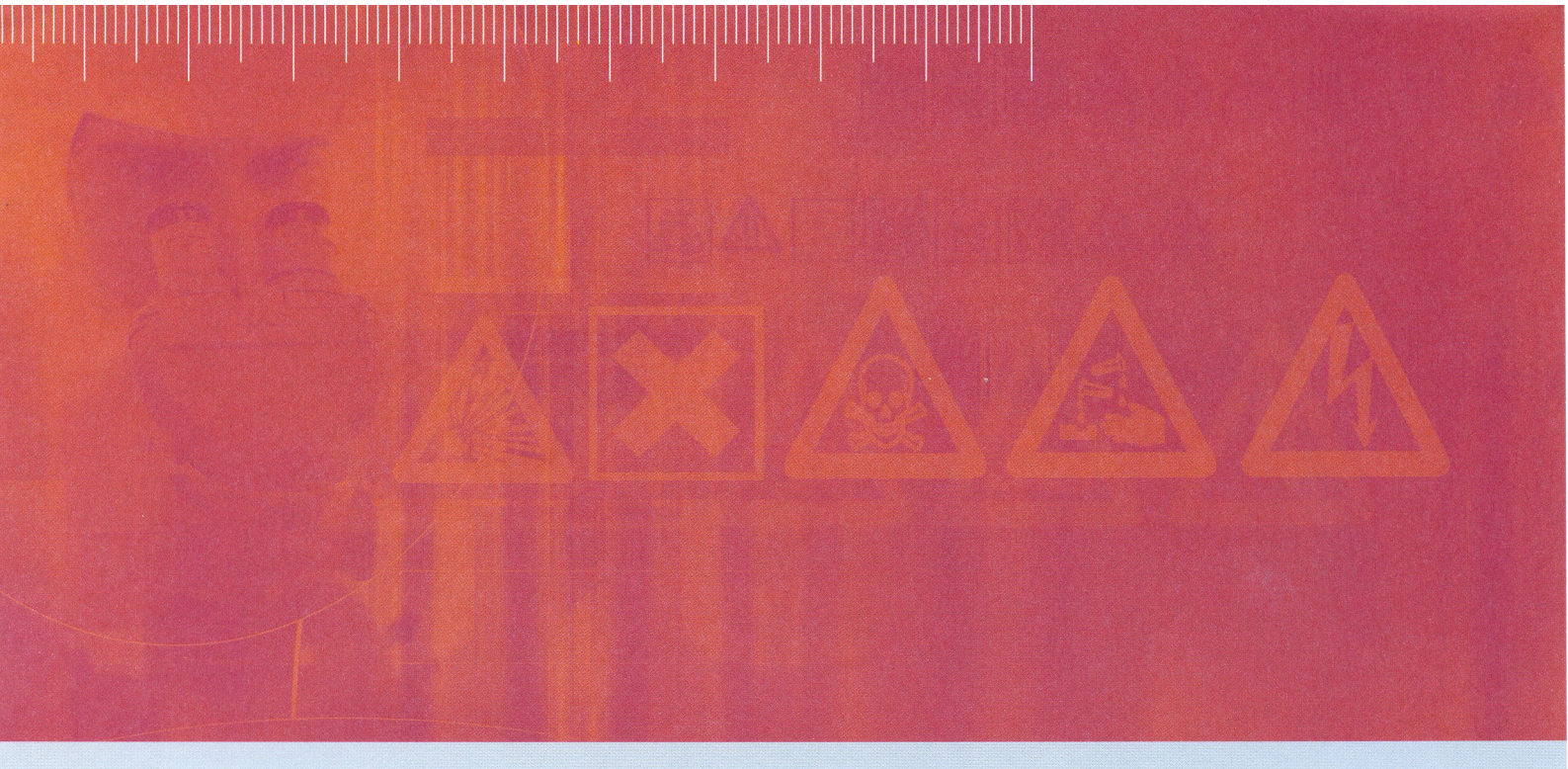


RAPPORT D'ÉTUDE 30/11/2016

DRS-16-156834-00810B

Guide de surveillance des cavités souterraines d'origine anthropique

INERIS

maîtriser le risque
pour un développement durable

Guide de surveillance des cavités souterraines d'origine anthropique

Direction des Risques du Sol et du Sous-sol

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Marie-Pierre HANESSE, Thomas RICHARD

PREAMBULE

Dans le cadre du programme d'appui aux pouvoirs publics EAT-DRS06 relatif à la surveillance des risques du sol et du sous-sol, l'INERIS a réalisé ce document pédagogique, relatif à la surveillance des cavités souterraines d'origine anthropique, visant à réduire la vulnérabilité des territoires sous-cavés. Ce document s'inscrit dans le cadre de l'action 9 du Plan National Cavité.

Il a été établi sur la base de l'expérience de l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

Ce guide a été relu par des personnalités appartenant à des collectivités, administrations, réseau scientifique et technique du Plan National Cavité, maîtres d'ouvrages, bureaux d'étude, susceptibles d'utiliser ou de diffuser ce document. L'INERIS remercie vivement ces personnalités pour avoir consacré du temps à la relecture et pour leurs remarques précieuses.

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

Liste des relecteurs :

Julien ALATERRE, Jean-Michel FOURNIER, Marc HANNOYER – IGC Paris

Gaëtan CHEPPE – Ville de Lille

Sandrine FAUCHET et Stéphanie MAHE – MEEM – Direction Générale de la Prévention des Risques

Florian GETTVERT – DREAL Normandie

Sylvine GUEDON - IFSSTAR

François LEBERT - BRGM

Clémence LOUVARD – ANTEA GROUP

Frédéric MERLIER - INERIS

Serge TERRAMORSI – DDTM Bouches du Rhône

Cyrille THOMAÏDIS – Bureau des Carrières Souterraines de Gironde

Anne-Sophie VASSORT - SOFERIM

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	M. BENNANI C. BOUFFIER, C. FRANCK	J.-M. WATELET	P. BIGARRE
Qualité	Ingénieurs à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Référent Mouvements de terrain à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Directeur des Risques du Sol et du Sous-sol
Visa			

RESUME

Le risque d'instabilité de cavités souterraines d'origine anthropique (créées par la main de l'Homme) concerne un territoire étendu et des dizaines de milliers de communes en France. S'il existe des solutions de traitement pérennes, comme le comblement des vides, la surveillance des cavités souterraines peut constituer un outil palliatif et transitoire de gestion du risque.

Le guide de surveillance des cavités souterraines anthropiques est un document réalisé par l'INERIS pour le MEEM à destination des collectivités territoriales et des maîtres d'ouvrage confrontés au choix de l'emploi de la surveillance.

Ce guide évoque les questions à se poser avant d'envisager une surveillance. Dans un premier temps, le phénomène d'instabilité redouté doit être connu et correctement évalué. De plus, il convient de se poser la question de 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. Enfin, les possibilités et les conditions d'accès aux sites, les contraintes de sécurité et les conditions de transmission doivent permettre d'orienter vers la mise en place d'une surveillance simple ou d'une télésurveillance.

Une fois ces questions préliminaires bien appréhendées, le projet de surveillance peut être réalisé. Différents types de dispositifs de surveillance sont alors possibles ; ils sont brièvement présentés dans le corps du guide, et font l'objet de fiches didactiques en annexe du document.

Les inspections visuelles sont fondamentales et à privilégier dès lors que l'on peut accéder au site dans des conditions de sécurité acceptables ; elles sont d'ailleurs très répandues. Les outils tels que la photogrammétrie ou les scanners laser sont des compléments parfois indispensables pour constater des évolutions difficilement perceptibles à l'œil nu. Les mesures géotechniques permettent d'évaluer directement des caractéristiques physiques ponctuelles telles que des déplacements, des pressions, des niveaux d'eau... Enfin les capteurs géophysiques permettent une surveillance sur de plus grandes étendues, grâce à des mesures indirectes qui permettent de détecter les ondes liées à l'évolution et l'instabilité des massifs ou des vides souterrains.

La surveillance doit, pour être efficace, être fonctionnelle, et l'ensemble des maillons qui la constituent doit pouvoir être maîtrisé : appareils de mesures, processus de communication des données, de maintenance et d'organisation. Elle doit s'appuyer sur des seuils d'alarme fiables caractérisant une évolution préjudiciable de l'instabilité, afin d'alerter les maîtres d'ouvrage ou les collectivités uniquement en cas de besoin. La maintenance et le suivi constant des outils de mesure sont indispensables. La gestion des données de surveillance doit par ailleurs permettre de détecter un dysfonctionnement à chacun des maillons de la chaîne. Enfin, le partage et la restitution des données permettent de procéder à des analyses plus rapides et d'établir des retours d'expérience en tenant compte de l'historique des données de mesure.

SUMMARY

Underground man-made cavities failure hazards affect an extensive territory and tens of thousands of communes in France. Although long-term hazard remediation solutions exist (e.g. filing of the voids), the monitoring of underground cavities may constitute a palliative and transitional solution for risk management.

The guideline “Monitoring of underground anthropic cavities” is a document produced by the French Institute of risks “INERIS” for the French Ministry of Ecology, Sustainable Development and Energy, and is addressed to local authorities or project owners facing with the choice of a monitoring use.

Present guideline deals with the important questions to be raised before considering a monitoring project. Firstly, the dreaded instability phenomenon must be known and correctly evaluated. Secondly, it is important to know how long the monitoring should operate: for emergency and short-term purposes, or for a more long-term implementation, e.g. due to a waiting for a decision about the most suitable risk management method. Finally, the access conditions to the monitored site, the safety constraints and the data transmission possibilities allow considering an implementation of a simple monitoring or a remote monitoring solution.

Once the preliminary questions considered, the monitoring project may be designed. Various kinds of monitoring devices can be used and are briefly presented in the guidelines corpus. In appendix, simple and didactics sheets summarize the most used monitoring methodologies.

Visual inspections are key methods and should be privileged if the cavities are accessible in sufficient safety conditions. Some tools such as photogrammetry or laser scanners are useful complements and may be indispensable to detect some geotechnical evolutions that may be hardly perceptible even for a trained eye. The geotechnical measurements allow direct assessment of the monitored punctual physical characteristics such as displacements, pressures or water level… Finally, geophysical sensors allow to monitor extended areas thanks to indirect measurements of acoustic or seismic waves related to instability evolutions of the rockmass or the underground voids.

Monitoring must operate correctly to be useful, and the operational state of each component of the monitoring device must be controlled: measurement tools, data transmission process, maintenance and operator’s organization. Reliable warning thresholds definition related to a prejudicial evolution of the instability allow to warn the project owner or the authorities only in case of requirement. Besides, the preventive and curative maintenance is indispensable to guaranty the continuous monitoring. Consequently, the management of the monitoring data must allow to detect a dysfunction of any device of the monitoring system. Finally, the sharing and the restitution of the data allow quick analysis and feedbacks taking into account measurement data historic.

TABLE DES MATIÈRES

RESUME 3

SUMMARY 5

1. OBJECTIFS DU GUIDE 9

2. NOTIONS SUR LA SURVEILLANCE 11

2.1 Principes de la surveillance 11

2.2 Quand et pourquoi surveiller ? 12

2.3 Que surveiller ? 13

2.4 Quelles options et techniques de surveillance ? 14

3. LES QUESTIONS A SE POSER AVANT D'ENVISAGER UNE SURVEILLANCE 17

3.1 Quel est le *phénomène* redouté ? 17

3.1.1 Les effondrements localisés 17

3.1.2 Les affaissements et effondrements généralisés 22

3.2 Combien de temps faut-il surveiller ? 26

3.2.1 Situation ponctuelle 26

3.2.2 Situation temporaire 26

3.2.3 Situation durable 27

3.3 Que permet l'environnement d'un site ? 27

3.3.1 Accessibilité 27

3.3.2 Faisabilité technique liée à l'environnement du site 29

3.4 Quelques éléments-guides de pertinence d'une surveillance 29

4. COMMENT ELABORER LE PROJET DE SURVEILLANCE ? 33

4.1 Que surveiller ? 33

4.1.1 Les relevés visuels directs ou assistés 33

4.1.2 Les mesures de déplacement 34

4.1.3 Les mesures de pression 36

4.1.4 Les mesures d'ondes acoustiques et microsismiques 36

4.2 Comment dimensionner la surveillance ? 37

4.2.1 Rechercher le meilleur rapport coût/avantage 38

4.2.2 Tenir compte de l'étendue de l'ouvrage à surveiller 38

4.2.3 Tenir compte de la contrainte d'accessibilité à l'ouvrage souterrain 39

4.2.4 Tenir compte des contraintes environnementales du site à surveiller 40

4.2.5 S'adapter à la durée de surveillance 40

4.2.6 Redondance et complémentarité des mesures 41
4.3 Comment s'assurer du bon fonctionnement du dispositif 42
4.4 Comment gérer les données de surveillance 43
4.4.1 L'*acquisition* des données 43
4.4.2 La gestion des données..... 44
4.5 Comment identifier une situation anormale ? 48
4.6 Comment se préparer à la gestion de crise.....50
4.7 Comment maintenir le dispositif de surveillance 51
4.8 Quelles évolutions possibles ? 53
5. CONCLUSIONS 55
6. POUR ALLER PLUS LOIN.....57
7. LISTE DES ANNEXES 61

1. OBJECTIFS DU GUIDE

Les cavités souterraines d'origine anthropique, peuvent, si elles deviennent instables, occasionner en surface des mouvements de terrain qui peuvent être préjudiciables en cas de présence d'habitations, de bâtiments ou d'infrastructures. La surveillance des cavités souterraines est l'une des solutions permettant d'assurer la sécurité des personnes et des biens situés à proximité.

Cette solution de surveillance est palliative dans la plupart des cas, 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 guide technique a pour objectifs de présenter les bonnes pratiques 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.

Ce guide s'adresse en particulier à un public de maîtres d'ouvrages ou de collectivités territoriales 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 surveillance.

Ce guide vise également à établir des recommandations lorsqu'un projet de surveillance est mis en place.

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.

On pourra consulter en annexe les fiches des dispositifs de surveillance les plus usités en cavités souterraines, précisant leurs domaines d'utilisation, leurs modalités d'emploi, leurs avantages et inconvénients. La description de cas de référence ou représentatifs est également proposée.

Par ailleurs un glossaire est consultable en annexe pour connaître les définitions des termes les plus employés (figurant en italique dans le corps de texte) et, le cas échéant, pour apporter des précisions techniques.

NB : *ce guide 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, bien que dans certains cas, la problématique et les solutions techniques soient très proches, voire identiques.*

2. NOTIONS SUR LA SURVEILLANCE

2.1 PRINCIPES 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 mécanisme 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).

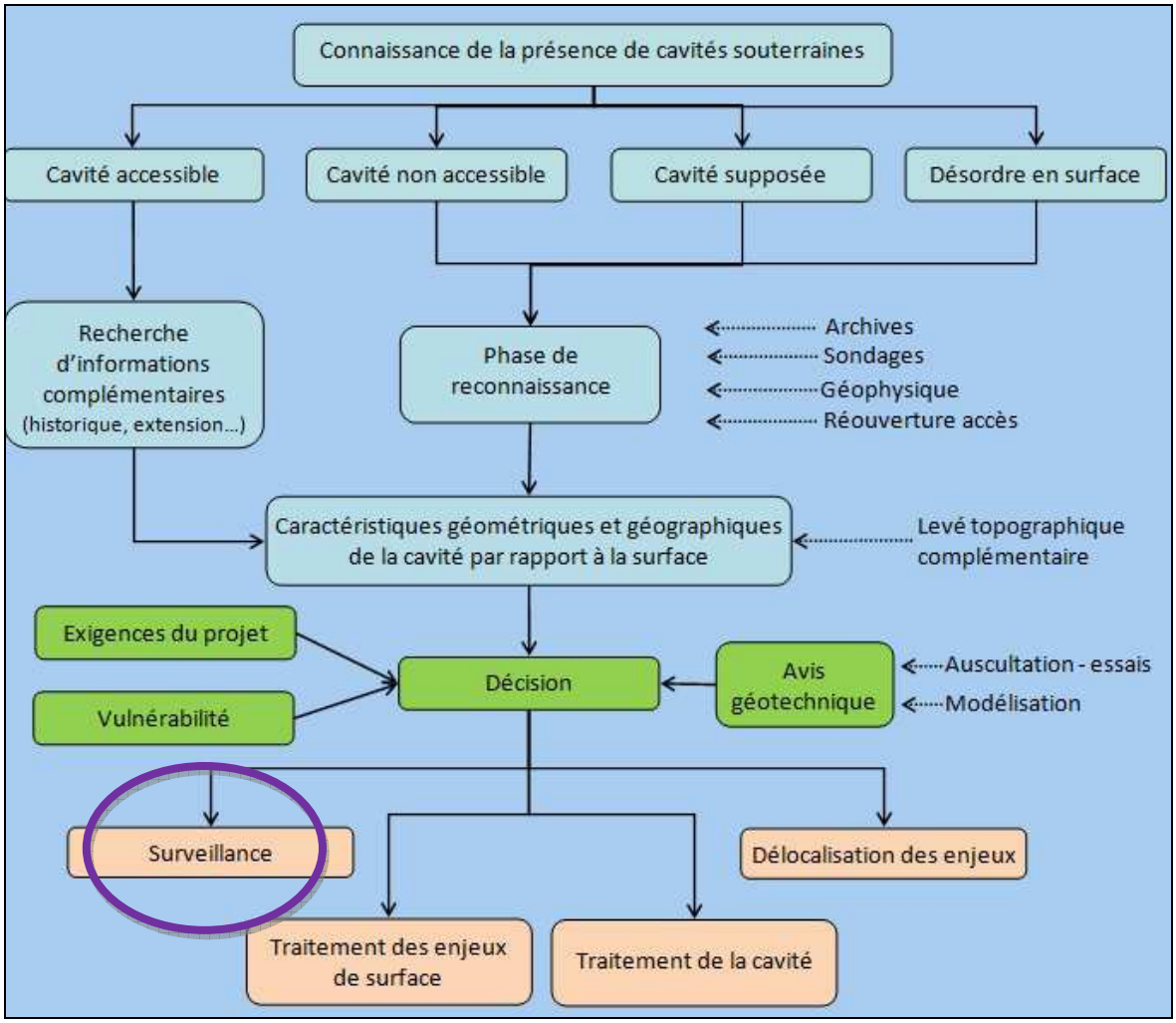


Figure 1 : Place de la surveillance dans la prévention du risque lié aux cavités souterraines

La *surveillance* fait appel à des méthodes dont le principe est de détecter et suivre l'initiation et l'évolution des 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.

Cette notion de suivi 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.

2.2 QUAND ET POURQUOI SURVEILLER ?

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

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 (traitement 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 protéger les personnes et biens tout en visant à 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 peut-être allégée.

Certains cas particuliers nécessitent une *surveillance* durable dans le temps. Ce sont par exemple les *cavités* souterraines réutilisées et aménagées en Etablissements Recevant du Public (ERP), pour lesquelles une *surveillance* est nécessaire pour garantir la fréquentation des lieux en toute sécurité (Photographie 1).

Photographie 1 : Surveillance par scan3D à la carrière souterraine de La Brasserie (cliché INERIS)

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

2.3 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.

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* [1].

Photographie 2 : Un exemple de pilier dégradé dont l'évolution pourrait être suivie (cliché INERIS)

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* (par exemple une intrusion d'eau, ou une variation du niveau de la nappe).

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, ...).

La manifestation en surface du mécanisme (affaissement du sol, apparition de *fissures* sur les bâtis, ...) peut également être identifiée et suivie avant qu'un danger potentiel ne soit identifié.

[1] A ce sujet l'IFSTTAR a fait paraître en 2014 un guide méthodologique relatif au diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées (18), auquel le lecteur pourra se référer

2.4 QUELLES OPTIONS ET TECHNIQUES DE SURVEILLANCE ?

Différentes options et techniques existent pour la *surveillance* (Figure 2*)*. Elles doivent être adaptées aux configurations du site, à la situation de *risque* et aux objectifs de suivi énoncés ci-avant.

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 internet, ...) ou lorsque les technologies employées permettent de la garantir (panneaux solaires, couverture 3G), ...

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 :

- l'inspection par analyse visuelle de l'évolution des désordres. Celle-ci peut être complétée 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 télé*transmission* 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.

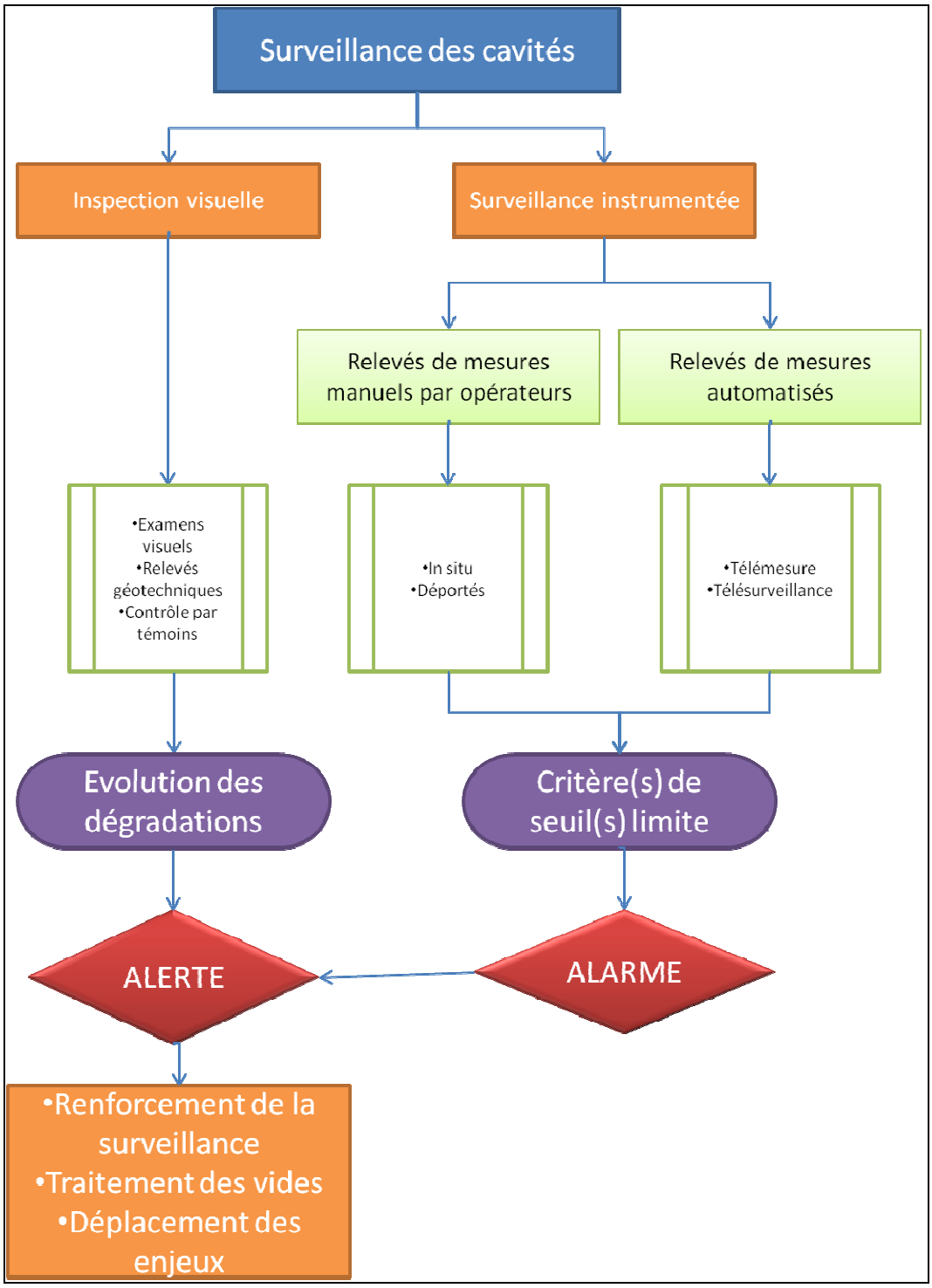


Figure 2 : Les différents types de surveillance

3. LES QUESTIONS A 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.

3.1 QUEL EST LE *PHENOMENE* REDOUTE ?

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 de la roche dans laquelle est constituée la *cavité* (le comportement d'un calcaire étant très différent de celui d'un gypse, 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 (18).

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, 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 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.

Le retour d'expérience a permis de distinguer trois types de *phénomènes* possibles : les effondrements localisés, les affaissements et les effondrements généralisés. Ils sont abordés dans les chapitres qui suivent.

3.1.1 LES EFFONDREMENTS LOCALISES

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 (Photographie 3). Dans certains cas, cette extension peut dépasser dix mètres de diamètre.

Photographie 3 : Exemples de manifestation de fontis en surface (gauche : cliché INERIS, droite : MediaSeine)

Les effondrements localisés sont le plus souvent initiés par l'éboulement du *toit* ou de la voûte d'une *galerie*. 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 3, Photographie 4). 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*.

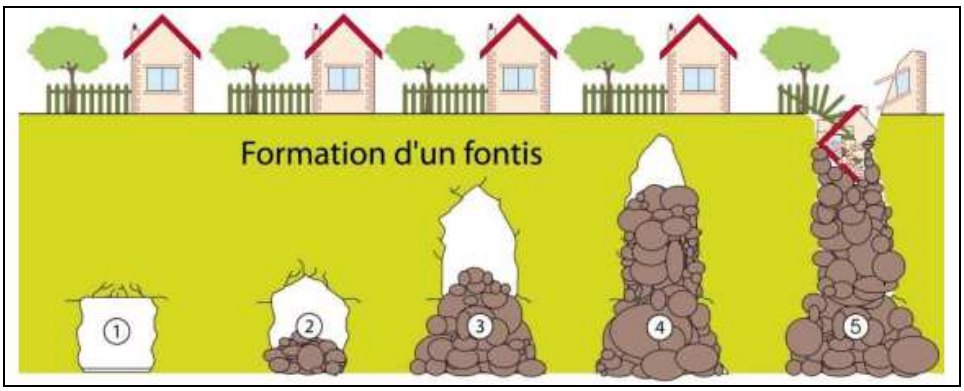


Figure 3 : Schéma d'évolution d'un fontis (INERIS)

Photographie 4 : Remontée de voûte observée en souterrain (cliché INERIS)

Les effondrements localisés peuvent également être provoqués par la rupture d'un ou de quelques *piliers* isolés (Photographie 5) au sein d'une carrière souterraine de type *chambres et piliers* abandonnés.

Photographie 5 : Pilier très dégradé n'assurant plus sa fonction de maintien (cliché INERIS)

Dans ce cas, l'étendue de la zone affectée en surface est généralement plus grande que pour un simple *fontis* (Photographie 6).

Photographie 6 : Secteur effondré lié à un effondrement de pilier (cliché INERIS)

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, venues d'eau...).

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

Cas d'un fontis

L'initiation est liée à la rupture du toit de la cavité, lorsque la résistance mécanique de ce dernier est inférieure à la contrainte liée à l'excavation et 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 qui peut rompre sans fissuration naturelle (par exemple certains grès ou certains calcaires), ou de galeries ou cavités de largeur importante, le rapprochement entre le toit et le mur de la cavité (dénommé convergence) ou 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. L'accélération peut toutefois 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 du fontis est un paramètre important dans le cadre d'une surveillance.

Un cas particulier de remontée à la surface, en terrain karstique, est le décolmatage ou débourrage d'une cheminée remplie de matériaux meubles.

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 pilier ou du toit proche). La mesure de convergence entre toit et mur à proximité du pilier ou de l'expansion du pilier (déformation horizontale) peuvent également être 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'un fontis, voire instantanée. Une accélération peut se produire si la remontée de cet effondrement atteint des formations meubles ou rendues mobilisables en présence d'eau.

3.1.2 LES AFFAISSEMENTS ET EFFONDREMENTS GENERALISES

Les ***affaissements*** sont des mécanismes fréquemment observés en surface à l'aplomb des *cavités* de plus grande profondeur que pour les effondrements localisés. Ils peuvent se produire pour certaines configurations particulières (notamment les *cavités anthropique*s de grandes extensions exploitées par la méthode des *chambres et piliers*).

Un affaissement est déclenché par l'éboulement d'un quartier souterrain, résultant de la rupture progressive des éléments assurant la stabilité de l'ouvrage (*piliers*, intercalaires lorsqu'il existe plusieurs niveaux exploités, *toit*, *mur*).

Les éboulis formés par *foisonnement* des blocs tombés, de formes et de tailles variables, avec des vides plus ou moins importants entre eux, subissent la charge des formations géologiques sus-jacentes. Celles-ci fléchissent et se réajustent progressivement à leur tour en direction de la surface (Figure 4).

Les affaissements se traduisent ainsi en surface par l'apparition graduelle d'une dépression topographique, sans rupture cassante importante (Photographie 7). On emploie souvent le terme de « cuvette d'affaissement ».

Photographie 7 : Cuvette d'affaissement (cliché INERIS)

L'amplitude verticale de la cuvette en surface, d'ordre décimétrique à plurimétrique, est en rapport avec l'*ouverture*, la profondeur et le *taux de défruitement* de l'exploitation.

