

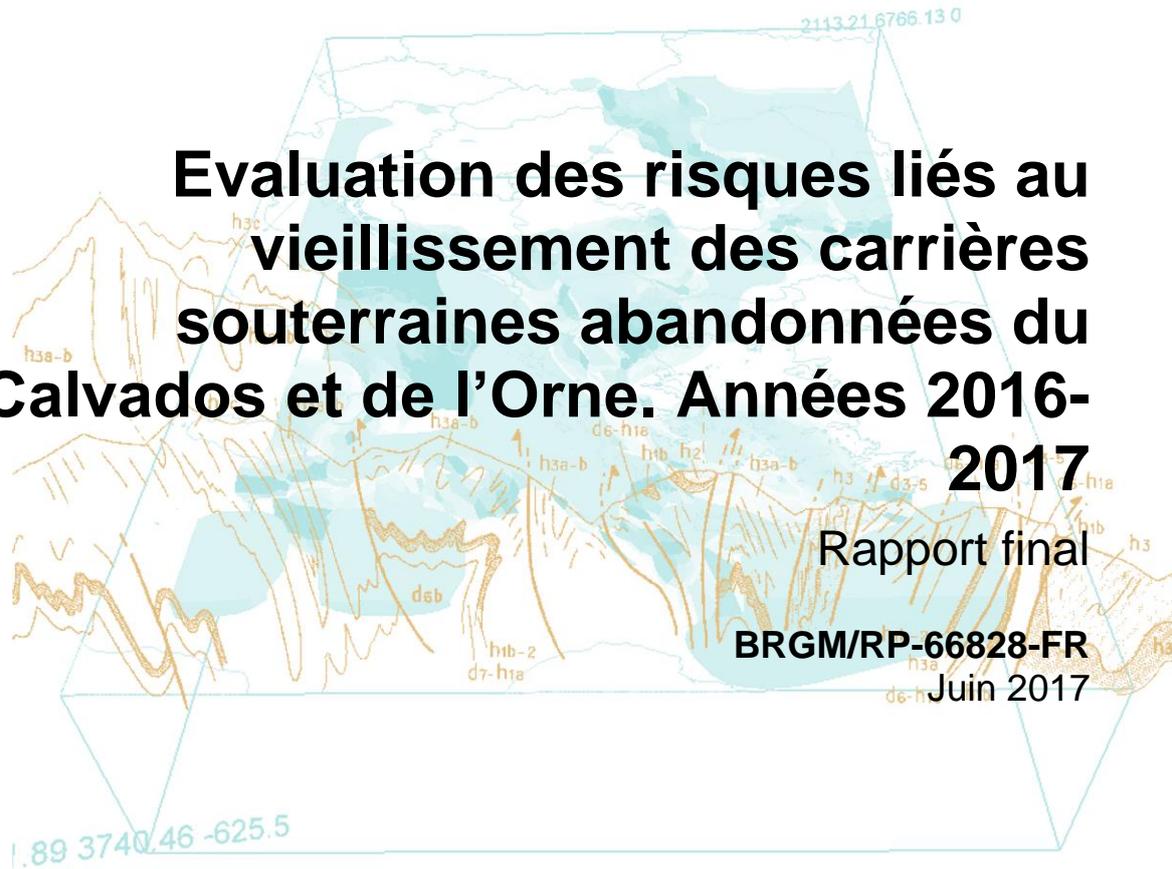


Evaluation des risques liés au vieillissement des carrières souterraines abandonnées du Calvados et de l'Orne. Années 2016-2017

Rapport final

BRGM/RP-66828-FR

Juin 2017



Evaluation des risques liés au vieillissement des carrières souterraines abandonnées du Calvados et de l'Orne. Années 2016-2017

Rapport final

BRGM/RP-66828-FR
Juin 2017

B. Meire, E. Plat, B. Milési

Avec la collaboration de

J. Ph. Vandorpe, F. Mathieu, T. Jacob, A. Portal, B. François, F. Beaubois, M. Imbault, S. Yart, F. Masson

Vérificateur :

Nom : P. Pannet

Fonction : Directeur régional délégué
Grand-Est

Date : 29/06/2017

Signature :



Approbateur :

Nom : D. Pennequin

Fonction : Directeur Régional

Date : 07/07/2017

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots-clés : Carrière souterraine, diagnostic de stabilité, investigations géophysiques, base de données, topographie souterraine, Bellavilliers, Saint-Langis-lès-Mortagne, Mauves-sur-Huisne, Loissail, Bény-sur-Mer, Basly, Calvados, Orne, Normandie.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Meire B., Plat E, Milési B. (2017) – Evaluation des risques liés au vieillissement des carrières souterraines abandonnées du Calvados et de l’Orne – Années 2016-2017 Rapport final. BRGM/RP-66828-FR, 82 p., 30 ill., 1 tabl., 11 ann., CD.

Synthèse

Le territoire de l'ex-Basse-Normandie, par sa diversité géologique, a été le siège d'une activité extractive foisonnante pour l'extraction de matériaux divers (minerais, granulats et pierres de taille pour la construction, marne pour l'amendement). Pour la pierre de taille et la marne, un grand nombre de carrières ont été exploitées en souterrain et la très grande majorité de ces exploitations sont aujourd'hui abandonnées. A terme, leur vieillissement peut induire des désordres en surface (effondrements, affaissements), comme ce fût par exemple le cas en 2011 à Saint-Pierre-Canivet (Calvados) ou à Courgeon (Orne), et en 2013 à Caen (Calvados).

Dans le cadre de ses missions d'appui aux politiques publiques qui s'inscrivent au contrat d'objectifs Etat-BRGM 2013-2017, la BRGM a initié en 2014, en partenariat avec la DREAL Normandie, un programme d'évaluation des risques liés au vieillissement des anciennes carrières souterraines de pierre de taille situées sur le territoire de l'ex-Basse-Normandie (Calvados, Orne et Manche).

Une première étude a permis de visiter une quinzaine de carrières souterraines de pierres de taille, creusées dans les calcaires du Bathonien des environs de Caen. Les comptes-rendus de ces visites ont fait l'objet d'un rapport BRGM (RP-64117-FR). Suite à cette étude, et au regard des observations effectuées lors des visites, il s'est avéré nécessaire de poursuivre les investigations sur d'autres carrières souterraines abandonnées pour évaluer leur degré de vieillissement, et notamment sur des carrières creusées dans les craies cénomaniennes.

Dans ce cadre, et en partenariat avec la DREAL Normandie, le BRGM a poursuivi les investigations sur les carrières souterraines abandonnées du Calvados et de l'Orne, avec pour objectifs de :

- poursuivre le travail initié en 2014, en réalisant de nouvelles inspections de carrières souterraines situées dans les formations sédimentaires du Bathonien (calcaire) et du Cénomaniens (craie) ;
- synthétiser l'ensemble des données dans une base de données dédiée ;
- affiner la méthode de suivi des cavités de l'ex-Basse-Normandie en :
 - o testant des méthodes de cartographie/topographie de cavités souterraines ;
 - o appliquant des méthodes géophysiques pour la détection d'anciennes carrières souterraines adaptées au contexte bas-normand.

La première étape du projet a porté sur l'élaboration d'une stratégie de sélection des sites intéressants pour effectuer un diagnostic de stabilité. Pour cela, une série de sélections a été appliquée sur la base de données des cavités souterraines de la DREAL Normandie pour ne retenir que les carrières souterraines potentiellement intéressantes, pouvant être traitées dans le cadre de cette étude. Suite à cette étape, la liste de carrières sélectionnées a été affinée via des visites de terrain (en surface), pour ne retenir que les carrières souterraines de pierre de taille accessibles, et pour lesquelles il est possible d'effectuer un diagnostic de stabilité. Ainsi, la stratégie élaborée dans le cadre de ce projet a permis d'identifier 46 carrières souterraines accessibles (sur les 325 visitées sur le terrain). Les sélections et les vérifications de terrain ont été menées à l'échelle communale.

Dans un second temps, 10 carrières souterraines situées sur les communautés de communes du Bassin de Mortagne-au-Perche (Orne) et d'Orival – Cœur-de-Nacre (Calvados) ont été retenues pour les investigations en souterrain et l'élaboration de diagnostics de stabilité. Le choix de ces carrières a été effectué en fonction des enjeux situés en surface (bâtiments, voiries, terrains de sports etc.) ou des risques d'intrusions pour les carrières en accès libre. Parmi ces 10 carrières souterraines, 5 sont creusées dans les craies cénomaniennes du Bassin de Mortagne-au-Perche (Orne) et 5 sont creusées dans les calcaires bathoniens du nord de la plaine de Caen (Calvados).

Les carrières retenues ont fait l'objet d'investigations en souterrain pour :

1. Dresser le plan géométrique de la carrière (si absence de plans) ;
2. Réaliser un diagnostic de niveau 1 (selon le guide de l'IFSTTAR - 2014).

L'ensemble des observations réalisées sur le terrain ont été compilées dans une base de données SIG dédiée au projet et développée dans le cadre de la présente étude. Elles ont par ailleurs été utilisées pour mettre à jour la base nationale des cavités souterraine BDCavité, gérée par le BRGM, et disponible via le site internet Georisques.fr.

Les visites de ces carrières ont ensuite abouti à la rédaction de 10 comptes rendus détaillés (en annexe hors-texte de ce rapport) qui viennent compléter ceux réalisés en 2014 (rapport BRGM-RP-64117-FR).

Outre les étapes de sélection des sites, plusieurs actions ont été réalisées afin d'affiner la stratégie de suivi des cavités en ex-Basse Normandie. En ce qui concerne le levé de la géométrie des cavités, différentes méthodes ont été mises en œuvre : levé « classique » semi-automatisé au laser mètre et à la boussole et mesure innovante au scanner laser 3D portatif « ZEB-REVO ». Il a ainsi été montré leur fiabilité (très peu d'écart entre les deux types de mesures) et leur complémentarité (en fonction de la taille de la cavité : la méthode « classique » demeure intéressante sur des cavités de taille inférieure à 1 000 m² et à géométrie peu complexe, ou pour des levés géométriques globaux dans le cadre de diagnostics d'urgence).

Par ailleurs, la cavité de Saint-Langis-les-Mortagne (Orne) (dont la géométrie a été levée au « ZEB-REVO ») a été retenue pour réaliser des investigations géophysiques destinées à montrer la pertinence des mesures micro-gravimétriques et électriques pour déterminer l'emprise des cavités dans le contexte bas-normand, lorsque celles-ci ne sont pas accessibles (ici cavités peu profondes dans la craie). Les résultats des investigations géophysiques se sont montrés particulièrement concluants.

Ainsi, cette étude, menée sur des carrières souterraines de dimensions et d'état général très variés, a également permis de déterminer les techniques les plus appropriées à mettre en œuvre, pour élaborer des diagnostics de stabilité destinés à évaluer le degré de vieillissement à long terme des cavités et de constituer la chaîne de traitement : identification des cavités ; si nécessaire : investigations non destructives (géophysique) ; levé géométrique ; diagnostic de stabilité ; bancarisation et archivage de l'information. La durée nécessaire pour les visites en souterrain est également mieux connue sachant que ce temps nécessaire reste indicatif puisque fonction du site (conditions d'accès, présence de CO₂, etc.).

