

GUIDE



Ineris-230707-2806028-v2.0

Méthodes et outils d'inspection et d'auscultation en cavités souterraines

Synthèse et bonnes pratiques

Crédits photos :

@Ineris : pp. couverture, 11, 12, 13, 16, 17, 19, 20, 32, 33, 34, 36, 44, 45, 48, 49, 51, 54, 58, 59, 62

@Wikipédia : p. 9

@Multinnov : p. 17

@Igecav : pp. 17, 66

@BRGM : p. 37

@Cerema : pp. 40, 41, 50, 51, 55

@Léa Duran : p. 63

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

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

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Ce document s'inscrit dans la démarche et les actions engagées autour [la feuille de route « cavités »](#) en appui au BRNT/SRNH (bureau des risques naturels terrestres au sein du service des risques naturels et hydrauliques) de la DGPR (direction générale de la prévention des risques) du ministère en charge de l'environnement.

Il a été établi sur la base de l'expérience respective de l'Ineris, du BRGM et du Cerema, ainsi que des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives au sein de ces organismes. Il a fait l'objet d'une relecture par des professionnels et des collectivités susceptibles d'utiliser ou de diffuser ce document.

Ce document est destiné aux opérateurs spécialisés ainsi qu'aux maîtres d'œuvre et maîtres d'ouvrage confrontés à la gestion des cavités anthropiques abandonnées, en particulier les souterrains abandonnés et accessibles (anciennes carrières souterraines, marnières, souterrains-refuges, habitats troglodytiques, sapes de guerre...).

Rédactrice :

Catherine PINON (Ineris – Direction Sites et Territoires)

Comité de rédaction et de relecture :

- Cyrille BALLAND, Jean-Marie DAVESNE, Timothée DEFFRENNE, Amélie LECOMTE et Frédéric POULARD (Ineris)
- Jacques DEPARIS, Benjamin FRANCOIS, Ianis GAUDOT et Silvain YART (BRGM)
- Pierre AZEMARD, Raphaël BENOT, Florent BOURHIS, Cedric LEFEBVRE, Cyril RESPAUD et Emeric VEDIE (Cerema)

Avec la contribution et la relecture de :

- Irma APPORA (Pôle Risques majeurs de la Communauté urbaine d'Arras)
- Thierry DOBRZYNSKI (Direction générale des Services techniques de la Ville de Saint-Quentin)
- Laurent FUMAROLI (ANTEA Group)
- Gaël GOUILLON et Thomas RICHARD (IGECAV)
- Margaret HERBAUX (DGPR)
- Mandy MIGNON (S.I. Cavités 37)

SOMMAIRE

PRÉAMBULE	3
1 CONTEXTE ET OBJECTIFS	6
1.1 Contexte général	6
1.2 Objectifs	6
1.3 Démarche adoptée	7
1.4 Domaine d'application	7
1.5 Rappel des définitions	8
1.6 Contraintes liées au milieu	10
2 ÉVALUATION QUALITATIVE DE L'ÉTAT DE DÉGRADATION D'UNE CAVITÉ	11
2.1 Méthodologie	11
2.2 Types de dégradation	12
2.3 Facteurs aggravants et/ou déclenchants	12
3 MÉTHODES ET OUTILS DE DIAGNOSTIC EN CAVITÉ SOUTERRAINE ACCESSIBLE	14
3.1 Capteurs	14
3.2 Vecteurs	15
4 APPLICATIONS DANS LA PLATEFORME EXPÉRIMENTALE ET PÉDAGOGIQUE SAINT-MAXIMIN DE L'INERIS	19
5 SYNTHÈSE	22
6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES	26
7 BIBLIOGRAPHIE	27
8 GLOSSAIRE	29
9 ANNEXES - FICHES CAPTEURS	31

1.1 Contexte général

Le sous-sol du territoire français a toujours fait l'objet de travaux en souterrain destinés à l'extraction de matières minérales. L'utilisation historique de ce milieu a également donné lieu au creusement de multiples cavités destinées à la défense et l'aménagement du territoire (tunnels, cavernes de stockage, abris civils ou militaires, habitats troglodytiques...).

Les dimensionnements des exploitations souterraines récentes et des travaux de génie civil sont systématiquement précédés d'études destinées à évaluer les caractéristiques géomécaniques des terrains encaissants. Elles aboutissent à une évaluation de la stabilité des ouvrages projetés et à des mesures de confortations correspondantes établies à partir de retours d'expérience, de reconnaissances détaillées du massif et s'appuyant sur des calculs de plus en plus performants.

En revanche, les cavités plus anciennes (antérieures au XX^e siècle principalement) ont été creusées sans bénéficier des dimensionnements rigoureux et de l'encadrement technique, juridique et légal déployé aujourd'hui. Les exploitants avaient pour but l'exploitation optimale de la couche minérale convoitée, engendrant parfois des effondrements dommageables voire catastrophiques. Bien que l'expérience ait petit à petit permis d'améliorer le dimensionnement des exploitations et les techniques d'extraction pour garantir aux exploitants une plus grande sécurité, la stabilité à long terme des ouvrages souterrains n'est devenue une priorité que très récemment.

Dans ces conditions, la majorité des cavités issues d'exploitations anciennes sont susceptibles de présenter des dégradations pouvant entraîner des conséquences en surface, d'autant plus que l'évolution des dégradations géotechniques des édifices souterrains peuvent être très lentes et se conclure brutalement (fontis, ruptures fragiles...). Ces exploitations ont été presque systématiquement abandonnées en l'état et sont situées, le plus souvent, à des profondeurs inférieures à 50 m. Ce risque touche toutes les régions du territoire français. Les cavités abandonnées pouvant dater

de l'Antiquité, la connaissance de l'existence et du contour d'un grand nombre d'ouvrages ont été perdus et le nombre de cavités réel pourrait être très important.

1.2 Objectifs

Dans le cadre d'une analyse optimisée des risques géotechniques pour une cavité abandonnée, les études de stabilité permettent d'apprécier l'état des dégradations et de connaître au mieux les sollicitations qui sont appliquées par le massif encaissant. La précision du diagnostic influe sur l'orientation des choix technico-économiques qui seront retenus pour la sécurité publique et pour l'optimisation des traitements. Cette analyse dépend en partie des possibilités de mise en œuvre de techniques d'inspection et d'auscultation destinées à fournir des données qualitatives et/ou quantitatives sur la cavité.

Dans le cas d'une cavité anthropique (carrières souterraines, caves...), le travail d'expertise commence par la consultation des archives (éventuellement) existantes : cartes, plans, coupes, historique d'exploitation... Ensuite, lorsque l'accès est possible, l'inspection visuelle du milieu souterrain est réalisée et des moyens d'inspection et d'auscultation sont déployés. L'objectif est de dimensionner et de positionner la ou les cavités, d'en représenter l'état géotechnique, de caractériser la nature et la structure des matériaux, de diagnostiquer l'état de dégradation des ouvrages et des terrains, l'état de fracturation, et ce de la façon la plus fine possible selon les enjeux.

La réalisation d'une étude géotechnique intégrant la réalisation de mesures d'auscultation ne se justifie souvent que pour des sites présentant une vulnérabilité avérée en surface (présence de structures sensibles ou non renforcées) ou, ponctuellement, dans l'optique de la conservation des cavités (afin par exemple, d'y maintenir une activité de stockages ou dans le cadre d'un établissement recevant du public (ERP)).

Dans le cadre de son programme d'appui auprès de la direction générale de la prévention des risques (DGPR) du ministère, relatif aux risques gravitaires et à l'aménagement du territoire, l'Ineris a mené, en collaboration avec le BRGM et le Cerema, une synthèse des connaissances sur les techniques d'inspection et d'auscultation, in situ, en cavité souterraine abandonnée.

Elle est destinée à des opérateurs spécialisés et aux maîtres d'œuvre et maîtres d'ouvrage confrontés à la problématique des cavités anthropiques abandonnées (carrières souterraines en particulier) et comprend :

- ▶ une description de la démarche d'évaluation de l'état de dégradation d'une cavité ;
- ▶ une liste des techniques d'inspection et d'auscultation en souterrain, en particulier les plus récentes et/ou innovantes, et qui présentent un intérêt dans le cadre des études de stabilité spécifiques à d'anciennes cavités souterraines, pour préciser leur état de dégradation ;
- ▶ des exemples d'application de ces outils au sein de la plateforme souterraine pédagogique et expérimentale de l'Ineris ;
- ▶ des tableaux comparatifs et une synthèse des principaux atouts et contraintes, en cas de mise en œuvre de ces outils/techniques.

Sont joints à ce document : un glossaire des types de dégradation en cavité souterraine anthropique abandonnée, des fiches récapitulatives par outil/capteur comprenant notamment le domaine d'application, le(s) rendu(s) associé(s), les atouts et contraintes, des références...

1.3 Démarche adoptée

Un groupe de travail (GT) a été constitué en 2021 et regroupe les membres du Réseau scientifique et technique (RST) « cavités » : BRGM, Cerema et Ineris.

Piloté par l'Ineris, ce GT s'est réuni une première fois en 2021 puis à deux reprises en 2022 et 2023 pour rédiger et valider les fiches techniques. Deux séances de tests, en conditions réelles, au sein de la plateforme souterraine pédagogique et expérimentale de l'Ineris à Saint-Maximin (60) ont également été organisées en 2023 et 2024 afin de mettre en perspective, sur un même site, les différents outils cités dans ce document.

Le présent document technique est le fruit de cette collaboration et s'inscrit dans le cadre de la feuille de route « cavités », pilotée par l'Ineris.

1.4 Domaine d'application

Les techniques d'inspection et d'auscultation présentées dans ce document sont potentiellement utilisables dans tous les milieux souterrains, notamment les tunnels, les galeries isolées et les cavités à grande profondeur mais le type de cavités concernées par ce document sont principalement les **cavités souterraines abandonnées accessibles et d'origine anthropique**, c'est-à-dire des cavités issues de l'activité humaine avec un accès connu et localisé (puits, entrée en cave, fontis...) et pour lesquelles il n'y a plus de travaux d'extraction, ni d'exploitant connu. Ces cavités ont pour origine aussi bien l'extraction de matériaux non concédés (carrières souterraines, marnières...) que le creusement de refuges (souterrains moyenâgeux, habitats troglodytiques, sapes de guerre...).

Le présent document ne traite pas des mines (abandonnées ou non) ou des carrières souterraines en activité. Bien que les méthodes/outils qui sont présentés dans ce document soient globalement comparables à celles utilisés pour les mines (régime des concessions) et les carrières souterraines en activité (ICPE), il est rappelé que les mines et les carrières souterraines en activité relèvent de procédures administratives (réglementations, responsabilité...) et de contrôles différents. Pour autant, mines et cavités possèdent un point commun, celui d'affecter irrémédiablement le sous-sol, les mécanismes d'instabilité y pourvoyant étant identiques.

Ce document ne concerne pas les cavités naturelles (karst notamment).

Le présent document ne traite pas des techniques de surveillance, ni des méthodes de reconnaissance des cavités souterraines. Pour plus de détails sur ces thématiques, se reporter au guide de surveillance des cavités souterraines d'origine anthropique réalisé par l'Ineris en 2016 [5] et à la synthèse des connaissances sur les méthodes de reconnaissance, réalisée par le Cerema en 2020 [4].

1.5 Rappel des définitions

Dans le cadre d'une analyse de stabilité, le géotechnicien dispose de plusieurs outils destinés à acquérir, *in situ*, des informations sur les ouvrages souterrains et le massif encaissant.

L'inspection visuelle, l'auscultation et la surveillance sont, à ce titre, des techniques extrêmement utilisées qui concourent à établir ou à confirmer des diagnostics pertinents de l'état et de l'évolution de la stabilité d'une cavité.

Ces trois termes restent toutefois souvent confondus et parfois utilisés de manière inexacte. Ils recouvrent des approches complémentaires mais cependant différentes qu'il nous apparaît utile de préciser. Nous proposons donc de retenir, au moins dans le cadre de ce document, les définitions générales suivantes :

- **l'inspection** permet de déterminer un état apparent du site étudié. Elle est établie à partir d'un examen purement visuel du milieu (en souterrain et/ou en surface) et se base en priorité sur l'expérience du (ou des) géotechnicien(s) ;
- **l'auscultation** correspond à la mise en œuvre, localisée et limitée dans le temps, d'une technique plus ou moins sophistiquée qui détermine une ou plusieurs valeurs physiques propres à l'ouvrage et/ou à son encaissant (géométrie, fracturation, nature et structure des roches...) ;

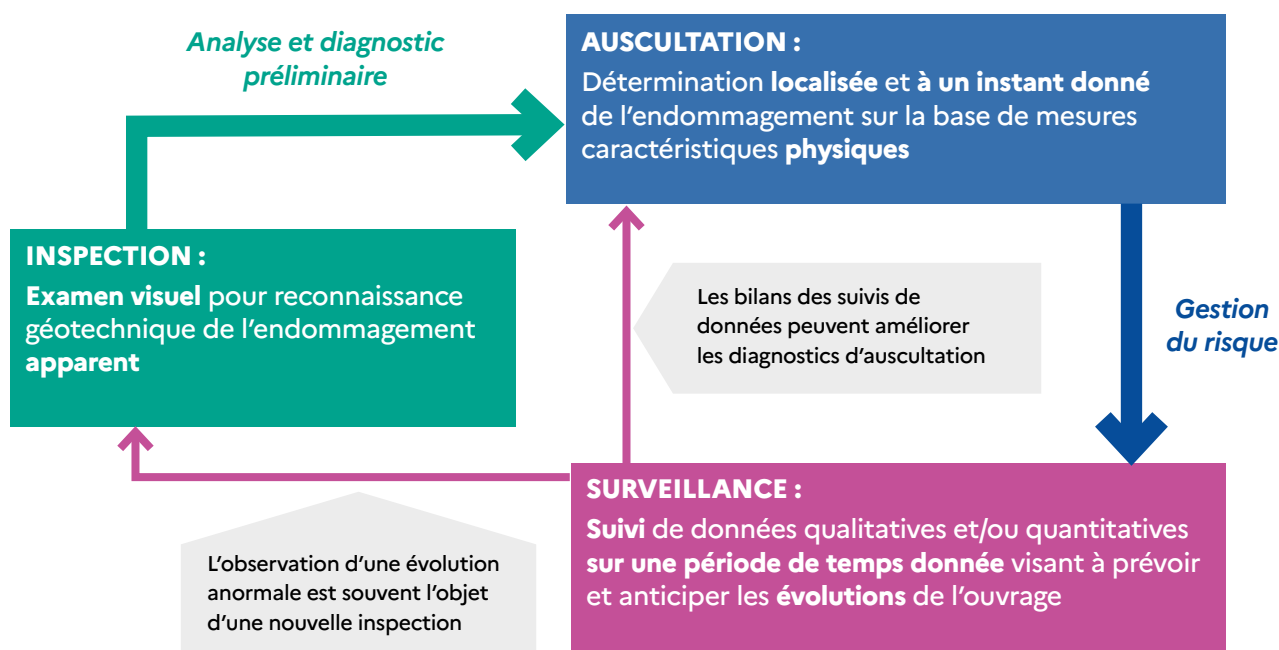
► **la surveillance** intègre obligatoirement la notion de durée, et suppose l'accumulation de données qualitatives ou quantitatives sur une période de temps suffisante (variable selon les méthodes) pour comprendre, prévoir et anticiper le comportement de l'ouvrage. L'analyse est alors basée sur les évolutions constatées de manière relative à un état de référence, et non sur les valeurs ponctuelles. Une inspection régulière est à ce titre une forme de surveillance.

Ces approches permettent d'acquérir les caractéristiques qui seront par la suite utilisées, par exemple dans des modèles de calcul ou en complément avec des essais menés en laboratoire¹.

Dans les faits, ces trois approches techniques peuvent être mises en œuvre successivement ou conjointement dans le cadre d'une étude géotechnique. En fonction des objectifs attendus, l'inspection est, si les contraintes environnementales le permettent, systématique, l'auscultation et la surveillance ne pouvant être réalisées de manière optimale sans une connaissance globale du site.

Les trois approches peuvent se résumer selon le schéma suivant.

Figure 1 : définition des notions d'inspection, d'auscultation et de surveillance [7].



¹ Ce rapport ne traite pas des essais en laboratoire qui peuvent être réalisés par ailleurs pour compléter l'analyse de la stabilité de l'ouvrage.

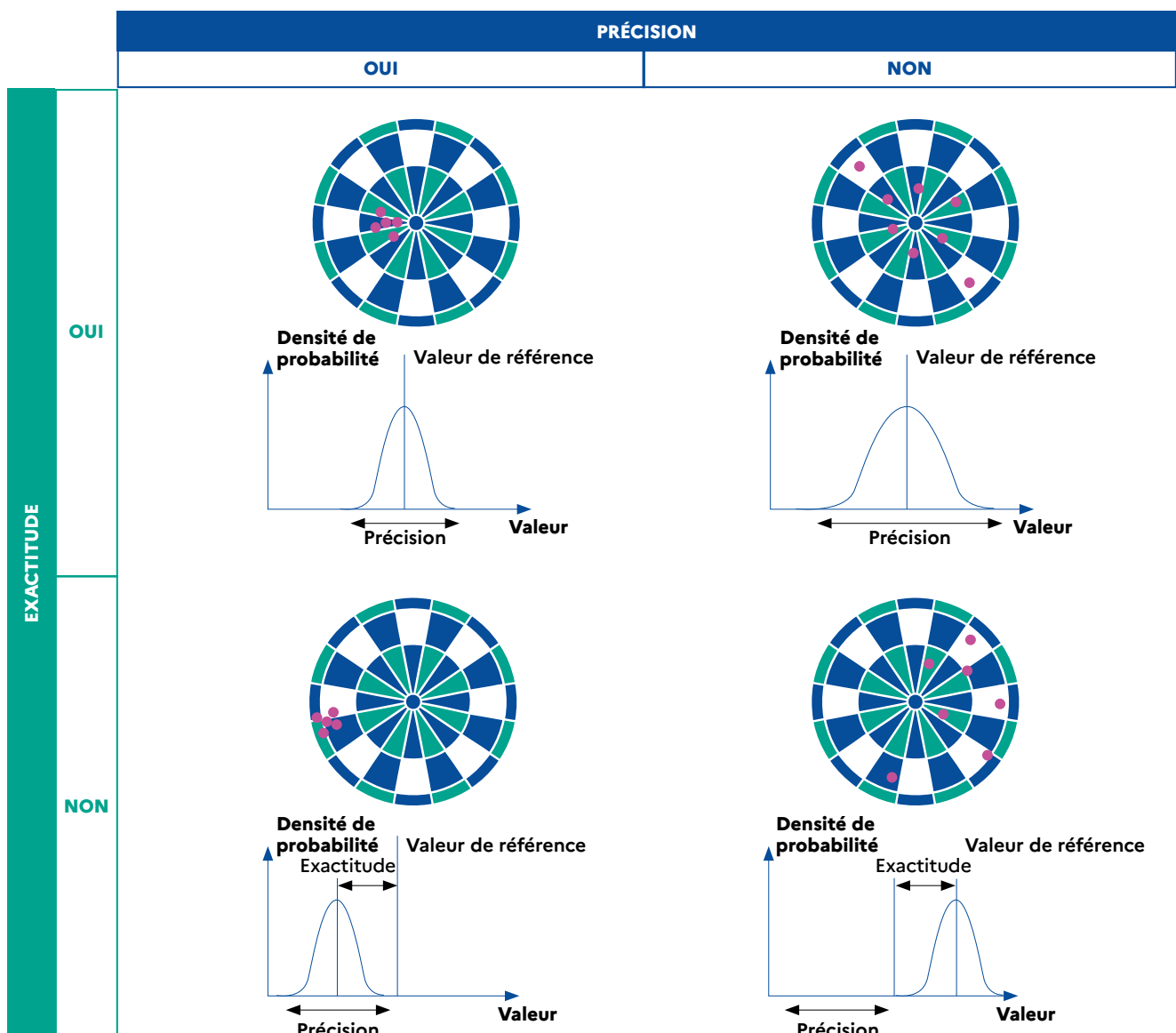
La mise en œuvre d'une technique d'auscultation s'effectue au sein du milieu souterrain, au contact direct ou au plus près du massif à investiguer. Elle se doit de fournir des données tangibles permettant d'infirmer ou de confirmer des hypothèses émises à divers stades de l'étude, notamment vis-à-vis des caractéristiques mécaniques du milieu étudié, de son endommagement réel ou de son comportement futur.

