

**Amélioration transfrontalière
de la prévention et de la gestion des
risques du sous-sol engendrés par
les terrains sous-cavés**

**Compte-rendu de la journée technique
"Gestion transfrontalière du risque cavités"**

14 novembre 2019, Lille

Sommaire

Sommaire	1
Résumé.....	2
Introduction.....	3
1. Présentation du projet	3
2. Les types de cavités présents en Hauts-de-France et en Wallonie.....	4
3. Les bases de données relatives aux cavités souterraines	6
4. L'inspection visuelle	9
5. Le suivi par instrumentation.....	10
6. Les mécanismes de dégradation d'une carrière souterraine.....	12
7. La compréhension des mécanismes de ruine des cavités souterraines – cas de la Malogne.....	14
8. L'influence minière sur les ouvrages souterrains proches de la surface	15
9. Comment sécuriser une cavité ?	17
Conclusions.....	19
Références.....	20

Résumé

En raison d'une géologie et d'une histoire industrielle communes, la Wallonie et les Hauts-de-France comportent de nombreuses cavités souterraines d'origine naturelle et anthropique sur leur territoire. Grâce à une approche transfrontalière, le projet Interreg RISSC vise à mieux prévenir et gérer les risques du sous-sol engendrés par ces terrains sous-cavés. Le 14 novembre 2019, les partenaires du projet ont présenté leurs avancées à mi-parcours.

Le projet RISSC s'organise en 3 modules techniques qui concernent (1) la caractérisation des objets et des menaces présents en Wallonie et dans les Hauts-de-France, (2) le développement de solutions locales adaptées pour réduire le risque et (3) la mise en place d'un soutien technique à destination des acteurs locaux et de la population. Pour atteindre ces objectifs, les différents opérateurs (ISSeP, Association des Communes Minières de France, CEREMA, Ineris, Université de Mons, Université de Lille, villes de Lille et de Mons, Service Public de Wallonie (SPW Mobilité et Infrastructures et SPW Agriculture, Ressources Naturelles et Environnement)) bénéficient d'une enveloppe de près de 1.5 millions d'euros. Le colloque « Gestion transfrontalière du risque cavités » s'est surtout concentré sur les deux premiers axes du projet.

Une des premières actions réalisées a consisté à inventorier les cavités souterraines présentes en Wallonie et dans les Hauts-de-France. Le contexte transfrontalier montre de nombreuses similitudes (exploitations souterraines de craie, de sable, exploitations profondes de charbon) mais aussi des spécificités plus locales. Dans chaque région, des bases de données sont constituées pour dresser ces inventaires ; elles sont en constante évolution pour mieux répondre aux besoins des acteurs du risque du sous-sol et des populations.

Les cavités souterraines sont des objets évolutifs. Pour bien les caractériser et pour prévenir les risques associés, différentes techniques de surveillance peuvent être mises en œuvre. Lors du colloque, les travaux d'inspection visuelle réalisés par le Service Commun des Carrières Souterraines de la Ville de Lille ont été présentés. Cette approche peut être complétée par l'instrumentation des cavités avec différents capteurs. L'exemple de la carrière Gide-Krebs (Hellemmes, France), instrumentée par l'Ineris et connectée à la plate-forme e-Cenaris, a été développé.

Dans le cas des carrières souterraines, différents mécanismes peuvent induire des dégradations. Ils trouvent leur origine non seulement dans les caractéristiques du massif rocheux mais aussi dans des facteurs bio-physico-chimiques, les techniques d'exploitation employées, l'histoire du site et toute une série de facteurs extérieurs. Ces mécanismes de dégradation ont été expliqués et illustrés par plusieurs exemples. Le cas particulier des carrières souterraines de la Malogne, site test sur le versant wallon, a été développé. L'approche combine un travail sur le terrain et en laboratoire : recensement des désordres, caractérisation mécanique du massif rocheux, essais mécaniques en laboratoire et modélisation numérique du comportement de l'ouvrage. Enfin, un dernier volet abordé lors du colloque concerne l'influence minière sur les ouvrages souterrains proches de la surface, également à travers l'exemple de la Malogne.

Introduction

Le 14 novembre 2019, lors de la journée consacrée à la gestion transfrontalière du risque cavités, les partenaires du projet RISSC ont présenté leurs avancées devant environ 80 personnes issues de collectivités territoriales, d'universités, de sociétés savantes, de bureaux d'études et de gestionnaires d'infrastructures. La matinée a été dédiée aux présentations du projet et de son contexte tandis que l'après-midi a permis d'aborder les mécanismes de dégradation, l'influence minière sur les ouvrages souterrains proches de la surface et les moyens de sécurisation. Les chapitres ci-dessous synthétisent les exposés du colloque, repris suivant l'ordre des présentations. Cette séquence correspond également au phasage classique d'analyse : connaissance, suivi, diagnostic et gestion.

1. Présentation du projet

Les Régions de Wallonie et des Hauts-de-France comportent sur leur territoire de nombreuses cavités souterraines d'origines anthropique (mines, carrières, etc.) et naturelle (karsts), qui induisent souvent une menace à l'égard de la sécurité des personnes, des biens immobiliers, des projets d'aménagement et de l'attractivité socio-économique de certains territoires.

Les politiques publiques de prévention et de gestion des risques du sous-sol, des deux côtés de la frontière, mettent en œuvre des outils différents et perfectibles. C'est pourquoi le projet RISSC vise l'amélioration et la mise à disposition d'outils en matière de sécurité, d'aménagement du territoire, tant en prévention qu'en gestion d'incidents.

Prônant la mutualisation des ressources existantes (règlements, données, méthodologies, etc.) et les échanges de bonnes pratiques à l'échelle transfrontalière, le projet propose la mise en œuvre d'actions portant sur :

1. **la caractérisation des objets et des menaces présents en Wallonie et dans les Hauts-de-France** : l'objectif principal est le renforcement transfrontalier de la connaissance du sous-sol et des risques liés aux cavités souterraines et objets du sous-sol en Wallonie et dans le Nord de la France, par la mutualisation des ressources existantes (données, méthodologies et outils) ;
2. **le développement de solutions locales adaptées pour réduire le risque** : ce module vise une synthèse des méthodes de traitement classiquement mises en œuvre en Wallonie et dans les Hauts-de-France et propose des solutions innovantes ou alternatives, qui seront adaptées à la configuration des vides et aux contextes nationaux (réglementaire, économique, territorial et patrimonial) ;
3. **la mise en place d'un soutien technique à destination des acteurs locaux et de la population** : cet axe propose une interface transfrontalière entre les décideurs publics, les administrations, les experts et la population avec pour objectifs de :
 - répertorier les cadres réglementaires, les comparer et identifier les pratiques en vue de leurs améliorations ;
 - constituer un réseau transfrontalier d'élus pour faciliter les échanges avec l'administration et les experts ;
 - établir un pôle transfrontalier de connaissances et d'expertises de soutien technico-administratif destiné aux acteurs locaux.

Pour atteindre ces objectifs, le projet RISSC a été doté d'un budget global de 1 493 060 € dont 746 530 € subsidiés par le Fonds FEDER. Le projet réunit des partenaires actifs en Wallonie et Hauts-de-France en matière de caractérisation, prévention et gestion des risques du sous-sol : ISSeP, Association des Communes Minières de France, CEREMA, Ineris, Université de Mons, Université de Lille, villes de Lille et de Mons, Service Public de Wallonie (SPW Mobilité et Infrastructures et SPW Agriculture, Ressources Naturelles et Environnement (anciennement DGO1 et DGO3)).

