer le projet de surveillance

A. Que surveiller ?

La surveillance repose sur des données qualitatives ou quantitatives acquises pendant une « période de temps » suffisante permettant de prévoir et d'anticiper le comportement de l'ouvrage.

Il s'agit dans un premier temps d'identifier la ou les grandeurs physiques qui caractérisent le mieux le mécanisme d'instabilité de la cavité souterraine pouvant mener, au stade ultime, au phénomène redouté. Il convient notamment de s'attacher autant que possible aux signes précurseurs de cette évolution. Ceux-ci peuvent s'exprimer par nombre de paramètres, mesurables mais pas forcément visibles, dont les principaux sont :

- un mouvement (déplacement ou déformation) ;
- une variation de pression ;
- une vibration liée à une rupture ou un mouvement rocheux ;
- la présence d'eau ou une variation du niveau d'eau ;
- etc.

Les principales méthodes déployées dans le cadre de la surveillance de cavités instables sont présentées ci-après. Des fiches des principaux dispositifs, incluant leurs domaines d'application, avantages et inconvénients, peuvent être consultées dans le guide « Surveillance des cavités souterraines d'origine anthropique » édité par l'Ineris en 2016 [1].

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

1. Les relevés visuels directs ou assistés

Même si on ne peut pas l'assimiler à une mesure au sens strict du terme, l'inspection visuelle périodique d'un site est la surveillance la plus déployée pour des cas peu complexes et localisés, lorsque les zones sont accessibles, avec des conditions de sécurité acceptables. Cette inspection visuelle est à privilégier dans ces conditions.

L'examen purement visuel du milieu est basé sur l'expérience du géologue ou du géotechnicien chargé de l'inspection et sur l'établissement d'un « état zéro » matérialisant objectivement l'état de dégradation de l'ouvrage surveillé lors de la première inspection. Ces relevés permettent d'identifier et de suivre les mouvements (chutes de blocs, éboulements localisés) et déplacements (fissures) majeurs et visibles. La mise en place d'indicateurs (témoins, bâches plastiques pour mettre en évidence d'éventuelles chutes de blocs, marques de peinture... Figures 13) facilite le suivi.

Une couverture photographique des éléments dégradés est également recommandée, avec une même position et un même angle de visée de l'appareil permettant la comparaison.



Figures 13 : Exemples d'indicateurs de suivi (témoins, bâche, peinture) dans des carrières de Wallonie et des Hauts-de-France

Un suivi par relevés visuels nécessite que les signes évolutifs et indicateurs mis en place soient répertoriés, datés et identifiés de manière systématique et de façon répétable. Cela permet de factueliser l'observation, de la partager auprès de différents intervenants des mêmes objets de contrôle et de limiter le caractère subjectif de l'analyse de l'opérateur sur la dégradation d'une zone souterraine.

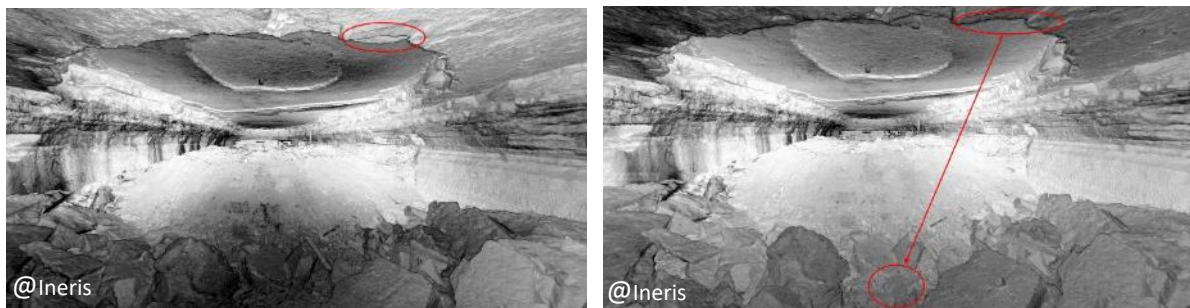
SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

Cette méthode est employée depuis de nombreuses décennies dans les cavités souterraines de la région Hauts-de-France, notamment par le Service Commun des Carrières Souterraines de la Ville de Lille, celui de la ville de Laon ou par l'IGC à Paris.

De nouveaux outils, liés à la technologie laser (Lidar, scanner laser 3D, photogrammétrie, Figure 14), sont désormais opérationnels et peuvent être avantageusement utilisés en complément, notamment pour les grands volumes. Ils permettent d'acquérir, à intervalles réguliers, des nuages de points précis des cavités et de les comparer de manière assistée par ordinateur (Figures 15).



Figure 14 : Suivi par photogrammétrie dans la carrière de la Malogne



Figures 15 : Surveillance d'une montée de voûte par comparaison des images 3D

Par ailleurs, les caméras, comme d'autres techniques applicables en forage (laser, sonar) se sont aujourd'hui répandues, notamment pour l'inspection régulière de cavités aux accès limités ou impossibles.

La surveillance visuelle est assez facile à mettre en œuvre, mais elle suppose de définir une fréquence de visite qui n'est pas toujours simple à évaluer selon le phénomène pressenti. Elle suppose en outre d'être réalisée par des spécialistes rodés aux expertises en souterrain.

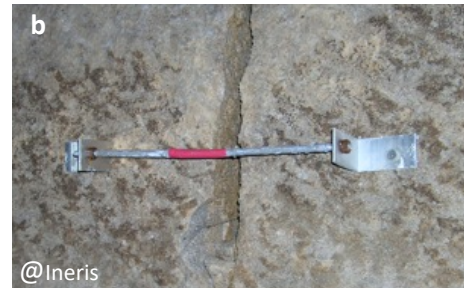
2. Les mesures de déplacement

Ces mesures ont pour but d'évaluer, dans les secteurs clés des cavités définis par l'étude géotechnique, l'amplitude et la vitesse des mouvements d'une structure et d'apprécier leur évolution, afin d'anticiper la rupture. Il existe de nombreux dispositifs pour mesurer les déplacements verticaux, horizontaux, voire angulaires, des terrains.

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

On utilise le terme générique de distancemètre pour qualifier les capteurs permettant la mesure de déplacement entre deux points (Figures 16). Cette famille de capteurs comprend les dispositifs suivants :

- le convergence-mètre, connu aussi sous le nom de canne de convergence (Figures 16a), est un instrument mesurant les déplacements entre deux surfaces libres (très souvent entre le toit et le mur d'une cavité, mais parfois entre les parements) ;
- le fissuromètre (Figures 16b) est un instrument mesurant l'amplitude des mouvements de part et d'autre d'une fissure. Cette amplitude peut être mesurée sur une dimension (simple écartement de la fissure) mais certains cas (les fissures obliques, notamment) nécessitent de connaître les mouvements dans les trois directions de l'espace. De multiples équipements, très simples (échelle graduée) à sophistiqués, basés sur des capteurs de technologies variées, permettent ce type de mesure ;
- l'extensomètre, également appelé expansomètre est un instrument mesurant la déformation à l'intérieur du massif ou plus généralement le déplacement relatif de deux points à l'intérieur d'un pilier, d'un parement, ou entre bancs du toit ou du mur. Les extensomètres sont également mis en œuvre dans des forages (Figures 16c) pour caractériser le déplacement dans les terrains de recouvrement au-dessus de la cavité souterraine ;
- l'inclinomètre est un instrument mesurant le basculement du massif ou de la paroi sur lequel il est ancré. Il peut être utilisé pour mesurer les déformations d'un ouvrage souterrain (soufflage d'un mur, flexion du toit, basculement d'un bloc...) ou en surface pour l'inclinaison des structures. Il peut également être utilisé en forage depuis la surface pour détecter, dans le cas d'un affaissement redouté, la mise en pente des terrains de couverture.



Figures 16 : Exemples de capteurs de déplacement utilisés dans le cadre de la surveillance de cavités
a) canne de convergence avec comparateur ; b) fissuromètre ; c) extensomètre en forage

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

- le nivellement, comme d'autres mesures topométriques et géodésiques (le GPS différentiel, le théodolite motorisé, l'interférométrie radar, le tachéomètre...), s'applique essentiellement à suivre un phénomène en surface. Ces systèmes consistent à mesurer, manuellement ou de manière automatisée, l'amplitude – verticale – et l'extension – horizontale – d'un mouvement d'abaissement ou d'élévation du sol au droit d'une cavité souterraine instable. Ils mesurent également le tassement différentiel entre deux points.

3. Les mesures de pression

Les mesures de pression sont effectuées dans les massifs rocheux ou dans l'eau. Souvent utilisés dans les domaines des tunnels, des stockages et parfois des cavités en activité, les capteurs de pression sont employés pour étudier les variations de contraintes provoquées par la progression des creusements. Parmi les dispositifs les plus répandus, les piézomètres sont utilisés pour les mesures de pression d'eau. Ils informent essentiellement sur les variations de niveau de nappe phréatique. Dans le cadre de la surveillance de cavités instables, ces capteurs permettent de suivre principalement la cote d'envoyage et les fluctuations saisonnières ou exceptionnelles des aquifères souterrains (Figure 17), en particulier lorsque ce facteur constitue un élément aggravant de l'état de stabilité de l'ouvrage surveillé.

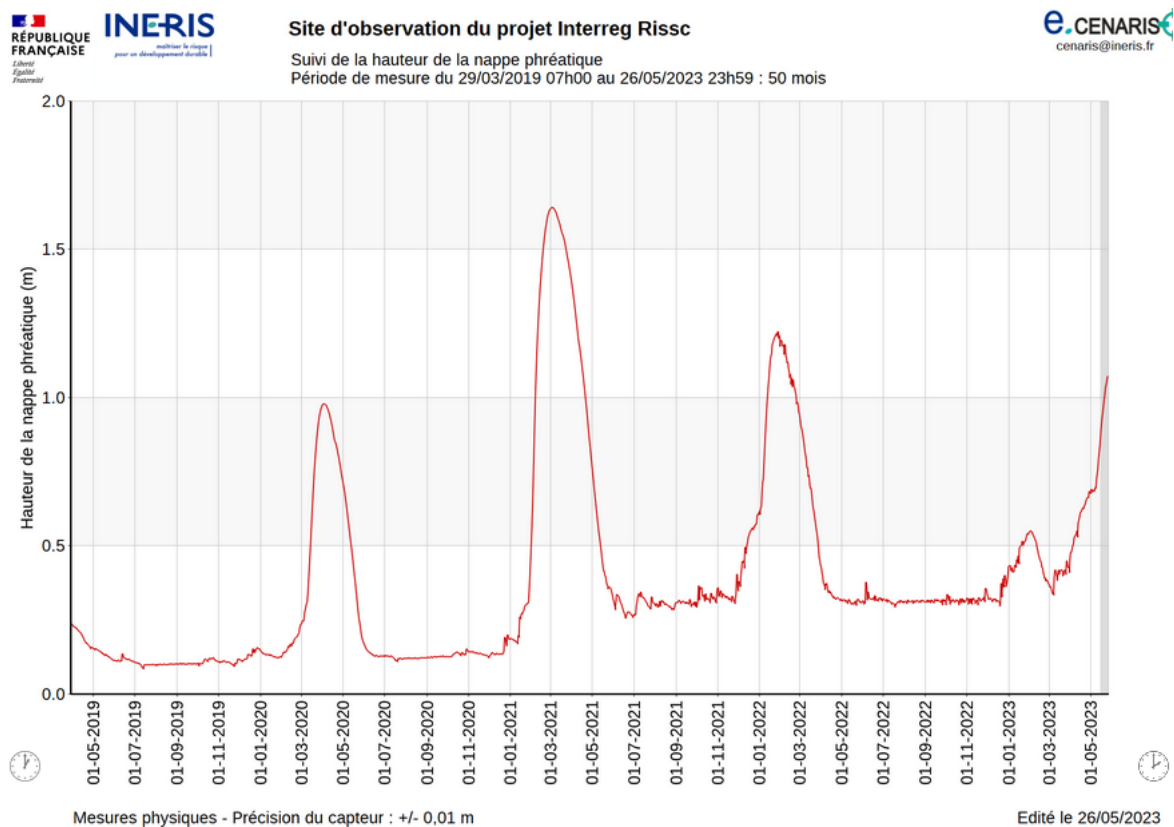


Figure 17 : Variation du niveau de la nappe dans la carrière d'Hellemmes (France) entre mai 2019 et mai 2023 – mise en place dans le cadre du projet RISSC

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES

MODULE 4 – ACTIVITE 2

Certaines variantes permettent simplement la détection d'une présence d'eau ou informent sur l'état de saturation des terrains (on parle dans ce dernier cas de mesures de pression interstitielle).