On peut également considérer que l'auscultation dans une cavité souterraine fait appel à un ou plusieurs dispositifs mesurant *in situ* une grandeur physique pour évaluer, directement ou indirectement, des caractéristiques du milieu. La mise en place de ces dispositifs peut nécessiter un déploiement logistique plus ou moins important. L'interprétation des résultats intègre généralement des phases de dépouillement et d'analyse incontournables.

Enfin, dans le cas où les inspections visuelles et/ou les techniques d'auscultation sont réalisées à intervalles réguliers, elles peuvent participer à la surveillance de l'ouvrage dans la mesure où elles permettent de mettre en évidence des évolutions.

Dans ce document, il sera mentionné, pour certains outils ou capteurs, leur exactitude et/ou leur précision. **Exactitude et précision** sont des termes souvent utilisés de manière interchangeable. Cependant, ils désignent deux concepts complètement différents en matière de mesure : une mesure exacte n'est pas forcément précise et inversement. L'exactitude et la précision décrivent l'erreur de mesure mais l'exactitude est la proximité des mesures à la valeur vraie, tandis que la précision (ou variabilité) est la proximité des mesures les unes par rapport aux autres (figure 2).

Figure 2 : schéma explicatif de l'exactitude et de la précision appliquées à des lancers de fléchettes.



1.6 Contraintes liées au milieu

Outre la difficulté majeure consistant à appréhender et à traduire les caractéristiques du milieu naturel, par définition d'origine hétérogène et discontinue, la mise en œuvre des diverses techniques d'auscultation et d'inspection dans le domaine des cavités souterraines peut être soumise à de nombreuses contraintes :

- ▶ la percolation des eaux depuis la surface (liée à la faible épaisseur et la nature du recouvrement) engendrant un ruissellement souvent régulier dans les cavités et conférant ainsi au milieu une humidité importante et constante (entre 80 % et 95 %) ;
- ▶ des conditions parfois difficiles d'accessibilité : l'aménage-repli du matériel devant s'effectuer par puits à échelons, dans des galeries irrégulières de faible ouverture... ;
- ▶ des conditions d'hygiène et de sécurité incertaines : état de stabilité, local et/ou global, de l'ouvrage souterrain peu ou non connu, voire dangereux ;
- ▶ une atmosphère confinée : déficit d'oxygène, gaz plus ou moins toxiques, vapeurs nocives ou explosives... ;
- ▶ l'absence de source d'énergie (électricité), d'éclairage naturel et de produits « consommables » comme l'eau ;
- ▶ une configuration géométrique des ouvrages souterrains et un mode de creusement qui peut notamment engendrer des erreurs d'interprétation ;
- ▶ des contraintes environnementales (présence de chiroptères par exemple).

Les caractéristiques de température et d'hygrométrie au sein des cavités souterraines sont très particulières et ne doivent pas être négligées lors de la phase de conception d'une expérimentation. Ainsi, l'utilisation de capteurs et de dispositifs d'acquisition, sensibles à ces conditions, suppose des étalonnages adaptés ou une connaissance précise de l'environnement du site (mesures de température et d'hygrométrie au cours des essais). Cela nécessite également leur prise en compte lors des dépouillements.

Tous ces paramètres vont déterminer les objectifs d'auscultation, les techniques et leur opérabilité. En général, les techniques d'inspection et d'auscultation sont mises en œuvre dans des sites reconnus et sécurisés, après une reconnaissance préalable des cavités.

2 ÉVALUATION QUALITATIVE DE L'ÉTAT DE DÉGRADATION D'UNE CAVITÉ

2.1 Méthodologie

Lorsque les cavités sont accessibles avec des conditions de sécurité acceptables (géotechniques, ventilation...), leur géométrie et leur état géotechnique sont basés généralement sur un examen visuel détaillé des indices de dégradation et d'évolution, indispensable au diagnostic de stabilité [18].

Le géotechnicien en charge de l'inspection inventorie, documente et décrit méthodiquement les dégradations ou indices d'instabilité repérés visuellement pour établir un diagnostic de stabilité de l'ensemble ou d'une partie du site. Si besoin, il peut proposer des travaux de mise en sécurité localisés (confortement, boulonnage, purge, etc.) ou des solutions de gestion du risque cavité à plus grande échelle (surveillance, traitement, délocalisation des enjeux...) en fonction de scénarios potentiels.

Une étape principale de ce diagnostic consiste à établir une carte (ou zonage) géotechnique de la cavité à partir de ces caractéristiques topographiques, géologiques, géométriques et d'exploitation, en relevant les signes manifestes ou prémonitoires de sa dégradation ou de sa rupture (figure 3).

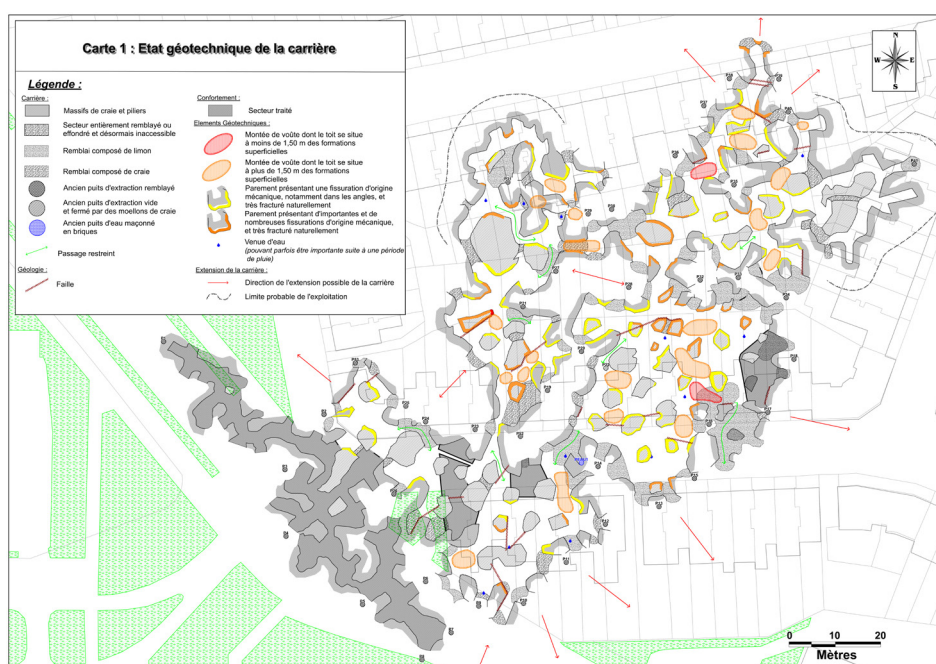
Ces signes peuvent être des déformations de structures, des fractures ou fissures mécaniques affectant le toit des galeries ou des piliers lorsqu'ils sont sollicités au-delà de leur capacité de résistance, des ruissellements d'eau... Les signes de dégradations doivent être qualifiés en termes d'intensité (depuis la fissure fine de rupture initiale jusqu'à la ruine totale d'un pilier) et de stade d'évolution.

Pour le toit et les parements de pilier, l'examen visuel est complété localement par un contrôle du décollement des bancs, par exemple en « sonnant » la dalle suspecte avec un marteau ou une pince à purger.

Dans l'examen, il convient de ne pas omettre les dispositifs de confortement qui témoignent des désordres antérieurs, soit contemporains de l'exploitation, soit relativement récents.

Pour parfaire cet examen visuel et approfondir le diagnostic de stabilité, il existe actuellement des outils (ou méthodes) d'auscultation qui ont fait leur preuve en souterrain et qui permettent de qualifier, voire quantifier les observations visuelles. Ces outils, objets du présent document, sont explicités dans le chapitre 3.

Figure 3 : exemple d'une carte géotechnique issue d'un diagnostic d'une cavité.



2.2 Types de dégradation

Dans une cavité accessible, les dégradations observées peuvent se situer au niveau [16] :

- **des piliers** : fissures d'angles, épaufrures, écaillage, chutes de parement, pilier ruiné, en diabolo (figure 5) ou en colonnettes... ;
- **du toit** : flexion de la dalle, fracture dans l'axe médian de la galerie due à la flexion, fracture avec rejet, fracture de cisaillement sur le bord de la galerie, décollement de plaques, chute de blocs, éboulement, montée de voûte (figure 4), fontis... ;

Figure 4 : montée de voûte dans une ancienne carrière.

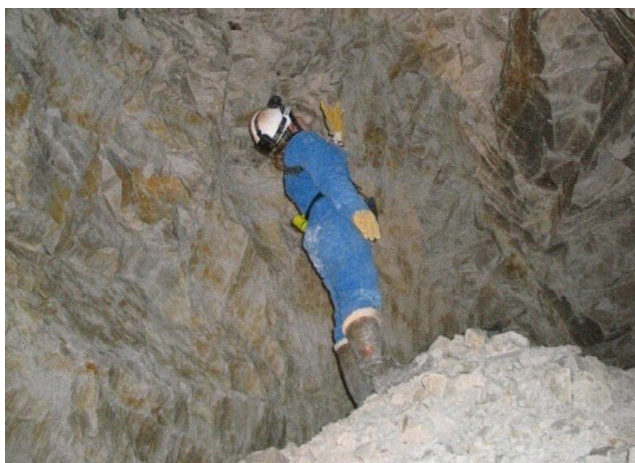


Figure 5 : piliers en diabolo dans une ancienne carrière.



- **du mur (ou sol)** : fissuration de la dalle, gonflement, soufflage, poinçonnement... ;
- **des accès** : fracture, chute de la dalle du toit et de blocs au niveau des fronts extérieurs, débouillage de puits, rupture du bouchon en tête de puits... ;

- **des dispositifs de confortement** : rouille/corrosion pour les éléments métalliques, fissuration pour les éléments bétonnés, effritement des joints pour les éléments maçonnés, pourrissement pour le bois...

Afin de factueliser l'observation de ces dégradations, l'homogénéiser et la rendre répétable quel que soit l'intervenant, une liste-type d'observations/levés/mesures en cavité souterraine est proposée avec des définitions. Ce glossaire, en chapitre 8 de ce document, a été partagé avec les différents opérateurs français impliqués dans le domaine du risque « cavités » (Cerema, BRGM et Ineris) afin d'utiliser un vocabulaire commun. Cette liste se restreint volontairement aux termes géotechniques liés aux dégradations du massif rocheux.

Il est à compléter avec les termes techniques spécifiques aux dégradations sur les structures de soutènement (métalliques, en bois, en maçonnerie...) et avec les observations liées notamment à l'environnement qui sont considérées comme des facteurs aggravants (cf. paragraphe suivant).

2.3 Facteurs aggravants et/ou déclenchants

Les processus de dégradation qui engendrent des situations accidentelles résultent souvent de la combinaison d'une ou plusieurs configurations défavorables (facteurs de prédisposition) [7] et de l'occurrence de facteurs externes (facteurs aggravants et/ou déclenchants) susceptibles de modifier les conditions d'équilibre du milieu et d'accélérer la rupture [18]. Il est donc important de les dénombrer et si possible, de les qualifier dans le cadre d'un diagnostic de stabilité d'une cavité.

Ces facteurs peuvent être naturels ou anthropiques :

- **hygrométrie et altération du milieu** : une modification significative de la teneur en eau du milieu, par infiltration d'eaux superficielles ou battements de la nappe phréatique (figures 5 et 8), peut altérer considérablement la résistance mécanique du matériau. En passant de l'état sec à l'état saturé, certains grès perdent de l'ordre de 40 % de leur résistance en compression uniaxiale et les craies plus de 50 %. Ou encore, l'eau, légèrement acide, peut dissoudre la roche puis à terme l'altérer, en particulier au droit des fractures par lesquelles elle circule (figure 6) ;

Figure 6 : figures de draperie liées à une venue d'eau régulière dans une ancienne carrière.



Figure 7 : déchets dans un ancien puits de carrière.



► **fluage et influence du temps** : l'expérience montre que certaines roches soumises à une contrainte constante sur une longue durée encaissent, outre une déformation instantanée, une déformation progressive au cours du temps (plus ou moins marquée selon la nature des roches). Ce phénomène physique appelé « fluage » dépend de plusieurs facteurs (la nature du matériau, sa teneur en eau, les contraintes qu'il subit, la température...). Les mises en saturation hydraulique, conditionnées par les variations pluviométriques saisonnières semblent aussi favoriser le fluage par effet de fatigue. La résistance des roches décroît également dans le temps par altération progressive (vieillessement) du matériau ;

► **mise en charge hydraulique** : de nombreux effondrements surviennent « après » une longue période pluvieuse [7] ;

► **végétation** : la présence de racines ou radicelles, qui en grossissant, peuvent faire évoluer les fissures existantes (figure 8) ;

Figure 8 : développement de racines dans une carrière abandonnée partiellement ennoyée.



► **facteurs anthropiques** : les activités de surface (construction, terrassement, dépôts de remblais, circulation, transports...) engendrent des surcontraintes, des vibrations ou des ébranlements susceptibles d'accélérer par surcharge statique ou dynamique le processus naturel de dégradation des cavités. Certaines cavités peuvent avoir été utilisées comme décharge de déchets de toutes sortes (faïencerie, sacs plastiques, briques, matériaux métalliques... figure 7) et devenir sources de pollution (éluats, gaz...). Enfin, des venues d'eau anthropiques (eaux pluviales, eaux usées) peuvent participer à l'altération du milieu et à la dégradation mécanique de l'encaissant ;

► **météorologie (gel/dégel)** : les entrées en cavage et les puits, soumis aux intempéries et notamment au gel/dégel, se dégradent plus vite que les parties non exposées.

3 MÉTHODES ET OUTILS DE DIAGNOSTIC EN CAVITÉ SOUTERRAINE ACCESSIBLE

Il existe de nombreuses méthodes et techniques d'inspection et d'auscultation d'une cavité souterraine. L'objectif du présent document n'est pas d'en faire un inventaire exhaustif mais de détailler les techniques les plus récentes et/ou innovantes applicables dans le cas de cavités abandonnées et accessibles.

Il a été choisi de dissocier le capteur (ou outil) considéré et le vecteur choisi pour mouvoir et/ou transporter ce capteur. En effet, certains d'entre eux (scanner laser mobile, caméra vidéo...) peuvent être embarqués sur plusieurs types de vecteur (drone terrestre ou drone volant par exemple). Il a donc été décidé de mettre en valeur cette interactivité en donnant la possibilité de coupler les « capteurs ou méthodes » avec les différents « vecteurs » identifiés actuellement comme opérationnels en cavité souterraine.

3.1 Capteurs

Parmi les techniques d'inspection et d'auscultation en cavité souterraine accessible, on distinguera les capteurs ou techniques dits « superficiels » qui visent à représenter et cartographier la surface visible de la cavité (photogrammétrie, scanner laser...) et les capteurs ou techniques dits « profonds ou pénétratifs » (méthodes géophysiques notamment) qui fournissent une image de l'« intérieur » de la roche et nécessitent une interprétation des résultats. Il est parfois nécessaire, dans certains contextes, d'associer plusieurs types de capteurs et mesures (« superficielles » et « profondes ») pour caractériser au mieux la cavité étudiée.

► Techniques d'inspection et d'auscultation « superficielles »

On y trouve notamment les inspections visuelles en souterrain. Grâce à la solution numérique de saisie des données, la phase de « prise de notes », peut se faire dorénavant via un formulaire installé sur une tablette qui a la particularité de fonctionner hors connexion internet. Ce formulaire permet de com-

pléter les informations relatives à une dégradation, *in situ*. Ces données regroupent les caractéristiques et la localisation des dégradations géotechniques identifiées lors de l'inspection visuelle en cavité souterraine.

Parmi les techniques « superficielles », les technologies LiDAR² ou par photogrammétrie vont permettre de construire un modèle tridimensionnel (nuage de points 3D et/ou maillage) d'une structure souterraine à partir de mesures laser ou de photographies.

La numérisation des cavités sous forme de nuages de points 3D à l'aide d'un scanner laser (technologies LiDAR) peut être réalisée avec un support fixe ou terrestre, sur un trépied (TLS³) ou mobile (drone, véhicule, personne...), associé à un algorithme SLAM⁴.

► Techniques profondes d'auscultation

Les techniques dites « profondes » comprennent les méthodes géophysiques. Habituellement utilisées pour détecter les cavités depuis la surface ou en forages, certaines peuvent être appliquées pour appréhender l'état d'endommagement du massif rocheux constitutif des parements des cavités.

Les méthodes géophysiques liées à la propagation des ondes apparaissent comme les plus intéressantes puisqu'elles permettent généralement d'évaluer de manière non destructive l'état d'un massif. Un certain nombre de types d'ondes sont utilisables et chacune présente ses avantages et inconvénients. On retiendra, pour notre application en cavité souterraine abandonnée et accessible, les méthodes sismiques, électriques et électromagnétiques⁵ (radar géologique).

Les ondes sismiques et le radar géologique sont plus adaptés pour déterminer la fracturation et les modules d'élasticité. La tomographie électrique, quant à elle, est plus sensible aux caractéristiques hydrauliques de la roche comme la teneur en eau ou l'altération qui se traduit par des anomalies de

² Light detection and ranging (détection et télémétrie par la lumière). Le lidar est une technologie laser qui permet de capturer les surfaces d'un objet ou d'un espace en trois dimensions.

³ Terrestrial laser scans.

⁴ Simultaneous localization and mapping.

⁵ Des descriptions détaillées de ces techniques géophysiques et des préconisations d'utilisation figurent dans de nombreux ouvrages de référence (chapitre 7). Des recommandations complètes sur l'utilisation de ces méthodes sont, par ailleurs, régulièrement remises à niveau par des associations spécialisées (AFTES, AGAP).

Tableau 1 : liste des capteurs/méthodes opérationnels pour l'inspection et l'auscultation géotechnique d'une cavité.

N° de fiche	Capteur/méthode d'auscultation et d'inspection	Technique superficielle	Technique profonde
2025-C1	Scanner laser 3D terrestre	X	
2025-C2	Scanner laser 3D mobile	X	
2025-C3	Photogrammétrie	X	
2025-C4	Saisie numérique de données d'inspection visuelle	X	
2025-C5	Inspection vidéo	X	
2025-C6	Relevés topographiques simplifiés	X	
2025-C7	Radar géologique (mode bistatique)		X
2025-C8	Imagerie sismique		X
2025-C9	Imagerie électrique		X
2025-C10	Sonar	X	

Le groupe de travail s'est accordé sur la liste des capteurs et techniques présente dans ce document (tableau 1). Ces capteurs font chacun l'objet d'une fiche descriptive en annexes.

Au total, dans ce rapport, 10 fiches « capteur/méthode » ont été rédigées par les membres du GT. Elles exposent, en annexe de ce document, les principes, les domaines d'application, les grandeurs mesurées, les types de restitution, les techniques et moyens de mise en œuvre et de traitement, les précisions et incertitudes, les avantages et les inconvénients, les limites et perspectives pour chacune des techniques/capteurs. Des cas d'études et/ou références sont également proposés afin d'illustrer chaque outil/méthode.