2. Les types de cavités présents en Hauts-de-France et en Wallonie

En raison d'une géologie commune, des similitudes existent des deux côtés de la frontière en termes de typologie des cavités souterraines, avec des exploitations souterraines de craie (Figure 1a) ou de sable (Figure 1b), des cavités karstiques certes moins nombreuses en Hauts-de-France qu'en Wallonie, et des mines de fer notamment. Un autre point commun concerne la présence de mines de charbon profondes. Certaines concessions s'étendent dans des secteurs où des cavités souterraines plus superficielles se trouvent également.

L'inventaire des cavités a également mis en évidence des disparités avec des types de cavités qui influencent de manière plus prégnante certaines zones des Hauts-de-France. C'est le cas des sapes de guerre, des souterrains refuges (Figure 2) ou d'habitats troglodytiques par exemple. A l'inverse, en Wallonie existent de vastes carrières souterraines de craie phosphatée (Figure 3) alors qu'en Hauts-de-France, ce type d'exploitation est d'emprise réduite ou plutôt à ciel ouvert.



Figure 1 : Exemples de cavités typiquement rencontrées en Wallonie et dans les Hauts-de-France. (a) Carrière de craie de Hesbaye à Jauche-la-Marne (carrière de l'étang, photo SPW). (b) Carrière de sable dans la vallée de l'Aisne (photo Cerema).



Figure 2 : Configuration typique d'un sape de la Première Guerre Mondiale (source : Sagnier et Rochut, 2003).

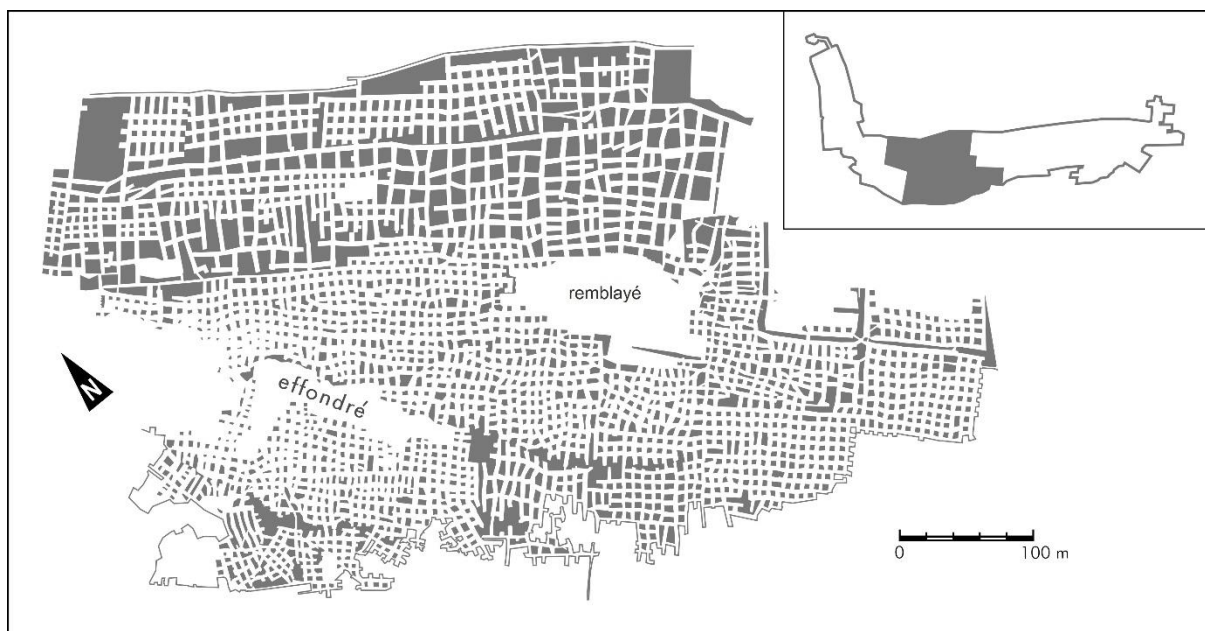


Figure 3 : Exploitation de craie phosphatée par chambres et piliers aux carrières de la Malogne (Mons, Belgique ; d'après les données du SPW). Le secteur détaillé représente une surface de 25 ha.

3. Les bases de données relatives aux cavités souterraines

En Wallonie comme dans les Hauts-de-France, l'existence de cavités souterraines remonte à des temps très anciens. De ce fait, la constitution de bases de données exhaustives est compromise par manque de traçabilité, liée notamment au cadre réglementaire.

3.1 Situation en Wallonie

Le Service Public de Wallonie (SPW) alimente ses bases de données avec différentes sources d'informations, tantôt surfaciques, tantôt au niveau du parcellaire cadastral, voire seulement ponctuelles: les archives de l'ex-Administration des Mines, les descriptions de la Carte géologique de Belgique à 1/40.000 et de la Carte géologique de Wallonie à 1/25.000, des levés topographiques réalisés lors d'interventions du SPW, des campagnes locales de recensement d'indices de terrain suite à des effondrements, etc.

Les premières cartographies de cavités souterraines consistaient en une série de projets distincts de recensement en fonction du type d'exploitations ou du type de données : parcellaire cadastral (phosphates, marnes, silex, etc.), recensements ponctuels d'indices, recensements ponctuels de dépressions, digitalisation des emprises de carrières souterraines et de zones d'indices de carrières souterraines. Il en résulte une grande disparité quant à la structure, l'origine, la précision et l'exhaustivité des données.

Une première rationalisation des données a eu lieu en 2010 avec la création des « zones de consultation de la DRIGM »¹ liées à la présence de carrières souterraines, gisements et puits de mines, potentialité d'anciens puits, minières de fer ou karst (Figure 4). Chaque cartographie est affectée d'une zone tampon (imprécision et impact) pour obtenir une « surcouche » unique destinée à limiter les consultations aux zones sensibles.

Actuellement, les données relatives aux cavités souterraines font l'objet d'une diffusion à travers un site internet didactique (<http://geologie.wallonie.be>), une application de consultation « Thématiques sous-sol » et une « Fiche d'informations sous-sol » (usage interne au SPW). Cette base de données est en pleine mutation pour des impératifs administratifs, notamment pour intégrer les travaux de recherche sur les aléas en relation avec les cavités souterraines, et techniques. Le SPW travaille ainsi à une seconde rationalisation qui concerne la géométrie des objets (corrections, nouvelles données) et se focalise sur des attributs spécifiques (roche exploitée, type d'exploitation, remblayage, etc.). La diffusion se fera à travers deux géoservices spécifiques : « Carrière souterraines » et « Aléas de mouvements de terrain ».