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 cuvette, un raccourcissement (zone dite en compression) ou un allongement (zone en traction).

L'extension d'une cuvette d'affaissement déborde des aplombs du quartier souterrain éboulé, selon un angle dit d'influence (Figure 4*),* 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. L'existence d'un pendage des couches exploitées influe sur les valeurs de cet angle, tout comme la présence d'accidents géologiques (failles).

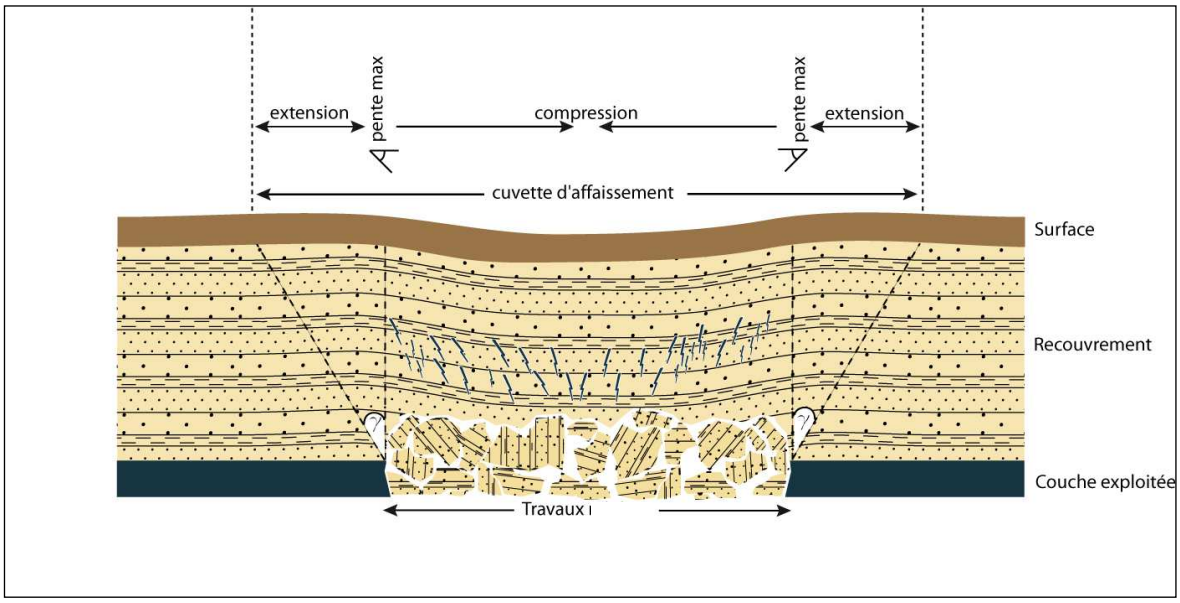


Figure 4 : Schéma de principe d'une cuvette d'affaissement (INERIS)

Les ***effondrements généralisés*** sont issus de mécanismes rares mais dont les conséquences peuvent être désastreuses. Les effondrements généralisés ou « en masse » 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.

Ce type d'effondrement peut également résulter d'une rupture du *toit*. Ce *phénomène* intervient lorsque la stabilité d'ensemble est conditionnée par une combinaison de celle des *piliers* et des terrains de *recouvrement*. C'est le cas notamment en présence de *bancs* rocheux raides et résistants au sein du *recouvrement*.

Quelle qu'en soit la cause, les *piliers* rompent généralement de manière brutale et spontanée. L'effondrement en surface est également brutal – parfois quasi instantané – s'accompagnant de secousses sismiques. La zone effondrée est bordée par des fractures franches, ouvertes et sub-verticales, délimitant des « marches d'escalier » (Photographie 8). Les conséquences peuvent, ainsi, s'avérer très dommageables pour les personnes et les biens situés en surface.

Photographie 8 : Effondrement généralisé à l'aplomb des cavités de craie (cliché INERIS)

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 généralisé**, le mécanisme est lié à la rupture de piliers, toit, mur, éventuellement 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.*

Le constat de la dégradation de piliers et de toits traduit la perte de résistance locale de l'édifice : chutes ou instabilités d'éléments rocheux, fissures mécaniques, fléchissement du toit, voire bombement du mur de la cavité qui peut résulter du poinçonnement des piliers voisins. 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 un pilier très endommagé ou de très faible section).

Lorsqu'un banc résistant est présent au toit des vides et que la stabilité de l'édifice est inhérente à sa tenue mécanique, la perte de résistance peut être induite par l'ampleur des éléments rocheux instables ou tombés, et par la présence de fissures évolutives au toit, qui constituent des signes précurseurs.

Dans le cas d'une rupture sans fissures préalables (par exemple certains grès ou certains calcaires), la convergence entre le toit et le mur de la cavité peut renseigner sur l'occurrence ou l'imminence d'une rupture du toit.

Outre le vieillissement et l'altération propres au matériau exploité ou laissé au toit, l'instabilité de l'édifice souterrain peut être favorisée par la présence, l'intrusion d'eau, ou encore la variation de son niveau (matériaux solubles notamment).

*Dans le cas de l'**affaissement**, la propagation vers la surface est progressive, mais de vitesse variable, et en tout état de cause complexe à appréhender car tributaire de la nature (souplesse ou raideur) du recouvrement.*

Il en va de même pour la vitesse de développement de la cuvette d'affaissement en surface. Les retours d'expérience indiquent des durées de quelques jours à plusieurs années.

*Dans le cas de l'**effondrement généralisé**, la propagation vers la surface est rapide, voire instantanée.*

Lorsqu'un banc dur est présent, non pas au toit immédiat de la cavité mais au sein des terrains de recouvrement, la vitesse du mécanisme est variable jusqu'à ce que ce banc soit atteint. Au-delà, le comportement est identique à celui décrit ci-dessus.

En surface, le développement du désordre est également rapide voire instantané.

3.2 COMBIEN DE TEMPS FAUT-IL SURVEILLER ?

Sont abordées, ci-après, des situations temporelles classiques de gestion du *risque*.

3.2.1 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 de stabilité soit effectué et que le *risque* soit confirmé ou infirmé.

Ce cas de figure vise également les situations où un *phénomène* a priori lent risque d'être accéléré sous l'effet d'un facteur aggravant, comme par exemple une intrusion d'eau ou une surcharge passagère.

> ☞ *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.*

3.2.2 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 survenir rapidement.

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

3.2.3 SITUATION DURABLE

Une « situation durable » fait référence à une *surveillance* d'une durée prévisible supérieure à la dizaine d'années.

Dans les *cavités* abandonnées, cette situation est rencontrée lorsque le *risque* est réel mais non imminent, et lorsque l'évolution du mécanisme d'instabilité redouté est progressive et offre la possibilité de mettre en œuvre suffisamment à l'avance les mesures de mise en sécurité des personnes.

Elle l'est également lorsque les solutions de traitement existantes sont jugées inappropriées ou incertaines en termes de sécurité, ou encore 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 d'organisation plus ou moins complexe, 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 non seulement la collectivité/le maître d'ouvrage mais également les organismes publics pour gérer le *risque*. Il s'agit alors d'identifier et de tester des techniques de mise en sécurité innovantes, spécifiquement adaptées à la situation rencontrée, visant à être plus sûres et/ou plus avantageuses économiquement, avec l'appui des bureaux d'études et d'entreprises. Il s'agit également de définir et de mettre en œuvre d'autres actions visant à maîtriser, réduire ou 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*.

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

3.3 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*.

3.3.1 ACCESSIBILITE

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 lors qu'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.

L'accessibilité peut être jugée comme dégradée dans les cas de figure suivants :

- lorsque l'accès depuis la surface (*galerie*, puits et leurs abords, cheminement pour les atteindre) n'est pas aisé ;
- lorsque 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 lorsque la zone à surveiller est elle-même dangereuse (Photographie 9) ;
- lorsque 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.

Photographie 9 : Illustration de deux carrières souterraines de conditions d'acheminement opposées (aisé à gauche, difficile et dangereux à droite) (gauche, cliché INERIS, droite cliché Ville de Lille)

En cas d'accessibilité dégradée, l'inspection visuelle des *cavités* comme méthode de *surveillance* est difficilement envisageable. On privilégiera alors 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.

3.3.2 FAISABILITE TECHNIQUE LIEE A 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 facilitent bien évidemment la mise en place d'une *surveillance* de sites où l'on souhaite limiter les 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*.

3.4 QUELQUES ELEMENTS-GUIDES DE PERTINENCE D'UNE SURVEILLANCE

Le Tableau 1 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

Tableau 1 : Tableau de pertinence d'une surveillance

Quelques éléments explicatifs permettent une meilleure compréhension du Tableau 1 :

- 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. Ainsi il est attribué la mention « degré de pertinence variable selon le cas » ;
- il n'est pas fait de distinction de vitesse pour les *cavités* non accessibles, du fait de la difficulté voire 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 souvent insuffisantes pour caractériser l'évolution des dégradations.

Les graphiques de la Figure 5 permettent une autre visualisation de la pertinence d'une surveillance pour chaque mécanisme, lorsque les conditions d'accès sont favorables.

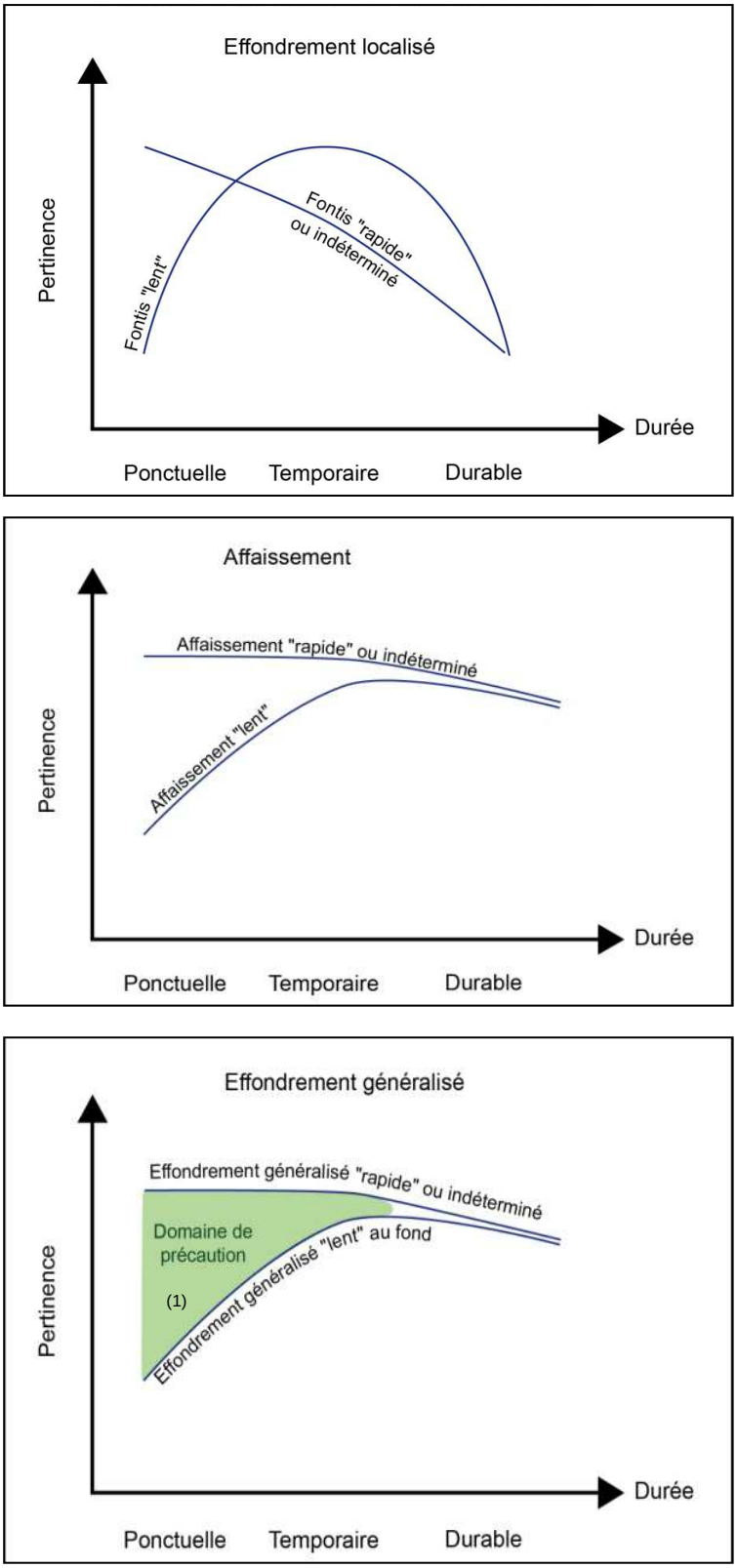


Figure 5 : Illustrations de la pertinence d'une *surveillance*, en fonction du mécanisme (pour les sites accessibles)

(1) En raison de l'intensité importante redoutée, souvent préjudiciable, de l'effondrement généralisé, le « domaine de précaution » qualifie le fait qu'il convient de caractériser au mieux la vitesse du mécanisme pour anticiper le phénomène redouté. Si cette vitesse est incertaine il convient de se placer du côté de la sécurité en considérant que le mécanisme peut être rapide

4. COMMENT ELABORER LE PROJET DE SURVEILLANCE ?

4.1 QUE SURVEILLER ?

La *surveillance* repose sur des données qualitatives ou quantitatives acquises pendant une période de temps suffisante permettant de prévoir et 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 ;
- une 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 en annexe 1.

4.1.1 LES RELEVES VISUELS DIRECTS OU ASSISTES

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 - Photographie 10, bâches plastiques pour mettre en évidence d'éventuelles chutes de blocs, marques de peinture, ...) 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.

Photographie 10 : Exemple de témoin de plâtre mis au droit d'une fissure (cliché INERIS)

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 factualiser 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. La fiche n°1 de l'annexe 2 propose à ce sujet un certain nombre de techniques classiques pour que ces inspections puissent être optimales.

De nouveaux outils, liés à la technologie laser (*Lidar*, Scan 3D, voir fiche n°2), désormais opérationnels, peuvent être avantageusement utilisés en complément, notamment pour les grands volumes. Ils permettent de réaliser, à intervalles réguliers, des modèles numériques précis et réalistes des *cavités* et de les comparer de manière assistée par ordinateur.

Par ailleurs, les caméras, comme d'autres techniques applicables en forage (laser, sonar, voir fiche n°3) se sont aujourd'hui répandues, notamment pour l'inspection régulière de *cavités* aux accès limités ou impossibles.

La *surveillance* visuelle est 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.

4.1.2 LES MESURES DE DEPLACEMENT

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.

On utilise le terme générique de distancemètre pour qualifier les *capteurs* permettant la mesure de déplacement entre deux points (Photographie 11). Cette famille de *capteurs* comprend les dispositifs suivants :

- le convergence-mètre (voir fiche n°4), connu aussi sous le nom de canne de convergence, 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) ;

- l'extensomètre (voir fiche n°5), 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 pour caractériser le déplacement dans les terrains de *recouvrement* au-dessus de la *cavité* souterraine ;

- le fissuromètre (voir fiche n°6) 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 équipement, très simples (échelle graduée) à sophistiqués, basés sur des *capteurs* de technologies variées[2], permettent ce type de mesure ;

- l'inclinomètre (voir fiche n°7) 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 ;

Photographie 11: 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 (clichés INERIS)

[2] On se référera au glossaire de l'annexe 1 pour des précisions sur les technologies des *capteurs*

- le nivellement (voir fiche n°8), 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.

4.1.3 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 (voir fiche n°9). 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'ennoyage et les fluctuations saisonnières ou exceptionnelles des aquifères souterrains, en particulier lorsque ce facteur constitue un élément aggravant de l'état de stabilité de l'ouvrage surveillé. 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, voir fiche n°10) 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 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 le rapport établi par l'INERIS sur les méthodes d'*auscultation* en *cavités* souterraines 23. 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.

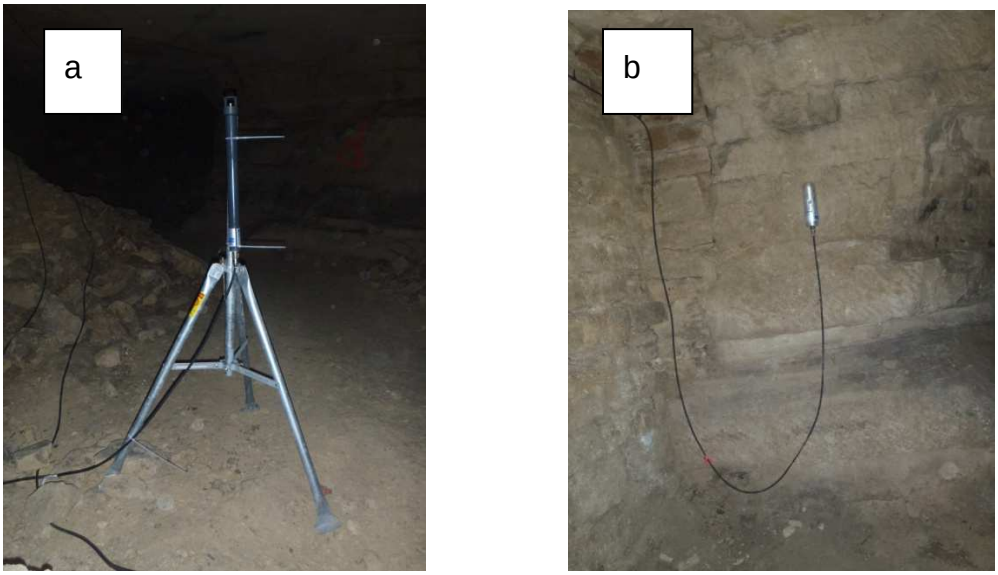
Par ailleurs, la mise en place de jauges de contraintes dans des forages permet de suivre l'évolution des contraintes au sein d'un massif. C'est une méthode également indirecte qui est assujettie à une bonne connaissance de la loi de comportement de la roche dans laquelle ces jauges sont installées.

4.1.4 LES MESURES D'ONDES ACOUSTIQUES ET MICROSISMIQUES

Dans les *cavités* profondes, l'instabilité s'exprime généralement par une rupture des *piliers*, du *toit* voire parfois du *mur* qui ont atteint leur limite de résistance sous la charge des terrains sus-jacents. Cette rupture peut engendrer la libération brutale d'une énergie accumulée, qui s'accompagne par l'émission d'ondes mécaniques intenses qui se propagent dans le massif. Ces ondes sismiques peuvent alors être interceptées par des *capteurs* dénommés sismomètre, géophone ou accéléromètre (voir fiche n°11).

Dans les *cavités* peu profondes, les terrains sont moins soumis aux effets de pression des terres qu'aux effets d'altération et de *fracturation*. L'intensité des ondes mécaniques générées par les ruptures est donc moindre, et il n'est pas toujours possible de les enregistrer correctement. Toutefois, dans ces configurations de faible profondeur, 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 (voir fiche n°12).

Dans les deux cas, 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.



Photographie 12 : Dispositifs de mesure acoustique et microsismique dans une cavité a) microphone, b) géophone de paroi (clichés INERIS)

4.2 COMMENT DIMENSIONNER LA SURVEILLANCE ?

A ce stade, 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.

4.2.1 RECHERCHER LE MEILLEUR RAPPORT COUT/AVANTAGE

Comme explicité au chapitre 3.4, 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 devait 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 :

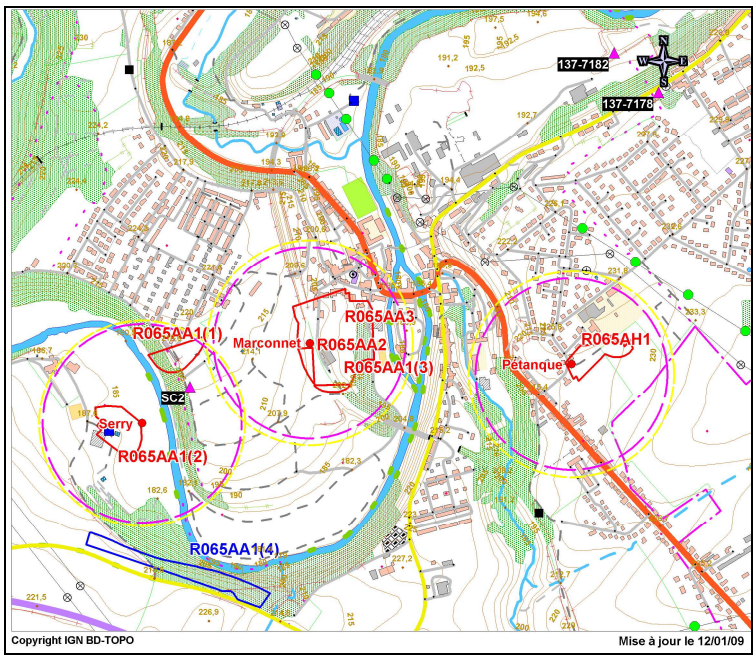
- l'application en souterrain à l'application depuis la surface ;
- les approches globales aux approches ponctuelles.

4.2.2 TENIR COMPTE DE L'ETENDUE DE L'OUVRAGE A 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, la taille du dispositif de *surveillance*, en termes de **nombre de stations**, sera proportionnelle 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 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 alors à établir, dans un premier temps, un **plan d'implantation préliminaire** des stations de mesure (Figure 6), sur la base de ce principe. Ce plan devra ensuite être adapté à la réalité et aux contraintes de terrain comme décrit aux chapitres 4.2.3 et 4.2.4.



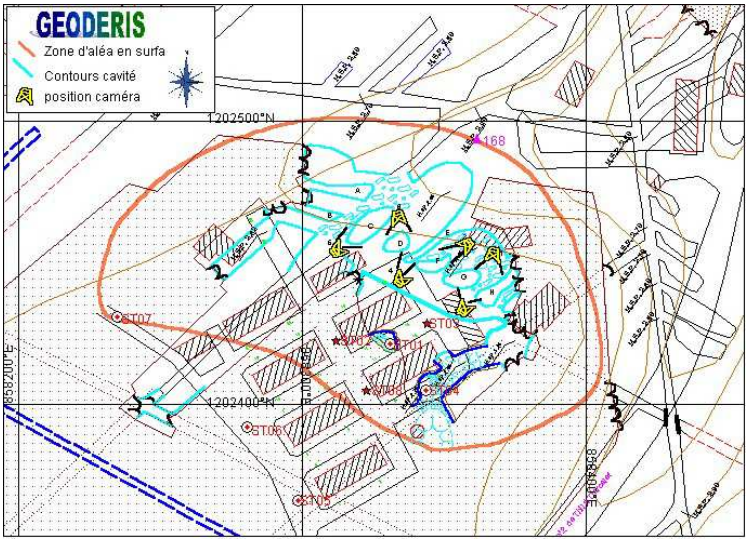
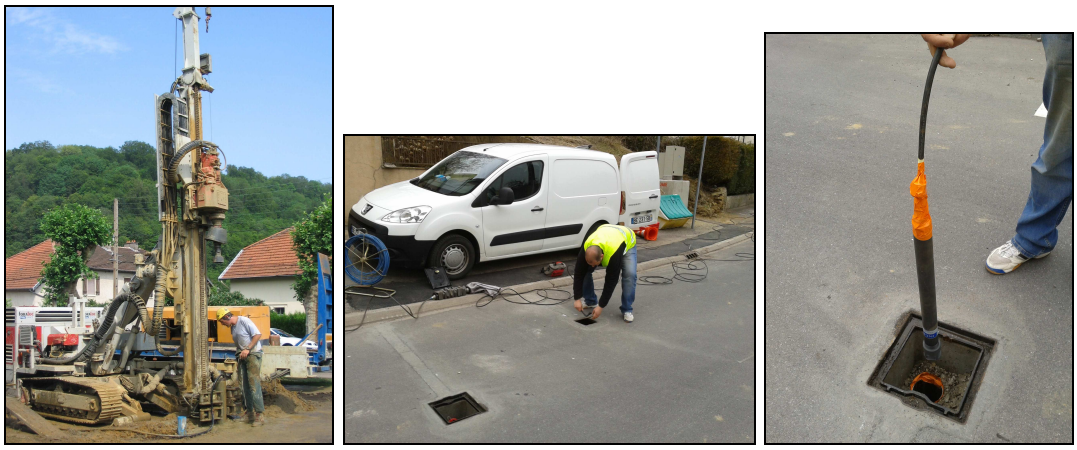


Figure 6 : Illustrations de plans préliminaires d'implantation d'un réseau de surveillance (source GEODERIS)

4.2.3 TENIR COMPTE DE LA CONTRAINTE D'ACCESSIBILITE A 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 (Photographie 13). 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.



Photographie 13 : Implantation de stations de surveillance depuis la surface (clichés INERIS)

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

4.2.4 TENIR COMPTE DES CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES DU SITE A SURVEILLER

Ces contraintes peuvent parfois être déterminantes pour transformer un schéma d'implantation préliminaire des stations en plan opérationnel. Elles sont de deux ordres :

- **la desserte en réseaux de puissance et de communication** (électricité et téléphonie, …) : l'implantation des 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 « obstacles » que constituent les multiples occupations de la surface.

  Ceux-ci peuvent interférer directement, en interdisant physiquement 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 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.

4.2.5 S'ADAPTER A LA DUREE DE SURVEILLANCE

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

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.[3]

[3] Le lecteur consultera le glossaire de l'annexe 1 pour plus de détail sur les termes employés

4.2.6 REDONDANCE ET COMPLEMENTARITE 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). La redondance augmente ainsi considérablement la résilience d'un système de *surveillance*, en améliorant sa capacité de récupération en cas de défaillance technique.

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 7*).

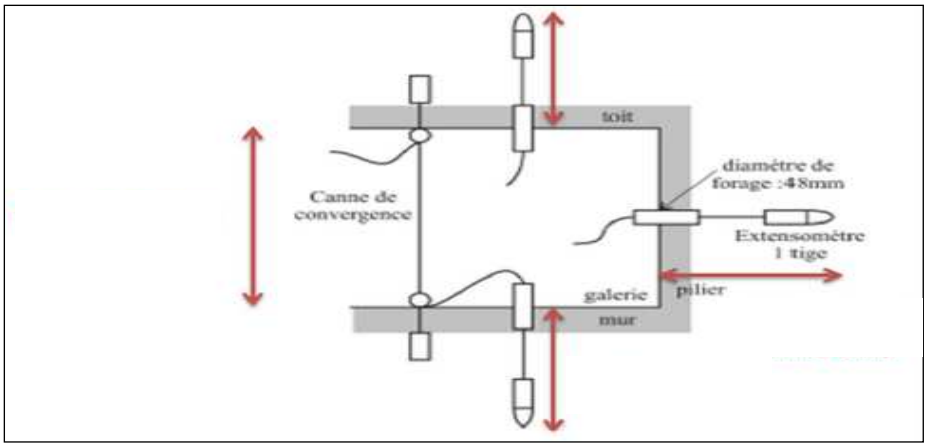


Figure 7 : Exemple de station de mesure réunissant canne de convergence et trois extensomètres

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 (Figure 8) ;
- 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.

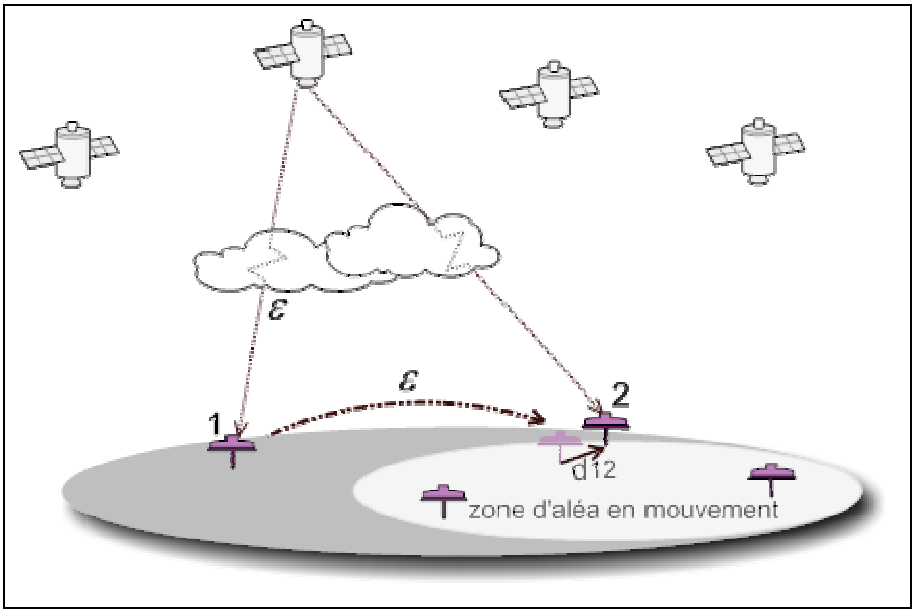


Figure 8 : Mesure de déformation de surface : schéma de principe d'un réseau géodésique de type GPS RTK. Les variations de mesure de la balise de référence (1), située en zone stable, sont transmises sous forme de correction aux balises de mesure (2, 3 …), situées en zone de mouvement.