3.2 Vecteurs

Les vecteurs pour mouvoir les capteurs/méthodes, listés dans le paragraphe précédent, sont :

- ✓ **Humain**
- ✓ **Trépied**
- ✓ **Dispositif pour inspection en forage**
- ✓ **Drone volant**
- ✓ **Drone terrestre roulant**
- ✓ **Drone quadrupède (robot-chien)**

Le vecteur, le plus couramment utilisé en souterrain pour mettre en œuvre les capteurs cités dans ce rapport, reste l'homme sous réserve que les conditions d'accessibilité et de sécurité soient garanties dans la cavité à diagnostiquer.

Les principales caractéristiques de ces « vecteurs » sont synthétisées dans le tableau 2.

Remarque : les colonnes « Avantages/Inconvénients » reflètent une situation en 2024 qui devrait évoluer substantiellement dans les prochaines années.

Tableau 2 : caractéristiques principales des vecteurs identifiés pour l’inspection et l’auscultation géotechnique d’une cavité.

	Drone volant	Drone quadrupède
Description	Drone volant (parfois avec cage rotative de protection), pilotable à distance.	Drone terrestre sur pattes (robot-chien), pilotable à distance.
Mise en œuvre en cavité*	+++	++
Durée de fonctionnement moyenne* (pour 1 batterie)	+	++
Charge utile*	+	++
Vitesse de déplacement*	++ à +++	++
Capteurs embarqués	Photogrammétrie (fiche 2025-C3). Scanner laser mobile (fiche 2025-C2). Caméra vidéo (fiche 2025-C5).	Scanner laser terrestre (fiche 2025-C1). Scanner laser mobile (fiche 2025-C2). Photogrammétrie (fiche 2025-C3). Caméra vidéo (fiche 2025-C5).
Avantages	Sécurité et flexibilité des interventions. Cage rotative de protection (sur les drones spécifiques au souterrain).	Sécurité et flexibilité des interventions. Auto-recharge.
Inconvénients	Technologie onéreuse. Formation recommandée pour piloter un drone en souterrain. Portée et autonomie limitées (notamment en environnement souterrains non linéaires). Attention aux conditions de sécurité pour la cavité, l'engin et les personnes : mouvements d'air générés par les hélices, chocs contre parois...	Technologie onéreuse. Uniquement sur des pentes inférieures à 30°. Difficulté à escalader des éboulis. Portée et autonomie limitées (notamment en environnement souterrains non linéaires).
Commentaires	Éclairage embarqué par défaut. Bonne stabilité (assistée) en vol. Portée de plus de 150 m en ligne de vue et au moins 50 m en vol en immersion avec obstacles.	Éclairage embarqué par défaut. Capable d'éviter les obstacles. Mise en station automatisée. Stabilisation assistée.
Coût*	+++	++ à +++
Exemples	Elios 3® de FLYABILITY Stereo 2® de MULTINNOV.	Cyberdog® de XIAOMI SPOT® de Boston Dynamics.
Illustrations		

*+ : technique facile à +++ : complexe à mettre en œuvre.

+++ : longue/rapide/lourde (> 3 m/s ou > 20 kg) à + : courte/lente/légère (< 1 m/s ou < 10 kg).

+++ : onéreuse (> 50 k€) à + : économique (< 10 k€).

Drone roulant	Trépied	Dispositif pour inspection en forage
Véhicule robotisé (sur roues ou chenilles), pilotable à distance.	Trépied sur jambes télescopiques.	Trépied et câble ou train de tiges rigide pour ausculter un effondrement ou via un forage ou puits.
+	+ à ++	++ à +++
+++	Dépendant de l'opérateur	Dépendant de l'opérateur
+	+++	+++
+	Dépendant de l'opérateur	Dépendant de l'opérateur
Photogrammétrie (fiche 2025-C3). Caméra vidéo (fiche 2025-C5).	Scanner laser terrestre (fiche 2025-C1). Photogrammétrie (fiche 2025-C3). Caméra vidéo (fiche 2025-C5). Relevés topo simplifiés (fiche 2025-C6).	Scanner laser mobile (fiche 2025-C2). Photogrammétrie (fiche 2025-C3). Caméra vidéo (fiche 2025-C5). Sonar (fiche 2025-C10).
Sécurité et flexibilité des interventions. Coque étanche. Capacités de flottaison.	Léger et facile d'utilisation.	Possibilité d'ausculter, depuis la surface, une cavité inaccessible à l'homme. Si la sonde est fixée sur un train de tige fixe, alors on peut orienter avec précision la sonde.
Technologie onéreuse. Uniquement pour des pentes inférieures à 30°. Difficulté à escalader des éboulis.	Trépied spécifique à chaque capteur embarqué. Hauteur minimale auscultée > 80 cm.	Technologie onéreuse. Profondeur d'investigation limitée à une centaine de mètres.
Éclairage embarqué par défaut. Capable d'éviter et de franchir (certains) les obstacles. Stabilisation assistée.	Stabilisation manuelle (niveau à bulle et boussole).	Éclairage embarqué par défaut. Stabilisation manuelle. Uniquement pour forage tubé et peu dévié, de 112/125 mm minimum de diamètre. Dimensions minimales du vide à ausculter = 0,20 m de hauteur et 1 m de diamètre.
++	+	+ à ++
Review® de MULTINNOV.	Trépied pour inspection au scanner laser terrestre.	Trépied pour sonde LiDAR.
		

Tableau 3 : connexions possibles et opérationnelles en 2024 entre capteurs et vecteurs dans le domaine de l’inspection et de l’auscultation des cavités souterraines abandonnées.

Vecteur Outil	Humain	Trépied	Dispositif pour inspection via forage/puits	Drone volant	Drone terrestre roulant	Drone quadrupède (robot-chien)
Saisie numérique de données d’inspection visuelle	oui	non	non	non	non	non
Relevés topographiques simplifiés	oui	oui	non	non	non	non
Photogrammétrie	oui	oui	oui	oui	oui ⁶	oui ⁶
Scanner laser terrestre	non	oui	oui	non	oui	oui
Scanner laser mobile	oui	non	non	oui	oui	oui
Caméra vidéo	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Sonar	non	non	oui	non	non	non
Imagerie électrique	oui	non	oui	non	non	non
Imagerie sismique	oui	non	oui	non	non	non
Radar géologique	oui	non	oui	non	non	non

Actuellement, les connexions capteurs/vecteurs possibles et opérationnelles pour le diagnostic géotechnique en cavité souterraine abandonnée sont illustrées dans le tableau 3.

Compte tenu des tests menés récemment, une perspective intéressante serait d’adapter le dispositif de radar géologique sur un drone terrestre roulant.

Notons enfin qu’il existe d’autres vecteurs, comme le drone nautique et le drone sous-marin, qui sont en cours de développement pour leur utilisation en diagnostic géotechnique (cartographie 3D et imagerie) de cavités souterraines envoyées partiellement ou totalement.

4 APPLICATIONS DANS LA PLATEFORME EXPÉRIMENTALE ET PÉDAGOGIQUE SAINT-MAXIMIN DE L'INERIS

Afin de mettre en perspective, sur un même site, les différents outils (temps d'acquisition, type de rendu, précision/exactitude...) cités ci-dessus, des tests ont été menés, à Saint-Maximin (60), dans la plateforme⁷ souterraine expérimentale et pédagogique de l'Ineris.

Le Cerema, le BRGM et l'Ineris se sont relayés pour y tester sur trois zones distinctes (montée de voûte, pilier, chambres et piliers) les outils suivants :

- ▶ scanners 3D terrestre et mobile (figures 9 et 10) ;
- ▶ relevés topographiques simplifiés ;
- ▶ photogrammétrie (figure 12) ;
- ▶ drone volant avec caméra vidéo embarquée ;
- ▶ drone volant avec lidar embarqué (figure 11) ;

Figure 9 : levés par scanner laser terrestre d'une zone de chambres et piliers (Ineris).



Figure 11 : levés 3D par drone volant (BRGM).



- ▶ radar géologique et imagerie électrique (figures 13 et 14).

Pour chacune des méthodes testées, des « fiches » ont été complétées afin d'y renseigner les principales caractéristiques de mise en œuvre et de traitement des données de chaque outil ou méthode sur la plateforme souterraine de Saint-Maximin. Le débriefing de ses premiers tests a permis d'échanger sur les difficultés et améliorations à apporter dans le cadre d'une inspection ou auscultation en souterrain et d'illustrer les fiches techniques en annexes de ce document.

Figure 10 : levés par scanner laser mobile d'une montée de voûte (BRGM).



Figure 12 : levés par photogrammétrie d'un pilier dégradé (Cerema).



⁷ Liens internet : Plateforme expérimentale et pédagogique | Ineris prestations Nos plateformes d'essais en grand | Ineris

Figure 13 : auscultation par radar géologique du toit d'une cavité (Cerema).



Figure 14 : auscultation par imagerie électrique d'un pilier dégradé (Cerema).



Les tableaux suivants récapitulent les résultats des tests de différents outils d'auscultation, menés au sein de la carrière souterraine de Saint-Maximin.

Remarque : la carrière souterraine de Saint-Maximin est un environnement souterrain « facile » en termes d'accès, de géométrie, d'aérage... Les temps d'acquisition seraient sans doute différents dans un environnement plus complexe. L'expérience montre que le scan mobile est plus aisé d'utilisation dans des

milieux à fortes contraintes (géométrie complexe, difficultés d'accès...) et donc encore bien plus rapide que le scan terrestre.

Ces tests, menés en grandeur et conditions réelles sur la plateforme scientifique et pédagogique de l'Ineris, ont également permis d'évaluer la dérive des capteurs LiDAR⁸, la dispersion (ou précision) de leurs mesures et leur exactitude.

Tableau 4 : résultats des tests d'inspection et d'auscultation menés dans un secteur de chambres et piliers.

Technique/Outil	Objectif	Type de rendu	Mise en œuvre*	Temps d'acquisition	Durée de traitement	Volume des données acquises	Précision
Levés topographiques simplifiés – DISTO X2®	levés géométriques	plan 2D	★	150 min	30 min	150 Ko	métrique
Scanner laser 3D terrestre – FARO X330®	levés géométriques	nuages de points 3D	★ à ★★★	50 min	2 h	20 Go	2 mm
Scanner laser 3D mobile – ZEB Revo®	levés géométriques	nuages de points 3D	★ à ★★★	20 min	30 min	142 Mo	16 mm
Scanner laser 3D mobile – ZEB Horizon®	levés géométriques	nuages de points 3D	★ à ★★★	20 min	30 min	1,3 Go	16 mm
Scanner laser 3D mobile V par drone volant – Elios 3®	levés géométriques	nuages de points 3D et vidéo	★ à ★★★	8 min	30 min	10 Go	22 mm
Inspection vidéo par drone volant – Elios 1®	levés géotechniques	vidéo	★★	2 x 8 min	30 min ⁹	2 Go	SO
Saisie numérique de données d'inspection visuelle	levés géotechniques	fiches de dégradation et carte géotechnique	★	180 min	180 min	100 Ko	SO

★ : technique facile à ★★★ : complexe à mettre en œuvre.

⁸ Scanners lasers mobiles ou terrestre, y compris embarqués sur drone volant.

⁹ Le traitement de la vidéo comprend les étapes suivantes : visionnage et nettoyage de la vidéo, amélioration des images et pointage des points d'intérêt. Il s'agit donc déjà d'une première analyse géotechnique ; ce qui n'est pas le cas pour la phase dite de traitement des données pour les outils de type scanner laser 3D.

Tableau 5 : résultats des tests d'auscultation menés sur un pilier de la carrière souterraine de Saint-Maximin.

Technique/outil	Objectif	Type de rendu	Mise en œuvre	Temps d'acquisition	Durée de traitement	Volume des données acquises	Précision
Photogrammétrie	levés géométriques	nuages de points 3D	★★	2 h pour 2 faces opposés du pilier (100 m ²)	3 h ¹⁰	150 Mo	1-2 cm ¹¹
Scanner laser 3D terrestre – FARO X330®	levés géométriques	nuages de points 3D	★ à ★★★	1 h pour 4 faces du pilier et galeries environnantes (1000 m ²)	2 h	20 Go	2 mm
Imagerie électrique (méthode dipôle/dipôle)	endommagement du massif	profils et cartographies de résistivité	★★★	4h pour 1 face du pilier	2 h	3 Mo	SO
Radar géologique	endommagement du massif	profils radar	★★	4h, 2 x 3 profils pour chacune des 2 faces opposées du pilier ¹²	3 h	3 Mo	SO

★★ : technique facile à ★★★ : complexe à mettre en œuvre.

¹⁰ Cette durée de traitement comprend la mise à l'échelle du modèle 3D issu de la photogrammétrie, à partir des données TLS.

¹¹ Par rapport aux données TLS.

¹² Ce temps inclut les phases de préparation et de calage de la méthode.

5 SYNTHÈSE

Le choix de la technique ou méthode d'inspection ou d'auscultation à utiliser en souterrain dépend fondamentalement des objectifs (cartographie, expertise géotechnique, caractérisation de l'état d'endommagement...), des rendus et du niveau de précision que l'on recherche.

Compte tenu des objectifs fixés, il s'agit de déterminer la méthode la plus performante (rapidité, rendement, etc.), la plus fiable, et si possible la plus facile de mise en œuvre sur le plan technique. Il faut également considérer les conditions générales d'hygiène et de sécurité du personnel (travaux en souterrain) et le coût.

Les tableaux suivants proposent des critères d'évaluation à prendre en compte dans le choix de la (ou des) méthode(s) d'inspection ou d'auscultation en cavité souterraine abandonnée accessible :

- le tableau 6 présente les outils d'inspection et d'auscultation en fonction des objectifs recherchés. Ce tableau n'intègre pas la notion de surveillance ;
- le tableau 7 récapitule les grandeurs mesurées et les types de rendu pour chaque outil/technique d'inspection et d'auscultation en souterrain ;
- les tableaux 8 et 9 comparent les différentes techniques, respectivement superficielles puis profondes, à partir de critères de choix essentiels.

Tableau 6 : choix des techniques d'inspection et d'auscultation en fonction des objectifs recherchés.

Outil		Saisie numérique de données d'inspection visuelle	Relevés topographiques simplifiés	Photogrammétrie	Scanner laser 3D terrestre ou mobile	Caméra vidéo	Sonar	Imagerie sismique	Imagerie électrique	Radar géologique
Objectif	Cartographie 2D ou 3D		X	X	X		X			
	Expertise géotechnique	X	X	X	X	X	X			
	Endommagement du massif							X	X	X
Objet à ausculter	Object ponctuel	X		X	X	X		X	X	X
	Cavité dans son ensemble	X	X		X	X	X			
	Cavité ennoyée	non	non	non	non	non	oui	non	non	oui
Vecteur possible	Humain	X	X	X	X	X		X	X	X
	Trépied		X	X	X	X				
	Drone (volant, roulant, quadrupède)			X	X	X				
	Dispositif en forage			X	X	X	X	X	X	

Tableau 7 : synthèse des grandeurs mesurées et des types de rendu pour chaque outil/technique d'inspection et d'auscultation en souterrain.

Outil	Type de technique		Grandeur mesurée	Principaux résultats	Vecteur(s) possible(s)			
	Technique superficielle	Technique profonde			Humain	Trépied	Drone (volant, roulant, quadrupède)	Dispositif en forage/puits
Saisie numérique de données d'inspection visuelle	X		Description et localisation des dégradations/désordres.	Fiches et cartes géotechniques numériques.	X			
Relevés topographiques simplifiés	X		Cartographie en 2D et 3D de la cavité.	Plan et coupes de la cavité.	X	X		
Photogrammétrie	X		Modèle numérique 3D.	Photos et nuage de points 3D.	X	X	X	X
Scanner laser 3D terrestre ou mobile	X		Cartographie en 3D d'une cavité et de son environnement.	Nuage de points 3D.	X	X	X	X
Caméra vidéo	X		Observations visuelles de la cavité et des dégradations/désordres.	Vidéos et photographies.	X	X	X	X
Sonar	X		Cartographie en 3D d'une cavité ennoyée (par ondes sonores).	Nuage de points 3D.				X
Imagerie sismique		X	Temps de trajet et/ou atténuation des ondes sismiques.	Imagerie de l'endommagement par cartographie des vitesses de propagation des ondes, anisotropie de vitesse.	X			X
Imagerie électrique		X	Différence de potentiel. Résistivités/conductivités apparentes.	Cartographie de l'altération et de la teneur en eau par profils et cartographies de résistivité.	X			X
Radar géologique		X	Variations d'amplitude du champ électromagnétique en fonction du temps de propagation.	Radargramme pour l'identification d'objets géologiques et mécaniques (discontinuités, altération, cavités, eau...).	X			X

Tableau 8 : comparaison des techniques d'auscultation et d'inspection géotechnique en souterrain (techniques « superficielles »).

Technique/outil	Mise en œuvre	Temps/ Surface d'acquisition	Durée de traitement	Volume des données acquises/ Surface d'acquisition	Coût (matériel)	Précision et exactitude	Densité maximale de points d'acquisition
Saisie numérique de données d'inspection visuelle	★	★ à ★★	★	★	★	SO	SO
Relevés topographiques simplifiés	★	★★ à ★★★	★★	★	★	décimétrique à métrique	★
Scanner laser 3D terrestre	★ à ★★	★★	★★	★★★	★★ à ★★★	millimétrique	★★★
Scanner laser 3D mobile	★ à ★★	★	★	★ à ★★	★★ à ★★★	centimétrique	★★
Photogrammétrie	★★	★★★	★★★	★ à ★★	★	millimétrique à centimétrique	★★
Scanner laser 3D en forage	★★ à ★★★	★★	★★	★★★	★★★	centimétrique à décimétrique	★★★
Sonar en forage	★★ à ★★★	★★★	★★★	★★	★★★	décimétrique	★★
Caméra vidéo en forage	★	★★	★	★ à ★★	★	SO	SO
Caméra vidéo sur drone volant	★ à ★★	★	★	★★ à ★★★	★★	SO	SO
Scanner laser 3D mobile sur drone volant	★ à ★★	★	★ à ★★	★★ à ★★★	★★★	centimétrique	★★

Tableau 9 : comparaison des techniques d'auscultation géophysique en souterrain (techniques « profondes »).

Technique/outil	Mise en œuvre	Temps/Surface d'acquisition	Durée de traitement	Volume des données acquises/ Surface d'acquisition	Coût (matériel)
Radar géologique	★★	★★ à ★★★	★ à ★★	★ à ★★	★★
Imagerie sismique	★★★	★★★	★★★	★	★★
Imagerie électrique	★★★	★★★	★★	★★	★

★★★ : technique complexe à mettre en œuvre à ★ : technique facile à mettre en œuvre.

★★★ : long/plusieurs Go à ★ : rapide/quelques Ko.

★★★ : onéreuse (> 50 k€) à ★ : économique (< 10 k€).

Plus particulièrement, on retiendra :

Pour la photogrammétrie et les technologies LiDAR :

- ▶ l'avantage de la photogrammétrie est d'obtenir, à moindre coût, un nuage de points 3D, en couleur, d'une zone particulière de la cavité. Cependant, ce nuage n'est pas à l'échelle et non géoréférencé ;
- ▶ la photogrammétrie focalise l'auscultation sur une partie de l'ouvrage souterrain, la partie supérieure de la montée de voûte par exemple (alors que les technologies LiDAR cartographient plus largement l'espace visible) ;
- ▶ il faut être rigoureux sur les réglages de l'appareil photo et l'éclairage est un point primordial en photogrammétrie ;

- ▶ la méthode de cartographie 3D par scanner laser suppose, sur le terrain, une continuité des mesures. Par exemple, pour l'auscultation du pilier de la carrière de Saint-Maximin, il est nécessaire de cartographier tout le tour du pilier pour assurer une continuité du nuage de points ; il n'est pas possible de cartographier seulement les deux faces opposées, auscultées par ailleurs par les autres méthodes (géophysiques et photogrammétrie) ;
- ▶ la lecture et le traitement des nuages de points 3D nécessitent des logiciels spécifiques et distincts pour la photogrammétrie et les scanners laser mobile et terrestre (embarqués ou non) ;
- ▶ la densité de points du nuage 3D est plus importante avec un scanner terrestre (TLS), qu'un

scanner laser mobile de type ZEB Horizon (ou ZEB Revo), mais il y a plus de zones occultées (zones d'ombres) avec le TLS qu'avec un scanner laser mobile (par exemple, selon la position du trépied et donc de la mesure, les détails des éboulis au sol d'une montée de voûte peuvent être masqués pour le TLS mais visibles par les scanners mobiles) ;

- ▶ la mise en œuvre des scanner laser 3D mobile (quel que soit le vecteur choisi) nécessite une vigilance particulière et un mode opératoire rigoureux pour éviter les dérives du capteur.