¹ Zones dans lesquelles il est nécessaire de consulter la Direction des Risques Industriels, Géologiques et Miniers (DRIGM) du SPW Agriculture, Ressources Naturelles et Environnement avant tout projet

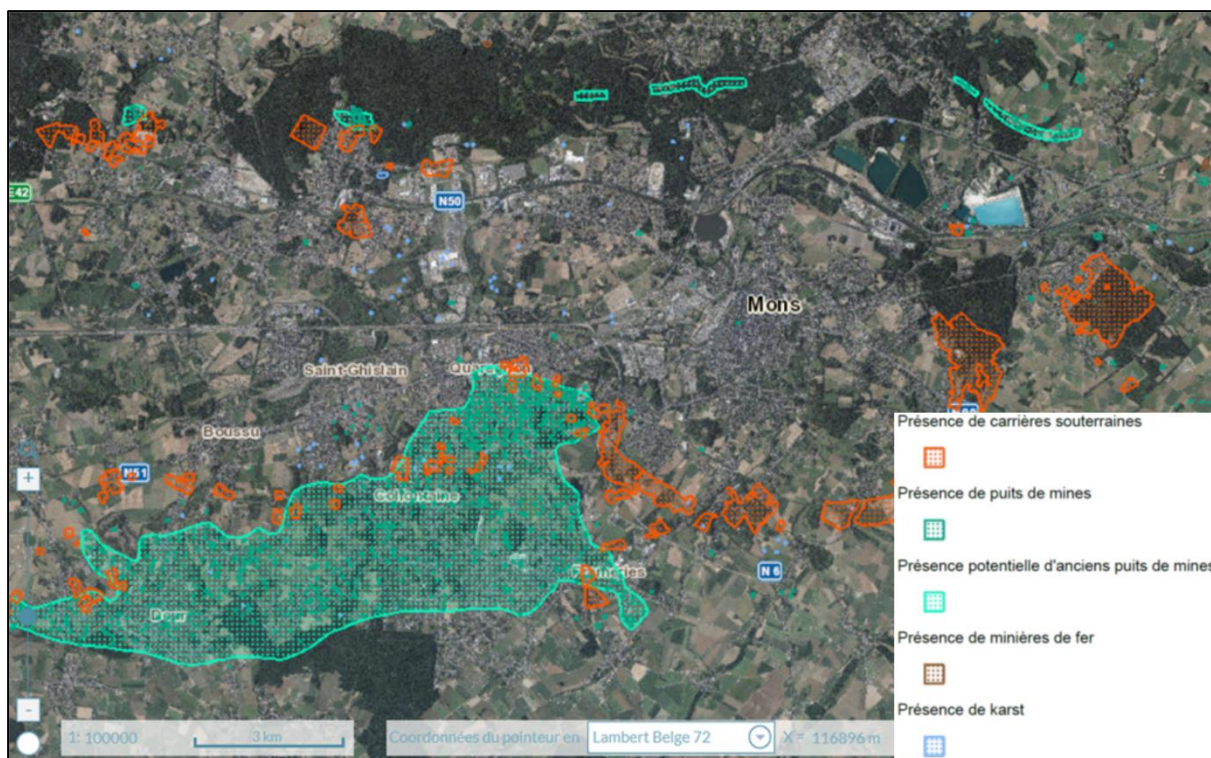


Figure 4 : Zones de consultation de la DRIGM - exemple en région de Mons (source : SPW).

3.2 Situation en Hauts-de-France

En France, les données relatives aux cavités souterraines se répartissent entre différents acteurs et à différentes échelles. Les bases de données nationales (BD Cavité, BD Mouvements de terrains intégrées aux sites Géorisques du Ministère de l'Ecologie et banque de données du sous-sol Infoterre) sont gérées par le BRGM et couvrent l'ensemble du territoire français. Plus localement dans la région des Hauts-de-France, elles sont complétées par les bases de données des directions départementales des territoires (DDT), des collectivités territoriales comme les communes d'Amiens, Cambrai, Laon, Saint-Quentin et la Métropole européenne de Lille (issues des données de l'ancien service départemental des carrières du Nord – SDICS), voire même des bases de données privées établies par des associations historiques et spéléologiques.

Initiée en 1997, la BD Cavité recense et localise les cavités souterraines abandonnées, hors mine. Publique, elle inventorie les caves anciennes et abandonnées, les carrières souterraines, les cavités souterraines, les ouvrages civils, des puits, des souterrains, des ouvrages militaires et des vides indéterminés. Toutes ces entités sont matérialisées par une localisation ponctuelle qui peut être le centre de la cavité, un orifice supposé, mais parfois aussi un mouvement de terrain provoqué par le vide, etc.

En 2014, la BD Cavité a intégré un portail cartographique plus large et nommé « Géorisques » qui regroupe les informations de 15 sites internet différents et continue d'évoluer. Les données proviennent d'inventaires départementaux, de données spéléologiques et de partenaires locaux. Ainsi, 186 000 cavités sont actuellement recensées en France dont 12 247 pour la région des Hauts-de-

France (Figure 5). L'accès aux données se fait via une recherche par identifiant, département, commune ou type de cavité. Des fiches d'informations sont disponibles et accessibles via le site internet consultable par le public <https://www.georisques.gouv.fr/> mais, contrairement au site d'information wallon, les emprises des cavités ne sont pas indiquées.

La BD Mouvements de terrains recense et localise les mouvements de terrains dont certains sont dus à des cavités. La banque de données du sous-sol met à la disposition du public tous les sondages de reconnaissance de sol (normalement de plus de 10 m de profondeur) dont ceux qui ont traversé des vides souterrains.

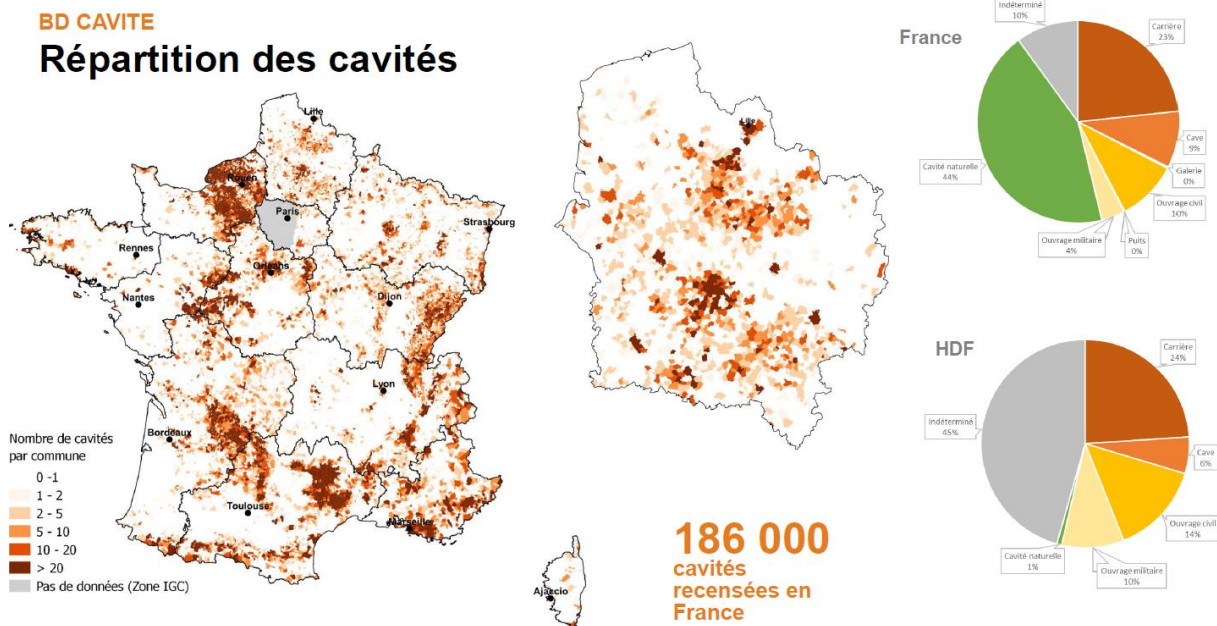


Figure 5 : Répartition des cavités souterraines en France et en particulier dans les Hauts-de-France d'après le portail Géorisques (source : Yart, 2019).