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.

4.3 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 chaine 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 chaine doivent être vérifiées en sollicitant directement les *capteurs*.

L’installation d’un dispositif de *surveillance* 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, cette 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 sismoacoustique 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 (21) afin d’établir le lien (la fonction de transfert) entre le *phénomène* à la source et le signal au *capteur* distant.

4.4 COMMENT GERER LES DONNEES 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.

4.4.1 L’*ACQUISITION* DES DONNEES

Cette opération consiste à collecter des valeurs brutes à partir des points d’observation, qu’ils soient visuels ou issus de *capteurs*. L’acquisition des mesures instrumentées est généralement réalisée sur le site par une ou plusieurs unités d’*acquisition* (Photographie 14), 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, ...).

La fréquence de collecte des mesures est généralement imposée par le mécanisme redouté. Elle sera 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.

Photographie 14 : Exemples d'unités d'acquisition (gauche cliché SolExperts, droite cliché INERIS)

4.4.2 LA GESTION DES DONNEES

4.4.2.1 LA TRANSMISSION DES DONNEES

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, radio-transmetteur, 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.

4.4.2.2 LE TRAITEMENT DES DONNEES

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 l'exception des 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 9. Des corrections calées empiriquement peuvent permettre 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 périodiques ;
- 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. C'est le cas par exemple des chaines de mesure sismique qui peuvent induire des distorsions en amplitude et fréquence qu'il convient de corriger pour restituer le vrai mouvement du sol 17.

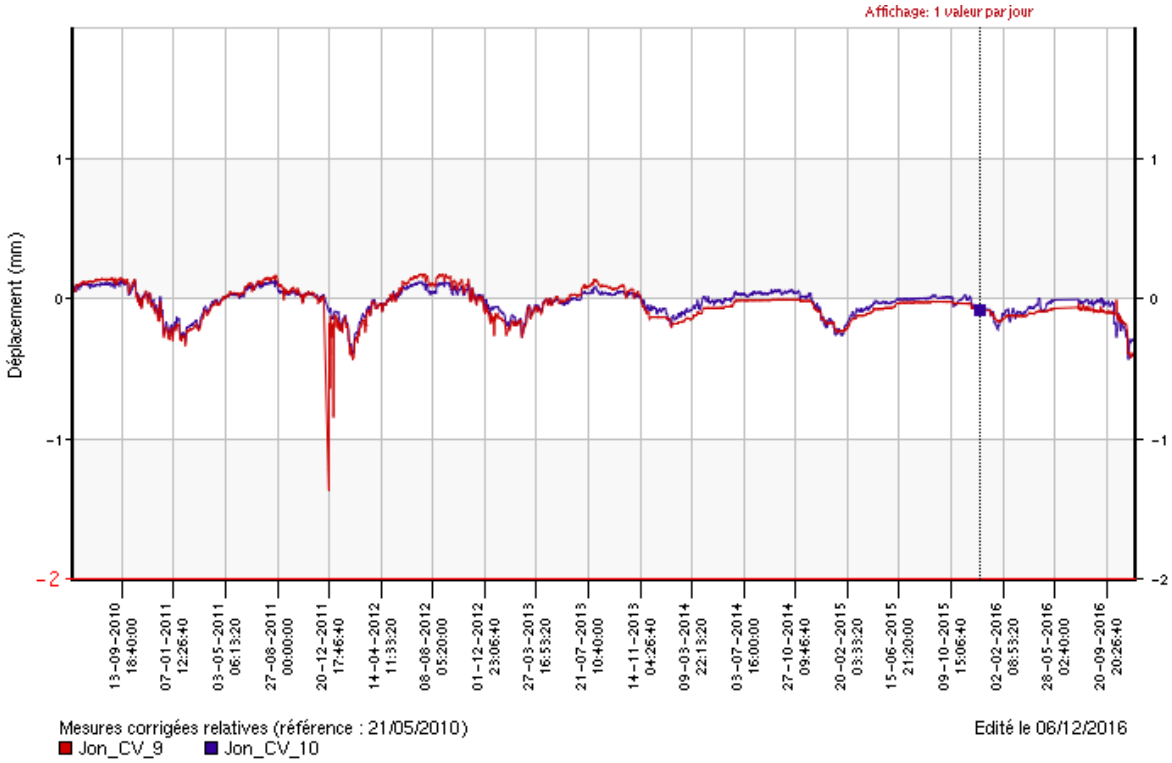


Figure 9 : Mesures de déplacement relatif dans une carrière de pierre de taille (août 2010 – octobre 2016) : les auteurs attribuent les fluctuations des déplacements relatifs entre -0,05 et 0,05, enregistrés par les capteurs aux variations de température saisonnières

L'analyse des données – Les données élaborées

L'analyse de ces données après corrections va permettre de fournir 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 (Figure 10). 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 pourra se faire manuellement ou au moyen d'outils (calculateurs, logiciels) automatisés ou pas.

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 *capteurs* (d'une même station ou entre stations) pour identifier une évolution inhabituelle de l'ouvrage et en caractériser l'ampleur.

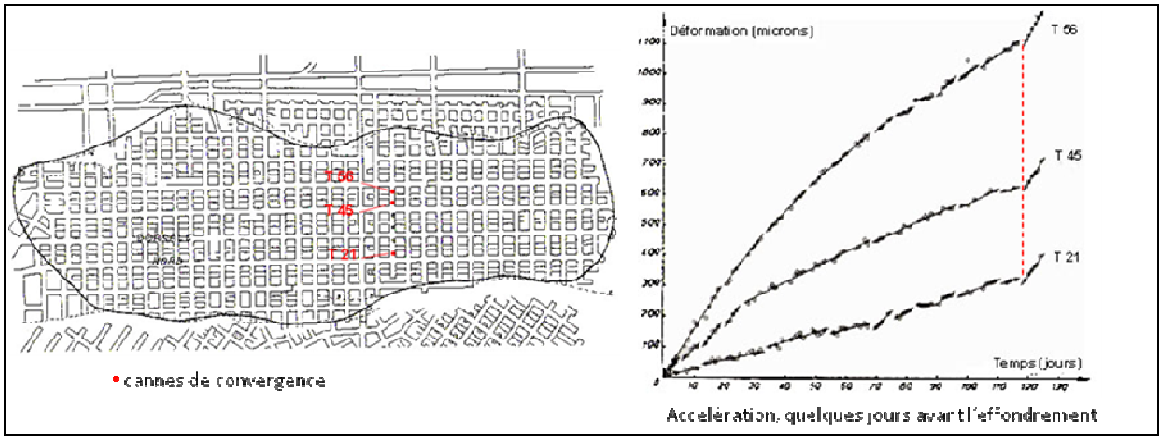


Figure 10 : Accélération simultanée de la convergence sur plusieurs stations [26]

Dans le cadre d'une *surveillance* sismoacoustique, 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 permet de fournir 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 peut intervenir à différents stades du traitement, sur des données brutes, physiques ou même élaborées.

Au niveau le plus bas, la validation peut se faire sur des critères métrologiques. On écartera par exemple une mesure brute hors plage (exemple : mesure de 0 mA issue d'un *capteur* dont l'*étendue de mesure* est 4-20 mA). La validation peut également se faire par l'examen de la dispersion de plusieurs mesures rapprochées ou de mesures redondantes (cf. section 4.2.5) : c'est le cas pour les artefacts ou les parasites électriques par exemple.

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 (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'invraisemblance, 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.

4.4.2.3 LE STOCKAGE ET LA TRAÇABILITE DES DONNEES

La traçabilité des données est importante, d'autant plus que la *surveillance* est durable. À tout moment, la reprise et la réinterprétation des données de mesure 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). L'expérience montre qu'avec la complexité croissante des systèmes, des erreurs de paramétrage peuvent parfois être décelées tardivement.

Ainsi, pour les systèmes d'*acquisition* reposant sur un *seuil* de déclenchement (en microsismique par exemple), la recrudescence (ou la raréfaction) des mesures peut déboucher sur des interprétations diamétralement opposées selon que l'on aura modifié ce *seuil* ou pas. Dans un cas, elle sera vue comme un signe d'évolution du milieu et dans l'autre comme un simple regain (ou une baisse) d'activité apparent. 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 apparait incontournable dès lors que les projets de *surveillance* sont complexes et/ou de longue durée.

4.4.2.4 L'ACCES, LE PARTAGE ET LA RESTITUTION DES DONNEES

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

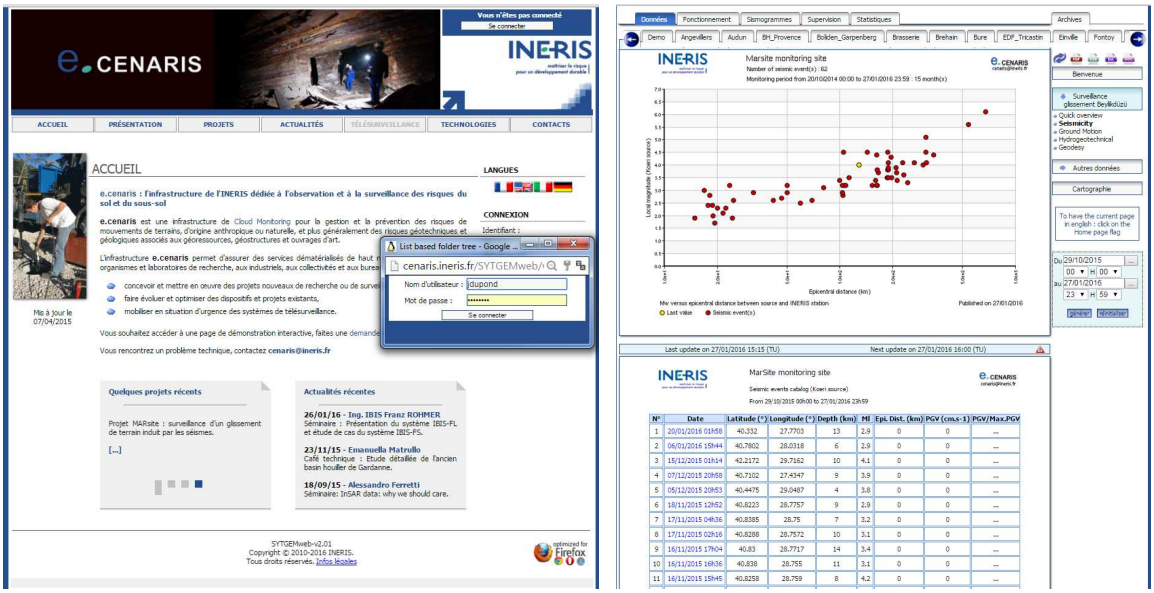


Figure 11 : Exemple de centre de traitement et de partage de données en ligne et en temps réel

En situation normale, les besoins d'accès consistent essentiellement 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 (Figure 11), en particulier avec des intervenants distants.

4.5 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.

Les critères d'alarme peuvent aussi revêtir la forme d'un gradient qui repose cette fois sur la détection d'une *accélération* du *phénomène* physique mesuré (vitesse de déformation, de déplacement, fréquence, etc.). Il s'applique alors, non plus à une, mais à une série chronologique de mesures.

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.

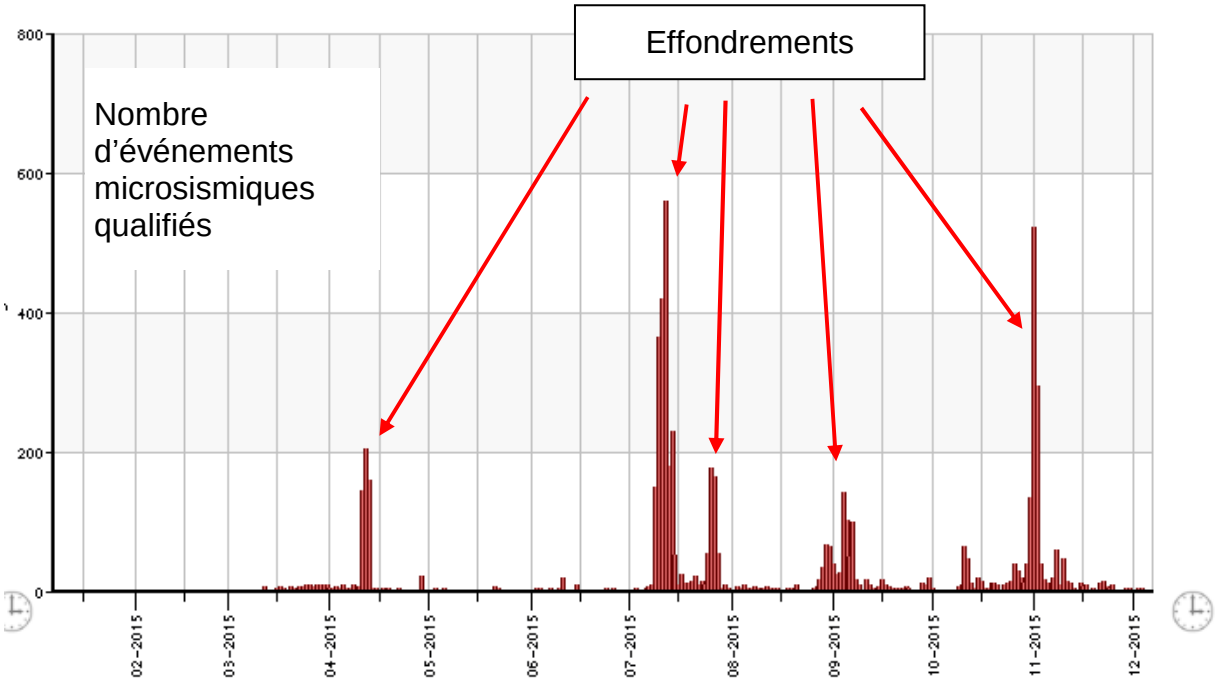


Figure 12 : Exemple d'identification de situations anormales lors d'une surveillance microsismique.

La connaissance de l'état « normal » passe idéalement par une période préliminaire (quelques semaines, voire quelques mois) d'apprentissage, mise à profit pour évaluer la dispersion des mesures et ajuster les critères. 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. Dans le doute, on peut fixer très temporairement des valeurs sécuritaires de critères et assujettir les déclenchements d'alarme au dépassement persistant sur plusieurs mesures successives et/ou sur des *capteurs* redondants.

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.

4.6 COMMENT SE PREPARER A 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 12).

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. En somme, tout doit être fait pour que, d'une part chacun connaisse parfaitement son rôle et que, d'autre part les temps de réaction soient minimisés, car il faut à tout prix éviter de se poser des questions dans le feu de l'action.

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. Si nécessaire, une permanence peut aussi être organisée par entités. 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.

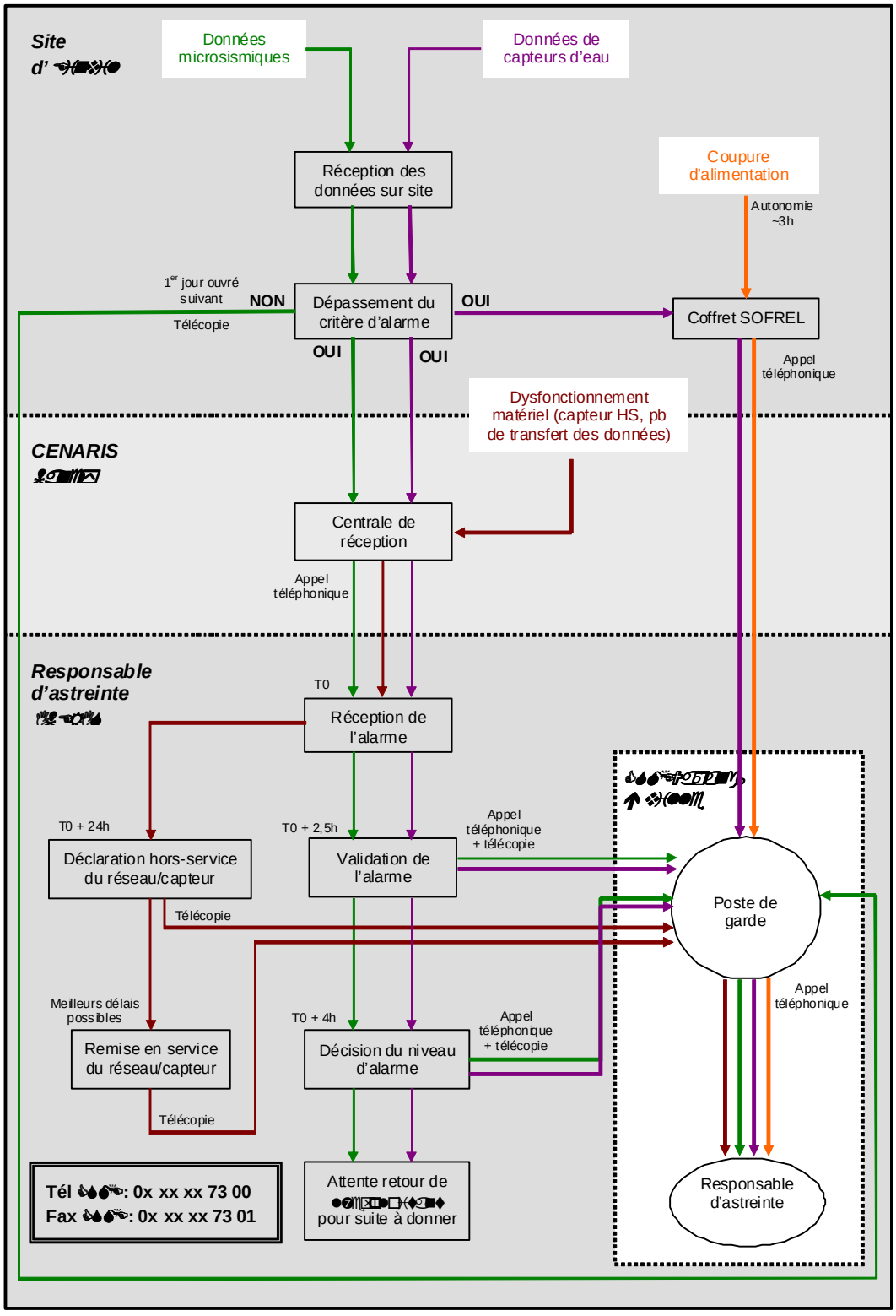


Figure 12 : Exemple de procédure de surveillance

4.7 COMMENT MAINTENIR LE DISPOSITIF DE SURVEILLANCE

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 :
  un **contrôle périodique préprogrammé** (communément semestriel ou annuel) qui consiste à faire un bilan fonctionnel et métrologique de l'ensemble de la chaine 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. Ces contrôles font généralement l'objet de modes opératoires précis, intégrés au système de qualité. Ils garantissent en général une disponibilité élevée des dispositifs de *surveillance* et leur longévité ;
- une maintenance curative :
  Cet aspect de la maintenance repose sur deux éléments principaux :

    - un **système de détection de défauts** de fonctionnement : pour les méthodes sans télé*transmission*, cette détection est généralement pratiquée par un opérateur lors des visites de site ou de collecte des données. Pour les systèmes automatisés avec télé*transmission*, des tests réguliers peuvent être mis en place pour s'assurer du bon fonctionnement aux différents niveaux de la chaine d'*acquisition* (*capteurs*, unité centrale, …), de *transmission* et de traitement. Dans la mesure du possible, la mise en place de mécanismes d'autodiagnostic par des tests automatisés (Figure 13) et d'autoréparation (réinitialisation automatique sur détection d'anomalie) est encouragée car elle facilite grandement la maintenance d'un réseau, en limitant l'investissement en personnel pour réaliser ces contrôles ;

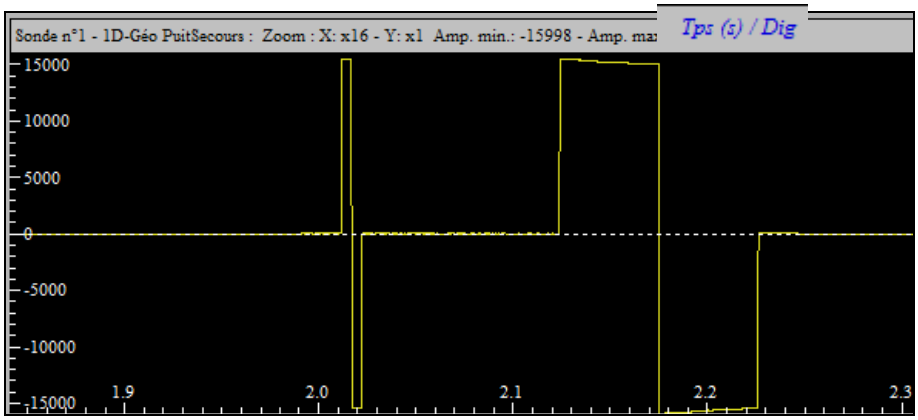


Figure 13 : Exemple de signal autotest délivré par une sonde de type géophone afin de vérifier la réponse conforme en amplitude, en forme, et en heure de toutes les voies d'un réseau

    - une **organisation humaine et matérielle** permettant de mettre en œuvre efficacement les opérations de maintenance curative. La constitution d'un stock de remplacement pour les éléments les plus exposés est recommandée, surtout lorsque des délais d'approvisionnement importants sont nécessaires.

4.8 QUELLES EVOLUTIONS POSSIBLES ?

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 …) et peut, à tout moment, amener à modifier la configuration 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 (ERP par exemple). Dans ces conditions, non seulement les *enjeux* sont susceptibles d'évoluer, mais également les sources potentielles de bruits de mesure ;
- dégradation matérielle : des actes de malveillance ou des chutes de blocs peuvent affecter le fonctionnement d'une partie ou de la totalité d'un réseau de *surveillance*. Dans ces conditions, on peut être amené à déplacer/modifier/sécuriser les *capteurs* et la configuration d'origine des stations de mesure ;
- 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 et le vieillissement des matériaux sur le long terme 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. Cela conduit en général à reconsidérer et faire évoluer peu ou prou le dispositif de *surveillance* ;
- 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 (UGPS, 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, en revanche,

l’utilisation de drones est problématique à cause des difficultés d’évolution dans les vides souterrains ainsi que de *transmission*. Ce domaine est cependant l’objet d’améliorations continues et sera à terme en mesure d’offrir la possibilité d’inspecter des sites souterrains dangereux ou aux conditions d’accès difficiles ;

- 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.

5. CONCLUSIONS

L'emploi d'une *surveillance* n'est pas anodin puisqu'il s'inscrit dans un objectif de sécurité publique et 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 où la mesure est produite, jusqu'au bureau de l'ingénieur où l'analyse des données est faite.

Les technologies étant très évolutives dans ce domaine et parfois très attirantes en termes d'opérabilité et de rendus de produit de sortie, 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.

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 puissent être préservées.

6. POUR ALLER PLUS LOIN

1. Allard J. F., 1975 : Méthode adoptée dans le sud-ouest de la France pour l'étude de la stabilité des carrières souterraines. Thèse à l'Université de Bordeaux I.
2. Auvray C., Homand F., Hoxha D., 2008 : The influence of relative humidity on the rate of convergence in an underground gypsum mine. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 45, 1454 – 1468.
3. Bernede J., 1977 : Appareils de conception récente utilisés actuellement au contrôle des mouvements de terrains – télémesure associée. Revue française de géotechnique, n° 1, p 77-85.
4. Bonis M., Renaudeaux 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. Couffin S., Bigarré P., Bennani M., Josien J-P., 2003 : Permanent real time microsismic monitoring of abandoned mines for public safety. Field Measurements in Geomechanics, -Myrvoll (ed.), © 2003 Swets & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 602 5.
8. Coussy O., 1991 : Mécanique des milieux poreux. Editions TECHNIP, 464 p.
9. Crouzeix C., Le Mouël J.L., Perrier F., Richon P., Morat P., 2003 : Long-term thermal evolution and effect of low poer heating in an underground quarry. C.R. Geoscience 335, 345-354.
10. 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.
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. Fardin R., 1964 : Guide de la mesure et de la régulation industrielle. Editions Eyrolles.
13. 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, 67-85.
14. Feuga B., Schwartzmann R., 1989 : La sécurité des anciennes carrières souterraines. Revue de l'Industrie Minérale – les techniques, p. 131-137, mars 1983.

15. Glories P., Dejean M., 1983 : Télésurveillance des ouvrages de génie civil et miniers – Mise au point et essais du dispositif CERCHAR à la mine de Rochonvillers.
16. 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, 867-886.
17. Havskov J., Alguacil G., 2006 : Instrumentation in Earthquake Seismology. Springer, 358 p.
18. IFSTTAR, 2014 : Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées. Guide méthodologique. Collection Environnement Les Risques Naturels.
19. INERIS, 2007 : Guide « mise en sécurité des cavités souterraines d'origine *anthropique* : surveillance – traitement. INERIS-DRS-07-86042-02484A.
20. INERIS, 2008 : Surveillance microsismique d'une carrière abandonnée : Site de Grozon. INERIS DRS-08-95048-04835A.
21. INERIS, 2013 : Méthodologie de surveillance du risque de fontis en cavité souterraine par méthode acoustique. INERIS-DRS-13-135992-01259B.
22. INERIS, 2015 : Surveillance instrumentée des carrières souterraines. Retours d'expérience sur l'instrumentation géotechnique par capteurs de déplacements. INERIS-DRS-15-149560-10629A.
23. INERIS, 2015 : Préconisations pour la mise en œuvre de techniques d'*auscultation* dans les carrières souterraines. INERIS-DRS-15-149556-11615A.
24. INERIS, 2015 : Guide sur les solutions de mise en sécurité des cavités d'origine *anthropique*. INERIS-DRS-15-149564-02401A.
25. Josien J.-P., 1995 : Diagnostic et caractérisation des aléas. Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, n° 51, p. 95-111. Revue de l'Industrie Minérale – mines et carrières, p. 17-23, février 1989.
26. 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.
27. Laboratoire des Ponts et Chaussées, 1994 : Surveillance des pentes instables. Guide technique, 125 p.
28. Lhoste J., 1987 : La stabilité des carrières souterraines abandonnées de l'Entre-Deux-Mers, méthodes d'études et de surveillance. Thèse à l'Université de Bordeaux III.
29. 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.
30. Perrier F., Morat P., Le Mouël J.-L., 2001 : Pressure induced temperature variations in an underground quarry. Eatrh Planet. Sci. Lett. 191, 145-156.
31. Portail de Prévention des Risques Majeurs : www.prim.net

32. 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.

33. 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.

34. Schwartzmann R., Feuga B., 1989 : La sécurité des anciennes carrières souterraines. Revue de l'Industrie Minérale – mines et carrières, février 1989, p. 17-23.

35. Schwartzmann R., Josien J.-P., Homand F., 1989 : Stabilité et surveillance de sites historiques. Symposium international, Athènes, 19-23 sept. 1989, 10 p.

36. Sinou P., Barou S., Leonet O., 1980 : Etude et mise au point d'un système d'alerte et d'alarme vis-à-vis des éboulements. Bull. Tech. des Mines de Fer, n° 140, p. 159-177.

37. TELEMAC : Catalogue de mesure pour l'*auscultation* des ouvrages de génie civil.

38. Tritsch J-J., 1991 : Dispositif de télésurveillance du soutènement des voies larges. Etude convention CECA n° 7220-AB/308, 23 p., mars 1991.

39. Tritsch J.-J., Toulemont M., Durville J.-L., Potherat P., 2002 : Guide technique : Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines. Collection Environnement – Risques naturels, LCPC/INERIS/MATE, 130 p.

40. Wigley T.M.L., Brown M.C., 1971 : Geophysical applications of heat and mass transfer in turbulent pipe flow. Bound.-Lay. Meteorol. 1, 300-320.

7. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe 1	Glossaire	11 A4
Annexe 2	Fiches de dispositifs courants de surveillance	24 A4
Annexe 3	Exemples de surveillance	21 A4

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.

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 bonnes propriétés mécaniques. Ce banc peut constituer le *toit* d'une cavité ou encore se trouver au sein des *terrains de recouvrement*.

Capteur électrique

Dispositif permettant d'enregistrer une mesure pouvant être traduite en une grandeur recherchée (distance, déformation, contrainte, ...). Plusieurs technologies existent dont les principales sur le marché sont présentées ci-après.

Capteur à corde vibrante

Capteur doté d'une corde à piano tendue entre deux points solidaires de la structure à étudier. La corde est mise en vibration par un système électronique (excitateur) et « écoutée » au moyen d'électro-aimants. Les signaux sont ordinairement transmis par des câbles électriques. Sous l'effet du chargement de la structure, la base définie par les deux points subit une variation de longueur. La corde subit en conséquence une variation de tension qui se traduit par un changement de la fréquence de vibration. C'est cette fréquence qui est relevée.

Ces capteurs présentent une très bonne fiabilité et une très bonne sensibilité. En outre, les signaux (fréquence) sont faciles à transmettre par câbles avec une altération minimale du signal jusqu'à des distances importantes (de l'ordre de 1000 m). Ce type de capteur est donc bien adapté à la télémesure et télésurveillance.