Pour les méthodes géophysiques :

- ▶ les techniques de caractérisation de l'endommagement superficiel d'un massif par mesures géophysiques reposent sur l'analyse de signaux ayant traversé ledit massif, ce qui implique que la mesure n'est pas directe. Elles doivent donc tenir compte des caractéristiques physiques du milieu (saturation de la roche, état de dégradation global, caractéristiques élastiques du milieu) et suffisent rarement à elles-mêmes pour réaliser un diagnostic complet ;
- ▶ les méthodes électromagnétiques et électriques permettent de caractériser l'endommagement du massif. Le radar permet de préciser localement (ou plus largement par extrapolation) la configuration géométrique du modèle géotechnique utilisé pour les calculs de stabilité. Ces méthodes géophysiques sont relativement peu employées à ce jour dans le domaine de l'analyse de la stabilité, bien que leur utilisation puisse être sollicitée dans des cas très particuliers (recherche de caractérisation d'un réseau de fractures ou de décollement au toit pour caractériser par exemple l'avancement d'un fontis) ;
- ▶ la mesure par résistivité électrique nécessite l'implantation d'électrodes (piquets) dans la paroi et donc de forer dans le massif ;
- ▶ le temps d'acquisition des méthodes électriques et radar est long car la préparation (temps de mise en place) est chronophage (tracer des profils, foration...). Les mesures en elles-mêmes sont rapides. Soulignons toutefois que la mise en œuvre (et par conséquent le temps d'acquisition) des mesures radar est très dépendante de l'état de la surface à ausculter (rapide si la surface est lisse et à « hauteur d'homme » et plus longue et plus complexe si la surface est irrégulière et en hauteur) ;

- ▶ le traitement de l'imagerie électrique doit intégrer la topographie du pilier (issu d'un scanner laser par exemple) et cette étape est chronophage ;
- ▶ la méthode électrique permet d'obtenir une image jusqu'à environ 2 m dans le pilier avec la configuration des électrodes choisie dans le cas particulier du pilier de la carrière de Saint-Maximin. Avec le radar géologique, on pourrait y ausculter jusqu'à 4 m de profondeur dans le pilier (soit dans certains cas, la totalité du pilier).

Pour les autres outils :

- ▶ la solution numérique de saisie des données géotechniques simplifie le travail des experts, notamment le partage et le reporting des données grâce à un portail web. Il permet un gain de temps et l'uniformisation des données d'inspection ;
- ▶ la rapidité et la souplesse de mise en œuvre des levés topographiques simplifiés, permettant de travailler dans des conditions difficiles (étroitures, zones boueuses, partiellement inondées...), courantes en spéléologie, associés à un coût modéré du capteur en font un outil bien adapté pour un premier relevé. On obtient ainsi rapidement un plan, avec une précision de 1 à 3 % des longueurs de cheminement, pour pouvoir ensuite, si besoin, engager des campagnes de mesures plus fines ;
- ▶ la présence de masses métalliques ou de câbles sous tension perturbe fortement, voire interdit, l'utilisation de la méthode par levés topographiques simplifiés. Cela engendre des perturbations de la boussole électronique (magnétomètres). De fait, l'opérateur doit être vigilant et ne doit pas avoir sur lui d'objet métallique, batteries magnétiques, mousquetons en acier, piles... ;
- ▶ la vidéo du drone permet d'observer en temps réel, par exemple des zones d'une montée de voûte qui sont peu visibles par le géotechnicien. Ces zones pourront aussi être observées, plus tard, après traitement, au bureau, sur les nuages de points issus des scanners laser 3D.

Les techniques d'inspection et d'auscultation des ouvrages souterrains sont nombreuses et ont fait l'objet de développements importants notamment au cours du XX^e siècle, en particulier pour les usages industriels tels que le génie civil ou les industries extractives (mines, tunnels...). L'inspection et l'auscultation relative au diagnostic de stabilité d'anciennes cavités n'ont pas toujours pu bénéficier de tels développements notamment parce que ces sites présentent des conditions très particulières (absence d'électricité et d'eau, risques liés à une atmosphère confinée ou accès difficile aux zones d'intérêt) mais également parce que les moyens financiers mobilisables sont moins importants que ceux du génie civil et des industries extractives (même si de nombreuses cavités sous-cavent des enjeux à protéger). Toutefois, les solutions techniques ont évolué ces dernières années et évoluent encore rapidement avec l'arrivée de moyens mobiles de type drone et leurs facultés à s'affranchir de certaines contraintes du milieu souterrain.

Les comparatifs menés sur les différents outils d'inspection et d'auscultation de cavités abandonnées montrent une disparité dans les temps de mise en œuvre et de traitement, les types de rendus, la précision... il est donc fondamental de définir dès le départ, ce que l'on cherche et le niveau de précision attendu. Dans certains contextes, il convient d'associer plusieurs types de capteurs et de mesures pour caractériser au mieux la cavité étudiée.

Précisons également que les outils, vecteurs et données techniques associées, mentionnés dans ce document reflètent une situation et des tests réalisés jusqu'en 2024, les technologies devraient évoluer substantiellement dans les prochaines années. Le drone sous-marin téléguidé, compatible avec de nombreux capteurs et accessoires (caméra, sonar, bras simple ou multifonctions...) pourrait, par exemple, être utilisé lors de missions d'inspection en cavité abandonnée noyée (partiellement ou totalement).

Les techniques géophysiques (de type radar de sol) présentent un potentiel intéressant pour caractériser l'endommagement du massif mais elles mériteraient d'être adaptées pour plus d'efficacité en souterrain : améliorer la mise en

œuvre en utilisant un niveau laser pour tracer les profils, tester une antenne aérienne (sans contact) pour limiter les artéfacts lors du déplacement de l'antenne radar sur la paroi rocheuse...

La gestion des données générées lors d'une inspection ou d'une auscultation de cavité souterraine abandonnée reste un critère important à considérer. S'il est recommandé au décideur de collecter et de stocker les données brutes des capteurs (afin de pouvoir les retravailler si besoin), il est également nécessaire de rendre compréhensible les résultats (images, mesures...) et de prévoir des exports facilement utilisables et valorisables (raster, tableur...) plutôt que des données numériques lourdes et nécessitant des logiciels spécifiques.

Enfin rappelons que, dans le cas où les inspections visuelles et/ou les techniques d'auscultation (scan 3D et photogrammétrie notamment) sont réalisées à intervalles réguliers, elles peuvent participer au suivi de l'ouvrage dans la mesure où elles permettent de mettre en évidence des évolutions entre deux inspections.

- [1] AFTES (2005) - *Méthodes d'auscultation des ouvrages souterrains*, GT19R2F1 – Revue Tunnels et ouvrages souterrains n°187, janvier-février 2005.
- [2] BALLESTEROS D., DOMINGO-CUESTA MJ., JIMENEZ-SANCHEZ M. et GONZALEZ-PUMARIEGA P. (2013) - *Tape-compass-clinometer, DistoX or total station, what is the best method to elaborate a cave survey? A case study in El Pindal Cave, Spain* :
https://www.researchgate.net/publication/256375336_Tape-compass-clinometer_DistoX_or_total_station_what_is_the_best_method_to_elaborate_a_cave_survey_A_case_study_in_El_Pindal_Cave_Spain
- [3] BALLAND C. (2021) – *Conception d'une auscultation géophysique combiné des piliers de carrière* - Rapport Ineris-204392-2722374.
- [4] BENOT R., P. AZEMARD et COTE P. (2020) – *Méthodes de reconnaissance des cavités – Synthèse des connaissances actuelles* – Collection Références, Cerema :
<https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/methodes-reconnaissances-cavites>
- [5] BENNANI M., BOUFFIER C. et FRANCK C. (2016) - *Guide de surveillance des cavités souterraines d'origine anthropique*, rapport Ineris référencé DRS-16-156834-00810B :
<https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/drs-16-156834-00810b-rap-guide-surveillance-unique-1484642941.pdf>
- [6] BERANGER N. (2017) - *La gestion du risque cavités souterraines. Guide à l'usage des collectivités* - Collection Références, Cerema, 118 p. :
<https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/gestion-du-risque-cavites-souterraines>
- [7] BOUFFIER C. (2015) - *Préconisations pour la mise en œuvre de techniques d'auscultation dans les carrières souterraines* – Rapport Ineris DRS-15-149556-11615A.
- [8] CARRIER A. et BOTTELIN P. (2022) - *Damage assessment of supporting pillars in an underground cave using joint inversion of electrical resistivity and P-wave velocity, Bailly (France)* - Pure and Applied Geophysics, volume 179, issue 1, pp. 45-67.
- [9] CHERKAOUI A. et HERBAUX M. (2017) – *Guide Aléa versant sous-cavé – Caractérisation et évaluation* – Guide Ineris/Cerema référencé Ineris 17-164712-08773A :
[Guide Aléa versant rocheux sous-cavé – Caractérisation et évaluation | Ineris](#)
- [10] CONIL N. et GOMBERT P. (2024) - *Amélioration de la connaissance des mécanismes d'instabilité et de l'impact du changement climatique sur les carrières souterraines abandonnées en France* – Rapport Ineris-212824-2763492-v1.0 :
https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Ineris_212824_2763492_Instabilit%C3%A9%20des%20carri%C3%A8res%20souterraines_%20v1_0.pdf
- [11] *Reconnaissance géophysique : le code de bonne pratique AGAP* : www.agapqualite.org
- [12] CONIL N., PINON C., TOUSSAINT R. et KLEIN E. (2022) - *Les enjeux et atouts des solutions numériques pour la gestion des données d'inspection géotechnique : l'exemple du portail e.cenaris* - 11^{es} journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur, Lyon.
- [13] DEWEZ T., YART S., THUON Y., PANNET P. et PLAT E. (2017) - *Towards cavity-collapse hazard maps with Zeb-Revo handheld laser scanner point clouds* - The Photogrammetric Record 32, n°160 : 354-76 :
<https://doi.org/10.1111/phor.12223>

- [14] DEWEZ T., YART S., MASSON F., PANNET P., THUON Y. et DEVOS A. (2017) - *Quantification géotechnique 3D de fractures souterraines au ZEB-Revo : les carrières d'Hermonville (Marne, Est de la France)* – Journées Aléas Gravitaires (JAG) à Besançon, France : <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-01586641>
- [15] FAUCHARD C. et POTHERAT P. (2004) - *Détection de cavités souterraines par méthodes géophysiques*. PN CriTerre, co-édition LCPC, 168 p.
- [16] IFSTTAR (2014) – *Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées. Guide méthodologique* - Collection Environnement / Les risques naturels.
- [17] Ineris, LCPC (2005) - *Évaluation et gestion des risques liés aux carrières souterraines abandonnées. Séminaire de restitution et de valorisation des travaux Ineris – Réseau des LPC - Actes des journées scientifiques du LCPC / ENPC, Paris.*
- [18] POTHERAT P. (2005) - *L'opération de recherche « carrières souterraines abandonnées » : localisation, diagnostic de stabilité, gestion : rapport de synthèse* – LCPC.
- [19] TRITSCH J.J., TOULEMONT M., DURVILLE J.-L, POTHERAT P. (2002) - *Évaluation des aléas liés aux cavités souterraines : guide technique du LCPC/INERIS/MEDD* – Collection Environnement / Les risques naturels, 130 p.
- [20] YART S., JACOB T., HANNION Y., PANNET P. et MASSON F. (2018) - *Le scanner laser 3D mobile, un outil complémentaire à la microgravimétrie pour la détection fine de cavités souterraines en milieu urbain. Application aux crayères de Champagne* - 26e réunion des sciences de la terre (RST) à Lille, France : <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-01854834>

8 GLOSSAIRE

Types de dégradation géotechnique rencontrée en cavités souterraines abandonnées

Type d'observation/ levé/mesure	en toit/ voûte	sur pilier/ pare- ment	au sol/ mur	sur essor/ puits	en front de cavage	sur conforte- ment	Description
Altération karstique	X	X	X	X	X		Zone affectée de dissolution naturelle provoquant un vide parfois rempli (avec de l'argile, du sable...) par la suite.
Bloc ou masse ou pierre en surplomb	X	X		X	X	X	Bloc ou masse ou pierre qui fait saillie, qui avance dans le vide, relativement aux terrains rocheux environnants.
Chute de pierres ou de blocs	X	X		X	X	X	Chute de masses rocheuses résultant de l'action de la pesanteur et affectant le plus souvent des matériaux rigides et fracturés tels que du calcaire, du grès, des roches cristallines, etc.
Chute de plaquettes/ épaufure	X	X		X	X	X	Chute de plaques ou d'éclats de roche en général de faible épaisseur.
Ciel tombé = chute de toit	X						Lorsque le banc de ciel déterminé lors de l'exploitation vient à céder (= chute du premier banc de toit), on parle de ciel tombé qui constitue souvent une amorce de cloche de fontis.
Cisaillement	X	X				X	Fracture de rupture découpant dans la diagonale une masse rocheuse (typiquement pilier ou bancs de toit) en deux compartiments contigus par suite de forces entraînant le déplacement de l'une par rapport à l'autre.
Cloche de fontis = montée de voûte	X						Évolution et aggravation d'un ciel tombé qui progresse vers la surface en traversant les couches géologiques surincombantes. Ce phénomène prend une forme de tronconique ou semi-elliptique (voûte) et est susceptible de déboucher en surface (fontis).
Débouillage	X	X		X			Vidange brutale d'un remplissage argileux naturel ou d'un remblai anthropique (la plupart du temps sous l'effet d'une saturation en eau) à l'intérieur d'un conduit karstique subvertical ou dans un orifice vertical, pouvant entraîner en surface, l'apparition d'un effondrement ou affaissement d'emprise limitée.
Décollement de toit	X						Banc situé en ciel qui fléchit et provoque une ouverture visible au droit d'un joint de stratification.
Dégradation en diabolos		X				X	Écaillage progressif des bords d'un pilier réduisant ainsi de façon sensible sa surface portante et lui donnant une forme de diabolos. Ce phénomène traduit souvent une charge excédant la résistance à la compression du matériau.
Diaclase = fracture naturelle	X	X	X	X	X		Fracture naturelle, souvent subverticale, d'origine tectonique, sans rejet, qui affecte plusieurs couches de terrains.

Type d'observation/ levé/mesure	en toit/ voûte	sur pilier/ pare- ment	au sol/ mur	sur essor/ puits	en front de cavage	sur conforte- ment	Description
Dièdre prédécoupé	X	X	X	X	X	X	Bloc découpé par au moins deux plans de fissures, naturelles et/ou mécaniques, sécants.
Écaille décollée/ écaillage	X	X		X	X	X	Dégradation mécanique d'une paroi rocheuse, liée souvent à l'état de contraintes, conduisant au décollement de plaques ou d'éclats de roche. Dégradation souvent identifiée par sonnage du « creux » au marteau.
Écrasement		X				X	Déformation verticale se traduisant par un écrasement de la structure et l'apparition de fractures plus ou moins dense.
Faïençage	X						Ensemble de fissurations mécaniques, de craquelures de la surface du toit d'une cavité.
Faille	X	X	X	X	X		Fracture naturelle d'importance affectant toute la masse sédimentaire, elle peut être associée à des déplacements.
Fissure mécanique	X	X	X	X	X	X	Cassure au niveau du substratum rocheux dont l'origine est liée au creusement ou à une sollicitation trop forte sur la roche.
Fléchissement du toit	X					X	Concavité (déplacement vertical vers le bas) du toit de la cavité, liée à une déformation des bancs.
Gonflement		X	X			X	Augmentation du volume d'une formation géologique d'origine chimique ou mécanique.
Rupture (d'un pilier) « sandwich »		X					Réduction de la hauteur et rupture en traction d'un pilier par écrasement de ses bancs les plus déformables.
Soufflage			X				Soulèvement apparent du sol de la cavité notamment consécutif à l'enfoncement des piliers (poinçonnement) dans la formation sous-jacente sol.
Tassement du sol			X				Déplacement vertical apparent du sol (notamment remblai) de la cavité.
Zone effondrée (en souterrain)	X	X	X		X	X	En souterrain, secteur souvent inaccessible résultant de la rupture des appuis ou du toit d'une cavité souterraine.

9 ANNEXES

Fiches capteurs

N° de fiche	Capteur/méthode d'auscultation et d'inspection
2025-C1	Scanner laser 3D terrestre
2025-C2	Scanner laser 3D mobile
2025-C3	Photogrammétrie
2025-C4	Saisie numérique de données d'inspection visuelle
2025-C5	Inspection vidéo
2025-C6	Relevés topographiques simplifiés
2025-C7	Radar géologique (mode bistatique)
2025-C8	Imagerie sismique
2025-C9	Imagerie électrique
2025-C10	Sonar

FICHE 2025-C1 : SCANNER LASER 3D TERRESTRE

✓ Principe de la méthode/outil

Numérisation (technologie LiDAR) des cavités et enjeux associés, sous forme de nuages de points 3D à l'aide d'un scanner laser en position statique.

Champs d'application :

Objet ausculté :

Ensemble des parties accessibles de la cavité (pilier, parement, mur-sol, toit-voûte, confortement, puits/essors...).

- ☒ Pour cavité hors d'eau ;
- ☒ en conditions de sécurité et d'atmosphère acceptables : atmosphère respirable et faible dangerosité du site si opérateur humain. Pour les autres vecteurs, pas d'atmosphère explosive.

Cavité accessible en sécurité pour un opérateur (> 80 cm) ou de dimensions suffisantes si le capteur est monté sur un autre vecteur (dispositif en forage, drone, robot...).



Exemple d'un scanner laser 3D terrestre sur trépied
FARO Focus 3D X330.

Vecteurs associés

- ☐ Humain
- ☒ Trépied
- ☒ Dispositif pour inspection en forage
- ☐ Drone volant
- ☒ Drone terrestre roulant
- ☒ Drone quadripède (robot-chien)

Conditions nécessaires et pré-requis

Prévoir des points de repère de position connue (points GPS en extérieur ou idéalement squelette topographique à l'intérieur de la cavité) pour permettre un géoréférencement du nuage de points.

Pour le recalage des nuages, selon la méthode appliquée, prévoir suffisamment de zone de recouvrement ou alors des cibles de référence en commun entre chaque station.

Si la numérisation du site doit se faire en couleur, prévoir suffisamment de lumière.

Distance maximale d'auscultation

300 m.

Grandeur(s) mesurée(s)

Cartographie en 3D d'une cavité et de son environnement.

Types de restitution et format des données

Un nuage de points en 3D complet (plusieurs centaines de millions de points à plusieurs milliards) obtenu après traitement des données avec des logiciels spécifiques (RealWorks® par exemple). Le format de la donnée source est dépendant du logiciel utilisé (LAS, E57, ASCII...).

Pour un rendu encore plus réaliste, les nuages de points peuvent être colorisés avec les appareils photo intégrés aux scanners.

Possibilité de traitements basiques (échantillonnage, réalisations de coupes horizontales/verticales, mesures de distance) ou plus complexes (maillage, calcul de volume, données d'entrée pour modélisation géomécanique...) sur le nuage de points.