Les mesures de pression dans le massif rocheux (on parle plutôt de mesures de contraintes dans ce cas) sont moins répandues. Ce sont parfois des mesures de déformations transformées, par calculs, en contraintes, selon des lois de comportement de la roche et en fonction de la nature de cette dernière. Ces mesures sont plus souvent réalisées pour renseigner sur l'état de contrainte au sein de piliers, que l'on souhaite comparer à leur résistance. Plusieurs techniques existent (méthode au vérin plat, surcarottage, fracturation hydraulique) détaillées dans un rapport établi par l'Ineris sur les méthodes d'auscultation en cavités souterraines [19]. Les difficultés de mise en œuvre et la durabilité dans le temps des dispositifs, ainsi que l'analyse souvent indirecte, parfois peu aisée, des mesures font que ces techniques sont peu utilisées en surveillance, mais davantage en auscultation d'un massif.

4. Les mesures d'ondes acoustiques et microsismiques

Dans les cavités, l'instabilité s'exprime généralement par une rupture du toit ou mur (ou piliers) qui ont atteint leur limite de résistance sous la charge des terrains sus-jacents.

En fonction des caractéristiques du massif (au niveau de la cavité ou dans le recouvrement), cette rupture peut engendrer la libération brutale d'une énergie accumulée, qui s'accompagne par l'émission et la propagation d'ondes mécaniques intenses. Ces ondes sismiques peuvent alors être interceptées par des capteurs dénommés sismomètre, géophone ou accéléromètre.

Dans le cas des formations mécaniquement peu résistantes (comme la craie), altérées et fracturées ou peu profondes, l'intensité des ondes mécaniques générées par les ruptures est donc moindre et il n'est pas toujours possible d'enregistrer correctement ces ondes mécaniques.

Toutefois, dans ces configurations, les chutes et basculement de blocs, les décollements de bancs, les cassures et craquements génèrent des ondes acoustiques (sonores) qui se propagent dans l'air (cavités) et peuvent être détectés par des microphones (Figure 18).



Figure 18 : Dispositif de mesure acoustique dans la carrière souterraine d'Hellemmes (France) – mise en place dans le cadre du projet RISSC

Pour des raisons de sécurité et de pérennité des dispositifs mis en place, la mesure est réalisée à distance des zones de désordres. Elle a de ce fait la capacité de surveiller un volume important de l'ouvrage à partir d'une station, par opposition aux mesures localisées. La mesure peut permettre, par ailleurs, de remonter par le calcul à la position du désordre et à la quantification de son ampleur. Plusieurs versions de ces capteurs existent selon l'usage en souterrain ou en forage.

B. Comment dimensionner la surveillance ?

A ce stade de la mise en œuvre d'une surveillance, le mécanisme d'instabilité doit avoir été diagnostiqué. La ou les grandeur(s) physique(s) caractéristique(s) à surveiller, ainsi que la méthode et la durée de surveillance appropriées – ce dernier paramètre étant parfois complexe à appréhender selon le cas considéré – ont été déterminées. L'étendue de l'ouvrage à surveiller et les enjeux à protéger étant connus, il s'agit dès lors de concrétiser une solution technique de surveillance adaptée aux contraintes et au besoin, en termes de performances et de coût.

1. Rechercher le meilleur rapport coût/avantage

Comme explicité au chapitre 4D, la méthode de surveillance découle d'une analyse de pertinence. Néanmoins, on conçoit assez aisément que, pour une cavité donnée, l'investissement immédiat pour réaliser une inspection visuelle en souterrain sera moindre que pour une surveillance instrumentée, notamment si celle-ci doit être pratiquée depuis la surface. La marge de manœuvre consiste donc, dès lors que la méthode est définie, à rechercher la solution qui présente le rapport coût/avantage optimal en privilégiant autant que faire se peut :

- l'application en souterrain à l'application depuis la surface ;
- les approches globales aux approches ponctuelles.

2. Tenir compte de l'étendue de l'ouvrage à surveiller

L'étendue de la zone à surveiller est délimitée par le recoupement entre les cavités instables et les enjeux à protéger. Quelle que soit la méthode retenue, le temps d'inspection ou la taille du dispositif de surveillance (en termes de nombre de stations) seront proportionnels à cette étendue, dans la mesure où le principe de base reste la nécessité de couvrir l'ensemble de la zone.

Cela revient à trouver la fréquence des visites ou la répartition optimale des stations de mesure qui minimise à la fois, leur nombre d'une part et les zones d'ombre d'autre part.

Le mode opératoire consiste aussi à établir, dans un premier temps, une priorisation des secteurs et un plan d'implantation préliminaire d'éventuelles stations de mesure, sur la base de ce principe. Ce plan devra ensuite être adapté à la réalité et aux contraintes de terrain comme décrit aux chapitres 5B.3 et 5B.4.

3. Tenir compte de la contrainte d'accessibilité à l'ouvrage souterrain

Lorsque la cavité souterraine ou certains secteurs de cette cavité sont inaccessibles, on s'orientera vers une surveillance instrumentée à distance, comme par exemple :

- l'implantation de stations de mesure en souterrain autour du secteur inaccessible, lorsque la configuration du site permet de contourner la difficulté ;
- l'implantation de stations de mesures depuis la surface. Dans ce cas, il sera parfois nécessaire de recourir à des forages, notamment pour les méthodes de surveillance directes (inspection vidéo, laser...) ou certaines méthodes géophysiques (surveillance acoustique, microsismique). L'investissement supplémentaire non négligeable imposé par ces forages doit être pris en compte dans le projet.

Dans tous les cas, cette contrainte aura tendance à augmenter le nombre de stations nécessaires à la surveillance du site.

4. Tenir compte des contraintes environnementales du site à surveiller

Ces contraintes peuvent être déterminantes pour transformer un schéma préliminaire de dispositifs instrumentés en plan opérationnel. Elles sont de deux ordres :

- la desserte en réseaux de puissance et de communication (électricité et téléphonie...) : l'implantation de stations de mesure devra, dans la mesure du possible, se faire à proximité de ces réseaux. On préférera généralement cette solution car elle facilite grandement la mise en œuvre du dispositif instrumental. À défaut, le recours à des dispositifs autonomes est possible même si ces derniers imposent quelques limitations ;
- l'occupation de la surface : le schéma d'implantation doit s'adapter aux multiples occupations de la surface. Celles-ci peuvent interférer directement, en réglementant ou interdisant physiquement l'accès ou l'implantation d'une station (bâtiment ou réseau enterré qui oblige à déplacer un forage d'instrumentation par exemple) ou indirectement, car ils constituent une source d'altération de la qualité des mesures (bruits, interférences électromagnétiques, infiltration d'eau...).

D'autres contraintes non négligeables peuvent entrer en ligne de compte, à savoir, par exemple, la propension du site souterrain ou des terrains de surface à subir des actes de

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

vandalisme, ou la présence d'espèces protégées (chauves-souris) dans les galeries et cavités limitant les interventions et la position des dispositifs à mettre en place.

Il est important de bien prendre en compte ces contraintes environnementales dès la conception du projet car elles peuvent avoir un impact qualitatif et financier non négligeable.

5. S'adapter à la durée de surveillance

Hormis son impact direct sur le coût d'acquisition d'un dispositif, la durée de surveillance aura une influence sur le choix du matériel utilisé.

Ainsi, si des paramètres comme la résolution de mesure sont à adapter au cas par cas, la robustesse et la longévité seront des éléments décisifs de choix des instruments de mesure (capteurs, électronique, éléments de sécurité électrique...) pour une surveillance à long terme, de même pour la sensibilité et la précision de mesure qui doivent permettre un suivi fin et la détection précoce des tendances de variation.

À l'inverse, une surveillance ponctuelle recherchera d'abord la fiabilité avant la robustesse dans le temps, de même la précision de mesure ne sera pas forcément recherchée si les variations attendues sont généralement de plus grande amplitude.

6. Redondance et complémentarité des mesures

De manière générale, la redondance est un moyen robuste de fiabilisation des systèmes de surveillance.

Elle peut être invoquée au titre de la fiabilité et de la disponibilité du dispositif de surveillance. Il s'agit alors de renforcer les éléments critiques de la chaîne de surveillance (c'est-à-dire ceux dont la défaillance altère gravement le fonctionnement).

Dans certains cas, la redondance peut aussi s'appliquer aux dispositifs de mesure (capteurs). Elle a alors pour objet de fiabiliser l'interprétation des mesures et la détection des évolutions significatives. Elle est motivée par un ou plusieurs impératifs parmi les suivants :

- le milieu est complexe (exploitation souterraine sur plusieurs niveaux, schéma d'exploitation hétérogène, fracturation intense...) et certains points plus « fragiles » sont des zones d'amorçage probables de l'instabilité redoutée ;
- l'enjeu à préserver est grand : certaines structures (ouvrages d'art, bâtiments, réseaux enterrés, etc.) peuvent être particulièrement vulnérables (structures élancées, de grande longueur, sensibles à la torsion, au cisaillement...) voire susceptibles de provoquer des sur-accidents (transports de fluides toxiques ou explosibles, risques de submersion...);
- le mécanisme d'instabilité redouté est intense, rapide et/ou dangereux ;
- certains capteurs sont perturbés par des sources de bruit ou sont sujets à des dérives (thermique, vieillissement...). La combinaison avec d'autres capteurs facilite le tri et le rejet des données erronées, voire dans certaines applications, l'interprétation des données pertinentes.

Il peut donc s'avérer avantageux dans ces situations de densifier et/ou augmenter le nombre de capteurs. Il s'agit par exemple de multiplier l'implantation, en un point donné, de capteurs identiques, de capteurs mesurant une grandeur physique par différentes techniques ou de capteurs complémentaires permettant de cerner un même processus physique (Figure 19).

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

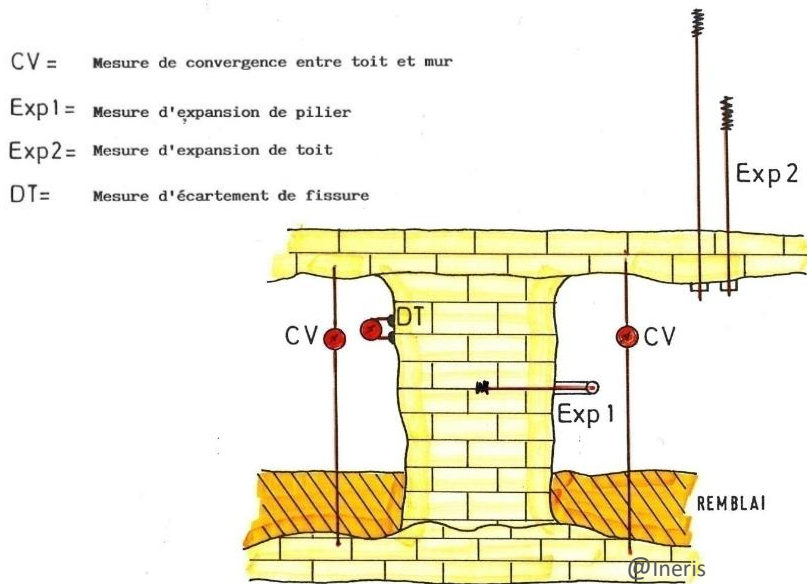


Figure 19 : Exemple de station de mesure réunissant cannes de convergence et extensomètres

La redondance de mesure est parfois exploitée comme principe de mesure, par exemple :

- lorsque la mesure pertinente est un différentiel. Un capteur témoin est alors implanté sur une base fixe de référence pour permettre une mesure différentielle au niveau des points évolutifs ;
- doubler un capteur électrique connecté à une centrale d'acquisition par un capteur mécanique pouvant être lu lors d'une inspection visuelle (Figure 20) ;
- pour amplifier et améliorer la qualité d'un signal faible (ou « noyé » dans le bruit ambiant) par sommation (« stacking ») sur des capteurs identiques empilés en série.