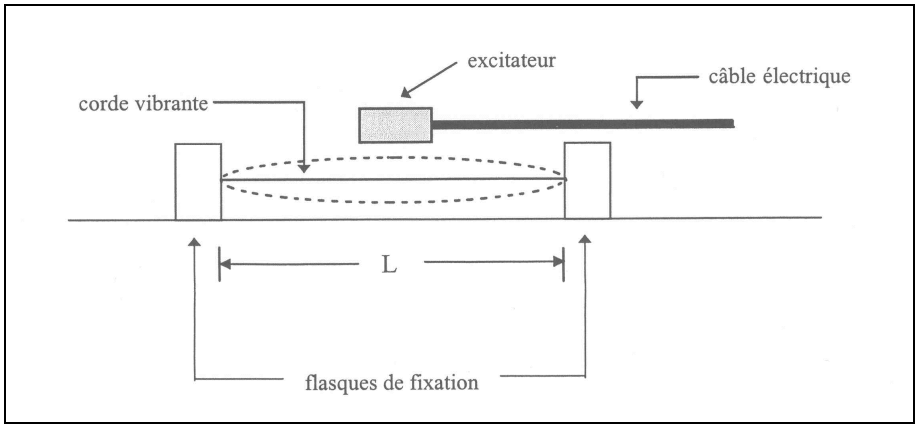


Schéma de principe d'un capteur à corde vibrante

Capteur inductif

Capteur conçu à partir de deux circuits oscillants coulissant à l'intérieur d'un anneau de couplage en alliage non magnétique. Les circuits oscillants sont constitués de deux bobines associées à une même capacité par un relais. La lecture des fréquences sur les deux bobines permet d'évaluer le déplacement d'un point.

La résolution de ces capteurs est supérieure au centième de millimètre. Comme il n'y a pas de contact mécanique, ces systèmes résistent bien aux chocs (vibrations, par exemple). Ils ne présentent pas de dérive électronique et le signal de sortie exploité est une fréquence parfaitement transmissible par câble. Ils nécessitent pour leur fonctionnement une alimentation électrique et un poste de lecture.

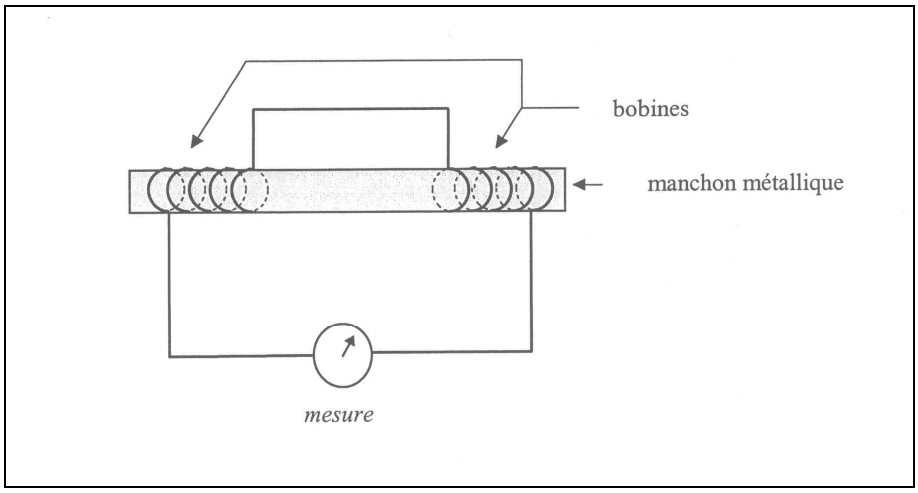


Schéma de principe d'un capteur inductif pour la mesure d'un déplacement linéaire

Capteur LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

Il s'agit d'un capteur de déplacement linéaire dont la mesure se fait par variation d'induction mutuelle. Le corps de mesure de ce capteur est constitué d'un bobinage primaire et de deux bobinages secondaires montés symétriquement dans un cylindre de part et d'autre d'un noyau magnétique. Le bobinage primaire est excité par une source de courant alternatif et crée de ce fait deux tensions déphasées de 180° dans les bobinages secondaires. La grandeur mesurée est une tension : lorsque le noyau se trouve au centre du système secondaire, la tension de sortie est nulle. Elle prend des valeurs non nulles lorsque le noyau s'éloigne.

Comme pour les capteurs inductifs, il n'y a pas de contact mécanique entre le noyau et les bobinages : le système ne peut donc pas être facilement détérioré. Pour cette même raison, la résolution est quasi infinie et la fiabilité du capteur est assez importante. Enfin, la tension lue est liée au déplacement par une simple fonction affine.

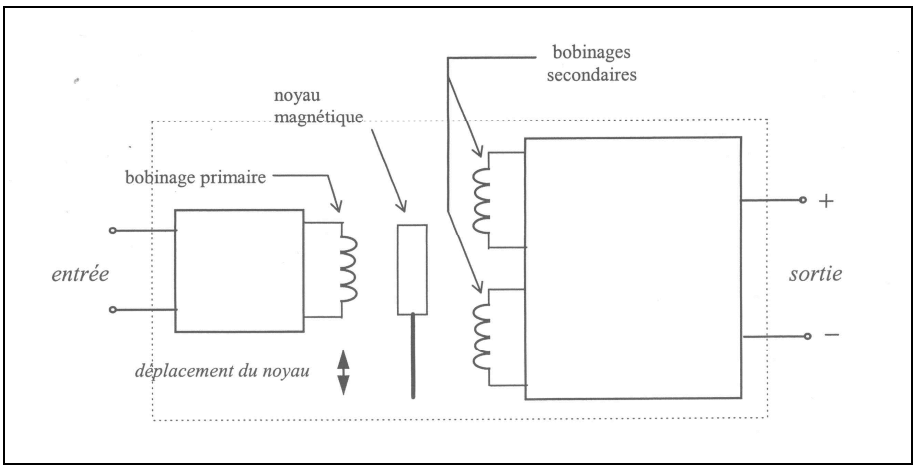


Schéma de principe d'un capteur LVDT

Capteur résistif

On mesure par ce capteur la résistance d'une jauge de déformation métallique ou piézorésistante qui est amenée à se déformer. On la caractérise par son facteur de jauge, k, tel que :

$$k = \frac{dR/R}{d\ell/\ell}$$

où dR est la variation de résistance en réponse à l'allongement, dl.

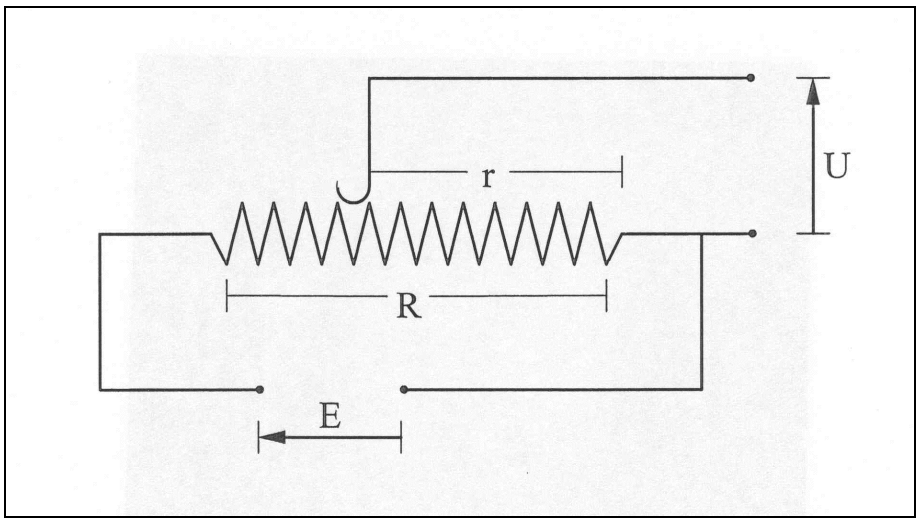
Ces jauges peuvent être utilisées en nombre sur un même câble pour s'affranchir des discontinuités. Une jauge comporte généralement deux ancrages en plastique à coller directement sur le câble d'acier : l'ancrage de tête et l'ancrage de pied reliés par un fil (ou groupement de fils) tendu et posé sur le câble de telle façon qu'il en adopte complètement la déformation. La résistance de la jauge varie de façon linéaire par rapport à l'élongation du câble. Un poste de lecture permet de traduire cette résistance en micro-déformation.

Les capteurs à jauges permettent de déterminer ponctuellement la valeur d'un déplacement à un instant précis, celui de la mesure. Toutefois les jauges sont très sensibles à différentes grandeurs d'influence telles que la température.

Capteur potentiométrique

Le potentiomètre consiste en un ensemble de deux résistances variables montées en série mais dont la somme reste constante égale à R. Les deux résistances sont séparées par un curseur mobile de type mécanique par exemple (simple fil tendu et muni d'un contact glissant). Il s'agit de déterminer la tension de sortie qui est une fonction linéaire du déplacement.

Ce type de capteur utilisé principalement pour la mesure des déplacements présente une bonne sensibilité et une bonne résolution en statique. Son coût est faible et on peut le mettre en place en atmosphère humide. Il est néanmoins difficile à mettre en place et fragile.



$$U = E \cdot \frac{r}{R}$$

Schéma de principe d'un capteur potentiométrique

Capteur mécanique

Le capteur mécanique est un dispositif permettant une lecture directe de la grandeur à suivre : l'écart entre deux points et les variations de distance entre ces points. Les grandeurs d'entrée et de sortie sont donc de même nature. Les capteurs à lecture directe amplifient le déplacement pour faciliter la mesure au moyen, par exemple, d'une crémaillère. Des systèmes à vis existent également, transformant un petit mouvement longitudinal en une grande rotation.

Ce type de capteur présente l'avantage de n'être pas lié à la structure. De plus, il demeure généralement peu onéreux. La résolution est relativement faible, souvent compatible avec l'évolution de la grandeur recherchée. Ce capteur nécessite l'accès humain à la structure mesurée.

Caractéristiques d'une mesure

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

Etendue de mesure

Intervalle de valeurs pouvant être mesurées par le capteur.

Mesurande

Terme parfois employé pour qualifier la grandeur que l'on cherche à mesurer.

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 :

$$\boxed{T = ds/de}$$

Cavité

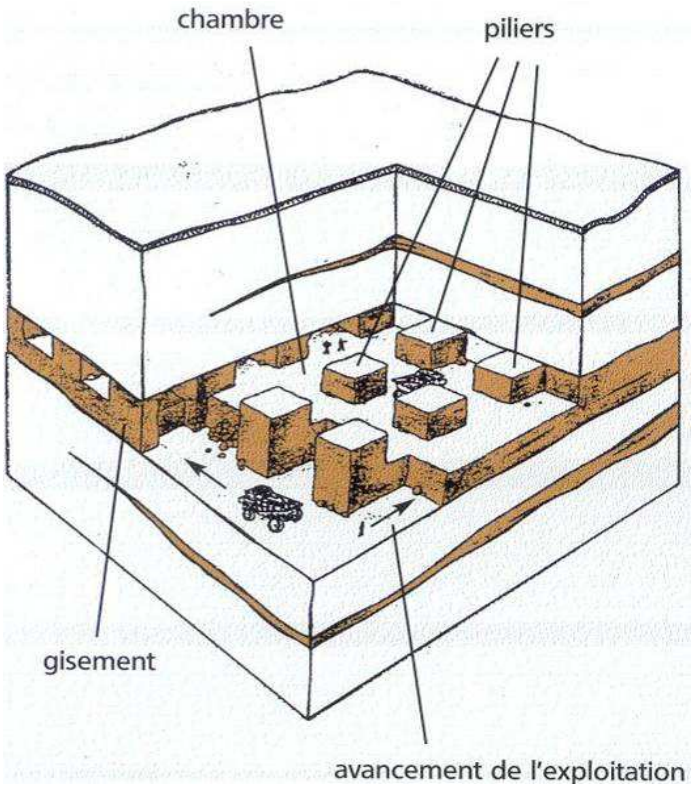
(en géologie) Espace creux, naturel ou artificiel, plus ou moins large, plus ou moins profond, fermé ou non, dans un massif rocheux (ex : carrière souterraine, karst, grotte, caverne…).

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.



Diaclase

Fracture d'une formation ou d'une roche sans déplacement vertical ou latéral des parties de part et d'autre de cette fracture.

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).

Etude géotechnique

Elle est définie et codifiée par la norme NF-P-94 500 version 2013 (Etude géotechnique).

Pour les cavités souterraines, elle comprend selon les cas : analyse de la documentation existante, visites de terrain, campagne géophysique, sondages (avec éventuellement vidéoscopie), relevé topographique, repositionnement du vide par rapport à la surface et si possible examen visuel des cavités souterraines, évaluation des mécanismes d'instabilité, analyse de stabilité de l'ouvrage, préconisations de solutions de mise en sécurité.

Faille

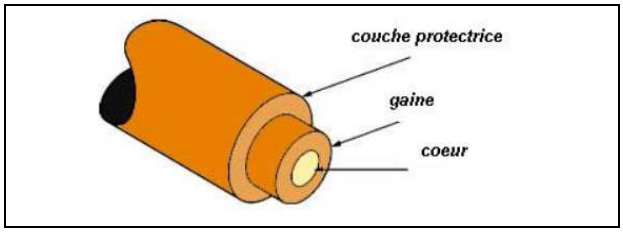
Discontinuité d'origine géologique, dont l'extension est importante (plusieurs centaines de mètres à plusieurs dizaines de kilomètres pour les failles majeures) qui sépare deux compartiments rocheux qui peuvent se déplacer de manière relative, notamment lorsqu'elles sont recoupées par des exploitations souterraines.

Fibre optique

Technologie de transmission de plus en plus répandue, consistant à guider une onde optique de polarisation circulaire par l'intermédiaire d'un fil en verre ou plastique. Les avantages en sont notamment une vitesse de transmission très élevée, et une atténuation limitée du signal initial fourni par le capteur.

Outre la transmission de l'information, les fibres optiques sont également utilisées comme capteur distribué de température, variation de pression et ou de déformation en utilisant une technique d'interférométrie de la lumière transmise.

Les fibres optiques permettent de nombreuses mesures (thermiques, niveaux, déplacements), avec des applications de plus en plus développées en géosciences.



Composition générale d'une fibre optique (http://www.giacintec.com)

Fissure

Discontinuité locale, d'origine mécanique, qui sépare deux parties rocheuses qui peuvent se déplacer de manière relative. 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.

Fracturation

Terme qui caractérise la densité de discontinuités d'origine naturelle (géologique) qui affectent une roche ou un massif rocheux.

Galerie

Voie de cheminement utilisée dans l'exploitation des carrières. 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 *ciel*.

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.

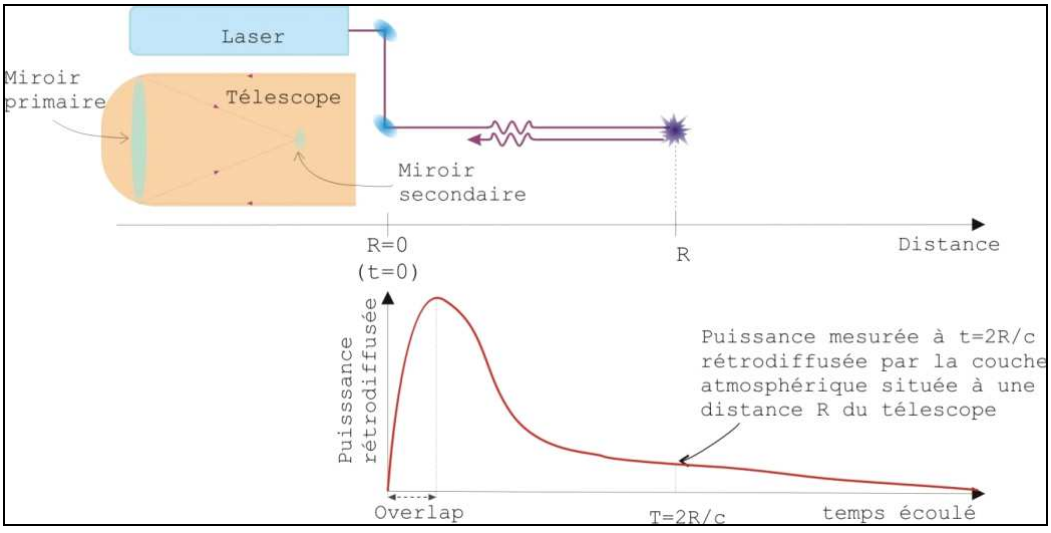


Schéma de principe de la méthode LIDAR.

Mesureur

Se dit d'un équipement qui permet de mesurer une grandeur physique. Il s'oppose en cela à l'indicateur.

Le mesureur permet ainsi le suivi de cette grandeur, facilitant l'analyse de l'évolution potentielle vers la stabilisation ou la rupture.

Mur

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

Ouverture

Dimension d'une cavité (galerie, chambre) mesurée perpendiculairement au mur et au toit.

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 défruitement

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…).

Annexe 2 :
Fiches de dispositifs courants de surveillance

Fiche n°1	Inspection visuelle
Fiche n°2	Inspection assistée - scanner laser 3D
Fiche n°3	Inspection en forages
Fiche n°4	Convergencemètres
Fiche n°5	Extensomètres
Fiche n°6	Fissuromètres
Fiche n°7	Inclinomètres
Fiche n°8	Nivellement de surface
Fiche n°9	Mesures de niveau d'eau
Fiche n°10	Mesures de contraintes
Fiche n°11	Ecoute sismique
Fiche n°12	Mesures acoustiques

FICHE N°1 : INSPECTION VISUELLE

- **MECANISME SURVEILLE**
- Tout mécanisme
- **LIEU D'EMPLOI**
- Vides souterrains accessibles dans de bonnes conditions de sécurité (permettant des visites fréquentes)
- **FAMILLE**
- Indicateurs divers
- **PRINCIPE ET PARAMETRE(S) SUIVI(S)**
- Collection d'indicateurs et de procédures permettant au géotechnicien/géologue d'apprécier l'évolutivité d'un vide souterrain
- Peut être associée au suivi de dispositifs de mesure simples relevés lors de l'inspection
- **DEGRE D'ANTICIPATION DE LA RUPTURE**
- Permet de constater des premiers signes d'évolution (chutes de blocs, apparition de fissures, dégradation de piliers) ou des facteurs pouvant concourir à l'instabilité (présence ou arrivée d'eau)
- **RAYON D'ACTION**
- Hectométrique
- **COLLECTE DES DONNEES**
- In situ. Des tests ou la maintenance de dispositifs de mesure/surveillance plus sophistiqués peuvent être entrepris
- **TRAITEMENT**
- Analyse d'évolution d'indicateurs et transcription en termes d'analyse de la stabilité (faite par un expert)
- **MATURITE/FIABILITE**
- Technique de base de surveillance des cavités souterraines, nécessitant par la suite une analyse d'expert pour appréhender les zones évolutives et distinguer celles dont l'instabilité est présagée. La fiabilité est tributaire des indicateurs d'évolution mis en place et de l'application d'une procédure d'inspection stricte et répétée permettant de limiter la subjectivité de l'opérateur de terrain
- **ELEMENTS DE COUT DE MISE EN OEUVRE**
- 5k€ à quelques dizaines de k€ par intervention en fonction de l'étendue de la zone à investiguer et du coût de la main d'œuvre. Cette valeur est à multiplier par la fréquence retenue des visites

Inspection visuelle (INERIS)

Marquage à la peinture (INERIS)

Témoin en plâtre (INERIS)

- Observation directe, très bonne appréhension de l'état de stabilité des cavités
- Coût limité
- Efficacité de la surveillance si procédure stricte mise en place et fréquence adaptée
- Test ou maintenance de capteurs/mesureurs mis en place possible

- Sécurité du personnel (zones potentiellement instables, passages dangereux)
- Méthode de surveillance ponctuelle (une fréquence de surveillance est donc à définir pour maîtriser l'instabilité potentielle)
- Subjectivité
- Absence de mesure permettant de quantifier le caractère évolutif et l'accélération du phénomène

FICHE N°1 : INSPECTION VISUELLE

L'inspection visuelle consiste en la simple observation des dégradations. Elle est effectuée par un spécialiste géologue et/ou géotechnicien lors de visites périodiques à fréquence mensuelle, semestrielle ou annuelle selon l'évolution du site. S'il réussit à obtenir au préalable une carte géotechnique de la carrière, le géologue/géotechnicien pourra décider d'un itinéraire de visite type. Dans le cas contraire, il sera très recommandé d'établir cette carte à l'issue des premières visites, qui constituera un état de référence. Il faut cependant préciser qu'elle ne témoignera que d'un état ponctuel de la carrière, c'est-à-dire à un instant donné. Il s'agira ensuite de l'actualiser après chaque inspection.

Pour décider des points de surveillance, le spécialiste devra s'aider des singularités constatées lors de l'étude de stabilité (zones à faibles coefficients de sécurité locaux). L'attention du spécialiste devra essentiellement se porter sur les différentes caractéristiques de la carrière et des dégradations observées :

- géométrie de l'exploitation : forme et dimensions ;
- mode d'exploitation ;
- nature et altération de la roche ;
- discontinuités de nature géologique ;
- fractures mécaniques observées au toit ou dans les piliers ;
- effritement des piliers ;
- venues d'eau qui fragilisent fortement la roche ;
- chutes de toit importantes ;
- déformation des parois : parements, sol et ciel ;
- etc…

Lorsque l'œil devient insuffisant, on peut aider l'observation en utilisant dans un premier temps des "Tout Ou Rien" (T.O.R.) ou des indicateurs pour le relevé d'indices d'évolution. Il s'agit de témoins repérés et datés dont on suit l'évolution par des visites de contrôle périodiques : témoins d'argile, de plâtre, de ciment prompt ou de verre posés en travers des fractures majeures, bâches posées au sol, projection de peinture, système de boulon - plaques, dispositif à billes, etc.

On peut également envisager la surveillance par photographies périodiques des zones suspectes. Cette surveillance est très avantageuse si les mêmes positions et angles de prise de vue sont effectués.

L'inspection visuelle est en général le type de surveillance adopté pour les carrières accessibles (par les conditions d'accès et de sécurité) et lorsque l'évolution est jugée faible a priori. Il s'agit d'une très bonne approche qualitative de l'état d'un site et de son évolution lorsqu'une inspection méthodique, de type procédure, est établie. C'est une solution qui nécessite un personnel qualifié et expérimenté. Elle est simple et économique pour le suivi d'un grand espace. Elle est généralement également très utile pour vérifier des alarmes sur capteurs, qui ne reflètent pas toujours la situation complète d'une évolution.

Cependant ce genre d'étude présente une grande part de subjectivité et le facteur humain n'est pas toujours adapté vis à vis de phénomènes d'instabilité évolutifs trop rapides ou non perceptibles par absence de signes précurseurs. Enfin, la périodicité des visites ne convient pas à une évolution brusque des instabilités.

FICHE N°2 : INSPECTION ASSISTEE - SCANNER LASER 3D

➢ **MECANISME SURVEILLE**
- Tout mécanisme

➢ **LIEU D'EMPLOI**
- Vides souterrains (parois de piliers, toits de chambres ou de galeries)
- Fronts rocheux
- Bâtiments en surface (murs, dalles, ...)

➢ **FAMILLE**
- Scanner Laser 3D

➢ **PRINCIPE ET PARAMETRE(S) SUIVI(S)**
- Emission d'un faisceau laser qui mesure la distance entre l'appareil (position fixe) et son point d'impact dans l'espace (ici le massif rocheux ou autres obstacles). Génère ensuite un nuage de points 3D
- Surveillance : comparaison de plusieurs nuages de points réalisés à des dates différentes. Mesure de l'amplitude du déplacement du massif rocheux entre les deux périodes de mesures

➢ **DEGRE D'ANTICIPATION DE LA RUPTURE**
- Correcte (évolution plutôt lente) à médiocre (évolution rapide)

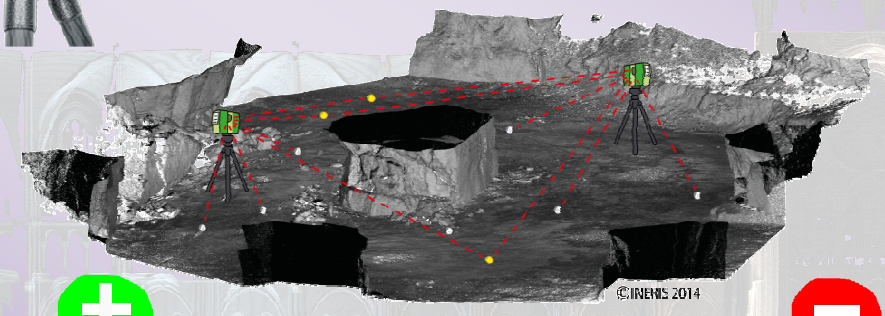
➢ **RAYON D'ACTION**
- Décamétrique à hectométrique

➢ **COLLECTE DES DONNEES**
- In situ (proche ou à distance de la paroi). Appareil nécessitant un à deux opérateurs

➢ **TRAITEMENT**
- Nécessite des ressources informatiques importantes (poids des données, station de travail puissante)
- Nécessite un spécialiste pour manipuler les différents logiciels : de l'acquisition au traitement des données

➢ **MATURITE/FIABILITE**
- Outils utilisés depuis des dizaines d'années dans le domaine de la topographie. Usage de type « surveillance » plus récent avec peu de retours à l'heure actuelle sur la fiabilité de la méthode

➢ **ELEMENTS DE COUT DE MISE EN OEUVRE**
- 5k€ à quelques dizaines de k€ par intervention selon le site et le temps passé sur le traitement des données



- Rapidité et facilité de mise en œuvre
- Méthode ne nécessitant pas de contact direct avec la zone instable
- Comparaison à une image de référence, utile pour les zones peu visualisables par l'homme
- Analyse de grandes surfaces de roches
- Visualisation précise en 3D de la zone instable

- Méthode de surveillance non continue (mesures ponctuelles)
- Accès au souterrain en conditions de sécurité requis
- Précisions des mesures (déplacements centimétriques)
- Technologie récente en souterrain

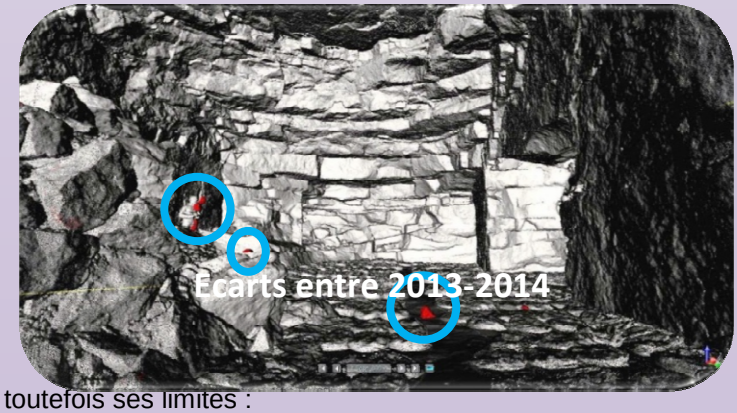
FICHE N°2 : INSPECTION ASSISTEE - SCANNER LASER 3D

Les scanner laser 3D sont des appareils de topographies utilisés dans plusieurs domaines :

- Architecture / TP
- Patrimoine / archéologie ;
- Police scientifique ;
- Ouvrages d'arts ;
- Industries ;
- Mines & Carrières.

Les scanner laser 3D sont des appareils principalement tournés vers la cartographie en trois dimensions de l'espace. Une fois l'environnement numérisé, il est possible d'effectuer des traitements numériques variés et plus ou moins complexes (volumes, élévation, coupes, maillages 3D, modélisation 3D, etc.).

Une des applications possibles des scanner laser 3D est la surveillance de mouvements de terrains. Pour cela, une comparaison temporelle entres plusieurs nuages de points est effectuée. Cela consiste à analyser les écarts (distance) entre deux nuages de points similaires réalisés à deux périodes différentes. Il est ainsi possible d'afficher la position et la valeur de l'amplitude du déplacement entre ces deux périodes.



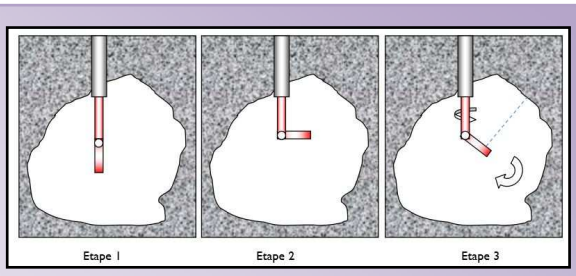
Cette technique a toutefois ses limites :

- Présence d'obstacles autres que le massif rocheux gênante pour la comparaison des nuages de points ;
- Nécessité de positionner des repères pour obtenir une meilleure précision ;
- Traitement des données pouvant être lourd selon le site numérisé.