Sommaire

1. Contexte et objectifs	9
2. Contexte géologique et géomorphologique du territoire de l'ex-Basse-Normandie	11
2.1. CADRE GEOLOGIQUE	11
2.2. CADRE GEOMORPHOLOGIQUE	12
3. Les carrières souterraines en ex-Basse-Normandie.....	13
3.1. L'EXPLOITATION DES PIERRES DE TAILLE EN EX-BASSE-NORMANDIE	13
3.1.1. Formations exploitées en ex-Basse-Normandie.....	13
3.1.2. Les méthodes d'exploitation	15
3.1.3. Les accès	16
3.2. LES RISQUES LIES AUX CAVITES SOUTERRAINES	17
4. Sélection des sites à visiter– traitement des bases de données et visites de surface..	19
4.1. PRE-SELECTION DES INDICES	19
4.2. VERIFICATIONS DE TERRAIN	20
4.3. HIERARCHISATION DES COMMUNAUTES DE COMMUNES A INVESTIGUER	22
4.4. CHOIX DES CAVITES A DIAGNOSTIQUER.....	23
5. Inspection des carrières souterraines abandonnées – diagnostics de stabilité.....	25
5.1. METHODOLOGIE : NIVEAU DE DIAGNOSTIC ET DONNEES UTILISEES.....	25
5.1.1. Niveau de diagnostic	25
5.1.2. Données géographiques et topographiques – environnement de la carrière....	26
5.1.3. Données géologiques et hydrogéologiques	26
5.1.4. Données historiques	26
5.2. TOPOGRAPHIES SOUTERRAINES – LEVES GEOMETRIQUES	27
5.3. FORMALISATION DES OBSERVATIONS.....	30
5.3.1. Données géométriques – contours et emprises	30
5.3.2. Etat des piliers	31
5.3.3. Fracturation	32
5.3.4. Chutes de toit et remontées de fontis	33
5.3.5. Ecaillage et décollement de 1 ^{er} banc de toit.....	34
5.3.6. Observations ponctuelles diverses	34
5.3.7. Evaluation qualitative de l'état général des carrières souterraines	35

5.4.	CONCEPTION D'UNE BASE DE DONNEES D'OBSERVATION ET DE SUIVI DE L'ETAT DE STABILITE DES CARRIERES SOUTERRAINES.....	35
5.5.	REALISATION DE COMPTES RENDUS DETAILLES	36
5.5.1.	Contenu des fiches	36
5.5.2.	Mise en forme cartographique.....	37
5.5.3.	Liste des fiches	37
6.	Application de méthodes géophysiques pour la détection de carrières souterraines abandonnées dans le contexte bas-normand.....	39
6.1.	MICROGRAVIMETRIE	39
6.1.1.	Rappel de la méthodologie.....	39
6.1.2.	Résultats	41
6.1.3.	Conclusions / pertinence de la méthode.....	43
6.2.	METHODES ELECTRIQUES	43
6.2.1.	Rappel de la méthodologie.....	43
6.2.2.	Résultats	45
6.2.3.	Conclusions / pertinence de la méthode.....	47
7.	Conclusions et perspectives.....	49
7.1.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES GENERALES	49
7.2.	RESULTATS DES DIAGNOSTICS.....	51
7.2.1.	Tableau de synthèse	51
7.2.2.	Analyse par communautés de communes.....	55
7.2.3.	Conclusion sur le vieillissement et zones à investiguer	56
8.	Bibliographie.....	57

Liste des figures

Illustration 1 : Carte géologique du territoire de l'ex-Basse-Normandie. Les terrains crétacés sont représentés par la couleur vert clair, les terrains jurassiques par la couleur bleue	11
Illustration 2 : Les paysages de l'ex Basse-Normandie, intimement liés à la nature géologique du substratum (source : http://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr)	12
Illustration 3 : Exploitation des terrains sédimentaires du Bassin Parisien en Normandie (Evrard, 1987) .	14
Illustration 4 : Répartition des calcaires du Bathonien (Jurassique moyen – en bleu clair) et du Cénomanién (Crétacé supérieur – en vert) sur le territoire de l'ex-Basse-Normandie (source : traitement des cartes géologiques harmonisées du BRGM).....	14
Illustration 5 : Exemple d'une géométrie caractéristique d'une carrière exploitée par chambres et piliers tournés (Loisail – Orne).....	15
Illustration 6 : Exemple d'une géométrie caractéristique d'une carrière exploitée par chambres et galeries (Bellavilliers – Orne)	16
Illustration 7 : Schéma des différents types d'accès aux carrières souterraines (IFSTTAR, 2014).....	16
Illustration 8 : Répartition des indices de cavités retenus lors des phases de sélection par communautés de communes	20
Illustration 9 : Méthodologie de validation des indices sur le terrain	21
Illustration 10 : Illustration de la table X_SELECTION_INDICES_BD_DREAL.shp qui bancarise les données de terrain (surface)	22
Illustration 11 : Définition des différents niveaux de diagnostics (source : IFSTTAR, 2014)	25
Illustration 12 : Contenu des différents niveaux de diagnostics (source : IFSTTAR, 2014).....	26
Illustration 13 : Exemple d'un levé géométrique par la méthode « classique » sous PocketTopo® - cas de la carrière de Mauves-sur-Huisne (BNOAA0000765 – R25_61255P3, P4 et P32)	28
Illustration 14 : Illustration du nuage de points 3D réalisé sur la carrière souterraine de Saint-Langis-lès-Mortagne (levé « fond » et « surface)	29
Illustration 15 : Comparaison des méthodes de topographies sur la carrière de Saint-Langis-lès-Mortagne. En rouge, le levé « ZEB-REVO » et en noir le levé par la méthode « classique »	30
Illustration 16 : A gauche, extension supposée masquée par un cône d'éboulis (représenté sur les plans par un pointillé) et à droite un contour avéré (front de taille).....	31
Illustration 17 : Illustration des 4 états de stabilité des piliers (carrières de Béný-sur-Mer, de Mauves-sur-Huisne et de Saint-Langis-lès-Mortagne).....	32
Illustration 18 : Illustration des deux types de fractures cartographiées : à gauche, une fracture naturelle karstifiée qui affecte le toit et les piliers (carrière de Loisail « Le Bas Champailleume ») et à droite, des fractures mécaniques qui affectent la voûte (carrière de Basly)	33
Illustration 19 : Illustration des deux types d'instabilités de toit : à gauche, les chutes de toit et à droite, un éboulis lié à la remontée d'une cloche de fontis – carrière de Loisail « Le Bas Champailleume »	34
Illustration 20 : Illustration d'une zone de décollement de 1 ^{er} banc de toit dans la carrière de Béný-sur-Mer « Le Rocreux »	34
Illustration 21 : Représentation cartographique de la base de données ARCGIS® dédiée aux diagnostics de stabilité.....	36
Illustration 22 : Exemple d'un plan détaillé de diagnostic (ici pour la carrière souterraine de Béný-sur-Mer « Le Rocreux »)	37
Illustration 23 : Schéma de principe de la méthode gravimétrique (BRGM, 2009)	40

Illustration 24 : Topographie de la zone d'étude (m) montrant les stations gravimétriques (points noirs). Les bâtiments sont marqués par de polygones bleus, les murs par des traits violet et l'emprise de la carrière par un polygone rouge.	41
Illustration 25 : Anomalie résiduelle (mGal). Les anomalies négatives significatives sont entourées par un trait discontinu bleu foncé. Les anomalies décelées sont numérotées de A1 à A8.	42
Illustration 26 : Situation des différents profils électriques réalisés au droit de la carrière de Saint-Langis-lès-Mortagne – l'emprise actuelle de la carrière (en noir sur la carte) a été topographiée après les investigations géophysiques.....	44
Illustration 27 : Principe de la prospection électrique par courant continu (LCPC, 2004)	44
Illustration 28 : Dispositif OhmMapper (source : Geometrics).....	45
Illustration 29 : Coupe de résistivité inversée du profil de tomographie électrique ERT 1	46
Illustration 30 : Coupe de résistivité inversée du profil OhmMapper P6	46
Tableau 1 : Evaluation qualitative de l'état général des carrières souterraines d'après les observations effectuées en souterrain et l'impression générale de stabilité lors des visites	35

Liste des annexes

Annexe 1 - Nomenclature spécifique liée aux carrières souterraines	59
Annexe 2 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Bellavilliers (61) (hors-texte)	63
Annexe 3 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Saint-Langis-lès-Mortagne (61) (hors-texte).....	65
Annexe 4 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Mauves-sur-Huisne RD9 (61) (hors texte).....	67
Annexe 5 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Mauves-sur-Huisne RD5 (61) (hors texte).....	69
Annexe 6 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Loisail (61) (hors texte).....	71
Annexe 7 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Bény-sur-Mer BNOAA0002218 (14) (hors-texte)	73
Annexe 8 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Basly BNOAA0002117 (14) (hors-texte)	75
Annexe 9 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Basly BNOAA0004048 (14) (hors-texte)	77
Annexe 10 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Basly BNOAA0004049 (14) (hors-texte)	79
Annexe 11 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Bény-sur-Mer BNOAA0002207 (14) (hors-texte)	81

1. Contexte et objectifs

Le territoire de l'ex-Basse-Normandie est caractérisé par une diversité géologique remarquable, qui a historiquement été à l'origine d'une activité extractive foisonnante. Les traces d'exploitations sont en effet très nombreuses, et la nature des matériaux extraits est variée (minerais, pierres de taille ou granulats, amendement etc.). L'accessibilité de certains gisements a parfois nécessité la mise en place d'exploitations souterraines (mines, carrières souterraines), qui sont aujourd'hui en grande partie abandonnées.

Au cours de l'année 2011, plusieurs effondrements d'anciennes carrières souterraines abandonnées ont entraîné des désordres au sein ou à proximité des zones urbanisées (Saint-Pierre-Canivet dans le Calvados, Courgeon dans l'Orne). En 2013, plusieurs effondrements se sont également déclarés sur la ville de Caen.

Ces désordres témoignent du vieillissement de certaines carrières souterraines abandonnées, ce qui a nécessité la mise en place de visites de diagnostics pour évaluer leur état de stabilité. L'intérêt de ces inspections est double : d'une part cela permet de porter à connaissance l'existence et les risques liés au vieillissement de ces carrières souterraines, et d'autre part de préconiser d'éventuels programmes de mise en sécurité, de surveillance et de prévention.

Dans le cadre de ses missions d'appuis aux politiques publiques qui s'inscrivent au contrat d'objectifs Etat-BRGM 2013-2017, le BRGM a initié en 2014 un programme d'évaluation des risques liés au vieillissement des anciennes carrières souterraines de pierre de taille situées sur le territoire de l'ex-Basse-Normandie (Calvados, Orne et Manche).

Dans le cadre de ce programme, une première étude a permis de visiter une quinzaine de carrières souterraines de pierres de taille, creusées dans les calcaires du Bathonien des environs de Caen. Les comptes rendus de ces visites ont fait l'objet d'un rapport BRGM (RP-64117-FR). Les résultats de ce premier projet ont montré la nécessité de poursuivre les efforts de connaissance sur l'évaluation des risques liés aux carrières souterraines abandonnées, notamment via la poursuite des visites de site, la réalisation de diagnostics de stabilité de niveau 1, et la mise en œuvre d'une solution de mutualisation de l'information adaptée au niveau de détail attendu et pouvant permettre un suivi dans le temps de l'évolution des cavités. La présente étude, réalisée en partenariat avec la DREAL Normandie, s'inscrit dans cette continuité.

Les objectifs de la présente étude sont multiples :

- poursuivre le travail initié en 2014, en réalisant de nouvelles inspections de carrières souterraines situées dans les formations sédimentaires du Bathonien (calcaire) et du Cénomaniens (craie) ;
- synthétiser l'ensemble des données dans une base de données dédiée ;
- tester des méthodes de cartographie/topographie de cavités souterraines ;
- tester des méthodes géophysiques pour la détection d'anciennes carrières souterraines adaptées au contexte bas-normand ;

2. Contexte géologique et géomorphologique du territoire de l'ex-Basse-Normandie

2.1. CADRE GEOLOGIQUE

Le territoire de l'ex-Basse-Normandie est constitué par les départements du Calvados (14), de la Manche (50) et de l'Orne (61). Il est limité au nord et à l'ouest par la Manche, au sud par les régions Bretagne et Pays de la Loire, et à l'est par le territoire de l'ex-Haute-Normandie. La Basse et la Haute Normandie ont fusionné en janvier 2016 pour former la nouvelle région Normandie.

La diversité géologique de ce territoire est remarquable, puisqu'il est situé à cheval sur deux grands ensembles géologiques : le Massif Armoricaïn à l'ouest, caractérisé par des roches plutoniques, métamorphiques ou sédimentaires d'âge protérozoïque ou paléozoïque, et par la bordure Ouest du Bassin Parisien à l'est, caractérisé par des roches sédimentaires mésozoïques et cénozoïques. L'assise géologique de la Plaine de Caen est formée de terrains marno-calcaires, et la partie est des départements du Calvados et de l'Orne est notamment caractérisée par la présence de craies, qui constituent le soubassement des plateaux situés à l'est de la Dives.

Ces formations sont recouvertes par une couche plus ou moins épaisse de formations superficielles.

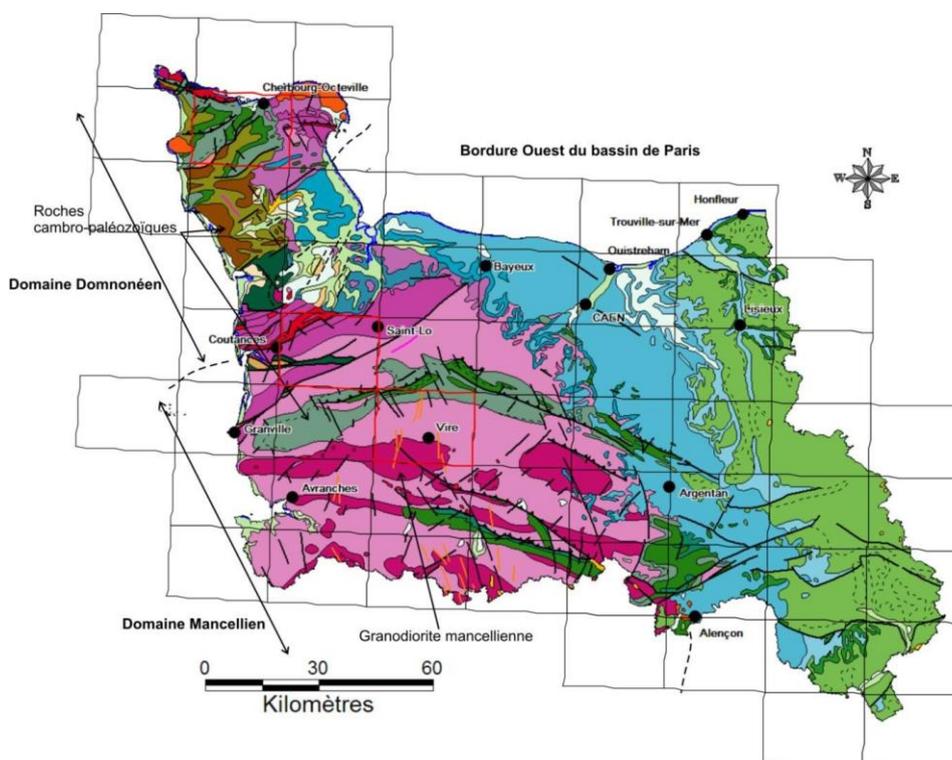


Illustration 1 : Carte géologique du territoire de l'ex-Basse-Normandie. Les terrains crétaçés sont représentés par la couleur vert clair, les terrains jurassiques par la couleur bleue

Cette diversité géologique a depuis longtemps été utilisée par les bas-normands, puisque l'exploitation du sous-sol a permis la production de pierres de taille et de granulats pour la construction, ou encore de marne pour l'amendement des terres agricoles.