Figure 20 : Capteur électrique doublé par un comparateur

La redondance est enfin un gage de fiabilité pour le traitement des alarmes, dans la mesure où l'information pertinente provient, non plus d'un seul capteur, mais de plusieurs, simultanément. L'évolution ainsi détectée (et la portée du phénomène qu'elle traduit) n'en est que plus sûre, ce qui permet par là même de limiter significativement le déclenchement de fausses alarmes.

C. Comment s'assurer du bon fonctionnement du dispositif ?

Un principe fondamental en métrologie consiste à étalonner tout instrument de mesure avant de s'en servir. C'est pourquoi, le contrôle d'un dispositif de surveillance est indispensable après son installation et avant sa mise en service.

L'objectif est double :

- vérifier le bon fonctionnement de chaque élément et de la chaîne de mesure dans son ensemble ainsi que du système de transfert et de télégestion des données s'il y a lieu ;
- s'assurer des bonnes performances métrologiques de l'ensemble (réponse appropriée à une sollicitation calibrée). La cohérence et la pertinence de la réponse de la chaîne doivent être vérifiées en sollicitant directement les capteurs.

L'installation d'un dispositif de surveillance instrumenté doit être suivie d'une phase initiale de réglage, préalablement à sa mise en service opérationnelle. Cette phase dite de calage est nécessaire pour bien appréhender la résolution et la qualité des données produites (bruit de mesure, dispersion statistique, sensibilité, etc.) et optimiser si nécessaire les paramètres d'acquisition et de traitement de données. Le calage d'un système de surveillance consiste également à simuler les effets des événements redoutés afin de vérifier que tout fonctionne comme attendu : évolution détectée, caractéristiques enregistrées en adéquation avec l'événement (amplitude, localisation...), transmission des signaux et alarmes opérationnelles.

Pour les inspections visuelles, une opération consiste à vérifier que le cheminement souterrain et l'état initial établi couvrent bien les secteurs évolutifs et permettent bien de rendre compte des évolutions qui menacent les enjeux.

Pour les mesures géotechniques, le calage du système d'acquisition consiste généralement, après avoir fait un point zéro (mesure initiale), constituant un point de référence pour les mesures relatives suivantes, à solliciter le capteur au moyen d'un dispositif calibré. Pour les capteurs présentant une plage de mesure fixe, les réglages adéquats sont à effectuer pour qu'ils ne soient pas d'emblée en bout de course. Pour les mesures géophysiques, le processus de calage peut-être plus complexe selon la technique mise en œuvre. Pour l'écoute sismo-acoustique par exemple, il convient de réaliser un calibrage in-situ du dispositif pour vérifier ses capacités de détection, caractériser la propagation des ondes et en déterminer les singularités (effets de site) au sein du milieu souterrain surveillé. Ceci permet de calibrer les routines numériques de traitement de données afin d'établir le lien (la fonction de transfert) entre le phénomène à la source et le signal au capteur distant.

D. Comment gérer les données de surveillance ?

La mise en œuvre d'un système de surveillance débouche nécessairement sur un processus en deux grandes étapes : l'acquisition et l'interprétation des données.

1. L'acquisition des données

Cette opération consiste à collecter et transcrire des informations brutes à partir des points d'observation, qu'ils soient visuels ou issus de capteurs.

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

Dans le cas des inspections visuelles, la carte papier reste le moyen le plus utilisé pour transcrire l'observation géotechnique. Les fractures (mécaniques ou naturelles), les couleurs (rouge, orange, verte, par exemple, pour indiquer l'état de dégradation), les venues d'eau sont en général les informations les plus utilisées ; mais d'autres points sont souvent reportés sur des « relevés géotechniques » (Figure 21).



Figure 21 : Extrait d'une carte de levés géotechniques dans une carrière souterraine (figurés rouge et orange : montées de voûte ou piliers fracturés, en bleu : venues d'eau...)

Depuis peu, il est possible de réaliser la saisie des données d'inspection visuelle en souterrain via un formulaire installé sur une tablette (Figure 22), ayant la particularité de fonctionner hors connexion internet [7].



Figure 22 : Site web mobile pour inspection géotechnique

Ce formulaire permet de compléter les informations relatives à une dégradation in situ. Chaque dégradation est décrite selon un ensemble de champs qui permet de localiser la dégradation dans la cavité et de la décrire aux moyens de différents indicateurs tels que son type (fontis, faille, fléchissement du toit...), son extension en termes de volume et surface, la

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

présence d'éventuels facteurs aggravants. A chaque dégradation peuvent être associés des éléments connexes (métadonnées) de type photographie et vidéo. A l'issue de l'inspection, dès la connexion internet rétablie, les données sont synchronisées avec la base centrale. Toutes les données sont alors consultables et éditables via un portail web qui intègre également une fonctionnalité pour la représentation cartographique interactive des désordres identifiés.

L'acquisition des mesures instrumentées est généralement réalisée sur le site par une ou plusieurs unités d'acquisition (Figure 23), selon la taille du dispositif de surveillance, ou manuellement par un opérateur. Ces systèmes doivent être mis en place en dehors de zones de risques (chutes de blocs, zones fracturées...).

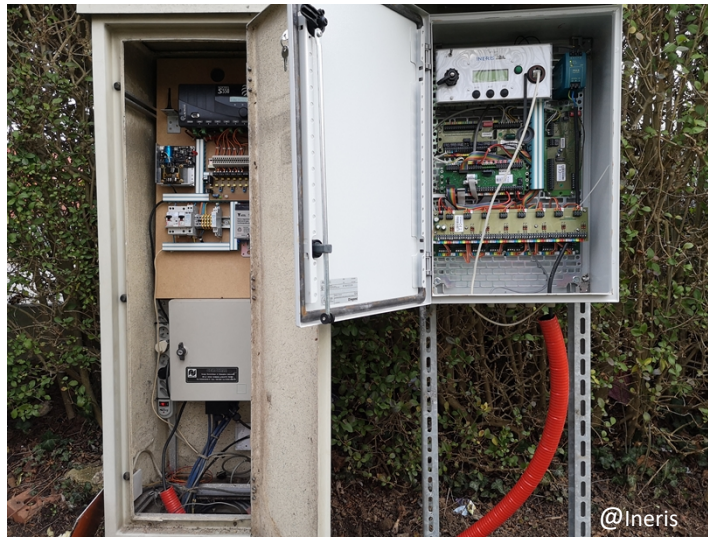


Figure 23 : Unité d'acquisition installée à Hellemmes (France) dans le cadre du projet RISSC

La fréquence de collecte des mesures est généralement imposée par le mécanisme redouté. Elle devra être d'autant plus grande que celui-ci sera rapide. Cette fréquence doit dans tous les cas être adaptée pour ménager un délai d'analyse suffisant et, le cas échéant, le déclenchement d'une alarme et le déploiement éventuel d'un plan d'intervention.

2. La gestion des données

- **La transmission des données instrumentées**

Cette première phase de gestion consiste à centraliser les données acquises sur site vers une centrale disposant de moyens de traitement et de stockage.

Cette transmission peut être assurée par un opérateur récupérant les données sur site et les stockant ultérieurement sur un répertoire informatique dédié. La transmission peut également être réalisée, souvent de manière avantageuse, par différents moyens techniques (liaison téléphonique câblée et/ou wifi, radiotransmetteur, satellite, etc.) à adapter en fonction :

- des volumes de données générés ;
- de la cadence de transmission adaptée aux besoins de la surveillance ;
- des capacités (débits) disponibles.

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

• Le traitement des données

Le traitement des données peut être effectué directement par un opérateur (inspection visuelle, validation) ou par une station de calcul. Les tâches à accomplir sont présentées ci-après.

La conversion des données : mesure brute / mesure physique

À part les versions purement mécaniques à lecture directe, la majorité des capteurs offrent aujourd'hui une sortie électrique (courant, tension, résistance, fréquence, etc.) ou optique (fréquence dans le domaine visible) qualifiée de « mesure brute ». Celle-ci doit être convertie par une formule appropriée pour obtenir une « mesure physique » correspondant à la grandeur que l'on souhaite évaluer et suivre.

La relation de conversion, plus ou moins complexe, est généralement fournie avec le capteur ou obtenue par étalonnage. Dans certains cas, elle peut aussi dépendre des caractéristiques de la centrale d'acquisition.

La correction des données de mesure

Dans certains cas, une correction des mesures peut être nécessaire avant interprétation. On distingue deux situations :

1. des corrections liées aux conditions environnementales : l'état thermique et hygrométrique d'un milieu souterrain peut avoir une influence significative sur la réponse du milieu et des instruments. Certaines grandeurs physiques peuvent y être très sensibles, comme l'illustre la Figure 24. Des corrections calées empiriquement permettent de corriger ces effets ;
2. des corrections liées aux instruments ou méthodes mis en œuvre : les instruments peuvent générer un décalage ou une dérive temporelle de la mesure. Ces défauts peuvent être corrigés à partir de données de calage acquises à intervalles réguliers lors d'opérations de contrôle métrologique ; certains instruments ont, par construction, une réponse altérée dans certaines plages de mesure. Une correction des données est alors appliquée pour rétablir la réponse réelle du milieu.

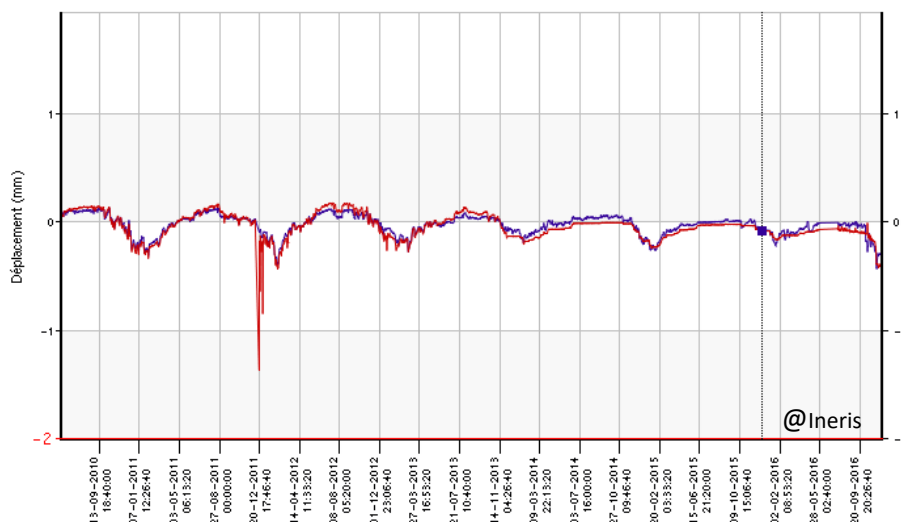


Figure 24 : Mesures de déplacement relatif dans une carrière de pierre de taille (août 2010 – octobre 2016) : les auteurs attribuent les fluctuations des déplacements relatifs entre -0,05 et 0,05, enregistrés par les capteurs aux variations saisonnières de température