4. L'inspection visuelle

L'inspection visuelle est un outil fondamental de la prévention du risque lié aux carrières souterraines. A Lille, un service commun des carrières souterraines a été créé pour assurer cette mission, à l'origine sur le territoire exclusif de la ville de Lille puis maintenant étendu à la Métropole Européenne de Lille. En effet, 11 communes de la Métropole lilloise sont concernées par le risque de mouvement de terrain lié aux anciennes carrières de craie. Actuellement, plus de 160 carrières ont déjà été recensées et de nouvelles carrières sont régulièrement découvertes. Elles exposent ainsi environ 70 000 citoyens aux risques liés à leur présence.

Le travail commence par un état géotechnique « initial » de la carrière. L'inspection couvre de nombreux aspects du site et se focalise sur les points particulièrement sensibles : les têtes de catiche (Figure 6), l'état des piliers (écaillage, ruine) et du toit (ou ciel ; fractures, chutes de toit), les éventuels rejets d'eaux usées, les pollutions, les montées de voûte, les ouvrages de confortement existants, etc. Parallèlement, l'inspection apporte aussi des informations pour l'inventaire du patrimoine et le suivi de la biodiversité. Les données de l'inspection sont intégrées dans un outil SIG.

Suite à cet état initial, différentes techniques ont utilisées pour assurer le suivi : installation de bâches pour identifier de nouvelles chutes de blocs, mise en peinture pour identifier les écaillages de piliers par exemple. Les dispositifs de surveillance instrumentée existants sont également contrôlés à cette occasion.

Certains travaux préventifs peuvent aussi être programmés : confortement de pilier par des travaux de maçonnerie, comblement sectorisé, comblement d'une carrière en état de ruine.

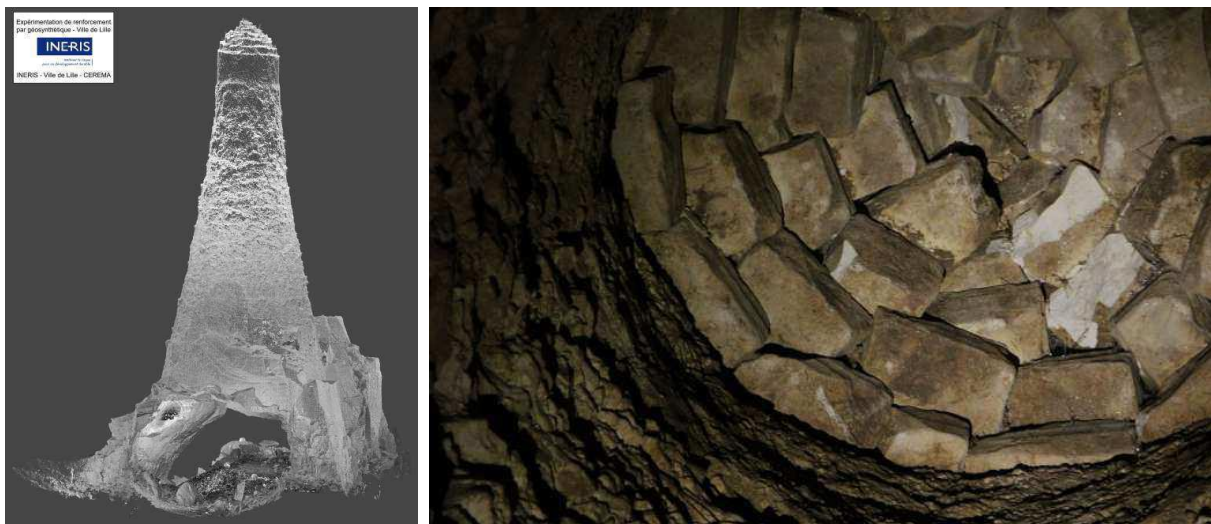


Figure 6 : Scan 3D d'une catiche, typique de la région de Lille (source : Ineris) et photo d'une tête de catiche (source : Cerema).

5. Le suivi par instrumentation

Lorsque des enjeux en surface peuvent être affectés par l'instabilité d'une cavité souterraine ou lorsque le site souterrain est difficilement accessible, l'instrumentation est parfois préconisée en attendant un traitement de la cavité, une délocalisation ou un traitement des enjeux. Cette technique de suivi contribue également à la compréhension de l'évolution d'un mécanisme de ruine.

Plusieurs questions se posent lorsqu'une instrumentation est envisagée pour un site : le type de mécanisme de ruine, la vitesse du phénomène, les facteurs déclenchants ou aggravants, la durée de la surveillance, etc. Techniquement, les principales difficultés consistent à anticiper les mouvements pour informer et alerter à temps. Autrement dit, la chaîne de mesure et d'acquisition doit être conçue en appréciant au mieux les paramètres et secteurs clés à suivre, tout en déterminant des seuils d'alerte raisonnables et en gérant les actions qui en découlent.

La surveillance instrumentée repose sur la mesure en continu de grandeurs physiques, dont les plus courantes sont les déplacements (en tous sens) et/ou déformations, les mesures de pression, accompagnées par la mesure de facteurs physico-chimiques (température, niveau d'eau, humidité relative, teneur en gaz, etc.). La station expansion-convergence est un exemple classique d'instrumentation ponctuelle utilisée dans les exploitations en chambres et piliers. Combinant cannes de convergence et extensomètres au toit et dans le pilier, c'est une mesure importante car le pilier est la structure porteuse de l'édifice ; sa stabilité est souvent prépondérante dans la stabilité globale de l'ouvrage.

Cependant, les mesures ponctuelles restent par nature très localisées. En outre, la pose des appareillages peut être complexe en zones d'accès difficile et/ou dangereux ou en présence de désordres importants. Sur de grands sites, le nombre de capteurs, la durée d'installation, l'entretien et les coûts deviennent très importants. D'autres techniques existent pour assurer la surveillance « en grand » des ouvrages souterrains : les mesures de vibrations (écoute sismique), acoustiques, déplacement sans contact (radar), hydriques (éventuellement couplées avec des mesures météorologiques en surface). Il est aussi possible d'opérer un suivi des effets des mouvements de terrain en surface par une télésurveillance des enjeux (inclinomètres, théodolite automatisé, balises GPS-RTK).

Les points importants d'un dispositif de surveillance consistent donc à :

- bien identifier l'objectif de la surveillance ;
- garantir le bon fonctionnement du dispositif (milieux agressifs) ;
- gérer les données (acquisition / traitement / stockage / restitution) ;
- identifier les situations anormales et préparer la crise.

Tout cela implique forcément des coûts d'investissement mais aussi d'entretien qu'il faut prendre en compte.