2.2. CADRE GEOMORPHOLOGIQUE

Le cadre géomorphologique de l'ex Basse-Normandie est intimement lié au substratum géologique, et trois grands ensembles morphologiques peuvent ainsi être définis, avec d'ouest en est :

- Le Bocage Normand constitué de collines bocagères dont l'altitude varie de 150 à 300 m, incisées par des vallées qui s'y enfoncent par endroits en gorges pittoresques (Suisse Normande). Le substratum du Bocage Normand est composé de roches plutoniques, métamorphiques ou sédimentaires anciennes. Dans les zones basses à proximité du littoral, cet ensemble géomorphologique laisse place à des paysages de marais (Marais du Cotentin), constitués de formations sédimentaires récentes ;
- La Plaine de Caen dont l'altitude varie entre 50 et 100 m, qui s'ouvre depuis l'Orne vers la façade maritime du Bessin où le paysage de plaine se transforme en une succession de petites collines. Le soubassement de la Plaine de Caen est composé de terrains sédimentaires du Jurassique, exploités notamment pour la célèbre Pierre de Caen ;
- Le Pays d'Auge, le Pays d'Ouche et le Perche Ornais, situés à l'est des départements du Calvados et de l'Orne, qui correspondent à des régions de collines bocagères verdoyantes où alternent plateaux et larges vallées en auge. L'altitude y varie de 150 à 250 m. Le soubassement de ces régions est caractérisé par la présence de craies, dont la limite ouest est bien marquée dans le paysage par la cuesta de la Dives.

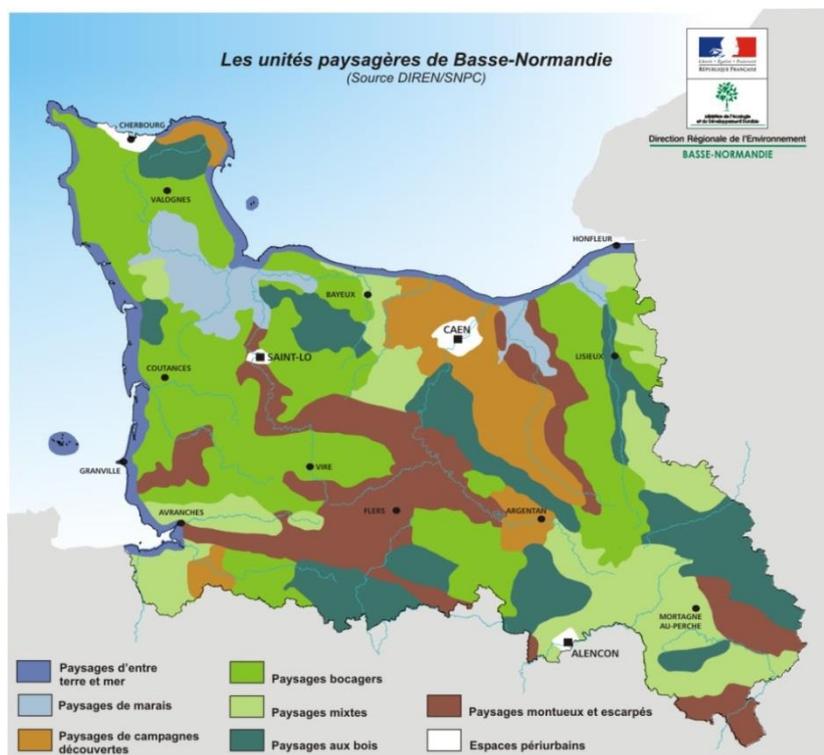


Illustration 2 : Les paysages de l'ex Basse-Normandie, intimement liés à la nature géologique du substratum (source : <http://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr>)

3. Les carrières souterraines en ex-Basse-Normandie

Le territoire de l'ex-Basse-Normandie présente donc un contexte géologique varié, où l'on retrouve des roches de nature très différentes (grès, schistes, granites, calcaire, sables etc...). Cette diversité a favorisé la mise en place d'une riche activité extractive qui a marqué la région (minerai de fer dans le Perche ou le Bocage Normand, pierres de taille dans la Plaine de Caen, marnières dans le Pays d'Auge etc.). Le contexte géomorphologique et l'accessibilité à la ressource a parfois conduit les exploitants à extraire le matériau depuis des excavations souterraines, dont la plupart sont actuellement abandonnées.

3.1. L'EXPLOITATION DES PIERRES DE TAILLE EN EX-BASSE-NORMANDIE

3.1.1. Formations exploitées en ex-Basse-Normandie

Dans les départements du Calvados et de l'Orne, deux formations géologiques ont été intensément exploitées pour la production de moellons pour la pierre de taille :

- Les calcaires du Bathonien (Jurassique moyen), dont le plus célèbre est le Calcaire de Caen, ont été exploités depuis l'antiquité pour la construction. La production s'est considérablement développée sous le règne de Guillaume le Conquérant et des Ducs normands pour la construction de grands monuments religieux, militaires et civils, tant en Normandie qu'en Angleterre. Actuellement, la Pierre de Caen est encore exploitée dans quelques carrières. Notons également que les Calcaires de Creully, de Blainville ou encore de Ranville ont fait l'objet d'une exploitation souterraine, pour la pierre de taille ou pour la production de chaux ;
- Les craies du Cénomani (Crétacé supérieur), utilisées pour les soubassements de nombreux monuments dans le Perche, le Pays d'Ouche ou le Pays d'Auge. Les craies ont également été très exploitées en petites carrières souterraines (marnières) pour l'amendement agricole ou la production de la chaux.

Étages		Principaux faciès	Matériau exploité	Principales localités
Tertiaire	Sparnacien Thanétien	sables et argiles	sables, terre à foulon, poterie, briques	Exploitations souterraines Pays de Caux ex : Saint-Aubin-Celloville (jusqu'en 1940)
	Crétacé	Senonien	craie blanche à silex craie noduleuse dure	calcaire pour construction
Turonien		craie grise plus ou moins phosphatée tuffeau	craie amendement pour construction calcaire pour construction	Seine-Maritime + Eure Calvados Vernon (en activité) Orne
Cenomanien		craie sablo-glaucouneuse	Pierre de taille dite pierre de Fécamp	Très importante carrière souterraine Fécamp
Albien		argile du Gault-sables		Région de Lisieux
Aptien		sables	?	?
Jurassique	Portlandien	sables Calcaire lithographique	Pierre de taille caves	Pays de Bray
	Kimmeridgien	argiles calcaire banc de plomb	argiles, briques	Villequier (Seine-Maritime)
	Oxfordien	marnes sables de Glos calcaire corraligène	sable calcaire, chaux	Quelques carrières région de Lisieux
	Callovien	marnes		
	Bathonien	calcaires et marnes	calcaire de Caen, pierre de taille	Intense exploitation de Caen à Fa- laise (Calvados)
	Bajocien	calcaire		
Trias		-	-	-

Illustration 3 : Exploitation des terrains sédimentaires du Bassin Parisien en Normandie (Evrard, 1987)

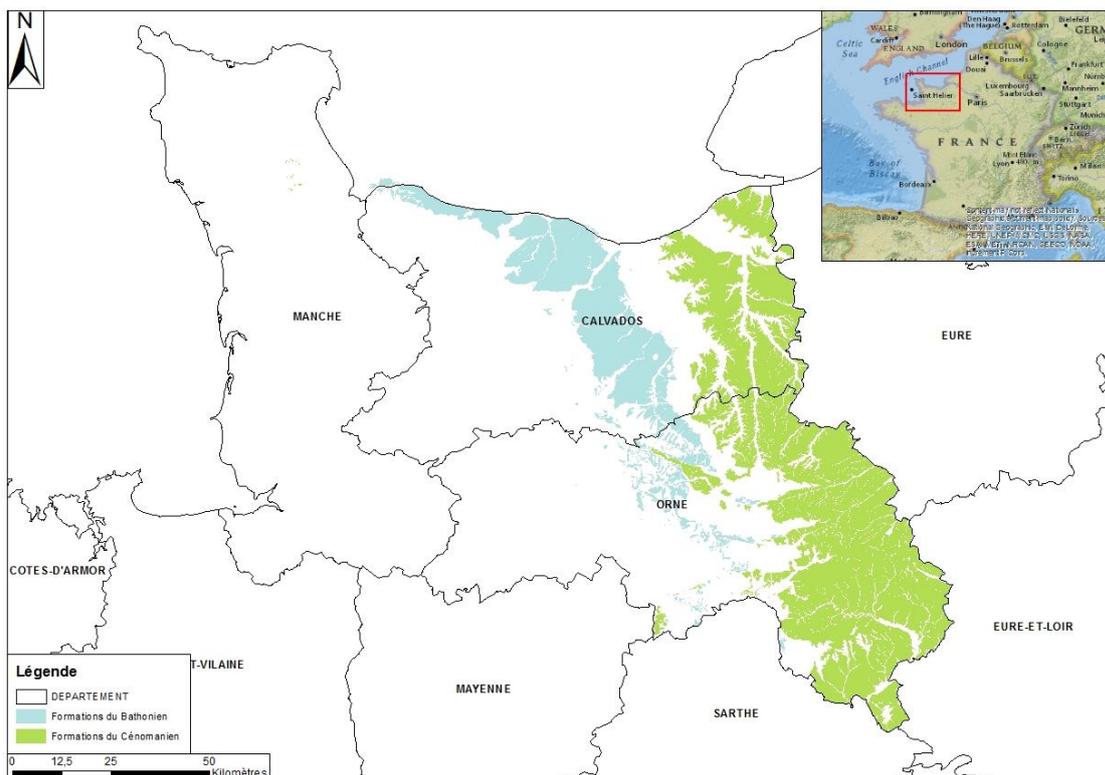


Illustration 4 : Répartition des calcaires du Bathonien (Jurassique moyen – en bleu clair) et du Cénomanien (Crétacé supérieur – en vert) sur le territoire de l'ex-Basse-Normandie (source : traitement des cartes géologiques harmonisées du BRGM)

3.1.2. Les méthodes d'exploitation

Il existe plusieurs types d'exploitations pour les carrières souterraines, qui dépendent de certains facteurs comme la topographie, la nature lithologique des roches à exploiter (dont leurs caractéristiques mécaniques), de l'usage du matériau extrait, de la profondeur du gisement, de la pression foncière, de la capacité de transport des matériaux ou simplement des us et coutumes des carriers. En ex-Basse-Normandie, la très grande majorité des carrières souterraines ont été exploitées soit par chambres et piliers tournés, soit par chambres et galeries (notamment pour les « marnières », non étudiées dans la présente étude ou les carrières de Fleury-sur-Orne dans l'agglomération de Caen). Les autres méthodes d'exploitation (hagues et bourrage, catiches) sont anecdotiques.

Carrière souterraine exploitée en chambres et piliers tournés

Sur le territoire de l'ex-Basse-Normandie, la majeure partie des carrières de pierre de taille ont été exploitées par la technique des chambres et piliers tournés. Cette technique, très courante pour les carrières de pierres de taille, permet d'exploiter une grande surface en conservant une certaine stabilité si la géométrie des piliers, et leur nombre, est bien dimensionnée pour supporter le toit. La technique consiste à exploiter la pierre en tournant autour des piliers, d'où le terme de « piliers tournés ». Les piliers peuvent être soit alignés, soit disposés de façon « anarchique » (sans organisation spécifique). La disposition des piliers donne des indications sur la période d'activité puisque les carrières à piliers disposés de façon « anarchique » sont généralement anciennes, et souvent en mauvais état. A l'inverse, les carrières à piliers alignés sont la plupart du temps les plus récentes (IFSTTAR, 2014).

Les carrières de Loisail (Orne), de Bény-sur-Mer ou de Basly (Calvados) sont de très bons exemples d'exploitations en chambres et piliers tournés alignés.