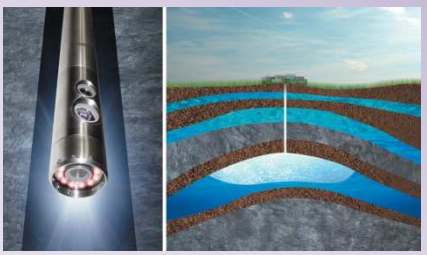
FICHE N°3 : INSPECTION EN FORAGE

- **MECANISME SURVEILLE**
- Tout mécanisme
- **LIEU D'EMPLOI**
- Vides souterrains non accessibles (parois de piliers, toits de chambres ou galeries)
- Puits ou parois de forages
- **FAMILLE**
- Caméra
- **PRINCIPE ET PARAMETRE(S) SUIVI(S)**
- Enregistrement de vidéos et photos
- Surveillance-Mesure : utilisation d'un lasermètre ou couplage possible de la caméra avec un lasermètre pour réaliser des mesures de distance et d'orientation. Surveillance visuelle par la vidéo possible et génération possible de nuage de points (grâce aux mesures laser)
- **DEGRE D'ANTICIPATION DE LA RUPTURE**
- Difficulté d'anticiper une rupture (évolution lente ou rapide). Les signes précurseurs de dégradation peuvent être détectés
- **RAYON D'ACTION**
- Décimétrique à décamétrique
- **COLLECTE DES DONNEES**
- In situ. Appareil nécessitant un à deux opérateurs
- **TRAITEMENT**
- Nécessite un spécialiste pour manipuler les différents logiciels : de l'acquisition au traitement des données
- Visualisation simple : nécessite peu de ressources informatiques
- Traitement de vidéo haute définition : nécessite des ressources informatiques importantes (poids des données, station de travail puissante, montage vidéo)
- **MATURITE/FIABILITE**
- Outils utilisés depuis des dizaines d'années dans un premier temps dans le domaine des canalisations et petits puits. Usage de type « inspection et surveillance en souterrain » plus récent avec mesures et vidéos réalisées en forages pour un objectif d'inspection géotechnique. Outils de mesure fragiles, nécessitant beaucoup de maintenance
- **ELEMENTS DE COUT DE MISE EN OEUVRE**
- Qq k€ à plusieurs dizaines de k€ (hors travaux de sondage) selon le site et le temps passé sur le traitement des données

Camera laser vidéo (INERIS)



« Dimensionnement de cavité par sonde laser » (FONDASOL)



Caméra vidéo laser (E.C.A. HYTEC)

- Facilité de mise en œuvre, coût réduit si caméra/laser en forage peu profond
- Méthode ne nécessitant pas la présence directe de l'opérateur en zone souterraine instable
- Inspection de cavités non accessibles
- Visualisation directe de la cavité (vidéo, photo). Position possible des dégradations par rapport à la surface
- Mesure les dimensions de la cavité, réalisation de coupes sériées

- Besoin de travaux en amont (forages équipés) pour inspecter les cavités souterraines non accessibles
- Méthode de surveillance ponctuelle (une fréquence de surveillance est donc à définir pour maîtriser l'instabilité potentielle)
- Anticipation de la rupture difficile
- Mesure laser impossible sous l'eau (emploi du sonar dans ce cas)

FICHE N°3 : INSPECTION EN FORAGE

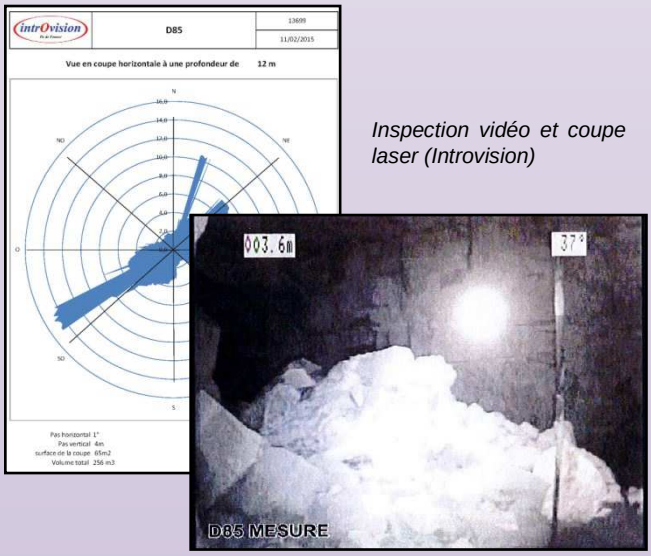
La caméra vidéo laser est un appareil de visualisation et de mesure utilisé dans plusieurs domaines :

- Mines et carrières ;
- Réseaux (eaux usées, canalisations …) ;
- Milieu industriel (inspection de puits et forages d'exploitation).

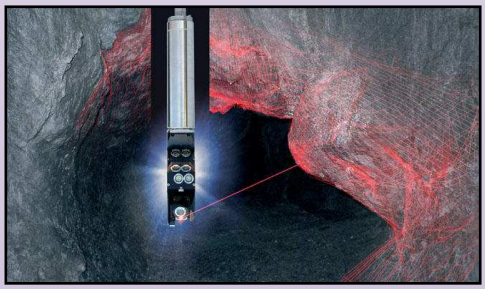
Les caméras vidéo laser sont des appareils principalement tournés vers la visualisation et la mesure d'espaces non accessibles. Une fois les travaux de forages réalisés et équipés pour permettre l'accès de la caméra, il est possible de visualiser et de mesurer la cavité inspectée. Une fois l'environnement numérisé, il est possible d'effectuer des traitements numériques variés et plus ou moins complexes (volumes, coupes, vidéos, photos, etc.).

Une des applications possibles des caméras laser vidéo est l'inspection visuelle de cavités souterraines non accessibles ou l'inspection de parois de puits et forages industriels. Pour cela, une comparaison temporelle entre plusieurs images peut être effectuée. Le traitement des coupes sériées permet d'obtenir une estimation des dimensions de la cavité rencontrée (volume, emprise, orientation). Dans le cas de cavités souterraines ennoyées, l'inspection vidéo ou photo demeure possible.

Inspection vidéo (INERIS)



Inspection vidéo et coupe laser (Introvision)



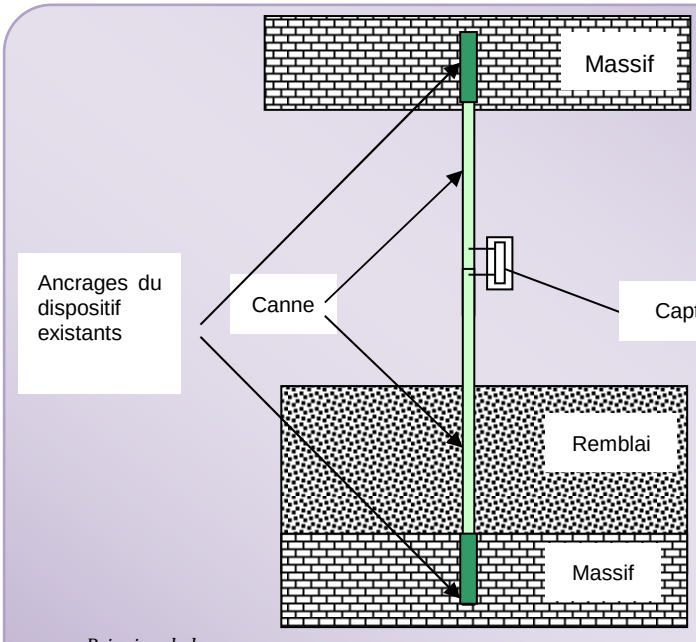
Inspection vidéo (E.C.A. HYTEC)

Cette technique a toutefois ses limites :

- le forage doit répondre à plusieurs critères : verticalité, diamètre suffisant, peu déformé, localisation du débouché en souterrain de manière à limiter les masques ;
- la caméra et le laser ne peuvent voir au-delà du massif rocheux ;
- fragilité du matériel ;
- surveillance d'une évolution et anticipation sur la rupture (pilier, chute de toit …) difficile ;
- traitement des données pouvant être lourd selon le rendu demandé.

FICHE N°4 : CONVERGENCEMETRES

- **MECANISME SURVEILLE**
- Affaissement, effondrement généralisé
- **LIEU D'EMPLOI**
- Vides souterrains (milieu d'une galerie, proximité d'un pilier)
- **FAMILLE**
- Distancemètres
- **PRINCIPE ET PARAMETRE(S) SUIVI(S)**
- Mesure de l'évolution du déplacement relatif entre le toit et le mur d'une cavité souterraine, soit au milieu d'une chambre ou d'une galerie (comportement du toit) soit à proximité d'un pilier (comportement de celui-ci). Les déplacements à suivre sont d'ordre inframillimétrique à pluricentimétrique. L'accélération de ce déplacement est à suivre (anticipation d'une rupture du toit, de son premier banc rocheux constitutif, anticipation d'une dégradation ou d'une ruine de pilier, ...)
- **DEGRE D'ANTICIPATION DE LA RUPTURE**
- Bon (évolution plutôt lente) à médiocre (évolution rapide)
- **RAYON D'ACTION**
- Limité à étendu (quelques mètres à dizaines de mètres) selon la cible recherchée
- **COLLECTE**
- In situ si conditions de sécurité acceptables (risques de chutes de toit). Centrale d'acquisition déportée. Télésurveillance possible
- **TRAITEMENT**
- Relativement aisé. Nécessite un spécialiste pour distinguer un mouvement pertinent de problèmes purement instrumentaux
- **MATURITE/FIABILITE**
- Techniques essentiellement souterraines, relativement peu étendues dans le commerce. Fiabilité à moyen/long terme dépendante de l'agressivité du milieu souterrain (eau/humidité/ roches agressives de type sel, ...) et de la qualité de maintenance du dispositif
- **ELEMENTS DE COUT DE MISE EN OEUVRE**
- k€ à 10aine k€ par intervention



Principe de la mesure de la convergence toit-mur

Convergencemètres autour d'un pilier très dégradé (INERIS)

Convergencemètre ancré dans le massif après décaissement du remblai (INERIS)

- Suivi de l'évolution avantageux pour surveiller un quartier souterrain dont l'instabilité peut conduire à la ruine de l'édifice (chute de toit(s), ruine de pilier(s))
- Faible coût, permettant un déploiement voire une redondance
- Données simples, analyse relativement aisée.

- Dérives instrumentales en contexte agressif
- Accès au souterrain en conditions de sécurité requis
- Cinétiques plutôt lentes à rechercher, sinon comportement en « tout ou rien »
- Développement commercial marginal du fait de l'emploi limité aux carrières souterraines

FICHE N°4 : CONVERGENCEMETRES

Ce type d'équipement sert principalement à mesurer en carrière le rapprochement des « épontes » (ciel et sol), plus rarement le rapprochement horizontal entre les parements opposés d'une galerie.

Le matériel classique correspond à une canne de mesure dotée d'une tige coulissante dans un fût en acier inoxydable ou en Invar. Les liaisons entre tige et ancrages sont réalisées par des joints de cardan de haute précision. Les deux points d'ancrage sont supposés en mouvement. La chaîne de mesure est constituée par le capteur de déplacement, la canne servant de support et une ou plusieurs rallonges destinées à centrer l'appareil dans sa plage de mesure. La précision est de l'ordre du dixième de millimètre. L'utilisation de l'Invar comme matériau permet de diminuer, de façon très sensible, le coefficient de dilatation thermique des tiges et donc d'augmenter la précision.

Les cannes peuvent avoir des hauteurs de 1 à 4 mètres pour une course de 0,40 à 1,20 m (coulissement de la canne).

Le dispositif de mesure est soit un comparateur à lecture directe (course 25 mm), soit un capteur résistif. La précision effective du système est comprise entre 0,1 et 0,01 mm, compte tenu de l'appareil de mesure et de la dilatation des tiges.

Ce procédé de mesure nécessite des scellements pour la mise en œuvre des ancrages ou des plots de mesure (canne purement mécanique).

En atmosphère humide, il est commun d'utiliser du « gel de silicate » qui se présente sous la forme de sels dont la propriété est d'absorber l'humidité du milieu. Les sels sont placés dans une poche en plastique qui entoure les capteurs électriques. Initialement bleus, les sels empruntent une teinte violette lorsque la quantité d'eau absorbable est atteinte (Il faut alors les remplacer).

Exemples de convergencemètres :

- Canne de convergence traditionnelle (mécanique ou électrique) ;
- Convergencemètre à fil Invar tendu ;
- Dispositif à ressort.

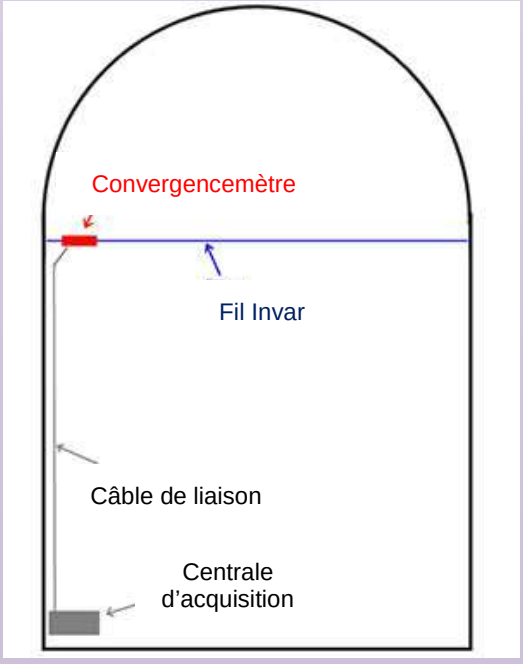
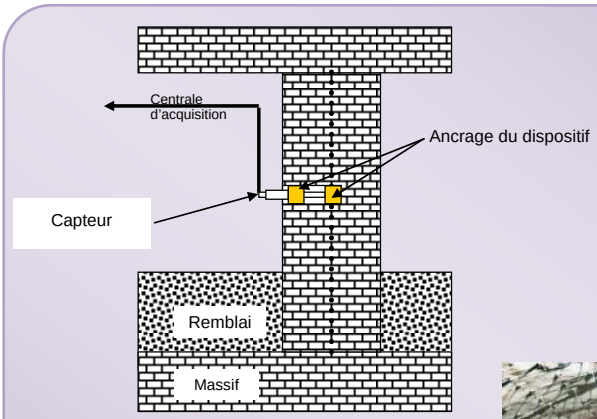


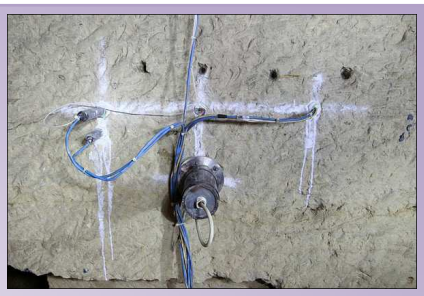
Schéma de mesure de rapprochement des parois d'une galerie par fil invar (http://www.groupe-cebtp.com)

FICHE N°5 : EXTENSOMETRES

- **MECANISME SURVEILLE**
- Fontis (dispositif au toit), affaissement ou effondrement généralisé (dispositif en pilier)
- **LIEU D'EMPLOI**
- Vides souterrains (cœur et parois de piliers, toits de chambres ou de galeries)
- Terrains de recouvrement (en forages)
- **FAMILLE**
- Distancemètres
- **PRINCIPE ET PARAMETRE(S) SUIVI(S)**
- Mesure de l'évolution du déplacement par extension du massif rocheux. L'accélération de ce déplacement est à suivre (anticipation d'une rupture de pilier, de toit ou de recouvrement)
- **DEGRE D'ANTICIPATION DE LA RUPTURE**
- Bon d'une manière générale
- **RAYON D'ACTION**
- Limité (quelques mètres), dépendant de l'homogénéité des vides souterrains
- **COLLECTE**
- In situ (associée à une inspection visuelle). Centrale d'acquisition déportée. Télésurveillance possible
- **TRAITEMENT**
- Relativement aisé. Nécessite un spécialiste pour distinguer un mouvement pertinent de problèmes purement instrumentaux
- **MATURITE/FIABILITE**
- Nombreuses techniques matures disponibles dans le commerce. Fiabilité à moyen/long terme dépendante de l'agressivité du milieu souterrain (eau/humidité/ roches agressives de type sel, ...) et de la qualité de maintenance du dispositif
- **ELEMENTS DE COUT DE MISE EN OEUVRE**
- k€ à plusieurs 10aines de k€ par intervention, tributaire des travaux de foration



Principe de mesure d'extension d'un pilier (INERIS)

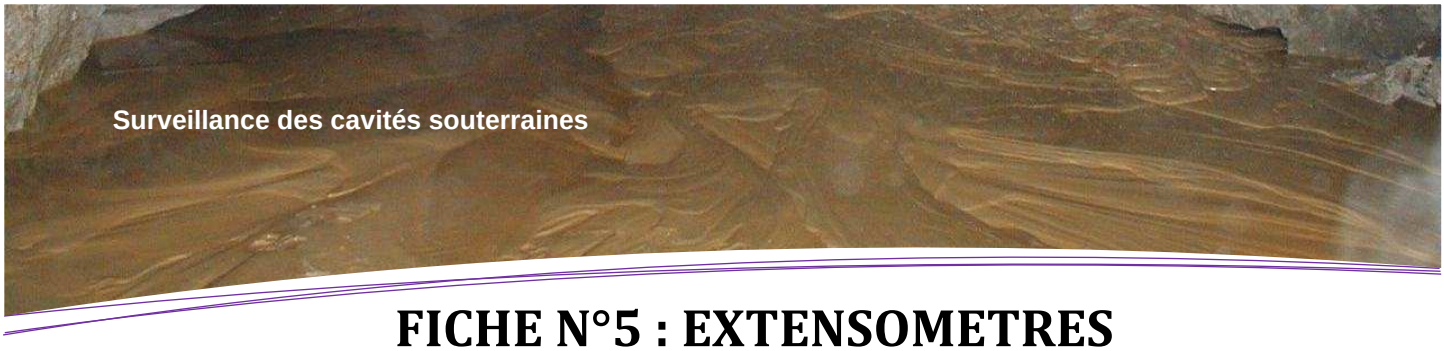


Tête d'extensomètre en paroi
(Crédit photo Vincent Duseigne)

Extensomètres en forage (SOLEXPERTS)

- Techniques éprouvées, technologies diverses pouvant être adaptées au contexte à surveiller
- Suivi d'un mouvement au sein d'une entité rocheuse (pilier par exemple)
- Coût faible si travaux de foration limités
- Données simples, analyse relativement aisée

- Dérives instrumentales en contexte agressif
- Accès au souterrain en conditions de sécurité requis
- Travaux de forage nécessaires, conditions de sécurité requises
- Coût élevé d'installation si longueurs de foration importantes



FICHE N°5 : EXTENSOMETRES

Les extensomètres désignent des dispositifs permettant de mesurer la variation de distance entre deux points d'ancrage fixés dans un massif rocheux, ou entre un point d'ancrage et une paroi à l'air libre.

Dans le cas des cavités souterraines, ils sont le plus souvent fixés :

- soit verticalement, au toit de la cavité, pour mesurer la déformation du toit et le déplacement entre les différents bancs du toit ;
- soit horizontalement, dans un pilier, pour mesurer la déformation horizontale au sein de celui-ci.

Une autre technique consiste à mettre en place ces extensomètres au sein d'un forage, avec le principe similaire de mesurer la variation de distance entre deux points du forage ancrés dans le massif rocheux. Ce dispositif permet de connaître par exemple les mouvements dans les terrains de recouvrement au-dessus d'une cavité souterraine.

Selon la nature du problème, on dispose d'extensomètres dotés des différents capteurs de mesure : potentiométriques en majorité, inductifs ou à corde vibrante. En pratique, l'extensomètre permet la mesure de l'ouverture de fissures dans des plages de variation réduites.

Dans la plupart des cas, lorsque l'on peut accéder aux vides souterrains, le capteur est fixé d'une part sur un ancrage ponctuel au fond d'un trou de forage, d'autre part sur une plaque de base, solidaire du toit ou de la paroi à surveiller, donc en mouvement a priori. La tige, supposée fixe d'un côté et mobile de l'autre, coulisse à l'intérieur du capteur. Le déplacement relatif est enregistré. En général, la précision effective est de l'ordre 0,1 mm et l'étendue de mesure se situe entre 25 mm et 450 mm.

L'emploi de l'extensomètre est adapté aux conditions de fonctionnement difficiles, et la mesure peut être automatisée dans le cadre de la télésurveillance. Cependant, il nécessite des forations, des scellements et une alimentation électrique. De plus, il doit être souvent recalibré.

En carrière où la précision recherchée est de l'ordre de quelques dizaines de microns, on choisira le capteur potentiométrique.

Exemples de variétés d'extensomètres :

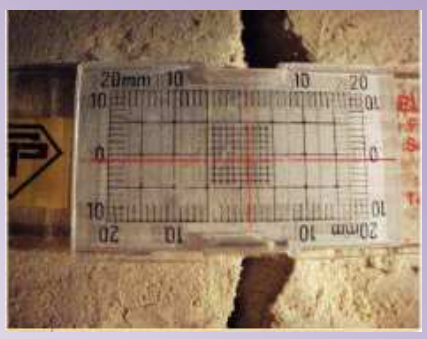
- Extensomètre mécanique à tiges, simple ou multiple ;
- Extensomètre continu en forage ;
- Extensomètre multipoints en forage.

FICHE N°6 : FISSUROMETRES

- **MECANISME SURVEILLE**
- Tout mécanisme
- **LIEU D'EMPLOI**
- Vides souterrains (parois de piliers, toits de chambres ou de galeries)
- Bâtiments en surface (murs, dalles, ...)
- **FAMILLE**
- Distancemètres
- **PRINCIPE ET PARAMETRE(S) SUIVI(S)**
- Mesure de l'évolution du déplacement du massif rocheux de part et d'autre d'une discontinuité de type fissure ou fracture (inframillimétrique à centimétrique). L'accélération de ce déplacement est à suivre (anticipation d'une rupture, aggravation de désordres, ...)
- **DEGRE D'ANTICIPATION DE LA RUPTURE**
- Bon (évolution plutôt lente) à médiocre (évolution rapide)
- **RAYON D'ACTION**
- Limité (quelques mètres), dépendant de l'homogénéité des vides souterrains
- **COLLECTE**
- In situ (associée à une inspection visuelle). Centrale d'acquisition déportée. Télésurveillance possible
- **TRAITEMENT**
- Relativement aisé. Nécessite un spécialiste pour distinguer un mouvement pertinent de problèmes purement instrumentaux
- **MATURITE/FIABILITE**
- Nombreuses techniques matures disponibles dans le commerce. Fiabilité à moyen/long terme dépendante de l'agressivité du milieu souterrain (eau/humidité/ roches agressives de type sel, ...) et de la qualité de maintenance du dispositif
- **ELEMENTS DE COUT DE MISE EN OEUVRE**
- k€ à 10aine k€ par intervention

Fissuromètre de type potentiomètre
Installé au toit d'une cavité (INERIS)

Fissuromètre installé
au parement d'une cavité (INERIS)



Fissuromètre à lecture directe
(http://cavites37.com)

Fissuromètre de type vinchon
(trois directions de l'espace,
cliché IRSTEA – G2DR)

- Techniques éprouvées, technologies diverses pouvant être adaptées au contexte à surveiller
- Faible coût, permettant un déploiement voire une redondance
- Données simples, analyse relativement aisée

- Non auto-suffisant, nécessite souvent d'être associé à un suivi visuel ou d'autres capteurs
- Dérives instrumentales en contexte agressif
- Accès au souterrain en conditions de sécurité requis
- Cinétiques plutôt lentes à rechercher, sinon comportement en « tout ou rien »

FICHE N°6 : FISSUROMETRES

Les fissuromètres surveillent le déplacement relatif (généralement dans une direction, parfois dans trois directions) de deux parties d'un ancrage, séparées par une discontinuité (fissure) dont on souhaite connaître l'évolution de l'ouverture.

Dans le cas d'un mouvement tridirectionnel, les paramètres à mesurer sont :

- le déplacement dans le sens de l'ouverture ou de la fermeture de la fissure ;
- le mouvement de cisaillement parallèlement à la fissure ;
- le mouvement de cisaillement dans le plan normal à la fissure.

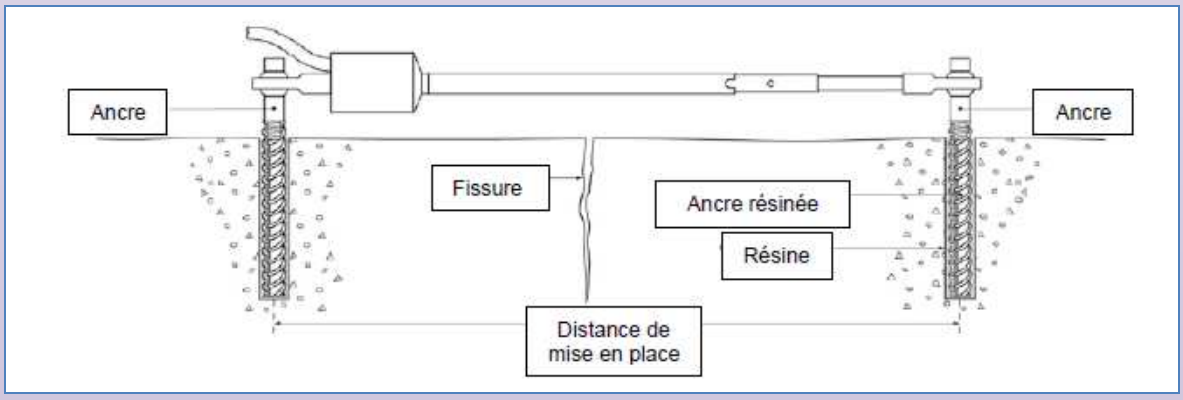
Les systèmes de mesure rencontrés, outre les appareils à lecture directe, sont les systèmes résistifs et inductifs. En carrière, on utilise le plus souvent les capteurs potentiométriques unidirectionnels.

La gamme de mesure s'étend généralement entre 50 mm et plus de 250 mm. La précision de mesure est de l'ordre du centième de millimètre pour les appareils les plus performants.

La lecture de la mesure peut s'effectuer assez simplement à l'aide d'un pied à coulisse lors des visites périodiques de surveillance. Il convient dans ce cas d'avoir accès à l'appareil pour pouvoir effectuer les mesures. De plus, son installation nécessite quelques forations et scellements.

La lecture peut également être opérée en reliant le capteur à un data logger ou un système d'acquisition des données.

Du fait de son relatif faible coût, il est avantageux d'équiper plusieurs fissures de directions différentes lorsqu'un quartier ou un secteur de carrière est jugé potentiellement instable.



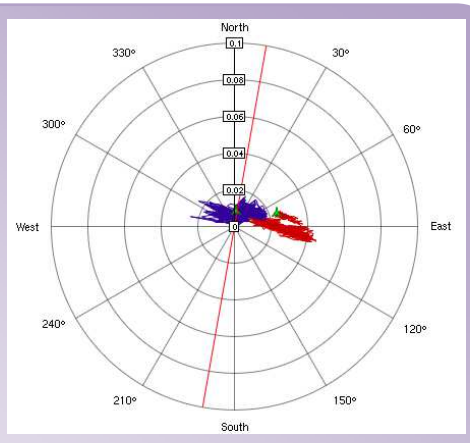
Exemple d'installation d'un fissuromètre

FICHE N°7 : INCLINOMETRES

- **MECANISME SURVEILLE**
- Mécanismes généralisés (affaissement, effondrement) essentiellement
- **LIEU D'EMPLOI**
- Forage (terrains au-dessus des cavités souterraines, à différentes profondeurs)
- Bâtiments en surface (parois, murs, dalles, ...)
- **FAMILLE**
- Tiltmètres
- **PRINCIPE ET PARAMETRE(S) SUIVI(S)**
- Mesure d'inclinaison des terrains de couverture à l'aplomb des cavités souterraines, sous l'effet de la déformation/rupture des piliers et/ou du toit des cavités. L'accélération de ce basculement est à suivre (anticipation d'une rupture généralisée, aggravation de désordres, ...)
- **DEGRE D'ANTICIPATION DE LA RUPTURE**
- Bon (évolution plutôt lente) à médiocre (évolution rapide)
- **RAYON D'ACTION**
- Étendu (quelques mètres à plusieurs centaines de mètres), dépendant de l'homogénéité des vides souterrains
- **COLLECTE**
- In situ (pose en paroi de bâtiment, notamment). Centrale d'acquisition déportée. Télésurveillance
- **TRAITEMENT**
- Relativement aisé. Nécessite un spécialiste pour distinguer un mouvement pertinent d'un mouvement apparent (effet thermique/humidité sur le support d'ancrage, par exemple)
- **MATURITE/FIABILITE**
- Technique précise et mature, disponible dans le commerce. Fiabilité à moyen/long terme dépendante de l'agressivité du milieu eau/humidité /gel/chaleur, ... pour les applications à l'extérieur, notamment) et de la qualité de maintenance du dispositif
- **ELEMENTS DE COUT DE MISE EN OEUVRE**
- k€ à 10aine k€ par intervention (hors forage)

Inclinomètre biaxe sur ouvrage en zone d'affaissement (INERIS)

Sonde inclinométrique en forage (inclinesensor.com)



Représentation de l'inclinaison mesurée par rapport à l'axe d'un pont (INERIS)

Inclinomètre mécanique (relevé visuel, newmediaclservices.fr)

- Technique éprouvée, très sensible et intégratrice (non ponctuelle). Technologies diverses à déclinaisons mono ou bi-axiales, en paroi ou en forage, pouvant être adaptées au contexte à surveiller
- Coût raisonnable, augmentant avec la précision, permettant un déploiement multi-stations, voire une redondance
- Données simples, analyse relativement aisée

- Nécessite souvent une association avec un suivi visuel ou d'autres capteurs, notamment si les mécanismes d'instabilité sont multiples
- Dérives instrumentales possibles à long terme ou en milieu agressif
- Cinétique plutôt lente à rechercher, ou en phase initiale (lente) de phénomène rapide
- Peu (non) applicable en souterrain

FICHE N°7 : INCLINOMETRES

Les inclinomètres surveillent l'inclinaison des terrains de couverture ou des structures (bâtiments, ouvrages d'art, …) à l'aplomb des cavités souterraines instables. Cette inclinaison est le résultat direct de la déformation/rupture des piliers et/ou du toit des cavités qui se traduisent par une perte de portance et une déformation par flexion des terrains en appui sur l'ouvrage souterrain (affaissement). La technique est très sensible et peut déceler des mouvements faibles aux stades précoces du phénomène, notamment pour les applications en forage. L'accélération du basculement peut alors être le signe d'une rupture généralisée en souterrain dont les effets sont susceptibles d'atteindre plus ou moins rapidement les enjeux de surface. Les applications en surface permettent de détecter les effets lorsque le phénomène est arrivé en surface. Elles restent malgré tout très utiles, notamment pour les structures sensibles/peu tolérantes au basculement (bâtiments longs ou élancés, tabliers de ponts, …), car l'expérience montre que les premiers dommages (fissures, effritements, écaillage de peinture/crépi, déformation d'enrobé …) passent souvent inaperçus en début de phénomène.