Dans le cadre du projet RISSC, l'Ineris évalue les solutions d'instrumentation pour le suivi des cavités. Une carrière possédant des secteurs dégradés (piliers dégradés, chute de toit, etc.) a été sélectionnée pour y installer un réseau de surveillance visant à illustrer l'applicabilité de ces instruments à la surveillance des carrières des Hauts-de-France et de Wallonie. Il s'agit de la carrière Gide-Krebs à Hellemmes (France). En plus des instruments de mesures de déplacement classiques déjà présents

dans la carrière (cannes de convergence suivies par la Métropole Européenne Lilloise), d'autres instruments permettant un suivi des dégradations à distance ont été installés (Figure 7):

- deux radars destinés à suivre l'évolution des bouchons en tête de catiche depuis le bas des galeries,
- un microphone, à déclenchement sur seuil, pour « écouter » d'éventuelles chutes de blocs dans l'environnement immédiat d'une zone dégradée,
- une sonde de température PT100,
- une sonde de pression pour mesurer le niveau d'eau et ainsi suivre l'évolution du niveau de la nappe dans la carrière.

Ces capteurs sont raccordés à une station d'acquisition en surface qui collecte et télétransmet les données au centre de surveillance de l'Ineris à Nancy. Les données valorisées sous forme de chroniques graphiques sont ensuite gérées au moyen de la plateforme internet e-Cenaris (<https://cenaris.ineris.fr/>) qui permet, outre la centralisation des informations, la gestion opérationnelle de la surveillance (validation des données et gestion d'alertes notamment).

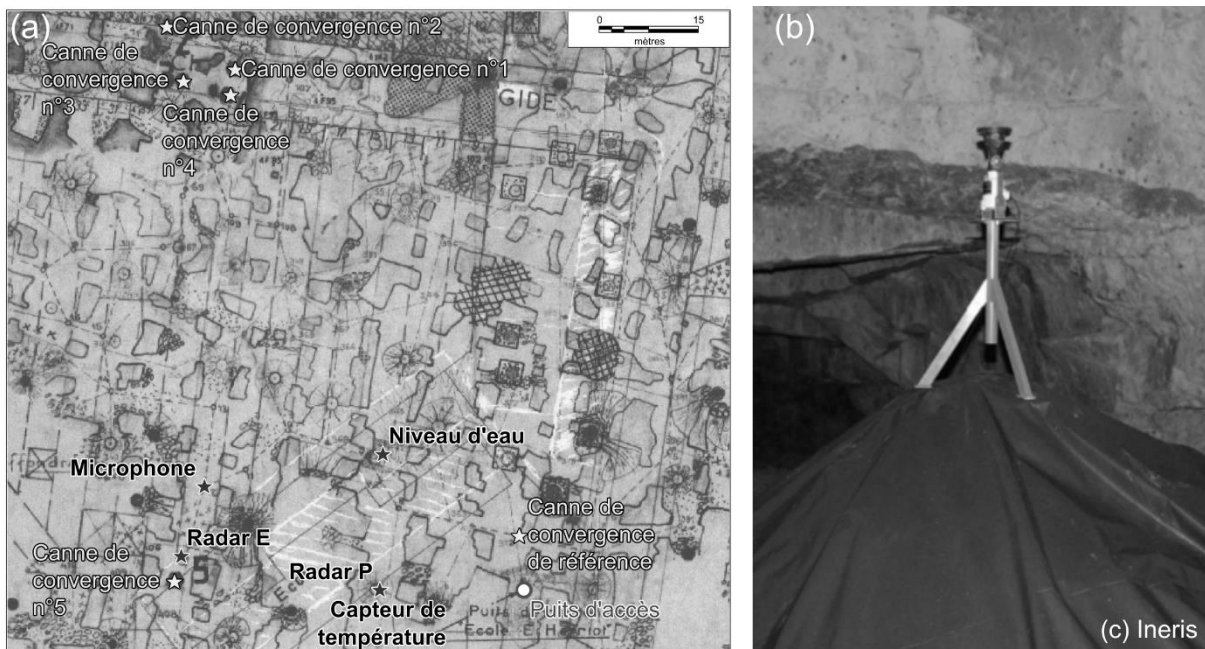


Figure 7 : (a) Dispositif d'instrumentation. (b) Radar mis en œuvre dans la carrière Gide-Krebs (Lille).

6. Les mécanismes de dégradation d'une carrière souterraine

Les facteurs d'évolution d'une cavité dépendent d'abord des caractéristiques du massif rocheux : propriétés mécaniques, état de fracturation, stratigraphie, géométrie, hydrogéologie, topographie. Mais des facteurs bio-physico-chimiques jouent aussi un rôle important, comme par exemple l'altération des matériaux liée à l'humidité. Les techniques d'exploitation employées et l'histoire du site (ancienneté, durée d'exploitation, reprises, défrètement, consolidations anciennes) sont autant d'autres facteurs à prendre en compte. Enfin, il existe une série d'éléments extérieurs qui peuvent contribuer à la dégradation d'une cavité : l'urbanisation, les activités de surface, les interactions avec les eaux de surface, voire des accidents.

Dans une carrière souterraine, les principaux points de faiblesse sont le toit (ou ciel) et les piliers. Selon la configuration de l'exploitation, d'autres points sensibles peuvent être pris en compte : les têtes de puits, particulièrement pour les catiches, le mur (ou radier) notamment dans les carrières de gypse. Les accidents qui surviennent ont tantôt un caractère progressif ou brutal, ils peuvent être localisés ou, au contraire, généralisés.

Parmi les ruptures ponctuelles, on peut citer :

- l'effondrement d'un bouchon de puits et le débouillage en galerie des terrains non cohérents de surface,
- la chute de toit c'est-à-dire le délitement de dalles du ciel (Figure 8a): associées à un ciel insuffisamment compétent et à la présence de diaclases, ces ruptures sont souvent localisées à l'intersection des galeries où les portées sont les plus importantes ; elles peuvent évoluer en montées de voûte et générer un fontis (Figure 8b).



Figure 8 : Quelques dégradations fréquemment rencontrées dans les carrières souterraines (source : Dubois, 2019).
(a) Chute de toit. (b) Fontis. (c) Desquamation d'un pilier à Lezennes. (d) Pilier en diabolo à Lille-Hellemmes.

Au niveau des piliers, les ruptures sont liées à une sollicitation trop importante (défruitement² exagéré) mais aussi à la présence de diaclases, de failles. Les désordres commencent par l'apparition de fissures dans les angles du pilier, qui évoluent en épaufures. Sur les faces, des plaques se détachent (écaillage, desquamation ; Figure 8c) faisant évoluer le pilier vers une forme de diabolo (Figure 8d), avec une section portante efficace réduite conduisant progressivement à la ruine du pilier.

Dans le cas d'un mur peu épais ou suffisamment déformable, voire d'une mauvaise superposition des piliers en cas de présence d'un niveau d'exploitation inférieur, une rupture peut aussi se produire. Elle provient d'un poinçonnement du mur par les piliers.

Les effondrements généralisés (ou en masse) se manifestent lorsqu'une charge trop importante n'est plus supportée par un pilier affaibli ou déjà en ruine. En l'absence de masses vierges pouvant bloquer la dynamique d'extension, la charge se reporte alors sur les piliers voisins qui, à leur tour, sont en surcharge. Cette configuration suppose également la présence d'un toit massif pouvant encaisser temporairement une déformation du massif et restituer brutalement l'énergie accumulée. La rupture des piliers produit un effet de souffle, avec des secousses sismiques. L'ensemble du recouvrement s'effondre en bloc.