Après traitement, possibilité de créer des plans, coupes, images, vidéos, plateforme de visualisation web, visite virtuelle 360°...et d'exporter les données dans de nombreux formats DAO et SIG : DWG/DXF, SHP, TIF...

La numérisation des parcelles en surface permet de déterminer l'épaisseur des terrains de recouvrement au-dessus de la cavité.

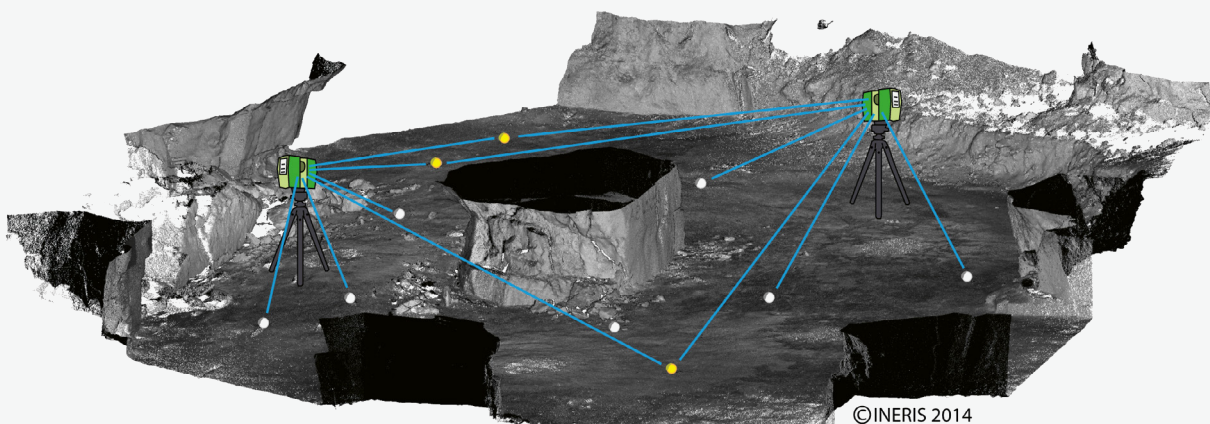
Le nuage de points peut être exploité pour l'identification et la caractérisation des discontinuités et des instabilités affectant la cavité, appuyant ainsi le géotechnicien dans son diagnostic de stabilité.

Description de la méthode/outil :

Le scanner laser 3D émet un faisceau laser qui est ensuite réfléchi sur une surface puis renvoyé directement à l'appareil. Ainsi, la distance et les coordonnées du point d'impact peuvent être calculées. En multipliant des millions de fois et sur 360° ces mesures de distance, un nuage de points en trois dimensions, géoréférencé dans l'espace est obtenu.

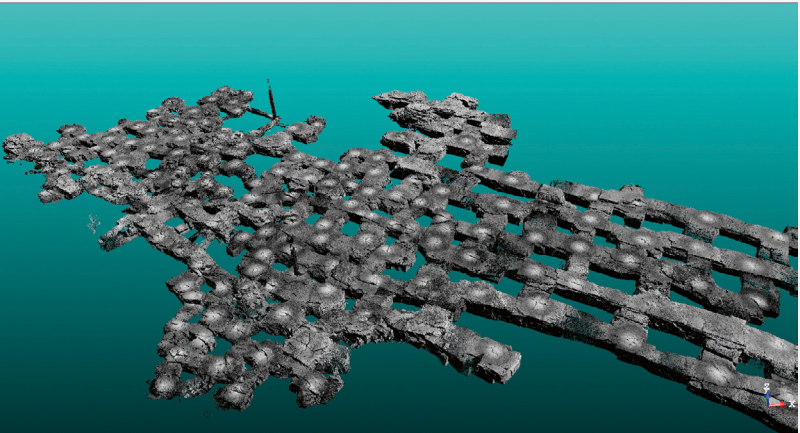
Le scanner laser terrestre est basé sur un système d'acquisition statique.

Pour numériser une cavité d'extension importante en trois dimensions, il est souvent nécessaire de réaliser plusieurs stations. En effet, l'appareil numérise uniquement l'environnement « visible ». Dans le cas où une salle ou une galerie n'est pas directement visible par le scanner, il est nécessaire de déplacer le scanner sur une autre position afin de réaliser une seconde station et ainsi de suite. La multiplication des stations permet ainsi de minimiser les « zones d'ombres ». Le repositionnement des stations est ensuite réalisé automatiquement grâce à des repères ou des cibles normalisées (sphères de diamètre 139 mm par exemple), visibles à partir de plusieurs stations.



©INERIS 2014

Principe d'utilisation du scanner laser 3D dans le cas de plusieurs stations
(en jaune les cibles visibles par les deux stations).

Opérateurs mobilisés (nombre, compétences...)	Un opérateur minimum, deux idéalement pour guidage dans les cavités labyrinthiques et assistance sur les passages délicats. Les opérateurs doivent avoir une connaissance minimale des instabilités en milieu souterrain pour une acquisition optimale.
Traitement de la donnée (liste des tâches)	Assemblage de l'ensemble des stations relevées sur le site et génération d'un unique nuage de points 3D. La plupart des logiciels (RealWorks® par exemple) sont désormais capables d'assembler rapidement et automatiquement chaque nuage de points (avec ou sans les cibles). Suppression, manuelle et automatique (via des outils et des filtres dédiés) des points parasites liés à certaines surfaces ou matériaux (surface de l'eau par exemple). Géoréférencement du nuage de points 3D.  Exemple de nuage de points obtenu après assemblage des stations et suppression des points « parasites ».
Précision et incertitude des outils et/ou du rendu	Précision entre les stations : quelques millimètres. Incertitude du nuage de points géoréférencé : dépend de la précision du GPS utilisé (en l'occurrence pluricentimétrique à métrique).
Limites de la méthode/ outil	Numérisation uniquement de l'environnement « visible ». Le scanner ne peut pas numériser un objet localisé sous l'eau.
Couplage/perspectives/ développements	À coupler avec d'autres techniques d'inspection (scanner laser mobile, photogrammétrie, inspection visuelle...). Les modèles 3D de cavités acquis au scanner laser peuvent être valorisés dans toutes les méthodes nécessitant une connaissance de la géométrie 3D des cavités : modélisation géologique et géomécanique, correction de l'effet des cavités connues sur des mesures microgravimétriques...
Autres champs d'application	Possibilité de surveillance d'une cavité par comparaison d'acquisitions répétées dans le temps.

Avantages	Inconvénients
• Appareil relativement léger et facile d'utilisation. • Localisation très précise (millimétrique) des évènements (écaillage, chutes de blocs, fracturations) survenus dans une cavité. • Outil très adapté pour des missions d'inspection et de surveillance des cavités. • Outil adapté pour la valorisation et la communication (animation vidéo).	• Nécessite une position statique pour effectuer les mesures. • Temps de numérisation pour chaque station pouvant varier de 2 à 15 minutes selon les paramètres souhaités (résolution, qualité, prise de photos...). • Gestion complexe du nuage de points 3D très dense (plusieurs dizaines voire plusieurs centaines de Go) et ressources informatiques importantes (logiciel spécifique et ordinateur puissant). • Nombreuses stations nécessaires pour éviter les « zones d'ombres ».

Cas d'application – exemples - références

- Cartographie de carrières souterraines pour zonage PPRN (Châtellerault - 86).
- Cartographie d'une carrière souterraine pour inspection géotechnique (Saint-Maximin - 60).
- Cartographie et modèle numérique d'une modélisation géomécanique de carrière (Château Landon - 77).

Mise en œuvre	Temps/Surface d'acquisition	Durée de post-traitement	Volume des données acquises	Coût (matériel)	Densité maximale de points d'acquisition
★ à ★★★ ¹	★★ ²	★★ ²	★★★ ²	★★ à ★★★ ³	★★★ ²

¹ ★★★ : technique complexe à mettre en œuvre à ★ : technique facile à mettre en œuvre .

² ★★★ : long/plusieurs Go à ★ : rapide/quelques Ko.

³ ★★★ : onéreux (> 50 k€) à ★ : économique (< 10k€).

FICHE 2025-C2 : SCANNER LASER 3D MOBILE

✓ Principe de la méthode/outil

Numérisation des cavités (technologie LiDAR) sous forme de nuages de points 3D à l'aide d'un scanner laser en mouvement.

Champs d'application :

Objet ausculté :

Ensemble des parties accessibles de la cavité (pilier, parement, mur-sol, toit-voûte, confortement, puits/essors...).

- ☒ Pour cavité hors d'eau ;
- ☒ en conditions de sécurité et d'atmosphère acceptables : atmosphère respirable et faible dangerosité du site si opérateur humain. Pour les autres vecteurs, pas d'atmosphère explosive.

Cavité accessible en sécurité pour un opérateur (> 80 cm) ou de dimensions suffisantes si le capteur est monté sur un autre vecteur (sonde, drone, robot...).



Exemple d'un scanner laser 3D mobile
ZEB Revo®.

Vecteurs associés

- ☒ Humain
- ☐ Trépied
- ☐ Dispositif pour inspection en forage
- ☒ Drone volant
- ☒ Drone terrestre roulant
- ☒ Drone quadrupède (robot-chien)

Conditions nécessaires et pré-requis

Prévoir un levé au GPS d'un ou plusieurs points communs à la surface et au souterrain pour permettre un géoréférencement du nuage de points. Présence de rugosité dans l'environnement à scanner. Éviter les parois lisses de type ouvrages maçonnés.

Disposer d'un minimum de quatre points de repère de position connue pour le géoréférencement des nuages de points : points GPS en extérieur, ou idéalement squelette topographique à l'intérieur de la cavité.

Distance maximale d'auscultation

100 m (variable selon les modèles).

Grandeur(s) mesurée(s)

Cartographie en 3D d'une cavité et de son environnement.

Types de restitution et format des données

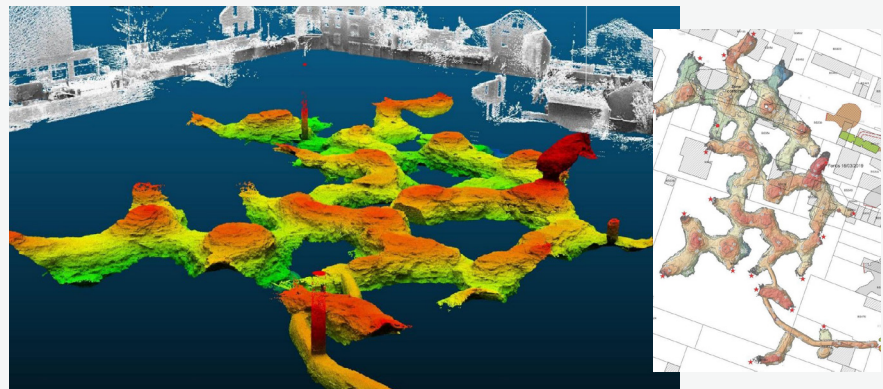
Un nuage de points en 3D complet (plusieurs centaines de millions de points à plusieurs milliards) obtenu après traitement des données avec des logiciels spécifiques. Le format de la donnée source est dépendant du logiciel utilisé (LAS, E57, ASCII...).

Possibilité de traitements basiques (échantillonnage, réalisations de coupes horizontales/verticales, mesures de distance) ou plus complexes (maillage, calcul de volume, données d'entrée pour modélisation géomécanique...) sur le nuage de points.

Après traitement, possibilité de créer des plans, coupes, images, vidéos, plateforme de visualisation web, visite virtuelle 360°...et d'exporter les données dans de nombreux formats DAO et SIG : DWG/DXF, SHP, TIF...

La numérisation des parcelles en surface permet de déterminer l'épaisseur des terrains de recouvrement au-dessus de la cavité.

Le nuage de points peut être exploité pour l'identification et la caractérisation des discontinuités et des instabilités affectant la cavité, appuyant ainsi le géotechnicien dans son diagnostic de stabilité.



Exemples d'un nuage de points 3D d'une ancienne carrière souterraine de et de son environnement en surface (à gauche) et restitution SIG associée (à droite). Les dégradés de couleur représentent la profondeur calculée par rapport au MNT de l'IGN.

Description de la méthode/outil :

Les scanners lasers mobiles sont constitués d'une tête, tenue en main par un opérateur ou fixée sur un vecteur (véhicule, drone...), reliée à une centrale d'acquisition et une batterie. La tête est composée d'un capteur LiDAR 2D « time-of-flight » couplé à un accéléromètre 3 axes.

L'acquisition se fait au fur et à mesure du déplacement de l'opérateur/vecteur. Les données enregistrées par le LiDAR et l'accéléromètre sont traitées par un algorithme SLAM (*Simultaneous location and mapping*) pour reconstituer l'environnement scanné sous forme d'un nuage de points 3D. Selon les modèles, cette reconstitution est faite soit en temps réel, soit en post-traitement. Certains modèles de scanners sont également équipés de caméra pour la colorisation des nuages de points ou pour augmenter l'efficacité du SLAM.

Centrale
d'acquisition +
batterie



Tête du scanner

LiDAR +
accéléromètre trois
axes en rotation

Éléments constitutifs d'un scanner laser mobile de type GeoSLAM ZEB Horizon®.

Description de la méthode/outil :	
	Selon la configuration du site, plusieurs acquisitions peuvent être nécessaires pour couvrir la zone d'étude. Dans ce cas une étape d'alignement des différents nuages de points est nécessaire. L'ensemble peut également être géoréférencé sur des points de repères dont la position est connue (points GPS en extérieur ou repères topographiques préexistants).
Opérateurs mobilisés (nombre, compétences...)	Un opérateur minimum, deux idéalement pour guidage dans les cavités labyrinthiques et assistance sur les passages délicats. Les opérateurs doivent avoir une connaissance minimale des instabilités en milieu souterrain pour une acquisition optimale.
Traitement de la donnée (liste des tâches)	Génération des nuages de points 3D (SLAM, si pas fait en temps réel). Alignement et géoréférencement des nuages de points 3D.
Précision et incertitude des outils et/ou du rendu	Précision : quelques centimètres. Incertitude du nuage de points géoréférencé : pluricentimétrique à métrique car dépendant de la précision des repères topographiques utilisés, de la taille et la configuration de la cavité.
Limites de la méthode/ outil	Numérisation uniquement de l'environnement « visible ». Algorithme SLAM sensible aux surfaces lisses (galeries maçonnées) et aux objets en mouvement. Dérives possibles. Pas de contrôle des paramètres d'acquisition. Qualité d'acquisition très dépendante de l'expérience de l'opérateur (vitesse de progression, choix de la trajectoire...). Plus l'espace est réduit, plus il faut avancer lentement pour une visée précise. Le scanner ne peut pas numériser un objet localisé sous l'eau.
Couplage/perspectives/ développements	À coupler avec d'autres techniques d'inspection (photogrammétrie, inspection visuelle...) Les modèles 3D de cavités acquis au scanner mobile peuvent être valorisés dans toutes les méthodes nécessitant une connaissance de la géométrie 3D des cavités : modélisation géologique et géomécanique, correction de l'effet des cavités connues sur des mesures microgravimétriques...
Autres champs d'application	Possibilité de surveillance d'une cavité par comparaison d'acquisitions répétées dans le temps.

Avantages	Inconvénients
• Outil léger et facile à mettre en œuvre. • Adapté aux environnements sans signal GPS. • Adapté aux environnements complexes/difficiles d'accès. • Localisation précise (centimétrique) des événements (écaillage, chutes de blocs, fracturations) survenus dans une cavité. • Outil très adapté pour des missions d'inspection et de surveillance des cavités. • Outil adapté pour la valorisation et la communication (animation vidéo).	• Peu adapté aux environnements « lisses » et à la présence d'objets en mouvement. • Risque de dérive. • Pas de possibilité de fixer des paramètres d'acquisition. Qualité de l'acquisition dépendante de l'opérateur. • Gestion complexe du nuage de points 3D très dense (plusieurs dizaines voire plusieurs centaines de Go) et ressources informatiques importantes (logiciel spécifique et ordinateur puissant). • Nuage de points non colorisé car trop gourmand en éclairage et en batteries.

Cas d'application – exemples - références

- Dewez et al (2017) « Towards cavity-collapse hazard maps with Zeb-Revo handheld laser scanner point clouds ». *The photogrammetric record* 32, no 160 : 354 76 : <https://doi.org/10.1111/phor.12223>.
- Dewez et al (2017) « Quantification géotechnique 3D de fractures souterraines au ZEB-REVO : les carrières d'Hermonville (Marne, Est de la France) » <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-01586641>.
- Yart et al (2018) « Le scanner laser 3D mobile, un outil complémentaire à la microgravimétrie pour la détection fine de cavités souterraines en milieu urbain. Application aux crayères de Champagne ». 26^e réunion des sciences de la terre (RST). Lille, France, 2018 : <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-01854834>

Mise en œuvre	Temps/Surface d'acquisition	Durée de post-traitement	Volume des données acquises	Coût (matériel)	Densité maximale de points d'acquisition
★ à ★★★ ¹	★ ²	★ à ★★ ²	★ à ★★★ ²	★★ à ★★★ ³	★★ ²

¹ ★★★ : technique complexe à mettre en œuvre à ★ : technique facile à mettre en œuvre.

² ★★★ : long/plusieurs Go à ★ : rapide/quelques Ko.

³ ★★★ : onéreux (> 50 k€) à ★ : économique (< 10k€).

FICHE 2025-C3 : PHOTOGRAMMÉTRIE

✓ Principe de la méthode/outil

Construction d'un modèle tridimensionnel (nuage de points 3D et/ou maillage) d'une structure souterraine à partir de photographies.

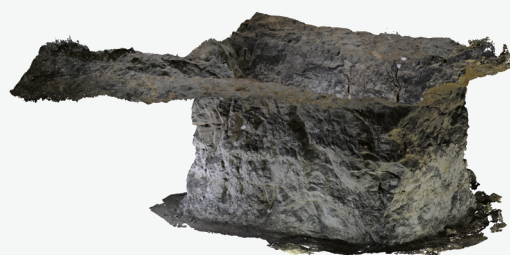
Champs d'application :

Objet ausculté :

objet ponctuel de la cavité tel qu'un pilier, un parement ou une montée de voûte.

- ☒ Pour cavité hors d'eau ;
- ☒ en conditions de sécurité et d'atmosphère acceptables : atmosphère respirable et faible dangerosité du site si opérateur humain. Pour les autres vecteurs, pas d'atmosphère explosive.

Cavité accessible en sécurité pour un opérateur (> 80 cm) ou de dimensions suffisantes si le capteur est monté sur un autre vecteur (dispositif en forage, drone, robot...).



Exemple d'un modèle 3D de pilier acquis par photogrammétrie.

Vecteurs associés

- ☒ Humain
- ☒ Trépied
- ☒ Dispositif pour inspection en forage
- ☒ Drone volant
- ☒ Drone terrestre roulant
- ☒ Drone quadrupède (robot-chien)

Conditions nécessaires et pré-requis

Connaître, au préalable, les dimensions de l'objet à photographier.
Bon éclairage de l'objet à photographier.

Distance maximale d'auscultation

Une dizaine de mètres (très dépendant de l'éclairage).

Grandeur(s) mesurée(s)

Construction d'un modèle numérique 3D d'un objet souterrain.

Types de restitution et format des données

Un nuage de points 3D et un maillage 3D pour chaque série de prises de vue, obtenus après traitement des données avec des logiciels spécifiques. Les données source (photos) sont au format image (JPG ou autre). Après traitement, le nuage de points est un fichier PLY.
Le nuage de points peut être exploité pour l'identification et la caractérisation des discontinuités et des instabilités affectant la cavité, appuyant ainsi le géotechnicien dans son diagnostic de stabilité.

Description de la méthode/outil :

La photogrammétrie est une technique permettant de produire un modèle numérique 3D d'un objet (nuage de points et/ou maillage 3D) à partir de multiples photographies de ce dernier. Cette technique nécessite un appareil photographique, des projecteurs, et éventuellement un pied. Elle peut aussi être réalisée à partir de drones.