Afin de reconstituer le mouvement et remonter à son origine, la mesure est souvent réalisée selon deux plans verticaux perpendiculaires, simultanément.

En application sur paroi, l'inclinaison est mesurée sur :

- le plan parallèle à la paroi-support ;
- le plan normal à la paroi.

En forage, les deux plans de mesure sont repérés sur l'instrument. Leur orientation est mesurée par un système approprié lors de la pose. Une application fréquente consiste à ancrer plusieurs inclinomètres à différentes profondeurs en forage (« tube inclinométrique ») afin d'identifier l'origine et suivre la progression du mouvement dans les terrains de recouvrement.

L'ancrage sur paroi ou le scellement en forage sont des opérations auxquelles il convient d'attacher quelques précautions afin de garantir une bonne qualité de mesure. Le tube de guidage doit être adapté aux terrains traversés en raison des problèmes de corrosion. La norme NF-P-94-156 d'octobre 1995 fixe les exigences techniques relatives aux inclinomètres.

La gamme de mesure s'étend généralement de ±5 à ±10 degrés. La précision effective est de l'ordre de 0,005 à 0,05 degrés (précision intrinsèque comprise entre 0,001 et 0,01 degrés).

Le dispositif de mesure est à lecture directe, par visée optique, ou électrique.

Exemples d'inclinomètres :

- Inclinomètre à pendule ;
- Inclinomètre à accéléromètre haute performance.

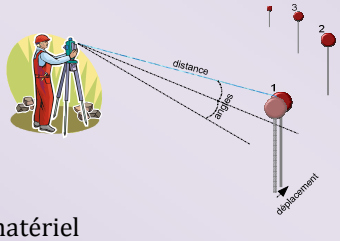
FICHE N° 8 : NIVELLEMENT DE SURFACE

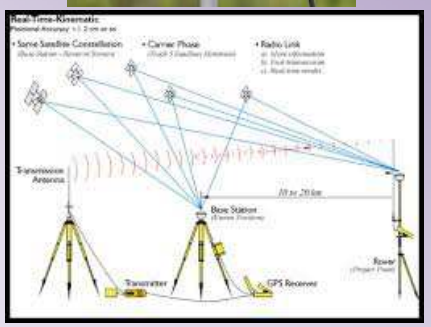
tachéomètre, GPS RTK, interférométrie Radar, LIDAR

- **MECANISME SURVEILLE**
- Mouvements généralisés d'affaissement ou d'effondrement
- **LIEU D'EMPLOI**
- En surface, à l'aplomb des vides souterrains
- **FAMILLE**
- Altimétrie, géodésie
- **PRINCIPE ET PARAMETRE(S) SUIVI(S)**
- Le principe repose sur la détermination de la variation en altitude et en coordonnées (locales ou rattachées à un réseau) d'un point entre deux mesures
- La surveillance par cette méthode repose sur la capacité du dispositif à détecter en temps réel une variation significative sur une série de points choisis dans la zone d'intérêt
- **DEGRE D'ANTICIPATION DE LA RUPTURE**
- Faible (évolution rapide notamment). Hormis les systèmes très sensibles, capables de détecter les déformations élastiques faibles avant la rupture, ces techniques mesurent généralement les effets de la rupture quand ils atteignent la surface
- **RAYON D'ACTION**
- Décamétrique à kilométrique
- **COLLECTE DES DONNEES**
- Automatisée, déportée ou plus généralement télétransmise
- **TRAITEMENT**
- Nécessite un spécialiste pour manipuler les différents logiciels : de l'acquisition au traitement des données
- Selon la technique, le traitement demandera des ressources informatiques variables : plutôt modestes pour le GPS et la tachéométrie, relativement importantes pour les techniques d'interférométrie radar terrestre ou satellitaire
- **MATURITE/FIABILITE**
- Tachéométrie mature depuis de nombreuses années en géomatique ou surveillance d'ouvrages d'art notamment. Le GPS RTK, l'interférométre radar ou le LIDAR sont des techniques de pointe aujourd'hui matures dans le domaine de la surveillance
- **ELEMENTS DE COUT DE MISE EN OEUVRE**
- Quelques dizaines de k€ à 100 k€ selon la taille du site (surface à couvrir, volume de données, temps de traitement)

Station automatisée radar terrestre IBIS FL, source IDS

Théodolite et Tachéomètre robotisés, source Leica





GPS RTK, source www.e-education.psu.edu

- Mise en œuvre relativement aisée, matériel disponible en location
- Méthodes applicables depuis la surface, n'exposant pas l'opérateur aux risques d'instabilité souterraine.
- Bien adapté aux cavités instables non accessibles
- Techniques utilisables en temps réel avec alarme ou en inspection périodique
- Suivi automatisé des données accessible aux non spécialistes

- Point de visée (théodolite, tachéomètre, radar, LIDAR) ou horizon dégagé (GPS) nécessaire
- Certaines techniques sensibles aux conditions météo et environnementales
- Méthode de surveillance plus adaptée aux mouvements lents
- Anticipation de la rupture difficile

FICHE N° 8 : NIVELLEMENT DE SURFACE

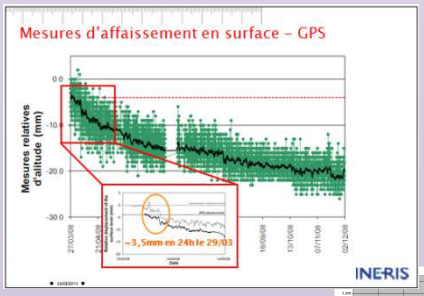
tachéomètre, GPS RTK, interférométrie Radar, LIDAR

Les techniques de nivellement de surface par géomètre sont précises. Y faire appel lors des inspections périodiques pour évaluer, après coup, l'occurrence et l'amplitude de mouvements de terrain peut s'avérer utile. La surveillance, qui s'appuie souvent sur la dimension « temps réel », fait appel à des techniques à temps de réponse court et/ou applicables en continu. Les procédés présentés ici ont cette aptitude et permettent par ailleurs de couvrir de grandes surfaces. Ils procèdent soit par adaptation et automatisation des techniques classiques (cas du tachéomètre et du théodolite robotisés), soit par des approches innovantes fondées sur les technologies satellites (GPS RTK), ou encore l'exploitation d'ondes électromagnétiques radar (interférométrie radar terrestre) ou laser (LIDAR). Ces techniques sont aujourd'hui matures et disponibles sur le marché. Elles se déclinent sous des formes variées, adaptées aux différents domaines d'application :

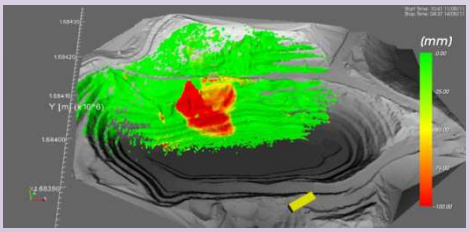
- Mines et carrières : conduite d'exploitation, surveillance de mouvements de terrain ;
- Conduite de chantiers de génie civil, infrastructures routières, ouvrages d'art, barrages, … ;
- Conduite d'exploitations agricoles ;
- Géomatique, cartographie, systèmes d'information géographique.

En matière de surveillance des cavités souterraines instables, ces techniques ne permettent pas de détecter les signes précurseurs de la rupture. Elles sont néanmoins suffisamment sensibles et précises pour détecter les déformations faibles et précoces de surface (mouvements d'ordre millimétrique à centimétrique), lorsqu'elles sont appliquées en continu.

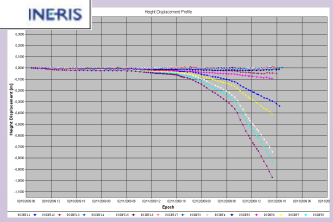
Selon le cas, elles peuvent nécessiter la pose ou le repérage préalable de cibles de visée (théodolite), de balises (GPS) ou de réflecteurs (interférométrie radar) pour suivre le mouvement de terrain. Le rendu se présente sous forme de courbes ou séries temporelles de déplacement vertical et/ou planimétrique pour les méthodes ponctuelles. On peut obtenir également des cartographies 2D ou 3D de la zone d'intérêt avec repérage des mouvements par une échelle de couleur.



Suivi d'un effondrement par GPS RTK et par théodolite motorisé, source : INERIS



Cartographie de mouvement par Station radar IBIS FL, source : IDS



Imagerie LIDAR, source : Altigator.com

Ces techniques ont toutefois leurs limites :

- La visée doit être directe : aucun obstacle (bâtiment, versant, couvert végétal, …) ne doit s'interposer entre le dispositif d'acquisition des mesures et sa cible (point ou zone). Pour les systèmes optiques ou à base de laser (LIDAR, Théodolite), les brumes et brouillard peuvent engendrer des incohérences.
- S'agissant de déformations mesurées en surface, une grande réactivité aux alarmes est nécessaire.
- le traitement des données peut être lourd selon la finesse de détection souhaitée (et le rendu demandé).

FICHE N°9 : MESURES DE NIVEAU D'EAU

- **MECANISME SURVEILLE**
- Tout mécanisme.
- **LIEU D'EMPLOI**
- Ouvrages/environnements exposés à des variations de niveaux d'eaux
- **FAMILLE**
- Mesures géotechniques
- **PRINCIPE ET PARAMETRE(S) SUIVI(S)**
- Mesure de l'évolution des niveaux d'eaux par mesure directe (réglette), de pression (statique ou interstitielle) ou au moyen de flotteurs. Les capteurs sont souvent installés dans des forages. L'évolution de niveaux d'eau est généralement liée à d'autres phénomènes de dégradation, surtout si la cavité est constituée de matériaux sensibles à l'eau, comme le sel ou la craie
- **DEGRE D'ANTICIPATION DE LA RUPTURE**
- Adapté à tout type de cinétique
- **RAYON D'ACTION**
- Dépend de la géologie de l'horizon mesuré
- **COLLECTE**
- In situ (associée à une inspection visuelle). Centrale d'acquisition déportée. Télésurveillance possible
- **TRAITEMENT**
- Le traitement de la donnée est relativement aisé. L'interprétation des conséquences mécaniques sur les ouvrages ne sont pas directes et doivent être traitées par des spécialistes
- **MATURITE/FIABILITE**
- Nombreuses techniques matures disponibles dans le commerce. Fiabilité à moyen/long terme dépendante de la qualité de maintenance du dispositif
- **UNITE DE GRANDEUR DE COÛT DE MISE EN OEUVRE**
- k€ à 10aine k€ par intervention sans compter les éventuels coûts de forages additionnels

Capteur de pression d'eau en forage (sonde du haut) (INERIS)

Flotteur en forage pour la détection de présence d'eau (INERIS)

Mesure d'eau par réglette en souterrain (source : Dreamstime)

Piézomètre : (source : Aqualyse.fr)

- Techniques éprouvées, technologies diverses pouvant être adaptées au contexte à surveiller
- Faible coût, permettant un déploiement voire une redondance
- Données simples

- Peut nécessiter la réalisation de forages couteux
- Parfois non auto-suffisant

FICHE N°9 : MESURES DE NIVEAU D'EAU

Les capteurs de niveau d'eau sont généralement employés dans les carrières en activité notamment pour étudier les variations de la pression interstitielle et du niveau de la nappe phréatique. Ils sont également facilement mis en place dans le cadre d'ouvrages abandonnés en zone à enjeux, surtout si le massif dans lequel se situe la cavité est sensible à la présence d'eau. Ainsi, la surveillance de carrières de craies ou de mines de sel abandonnées requiert souvent la mise en place de ce type de capteur.

La mesure peut être :

- directe si l'accès de la cavité est possible, au moyen par exemple d'une réglette graduée ;

- par piézomètre. Ces dispositifs sont généralement utilisés pour la mesure des pressions de la nappe phréatique. Certains piézomètres permettent les mesures de pressions en continu le long d'un forage. Les principaux éléments constituant un piézomètre pneumatique sont : un tube d'injection d'air, un tube d'éjection, une fine membrane souple et un système d'alimentation en air (un autre fluide peut aussi être utilisé).

  La mise en place d'un piézomètre est normée (NF P 94-157 -1 et NF EN ISO 22475-1) ;

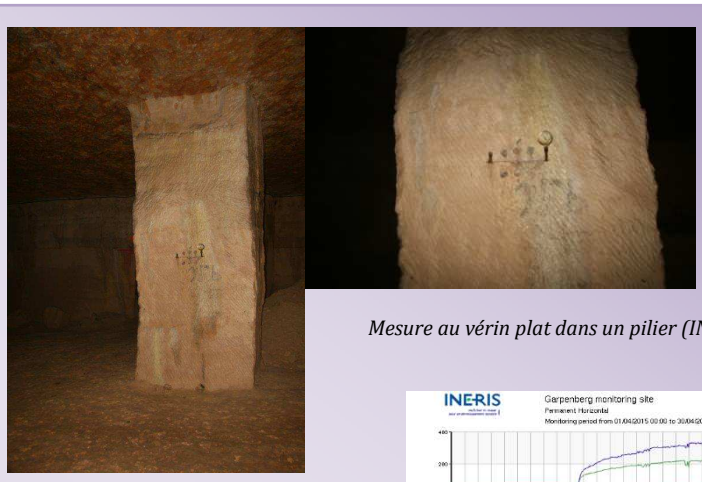
- par l'utilisation de capteurs de pression interstitielle, qui réalisent la mesure des pressions absolues d'eau et des pressions interstitielles dans les sols et dans les roches sans perturber l'écoulement naturel ;

- par d'autres capteurs : il existe par exemple des tubes équipés de flotteurs, permettant de lire une hauteur d'eau. Ils peuvent également servir pour la détection d'intrusion d'eau (capteur « tout ou rien ») comme par exemple dans le cas de la stabilité de mines de sel abandonnés.

FICHE N° 10 : MESURES DE CONTRAINTES

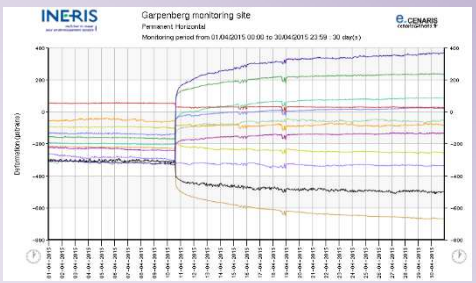
- **MECANISME SURVEILLE**
- Mécanisme qui suppose une modification préjudiciable de l'état des contraintes dans le massif rocheux à proximité de la cavité
- **LIEU D'EMPLOI**
- Carrières en activité
- Ouvrages/environnements exposés à des variations de niveaux d'eaux induisant des changements de l'état de contrainte
- **FAMILLE**
- Mesures géotechniques
- **PRINCIPE ET PARAMETRE(S) SUIVI(S)**
- Mesures directes (de pression) ou indirectes (de déformations) de l'évolution de l'état de contrainte dans le massif rocheux. Une valeur croissante d'une contrainte dans le sens de la compression peut être précurseure à des tassements, des élévations de la nappe phréatique, mais aussi à des mécanismes de dégradations
- **DEGRE D'ANTICIPATION DE LA RUPTURE**
- Variable, dépend de la qualité de transcription de la mesure de déformations
- **RAYON D'ACTION**
- Dépendant de l'homogénéité des terrains dans lesquels sont disposés les vides souterrains
- **COLLECTE**
- In situ (associée à une inspection visuelle). Centrale d'acquisition déportée. Télésurveillance possible
- **TRAITEMENT**
- Le traitement de la donnée est relativement aisé. En revanche l'interprétation en état de contrainte et sur les conséquences mécaniques sur les ouvrages ne sont pas directes et doivent être traitées par des spécialistes
- **MATURITE/FIABILITE**
- Techniques souvent réservées à l'auscultation et non à la surveillance, du fait de la difficulté de transcription des mesures en données et seuils de surveillance. Fiabilité à moyen/long terme dépendante de la qualité de maintenance du dispositif
- **UNITE DE GRANDEUR DE COÛT DE MISE EN OEUVRE**
- k€ à 10aine k€ par intervention sans compter les éventuels coûts de forages additionnels

Capteur de pression totale dans du minerai de nickel (INERIS)



Mesure au vérin plat dans un pilier (INERIS)

Cellule CSIRO de mesure de déformations en forage (12 orientations de mesures) (INERIS)



Saut de déformation sur jauge CSIRO enregistré dans une mine (INERIS)

- Techniques éprouvées, technologies diverses pouvant être adaptées au contexte à surveiller
- Faible coût, permettant un déploiement voire une redondance

- Difficulté de transcription des mesures de déformation en état de contraintes et en valeurs de surveillance
- Non auto-suffisant, nécessite souvent d'être associé à un suivi visuel ou d'autres capteurs,
- Accès au souterrain en conditions de sécurité requis,
- Peut nécessiter la réalisation de forages couteux.

FICHE N°10 : MESURES DE CONTRAINTES

Les capteurs de mesures de contraintes sont généralement employés dans les carrières ou les mines en activité notamment pour étudier les variations de contraintes provoquées par la progression des creusements (front de taille, piliers, voie, remblais).

On distingue deux grandes familles de dispositifs (fracturation hydraulique mise à part) :

- les mesures de pression : les capteurs correspondant enregistrent une pression hydraulique (mesure de pression totale, généralement dans des remblais), ou mécanique (on exerce une pression pour retrouver l'état de déplacement avant perturbation, exemple de l'essai au vérin plat).

  Le principe de mesure indirecte des capteurs de pression est sensiblement toujours le même. Il fait intervenir un corps d'épreuve qui transforme la grandeur à mesurer en une grandeur décelable par un détecteur (grandeur souvent de type électrique). L'association corps d'épreuve-détecteur est appelée transducteur. Les corps d'épreuve convertissent généralement la pression ou les forces engendrées en des champs de déplacements, de déformations ou de contraintes ;
- les mesures de déformations. Le couplage de jauges de déformation ou autres types de dispositif au massif, généralement en forage, permet de remonter au tenseur des déformations affectant le point de mesure. Si le régime est élastique, il est donc possible de retrouver les variations de l'état de contrainte.

  Entre autres, les cellules de mesures de déformations en forage suivantes ont fait leurs preuves dans le suivi des contraintes d'ouvrages souterrains : La cellule CSIRO (12 jauges de déformations), la cellule USBM (3 mesures diamétrales) ou encore la cellule Doorstopper (4 mesures de déformation).

Les capteurs suivants sont communément utilisés :

- les cellules de pression totale, qui permettent de suivre l'évolution des pressions totales au sein des sols, en limite de couches et au contact des fondations rocheuses ;

  Ces cellules de pression sont couramment appelées "manomètres à déformation de solide". Un exemple classique de cellule de pression totale est la cellule « Glötzl », utilisée pour mesurer les variations de pression en paroi de galerie (génie civil) ou dans les remblais (carrières).
- les capteurs de pression interstitielle, qui réalisent la mesure des pressions absolues d'eau et des pressions interstitielles dans les sols et dans les roches sans perturber l'écoulement naturel.

  Les capteurs de pression interstitielle sont également appelés capsules manométriques. Disposés à proximité d'une cellule de pression totale, ils permettent d'évaluer la contrainte effective. Selon la nature et l'environnement des carrières à inspecter, ce type d'étude, utilisé en complément des autres systèmes de surveillance, permet d'apprécier la perméabilité locale du massif.

FICHE N° 11 : ECOUTE SISMIQUE

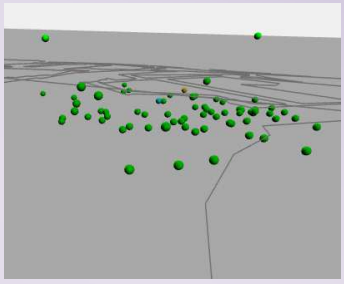
- **MECANISME SURVEILLE**
- affaissement, effondrement généralisé, effondrement localisé
- **LIEU D'EMPLOI**
- Vides souterrains, couplé au mur ou aux parements
- Scellé en forage plus ou moins profond
- En surface, en environnement peu bruité
- **FAMILLE**
- Mesure géophysique : sismographe, géophone, accéléromètre, hydrophone
- **PRINCIPE ET PARAMETRE(S) SUIVI(S)**
- Détection d'ondes mécaniques émises lors de la fracturation dans le massif rocheux ou de chutes de blocs dans les cavités. En conditions optimales (nombre et répartition des stations), le « foyer » (source) de l'instabilité est localisée et son énergie évaluée, ce qui permet de caractériser et hiérarchiser les événements détectés. Une évolution significative se manifeste souvent par une augmentation de la fréquence et de l'énergie des événements enregistrés qui forment un « essaim » (localisation en groupe)
- **DEGRE D'ANTICIPATION DE LA RUPTURE**
- Bon
- **RAYON D'ACTION**
- Plusieurs dizaines de mètres à plusieurs kilomètres. Selon l'application, quelques stations peuvent couvrir plusieurs dizaines d'hectares. Cette technique est particulièrement efficace en cavités profondes, pour des instabilités en grand
- **COLLECTE**
- Centrale d'acquisition déportée. Télésurveillance recommandée
- **TRAITEMENT**
- Identification et localisation des événements liés aux dégradations de l'édifice souterrain. Dans les cas favorables, des informations plus élaborées, comme la magnitude, la taille et le mécanisme à la source, … peuvent être déterminés.
- **MATURITE/FIABILITE**
- La méthode a fait ses preuves dans des domaines variés. De nombreux capteurs sont disponibles dans le commerce spécialisé, avec des déclinaisons adaptées aux différentes applications. Des offres de prestation clé-en-main existent, y compris pour le suivi des données
- **UNITE DE GRANDEUR DE COÛT DE MISE EN ŒUVRE**
- 10-aine k€ à 100k€

Chute de carrefour dans une mine de sel abandonnée (INERIS)

Unité d'acquisition pour chaine de mesure microsismique (INERIS)

Sondes microsismiques en forage et en paroi (INERIS)

Localisation de microséismes induits en zone d'aléa minier et vue 3D (INERIS)



- Bon degré d'anticipation de la rupture
- Couverture de volumes importants avec peu de stations
- Surveillance à distance, voire depuis la surface

- Plus efficace en milieu rocheux résistant, peu fracturé
- Nécessite une installation en forage en environnement urbain (bruité)
- Exploitation par un spécialiste géophysicien

FICHE N°11 : ECOUTE SISMIQUE

La surveillance microsismique est une technique passive non-invasive qui consiste à détecter et enregistrer les ondes émises lors de la fracturation et de la fissuration des massifs rocheux. Les sismomètres sont les dispositifs généralement utilisés ; ils sont composés d'un ou de plusieurs géophones qui permettent de mesurer les mouvements du sol (déplacement, vitesse ou accélération) dans une direction.

Le principe est donc identique à celui mis en œuvre en sismologie, si ce n'est que l'échelle est réduite de quelques ordres de grandeurs (magnitudes inférieures à 2 en général). Le traitement, l'analyse et l'interprétation des séquences d'événements microsismiques en termes de distribution spatio-temporelle des foyers, de mécanismes et d'énergie à la source ainsi que de contenu fréquentiel, fournissent des informations essentielles pour l'aide à la gestion des aléas de mouvements de terrain.

En particulier, l'observation et la surveillance microsismique trouvent de très nombreuses applications dans le domaine de la prévention des risques naturels et industriels. Si elle s'est particulièrement développée dans le contrôle de l'exploitation des mines et carrières ou des réservoirs d'hydrocarbures, activités extractives génératrices de redistributions importantes de contraintes et par conséquent d'activité microsismique, elle trouve aussi de nombreux autres champs d'application tels que :

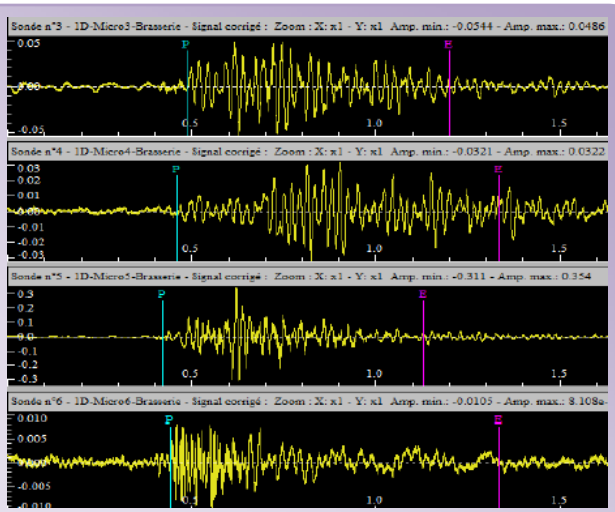
- la prévention des risques naturels et anthropiques : cavités souterraines, fronts de taille, versants rocheux, glissements de terrains, failles ;
- la surveillance de stockages géologiques souterrains ;
- la surveillance de réservoir, injection / extraction de fluide en forages profonds ;
- le génie civil : barrages, ouvrages d'art, tunnels ;
- la géothermie profonde.