Dans le cas d'une carrière ouverte en falaise ou à flanc de coteau, la décompression du versant peut induire des fractures et contribuer à l'instabilité. C'est le cas ponctuellement aux carrières de la Malogne (Mons).

Dans les exploitations classiques en chambres et piliers, les effondrements, localisés ou généralisés, sont surtout liés aux dimensions des chambres et des piliers, à l'état du toit et aux surcharges éventuelles. Dans les configurations d'extraction totale (par exemple, les hagues et les bourrages) ou de foudroyage à l'avancement, on observe surtout un tassement d'ensemble, une compression des remblais, quelques vides liés au tassement et aux espaces non comblés initialement, et aussi des fontis sans conséquences.

Les carrières de gypse se caractérisent par des qualités mécaniques médiocres. Les problèmes typiques sont les fontis, la dissolution rapide des niveaux de gypse et les mécanismes de poinçonnement. Les marnières, quant à elles, représentent un problème épineux en Haute Normandie particulièrement. Exploitées localement du XVII^{ème} au XIX^{ème} siècle, elles ne sont pas répertoriées et produisent des effets désastreux dus au ruissellement. Dans le cas des mines, les affaissements sont progressifs et prévisibles. Liés à des exploitations profondes, ils se traduisent en surface par une dépression topographique appelée « cuvette d'affaissement ».

L'eau est réputée pour influencer la dégradation des carrières souterraines. L'ennoyage, et plus particulièrement le battement du niveau de la nappe, peut modifier les propriétés mécaniques des roches. L'hygrométrie, en surchargeant les terrains de couverture, est fortement corrélée au nombre d'incidents recensés. Un délai de plusieurs mois est souvent observé entre les périodes de fortes précipitations et les pics d'incidents. Différents effets de l'altération peuvent se manifester : dissolution des carbonates liée à la teneur en CO₂ dans l'eau, concrétionnement de calcite, saturation des piliers qui réduit leur résistance, succession de cycles de saturation-désaturation dans les piliers avec fissuration et desquamation, fatigue et fluage, dépôt de sels dans la porosité des roches lors de l'évaporation et gonflement.

² Rapport de la surface exploitée à la surface totale

7. La compréhension des mécanismes de ruine des cavités souterraines – cas de la Malogne

Depuis le démarrage du projet RISSC, l'étude des mécanismes de ruine des cavités souterraines a essentiellement ciblé le site wallon pour lequel un avancement des travaux a été présenté lors du colloque. Les anciennes carrières de la Malogne (Mons) exploitaient la craie phosphatée par la méthode des chambres et piliers. Elles ont été choisies en raison de leurs dimensions importantes pour la Wallonie, de la diversité des phénomènes géomécaniques et surtout de l'enjeu qu'elles représentent pour la Ville de Mons en matière de sécurité publique et d'aménagement du territoire. Sur le versant français, la carrière Gide-Krebs (Métropole lilloise, France) a été sélectionnée. Ce site est géré par le Service commun des carrières de la Ville de Lille, ce qui en facilite l'accès.

Sur les deux sites, l'approche consiste à recenser les désordres et leur géométrie spécifique et à comparer les contextes géologiques. La démarche se poursuit avec la caractérisation des masses rocheuses concernées, en laboratoire et in situ, y compris les terrains de recouvrement pour ensuite modéliser les effets redoutés. Des solutions analytico-empiriques existent pour modéliser les effets de ruine des cavités souterraines, notamment la subsidence en surface (Brady et Brown, 2005). Toutefois, la modélisation numérique s'impose pour une bonne compréhension des phénomènes le plus souvent spécifiques aux sites étudiés.

Avec le soutien et les données du Service Public de Wallonie et de l'ISSEP, l'Université de Mons a donc commencé l'élaboration d'une méthodologie d'étude géomécanique sur un secteur spécifique de la Malogne. Une cartographie détaillée des instabilités est réalisée (Figure 9): failles majeures, karstification et oxydation, chutes de toit, fontis en forme de coupole, éclatement de piliers, etc. Les travaux en laboratoire ont permis de caractériser le comportement mécanique de la craie, sèche et saturée, et celui du calcaire des épontes en conditions atmosphériques. In situ, des levés structuraux et l'estimation d'indices de qualité du massif rocheux ont été réalisés dans différents secteurs. La qualité du massif varie de faible (en zone saturée) à bonne (dans le rocher sec). Un premier modèle numérique 2D dans une section verticale type a été réalisé en éléments finis. Il indique déjà quelques correspondances avec des phénomènes observés et permet d'étudier les effets de variation de la géométrie du problème et des propriétés mécaniques.

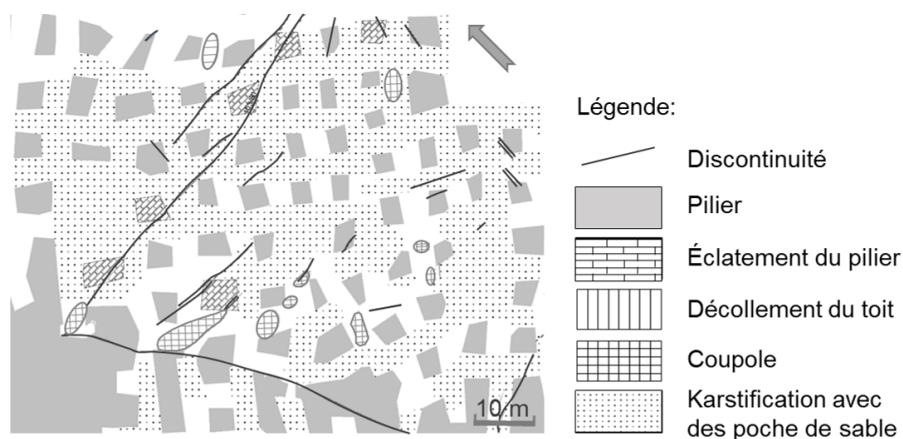


Figure 9 : Cartographie des instabilités dans un secteur test des carrières de la Malogne (Georgieva, 2019).

8. L'influence minière sur les ouvrages souterrains proches de la surface

Outre la présence de cavités souterraines proches de la surface, les régions de Wallonie et des Hauts-de-France ont aussi en commun un passé minier avec l'exploitation des bassins houillers. En Wallonie, les premières traces d'exploitation de charbon remontent au XII^{ème} siècle. L'exploitation s'est considérablement développée à l'ère industrielle avec des travaux dépassant 1400m de profondeur. Sur le plan géologique, les veines de charbon ont une puissance limitée (50cm à 1m) ; elles sont séparées d'épais intercalaires stériles. Cette configuration, couplée à la présence du grisou et/ou des venues d'eau importantes, a rendu l'exploitation difficile et a conduit progressivement à la fermeture des charbonnages, peu compétitifs dans le contexte mondial. Au total, 2.13 milliards de tonnes de charbon auront néanmoins été extraites en Belgique de 1831 à 1977. En France, le gisement du Nord fut seulement découvert en 1720, suivi par celui du Pas-de-Calais en 1847. Jusqu'à 1990, ces gisements auront contribué pour 2/3 de la production française, avec 2.4 milliards de tonnes extraites. Ils représentent aujourd'hui 700 millions m³ de vides créés en souterrain.