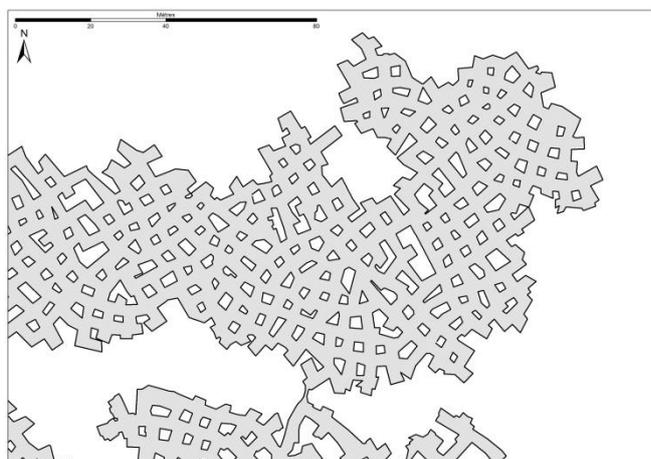


Illustration 5 : Exemple d'une géométrie caractéristique d'une carrière exploitée par chambres et piliers tournés (Loisail – Orne)

Carrière souterraine exploitée en chambres et galeries

Cette technique est généralement utilisée pour des exploitations de plus faibles extensions. Une grande partie des « marnières » normandes, creusées pour l'exploitation de la marne à des fins d'amendement, sont par exemple exploitées en chambres et galeries. Le principe est d'exploiter le gisement en galeries dimensionnées de manière à limiter les risques de chutes de

toit, c'est-à-dire en limitant les portances entre chaque paroi. L'accès se fait soit par puits (cas des marnières), soit par cavage (cas des carrières de Fleury-sur-Orne).

La carrière souterraine de Bellavilliers (Orne) est un bon exemple de ce type d'exploitation.



Illustration 6 : Exemple d'une géométrie caractéristique d'une carrière exploitée par chambres et galeries (Bellavilliers – Orne)

3.1.3. Les accès

Il existe trois grands types d'accès aux carrières souterraines : les entrées en cavage, les puits et les descenderies. Le choix de l'accès dépend de plusieurs facteurs, notamment :

- *De la profondeur à laquelle se situent les terrains à exploiter* : une faible épaisseur de recouvrement favorisera par exemple la mise en place de descenderies (cas de la carrière souterraine de Loissail, dans l'Orne), et à l'inverse, une épaisseur de recouvrement importante nécessitera le fonçage de puits pour accéder au gisement. Notons que certaines carrières accessibles en cavage ou par descenderie peuvent également contenir des puits, utilisés notamment pour l'aérage ou pour l'évacuation des matériaux ;
- *De la topographie* : les accès en cavage sont par exemple uniquement situés en pied de talus abrupts ou d'escarpements, notamment le long des vallées (cas des carrières de la vallée de la Mue, dans le Calvados), tandis que les puits et les descenderies seront situés en plateau ;

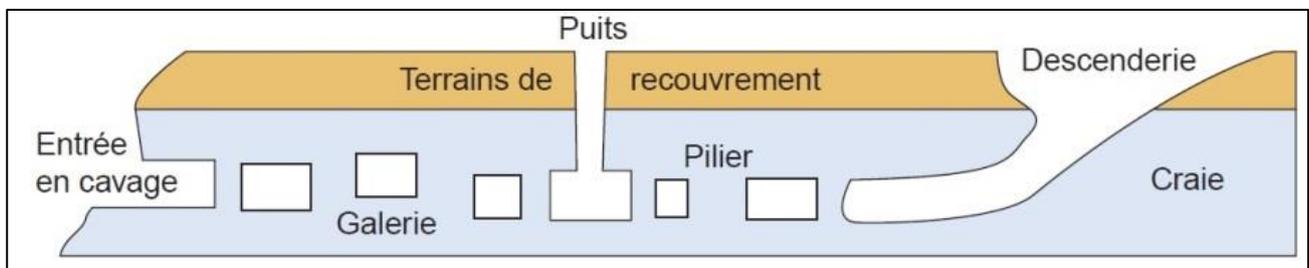


Illustration 7 : Schéma des différents types d'accès aux carrières souterraines (IFSTTAR, 2014)

3.2. LES RISQUES LIES AUX CAVITES SOUTERRAINES

La très grande majorité des cavités souterraines ont été abandonnées sans être comblées dans les règles de l'art à la fin de l'exploitation. Les phénomènes liés à leur vieillissement peuvent être à l'origine d'instabilités susceptibles de générer d'importants désordres en surface. La ruine d'une ancienne carrière souterraine peut induire trois types de phénomènes :

- *L'effondrement localisé*, qui est lié à la remontée en surface d'une cloche de fontis ou au débouffrage du puits d'accès. Il s'agit du phénomène le plus courant en Normandie, et concerne tous les types d'exploitation (chambres et piliers, chambres et galeries, catiches). Les effondrements localisés sont généralement circulaires et varient de quelques décimètres à plusieurs mètres de diamètre, selon les dimensions de la carrière ;
- *L'effondrement généralisé*, qui est lié à la rupture d'un ou plusieurs piliers de soutènement. Rare en Normandie, ce type de phénomène ne concerne que les carrières souterraines exploitées par chambres et piliers. Les dimensions surfaciques d'un tel phénomène sont généralement importantes (quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres de diamètre) et dépendent également de la géométrie de l'exploitation ;
- *L'affaissement*, qui est la conséquence en surface de la ruine partielle ou totale d'une carrière souterraine. Ce type de phénomène est conditionné soit par une déformation souple des terrains de recouvrement, soit par les matériaux éboulés qui « amortissent » la descente globale des matériaux (lié notamment en foisonnement des matériaux) (IFSTTAR, 2014). En surface, l'affaissement se présente sous la forme d'une cuvette endoréique¹ à bords fléchis dont la taille varie selon la taille de l'exploitation souterraine (de quelques décimètres à plusieurs dizaines de mètres de diamètre).

¹ Dépression topographique dépourvue d'exutoire où l'eau ne peut s'évacuer que par infiltration ou évaporation

4. Sélection des sites à visiter– traitement des bases de données et visites de surface

L'objectif de cette première partie a été d'élaborer une stratégie pour sélectionner les sites à visiter. Dans le cadre de la réforme territoriale, il est apparu, en concertation avec la DREAL Normandie, que la stratégie devait être établie à l'échelle des communautés de communes.

Cette sélection s'est faite en différentes étapes.

4.1. PRE-SELECTION DES INDICES

Cette étape a consisté à réaliser un traitement des bases de données pour filtrer les indices de cavités jugées inintéressantes pour l'étude (ouvrages civils, cavités naturelles, marnières etc.).

La base de données retenue pour effectuer les sélections est l'Atlas Régional des Indices de Cavités Souterraines en Basse-Normandie (ARICS), gérée par la DREAL Normandie et disponible sous l'application CARMEN (http://carmen.application.developpement-durable.gouv.fr/8/risques_naturels.map), jugée la plus complète sur le domaine d'étude puisqu'elle regroupe, entre autres, la BDCavité du BRGM et le Plan Marnières du CEREMA.

Comme dans l'étude *Plat et al.* (2014), plusieurs critères ont été pris en compte pour effectuer les sélections :

- *critère de précision de localisation des indices* : sont exclus des sélections les indices localisés en « centroïde de commune » ;
- *critère typologique (nature / type de cavité)* : sont exclues des sélections les marnières, bétoires, ouvrages civils et militaires², carrières à ciel ouvert ;
- *critère géologique* : sont exclues des sélections les cavités souterraines situées hors des terrains crayeux du Cénomaniens et calcaires du Bathonien ;
- *critère topographique (optionnel selon les secteurs)* : sont exclus des sélections les indices de cavités situés sur de très faibles pentes qui correspondent essentiellement à des puits de marnière en plateau et des bétoires en vallée. Notons que sur certains secteurs, ce critère n'a pas été pris en compte puisque certaines carrières accessibles par descenderie sont situées sur des plateaux de très faible pente (cas notamment du Perche Ornais, où les formations superficielles sont moins épaisses que dans le Pays d'Auge, ce qui facilite la mise en place de descenderies).

D'autres critères ont été testés mais écartés car jugés non pertinents :

- nombre des instabilités (un grand nombre d'instabilités étant liées aux marnières, ce critère n'a pas été retenu dans le cadre de la présente étude) ;
- présence d'enjeux via la BDTPOPO® de l'IGN (difficulté à évaluer une taille « moyenne » de cavité, et donc les zones à prendre en compte autour des indices) ;
- zone non saturée : l'intérêt de ce critère était de filtrer et d'évacuer toutes les cavités potentiellement situées dans la zone saturée, soumise au battement de la nappe

² Notons que le fait de ne pas inclure ces cavités souterraines dans la présente étude n'exclue pas qu'elles puissent également être à l'origine de désordres en surface.

phréatique, en partant de l'hypothèse que les carrières souterraines ne peuvent pas être exploitées sous le niveau piézométrique. Théoriquement intéressant, ce critère s'est avéré néanmoins peu concluant, notamment en raison de la difficulté de croiser la profondeur de la nappe avec la profondeur estimée des carrières. Ce critère n'a donc pas été conservé.

Les différentes étapes de sélection ont permis de retenir **1814** indices de cavités sur les 4627 indices bancarisés dans la base de données de la DREAL en mars 2016, ce qui représente 39 % d'indices retenus. L'illustration 8 présente la répartition des indices de cavités retenus lors des phases de sélection par communautés de communes.

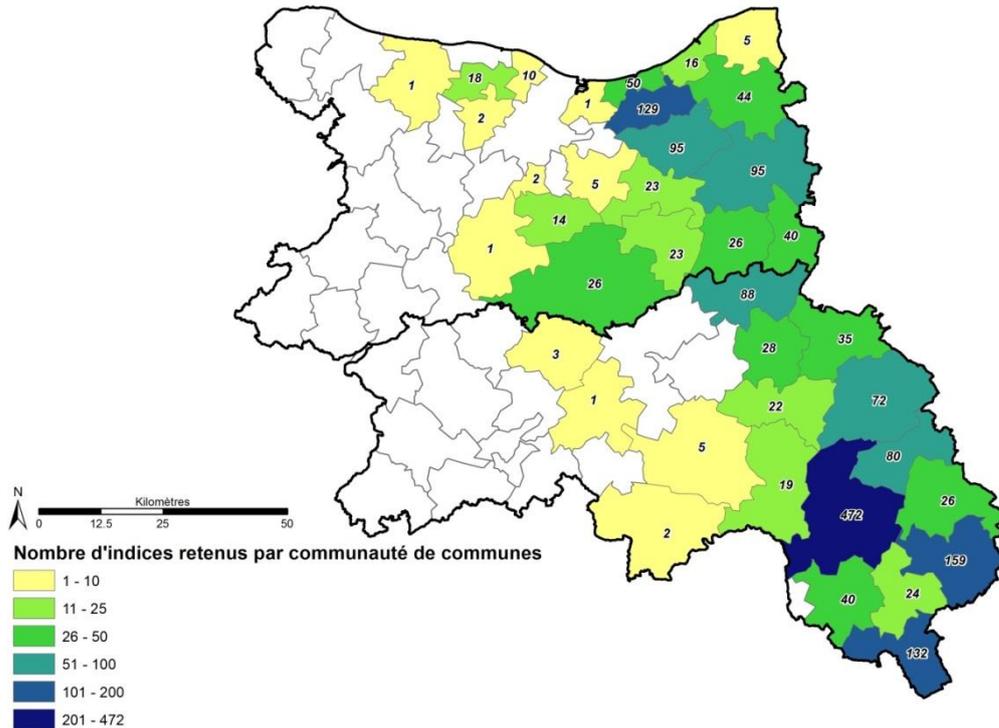


Illustration 8 : Répartition des indices de cavités retenus lors des phases de sélection par communautés de communes

4.2. VERIFICATIONS DE TERRAIN

Suite aux étapes de sélection, des vérifications de terrain ont été réalisées avec un objectif double : (1) améliorer la connaissance de la typologie des cavités rencontrées et de leur accès en fonction des secteurs géographiques et (2) repérer les entrées et conditions d'accès.

Les vérifications de terrain ont été réalisées à l'échelle communale, le contact pour l'organisation des visites étant la mairie. Les communes ont été retenues pour les visites d'après les critères suivants :

- nombre d'indices significatifs ;
- variété de contextes géologiques et géographiques ;
- intérêt porté par la mairie pour la démarche.

Outre les indices bancarisés dans les différentes bases de données (qui ne sont à l'heure actuelle pas exhaustives), plusieurs indices de carrières souterraines ont été signalés, soit par

des témoignages recueillis lors des visites de surface (particuliers, mairies), soit par des données historiques retrouvées en archives lors de la phase de préparation des visites.

Les visites ont été réalisées sur 58 communes réparties sur 14 communautés de communes du Calvados et de l'Orne.