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

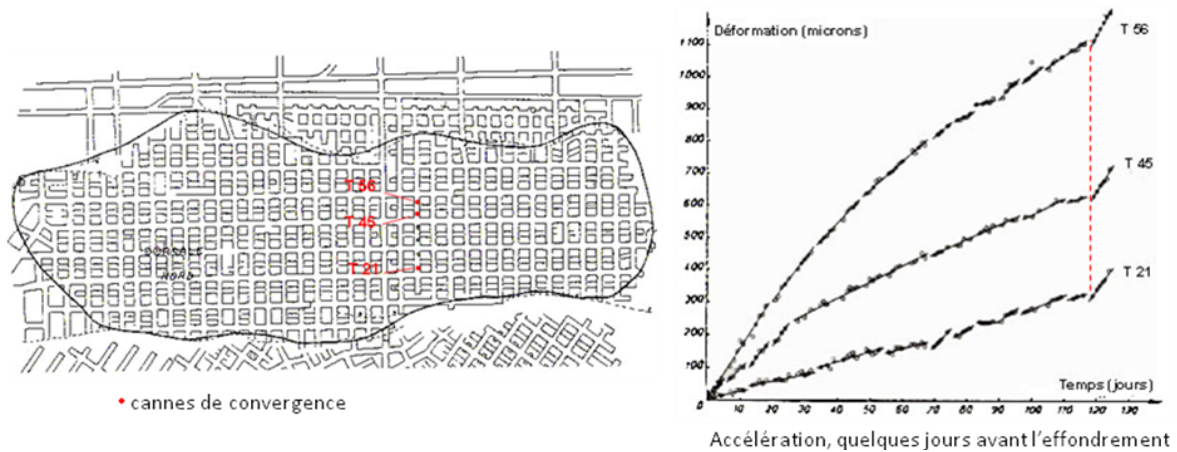
L'analyse des données – Les données élaborées

L'analyse de ces données collectées (éventuellement après correction des mesures) fournira des informations quant à la stabilité et l'évolution de la cavité surveillée. Ce sont par exemple les signes d'accélération de l'évolution des mesures (déplacement, déformation, fissuration, émission acoustique...) qui témoignent d'une modification du milieu (Figures 25). Ces signes peuvent annoncer une évolution vers le phénomène redouté.

Selon la complexité et le volume des données produites par la surveillance, suivant les méthodes et les éventuels instruments mis en œuvre ainsi que les moyens à disposition, cette production sera manuelle ou au moyen d'outils (calculateurs, logiciels) automatisés ou pas.

Pour les secteurs instrumentés, une première approche simple consiste à apprécier l'évolution sur des chronogrammes des mesures (courbes d'évolution, histogrammes), ce qui permet de la caractériser spatialement (évolution localisée ou généralisée) et temporellement (début et vitesse d'évolution).

Il est parfois nécessaire de comparer les données issues de plusieurs zones pour identifier une évolution inhabituelle de l'ouvrage et en caractériser l'ampleur.



Figures 25 : Accélération simultanée de la convergence sur plusieurs stations [21]

Dans le cadre d'une surveillance sismo-acoustique, l'accélération peut se manifester en premier lieu par une fréquence accrue des enregistrements. Néanmoins, la situation ne sera jugée anormale que si les sources d'émission sont spatialement groupées et les énergies libérées (magnitude) importantes. Seul un traitement approprié des données fournit ce type de résultats élaborés. Dans l'exemple d'une cavité souterraine, la détection de dix chutes de blocs en dix minutes sera différemment appréciée et interprétée selon que celles-ci sont localisées dans une zone circonscrite (éboulement, montée de voûte) ou dans plusieurs zones réparties de la cavité.

La validation des données

La validation a pour objectif de vérifier la continuité et la fiabilité des enregistrements du point de vue de l'acquisition. Le but est de repérer et d'écarter les données aberrantes et éventuellement manquantes qui pourraient altérer l'interprétation qui en sera faite.

La validation doit permettre également d'identifier et d'écarter tous les enregistrements dont l'origine n'est pas associée à ce qui est recherché, à savoir l'évolution de la cavité surveillée

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

(mesures de contrôle des capteurs périodiques, activités anthropiques, autres signaux liés à d'autres sources naturelles).

On s'inscrit donc à ce stade de validation dans une démarche d'expertise qui jugera de l'in vraisemblance, ou de l'origine « autre » d'une donnée, compte tenu du retour d'expérience, de l'incohérence avec d'autres observations ou après contrôle sur site.

- **Le stockage et la traçabilité des données**

La traçabilité des informations collectées est importante, notamment si la mission de surveillance est durable. À tout moment, la reprise et la réinterprétation des données doit être possible à la lumière d'éléments nouveaux. Il est tout aussi important de pouvoir remonter aux données brutes – exemptes de tout traitement – notamment en cas de doute sur le paramétrage (acquisition ou traitement).

Ainsi, pour les systèmes d'acquisition reposant sur un seuil, la recrudescence (ou la raréfaction) des mesures peut déboucher sur des interprétations diamétralement opposées selon que l'on aura modifié ce seuil ou pas... L'intérêt de conserver l'historique de ce paramétrage devient ainsi évident.

Il est communément recommandé d'envisager le stockage et la traçabilité des données de surveillance sur une durée au moins égale à celle du projet. La centralisation de l'ensemble en base de données apparaît incontournable dès lors que les projets de surveillance sont complexes et/ou de longue durée.

- **L'accès, le partage et la restitution des données**

De manière générale, l'accès aux données doit être aisé et sans délai pour les parties prenantes au projet de surveillance (Figure 26). Le mode d'accès, notamment pour les projets complexes, peut être adapté en fonction des besoins des différents intervenants.

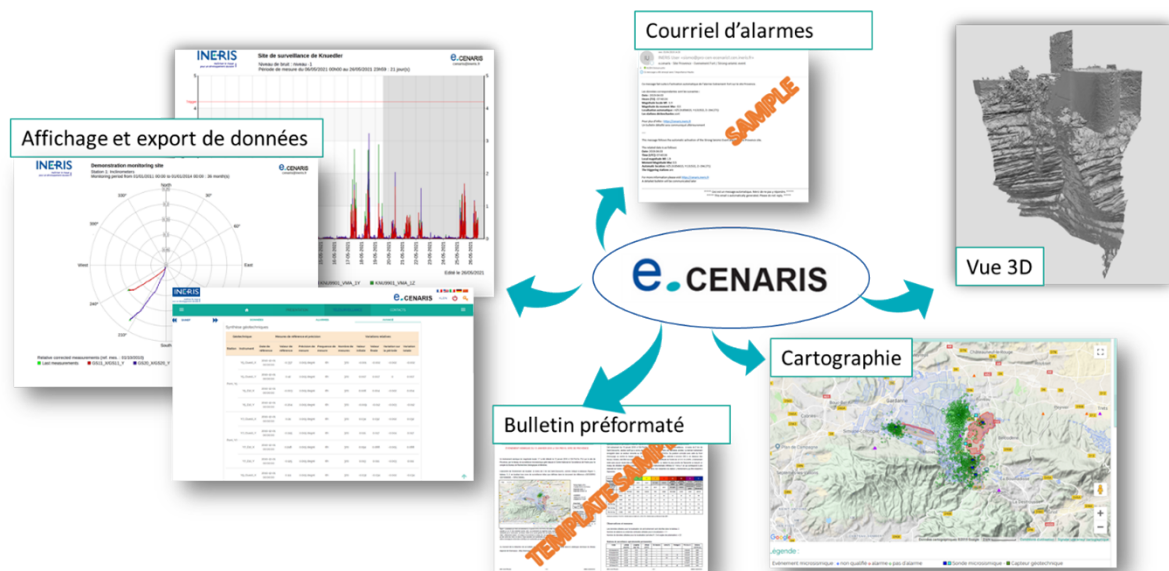


Figure 26 : Exemple de centre de traitement et de partage de données en ligne et en temps réel (e.cenaris)

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

En situation normale, les besoins d'accès consistent à assurer la gestion en routine, la mise en forme des données (graphiques, tables, cartes, etc.) et l'établissement de bilans périodiques de suivi. Ces bilans sont établis sous forme de note informant les services et autorités à une fréquence prédéfinie.

En situation de crise, l'élément déterminant sera le délai de production du diagnostic. Il est donc impératif de disposer rapidement de données élaborées synthétiques et utiles à la décision. Les technologies nouvelles permettent à la fois la centralisation des données, leur transmission et l'automatisation de nombreux traitements élaborés permettant de se prononcer plus aisément sur la pertinence d'une alarme. Elles facilitent en outre grandement leur partage en temps réel, en particulier avec des intervenants distants.

E. Comment identifier une situation anormale ?

La détection d'une situation inhabituelle par rapport au régime connu précédemment, avant que le phénomène redouté ne se produise, constitue le principe sur lequel repose toute surveillance. Cela implique la mise en œuvre de paramètres et d'outils d'évaluation spécifiques, à même de rendre compte rapidement d'une telle évolution. C'est la fonction principale du ou des critères d'alarme. Ces derniers peuvent comparer une mesure à une valeur seuil (ou aux bornes d'une plage) dont le franchissement, particulièrement s'il est durable, est considéré comme préjudiciable.

Dans tous les cas, bien connaître ce à quoi correspond l'état « normal » (habituel) permet de définir des valeurs de critères, à la fois adaptées à la détection d'alarmes pertinentes et évitant l'écueil de l'excès de fausses alarmes. Ces deux volets sont tout aussi importants l'un que l'autre car, si une alarme tardive, voire manquante, peut être désastreuse, l'excès de fausses alarmes installe une altération de la vigilance et de la mobilisation.

La connaissance de l'état « normal » passe idéalement par un suivi préliminaire (quelques semaines, voire quelques mois) d'apprentissage, mise à profit pour évaluer l'état visuel de l'ouvrage, la dispersion des mesures. Une autre alternative consiste à s'inspirer du retour d'expérience sur des sites voisins ou similaires. Cela doit néanmoins rester affaire de spécialistes et incite à la plus grande prudence compte tenu de la grande variabilité de comportement des sites.

Il est également d'usage de définir plusieurs niveaux d'alarme en établissant plusieurs valeurs seuil et/ou en différenciant les critères. Dans un milieu très sensible aux infiltrations d'eau, on peut considérer par exemple un degré de gravité croissant entre une chute limitée de blocs, un éboulement, une rupture de pilier et une arrivée massive d'eau. Ceci permet d'établir une échelle d'appréciation entre une situation inhabituelle et une situation très alarmante, afin d'adapter la réponse à chacune d'elles.

F. Comment se préparer à la gestion de crise ?

Le succès de la surveillance des mouvements de terrains réside dans l'anticipation pour prendre à temps les mesures de gestion du risque. Il implique d'une part de se préparer au pire et d'autre part de ne rien laisser au hasard. La mise en place d'une procédure écrite, opérationnelle, régulièrement révisée, éprouvée et portée à connaissance, est le meilleur moyen d'y parvenir (Figure 27).