L'exploitation du charbon se faisait par la méthode de la longue taille. Le principe consiste à exploiter une tranche de minerai sur toute la longueur du front d'exploitation. Le soutènement provisoire est alors avancé vers le front d'exploitation pour permettre le foudroyage en arrière taille. Une nouvelle tranche est alors exploitée et le processus est réitéré jusqu'à la fin du panneau. La zone foudroyée a typiquement une hauteur de 2 à 8 fois celle de la tranche de minerai exploitée (Figure 10). Au-delà, des fractures se propagent vers la surface, avec un possible décollement des couches. Les effets de la taille se traduisent en surface par un affaissement, également appelé subsidence continue. De nombreux travaux ont été menés pour prédire la subsidence par des méthodes empiriques, par des fonctions d'influence et par des méthodes numériques.

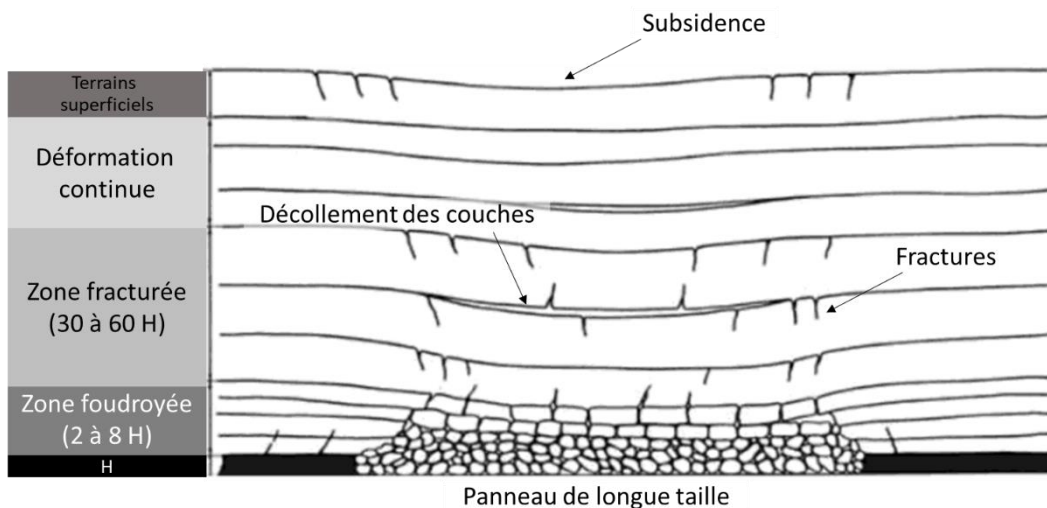


Figure 10 : Effets dans le voisinage d'un panneau exploité par la méthode de longue taille (d'après Brady et Brown, 2005).

Dans le cadre du projet RISSC, l'influence de l'exploitation de charbon sur les carrières souterraines de la Malogne est investiguée. En effet, sous une épaisseur d'environ 150m de morts-terrains, l'exploitation du charbon avait lieu pour des profondeurs allant de 200 à 750m environ, principalement dans la concession des Produits et du Levant de Flénu. La géométrie des anciennes exploitations est représentée dans des coupes méridiennes (coupes Nord-Sud à 1/5000 dressées tous les 100m et

donnant l'allure des veines de charbon) et dans les plans miniers. Tracés au 1/1000, ces derniers donnent pour chaque veine les limites des zones exploitées, les années, les épaisseurs déhouillées ainsi que les ouvrages miniers.

Le travail envisagé s'organise en trois phases. D'abord, la préparation des données consiste à dresser l'inventaire des veines exploitées pour collecter les plans correspondants, les numériser et les géoréférencer. Les quelque 25 veines déhouillées dans le secteur ont conduit à collecter 256 plans miniers, qui ont été scannés et analysés. Cela a permis de réduire la quantité de plans à géoréférencer pour un traitement plus poussé à 145 plans. Sur ces 145 plans, les contours des zones déhouillées ont été digitalisés à différentes périodes : avant l'exploitation de la Malogne, après l'exploitation de la Malogne et en fin d'exploitation du charbon. Les profondeurs et les épaisseurs des veines de charbon sont aussi prises en compte, ce qui permet de construire un modèle 3D de l'exploitation du charbon dans chaque veine.

Ensuite, un modèle géologique tridimensionnel sera construit à partir des contours des zones exploitées et de leur épaisseur. L'historique de l'exploitation sera pris en compte. Ce modèle pourra servir de base pour les simulations numériques aux éléments finis.

9. Comment sécuriser une cavité ?

Le traitement de cavités souterraines, qu'il concerne la cavité ou les enjeux, peut viser trois objectifs : garantir la stabilité du site dans le long terme, valoriser les terrains de surface ou l'ouvrage souterrain et réduire le risque associé aux cavités. Il peut être réalisé de manière préventive ou en situation de crise, lorsque des désordres sont déjà apparus en surface.

Plusieurs critères techniques guident le choix de la méthode de traitement : le niveau de sécurité recherché, la destination du site et sa configuration. Parmi les solutions, on distingue les méthodes passives (pieux, géotextile, chaînage, radier, etc.) et les méthodes actives (boulonnage des piliers ou du toit, remblayage des chambres, confortement des piliers, etc.).

Le choix de la méthode peut être guidé par la nécessité de conserver la cavité ou non. Ainsi, les techniques de boulonnage et de soutènement par des piliers artificiels se distinguent des méthodes par comblement (partiel ou total, injections de traitement, déversement gravitaire depuis la surface, etc.), voire de suppression de la cavité. En cas de comblement, différentes solutions sont utilisées en fonction des opportunités et de la nécessité d'assurer une résistance mécanique minimale. On peut recourir à des comblements avec du tout-venant, des matériaux fins, du sable/sablon ou/et à des injections de coulis avec additif (ciment). Ces méthodes sont soumises à des spécifications rigoureuses, notamment en termes de contraintes environnementales. On peut enfin procéder par terrassement-comblement depuis la surface, ou par foudroyage de la cavité en abattant systématiquement les piliers à l'explosif.

Plutôt que d'agir sur la cavité, on décide parfois de traiter les enjeux en surface en renforçant la structure de la construction pour la rendre monolithique, en réalisant des fondations profondes pour reporter la charge sous le niveau de la cavité, en adaptant les réseaux (eau, voirie).

En Hauts-de-France et en Wallonie, une enquête transfrontalière, des entretiens ciblés et une recherche bibliographique (Pinon et Degas, 2016) sur les méthodes de mise en sécurité ont été réalisés dans le cadre du projet RISSC. Ces recherches montrent que les entités questionnées (collectivités, organismes publics, exploitants et bureaux d'étude) doivent gérer des cavités de tous types (carrières, mines, puits, sapes de guerre, souterrains refuges, vieux égouts, karsts, etc.), en majorité situées entre 0 et 20 m de profondeur et en général en milieu urbanisé ou sous voirie.