En cavité souterraine, ce procédé consiste tout d'abord à éclairer la structure étudiée (par exemple, un pilier ou une montée de voûte) à l'aide de projecteurs. Ceux-ci ne peuvent être déplacés au cours des prises de vue et sont donc positionnés de manière à éclairer l'ensemble de la structure.

Une fois l'éclairage en place, l'opérateur/drone se déplace autour (ou le long) de la structure étudiée pour la prendre en photo sous différents angles. Il peut s'aider d'un pied, pour éviter les flous, lorsque l'éclairage est faible et que les temps de pose sont longs.



Exemple de mise en œuvre de la photogrammétrie pour une montée de voûte.

Opérateurs mobilisés (nombre, compétences...)

1 géotechnicien formé.
L'opérateur doit avoir une connaissance minimale des instabilités en milieu souterrain pour une acquisition optimale.

Traitement de la donnée (liste des tâches)

Téléchargement et sélection des photographies.
Traitement informatique des photographies : alignement puis création de polygones qui vont masquer les parties de la photographie qui ne sont pas à prendre en compte.
Construction du modèle photogrammétriques (nuage de points puis maillage) via des logiciels tels que MicMac ou Metashape (ex : Photoscan).
Mise à l'échelle et recalage du modèle photogrammétrique.

Précision et incertitude des outils et/ou du rendu

Quelques millimètres à quelques centimètres d'incertitude.
La précision du nuage de points 3D dépend du nombre de photographies utilisées pour construire le modèle photogrammétrique, de leur qualité (nombre de pixels, netteté, réglages de l'appareil), des paramètres informatiques de calcul.

Limites de la méthode/ outil	Numérisation uniquement de l'environnement « visible ». Le matériel (particulièrement les projecteurs) peut être encombrant et d'une autonomie limitée (batterie). La précision et la validité du modèle 3D obtenu dépendent fortement des conditions d'éclairage et de la qualité des photographies.
Couplage/perspectives/ développements	À coupler avec d'autres techniques d'inspection (scanner laser 3D, inspection visuelle...).
Autres champs d'application	Possibilité de surveillance par comparaison d'acquisitions répétées dans le temps.

Avantages	Inconvénients
• Matériel facile d'utilisation : des photos prises avec un portable peuvent suffire à produire un modèle 3D. • Souplesse dans la mise en œuvre : logiciels accessibles et modèle 3D de taille raisonnable (1 à 3 Go). • En plus du modèle 3D obtenu, l'opérateur dispose de photographies.	• Uniquement pour un objet d'emprise limité (pilier, montée de voûte...). • Matériel (projecteurs) à autonomie limitée et parfois encombrant, particulièrement lorsque la structure à photographier est large. • Résultat dépendant de la qualité de l'éclairage. • Temps de calcul long pour générer le modèle 3D. • Mise à l'échelle et géoréférencement indirects.

Cas d'application – exemples - références
• Modèle 3D d'une voûte de catiche (Hellemmes, 59). • Modèle 3D d'une montée de voûte et d'un pilier de carrière (Malogne, Belgique).

Mise en œuvre	Temps/Surface d'acquisition	Durée de post- traitement	Volume des données acquises	Coût (matériel)	Densité maximale de points d'acquisition
★★ ¹	★★★ ²	★★★ ²	★ à ★★★ ²	★ ³	★★ ²

¹ ★★★ : technique complexe à mettre en œuvre à ★ : technique facile à mettre en œuvre.

² ★★★ : long/plusieurs Go à ★ : rapide/quelques Ko.

³ ★★★ : onéreux (> 50 k€) à ★ : économique (< 10k€).

FICHE 2025-C4 : SAISIE NUMÉRIQUE DE DONNÉES D'INSPECTION VISUELLE

✓ Principe de la méthode/outil

Réalisation du suivi des dégradations géotechniques, des mouvements et déplacements (chutes de blocs, éboulements localisés, fissures...) majeurs et visibles au sein d'un ouvrage souterrain au moyen d'un outil numérique.

Champs d'application :

Objet ausculté :

Ensemble des parties accessibles de la cavité (pilier, parement, mur-sol, toit-voûte, confortement, puits/essors...).

- ☒ Pour cavité hors d'eau ;
- ☒ en conditions de sécurité et d'atmosphère acceptables : atmosphère respirable et faible dangerosité du site.

Cavité accessible en sécurité pour un opérateur.



Exemple d'application pour saisie de données d'inspection visuelle via une tablette numérique.

Vecteurs associés

- ☒ Humain
- ☐ Trépied
- ☐ Dispositif pour inspection en forage
- ☐ Drone volant
- ☐ Drone terrestre roulant
- ☐ Drone quadrupède (robot-chien)

Conditions nécessaires et pré-requis

Disposer d'un plan de la cavité numérisé (SIG de préférence).

Distance maximale d'auscultation

Environ 5 m.

Grandeur(s) mesurée(s)

Description et localisation des dégradations/désordres en souterrain.

Types de restitution et format des données

1 fiche numérique par dégradation.
Page web interactive avec cartographie des dégradations annotées.
Possibilité d'exporter les données au format tableau (csv) ou pdf.
Possibilité de générer des bilans et informations de synthèse de manière automatique (tableaux, graphes, etc.).
Nb : toutes les informations sont stockées dans une base de données et accessibles, via internet, depuis un PC ou via une application sur une tablette numérique.

Description de la méthode/outil :

Fiche géotechnique SMT6001.DIE.001
Créée le 20/12/2023 12:45, mise à jour le 20/12/2023 12:45 par l'utilisateur : l'observateur

LOCALISATION DE LA DÉGRADATION

Secteur : 100 Courant

Localisation : X : 0 Y : 0

Fréquentation : Circuit de visite

DESCRIPTION DE LA DÉGRADATION

Partie concernée : Sol visible

Type : Fissure préexistante

Description : Fissure préexistante par fissures mécaniques et naturelles. En limite de circuit de visite, galerie non souterraine

Caractéristiques :

Orientations (N/S/E/O) : Non Oui

Longueur (m) : Non Oui

Pendage (°) : Non Oui

Écartement/ouverture (cm) : Non Oui

Rempissage : Non Oui

Autre : Non Oui

Surface/volume : ★★☆☆

Niveau d'instabilité : ★★☆☆

Évolution observée : -

Date de dernière observation : 30/12/2023

Facteurs aggravants : RAS

CONFÈREMENT EXISTANT

Dispositif antichoc (pilot, glissière...) : Non Oui

Boulonnage : Non Oui

Croûte en béton (béton coffré) : Non Oui

Béton projeté : Non Oui

Pilotage : Non Oui

Soutènement porteur de type centre ou portique : Non Oui

Dispositif pare-blocs (grille, grillage) : Non Oui

Rempissage-comblement : Non Oui

Autre : Non Oui

Commentaires :

ACTIONS DE MISE EN SÉCURITÉ RECOMMANDÉES

Type d'actions préconisées :

Surveillance visuelle (peinture, bêche) : Non Oui

Surveillance instrumentée (caméra de convergence, fouloir, etc.) : Non Oui

Dispositif antichoc (pilot, glissière...) : Non Oui

Sondeur-piquet : Non Oui

Boulonnage : Non Oui

Croûte en béton (béton coffré) : Non Oui

Pilotage : Non Oui

Béton projeté : Non Oui

Soutènement porteur de type centre ou portique : Non Oui

Dispositif pare-blocs (grille, grillage) : Non Oui

Rempissage-comblement : Non Oui

Interventions tactiles : Non Oui

Investigations complémentaires (tracés, drone, scan 3D, géophysique, etc.) : Non Oui

Autre : Non Oui

Date de 4^{ème} prescription : 30/12/2023

CLASSIFICATION DE LA DÉGRADATION

Priorité : Orange

QUANTIFIÉ RELATIF AUX ACTIONS DE MISE EN SÉCURITÉ

Travail : 4800.4807

Date du constat : 09/01/2024

Commentaires :

Photos : 18



Exemple d'une fiche géotechnique sur un portail web.

Sur la base d'un référentiel commun aux inspections visuelles souterraines (indicateurs de suivi des indices de dégradation géotechnique, en termes de référencement, datation, description et photographie pour factueliser l'observation et la rendre répétable quel que soit l'intervenant), des fiches numériques sont renseignées in situ au moyen d'une application mobile sur tablette numérique, consultables et éditables via un portail web. Celui-ci intègre également une fonctionnalité pour la représentation cartographique interactive des désordres identifiés.

Cette technique nécessite l'utilisation d'une infrastructure spécifique qui intègre un système de gestion de base de données et un portail internet pour le partage sécurisé, global, systématique, rapide et fiable des données et métadonnées entre l'ensemble des acteurs d'un même projet, et ce via différents outils de visualisation interactifs (cartes 2D/3D, tableaux, etc.), d'édition et d'export des données.

Nb : le site web mobile sur tablette numérique (application) fonctionne hors connexion internet.

Opérateurs mobilisés (nombre, compétences...)

1 géotechnicien.

Traitement de la donnée (liste des tâches)

Synchronisation (ultérieure à l'inspection) manuelle des données de la tablette vers le PC.
Vérification, sur le site web, des données (fiches et cartographie) complétées sur le terrain.

Précision et incertitude des outils et/ou du rendu

Possibilité de caractériser (indicateurs) chaque dégradation.
Standardisation des données sous forme d'une fiche-modèle à compléter.
Standardisation de la nomenclature des dégradations.

Limites de la méthode/ outil	Aucune.
Couplage/perspectives/ développements	À coupler avec toutes les autres techniques d'inspection comme drone, photogrammétrie, scanner 3D... et possibilité d'intégrer et d'afficher les données issues de ces autres méthodes sur la même page web.
Autres champs d'application	Possibilité de surveillance d'une cavité par comparaison d'acquisitions répétées dans le temps.

Avantages	Inconvénients
• Gagner en temps et en opérationnalité. • Fonctionnement d'une application mobile sur tablette hors connexion internet. • Faciliter et optimiser la gestion et le suivi des dégradations géotechniques, majeures et visibles, au sein d'un ouvrage souterrain. • Standardiser l'architecture et la gestion des données. • Historiser, dans le temps, les observations. • Centraliser et sécuriser les données d'inspection. • Représenter cartographiquement des données de manière interactive. • Faciliter le partage et le reporting des résultats via un accès sécurisé (login et mot de passe).	• Nécessité d'une connexion internet avant l'inspection et pour le post-traitement. • Prévoir une tablette étanche, durcie et avec une bonne capacité de stockage des données. • Coût de fonctionnalité/maintenance de l'application et du site web.

Cas d'application – exemples - références
• Caves de champagne (51) avec circuit de visite ouvert au public. • Plateforme expérimentale et pédagogique de l'Ineris dans la carrière souterraine de Saint-Maximin (60).

Mise en œuvre	Temps/Surface d'acquisition	Durée de post- traitement	Volume des données acquises	Coût (matériel)	Densité maximale de points d'acquisition
★ ¹	★ à ★★ ²	★ ²	★ ²	★ ³	SO

¹ ★★★ : technique complexe à mettre en œuvre à ★ : technique facile à mettre en œuvre.

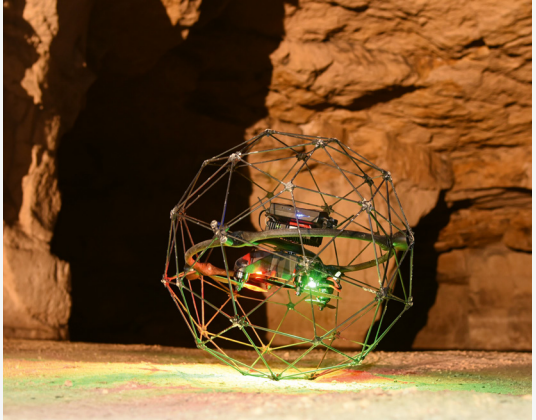
² ★★★ : long/plusieurs Go à ★ : rapide/quelques Ko.

³ ★★★ : onéreux (> 50 k€) à ★ : économique (< 10k€).

FICHE 2025-C5 : INSPECTION VIDÉO

✓ Principe de la méthode/outil

Observation à distance de secteurs souterrains dangereux ou inaccessibles pour détecter et observer des dégradations géotechniques, des venues d'eau ou d'autres signes d'instabilités.

Champs d'application :	
Objet ausculté : Ensemble des parties accessibles de la cavité (pilier, parement, mur-sol, toit-voûte, confortement, puits/essors...). ☑ Pour cavité hors d'eau ; ☑ en conditions de sécurité et d'atmosphère acceptables : atmosphère non explosive. Cavité accessible en sécurité pour un opérateur (> 80 cm) ou de dimensions suffisantes si le capteur est monté sur un autre vecteur (sonde, drone, robot...).	 Exemple d'une caméra sur drone volant (Elios 2 de FLYABILITY).
Vecteurs associés	☑ Humain ☑ Trépied ☑ Dispositif pour inspection en forage (au bout d'un câble ou d'un train de tige rigide) ☑ Drone volant ☑ Drone terrestre roulant ☑ Drone quadripède (robot-chien)
Conditions nécessaires et pré-requis	Aucune.
Distance maximale d'auscultation	3-5 m avec un éclairage standard à 15-20 m avec un éclairage spécifique.
Grandeur(s) mesurée(s)	Observations visuelles de la cavité et des dégradations/désordres en souterrain.
Types de restitution et format des données	Vidéos et photographies (MP4 et JPG). Les observations réalisées en vols (direction, profondeur, commentaires...) peuvent être indiquées dans la timeline de la vidéo sous forme de points d'intérêts afin de revenir plus facilement sur la séquence en post-traitement et ainsi commenter plus en détails ce qui peut être vu sur la vidéo. Les vidéos et photographies peuvent être exploitées pour l'identification et la caractérisation des discontinuités et des instabilités affectant la cavité, appuyant ainsi le géotechnicien dans son diagnostic de stabilité.

Description de la méthode/outil :	
Il s'agit d'une caméra HD, de petit diamètre, couplée à un éclairage LED puissant. La caméra est pilotable à distance avec un joystick. C'est un outil d'observation pour appuyer certaines inspections géotechniques souterraines. Il permet d'observer notamment en toute sécurité des secteurs dangereux ou difficilement accessibles.	 Exemple de rendu vidéo dans une crayère.

Opérateurs mobilisés (nombre, compétences...)	1 à 2 opérateurs formés.
Traitement de la donnée (liste des tâches)	Compte-rendu d'inspection à partir des points d'intérêts identifiés au cours de l'inspection.
Précision et incertitude des outils et/ou du rendu	Observations centimétriques.
Limites de la méthode/outil	Portée limitée.
Couplage / perspectives / développements	À coupler avec d'autres techniques d'inspection (lidar, photogrammétrie, inspections visuelles...).
Autres champs d'application	Possibilité de surveillance d'une cavité par comparaison d'acquisitions répétées dans le temps.

Avantages	Inconvénients
• Sécurité des interventions. • Recommandations en quasi-temps réel. • Facilite le partage des observations.	• Données uniquement visuelles qui ne suffisent pas toujours à détecter des dégradations. • Portée limitée. • Matériel sensible, notamment vis-à-vis de l'eau.

Cas d'application – exemples - références
• Inspection d'anciens puits. • Sites difficiles d'accès (Vialas, 30).

Mise en œuvre	Temps/Surface d'acquisition	Durée de post-traitement	Volume des données acquises	Coût (matériel)	Densité maximale de points d'acquisition
★ à ★★ ¹	★ à ★★ ²	★ ²	★ à ★★ ²	★ à ★★ ³	SO

¹ ★★★ : technique complexe à mettre en œuvre à ★ : technique facile à mettre en œuvre.

² ★★★ : long/plusieurs Go à ★ : rapide/quelques Ko.

³ ★★★ : onéreux (> 50 k€) à ★ : économique (< 10k€).

FICHE 2025-C6 : RELEVÉS TOPOGRAPHIQUES SIMPLIFIÉS

✓ Principe de la méthode/outil

Relevés géométriques sans détails permettant d'obtenir un plan et un/des coupes de la cavité, si possible géoréférencés.

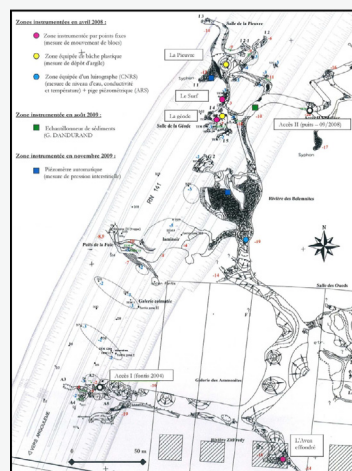
Champs d'application :

Objet ausculté :

Ensemble des parties accessibles de la cavité (pilier, parement, mur-sol, toit-voûte, confortement, puits/essors...).

- ☒ Pour cavité hors d'eau ;
- ☒ en conditions de sécurité et d'atmosphère acceptables : atmosphère respirable et faible dangerosité du site si opérateur humain.

Cavité accessible en sécurité pour un opérateur, section minimale de 30 cm x 60 cm.



Exemple de relevé topographique.

Vecteurs associés

- ☒ Humain
- ☒ Trépied
- ☐ Dispositif pour inspection en forage
- ☐ Drone volant
- ☐ Drone terrestre roulant
- ☐ Drone quadripède (robot-chien)

Conditions nécessaires et pré-requis

Si possible connaissance du réseau (croquis d'exploration). À défaut le relevé doit s'effectuer de proche en proche par boucles courtes s'élargissant progressivement.

Distance maximale d'auscultation

~ 40 m de station à station (distancemètre).

Grandeur(s) mesurée(s)

Cartographie en 2D et 3D de la cavité.

Types de restitution et format des données

Géométrie 2D et 3D, plus ou moins dense selon le nombre de points saisis et le temps passé.

Le format de la donnée source est dépendant du logiciel utilisé.

Après traitement, possibilité de créer plans, coupes, nuage de points 3D et d'exporter les données dans des formats DAO et SIG : DXF, LWG, SHP...

Ces données peuvent être superposées aux cartes topographiques ou orthophotographies, si un levé au GPS d'un ou plusieurs points communs à la surface et au souterrain est réalisé.

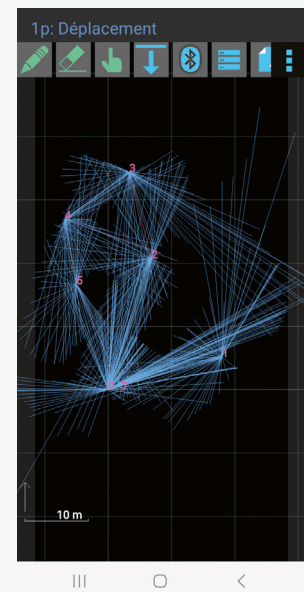
Description de la méthode/outil :

Cette technique nécessite boussole, distancemètre (topo fil ou décamètre par précision décroissante) et clinomètre, combinés dans un ou deux appareils dont les plus récents sont numériques et disposent d'un transfert par Bluetooth des valeurs mesurées (vers une application sur tablette ou smartphone).

Des logiciels spécifiques à chaque fabricant sont disponibles.



Exemple d'appareils de mesures et plan des visées sur Topodroid.



À chaque station, il est réalisé à *minima* quatre mesures (gauche-droite-haut-bas). Pour une description géométrique fine, on multiplie les visées d'habillage en choisissant des points caractéristiques (jusqu'à la centaine ou plus).

La procédure est similaire à celle par arpentage mais généralement il n'y a pas de double mesure de chaque visée (aller-retour). La station n'est pas nécessairement un trépied mais le plus souvent un point matérialisé sur la paroi ou au sol (point à la peinture par exemple). Les conditions de visée peuvent limiter la précision des mesures, notamment angulaires si on utilise des instruments analogiques.

Le bouclage (trajet différent passant par un point commun) améliore la précision.