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

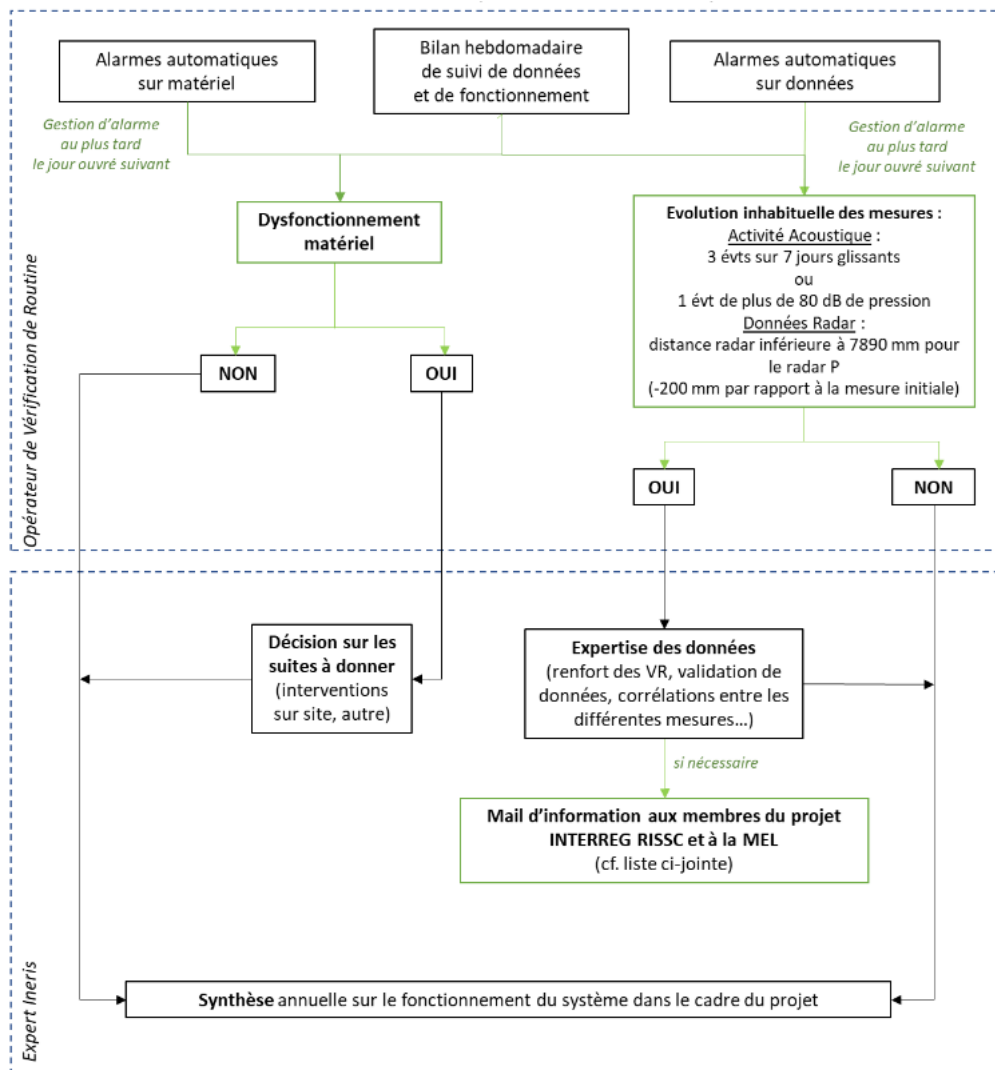


Figure 27 : Logigramme de suivi de la carrière d'Hellemmes dans le cadre du projet RISSC

Cette procédure doit, a minima, décrire de manière exhaustive et synthétique les actions, les acteurs et le flux d'information dans chaque situation, c'est-à-dire en temps normal et pour chaque niveau d'alarme. Les mêmes éléments doivent également être prévus pour les situations de défaillance du système.

Il est d'usage, notamment pour la gestion de crise, de partager et de tenir à jour un annuaire (téléphones, adresses e-mail) des différents acteurs avec priorité d'appel. Par ailleurs, des documents prévoyant par le détail les plans d'intervention en cas de sinistre (organisation des secours, évacuation, relogement, etc.) peuvent être élaborés, s'il y a lieu.

Après toute crise, un retour d'expérience doit être établi pour améliorer la gestion des futures crises.

G. Comment maintenir le système de surveillance instrumentée ?

Les pannes et autres dysfonctionnements peuvent affecter gravement l'efficacité des dispositifs de surveillance mis en place. A ce titre, un système de maintenance (organisation et coût) doit être clairement défini dès le projet de surveillance. Il recouvre généralement au moins les deux aspects suivants :

- une maintenance préventive préprogrammée qui consiste à faire un bilan fonctionnel et métrologique de l'ensemble de la chaîne de mesure, de remplacer préventivement les éléments obsolètes ou en fin de vie et de détecter les dérives instrumentales qui peuvent apparaître avec le temps ;
- une maintenance curative qui repose sur deux éléments principaux :
 - un système de détection de défauts de fonctionnement : dans la mesure du possible, la mise en place de mécanismes d'autodiagnostic et d'autoréparation (réinitialisation automatique sur détection d'anomalie) facilite grandement la maintenance d'un réseau, en limitant l'investissement en personnel ;
 - une organisation humaine et matérielle permettant de mettre en œuvre efficacement les opérations de maintenance curative.

6 RISSC et la surveillance de cavités

Pour illustrer les différentes informations de ce rapport, l'Ineris a instrumenté, dans le cadre du module 4 du projet Interreg RISSC et en collaboration avec le Service Commun des Carrières Souterraines de la Ville de Lille et la Métropole Européenne de Lille (MEL), une carrière souterraine abandonnée des Hauts-de-France. En effet, il avait été noté que globalement, les sites wallons présentant un intérêt pour la mise en œuvre d'une surveillance (enjeux en surface, zones évolutives...) n'étaient pas suffisamment sécurisés pour la pose, à demeure, de capteurs avec centrale d'acquisition. Les solutions de surveillance par suivi ponctuel y seraient à privilégier.

A. Caractéristiques du site instrumenté et phénomènes redoutés

La carrière instrumentée se trouve sur la commune d'Hellemmes (Lille, Figure 28). Il s'agit d'une ancienne carrière souterraine de craie exploitée par la méthode mixte de chambres et piliers et de catiches. La profondeur moyenne de la carrière est de 11 m et la hauteur des vides varie selon la méthode d'extraction : entre 1 et 4 m (chambres et piliers) et 3,5 à 12 m (catiches). Leur largeur est comprise entre 1 et 6 m. Le taux de défrètement est estimé à 80%. On note la présence de remblai au sol.

Cette carrière est soumise aux variations piézométriques, d'ordre métrique, du niveau de la nappe.

On observe des piliers ou parements de piliers dégradés et le toit est ponctuellement affecté par des montées de voûte (cloches de fontis) qui peuvent évoluer vers la surface.

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

Les têtes de catiches sont fermées soit par une dalle, soit par une voûte en moellons de craie (40 cm x 20 cm et 17 cm de hauteur) non cimentés. Les fermetures des têtes de catiches réalisées en moellons posés les uns sur les autres sont susceptibles de se rompre en entraînant les terrains situés au-dessus. La dégradation de la tête maçonnée peut se manifester selon plusieurs façons, plus ou moins concomitantes : perte localisée de plusieurs blocs, affaissement ou déflexion de la tête de puits, écaillage des appuis. Cette dégradation évolue en fonction du temps mais la rupture de la tête de puits peut se produire de manière très brutale.

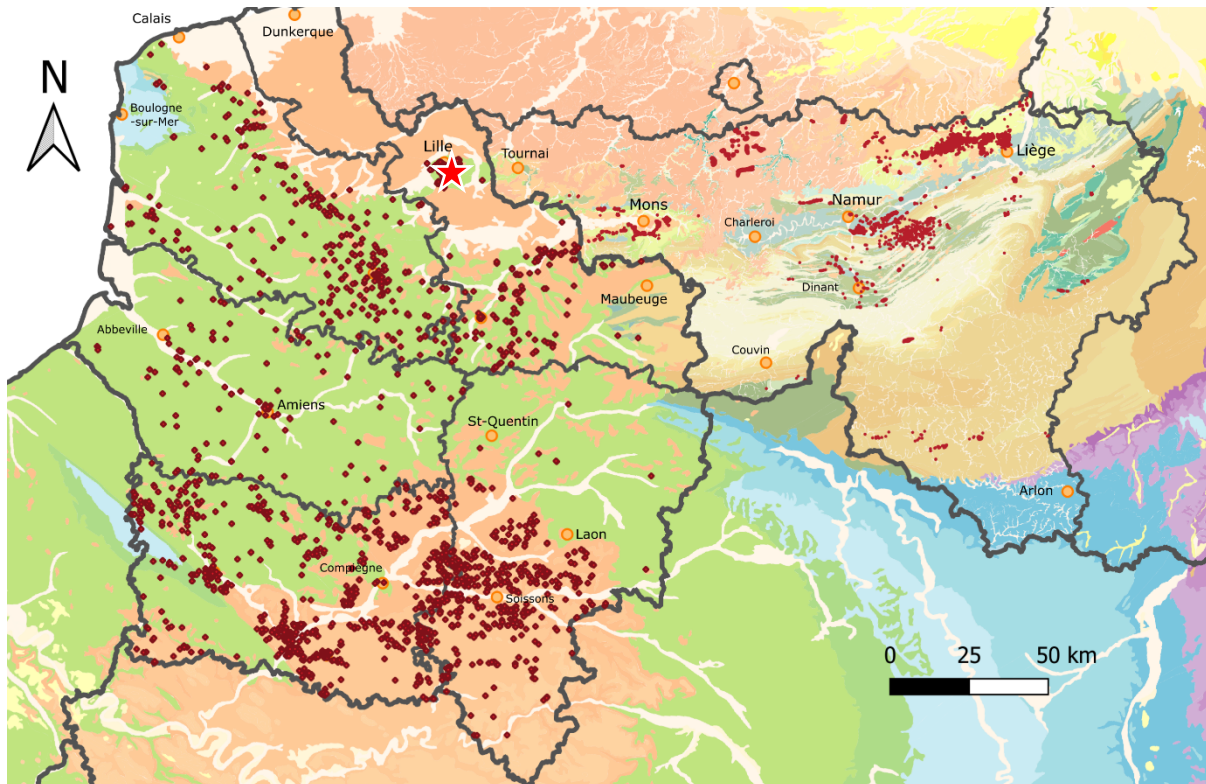


Figure 28 : Localisation du site instrumenté (étoile rouge) parmi les carrières souterraines recensées en Hauts-de-France et Wallonie (sources : SPW, Géorisques et EGDI)

B. Instrumentation déployée

1. Instrumentation pré-existante

Certains secteurs de la carrière, situés sous le domaine public (voiries) font l'objet d'une surveillance géotechnique opérationnelle gérée directement par la MEL (Métropole Européenne de Lille).

Cette surveillance repose sur des dispositifs de mesure de convergence et d'un fissuromètre (étoiles jaunes sur la Figure 29). Par convention, ces données sont récupérées mensuellement par l'Ineris et mises à disposition des partenaires du projet RISSC au travers de la plateforme e.cenaris (<https://cenaris.ineris.fr>).

Un suivi géotechnique visuel régulier est également en place et mené par le Service Commun des Carrières Souterraines de la Ville de Lille.

2. Instrumentation du projet RISSC à visée démonstrative

Le dispositif d'observation déployé en 2018 par l'Ineris pour les besoins du projet RISSC comprend (Figure 29) :

- un radar distancemètre destiné à suivre l'évolution d'un bouchon en tête de catiche depuis le bas des galeries ;
- un microphone (Figure 18), à déclenchement sur seuil, pour « écouter » d'éventuelles chutes de blocs dans l'environnement immédiat d'une zone dégradée ;
- une sonde de température PT100 et une sonde de pression pour mesurer le niveau d'eau et ainsi suivre l'évolution du niveau de la nappe dans la carrière.

En octobre 2020, deux nouveaux capteurs ont été installés pour observer les variations des teneurs en CO₂ et O₂ dans la carrière souterraine. Il s'agissait, à la demande des partenaires du projet RISSC, d'observer la corrélation possible entre la composition de l'air dans la carrière et la remontée de la nappe. La zone de prélèvement du gaz est située à proximité du radar P et du capteur de température (Figure 29). Des tuyaux souples permettent de transmettre le gaz ainsi pompé vers les 2 capteurs installés en surface dans une nouvelle station d'acquisition.