Afin de garder une traçabilité des visites de terrain réalisées, la base de données issue de la première sélection a été complétée selon la méthodologie présentée sur l'illustration 9. Un lexique spécifique a été élaboré pour les sélections :

- *Indice non repéré* : il s'agit des indices retenus lors des étapes de sélection mais non repérés ou non retrouvés lors des investigations de terrain ;
- *Indice repéré* : il s'agit des indices de cavités retenus lors des étapes de sélection et repérés sur le terrain. Les indices repérés ont ensuite été classés en trois catégories :
 - *Indices non retenus* : la cavité a été observée sur le terrain mais elle ne correspond pas aux critères de sélection (cuvettes d'affaissements, effondrements, puits etc.) ;
 - *Carrière non accessible* : il s'agit d'une carrière dont l'entrée a été observée sur le terrain, mais qui n'est pas ou plus accessible (entrée remblayée ou effondrée, accès sur un terrain privé, accès dangereux). Dans ce cas, l'accès à la carrière est bien localisé, mais il n'est pas possible, à l'heure actuelle, d'y accéder pour effectuer un diagnostic de stabilité ;
 - *Carrière accessible* : il s'agit des carrières bien identifiées sur le terrain et accessibles. Il s'agit des carrières retenues pour la suite de l'étude (investigations en souterrain et diagnostics de stabilité).

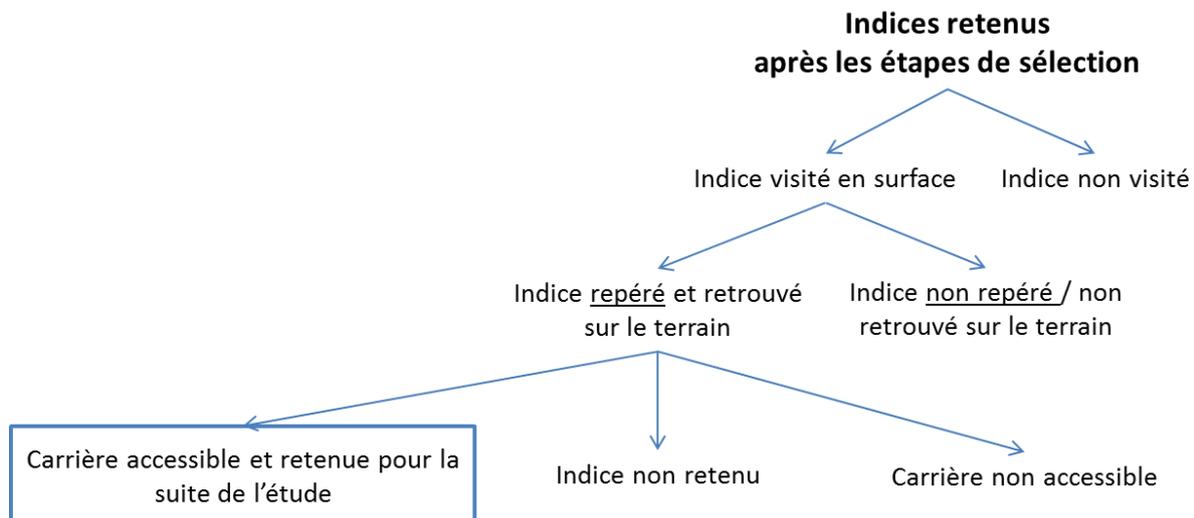


Illustration 9 : Méthodologie de validation des indices sur le terrain

Les résultats des étapes de sélection et des visites de surface sont compilés dans un fichier ArcGis®, inclus dans la base de données dédiée à ce projet (CDROM annexé au présent rapport), nommé X_SELECTION_INDICES_BD_DREAL.shp. Cette table contient le champ OBS_BRGM, qui reprend le lexique présenté en Illustration 9.

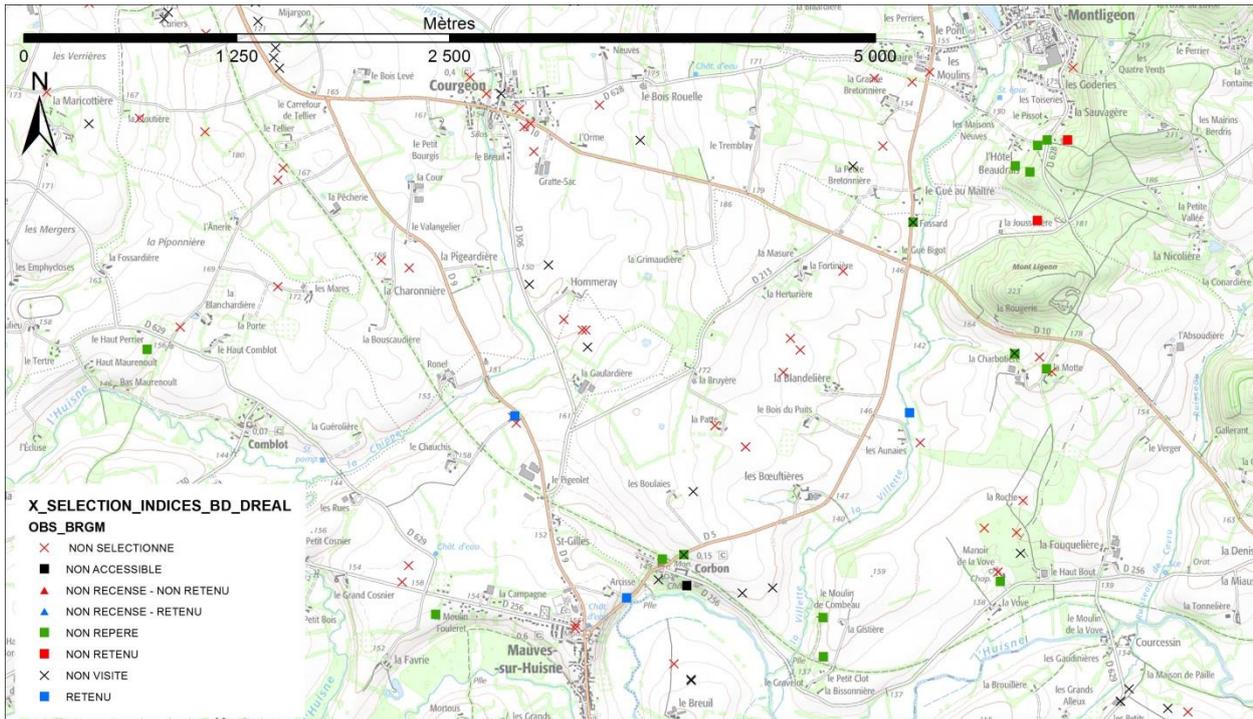


Illustration 10 : Illustration de la table X_SELECTION_INDICES_BD_DREAL.shp qui bancarise les données de terrain (surface)

Ces investigations ont permis de vérifier **325** indices de cavités sur le terrain. Parmi ces 325 indices, **46** correspondent à d'anciennes carrières souterraines accessibles et pour lesquelles un diagnostic de stabilité est réalisable, ce qui représente 14 % des indices de cavités vérifiés par les investigations de surface. Pour le reste, 13 % correspondent à des carrières actuellement inaccessibles, 36 % n'ont pas été retrouvées en surface et 37 % ne présentent pas d'intérêt pour l'étude (puits de marnières, affaissements, etc.).

Parmi ces indices, **23** cavités n'étaient pas recensées dans les bases de données, dont 9 sont accessibles pour y réaliser un diagnostic de stabilité.

4.3. HIERARCHISATION DES COMMUNAUTES DE COMMUNES A INVESTIGUER

Sur la base des informations collectées sur le terrain et de la connaissance des services de l'état, une hiérarchisation des communautés de communes concernées par le risque cavité a été élaborée en collaboration avec la DREAL Normandie, la DDTM du Calvados et la DDT de l'Orne, pour prioriser les communautés de communes à investiguer dans la suite de l'étude. Les demandes spécifiques des DDT(M) pour étudier certains territoires ont été notamment prises en compte pour la priorisation des secteurs. Il s'agit :

- Du secteur sud de la communauté de communes du Bassin de Mortagne-au-Perche, (Orne) ;
- Des communautés de communes d'Orival et Cœur de Nacre (Calvados) ;
- De la communauté de communes du Perche Rémalardais (sud-est du département de l'Orne – non investiguée en surface) ;

- De la communauté de communes du Haut Perche (sud-est du département de l'Orne – non investiguée en surface) ;
- De la communauté de communes de Cambremer, située sur le secteur 1 (Calvados).

Dans un premier temps et en concertation avec les services de l'état, les communautés de communes du Bassin de Mortagne-au-Perche, d'Orival et Cœur de Nacre ont été retenues.

4.4. CHOIX DES CAVITES A DIAGNOSTIQUER

Suite à cette hiérarchisation, 10 carrières souterraines situées sur les communautés de communes du Bassin de Mortagne-au-Perche et d'Orival – Cœur-de-Nacre ont été retenues pour les investigations en souterrain et l'élaboration de diagnostics de stabilité. Le choix de ces carrières a été effectué en fonction des enjeux situés en surface (bâtiments, voiries, terrains de sports etc.) ou des risques d'intrusions pour les carrières en accès libre.

Pour la communauté de communes du Bassin de Mortagne-au-Perche (partie sud), 5 carrières ont fait l'objet d'un diagnostic :

- *Carrière de Bellavilliers* – petite carrière en chambre et galerie accessible par cavage qui sous-cave des terres agricoles ;
- *Carrière de Saint-Langis-lès-Mortagne* – carrière en chambres et piliers tournés, située en milieu urbain, accessible par un puits ;
- *Carrière de Loisail* (lieu-dit « Le Bas Champaillaume ») – vaste champignonnière exploitée par chambres et piliers tournés, accessible par une descenderie, qui sous-cave une route départementale et des terres agricoles ;
- *Carrière de Mauves-sur-Huisne* (le long de la RD n°5) – carrière en chambres et piliers tournés, accessible par cavage (accès libre), et qui sous-cave des terres agricoles ;
- *Carrière de Mauves-sur-Huisne* (le long de la RD n°9) – carrière en chambres et piliers tournés, accessible par cavage (accès libre), et qui sous-cave une voie communale et des terres agricoles.

Pour la communauté de communes d'Orival et de Cœur-de-Nacre, 5 carrières ont fait l'objet d'un diagnostic. Toutes sont situées le long de la vallée de la Mue :

- *Carrières souterraines de Basly* (3 carrières souterraines situées en rive droite de la Mue) – carrières en chambres et piliers, accessibles par cavage (accès libres), situés le long d'un sentier de randonnée, et qui sous-cavent des terres agricoles et partiellement un terrain de sport (terrain de moto-cross) ;
- *Carrières souterraines de Bény-sur-Mer* (2 carrières souterraines situées en rive droite de la Mue) - carrières en chambres et piliers, accessibles par cavage (accès libres), situés le long d'un sentier de randonnée, qui sous-cavent essentiellement des terres agricoles et partiellement un terrain de sport (terrain de football) ;

D'autres carrières accessibles ont été identifiées sur ces communautés de communes mais n'ont pas fait l'objet d'un diagnostic de stabilité puisque le temps et le budget alloué à cette étude n'a pas permis d'effectuer davantage de visites et de diagnostics.

Les méthodologies utilisées pour l'élaboration des diagnostics sont présentés dans le chapitre 5. Les comptes rendus des 10 diagnostics sont disponibles en annexe (hors texte). L'ensemble des informations et des observations effectuées au cours des diagnostics ont été

compilées dans une base de données spécifique (cf. partie 5.4), élaborée dans le cadre de la présente étude.

5. Inspection des carrières souterraines abandonnées – diagnostics de stabilité

5.1. METHODOLOGIE : NIVEAU DE DIAGNOSTIC ET DONNEES UTILISEES

5.1.1. Niveau de diagnostic

Les carrières souterraines visitées ont fait l'objet d'un diagnostic de niveau 1, tel qu'il est défini dans le guide de l'IFSTTAR (Illustration 11 et Illustration 12). Ce niveau de diagnostic a pour objectifs de qualifier l'état de stabilité de la carrière (cf. Illustration 11) par l'intermédiaire notamment d'une visite du site associée à une cartographie des vides (géométrie de la carrière souterraine) et une cartographie géotechnique qui permet de situer les éléments d'instabilités (fractures, chutes de toit, fontis, écaillage, état des piliers etc.). L'ensemble des informations et des observations réalisées au cours des visites de carrières ont été compilées dans une base de données dédiée à ce projet (cf. chapitre 5.4).

Le niveau de diagnostic fourni ne se limite toutefois pas aux éléments strictement nécessaires pour le niveau 1, puisque pour certaines carrières à enjeux, des levés géométriques de précision (plan de détail) ont été réalisés au scanner laser 3D (cf. chapitre 5.2).

L'ensemble des comptes rendus de visites sont annexés au présent document.