Ces cavités, ou leurs accès, sont traités par diverses méthodes et avec des objectifs variés (situation de crise, en prévention, en réhabilitation des terrains de surface, en valorisation, etc.). Les solutions de sécurisation par comblement restent toutefois les plus utilisées (en majorité avec un coulis à base de ciment) en Hauts-de-France comme en Wallonie. Comme elles sont onéreuses, l'identification de solutions de mise en sécurité alternatives est intéressante. Des exemples existent dans les régions concernées :

- le terrassement-comblement de catiches dans la région lilloise ;
- l'effondrement provoqué (foudroyage) des cavités dans le secteur des carrières de la Malogne à Cuesmes géré par la SNCB, au droit d'une ligne de chemin de fer (Raedschelders et al, 1987);
- le confortement par piliers maçonnés à Laon (Lambert et Duval, 2013).

Les mesures de contrôle et de surveillance post-travaux sont pratiquées de part et d'autre de la frontière selon des procédures relativement similaires.

Dans certains cas particuliers comme un traitement d'urgence (comblement des cavités difficiles d'accès ou réalisation de barrages), des produits spécifiques sont employés pour le comblement : injection de mousses, billes d'argiles, etc. Mais la pérennité dans le temps et les risques sanitaires de ces solutions sont encore mal connus (Pinon, 2018 ; Coussy et al, 2016).

Globalement, cinq critères principaux sont à retenir pour le choix d'une solution : les aménagements de surface actuels ou prévus, les objectifs de sécurité recherchés, les données disponibles sur le site, les contraintes pour les travaux et enfin l'enveloppe financière disponible.

A ces critères s'ajoutent d'autres questions techniques comme l'emprise traitée et son volume, l'accessibilité de la cavité, sa profondeur, les procédures administratives, les contraintes environnementales, le matériau de comblement, les impacts et la traçabilité des travaux. On peut ainsi arriver à établir des recommandations telles qu'illustrées dans le tableau de la Figure 11.

Destination		DEFORMATIONS ACCEPTABLES DE LA SURFACE		DEFORMATIONS NON ADMISSIBLES DE LA SURFACE		ESPACE SOUTERRAIN REUTILISÉ
		ESPACES VERTS, ZONE DE LOISIRS, PARC, PARKING	INFRASTRUCTURES LINEAIRES ET RESEAUX DIVERS	CONSTRUCTION EXISTANTE	CONSTRUCTION NOUVELLE	
Critères de site						
CAVITE SOUTERRAINE ACCESSIBLE		Traitement des enjeux et/ou confortement ou comblement partiel	Confortement ou comblement et/ou renforcement des structures et adaptation éventuelle des réseaux	Confortement ou comblement total avec injections ¹³ et/ou reprise en sous-œuvre	Confortement ou comblement total avec injections ¹³ et/ou renforcement du bâti et/ou fondations adaptées	Toutes méthodes de confortement
CAVITE SOUTERRAINE INACCESSIBLE	Hauteur de recouvrement <10 m	Terrassement-comblement et/ou comblement partiel ou traitement des enjeux	Comblement partiel et/ou renforcement des structures et adaptation éventuelle des réseaux	Comblement total avec injections ¹³	Terrassement-comblement ou comblement total avec injections ¹³ et/ou renforcement du bâti et/ou fondations adaptées	SO
	Hauteur de recouvrement >10 m	Comblement partiel et/ou traitement des enjeux	Comblement partiel et/ou renforcement des structures et adaptation éventuelle des réseaux	Comblement total avec injections ¹³	Comblement total avec injections ¹³ et/ou renforcement du bâti et/ou fondations adaptées	SO
CAVITE SOUTERRAINE EFFONDREE		Traitement des enjeux	Injections de traitement de terrain et/ou renforcement des structures et adaptation éventuelle des réseaux	Injections de traitement du terrain et/ou reprise en sous-œuvre	Injections de traitement du terrain et/ou renforcement du bâti et/ou fondations adaptées	SO

Figure 11 : Solutions minimales de traitement recommandées en fonction du site (d'après Tritsch, 2007).

Conclusions

En raison d'une géologie continue et d'une histoire industrielle similaire, les régions de Wallonie et des Hauts-de-France comptent sur leur territoire de nombreuses cavités souterraines qui représentent une menace à l'égard de la sécurité des personnes, des biens immobiliers, des projets d'aménagement et de l'attractivité socio-économique de certains territoires. Le projet Interreg RISSC vise l'amélioration et la mise à disposition d'outils en matière de sécurité, d'aménagement du territoire, tant en prévention des risques qu'en gestion d'incidents. Prônant la densification de l'offre de services en matière de sécurité par la mutualisation des ressources existantes (règlements, données, méthodologies, etc.) et les échanges de bonnes pratiques à l'échelle transfrontalière, les actions de RISSC portent sur :

- l'inventaire des objets souterrains et la caractérisation des effets redoutés en surface,
- le développement de solutions locales adaptées pour suivre l'évolution de l'aléa et réduire le risque,
- la création d'un pôle transfrontalier de connaissances et d'expertises à destination des acteurs locaux et du public, permettant la mise à disposition d'informations adaptées et directement utilisables.

Pour cela, le projet réunit les institutions en Wallonie et dans les Hauts-de-France actives dans ce domaine d'expertise. Ces institutions ont organisé, le 14 novembre 2019, un colloque dédié à la gestion transfrontalière du risque cavités.

On a y d'abord rappelé le contexte des cavités de part et d'autre de la frontière, avec des bases de données dédiées au sujet. Le colloque s'est poursuivi avec les méthodes de suivi des cavités, qu'il s'agisse de l'inspection visuelle ou des techniques d'instrumentation. Enfin, la troisième partie de la journée a été consacrée à l'examen des mécanismes de dégradation d'une carrière souterraine. En particulier, le cas des anciennes carrières de craie phosphatée de la Malogne est analysé en détail dans le cadre d'une thèse de doctorat à l'UMONS. Pour ce site, on s'intéresse également à l'influence des exploitations minières sous-jacentes. Enfin, les solutions permettant de sécuriser une cavité ont été présentées.

Références

Brady B.H.G., Brown E.T. (2005) Rock Mechanics for Underground Mining. 3^{ème} édition. Springer.

Coussy S., Albinet R., Djouad I., Bâlon P. (2016). Guide méthodologique de comblement de cavités à l'aide de matériaux alternatifs. Rapport final. BRGM/RP-66500-FR, 22 pages.

Lambert C., Duval C. (2013). Retours d'expérience de méthodes de traitement de cavités souterraines – Principes de diagnostic des constructions maçonnées en carrière souterraine. Rapport Ineris DRS-12-126055-12421A, 84 pages.

Pinon C. (2018). Retour d'expérience de l'utilisation de mousse urée-formol pour la mise en sécurité de cavités souterraines. Rapport Ineris DRS-18-171467-02488A, 24 pages.

Pinon C., Degas M. (2016). Guide sur les solutions de mise en sécurité des cavités souterraines abandonnées d'origine anthropique. Rapport Ineris DRS-15-149564-02401A, 78 pages.

Raedschelders H., Delcourt C., Hance L., Thimus J. (1987). Mise en évidence de cavités souterraines sous le Ring ouest de Mons. Annales des travaux publics de Belgique, Num 5, pp 79-96.

Sagnier C., Rochut J.N. (2003). La grande imagerie – La guerre 1914-1918. Fleurus.

Tritsch JJ. (2007). Mise en sécurité des cavités souterraines d'origine anthropique : Surveillance – traitement. Guide technique. Rapport Ineris DRS-07-86042-02484A, 148 pages.