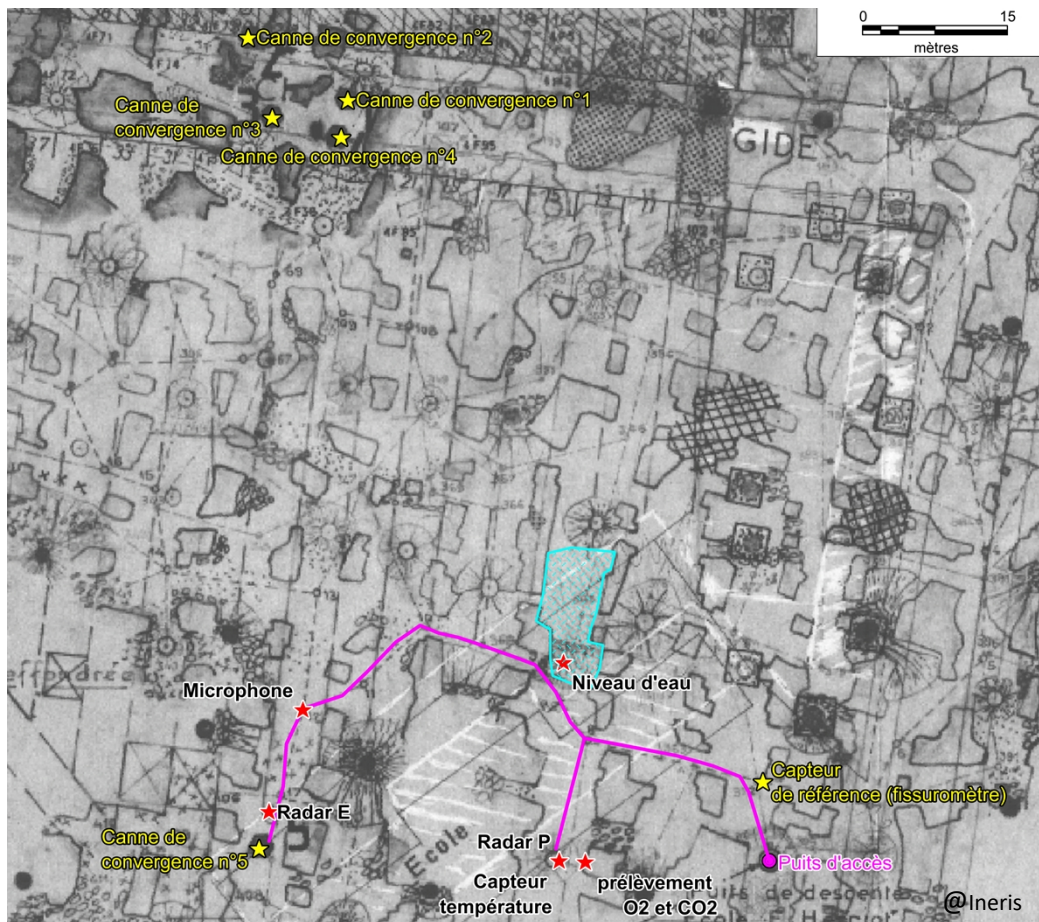


Figure 29 : Carte de situation des capteurs déployés par la MEL (étoiles jaunes) et dans le cadre du projet RISSC (étoiles rouges) dans la carrière souterraine d'Hellemmes

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2



Figures 30 : Zone de prélèvement du gaz et radar distancemètre à gauche ; capteurs de gaz installés dans une centrale d'acquisition en surface à droite

L'acquisition des données repose sur :

- une mesure par heure pour les capteurs géotechniques et de gaz,
- un déclenchement sur dépassement de seuil en amplitude pour les données acoustiques (l'écoute est continue mais l'enregistrement sonore démarre dès le dépassement du seuil et stoppe lorsque la valeur seuil n'est plus atteinte).

Les données sont transmises automatiquement via le réseau mobile data et peuvent être suivies en quasi-temps réel. Elles sont rendues accessibles via une page sécurisée de web-monitoring (Figure 31). Pendant la durée du projet RISSC, les partenaires disposaient de comptes d'accès à cette page web pour la consultation et l'édition des données.

Figure 31 : Page web-monitoring e.cenaris mise en place dans le cadre du projet RISSC

C. Constats

Les variables à considérer sur ce site sont :

- l'évolution d'un bouchon en moellons de catiche, suivi par mesures radar,
- la détection de chutes de blocs et chutes de toit par écoute acoustique.

Aucune vigilance spécifique n'a été définie pour les données de température, de gaz et de pression (collectées à titre illustratif).

Cette observation instrumentée de la carrière souterraine a été opérationnelle tout au long du projet. Elle a nécessité plusieurs interventions de maintenance des capteurs (en souterrain et en surface) pour notamment vérifier leur bon fonctionnement (tests in-situ sur les radars, microphone, vérification du niveau d'eau, démontage du radar E défaillant, installation et tests sur les capteurs de CO₂ et O₂...) quand la télésurveillance indiquait des anomalies. Ces opérations de maintenance ont été couplées à des prélèvements de l'atmosphère de la carrière, à des analyses en direct des teneurs en CO₂ et O₂, à des mesures in-situ des caractéristiques de l'eau de la nappe et à des contrôles visuels de l'état de la carrière.

Les cavités souterraines étant un milieu humide et globalement agressif, la maintenance et le test du bon fonctionnement du matériel sont primordiaux, afin que les conditions d'une surveillance puissent être préservées et la qualité des mesures soit conservée.

Cette observation instrumentée a mis en évidence, entre 2018 et 2023 :

- des intrusions de personnes dans la carrière grâce au microphone (environ 5 intrusions) ;
- la variation du niveau piézométrique de la nappe dans la carrière, d'une amplitude de 1,5 m maximum (Figure 17) ;
- la variation (de l'ordre 0,5°C) saisonnière de la température dans la carrière : les températures dans la carrière sont plus élevées en hiver qu'en été (Figure 32) ;
- une absence d'évolution significative du bouchon en tête de catiche et des secteurs géotechniquement sensibles proches du microphone.

Cette expérimentation a également montré que le radar distancemètre n'est aujourd'hui pas adapté pour suivre l'évolution d'un bouchon en tête de catiche depuis le bas des galeries. Les mesures présentent de fortes variations et sont difficilement interprétables (Figure 33). De nouveaux tests en laboratoire et in-situ sont programmés pour mieux comprendre le champ d'activités, en souterrain, de ce capteur.

A priori, les capteurs n'ont détecté aucune évolution des teneurs en O₂ et CO₂ dans la carrière depuis fin 2020 mais ce résultat reste à vérifier dans le moyen terme. En effet, le flux de gaz dans les cavités souterraines est un mécanisme complexe à appréhender et nécessiterait une étude de conception d'instrumentation ciblée et plus approfondie.

Enfin, la solution web intégrée de traitement et partage des données en temps réel et de suivi de surveillance en ligne s'est avérée particulièrement efficace et appréciée par les experts répartis de part et d'autre de la frontière.

Remarque : La surveillance instrumentée, mise en place dans le cadre du module 4 du projet Interreg RISSC dans la carrière souterraine abandonnée, sera stoppée dans les prochains mois et les différents capteurs démontés.

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

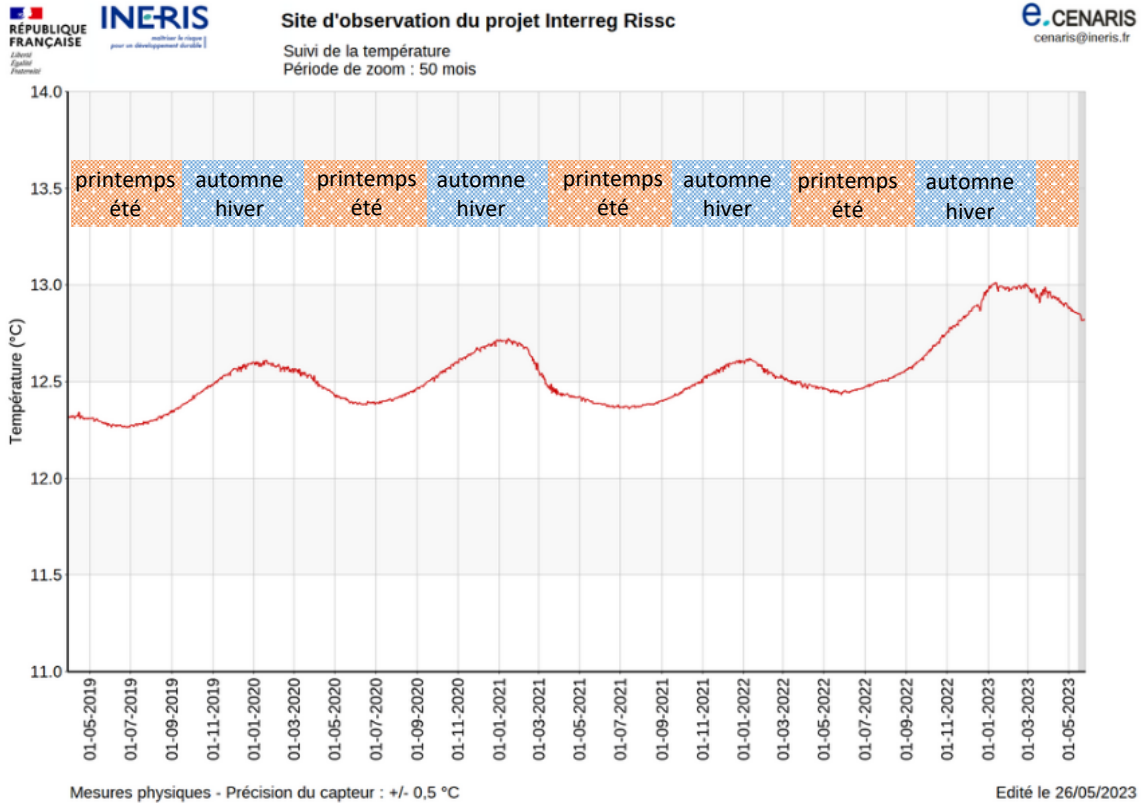


Figure 32 : Variation de la température dans la carrière d'Hellemmes (France) entre mai 2019 et mai 2023 – mise en place dans le cadre du projet RISSC

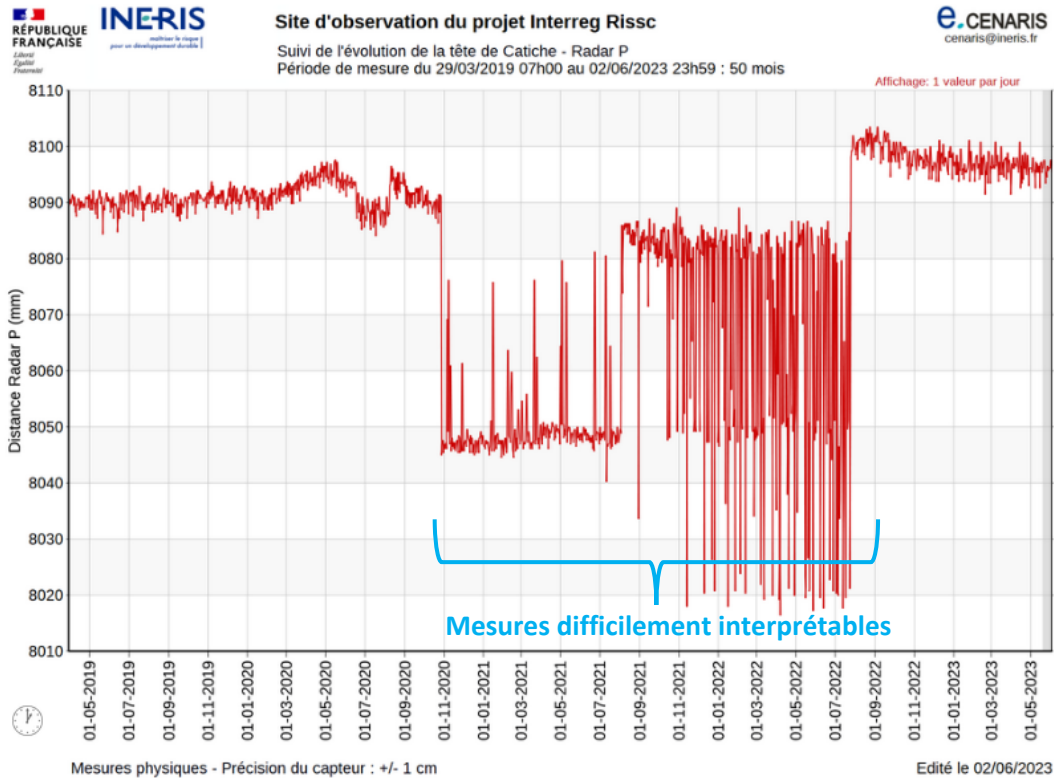


Figure 33 : Valeurs enregistrées par le radar P dans la carrière d'Hellemmes (France) entre mai 2019 et mai 2023 – mise en place dans le cadre du projet RISSC