Niveau	Objectif du diagnostic	Éléments nécessaires au diagnostic	Outils du diagnostic	Temps requis
Diagnostic d'urgence	Donner un avis d'expert sur les conséquences de l'évolution d'une carrière	Visite du site (appréciation de l'influence de l'environnement de la carrière et de son état de dégradation)	Expérience du géotechnicien (synthèse des données existantes)	De quelques heures (situation d'urgence) jusqu'à 2-3 jours
N1	Qualifier la stabilité de la carrière	Visite du site + cartographie (géométrie des vides et désordres) + caractérisation de l'environnement géologique	Cartographie géotechnique + modèles empiriques	Quelques jours à une semaine
N2	Quantifier de façon approchée la stabilité de la carrière	Niveau 1 + élaboration d'un modèle géomécanique	Mise à jour de la cartographie géotechnique + modèles analytiques	Plusieurs semaines à quelques mois
N3	Quantifier précisément le comportement mécanique de la carrière et/ou son évolution	Niveau 2 + instrumentation et /ou logiciel de calcul	Interprétation du suivi et/ou modélisation numérique	Plusieurs mois à quelques années

Illustration 11 : Définition des différents niveaux de diagnostics (source : IFSTTAR, 2014)

Éléments	Moyens	Niveaux de diagnostic			
		DU	N1	N2	N3
Données existantes					
Données géologiques et hydrogéologiques	• Carte géologique et hydrogéologique, base de données du sous-sol (BSS) • Bibliographie (rapports, thèses, articles...)	Vert	Vert	Rouge	Rouge
Données historiques sur l'exploitation	• Archives écrites • Archives numériques • Enquêtes orales	Rouge	Vert	Vert*	Rouge*
Données issues de supports cartographiques	• Carte topographique et géomorphologique, toponymie • Cadastre • Modèle numérique de terrain	Vert	Vert	Rouge	Rouge
Données issues de la télédétection	• Images aériennes	Rouge	Vert	Vert	Rouge
Données géomécaniques	• Bibliographie	Rouge	Rouge	Vert	Vert
Données sur l'environnement de la carrière	• Bibliographie, plans, schéma d'assainissement...	Vert	Vert	Vert	Rouge
Reconnaitances et investigations de terrain					
Environnement de la carrière	• Visite de terrain, observation • Études spécifiques (topographie, hydraulique, vibrations, réseaux...)	Vert	Vert	Vert*	Vert*
Géologie et hydrogéologie	• Observation • Levés géologiques • Sondages • Suivi piézométrique	Rouge	Vert	Vert*	Vert*
Géométrie de l'exploitation	• Levé métrique - Géométrie globale • Levé décimétrique - Plan de détail	Rouge	Vert	Vert	Rouge
Relevé de désordres	• Observation, photographies, description succincte • Description détaillée et localisation précise	Rouge	Vert	Vert*	Vert*
Données géomécaniques	• Essais de laboratoire • Essais <i>in situ</i> (dont géophysique)	Rouge	Rouge	Vert	Vert
Données acquises sur le long terme	• Visite régulière • Instrumentation	Rouge	Rouge	Vert	Vert

■ Non nécessaire ou inadapté
 ■ Possible
 ■ Indispensable
 * Mise à jour ou complément

Illustration 12 : Contenu des différents niveaux de diagnostics (source : IFSTTAR, 2014)

5.1.2. Données géographiques et topographiques – environnement de la carrière

Les plans des carrières visitées ont été recalés sur les cartes topographiques de l'IGN (SCAN25®) et sur le découpage cadastral, ce qui a permis d'identifier la nature et l'occupation des terrains de recouvrement, et notamment la présence d'enjeux (habitations, voiries etc.).

5.1.3. Données géologiques et hydrogéologiques

Chaque carrière diagnostiquée a été replacée dans son contexte géologique et hydrogéologique à partir de l'analyse des cartes géologiques et hydrogéologiques du BRGM, éventuellement des données disponibles dans la Banque du Sous-Sol (BSS), et confirmées par les observations de terrain.

5.1.4. Données historiques

Un chapitre de chaque compte rendu de visite est consacré aux données historiques qui ont pu être récupérées dans les archives ou sur le terrain, via des enquêtes de voisinage. Les informations recherchées concernaient essentiellement des indications sur les dates

d'ouvertures et/ou de fermetures des exploitations, l'emprise géométrique (plans), la nature des roches exploitées, et éventuellement des mentions de désordres en surface (effondrements ou affaissements). Les enquêtes de voisinage ont permis de retrouver des cavités et des désordres qui n'étaient pas mentionnés dans les bases de données

5.2. TOPOGRAPHIES SOUTERRAINES – LEVES GEOMETRIQUES

Dans le cadre du projet, plusieurs méthodes de topographies souterraines ont pu être testées sur des carrières connues, puis utilisées sur les carrières retenues pour les diagnostics. L'objectif de ces tests avait pour but d'évaluer les avantages et inconvénients de chaque méthode, pour retenir la méthode la plus efficace pour la réalisation de diagnostics de niveau 1, en fonction de la superficie des cavités, et de quantifier l'incertitude de positionnement des différentes méthodes.

Lever distance-mètre laser / boussole – méthode « classique »

Sur le principe (mesure distance, azimuth et inclinaison), il s'agit de la méthode la plus simple qui permet de dresser des plans topographiques globaux (précision métrique).

La méthode consiste, à partir d'une base de départ (point de référence), à enregistrer le cheminement parcouru en effectuant des mesures de distance et d'azimut entre des bases réparties dans l'ensemble de la carrière souterraine, puis à « habiller » ce cheminement en dessinant les contours de la cavité (Illustration 13). Cet « habillage » est réalisé à partir d'une série de mesures d'orientation et d'azimut effectuées à partir de chaque base vers des points repères (angles de piliers, paroi etc...), ce qui permet de représenter précisément la géométrie de la carrière souterraine (largeur des chambres, dimension des piliers). L'entrée de la cavité constitue le point de référence, localisé avec précision à l'aide d'une carte ou d'un GPS. L'ensemble de la cavité est ensuite positionné par rapport à ce point.

La méthode a été améliorée avec l'arrivée des distance-mètres laser et de leur interaction avec des logiciels de topographie. L'intérêt de cette méthode réside dans l'appareillage relativement basique qu'elle emploie : une boussole de topographe et un distance-mètre laser électronique. Ainsi, l'opérateur réalise un levé dans un ordre prédéfini et celui-ci est directement restitué en numérique. Il s'agit toutefois d'une méthode relativement chronophage, notamment pour les carrières de grandes dimensions, à géométries complexes.

Dans le cadre du projet, cette méthode a été utilisée pour dresser le plan global de 4 carrières souterraines, pour lesquelles aucun plan n'existait.

Les données géométriques ont été traitées à l'aide du logiciel PocketTopo® Version 1.37, développé par les spéléologues. Le traitement et la mise en forme a été réalisée sous SIG (ARCGIS®).

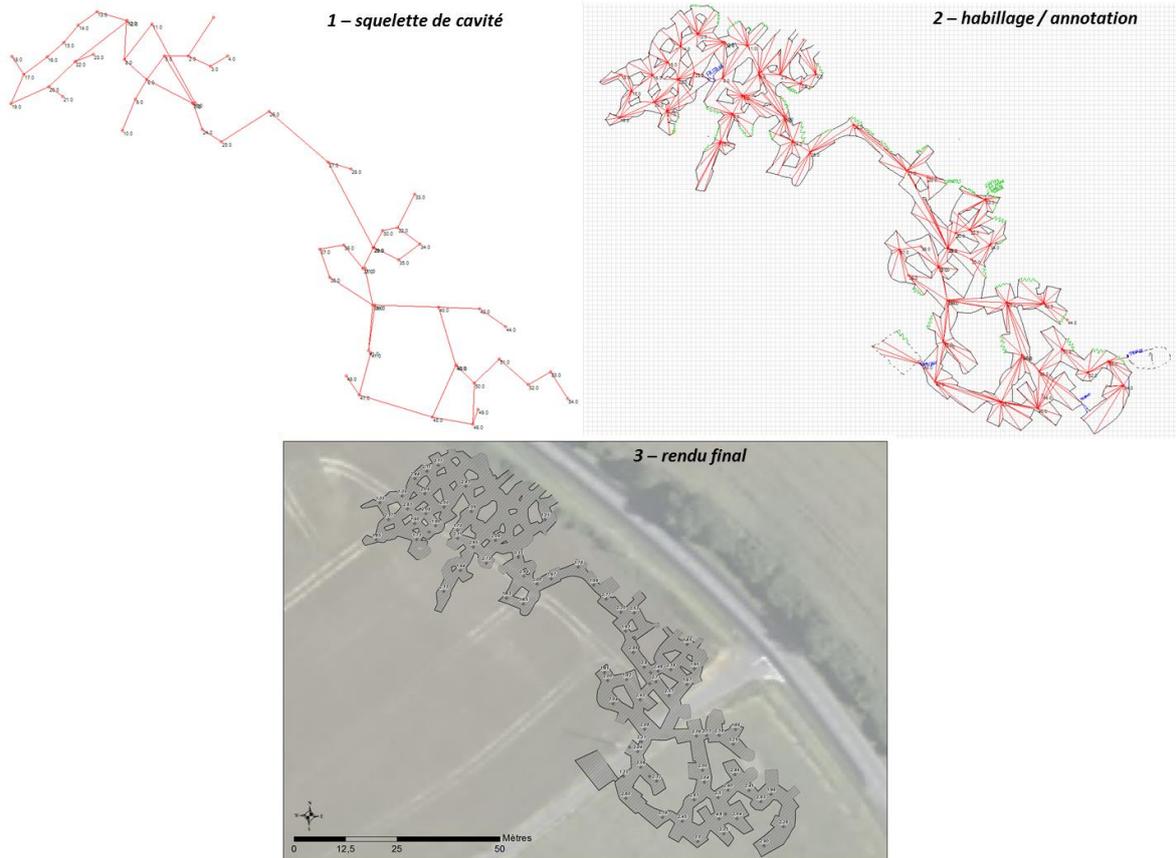


Illustration 13 : Exemple d'un levé géométrique par la méthode « classique » sous PocketTopo® - cas de la carrière de Mauves-sur-Huisne (BNOAA0000765 – R25_61255P3, P4 et P32)

Scanner laser 3D portatif : le « ZEB-REVO »

Le « ZEB-REVO » est un laser portable à main développé par des scientifiques australiens. Il s'agit d'un outil de topographie souterraine innovante, qui permet de dresser des plans topographiques précis (précision centimétrique), à des vitesses d'acquisition élevée.

Cette méthode a été testée par le BRGM en collaboration avec d'autres organismes publics dans une carrière souterraine de l'Oise, puis appliquée dans le cadre de ce projet pour la topographie de 4 carrières souterraines de la vallée de la Mue (Calvados), et pour la carrière souterraine de Saint-Langis-lès-Mortagne (Orne).

Les avantages de cette méthode sont multiples : outre le fait qu'elle permet de dresser des plans de carrières souterraines plus rapidement et plus précisément qu'avec la méthode « classique », le rendu est en trois dimensions, ce qui permet d'apprécier les volumes (Illustration 14), de réaliser des coupes, de visualiser la fracturation et de combiner le levé souterrain avec un levé en surface ou un modèle numérique de terrain existant, de manière à connaître précisément les épaisseurs de recouvrement.

Des traitements des données ont notamment été réalisés sur Saint-Langis-lès-Mortagne pour évaluer les épaisseurs de recouvrement. Ces documents sont inclus dans le compte rendu du diagnostic de stabilité, disponible en annexe de ce rapport. Ces données montrent l'intérêt que présente cette méthode pour les diagnostics de stabilité et la gestion des risques.

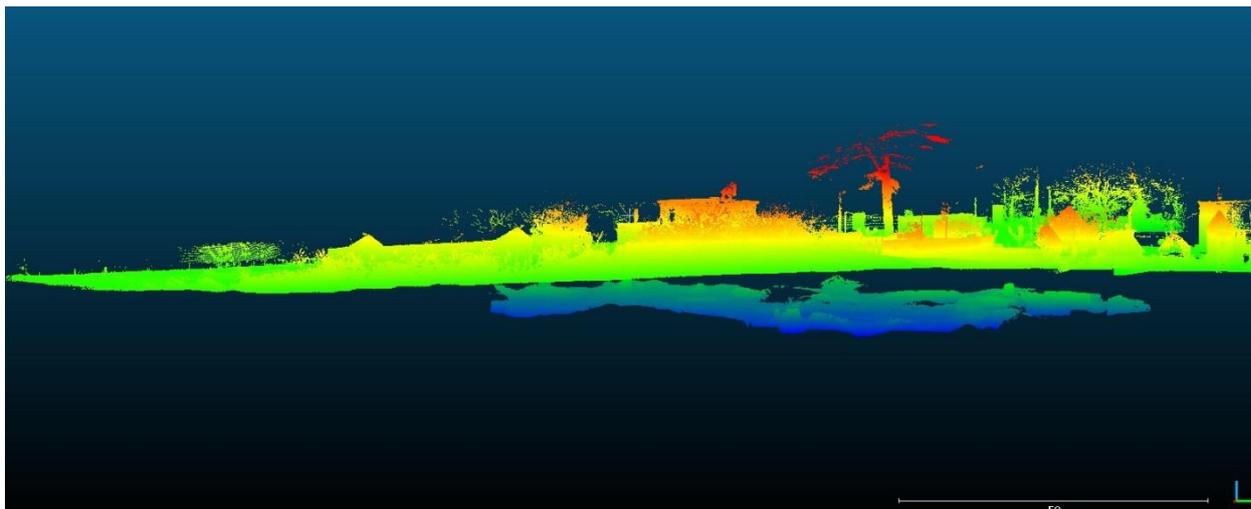


Illustration 14 : Illustration du nuage de points 3D réalisé sur la carrière souterraine de Saint-Langis-lès-Mortagne (levé « fond » et « surface »)

Comparaison des méthodes

Le plan de la carrière souterraine de Saint-Langis-lès-Mortagne a été levé dans un premier temps par la méthode classique en juillet 2016, puis par la méthode du laser scanner portatif « ZEB-REVO » en avril 2017 dans le cadre d'une démonstration proposée à la DREAL Normandie et à la DDT de l'Orne. Le plan « classique » a été élaboré à partir d'une base géoréférencée en surface au GPS centimétrique et l'ensemble du plan a donc été effectué à partir de cette base géoréférencée, en utilisant la méthode présentée sur l'illustration 13. Le levé « ZEB-REVO » a été effectué en souterrain et en surface, ce qui a permis de cartographier les bâtiments situés à proximité de l'entrée et donc de recalibrer l'ensemble du levé à partir de ces repères.