Le logiciel permet le téléchargement des données et une visualisation brute des mesures, voire la prise d'un croquis (sans passer par un carnet papier).

Opérateurs mobilisés (nombre, compétences...)

Deux personnes minimum (un maîtrisant les opérations et un aide).

Traitement de la donnée (liste des tâches)	Eventuellement, une saisie des relevés manuels dans un logiciel/tableur. Divers logiciels de cartographie spéléologiques sont disponibles. Leur ergonomie et leurs fonctionnalités sont très diverses, depuis des outils très complets permettant toute sorte de tris et représentation, d'usage universitaire, à la simple macro de tableur (par exemple Thérion, GH-Topo, TopoCalc'R, Auriga, GNU-Hades, TopoRobot, Survex, Compass, VisualTopo). Les fonctionnalités minimales sont : • calcul du cheminement (« squelette ») à partir des visées ; • vue en plan ; • vue en coupe et projection ; • export vers un logiciel de dessin ou SIG (DXF si possible en 3D) ; • correction des boucles. Il est capital de tenir compte de la déclinaison magnétique pour le géoréférencement. Ceci peut être fait directement dans le logiciel ou à postériori (rotation du dessin/modèle). Habillage de la sortie graphique (= dessin figurant la cavité), soit à partir de logiciel de topographie (Thérion...), soit par un logiciel de dessin (Inskape, Illustrator, Autocad, QGIS...). Géoréférencement à partir de la position de l'entrée, superposition sous SIG.
Précision et incertitude des outils et/ou du rendu	La précision est grandement dépendante de l'application de l'opérateur à la prise de mesure. Une attention particulière doit être portée aux mesures sur de longues distances. Le transfert numérique des données permet d'identifier d'éventuelles erreurs de prise de notes qui restent indispensables pour décrire les sections. Le bouclage (trajet différent passant par un point commun) améliore assez fortement la précision ; de même que l'usage d'une boussole et clinomètre électroniques qui limite aussi les erreurs de recopie avec une transmission Bluetooth. Un relevé effectué avec attention peut permettre une erreur de boucle de 1 - 2 % de la longueur parcourue, qui sera réduit par l'algorithme de correction-compensation.
Limites de la méthode/ outil	Boussole perturbée par les éléments métalliques, qui s'ils sont trop présents doivent conduire à utiliser un goniomètre (impose un trépied). Il est capital d'éloigner tout élément métallique lors de la mesure (mousqueton acier, batteries des éclairages...). Relevés uniquement de l'environnement « visible ». Précision de localisation d'un point particulier de la cavité dépend de sa distance à l'entrée de la cavité ce qui est un point particulièrement limitant pour les cavités de grande extension.
Couplage/perspectives/ développements	À coupler avec d'autres techniques d'inspection (scanner laser mobile ou terrestre, photogrammétrie, inspection visuelle...).
Autres champs d'application	-

Avantages	Inconvénients
• Appareil léger et facile d'utilisation. • Matériel peu coûteux.	• Temps de relevé assez long. La durée de mise en œuvre en souterrain est très dépendante de la finesse de détail du relevé (en lien avec la densité de points relevés) et des difficultés de progression. • Cartographie peu précise. • Matériel de fabrication « artisanale » (maintenance difficile...).

Cas d'application – exemples - références
• Des décennies de pratiques et publications dans le milieu spéléologique. • Pratique de relevés du Cerema Méditerranée depuis les années 1990.

Mise en œuvre	Temps/Surface d'acquisition	Durée de post-traitement	Volume des données acquises	Coût (matériel)	Densité maximale de points d'acquisition
★ ¹	★★ à ★★★ ²	★★ ²	★ ²	★ ³	★ ²

¹ ★★★ : technique complexe à mettre en œuvre à ★ : technique facile à mettre en œuvre.

² ★★★ : long/plusieurs Go à ★ : rapide/quelques Ko.

³ ★★★ : onéreux (> 50 k€) à ★ : économique (< 10k€).

FICHE 2025-C7 : RADAR GÉOLOGIQUE

✓ Principe de la méthode/outil

Identification des structures géologiques (fracturation, altération, vides, eau...) au sein d'un massif à partir de l'étude de la propagation des ondes électromagnétiques, dans un domaine de fréquences variables.

Champs d'application :

Objet ausculté :

Objet ponctuel de la cavité (pilier, parement, toit, confortement...).

- ☒ Pour cavité hors d'eau ;
- ☒ en conditions de sécurité et d'atmosphère acceptables : atmosphère respirable et faible dangerosité du site si opérateur humain.

Cavité accessible en sécurité pour un opérateur (> 80 cm).



Système d'acquisition Radar du Cerema.

Vecteurs associés

- ☒ Humain
- ☐ Trépied
- ☒ Dispositif pour inspection en forage
- ☐ Drone volant
- ☐ Drone terrestre roulant
- ☐ Drone quadripède (robot-chien)

Conditions nécessaires et pré-requis

Meilleur contact possible entre l'antenne et le massif (rechercher des surfaces les plus planes possibles).
La propagation des ondes doit être testée sur site.
Connaissance, si possible, de la géométrie des ouvrages (par scanner laser ou photogrammétrie).

Distance maximale d'auscultation

La profondeur de pénétration des ondes du radar, qui dépend de la fréquence de l'antenne utilisée, est comprise entre quelques décimètres avec les antennes hautes fréquences (900 à 2600 MHz) jusqu'à 5 mètres avec les antennes basses fréquences (100 à 600 MHz). Cette distance dépend fortement du contexte résistif de la roche.

Grandeur(s) mesurée(s)

Variations d'amplitude du champ électromagnétique (EM) des ondes EM réfléchies (et/ou diffractées) en fonction du temps de propagation (nanosecondes) de l'onde EM dans le massif.

Types de restitution et format des données

Le radargramme ou image radar représente une coupe du sol/massif, en profondeur, au droit de l'acquisition radar, le long d'un profil rectiligne. Les données brutes avant migration (radargramme brut ou coupe temps) correspondent à l'amplitude de chaque signal, graduée en niveau de couleur (ici en niveau de gris), en fonction du temps de propagation (nanosecondes) de l'onde.

Types de restitution et format des données

Le radargramme interprété (ou coupe profondeur), qui représente les signaux en fonction de la profondeur, est obtenu après traitement, i.e. après intégration des vitesses du milieu (vitesses théoriques des matériaux ou issues d'essais en laboratoire).

Le radargramme peut être exploité pour l'identification et la caractérisation des discontinuités géologiques et mécaniques, appuyant ainsi le géotechnicien dans son diagnostic de stabilité.

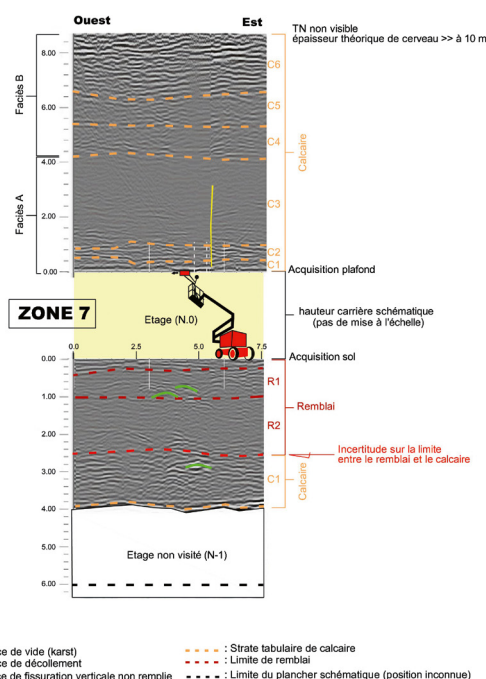
Description de la méthode/outil :

Le dispositif de mesure est constitué d'un radar géologique couplé à une antenne utilisée en mode bistatique (émetteur et récepteur dans la même antenne). Il est complété par une roue codeuse permettant la mesure des distances parcourues et une répartition homogène des signaux émis le long du profil et un système de « topage » servant à localiser les points de repères (fissures de surface, zone humide, etc.).

L'antenne radar émettrice est positionnée et déplacée sur la surface à ausculter (toit, parement, sol), le long d'un profil rectiligne appelé « ligne radar ». L'antenne radar émet des impulsions électromagnétiques dirigées vers la surface à ausculter avec une cadence régulière. Celles-ci se propagent en s'atténuant dans l'encaissant rocheux. À chaque interface rencontrée (contrastes de propriétés électromagnétiques, permittivité diélectrique représentant une variation du faciès par exemple), une partie de l'énergie de l'impulsion est réfléchie vers la surface. Le radar analyse le signal récupéré et reconstitue le radargramme (image radar) qui représente la somme des impulsions réfléchies.

La fréquence de l'antenne est adaptée en fonction de l'objectif de la profondeur à atteindre. À noter que les antennes hautes fréquences permettent d'ausculter des profondeurs décimétriques, mais offrent une meilleure résolution que les basses fréquences utilisées pour atteindre de plus grandes profondeurs. En mode transmission, la profondeur d'investigation est logiquement deux fois plus importante (absence d'aller-retour de l'onde).

Pour ausculter des objets en hauteur (toit, partie supérieure de parement), au-delà de la hauteur d'homme, il est possible d'utiliser une nacelle, un échafaudage ou encore une tyrolienne sur câble.



Radargrammes et application de la méthode, par nacelle, au toit d'une cavité.

Opérateurs mobilisés (nombre, compétences...)	2 opérateurs – expérience en auscultation géophysique et en géotechnique.
Traitement de la donnée (liste des tâches)	1- Traitement initiaux/amélioration du signal : calage du temps sur la surface auscultée et application des filtres (passe bandes et bruits de fonds). 2- Traitement quantitatif : transformations des temps d'écoute enregistrés en profondeur métrique à partir d'un étalonnage sur un objet connu ou d'une analyse de vitesses (Migration, CMP) ou d'une vitesse issue d'essais de laboratoire. 3- Amélioration visuelle du radargramme (image radar) : gain visuel, échelle fausse couleur.
Précision et incertitude des outils et/ou du rendu	De l'ordre de 10 % de la profondeur investiguée.
Limites de la méthode/ outil	Une surface de massif très irrégulière dégrade et ralentit la mise en œuvre. La profondeur d'investigation des ondes électromagnétiques émises par le radar géologique est très sensible aux altérations chimiques (variation de la teneur en eau et du degré d'altération, présence d'argile ou de vide). Les matériaux conducteurs, comme l'argile, les sols humides ou l'acier, ont une forte capacité d'atténuation, ce qui limite la profondeur de pénétration des ondes radar. Plus la roche est résistante et/ou présente des discontinuités, plus la profondeur d'investigation est importante. À l'extrême, avec une couche très conductrice et fine en surface, la profondeur d'investigation est quasi nulle. Les effets de bord (artefact de mesure) provoqués par les bordures de pilier ou par l'arête d'un mur diminuent la profondeur d'investigation.
Couplage/perspectives/ développements	Des essais sur roche en laboratoire sont fortement recommandés car il n'y a pas de relation directe entre conductivité/vitesses et les caractéristiques mécaniques ou hydrauliques. À coupler avec les autres méthodes géophysiques de tomographies : sismique et électrique. À coupler avec d'autres techniques d'inspection (scanner laser terrestre ou mobile, photogrammétrie, inspection visuelle...). Le radar à saut de fréquence pourrait améliorer à la fois la profondeur d'investigation et la résolution.
Autres champs d'application	Méthode utilisée en ouvrages d'art, en chaussée, en bâtiment...

Avantages	Inconvénients
• Donne une « image » de l'intérieur du massif, en temps réel, depuis sa surface. • Appareil relativement léger, facile et rapide d'utilisation. • Bonne résolution spatiale. • Sensible aux interfaces. • Identification de présence de structures conductrices (eau, argile...). • Possibilité d'adapter la fréquence d'émission à la taille de l'objet recherché.	• Interprétation délicate – nécessite un spécialiste de la méthode, doit idéalement faire l'objet d'une validation par une méthode complémentaire. • Méthode sensible à la conductivité électrique et limitée, voire exclue, pour la reconnaissance des sols argileux. • Détermination indirecte de la profondeur. • Peut-être difficile à appliquer si les parois sont irrégulières car nécessité d'être en contact avec le massif. • Auscultation du toit d'une cavité nécessite l'utilisation d'une nacelle, d'un échafaudage ou encore d'une tyrolienne sur câble. • Atténuation importante en cas de fractures.

Cas d'application – exemples - références

- Auscultation par radar géologique des toits et des planchers d'un parcours troglodyte (Brantôme (24) - Cerema).
- Auscultation radar des toit et piliers d'une carrière souterraine abandonnée (Chancelade (24) – Cerema).
- Auscultation du toit de la grotte du Placard (Moulin-sur-Tardoire (16) - Cerema).
- Auscultation par radar géologique des toits et des planchers d'une carrière souterraine à plusieurs niveaux (Saint-Même-les-Carières (16) - Cerema).
- Caselle et al (2020) « GPR surveys for the prevention of karst risk in underground gypsum quarries ». Tunnelling and Underground Space Technology, volume 95.
- Tomographie radar d'un pilier de carrière souterraine (suivi d'un front d'humidité depuis 2021 – Saint-Émilion (33) - Cerema).
- Code de pratique de l'AGAP : fiche 92.1, EMA 31.

Mise en œuvre	Temps/Surface d'acquisition	Durée de post-traitement	Volume des données acquises	Coût (matériel)	Densité maximale de points d'acquisition
★★ ¹	★★ à ★★★ ²	★ à ★★★ ²	★ à ★★ ²	★★ ³	SO

¹ ★★★ : technique complexe à mettre en œuvre à ★ : technique facile à mettre en œuvre.

² ★★★ : long/plusieurs Go à ★ : rapide/quelques Ko.

³ ★★★ : onéreux (> 50 k€) à ★ : économique (< 10k€).

FICHE 2025-C8 : IMAGERIE SISMIQUE

✓ Principe de la méthode/outil

Identification des structures (fracturation, zones humides par exemple) au sein d'un massif à partir de la propagation des ondes sismiques.

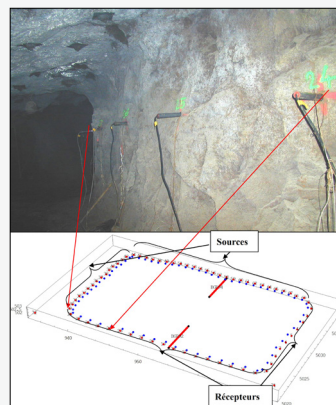
Champs d'application :

Objet ausculté :

Objet ponctuel de la cavité (pilier, parement, toit, sol, confortement...).

- ☒ Pour cavité hors d'eau ;
- ☒ en conditions de sécurité et d'atmosphère acceptables : atmosphère respirable et faible dangerosité du site si opérateur humain.

Cavité accessible en sécurité pour un opérateur (> 80 cm).



Exemple de dispositif de tomographie sismique dans un pilier.

Vecteurs associés

- ☒ Humain
- ☐ Trépied
- ☒ Dispositif pour inspection en forage
- ☐ Drone volant
- ☐ Drone terrestre roulant
- ☐ Drone quadripède (robot-chien)

Conditions nécessaires et pré-requis

Parfaite connaissance de la géométrie des ouvrages (par scanner laser ou photogrammétrie).
Bon couplage au massif des capteurs et des sources. Petits forages dans le massif pour implanter les capteurs sismiques.
Fissuration non ouverte et atténuation compatible avec la propagation des ondes mécaniques.
Nécessité de tester, au préalable, sur site la propagation des ondes.

Distance maximale d'auscultation

Pas de limite, puissance et fréquence des ondes à adapter.

Grandeur(s) mesurée(s)

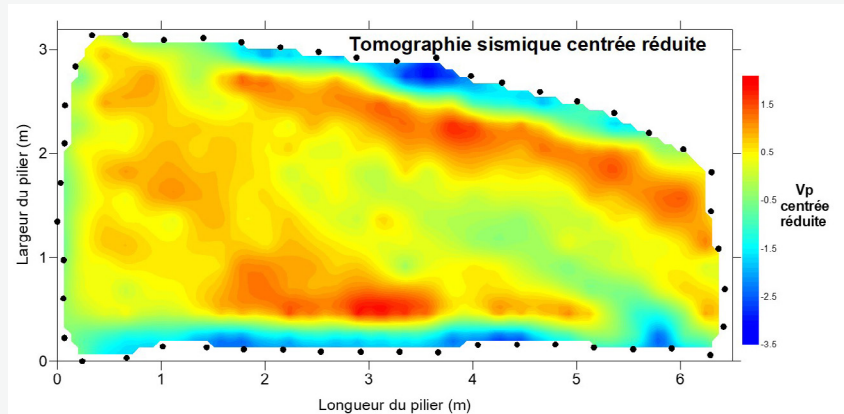
Temps de trajet et/ou atténuation des ondes sismiques.

Types de restitution et format des données

Après inversion, cartographie des vitesses de propagation des ondes.
Données brutes avant inversion : coordonnées des capteurs et des sources et temps de trajet des ondes.
Données traitées : cartographie des vitesses et/ou des atténuation des ondes sismiques.

Types de restitution et format des données

L'imagerie sismique peut être exploitée pour l'identification et la caractérisation des discontinuités et des instabilités affectant la cavité, appuyant ainsi le géotechnicien dans son diagnostic de stabilité.

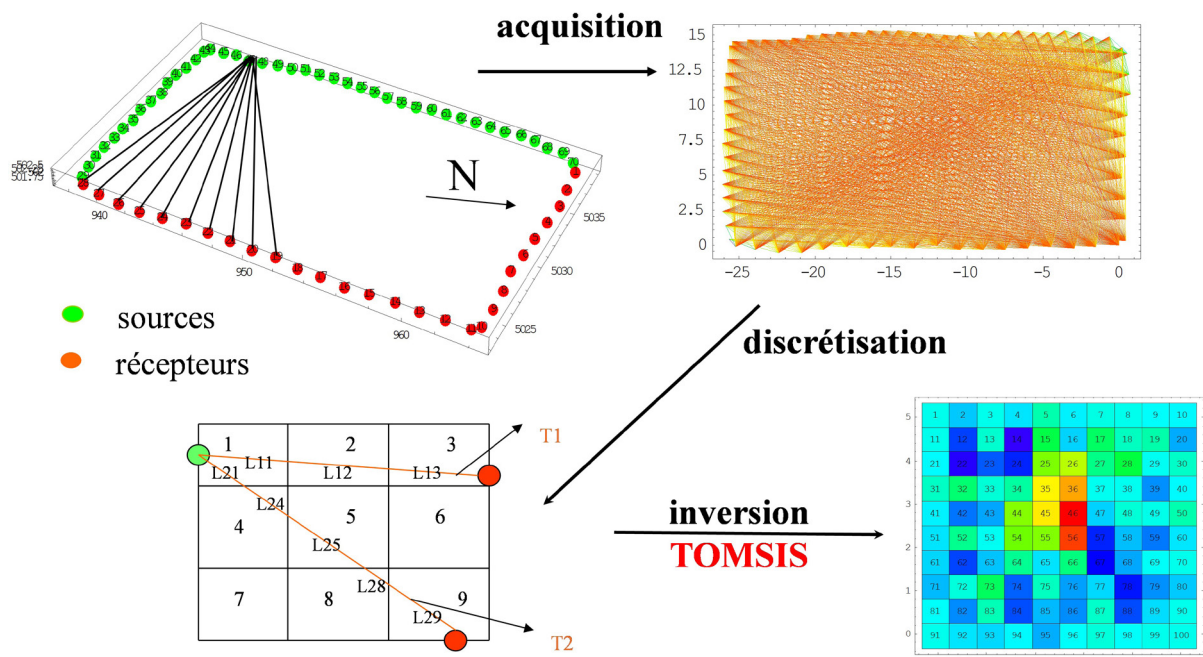


Exemple d'imagerie sismique dans un pilier.