7 Quelles évolutions possibles pour la surveillance des cavités ?

Les critères à prendre en compte lors de la mise en place d'un réseau de surveillance sont nombreux. Pour autant, une fois le réseau mis en service, la configuration en place est susceptible de changer pour diverses raisons :

- évolution géotechnique importante : l'occurrence d'événements majeurs est susceptible de modifier certaines conditions de sites (arrivée d'eau, galeries bouchées, effondrements...) et peut, à tout moment, amener à modifier la configuration et la fréquence du dispositif de surveillance pour en préserver l'efficacité ;
- évolution du site ou des enjeux : il peut arriver que le gestionnaire d'un site instrumenté en change la destination, par exemple s'il y a aménagement d'une partie pour un usage professionnel ou culturel (ouverture au public par exemple) ;
- dégradation matérielle : des actes de malveillance ou des chutes de blocs peuvent affecter l'accès au site ou le fonctionnement d'une partie ou de la totalité d'un réseau de surveillance ;
- évolution des contraintes : pour diverses raisons, les objectifs de surveillance peuvent être révisés, à la baisse ou à la hausse. Une nouvelle réglementation, un complément d'expertise, la dégradation progressive du site ou encore la récupération de documents d'archives perdus peuvent conduire à l'apparition de nouvelles zones de risque, ou au contraire, démontrer la stabilité de zones préexistantes ;
- évolutions technologiques : l'émergence de nouvelles techniques et technologies peut offrir des solutions de surveillance nouvelles et plus performantes en termes de rapport coût/bénéfice. Dans certaines situations, notamment des projets de surveillance durables, il peut être plus intéressant de remplacer le dispositif existant. Les domaines connaissant actuellement les évolutions technologiques les plus rapides sont :
 - les solutions web intégrées de traitement et partage de données en temps réel et de suivi de surveillance en ligne ;
 - les technologies laser : couplées à des dispositifs de localisation (balises fixes, boussoles/accéléromètres/gyroscopes de haute précision, etc.), elles permettent de numériser de manière précise les volumes de vides souterrains et de comparer, d'un levé à l'autre, les nuages de points obtenus pour apprécier et quantifier des évolutions non perceptibles à l'œil nu ;
 - les drones : les améliorations technologiques récentes ont largement participé à faire baisser les coûts et à multiplier les possibilités d'applications de techniques de surveillance embarquées, principalement en surface. En milieu souterrain, l'utilisation de drones est problématique à cause des difficultés d'évolution dans les vides souterrains ainsi que de transmission. Ce domaine fait cependant l'objet d'améliorations continues et commence à offrir la possibilité d'inspecter des sites souterrains dangereux ou aux conditions d'accès difficiles ;

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES MODULE 4 – ACTIVITE 2

- les approches géophysiques : à titre d'exemple, les nouvelles méthodes d'analyse du bruit de fond sismique permettent dans certaines situations d'évaluer en continu l'endommagement d'un massif sur de grands volumes et de détecter ainsi les signes précurseurs d'un phénomène d'instabilité ;
- l'appui de l'IA (Intelligence Artificielle) et du ML (Machine Learning) à la gestion des données de surveillance.

8 Conclusions

L'emploi d'une surveillance s'inscrit dans un objectif de sécurité publique préventive, notamment de protection des personnes et des biens sur une période donnée.

Il est donc fondamental d'identifier au mieux le phénomène à surveiller et de maîtriser l'ensemble des éléments qui constituent la surveillance de la cavité souterraine, depuis l'information géotechnique (visuelle ou mesurée) relevée en cavité, jusqu'au bureau de l'expert où les données sont analysées.

Les cavités souterraines étant un milieu humide et globalement agressif, la maintenance et le test du bon fonctionnement du matériel sont primordiaux, afin que les conditions d'une surveillance opérationnelle soient préservées. Les technologies sont très évolutives dans ce domaine et parfois très attirantes en termes d'opérabilité et de rendus de produit de sortie.

En France, la surveillance par inspection visuelle est largement mise en œuvre par des bureaux d'études privés, les organismes publics ou les quelques services spécialisés existant dans des collectivités territoriales (Lille, Laon, Paris...). Ce type de surveillance visuelle est couplé sur plusieurs dizaines de sites par des dispositifs instrumentés plus ou moins sophistiqués (cannes de convergence, microphones, extensomètres...) dont par exemple, la Métropole Européenne de Lille (rues sous-cavées) ou un établissement recevant du public (ERP) souterrain dans l'Oise. La mise en place de ces instrumentations (investissement uniquement) peut en outre bénéficier, sous certaines conditions en France, d'une aide financière de l'Etat. L'utilisation de ce mode de prévention a permis de juger l'évolution de dégradations dans certains ouvrages souterrains et de mettre en œuvre ponctuellement des mesures de traitement adaptées.

En Wallonie, il n'existe pas, à notre connaissance, de site abandonné instrumenté. La surveillance des espaces souterrains accessibles (karsts, galeries minières et anciennes carrières) est uniquement pratiquée par examen visuel, souvent de manière ponctuelle pour les sites les plus dangereux. Ponctuellement, des témoins tout-ou-rien ou des capteurs extensométriques à lecture directe ont pu être posés.

L'absence d'instrumentations sur site peut s'expliquer par :

- une approche de la prévention du risque cavités limitée à des recommandations et pouvant ralentir les choix organisationnels et décisionnels pour les acteurs en charge de mise en place d'une surveillance (pas d'aide financière, responsabilité en cas de crise...);
- beaucoup des sites reconnus sont inaccessibles ou au contraire trop facilement pénétrables d'où des risques de vandalisme sur les systèmes laissés à demeure.

9 Pour aller plus loin

- [1] Bennani M., Bouffier C. & Franck C., 2016 : Guide de surveillance des cavités souterraines d'origine anthropique. Rapport Ineris DRS-16-156834-00810B, 127 p.
- [2] Béranger N., 2017 : La gestion du risque cavités souterraines, Guide à l'usage des collectivités. Collection Références, Cerema, 118 p.
- [3] Bernede J., 1977 : Appareils de conception récente utilisés actuellement au contrôle des mouvements de terrains – télémessure associée. Revue française de géotechnique, n°1, p. 77-85.
- [4] Bonis M., Renaudeau J.-P., Ribreau C., 1983 : La mesure des pressions, manomètres et capteurs. Editions Masson, 160 p.
- [5] Bonvallet J., Dejean M., Schwartzmann R., 1978 : Stabilité d'une carrière souterraine – Application au cas des carrières de Hordain (Nord). Revue de l'Industrie Minérale, p. 1-12, Août-Septembre 1978.
- [6] Collectif, 1994 : Télésurveillance des ouvrages d'art et des sites. Projet national ITELOS. Editions KIRK, 442 p.
- [7] Conil N., Pinon C., Toussaint R., Klein E. : Les enjeux et atouts des solutions numériques pour la gestion des données d'inspections géotechniques. 11e Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur. JNGG 2022, Lyon, France.
- [8] Dejean M., Schwartzmann R., 1980 : Les excavations souterraines à faible profondeur. Cinq ans d'expérience dans l'évolution et la surveillance de leur stabilité. Symposium international « La sécurité dans les ouvrages souterrains », Bruxelles, 19-23 mai 1980, p. 219-35.
- [9] Descamps F., Dewaide L. (à paraître) : Les mouvements de terrain : accidentologie des données disponibles et balises pour une base de données idéale. Rapport du module 3, activité 4, du projet INTERREG RISSC.
- [10] Descamps F., Dewaide L., Lefebvre C., Pacyna D, Vandycke S., 2022 : Les cavités souterraines en Wallonie et en Hauts-de-France. Rapport rédigé dans le cadre du module 3, activité 1, du projet INTERREG RISSC.
- [11] Durville J.-L., Hameroux M., 1995 : Stratégies et méthodes de prévention. Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, n°51, p. 113-127.
- [12] Ferrero A.-M., Segalini A., 2011 : Assessment of Stability Conditions of Ancient Underground Quarries using On-Site Monitoring and Numerical Modeling. International Journal of Geoengineering Case Histories, Vol. 2, Issue 1, p. 67-85.
- [13] Hatzora Y.-H., Talesnickb M., Tsesarskya M., 2002 : Continuous and discontinuous stability analysis of the bell-shaped caverns at Bet Guvrin, Israel. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 39, p. 867-886.
- [14] IFSTTAR, 2014 : Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées. Guide méthodologique. Collection Environnement Les Risques Naturels.
- [15] Ineris, 2007 : Guide « mise en sécurité des cavités souterraines d'origine anthropique : surveillance – traitement ». Ineris-DRS-07-86042-02484A.

SYNTHÈSE SUR LES TECHNIQUES D'INSTRUMENTATION EN CAVITÉS SOUTERRAINES
MODULE 4 – ACTIVITE 2

- [16] Ineris, 2012 : Guide méthodologique « Plan de prévention des risques naturels (PPR) – cavités souterraines abandonnées », Documentation française, 81 p.
- [17] Ineris, 2013 : Méthodologie de surveillance du risque de fontis en cavité souterraine par méthode acoustique. Ineris-DRS-13-135992-01259B.
- [18] Ineris, 2015 : Guide sur les solutions de mise en sécurité des cavités d'origine anthropique. Ineris-DRS-15-149564-02401A.
- [19] Ineris, 2015 : Préconisations pour la mise en œuvre de techniques d'auscultation dans les carrières souterraines. Ineris-DRS-15-149556-11615A.
- [20] Ineris, 2015 : Surveillance instrumentée des carrières souterraines. Retours d'expérience sur l'instrumentation géotechnique par capteurs de déplacements. Ineris-DRS-15-149560-10629A.
- [21] Josien J.-P., 1977 : Surveillance de la stabilité d'une excavation par des mesures de déformation – choix d'un critère d'alarme. Annales des Mines, mars 1977, 12 p.
- [22] Kazmierczak J.B., Lizeur A., Contrucci I., Bigarre P. : Application du Machine Learning à la surveillance microsismique en quasi-temps réel d'opérations industrielles du sous-sol. 10e Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur. JNGG 2020, Nov 2020, Lyon, France.
- [23] Morat P., Le Mouël J.-L., Nover G., Will G., 1992 : Variation annuelle de la saturation d'une roche de grande porosité induite par la variation saisonnière de la température extérieure et mesurée par voie électrique. C.R. Acad. Sci. Paris, Ser. Iia 315, 1083-1090.
- [24] Perrier F., Morat P., Le Mouël J.-L., 2001 : Pressure induced temperature variations in an underground quarry. Earth Planet. Sci. Lett. 191, p. 145-156.
- [25] Schwartzmann R., 1986 : Surveillance et télésurveillance des anciennes exploitations. Symposium « Sécurité et salubrité dans les mines et carrières », Luxembourg, 11-12 sept. 1986, 16 p.
- [26] Schwartzmann R., Bivert B., 1986 : Surveillance des carrières souterraines abandonnées, par des mesures de déformation. Revue de l'Industrie Minérale – mines et carrières, p. 293-303.