La comparaison des deux plans montre des différences de précision qui sont globalement comprises entre 0,3 et 1,3 m sur l'ensemble des zones topographiées (Illustration 15). En termes d'efficacité de levé, le plan « classique » a nécessité 3 jours de travail (travail de terrain et de traitement) pour cartographier 1500 m² de vides, contre 1,5 jour pour le levé « ZEB-REVO » (travail de terrain et traitement du nuage de points) pour cartographier 2600 m² de vides et les terrains de surface.

La comparaison des deux méthodes montre clairement que le scanner laser portatif « ZEB-REVO » est le plus approprié pour effectuer les cartographies des réseaux souterrains nécessaires aux diagnostics de stabilité, et cela pour trois raisons :

- la précision du levé est très satisfaisante (précision centimétrique à décimétrique), ce qui équivaut à un plan de détail ;
- la vitesse d'acquisition et de traitement est plus élevée que pour la méthode « classique » ;
- le rendu en 3 dimensions permet d'apprécier les volumes et de réaliser des traitements du nuage de points *a posteriori* (analyse de la fracturation, des piliers etc.). En outre, la comparaison « levé de fond / levé de surface » permet de dresser des cartes d'épaisseurs de recouvrement en tout point de la carrière, avec une précision décimétrique, ce qui est particulièrement intéressant pour gérer le risque ;

- La comparaison de deux levés « ZEB-REVO », réalisés à plusieurs mois ou années d'intervalle, permet d'identifier et de quantifier des différences entre les nuages de points, ce qui peut souligner l'occurrence de mouvements de terrain (chutes de toit, chutes d'écaillles, évolution d'un fontis etc.). Cet outil peut donc également être utilisé pour un suivi régulier des cavités, et donc une gestion du risque à long terme.

La méthode « classique » reste néanmoins intéressante pour le levé de plans globaux sur des petites carrières dans le cadre de diagnostics d'urgence, puisqu'elle ne nécessite qu'un appareillage relativement simple (laser-mètre et boussole).

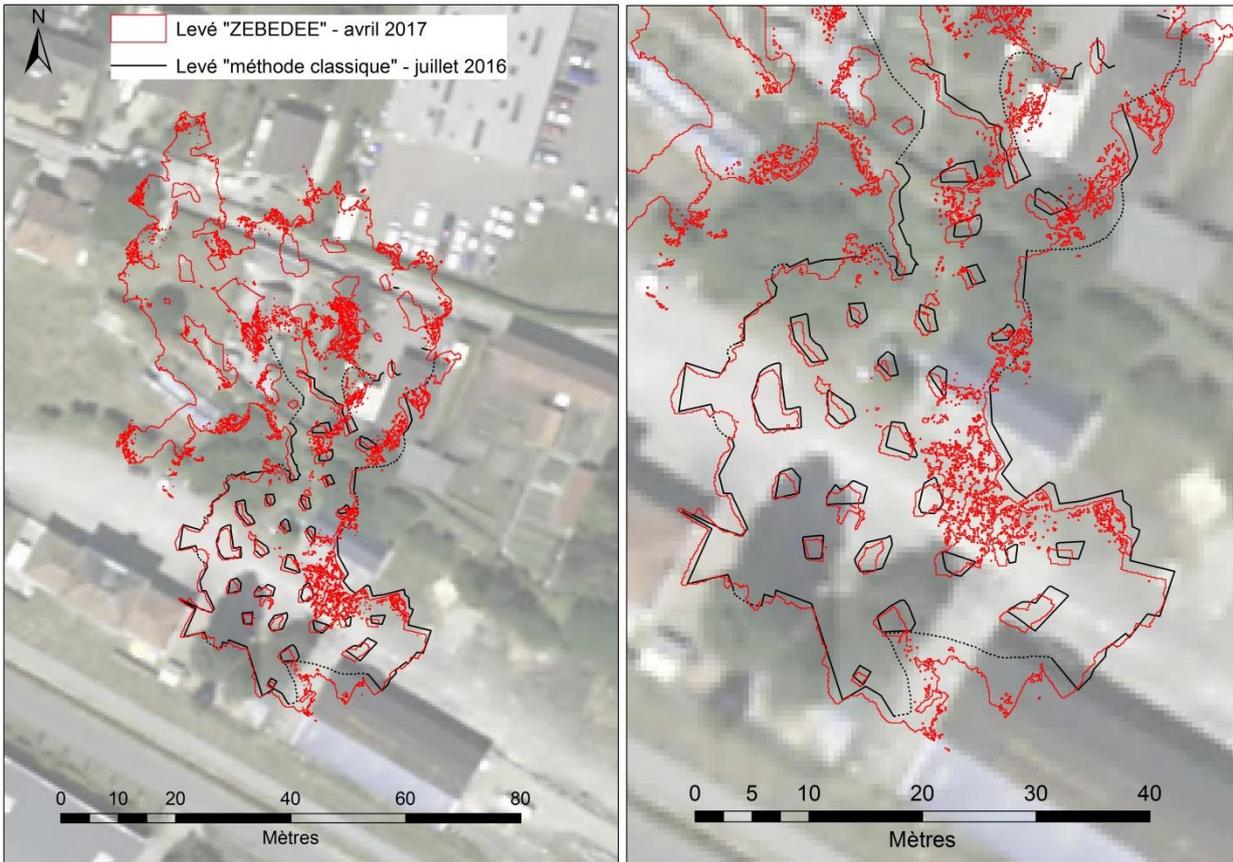


Illustration 15 : Comparaison des méthodes de topographies sur la carrière de Saint-Langis-lès-Mortagne. En rouge, le levé « ZEB-REVO » et en noir le levé par la méthode « classique »

5.3. FORMALISATION DES OBSERVATIONS

5.3.1. Données géométriques – contours et emprises

Chaque carrière diagnostiquée possède un plan cartographique dressé pour l'occasion (cf. chapitre 5.2) ou récupéré auprès de géomètres. Ces plans permettent d'une part d'avoir un aperçu de la géométrie de l'exploitation, et d'autre part de reporter les instabilités et les observations effectuées au cours des diagnostics. Sur les 10 carrières diagnostiquées, seules 2 disposaient d'un plan levé par des géomètres (carrières de Loisail « Le Bas Champillaume » et de Bénysur-Mer « Le Rocreux »). Ces plans, disponibles au format informatique, ont donc été directement intégrés dans la base de données.

Les 8 autres carrières ont fait l'objet d'un levé spécifique pour la mise en place du diagnostic. Il s'agit des carrières de Saint-Langis-lès-Mortagne, Mauves-sur-Huisne, Bellavilliers, Basly et Bény-sur-Mer. Les plans ont été dressés soit via la méthode « classique », soit au scanner laser portatif « ZEB-REVO ». Leur précision est donc variable : du plan global (précision métrique) au plan de détail (précision décimétrique). Dans les deux cas, la précision des plans est adaptée aux diagnostics de niveau 1.

Intégrés dans la base de données sous SIG, les plans ont permis d'extraire certaines données géométriques telles que les emprises, les surfaces exploitées, les taux de défrusement, les hauteurs de vide etc. Deux types de contours ont été utilisés pour leur digitalisation sous SIG :

- **Les contours avérés** : figurés en trait plein sur les différentes cartographies, il s'agit des « fronts de taille » de la carrière, qui correspondent à une limite avérée / confirmée de la carrière souterraine ;
- **Les contours supposés** : figurés en pointillés, il s'agit de zones pour lesquelles la limite avérée n'a pas été observée et donc pour lesquelles des extensions sont possibles. La plupart du temps, il s'agit de zones inaccessibles (éboulées, remblayées, trop instables etc.) ;

Au total, les levés géométriques inédits réalisés dans le cadre de cette étude ont permis de dresser 8 nouveaux plans, qui représentent plus de 20.000 m² de vides et environ 7 kilomètres de contours.



Illustration 16 : A gauche, extension supposée masquée par un cône d'éboulis (représenté sur les plans par un pointillé) et à droite un contour avéré (front de taille)

5.3.2. Etat des piliers

L'état de stabilité d'une carrière souterraine exploitée par chambres et piliers est intimement lié à l'état de ses piliers, puisqu'ils supportent le toit. La rupture simultanée de plusieurs d'entre eux peut induire l'occurrence d'un effondrement généralisé en surface. L'état des piliers témoigne du vieillissement de la carrière souterraine.

L'ensemble des piliers observés en carrière ont donc été classés pour qualifier leur état de stabilité, qui varie de « bon » à « état de post-rupture ». Une description succincte de ces états de stabilité est donnée ci-dessous :

- **Pilier sain** : le pilier est en bon état et n'est affecté par aucune instabilité notable ;

- **Pilier fracturé ou écaillé** : le pilier est traversé par une ou des fracture(s), naturelle(s) ou mécanique(s) et/ou il présente des écaillages sur ses flancs ;
- **Pilier en diabolo** : le pilier présente une forme de diabolo qui résulte d'un écaillage régulier des flancs, lié à des contraintes verticales ou à des fluctuations thermiques et hygrométriques importantes. L'état de stabilité de ce type de pilier est médiocre, la ruine est probable ;
- **Pilier en état de post-rupture** : le pilier est foudroyé, ruiné et totalement fracturé.

Dans la base de données, l'état de stabilité de chaque pilier est défini selon un code couleur qui varie du vert (sain) à violet (post-rupture). Les investigations ont permis d'évaluer l'état de stabilité apparent de plus de 800 piliers, répartis dans les 10 carrières diagnostiquées.

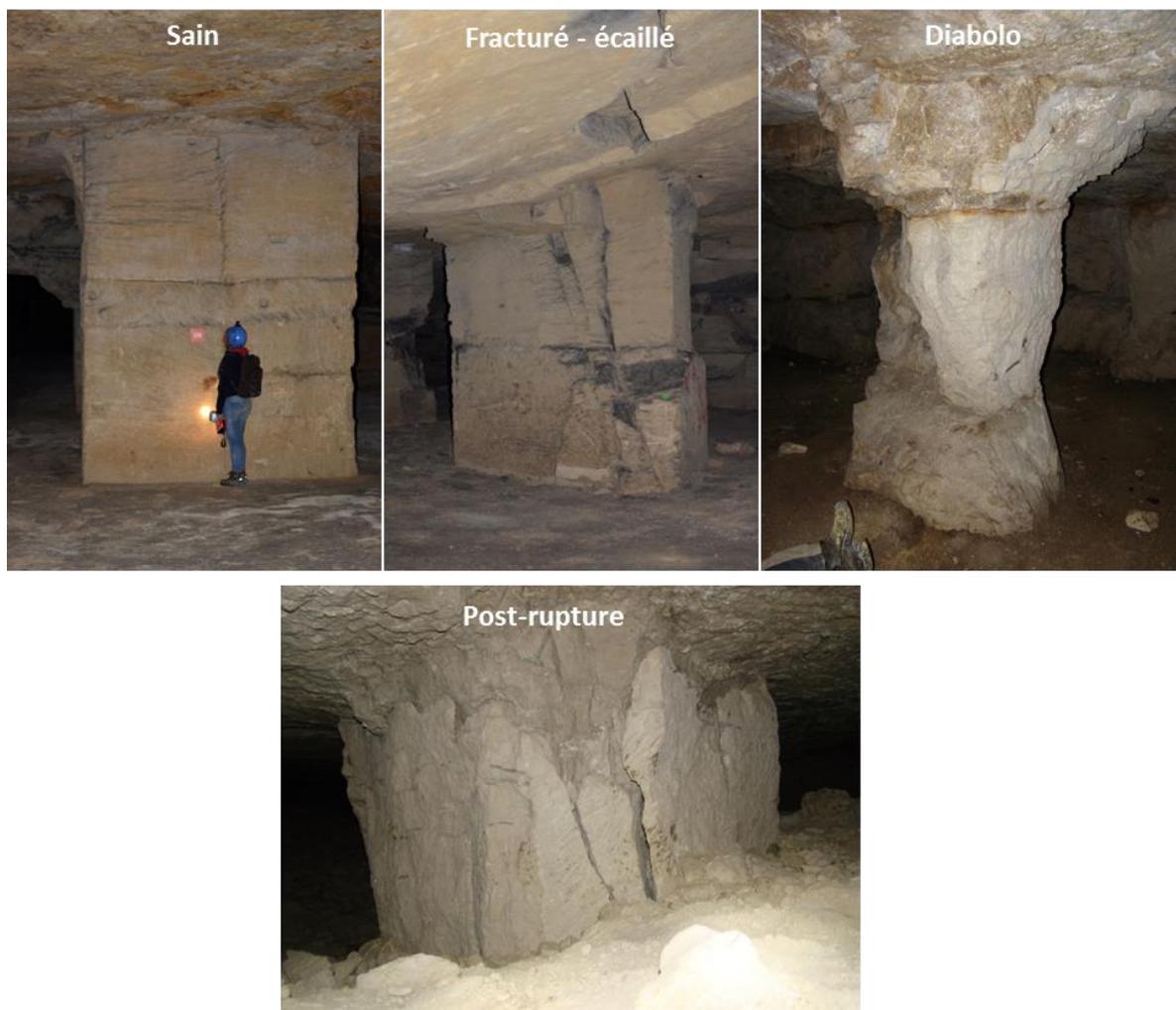


Illustration 17 : Illustration des 4 états de stabilité des piliers (carrières de Bénvy-sur-Mer, de Mauves-sur-Huisne et de Saint-Langis-lès-Mortagne)

5.3.3. Fracturation

Les carrières souterraines diagnostiquées ont fait l'objet d'un levé systématique de l'ensemble des fractures qui affectent le toit puisqu'elles renseignent sur l'état de stabilité de la voûte. Les mesures suivantes ont été réalisées sur chaque fracture observée en cavité, et compilées dans

la base de données : azimut, rejet, pendage, ouverture, remplissage, présence de suintements, présence de racines ou de radicelles.