FICHE N°12 : MESURES ACOUSTIQUES

- **MECANISME SURVEILLE**
- Chutes de bloc, craquements, …
- **LIEU D'EMPLOI**
- Vides souterrains, si possible dans des chambres de grande ouverture
- **FAMILLE**
- Mesure géophysique
- **PRINCIPE ET PARAMETRE(S) SUIVI(S)**
- Comptage des événements d'instabilités sonores tels que des chutes de blocs. Un réseau suffisamment dense permet de localiser et de caractériser plus précisément l'importance de l'événement détecté. L'accélération de l'occurrence de chutes de bloc dans un secteur peut être liée à une évolution de remontée de voûte pouvant aboutir à un fontis
- **DEGRE D'ANTICIPATION DE LA RUPTURE**
- Bon
- **RAYON D'ACTION**
- Dizaines de mètres. Selon l'environnement acoustique des cavités souterraines, quelques capteurs peuvent aller jusqu'à couvrir plusieurs dizaines d'hectares. Cette technique est particulièrement efficace en environnement de « chambres et piliers »
- **COLLECTE**
- Centrale d'acquisition déportée. Télésurveillance recommandée
- **TRAITEMENT**
- Les données doivent pouvoir être visualisées sous forme de sismogramme, convertibles en fichier audio. Si plusieurs microphones sont déployés, l'échantillonnage et les outils peuvent permettre d'évaluer les différences de temps d'arrivée des signaux aux différents capteurs dans le but d'affiner la localisation de l'événement
- **MATURITE/FIABILITE**
- Bien que de nombreux microphones soient disponibles dans le commerce, les conditions de milieu souterrain nécessitent une résistance et des caractéristiques techniques particulières auxquelles les équipements qui n'ont pas été créés sur mesure ne répondent pas forcément
- **UNITE DE GRANDEUR DE COÛT DE MISE EN ŒUVRE**
- 30 k€ à 100k€

Sondes microphones sur trépied en cavité souterraine (INERIS

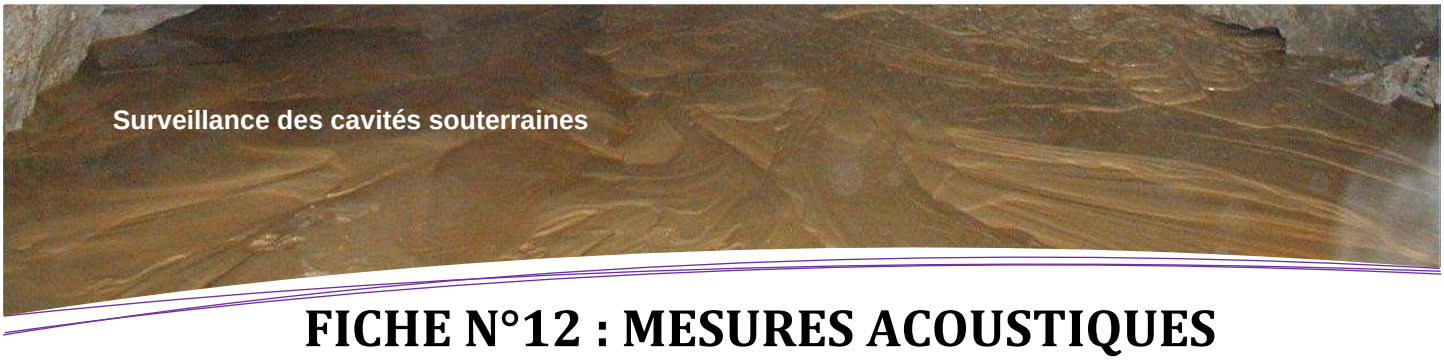
Unité d'acquisition (INERIS)



Signal acoustique déclenché par une chute de bloc sur un réseau de surveillance microphonique (INERIS)

- Bon degré d'anticipation de la rupture
- Couverture importante des zones à surveiller
- Installation simple (pose d'un microphone sur un trépied ou dans un forage) sans interaction avec le massif

- Nécessite souvent d'être associé à une confirmation visuelle en cas d'évolution suspectée
- Déclenchements intempestifs si des sources de bruits sont présentes



FICHE N°12 : MESURES ACOUSTIQUES

Les microphones réalisent une scrutation continue de la pression acoustique (capteur omnidirectionnel) à l'endroit où ils sont implantés. Tout événement générant des ondes acoustiques dans le voisinage du microphone est donc perçu par le capteur, qui fonctionne par déclenchement sur seuil.

Cette technique permet essentiellement de comptabiliser les chutes de blocs ou les craquements en surface libre. Elle est particulièrement efficace pour la surveillance de fontis ou d'effondrements localisés à condition que les capteurs puissent être installés dans la cavité, soit sur un trépied en intervenant directement au fond, soit dans des forages à cet effet.

Dans des configurations favorables, comme des carrières en chambres et piliers, quelques capteurs (3 à 5) suffisent à surveiller les chutes de petits blocs sur plusieurs hectares.

De nombreux types de microphones existent, dont des capteurs 4-20 mA classiques compatibles avec de nombreux systèmes d'acquisition. En revanche, les conditions agressives des milieux souterrains abandonnés et les longueurs de câbles déportés impliquent une attention particulière à la pré-amplification utilisée et à la qualité de résistance du capteur.

Les signaux peuvent être écoutés. Ils peuvent également être analysés comme des sismogrammes classiques avec des outils de calcul, afin de déterminer les fréquences des signaux ou les énergies (en dB). Les signaux enregistrés doivent être qualifiés avant d'être comptabilisés, les sources de parasites étant potentiellement nombreuses (gouttes d'eau, parasites, courants d'air). Cette qualification peut être délicate dans le cas où des sources de bruits parasites peuvent avoir des signatures acoustiques proches des événements à suivre (claquement de porte d'accès à la zone, coups sourds en surface, …).

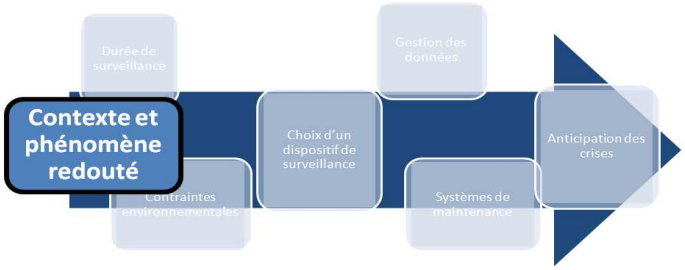
La technique permet une localisation plus ou moins grossière des événements :

- Soit par zonage en attribuant le signal enregistré à la zone où se situe le microphone ;
- Soit plus précisément en considérant les différences de temps d'arrivées aux différents capteurs. Ceci implique que l'événement enregistré soit suffisamment important et que le réseau soit suffisamment dense.

La surveillance acoustique est aujourd'hui relativement peu développée, mais ses performances rendent son usage intéressant dans le cadre de surveillance d'ouvrages étendus abandonnés et en proche surface, pour lesquels les autres types de surveillance présentent des défauts sécuritaires (visites d'inspection), économiques (capteurs géotechniques) et opérationnels (microsismique).

Annexe 3 :
Exemples de surveillance :
Carrière de la Brasserie (75)
Carrière et thermes troglodytes de Jonzac (17)

Surveillance de la carrière de la Brasserie à Paris



L'ancienne carrière de calcaire grossier de la Brasserie est située sur la commune de Paris sous la partie ouest du bois de Vincennes. Cette carrière a été exploitée successivement aux 18ème et 19ème siècles par piliers tournés puis par hagues et bourrages. Elle présente aujourd'hui, sur une extension souterraine d'environ **10 hectares**, différents types de **désordres géotechniques en évolution lente**. En particulier, plusieurs zones montrent **des chutes de blocs** au toit de la carrière liées à des mécanismes de délitage et ruptures en traction.

Au droit de cette carrière se trouvent des bâtiments administratifs occupés à ce jour par la Direction Espaces Verts et de l'Environnement (DEVE) de la ville de Paris. Par ailleurs cette carrière, particulièrement bien conservée et partie intégrante du patrimoine historique de la ville de Paris, fait l'objet chaque année de nombreuses visites.

L'environnement géologique est bien connu en région parisienne et confirme le danger que représente cette cavité :

- 15 m de recouvrement seulement séparent les vides souterrains de la surface. Ces vides sont évalués de 2 m à 5 m de hauteur ;
- la grande majorité des terrains de recouvrement, constitués des formations des « Marnes et caillasses » et des « Sables de Beauchamp » est de tenue douteuse ;
- les terrains durs constitués de calcaire ou de roche au toit de l'ancienne carrière sont peu épais et se dégradent lentement ;
- la portée du toit dans les zones à enjeux varie de 6 à 15 m ;
- des remontées de voûte en évolutions lentes sont identifiées, notamment dans le secteur nord.

Figure 1 : Instabilité de toit et bord d'effondrement à la carrière de la Brasserie

L'étude géotechnique a montré que deux types de phénomènes sont redoutés dans cette cavité :

1) le développement de remontées de voûte, notamment au droit du bâtiment, mais aussi sur presque toute l'étendue de la carrière. Ce phénomène, pour l'instant très lent, pourrait connaitre une accélération une fois que les vides atteindront les terrains marneux ;
2) les chutes de bloc au fond augmentent les risques d'accident lors des passages des équipes de l'IGC, qui gère le site, ainsi que des éventuels visiteurs.

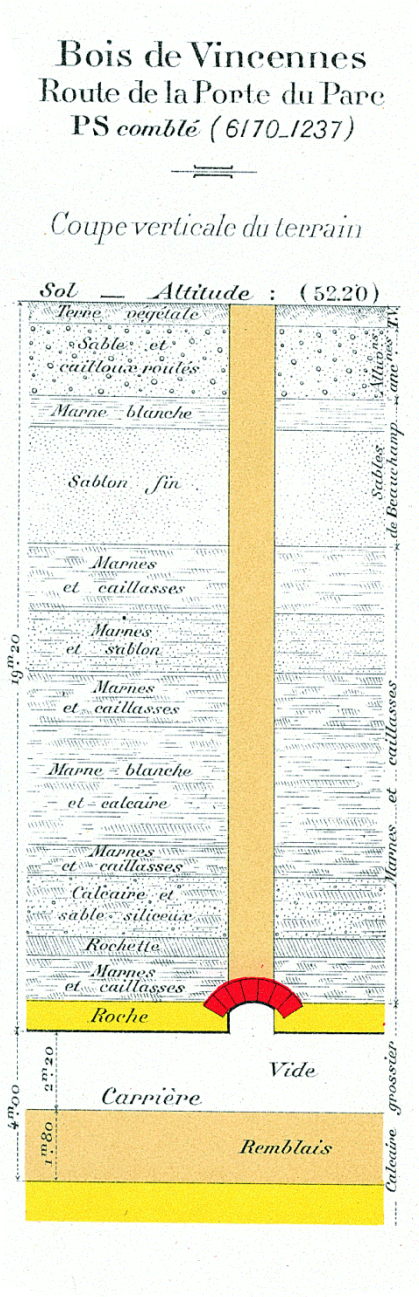
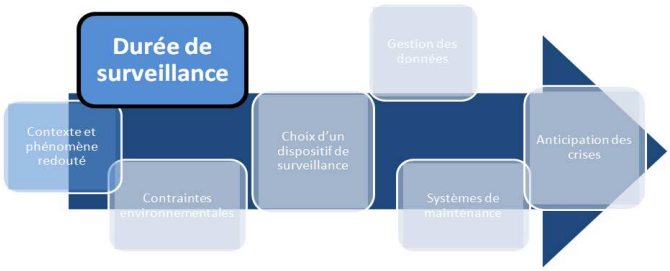


Figure 2 : Coupe stratigraphique des terrains de recouvrement de la carrière de calcaire (source : IGC).



La cinétique en évolution lente montre bien que le danger en surface n'est pas imminent, bien qu'il soit réel. La carrière, qui s'étend sur une étendue importante, ne peut pas être comblée pour des raisons économiques, mais aussi culturelles : son bon état de conservation en fait un ouvrage historique inscrit au patrimoine de la ville.

Des travaux de confortement des zones les plus dégradées ont bien été entrepris ; cependant, en fonction des budgets, seules de petites parcelles ont pu être aménagées.

On se retrouve donc dans une situation avec un risque réel, mais non imminent, aux solutions de traitement inappropriées.

Le projet de surveillance en lien avec cette cavité est donc une solution durable, sur plusieurs années.

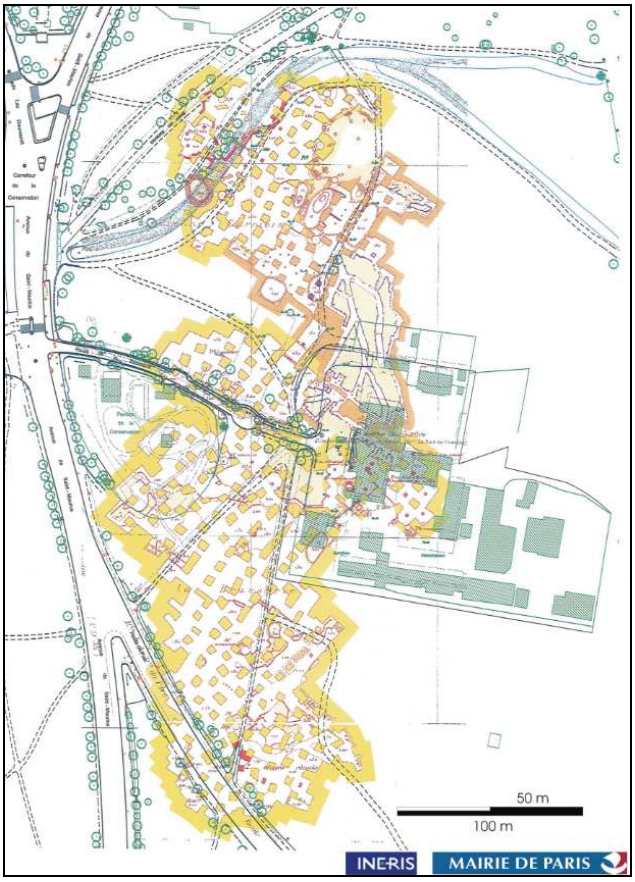
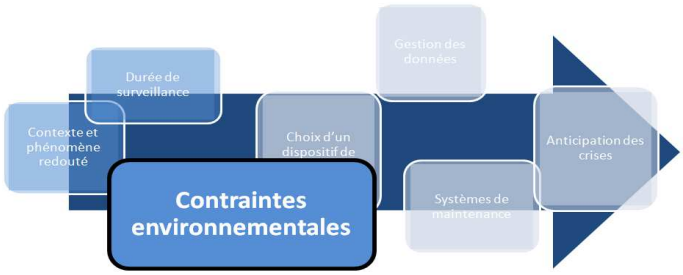


Figure 3 : Carte de la carrière de calcaire de la Brasserie, région parisienne.

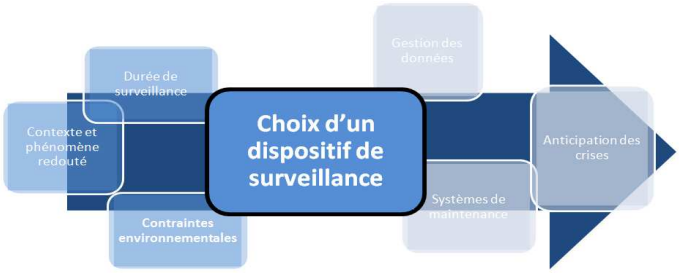


L'environnement de La Brasserie est favorable :

- d'une part **les conditions d'accès** sont confortables. En effet, les galeries sont entretenues et les remblais disposés au fond rendent les déplacements parfaitement praticables. Les zones dégradées sont en évolution lente. En revanche, pour accéder au fond, le passage obligatoire se fait par un escalier en colimaçon, ce qui limite les possibilités de déploiements de matériels importants pour des interventions au fond.
  En surface, une route permet d'accéder au parking sur lequel se trouve le puits d'accès. Situé en région parisienne, cet axe est bien desservi ;

Figure 4 : unique puits d'accès à la cavité.

- d'autre part, le site dispose de **prises électriques** qui servent notamment pour l'éclairage de certaines galeries, ainsi que de prises téléphoniques reliées au réseau internet de la ville de Paris, propriétaire du bâtiment administratif en surface.
  Le site est globalement sec sans venues d'eau incontrôlées durant les périodes pluviales (hors conditions climatiques exceptionnelles) ; des gouttes d'eau tombent cependant régulièrement du toit dans la cavité, traduisant la présence de circulation d'eau dans les terrains supérieurs.
- enfin, **l'accès au site est contrôlé**, une porte blindée permet de verrouiller le puits afin d'empêcher les personnes non habilitées à pénétrer dans le site. On note cependant que certaines personnes ont réussi à visiter le site sans autorisation, sans pour autant qu'aucun acte de malveillance sur les matériels déployés n'ait été à déplorer.



Le choix d'un dispositif de surveillance dans les conditions exposées n'est pas facile. En effet, bien que le phénomène redouté présente de nombreux signes d'évolution facile à détecter, l'étendue des zones à surveiller ainsi que les sources d'éventuels bruits de mesures (du fond et de la surface) sont nombreux.

Le phénomène redouté est la conséquence de la dégradation progressive de toits de grande portée, ce qui se traduit par des chutes de blocs. Ces évolutions sont visibles, sonores, et dans une moindre mesure sismique.

Etant donné l'étendue des zones à surveiller, ce sont des dispositifs de surveillance en grand qui sont favorisés. La surveillance sismique classique s'avère difficile à appliquer, étant donné que les blocs qui tombent sont en majeure partie petits et que le remblai couvrant le sol amortit les ondes provoquées par les chutes.

Figure 5 : Equipements de surveillance déployés dans la carrière de la Brasserie (à gauche, microphone sur trépied ; à droite, géophone de paroi)

En conséquence, une surveillance acoustique a été identifiée comme étant une solution intéressante. La cavité est en effet silencieuse et présente des zones de grandes chambres aux propriétés acoustiques favorables. Le simple comptage de chutes de blocs pourra être géré par moins d'une dizaine de microphones.

De manière complémentaire, l'utilisation de géophones de paroi a été jugée pertinente, afin de suivre les évolutions non sonores telles que des ruptures dans le toit et/ou les piliers. Ces géophones sont à même d'être également sollicités par les plus importantes chutes de toit.

Après une étude des caractéristiques acoustiques du site, notamment le bruit de fond, les propriétés d'atténuation des différentes chambres, et l'étude du niveau de décibels que provoque une chute de blocs de quelques kilos, il a été établi que la mise en place de cinq microphones et de deux géophones permettrait de suivre les évolutions pouvant potentiellement mener au phénomène redouté sur toute l'étendue de la carrière. Cette étude a abouti à la mise en place de capteurs selon la carte présentée en figure 6.

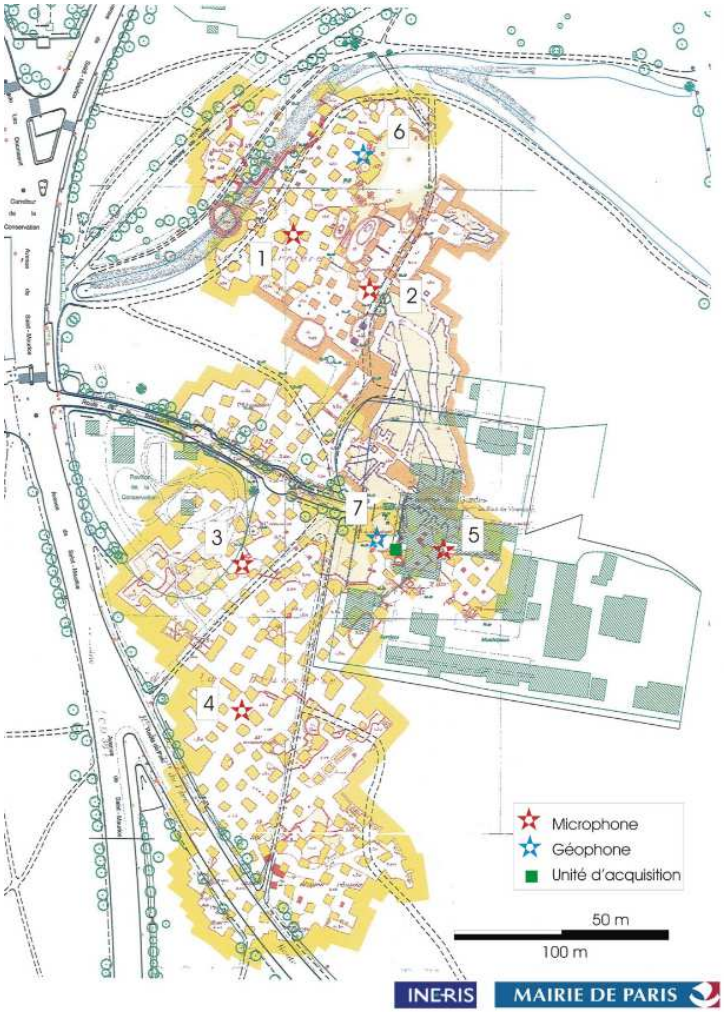


Figure 6 : Implantation des capteurs réalisant la surveillance de la carrière de la Brasserie

Les performances du réseau de surveillance ont été testées et calées en simulant des chutes de blocs de quelques dizaines de kilos.

Figure 7 : simulation de chute de bloc à la Brasserie

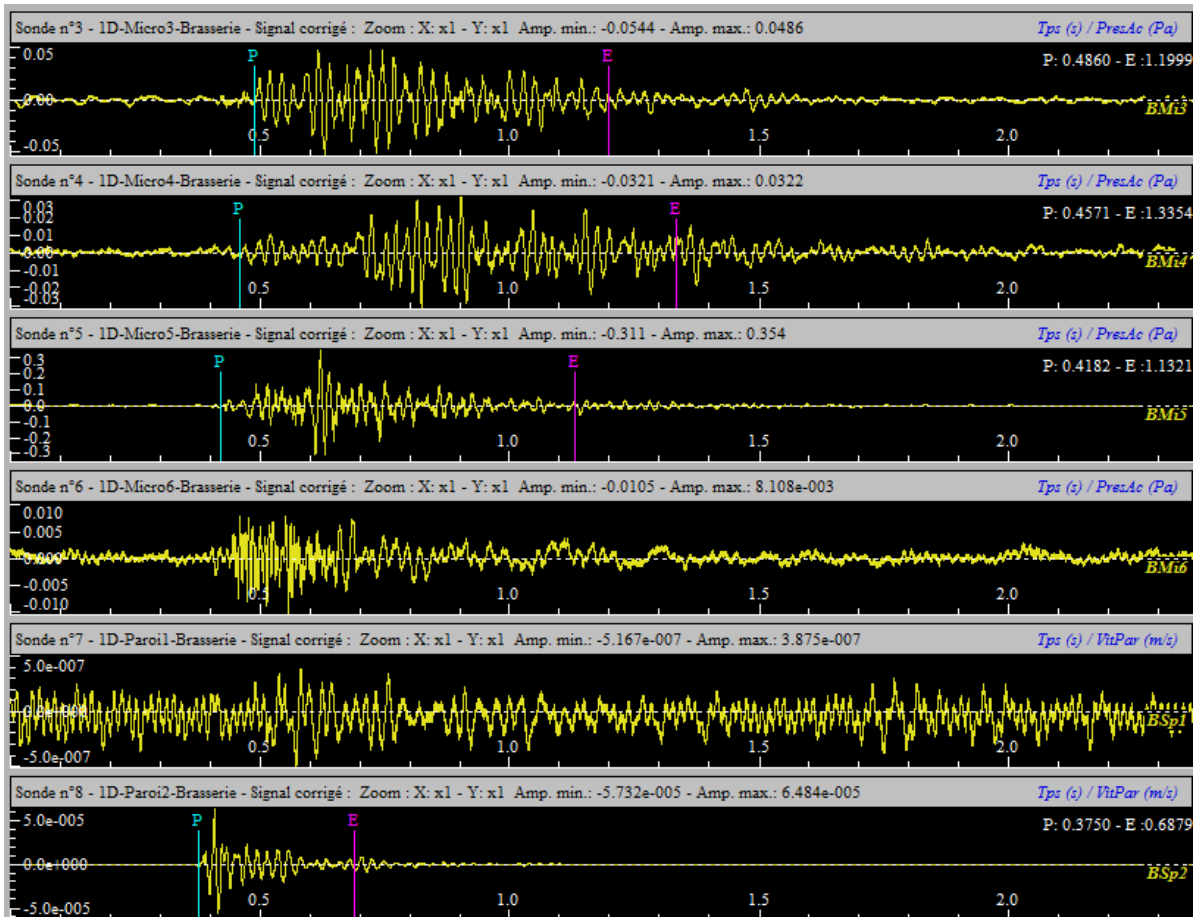
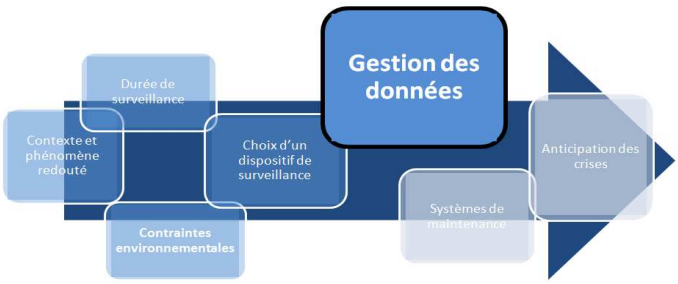


Figure 8 : Signaux enregistrés lors d'une chute de blocs.



Les capteurs utilisés pour la surveillance sont des microphones et des géophones à sortie en 4-20mA. Les valeurs brutes sont donc converties en valeurs physiques équivalentes (pression acoustique pour les microphones, vitesse particulaire pour les géophones).

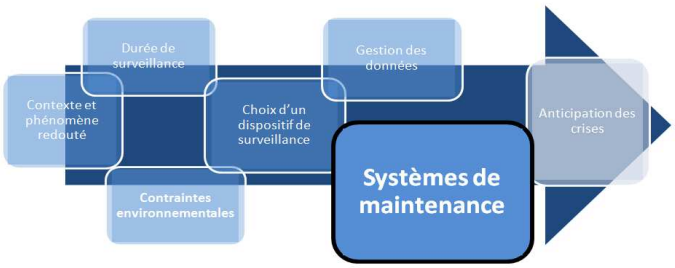
Ces capteurs réalisent une scrutation continue des ondes sismiques et acoustiques de la cavité mais n'enregistrent que les signaux dont les amplitudes (en pression acoustique ou en vitesse particulière) dépassent un seuil de déclenchement calé en fonction du bruit de fond. La densité du réseau de capteurs a été dimensionnée en fonction des propriétés acoustiques de la cavité et de l'événement minimal à détecter. Ainsi, toute chute de bloc d'une dizaine de kilos sera détectée par le système de surveillance mis en place.

La transmission des données est gérée par une unité d'acquisition connectée au réseau local, à savoir celui de la ville de Paris. Ainsi, toutes les heures, l'unité d'acquisition se connecte au réseau et les signaux enregistrés présents dans sa mémoire sont envoyés au centre de surveillance.

Figure 9 : Unité d'acquisition SYTGEM vlp installée dans la carrière de la Brasserie.

Une fois par semaine, un technicien spécialisé du centre de surveillance visualise les signaux enregistrés pour les trier. Cette vérification permet dans un premier temps de disqualifier un certain nombre de signaux, soit parce qu'ils sont liés à des bruits de surface, soit parce qu'ils sont liés à des interventions, des parasites ou des gouttes d'eau. Ces signaux disqualifiés sont conservés en archive, afin que le centre de surveillance dispose d'un maximum de données pour être capable d'améliorer les performances de tri, de détection et de qualification des signaux générés par ce réseau. Les autres signaux seront qualifiés, et le traitement effectué permettra de localiser et de caractériser avec plus ou moins de précision l'événement qui a provoqué le déclenchement du signal.

Chaque trimestre, un bilan des événements qualifiés est communiqué à la ville de Paris, précisant les énergies associées, leur localisation approximative dans la cavité et les commentaires des ingénieurs investis dans cette surveillance.

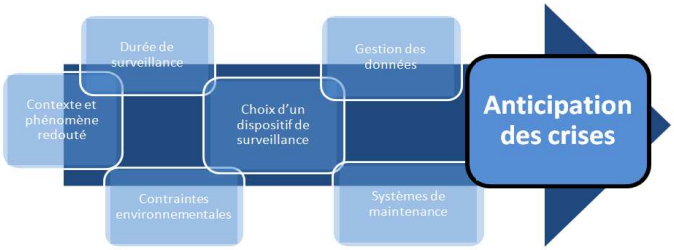


L'ensemble des équipements constituant la chaine d'acquisition (capteurs et unité d'acquisition) fait l'objet d'un suivi matériel répondant aux règles de traçabilité.

La maintenance préventive est réalisée :

- par la mise en place d'autotests quotidiens, permettant de vérifier la bonne réaction de chacun des capteurs à une sollicitation gérée par le datalogger, et la bonne transmission des données au centre de surveillance ;
- par des contrôles métrologiques de la chaîne de mesure réalisés tous les deux ans. Les microphones sont testés avec un calibreur acoustique et un générateur basse fréquence, qui permet également de tester les géophones de paroi. Des coups de masse sur une paroi à proximité des géophones concluent les tests.

Aucune intervention de maintenance curative n'a été pour le moment réalisée ; des équipements de rechange (microphones, géophones de paroi, pièces constituantes de l'unité d'acquisition) sont disponibles pour que l'opérateur de surveillance soit en mesure de remettre en état le réseau de surveillance rapidement en cas de dysfonctionnement matériel.