10 Annexes

- Annexe 1 : Glossaire

ANNEXE 1 : GLOSSAIRE

Accélération

Augmentation dans le temps de la vitesse d'une grandeur déduite d'une mesure (une distance, une déformation, une contrainte...). Dans le domaine de la surveillance des mouvements de terrain, ce paramètre est souvent privilégié pour anticiper un état d'instabilité.

Acquisition

Technique/technologie qui consiste à saisir les valeurs numériques fournies par les capteurs et à les convertir en des grandeurs physiques exploitables. Les centrales d'acquisition (ou unités d'acquisition) sont des dispositifs permettant de centraliser des mesures issues de différents capteurs et de les convertir en données exploitables.

Alarme

Signal d'urgence ou ayant une fonction dissuasive. L'avertissement peut être visuel et/ou sonore. Le dispositif d'alarme permet de détecter un dépassement de critère(s) et de le signaler.

Alerte

Définie comme un transmetteur d'alarmes. Le dispositif d'alerte informe le dispositif de surveillance en transmettant l'alarme.

Anthropique

Qui a une origine humaine ; qui est causé par l'homme.

Auscultation

Action qui vise, au moyen de dispositifs de mesures, à caractériser le milieu (dans le cas présent le massif rocheux encaissant à proximité des cavités souterraines). Des systèmes d'auscultation peuvent le cas échéant être utilisés pour la surveillance.

Banc

Couche naturelle de roche se terminant au-dessus et au-dessous par une séparation nette. Le banc dur désigne un banc ayant de meilleures propriétés mécaniques que les terrains sous- et sus-jacents. Ce banc peut constituer le toit d'une cavité ou encore se trouver au sein des terrains de recouvrement.

Caractéristiques d'une mesure

Les termes ci-après définis sont les plus fréquemment utilisés pour caractériser une mesure :

- **Étendue de mesure**

Intervalle de valeurs pouvant être mesurées par le capteur.

- **Précision**

Ce terme traduit la qualité de la mesure. Il regroupe les notions de fidélité et de justesse. La fidélité caractérise une non variation de la mesure d'une même grandeur au cours du temps, c'est-à-dire l'indépendance vis-à-vis de certains facteurs parasites qui peuvent amoindrir cette qualité. Par exemple, une variation de température peut induire une dérive thermique d'un capteur et ainsi altérer sa fidélité.

La justesse caractérise un capteur qui n'introduit pas d'erreur systématique dans la mesure.

- **Résolution**

C'est la plus petite variation de grandeur mesurable par le capteur.

- **Sensibilité**

La sensibilité (T) est le rapport entre une variation (ds) du signal de sortie ou valeur observée et la variation correspondante (de) du signal d'entrée ou grandeur mesurée :

$$T = ds/de$$

Cavité

(en géologie) Espace creux, naturel ou artificiel, plus ou moins large, plus ou moins profond, fermé ou non, dans un massif rocheux (ex : carrière souterraine, karst, grotte, caverne...).

Ciel

Le ciel d'une cavité souterraine est un terme parfois employé pour désigner le toit de celle-ci.

Chambres et piliers

Méthode d'exploitation la plus utilisée en carrières souterraines. Elle se caractérise par l'alternance plus ou moins bien ordonnée de galeries - ou chambres - et de piliers de matériau non extrait laissés en place pour assurer une stabilité suffisante à l'exploitation. La forme et l'alignement des piliers sont d'autant plus réguliers que les exploitations sont plus récentes.

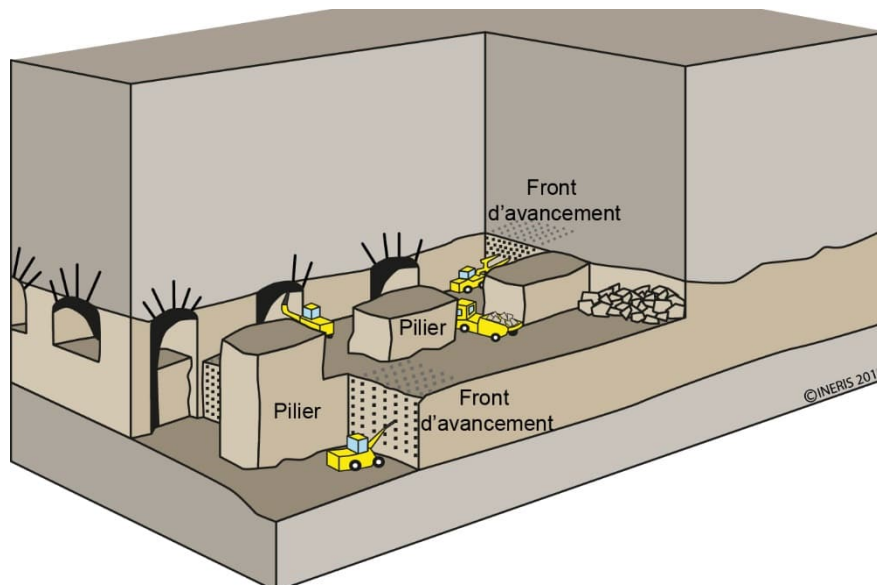


Schéma d'une exploitation par chambres et piliers

Enjeux

Personnes, animaux, biens, activités, moyens, infrastructures, patrimoines... susceptibles d'être affectés par un phénomène au sens large (dans le cas présent par un mouvement de terrain).

Faille

Cassure de terrain avec déplacement relatif des parties séparées. En pratique, ce terme désigne le plus souvent des accidents verticaux, ou à pendage fort, et n'impliquant pas de recouvrement important. La longueur des failles peut varier de quelques mètres à plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres. La valeur du déplacement (ou rejet) est variable selon les points pour une même faille et peut se situer entre le décimètre et plusieurs kilomètres verticalement, plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres horizontalement.

Fissure

Discontinuité locale, d'origine mécanique, qui sépare deux parties rocheuses. La fissure est fréquemment la marque d'une évolution du massif rocheux, la mesure de cette évolution est souvent recherchée dans le cadre d'une surveillance.

Foisonnement

Augmentation du volume apparent d'une roche du fait de son extraction ou de son instabilité, par suite de son morcellement.

Fontis

Terme désignant à la fois le phénomène de remontée localisée du toit d'une cavité souterraine au sein des terrains sus-jacents à celle-ci (on parle également de cloche de fontis), et au cratère formé en surface par l'effondrement brutal et inopiné des terrains à l'arrivée au jour de cette cloche de fontis.

Galerie

Toute voie souterraine, horizontale ou faiblement inclinée, quelle que soit son utilisation (reconnaissance, transport, aérage, drainage, etc.) et sa position (de niveau, d'étage, de base, de tête, etc.). Les dimensions, très variables, sont déterminées par la hauteur des bancs de matériaux à extraire, la circulation pour l'évacuation des blocs, la solidité du toit.

Indicateur

Se dit d'un équipement qui permet de renseigner sur une situation d'évolution sans que celle-ci ait pu être mesurée.

Les indicateurs « Tout ou Rien », encore appelés capteurs TOR, fournissent une indication à caractère binaire. Comme leur nom l'indique, ils traduisent deux états extrêmes d'occurrence ou d'absence d'un événement. Par exemple, un tube cassant ou un fil invar fixé de part et d'autre des lèvres d'une fissure indique la stabilité ou le rejet d'une fissure, respectivement, selon qu'il est resté intact ou qu'il s'est brisé. De même, des capteurs équipés de flotteurs sont parfois utilisés pour révéler la présence ou non d'eau dans une cavité.

D'autres indicateurs fournissent une information plus continue, en estimant grossièrement l'ampleur des mouvements observés. Par exemple, la pose de bâches au sol pour mettre en évidence d'éventuelles chutes de bloc et la projection de peinture sur les toits et les piliers suspects entrent dans cette catégorie.

Lidar

Acronyme de l'expression anglosaxonne « Light Detection and Ranging » qui désigne une technologie de télédétection ou de mesure optique basée sur l'analyse des propriétés d'une lumière laser renvoyée vers son émetteur. Il se compose d'un système laser chargé d'émettre l'onde lumineuse, d'un télescope qui récolte l'onde rétrodiffusée par les particules rencontrées, et d'une chaîne de traitement qui quantifie le signal reçu.

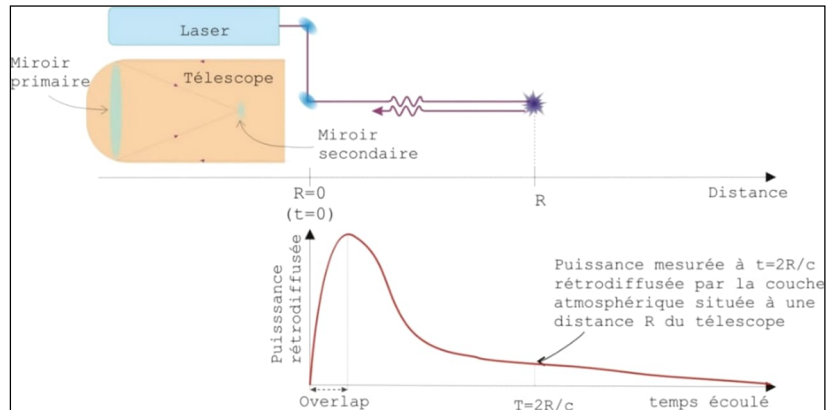


Schéma de principe de la méthode LIDAR

Mur

Partie inférieure d'une exploitation souterraine. Peut-être également dénommé par les termes « plancher », « sol » ou « sole ».

Pendage

Angle du plan moyen (d'une exploitation souterraine, d'une faille, d'une couche géologique...) avec l'horizontale.

Phénomène

Terme générique fréquemment employé dans le domaine des risques. Il s'entend dans le présent rapport comme étant la manifestation en surface résultant d'un mécanisme d'instabilité.

Pilier

Volume de matériau exploitable laissé au sein d'une exploitation souterraine pour assurer le maintien de l'édifice durant et après les travaux.

Poinçonnement

Enfoncement d'une surface, tassement d'un sol, ou encore déformation d'un élément de structure sous l'effet d'une charge localisée.

Recouvrement (terrains de)

Formations géologiques ou d'origine humaine (remblais) situés au-dessus de la cavité souterraine.

Remédiation

Action qui consiste à corriger ou combattre un problème par des moyens et/ou mesures appropriés.

Risque

Grandeur qui s'évalue en croisant l'aléa (grandeur elle-même estimée à partir de deux dimensions : la probabilité d'occurrence d'un phénomène, et son intensité) et les enjeux (personnes, infrastructures, bâtiments, habitations, mais également enjeux économiques ou environnementaux...).

Seuil, valeur seuil

Valeur limite au-delà de laquelle un phénomène physique, chimique ou biologique peut provoquer un effet donné. S'entend dans le contexte présent comme une valeur au-delà de laquelle l'évolution mesurée, dans la cavité, son environnement ou en surface, peut devenir préjudiciable et engendrer un risque.

Surveillance

Somme d'actions qui consistent à observer avec attention, examiner, contrôler, afin de pouvoir alerter à temps et ainsi réduire ou éviter le risque.

Taux de défrètement

Dans une exploitation souterraine, rapport surfacique de la part de matériau extrait sur celui en place initialement. Il s'exprime en pourcentage.

Télémesure

Interrogation des capteurs à distance et transcription en mesures.

Télésurveillance

Télémesure automatique selon une fréquence déterminée avec traitements correctifs en temps réel.

Toit

Partie supérieure d'une exploitation souterraine.

Transmission

Technique/technologie permettant de déplacer les données d'un lieu à l'autre sur de courtes ou de longues distances. Les modes de transmission sont filaires (câbles, fibres optiques, ...) ou ondulatoires (wifi, radio, satellite, etc.).

Vulnérabilité

Au sens large, exprime les conséquences prévisibles sur les enjeux exposés au risque (ici de mouvement de terrain) : personnes, biens et environnement (eau, faune, flore, activités, etc.).