Description de la méthode/outil :

La tomographie sismique par transmission consiste à émettre une onde ultrasonore à l'aide d'une source mécanique (marteau, détonateur, vibreur...) et à enregistrer le signal reçu au niveau de récepteurs (accéléromètre, géophone...). Une chaîne d'acquisition multi-voies doit permettre des enregistrements simultanés.

Il s'agit alors de mesurer le temps de trajet des ondes au travers du milieu rocheux avec un nombre de rais suffisamment important pour couvrir la surface ou le volume ausculté. Il faut ensuite trouver le champ de vitesse discrétisé qui vérifie au mieux les données mesurées. Une matrice reliant les temps de trajet, les longueurs de rais et les vitesses est inversée pour trouver le champ de vitesse. Cette inversion peut aussi être réalisée avec les valeurs d'atténuation de l'onde sismique.



Principe de la reconstruction d'image du champ de vitesse à partir des ondes sismiques.

Opérateurs mobilisés (nombre, compétences...)	Deux opérateurs – expérience en sismique et traitement du signal.
Traitement de la donnée (liste des tâches)	Projection des coordonnées des sources et des récepteurs dans un plan. Pointé de la première arrivée et/ou de l'atténuation des ondes. Constitution de la matrice des coordonnées et des temps de trajets à inversée. Discrétisation de la surface auscultée, inversion des temps de trajet, optimisation de l'erreur. Correction de l'anisotropie de vitesse.
Précision et incertitude des outils et/ou du rendu	En fonction de la longueur des ondes, de la couverture des rais sismiques et de la distance entre les sources et les récepteurs (< à 10 % des dimensions du dispositif). Répétabilité et reproductibilité des temps de propagation de l'ordre de 2,5 %.
Limites de la méthode/ outil	Sensible uniquement à des hétérogénéités de l'ordre de la longueur d'onde, présence d'artéfacts numériques surtout dans le cas de dispositifs asymétriques. Site perturbé ou bruyé – état de surface très irrégulier ou poreux.
Couplage / perspectives / développements	À étalonner avec des essais mécaniques sur roche en laboratoire (relation directe entre les ondes mécaniques et les coefficients mécaniques de la roche). À coupler avec des forages carottés dans l'objet ausculté. A coupler avec les méthodes de tomographie électromagnétiques (ERT, radar...). À coupler avec d'autres techniques d'inspection (scanner laser terrestre ou mobile, photogrammétrie, inspection visuelle...).
Autres champs d'application	Méthode utilisée en ouvrages d'art pour les bétons et en enrochement pour la fracturation.

Avantages	Inconvénients
• Interprétation directe en mécanique des roches (qualité, endommagement fracturation...). • Pas de limite de la profondeur d'investigation.	• Traitement des données assez long, à réaliser par un spécialiste. • Résolution moyenne. • Détermination de la profondeur indirecte. • Dépend de l'état de la surface. • Nécessité de forer le massif.

Cas d'application – exemples - références

- Tomographie sismique du pilier ennoyé de la mine de Tressange (57).
- Carrier et al (2022) « *Damage assessment of supporting pillars in an underground cave using joint inversion of electrical resistivity and P-wave velocity, Bailly (France)* ». *Pure and Applied Geophysics*, volume 179, issue 1, pp. 45-67.
- Cahiers de l'AGAP n°2.

Mise en œuvre	Temps/Surface d'acquisition	Durée de post-traitement	Volume des données acquises	Coût (matériel)	Densité maximale de points d'acquisition
★★★ ¹	★★★ ²	★★★ ²	★ ²	★★ ³	SO

¹ ★★★ : technique complexe à mettre en œuvre à ★ : technique facile à mettre en œuvre.

² ★★★ : long/plusieurs Go à ★ : rapide/quelques Ko.

³ ★★★ : onéreux (> 50 k€) à ★ : économique (< 10k€).

FICHE 2025-C9 : IMAGERIE ÉLECTRIQUE

✓ Principe de la méthode/outil

Identification des structures (fracturation, zones humides par exemple) au sein d'un massif à partir du champ de résistivité électrique.

Champs d'application :

Objet ausculté :

Objet ponctuel de la cavité (pilier, parement, toit, confortement...).

- ☒ Pour cavité hors d'eau ;
- ☒ en conditions de sécurité et d'atmosphère acceptables : atmosphère respirable et faible dangerosité du site si opérateur humain.



Système d'acquisition électrique sur un pilier.

Vecteurs associés

- ☒ Humain
- ☐ Trépied
- ☒ Dispositif pour inspection en forage
- ☐ Drone volant
- ☐ Drone terrestre roulant
- ☐ Drone quadrupède (robot-chien)

Conditions nécessaires et pré-requis

Parfaite connaissance de la géométrie des ouvrages (par scanner laser ou photogrammétrie).
Surface relativement rectiligne.
Bon couplage au massif des électrodes.
Petits forages dans le massif pour implanter les électrodes.

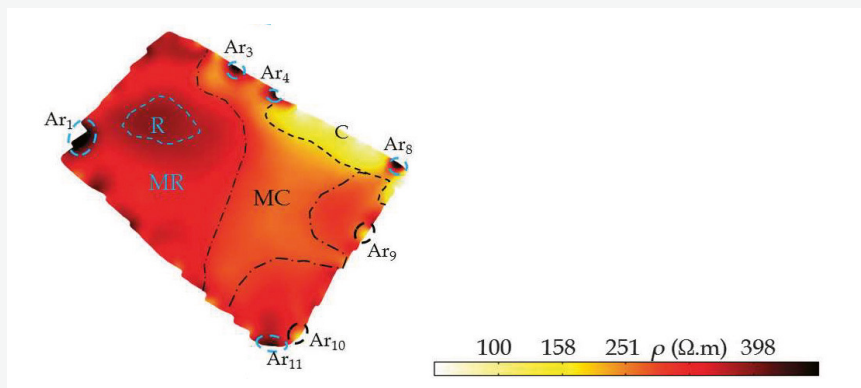
Distance maximale d'auscultation

De l'ordre de $1/8^e$ de la longueur du dispositif lorsque toutes les électrodes sont sur le même plan. La profondeur d'investigation n'est ainsi limitée que par la résistivité de la roche. Plus la roche est résistante, plus la profondeur d'investigation est importante. À l'extrême, avec une couche très conductrice et fine en surface, la profondeur d'investigation est quasi nulle.

Grandeur(s) mesurée(s)

Différence de potentiel – Résistivités/conductivités apparentes.

Types de restitution et format des données



Exemple de tomographie électrique dans un pilier d'une carrière de craie
(R : résistif ; MR : modérément résistif ; MC : modérément conducteur, C : conducteur
et Ar : artefact) (Fargier et al, 2017).

Données brutes avant inversion : coordonnées des capteurs et des sources et résistivités apparentes. Fichiers ASCII : dat, xls, amp, inv.
Après inversion, profils et cartographies de résistivité : fichiers images 2D ou 3D.

L'imagerie électrique peut être exploitée pour l'identification et la caractérisation des discontinuités et des instabilités (y compris teneur en eau) affectant la cavité, appuyant ainsi le géotechnicien dans son diagnostic de stabilité.

Description de la méthode/outil :

La tomographie électrique repose sur l'injection dans la roche d'un courant à l'aide de deux électrodes (pôles + et -) et la mesure de la différence de potentielle engendré sur deux autres électrodes.

La tomographie électrique consiste à construire une pseudo section à partir des résistivités mesurées par dispositif ou station. Il s'agit ensuite d'inverser la pseudo section pour remonter au champ de résistivité qui correspond au mieux. Il existe plusieurs dispositifs (Schlumberger, Wenner, dipôle-dipôle pour les principaux) suivant la configuration et les l'inter-distance des deux électrodes d'injection et des deux électrodes de mesure du courant circulant dans la roche.

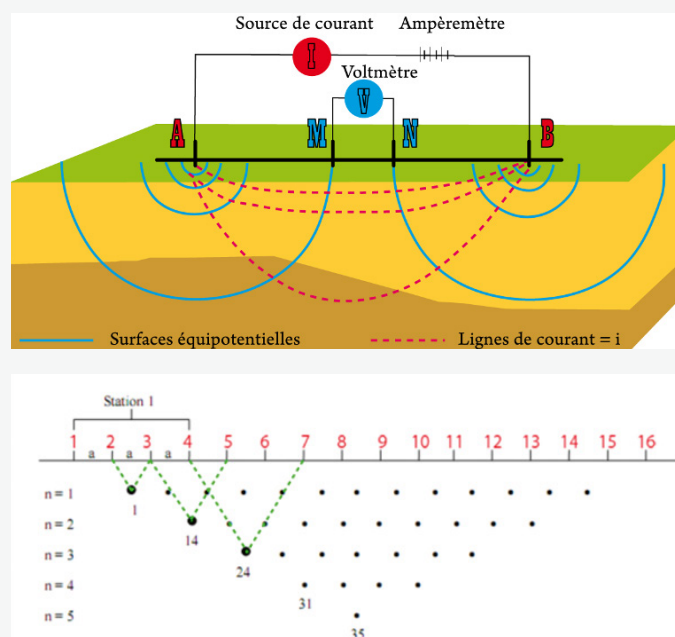


Schéma de principe de la tomographie électrique en configuration Wenner.

Opérateurs mobilisés (nombre, compétences...)	Deux opérateurs – expérience en implantation de dispositifs et traitement du signal.
Traitement de la donnée (liste des tâches)	Projection des coordonnées des sources et des récepteurs dans un plan. Mesure des différences de potentiel. Constitution de la matrice des coordonnées et résistivité apparente à inversée. Discrétisation de la surface auscultée, inversion des résistivités, optimisation de l'erreur. Correction de l'anisotropie de résistivité.
Précision et incertitude des outils et/ou du rendu	Dégradation de la résolution en fonction de la profondeur pour un dispositif en surface. Pour un dispositif 2D, l'alignement des électrodes doit présenter une déviation de moins de 2 %.
Limites de la méthode/ outil	Les variations de résistivité sont multifactorielles, elles impliquent de nombreuses équivalences ou de nombreux modèles pour expliquer les résistivités apparentes observées. Les éléments métalliques (réseaux électriques, canalisations) et une hydrométrie élevée peuvent perturber les mesures.
Couplage/perspectives/ développements	À étalonner avec des essais mécaniques sur roche en laboratoire car il n'y a pas de relation directe entre les résistivités et les caractéristiques mécaniques ou hydrauliques. À coupler avec des forages carottés dans l'objet ausculté. À coupler avec les méthodes de tomographie sismique électromagnétique (radar). À coupler avec d'autres techniques d'inspection (scanner laser terrestre ou mobile, photogrammétrie, inspection visuelle...).
Autres champs d'application	Méthode utilisée en ouvrages d'art.

Avantages	Inconvénients
• Dispositif léger, facile et rapide d'utilisation (acquisition depuis une seule surface). • Sensible aux zones altérées et aux variations de saturation.	• Couplage électrique parfois difficile à obtenir et interprétation délicate : à réaliser par un spécialiste. • Problème d'équivalence entre les anomalies. • Détermination indirecte de la profondeur. • Nécessité de forer le massif. • Profondeur investiguée contrainte par la longueur de l'objet.

Cas d'application – exemples - références

- Tomographie électrique du pilier de craie (Loir-et-Cher).
- Carrier et al (2022) « *Damage assessment of supporting pillars in an underground cave using joint inversion of electrical resistivity and P-wave velocity, Bailly (France)* ». *Pure and Applied Geophysics*, volume 179, issue 1, pp. 45-67.

Mise en œuvre	Temps/Surface d'acquisition	Durée de post-traitement	Volume des données acquises	Coût (matériel)	Densité maximale de points d'acquisition
★★★ ¹	★★★ ²	★★ ²	★★ ²	★ ³	SO

¹ ★★★ : technique complexe à mettre en œuvre à ★ : technique facile à mettre en œuvre.

² ★★★ : long/plusieurs Go à ★ : rapide/quelques Ko.

³ ★★★ : onéreux (> 50 k€) à ★ : économique (< 10k€).

FICHE 2025-C10 : SONAR

✓ Principe de la méthode/outil

Cartographie 3D, par analyse des ondes sonores, d'une cavité envoyée.

Champs d'application :

Objet ausculté :

Ensemble des parties d'une cavité envoyée (pilier, parement, mur-sol, toit-voûte, confortement...).

- ☐ Pour cavité hors d'eau ;
- ☐ en conditions de sécurité et d'atmosphère acceptables.

Cavité envoyée, via forage ou puits, de dimensions limitées et > 0,20 m de hauteur et > 1 m de diamètre.



Exemple de système d'acquisition sonar pour inspection en forage.

Vecteurs associés

- ☐ Humain
- ☐ Trépied
- ☒ Dispositif pour inspection en forage
- ☐ Drone volant
- ☐ Drone terrestre roulant
- ☐ Drone quadripède (robot-chien)

Conditions nécessaires et pré-requis

Cavité sous eau, située entre 0 et 100 m de profondeur, accessible par puits, effondrement ou forage tubé et peu dévié, de 112/125 mm minimum de diamètre.

Distance maximale d'auscultation

De l'ordre de 100 m depuis la tête de forage.

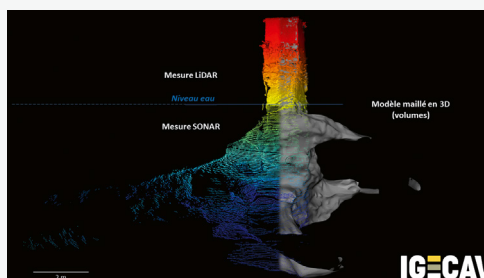
Grandeur(s) mesurée(s)

Cartographie en 3D d'une cavité envoyée.

Types de restitution et format des données

Nuage de points en 3D obtenu après traitement des données avec des logiciels spécifiques.

Le format de la donnée brute est dépendant du capteur utilisé.



Exemple d'un nuage de points d'une cavité envoyée obtenu par LiDAR et Sonar.

Types de restitution et format des données	Possibilité de traitements basiques (échantillonnage, réalisations de coupes horizontales/verticales, mesures de distance) ou plus complexes (maillage, calcul de volume, données d'entrée pour modélisation géomécanique...) sur le nuage de points. Après traitement, possibilité de créer des plans, coupes, images, vidéos, plateforme de visualisation web, visite virtuelle 360°... et d'exporter les données dans de nombreux formats DAO et SIG : DWG/DXF, LAS, E57, ASCII.
---	---

Description de la méthode/outil :	
La sonde munie d'un sonar est descendue dans une cavité sous eau ou transportée par un drone aquatique. Quel que soit le fluide (eau, saumure, hydrocarbures liquides ou gaz) et le nombre de tubages, les ondes acoustiques émises traversent le milieu et leur écho retour est analysé en temps pour définir la distance. En modulant la fréquence du signal de balayage, le sonar modifie l'angle du cône d'observation. Dans le cas du sonar en forage vertical, la cavité est mesurée à l'aide de sections horizontales et inclinées, jusqu'à ce qu'un maillage de points suffisant assure que toute la cavité a été explorée. La dernière génération des sondes sonar intègre des capteurs de positionnement et d'inclinaison permettant de réaliser des dimensionnements de cavités plus précis avec une correction éventuelle de la déviation du forage. Le résultat apparaît en direct ce qui permet d'adapter et d'orienter les investigations suivantes. Le nuage de points est positionné en plan et en profondeur. Pour une meilleure identification des enjeux, des relevés 3D de surface (GPS, LiDAR...) peuvent être réalisés et raccordés au relevé 3D souterrain.	

Opérateurs mobilisés (nombre, compétences...)	Deux opérateurs formés.
Traitement de la donnée (liste des tâches)	Assemblage des relevés 3D. Géoréférencement du nuage assemblés (si levés de surface). Etablissement de plans/coupes topographiques. Maillage 3D surfacique et calculs de volume... Autres analyses spécifiques : fracturation, épaisseur de recouvrement, etc.
Précision et incertitude des outils et/ou du rendu	Résolution et précision d'ordre décimétrique du nuage de points, liée principalement à la déviation/verticalité du forage.
Limites de la méthode/outil	Le sonar peut numériser uniquement l'environnement « visible » depuis sa position. Dans un forage, le capteur est positionné dans l'axe du forage : pas de déplacement possible dans la cavité. La cavité doit mesurer au moins 0,20 m de hauteur et au minimum 50 cm de rayon et être traversée par un puits ou sondage sécurisé de 112/125 mm minimum de diamètre.
Couplage / perspectives / développements	Les modèles 3D de cavités acquis peuvent être valorisés dans toutes les méthodes nécessitant une connaissance de la géométrie 3D des cavités : modélisation géologique et géomécanique, correction de l'effet des cavités connues sur des mesures microgravimétriques...
Autres champs d'application	Possibilité de surveillance d'une cavité par comparaison d'acquisitions répétées dans le temps.

Avantages	Inconvénients
• Cartographie 3D sous eau. • Dimensionnement précis des vides (volumes visibles, profondeur, dimensions, orientation). • Outil très adapté pour des missions d'inspection et de surveillance des cavités.	• Technologie onéreuse. • Matériel fragile. • Profondeur d'investigation limitée.

Cas d'application – exemples - références
• Cartographie de cavités salines. • Cartographie d'anciennes mines noyées.

Mise en œuvre	Temps/Surface d'acquisition	Durée de post-traitement	Volume des données acquises	Coût (matériel)	Densité maximale de points d'acquisition
★★ à ★★★ ¹	★★★ ²	★★★ ²	★★ ²	★★★ ³	★★ ²

¹ ★★★ : technique complexe à mettre en œuvre à ★ : technique facile à mettre en œuvre.

² ★★★ : long/plusieurs Go à ★ : rapide/quelques Ko.

³ ★★★ : onéreux (> 50 k€) à ★ : économique (< 10k€).

Dans le cadre d'une analyse précise des risques et des aléas liés aux cavités souterraines, tant de mouvements de terrain en surface que d'instabilités souterraines, un diagnostic sur site, permettant d'apprécier l'état des dégradations pouvant affecter les cavités et d'estimer les sollicitations du massif encaissant est souvent requis. La précision de ce diagnostic influe sur l'orientation des choix technico-économiques qui seront retenus pour la sécurité publique et pour l'optimisation des éventuels travaux de mise en sécurité. Cette analyse dépend en partie des possibilités de mise en œuvre de techniques d'inspection et d'auscultation destinées à fournir des données qualitatives et/ou quantitatives sur la cavité.

Ce document a pour objectif d'apporter aux opérateurs spécialisés ainsi qu'aux maîtres d'œuvre et maîtres d'ouvrage confrontés à la gestion des cavités anthropiques abandonnées, des éléments d'aide à la décision pour inspecter et ausculter une cavité abandonnée et accessible (carrières souterraines, marnières, souterrains-refuges, habitats troglodytiques, sapes de guerre...).

Le document comprend un rappel de la démarche d'évaluation de l'état de dégradation d'une cavité et une liste des techniques d'inspection et d'auscultation in situ, en particulier les plus récentes et/ou innovantes, et qui présentent un intérêt dans le cadre des études de stabilité spécifiques à d'anciennes cavités souterraines. Il ne traite pas des techniques de surveillance. Afin de les mettre en perspective sur un même site, ces outils ont été testés au sein de la plateforme expérimentale et pédagogique Saint-Maximin de l'Ineris.

Des tableaux ont été établis, présentant les critères à prendre en compte dans le choix de la (ou des) méthode(s) ou de(s) l'outil(s) d'inspection et d'auscultation de la cavité souterraine accessible et pointant les principaux atouts et contraintes.

Sont joints à ce document : un glossaire des types de dégradation en cavité abandonnée, des fiches récapitulatives par outil/capteur comprenant notamment le domaine d'application, le(s) rendu(s) associé(s), les atouts et contraintes.

Fruit d'une collaboration entre le BRGM, le Cerema et l'Ineris, ce travail s'inscrit dans le cadre de la feuille de route « cavités ».