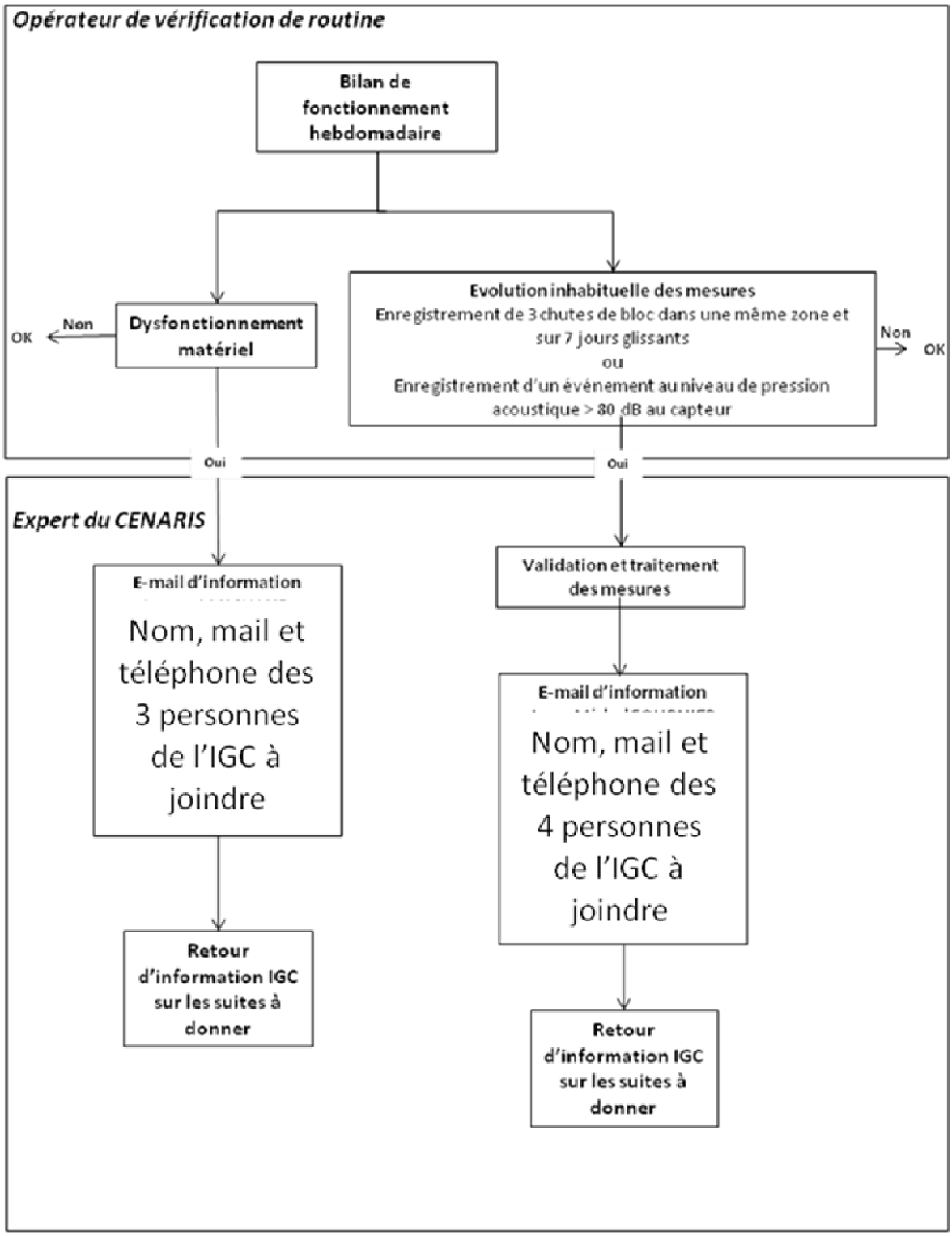
L'Inspection Générale des Carrières (IGC, ville de Paris) et l'opérateur de surveillance ont formalisé sous la forme d'une procédure de surveillance, les acteurs à joindre et les bonnes pratiques permettant la meilleure réactivité :

- en cas de crise matérielle :
  - o alarme sur absence d'autotest permettant de détecter un problème de communication sous 24h.
  - o panne d'un capteur détectée par retour d'autotest non conforme sous 24h.

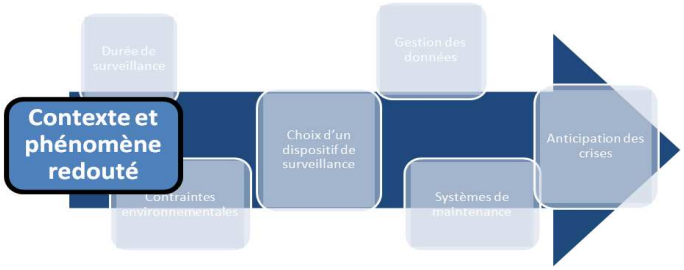
    ➔ information sur la panne transmise à l'IGC par mail ;
- en cas d'évolution anormale des mesures :
  - o signal qualifié d'amplitude supérieur à 80dB sur l'un des microphones.
  - o trois signaux qualifiés dans une même zone sous 7 jours glissants.

    ➔ Information transmise à l'IGC par mail et appel téléphonique. L'IGC réalisera alors une visite de site pour confirmer visuellement l'occurrence ou non d'évolution anormale dans la cavité.

La procédure de surveillance est présentée à titre d'exemple ci-après.


Opérateur de vérification de routine
Bilan de fonctionnement hebdomadaire
Dysfonctionnement matériel
Non
OK
Evolution inhabituelle des mesures
Enregistrement de 3 chutes de bloc dans une même zone et sur 7 jours glissants
ou
Enregistrement d'un événement au niveau de pression acoustique > 80 dB au capteur
Non
OK
Oui
Oui
Expert du CENARIS
E-mail d'information
Nom, mail et téléphone des 3 personnes de l'IGC à joindre
Retour d'information IGC sur les suites à donner
Validation et traitement des mesures
E-mail d'information
Nom, mail et téléphone des 4 personnes de l'IGC à joindre
Retour d'information IGC sur les suites à donner

Surveillance de la carrière de pierre de taille reconvertie en thermes troglodytes à Jonzac



L'ancienne carrière de pierre de taille d'Heurtebise, située sur la commune de Jonzac (Charente-Maritime), a été exploitée au début du XX^{ème} siècle par chambres et piliers. Les galeries s'étendent sur plusieurs hectares sous une vingtaine de mètres de recouvrement. La carrière a abrité pendant la seconde guerre mondiale un important dépôt d'explosif allemand qui a explosé en 1944. Cet événement a provoqué un incendie sur plusieurs jours, cause de la plupart des désordres géotechniques observés à ce jour. Les parois des galeries sont toujours couvertes de suie.

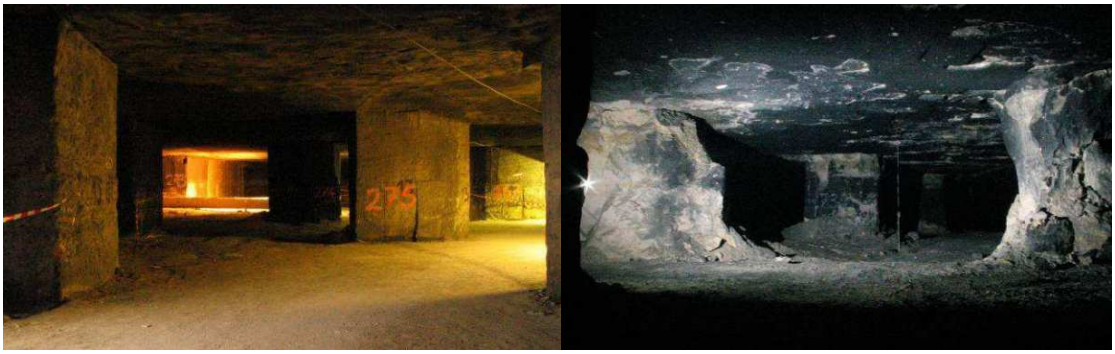


Figure 10 : Carrière d'Heurtebise. A droite : secteur en bon état. A gauche : secteur impacté par les explosions et incendies de 1944.

Utilisée par un champignonniste à la fin de la guerre, la carrière a été cédée à la commune de Jonzac. En 1979, un forage profond de 1862 m a permis de découvrir une eau hyper sulfatée chlorée. En 1984, la station thermale de Jonzac est agréée pour rhumatologie et séquelles des traumatismes par le Ministère de la Santé. La proximité avec le site souterrain abandonné fait naitre l'idée d'ouvrir le centre de soins dans une emprise limitée à l'intérieur des galeries.

Les installations thermales se développent avec l'obtention de l'agrément « voies respiratoires) (1992) et « phlébologie » (2006). Elles couvrent aujourd'hui plus de 8000 m² et reçoivent 15 000 curistes par an.

Préalablement à l'installation de ce site destiné à accueillir du public, les aspects géotechniques de stabilité générale de l'ouvrage et de stabilité immédiate ont dû être évalués, au-delà des conditions générales de sécurité (incendie, ventilation, accès…).

Etant donné l'importance des enjeux, à savoir les investissements de mise en place des thermes et la sécurité des 15 000 curistes annuels, une approche très sécuritaire est envisagée, avec un phénomène redouté qui comporte à la fois :

un effondrement de masse qui puisse affecter l'ouvrage ;

les dégâts mineurs : chutes de plaques au toit, délavages le long des parements, …

L'étude géotechnique du site a mis en évidence l'homogénéité des caractéristiques de résistance, de continuité des bancs exploités et de sollicitation sur les piliers. Le toit, de bonne qualité et massif a permis de grandes portées sans grande incidence des diaclases à caractère karstiques.

La stabilité des piliers est en revanche apparue moins franche dans les parties les plus anciennes de l'exploitation et celles ayant subi l'impact local des explosions.

Des confortements importants ont été préconisés dans les espaces à aménager : construction de piliers maçonnés et comblement des zones les plus sensibles notamment.

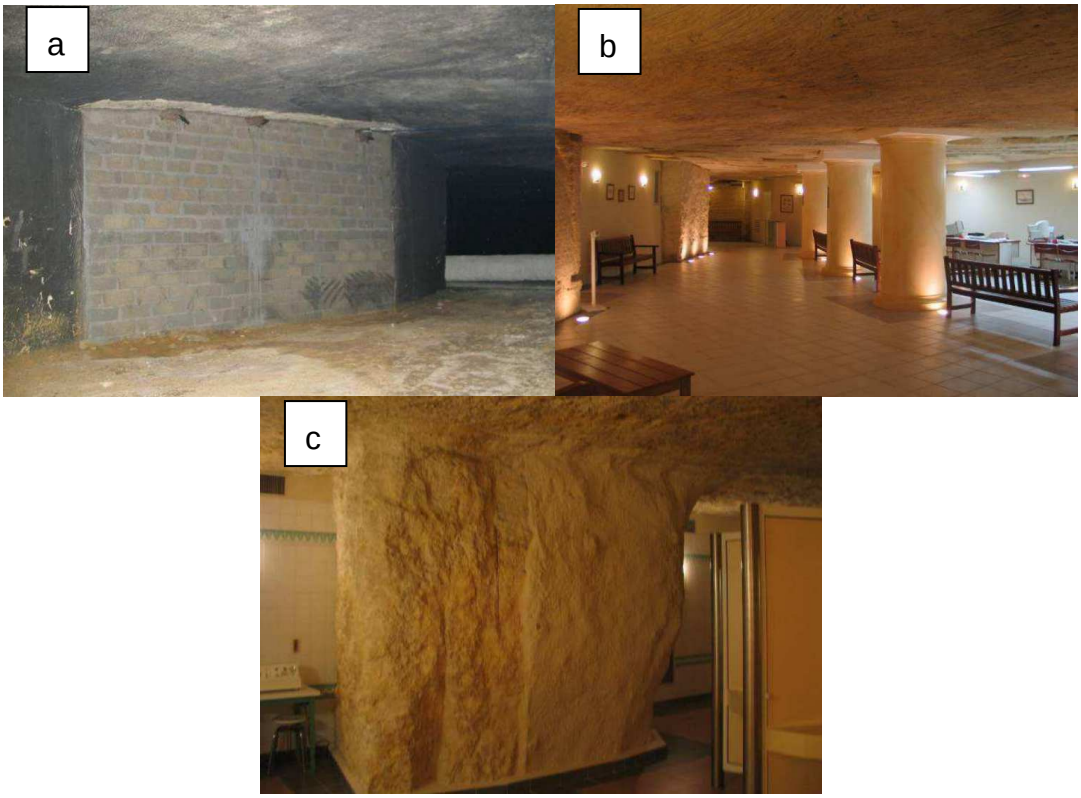
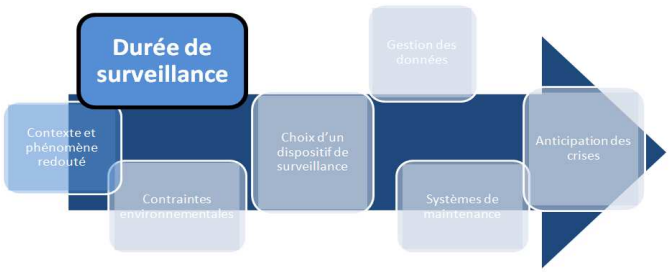
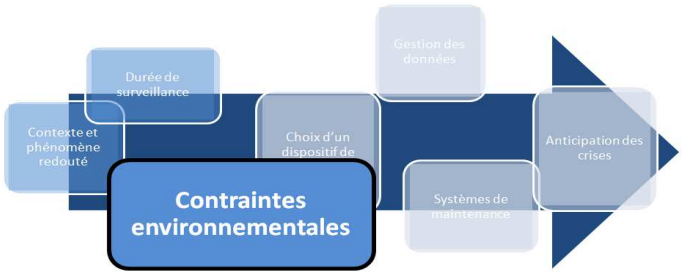


Figure 11 : a) Rétablissement de la portance par construction de piliers maçonnés ; b) « Remplacement » d'anciens confortements par des piliers en béton, intégrés à l'architecture du centre thermal ; c) partie de pilier (à droite) traitée par boulonnage et coque de béton projeté.



Si les travaux de confortement ont permis l'installation des zones thermales ouvertes au public dans des conditions de sécurité satisfaisantes, les enjeux sont tels qu'un suivi de l'état de l'ouvrage a également été préconisé au moins aussi longtemps que le site sera en activité. En effet, l'impact de désordres géotechniques, même mineurs, pourrait avoir des conséquences préjudiciables si un membre du personnel ou un patient venait à être blessé. Une partie seulement de la cavité a été confortée ; il est également important de suivre avec précision les évolutions des cavités plus éloignées car elles pourraient avoir une influence sur la stabilité du site à plus long terme.

Dans ce cadre, c'est plus l'importance des enjeux que la cinétique du phénomène redouté qui dicte la durée du projet de surveillance : une solution durable, sur plusieurs années, a donc été retenue.

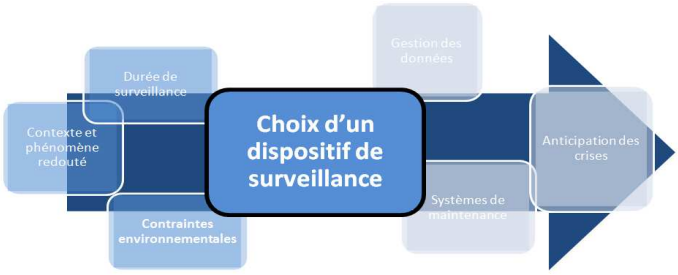


L'environnement de la carrière de Heurtebise est favorable pour la mise en œuvre de la surveillance :

- d'une part **les conditions d'accès** sont confortables. L'entrée de la cavité est accessible mêmes pour les petits fourgons et elle est sécurisée par un portail. Les galeries sont entretenues et les chambres suffisamment grandes pour permettre les passages de véhicules. Les remblais disposés au fond rendent les déplacements parfaitement praticables. Les zones les plus dégradées sont stabilisées et sans danger immédiat pour les intervenants. Enfin, la cavité est ventilée et il n'y a pas de risque lié à la présence de gaz. En surface, une route permet d'accéder au parking sur lequel le site est implanté ;

Figure 12 : La cavité est accessible en véhicule.

- d'autre part, le site dispose de **prises électriques** qui servent notamment pour l'éclairage de certaines galeries, ainsi que de prises téléphoniques. Un atelier permet de mettre à disposition de nombreux outils et le personnel est suffisamment qualifié pour réaliser des diagnostiques mineurs. Le site est sec sans venues d'eaux incontrôlées durant les périodes pluviales ; des percolations d'eau au toit existent cependant dans certaines zones présentant un caractère karstique ;
- en revanche, le site est actif avec la présence de nombreux personnels, patients et matériels. Des câbles à haute tension et l'aménagement continu des locaux peuvent perturber les dispositifs de surveillance en place.



Étant donné les dimensions importantes de la cavité, une solution géophysique (microsismique ou acoustique) aurait été intéressante. Malheureusement, l'importante activité du site générerait trop de bruit de mesure et rend peu fiable l'implantation de ce type de dispositif.

Dans ces conditions d'enjeux importants, des visites géotechniques ont été programmées deux fois par an pour suivre le plus précisément possible les potentielles évolutions. La probabilité d'un événement rapide ou brutal étant quasi nulle, ce rythme permet de suivre avec une fréquence suffisante l'état global de la cavité. Cependant, afin de suivre les cinétiques d'évolution plus précisément et de détecter d'éventuelles évolutions invisibles, 9 cannes de convergences ont été implantées à proximité immédiate des thermes et 3 dans les zones dégradées.

Figure 13 : Equipements de surveillance déployés dans la carrière d'Heurtebise (à gauche, canne de convergence avec comparateur dans une zone « dégradée » ; au centre, canne de convergence dans une zone confortée ; à droite, comparateur mécanique)

Ces capteurs présentent l'avantage de détecter d'infimes déformations (inférieures à 0.1 mm) et de ne pas être bruitées par l'activité ambiante.

Des seuils d'alarmes ont été fixés à 2 mm, ce qui est très sécuritaire étant donné la hauteur des vides. Ces cannes de convergence réalisent des mesures en télégestion, automatiquement envoyées à la centrale de surveillance de l'INERIS. Elles sont également équipées de comparateurs mécaniques, relevés mensuellement par l'exploitant afin de doubler les mesures, de sensibiliser le gestionnaire de site à la sécurité de la cavité et de servir de repères aux géotechniciens.

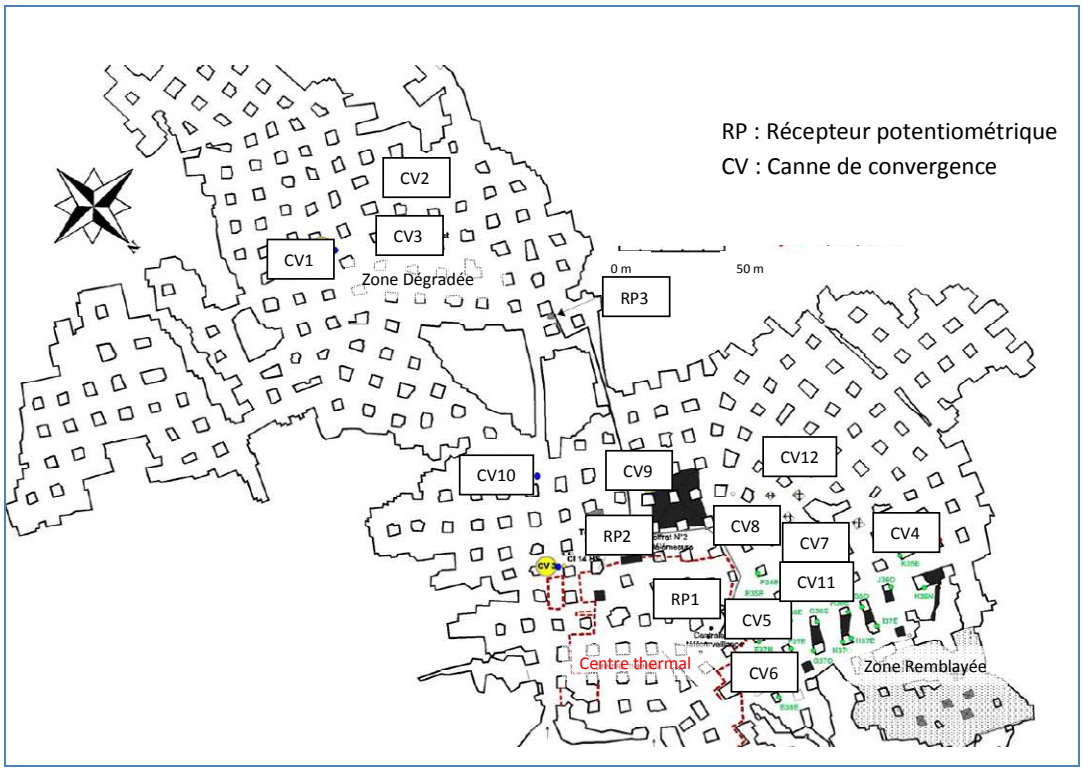
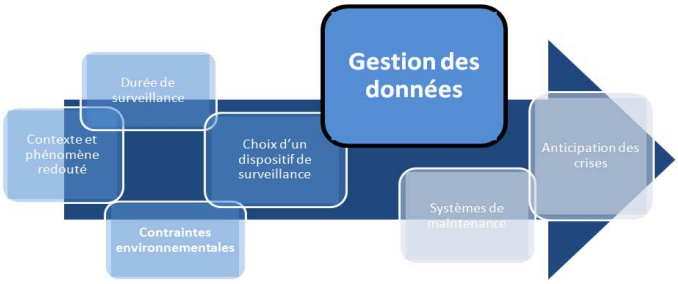


Figure 14 : Plan d'implantation des cannes de convergence sur le site de la carrière d'Heurtebise



Les dispositifs utilisés pour la surveillance sont des capteurs potentiométriques installés sur les cannes de convergence. Les valeurs brutes sont converties en valeurs physiques équivalentes (potentiel converti en déplacement).

Les capteurs réalisent une mesure toutes les heures. Le système d'acquisition est constitué d'un ordinateur superviseur, d'un contrôleur et de trois récepteurs potentiométriques. Les données sont envoyées par connexion internet toutes les six heures au centre de surveillance situé à Nancy.

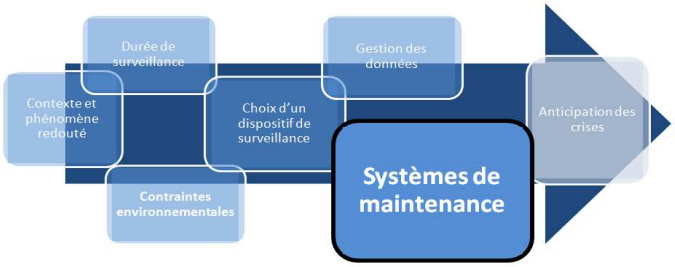
Figure 15 : à gauche : récepteur potentiométrique ; à droite : ordinateur d'acquisition.

Une fois par semaine, un technicien et un ingénieur spécialisé du centre de surveillance visualisent les courbes de déformations. Cette vérification permet dans un premier temps de valider le bon fonctionnement des capteurs et dans un deuxième temps de tirer les conclusions quant aux évolutions de la zone.

Deux rapports annuels sont envoyés au gestionnaire des thermes :

- le premier fait le bilan de l'état de la carrière sur la base des visites d'inspections visuelles. Généralement, peu d'évolutions sont observées. Les zones nouvellement aménagées présentent souvent des altérations de surface dues aux travaux et aux changements de température ;
- le deuxième fait le bilan de fonctionnement et des mesures de télésurveillance. Sur la figure 7, on voit que ces mesures sont très stables, mis à part quelques fluctuations dues aux changements de température annuels et aux quelques parasites enregistrés.

Figure 16 : mesures de déplacement enregistrées dans la carrière d'Heurtebise sur la période du 21/05/2010 au 24/11/2010



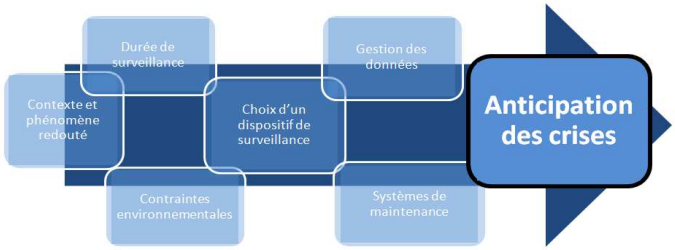
L'ensemble des équipements constituant la chaine d'acquisition (capteurs et unité d'acquisition) font l'objet d'un suivi matériel répondant aux règles de traçabilité.

La maintenance préventive est réalisée par:

- la vérification hebdomadaire du bon fonctionnement de l'ensemble de la chaine d'acquisition grâce aux relevés de télémesure ;
- des contrôles métrologiques de la chaîne de mesure réalisés tous les deux ans.

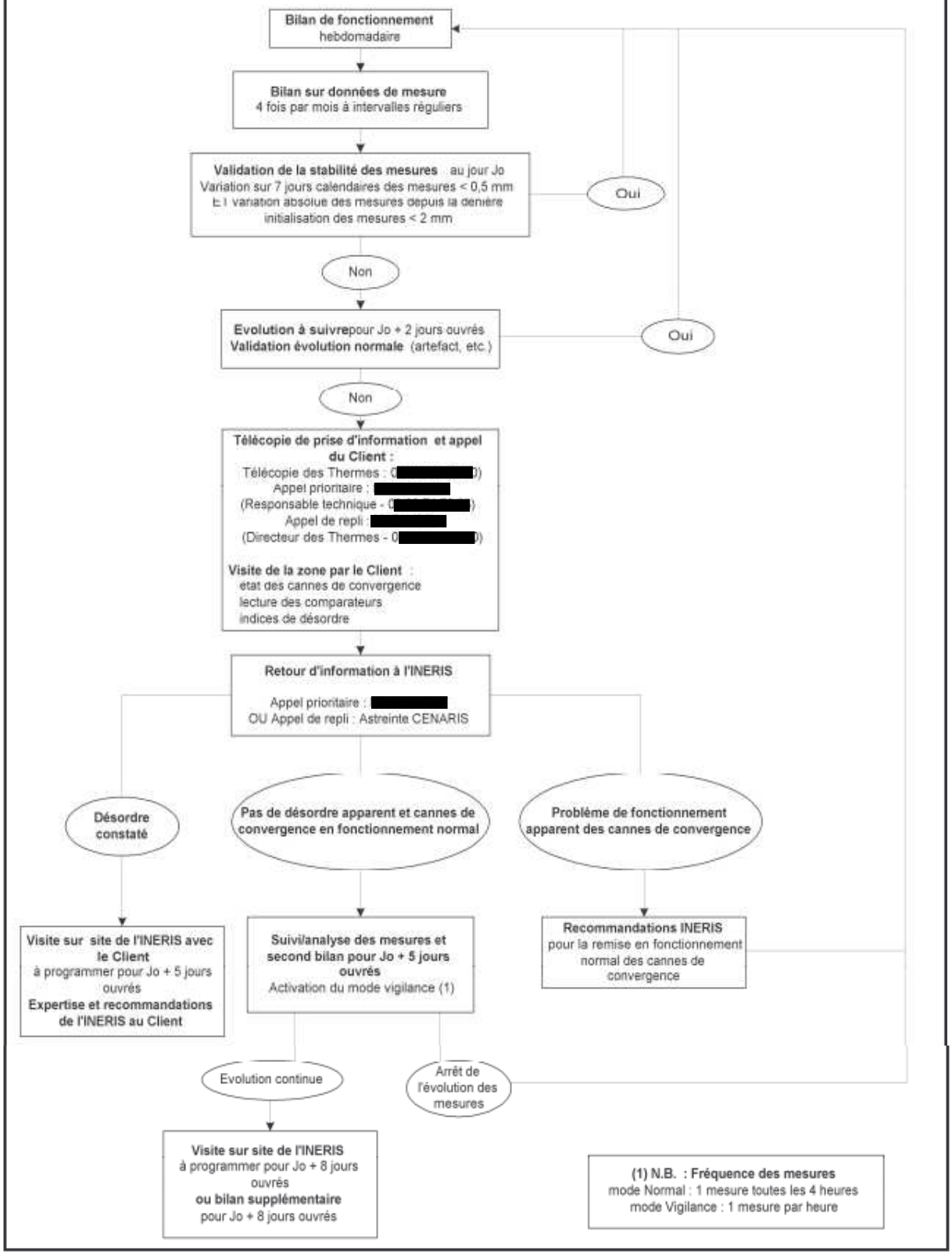
Le réseau de surveillance fonctionne depuis 1992 mais on note cependant que les capteurs ont tendance à se gripper avec le temps, dans un environnement relativement agressif, et doivent être changés en moyenne tous les 10 ans. Les extensions régulières du site thermal ont amené à allonger des longueurs de câbles, provoquant parfois des crises de parasites dans les mesures, mais ne perturbant pas outre mesure la surveillance.

Des stocks de remplacement sont prévus en cas de panne, pour permettre l'organisation des interventions de maintenance curative.



La chaine thermale du soleil et l'opérateur de surveillance ont formalisé par une procédure de surveillance les acteurs à joindre et les bonnes pratiques permettant la meilleure réactivité :

- en cas de crise matérielle :
  - si le bilan hebdomadaire met en évidence un défaut matériel, une télécopie d'information est envoyée au gestionnaire de site. Le prestataire de surveillance doit alors réaliser le diagnostic de la panne et faire des recommandations pour la remise en fonctionnement normal du dispositif de surveillance.
- en cas d'évolution anormale des mesures :
  - variation sur 7 jours calendaires des mesures > 0,5 mm ou variation absolue des mesures depuis la dernière initialisation >2 mm.
    - Evolution suivie sur deux jours supplémentaires pour détecter des artefacts. En cas de confirmation de l'évolution, le gestionnaire de site est contacté par télécopie, mail et téléphone. Le gestionnaire visite alors la zone pour vérifier des désordres apparents et le fonctionnement des cannes de convergence. En cas de désordre constaté, le prestataire de surveillance programme une visite d'expertise dans les 5 jours ouvrés.

La procédure de surveillance est présentée à titre d'exemple ci-après (les données professionnelles des intervenants ont été masquées).

PROCEDURE DE VERIFICATION DE ROUTINE ET DE VIGILANCE POUR LA SURVEILLANCE OPERATIONNELLE DE LA CARRIERE HEURTEBISE A JONZAC