D'autre part, ces fractures ont été différenciées selon leur nature :

- **Fractures naturelles** : il s'agit des fractures de type failles ou diaclases tectoniques, qui affectent le substratum. Ces fractures sont liées à la tectonique régionale ou à la décompression des massifs liée au creusement des vallées. Elles étaient donc présentes dans le massif bien avant le creusement des carrières, et sont donc indépendantes de l'exploitation. Parfois, ces fractures sont associées à des arrivées d'eau et des minéralisations, peuvent être argilisées ou karstifiées, et peuvent générer ou conditionner des instabilités de toit (chutes de toit, cloches de fontis) ;
- **Fractures mécaniques** : les fractures mécaniques correspondent soit à des fractures liées au vieillissement de la carrière souterraine, soit à des fractures liées à la redistribution des contraintes lors de l'excavation. Elles sont généralement situées aux carrefours de galeries, là où les portances entre piliers sont les plus grandes. Ces fractures mécaniques sont les premiers signes d'instabilités qui peuvent générer des chutes de toit, puis des remontées de voûtes, et enfin des remontées de cloches de fontis.

Les fractures ont été cartographiées selon leur nature. Une différenciation est faite dans la base de données selon un code couleur.



Illustration 18 : Illustration des deux types de fractures cartographiées : à gauche, une fracture naturelle karstifiée qui affecte le toit et les piliers (carrière de Loissail « Le Bas Champaillaume ») et à droite, des fractures mécaniques qui affectent la voûte (carrière de Basly)

5.3.4. Chutes de toit et remontées de fontis

Les chutes de toit et les remontées de fontis sont deux types d'instabilités qui peuvent, à terme, engendrer des désordres en surface (effondrement localisé, affaissement). Pour chaque carrière diagnostiquée, les secteurs de chutes de toit et de remontées de fontis ont été cartographiés et classés selon un code couleur dans la base de données.



Illustration 19 : Illustration des deux types d'instabilités de toit : à gauche, les chutes de toit et à droite, un éboulis lié à la remontée d'une cloche de fontis – carrière de Loissail « Le Bas Champailaume »

5.3.5. Ecaillage et décollement de 1^{er} banc de toit

Dans la plupart des cas, les écaillages et les décollements de 1^{er} banc de toit ne correspondent pas à des instabilités susceptibles d'engendrer des désordres en surface à court terme, mais elles représentent un danger avéré pour les visiteurs. Ainsi, toutes les instabilités de ce type repérées lors des diagnostics ont été positionnées sur les plans pour localiser les zones dangereuses. Notons que les décollements de 1^{er} banc de toit correspondent au premier stade d'évolution des chutes de toit, qui peuvent ensuite évoluer vers des remontées de voûte et des remontées de fontis.



Illustration 20 : Illustration d'une zone de décollement de 1^{er} banc de toit dans la carrière de Béný-sur-Mer « Le Rocreux »

5.3.6. Observations ponctuelles diverses

Ces observations ponctuelles diverses complètent les informations sur l'état qualitatif de stabilité des carrières souterraines. Dans le cadre de ce projet, 8 types d'observations ponctuelles ont été retenues pour être mentionnées sur les plans de diagnostics : les arrivées

d'eau, les blocs au sol, les canalisations et autres réseaux anthropiques, les concrétions carbonatées, les conduits karstiques, les racines et radicelles, les zones inaccessibles et les autres éléments remarquables (puits, informations diverses etc.).

5.3.7. Evaluation qualitative de l'état général des carrières souterraines

Pour chaque carrière souterraine diagnostiquée, une évaluation qualitative de l'état général est proposée, classée de bon à très mauvais. Cette évaluation est basée sur les observations effectuées lors des inspections (état des piliers, état de la voûte, fracturation etc.), ainsi que sur l'impression générale de la stabilité perçue par les intervenants lors des visites. A partir de ces critères, quatre classes ont été définies. Une définition sommaire de chaque classe est définie dans le tableau ci-dessous :

EVALUATION QUALITATIVE DE L'ETAT GENERAL	DESORDRES OBSERVES IMPRESSION SUR LA STABILITE LORS DES VISITES
BON	Peu de désordres au toit – les piliers sont globalement sains Impression de sécurité lors des visites
MEDIOCRE	Désordres au toit (chutes de toit, décollement de toit quelques fontis) – les piliers sont fracturés/écaillés ou sains Impression d'insécurité dans certains secteurs de la carrière
MAUVAIS	Nombreux désordres au toit (larges zones de chute de toit, décollement de toit, fontis) – les piliers sont majoritairement fracturés ou écaillés, certains en diablo Impression d'insécurité dans l'ensemble de la carrière
TRES MAUVAIS	Nombreux désordres au toit (larges zones de chute de toit ou de décollement de toit, nombreux fontis) – les piliers sont majoritairement fracturés/écaillés, en diablo voire en état de post-rupture Impression d'insécurité totale dans l'ensemble de la carrière

Tableau 1 : Evaluation qualitative de l'état général des carrières souterraines d'après les observations effectuées en souterrain et l'impression générale de stabilité lors des visites

Cette évaluation qualitative de l'état général des carrières a notamment été utilisée pour proposer une fréquence de visite pour le suivi de leur vieillissement (cf. 7.2.1).

5.4. CONCEPTION D'UNE BASE DE DONNEES D'OBSERVATION ET DE SUIVI DE L'ETAT DE STABILITE DES CARRIERES SOUTERRAINES

L'ensemble des observations réalisées au cours des diagnostics (années 2014 et 2016-2017) a été bancarisé dans une base de données dédiée au projet. Cette base de données a été créée sur le logiciel de SIG ARCGIS® (Illustration 21).

La notice explicative de chaque table est disponible en annexe de ce rapport (hors texte).

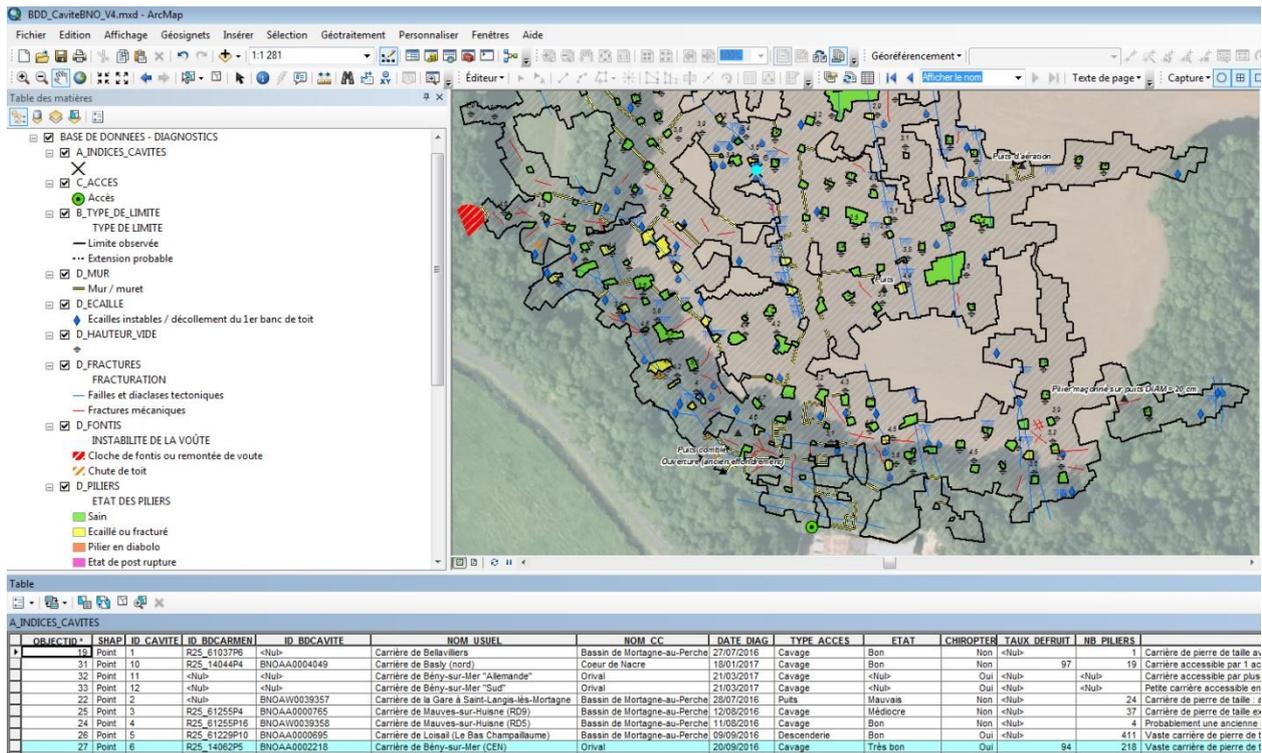


Illustration 21 : Représentation cartographique de la base de données ARCGIS® dédiée aux diagnostics de stabilité

En termes de résultats, l'analyse des différentes tables de la base de données permet d'extraire quelques chiffres concernant la quantité de données acquises dans le cadre de ce projet : **10** carrières souterraines diagnostiquées, levé de **9** plans inédits (3 à la boussole et 6 au scanner laser 3D portable « ZEB-REVO »), **8** ha de vides et plus de **25** kilomètres de contours digitalisés et géoréférencés (dont 2 ha inédits), **633** mesures de hauteurs de vide, évaluation qualitative de l'état de **815** piliers, relevé de **449** fractures, localisation de **245** écaillles et décollement de toit, identification de **152** désordres de type chutes de toit ou remontée de fontis, prise de plus de **300** photographies.

5.5. REALISATION DE COMPTES RENDUS DETAILLES

5.5.1. Contenu des fiches

Pour chaque carrière souterraine visitée, un compte rendu de diagnostic détaillé a été réalisé selon le modèle élaboré en 2014 et de manière à ce que la lecture de chaque site puisse être indépendante. Il permet de reprendre les observations, les analyses, et de proposer des recommandations en matière de sécurisation. Dans le cas de la mise en place de visites régulières de contrôle, ces comptes rendus pourront également être utilisés pour évaluer le vieillissement des carrières souterraines au cours du temps.

Chaque compte rendu est organisé selon la manière suivante :

- *Contexte général* : objectifs de l'intervention, situation géographique, situation géologique et hydrogéologique de la carrière souterraine, connaissance des cavités dans le secteur, données historiques ;

- *Constat et diagnostic de stabilité* : visite de l'environnement de surface de la carrière et identification des enjeux, reconnaissance et investigations de terrain antérieures si elles existent, données hydrologiques ou hydrogéologiques, inspections des souterrains (accès, géométrie, type d'exploitation, état de stabilité) ;
- *L'évaluation qualitative de l'état général de la carrière* ;
- *Risques résiduels* : en fonction des observations réalisées au cours du diagnostic et des enjeux, détails sur les risques résiduels liés au vieillissement de la carrière souterraine ;
- *Plan détaillé du diagnostic* ;
- *Synthèse, conclusions et recommandations.*

5.5.2. Mise en forme cartographique

Chaque compte rendu de visite est accompagné d'une cartographie géotechnique qui localise, sur l'emprise de la carrière souterraine, les instabilités repérées en souterrain et les principales observations (photographies, hauteurs de vides etc.). Ces plans ont été réalisés à partir des données intégrées dans la base de données SIG (Illustration 22).

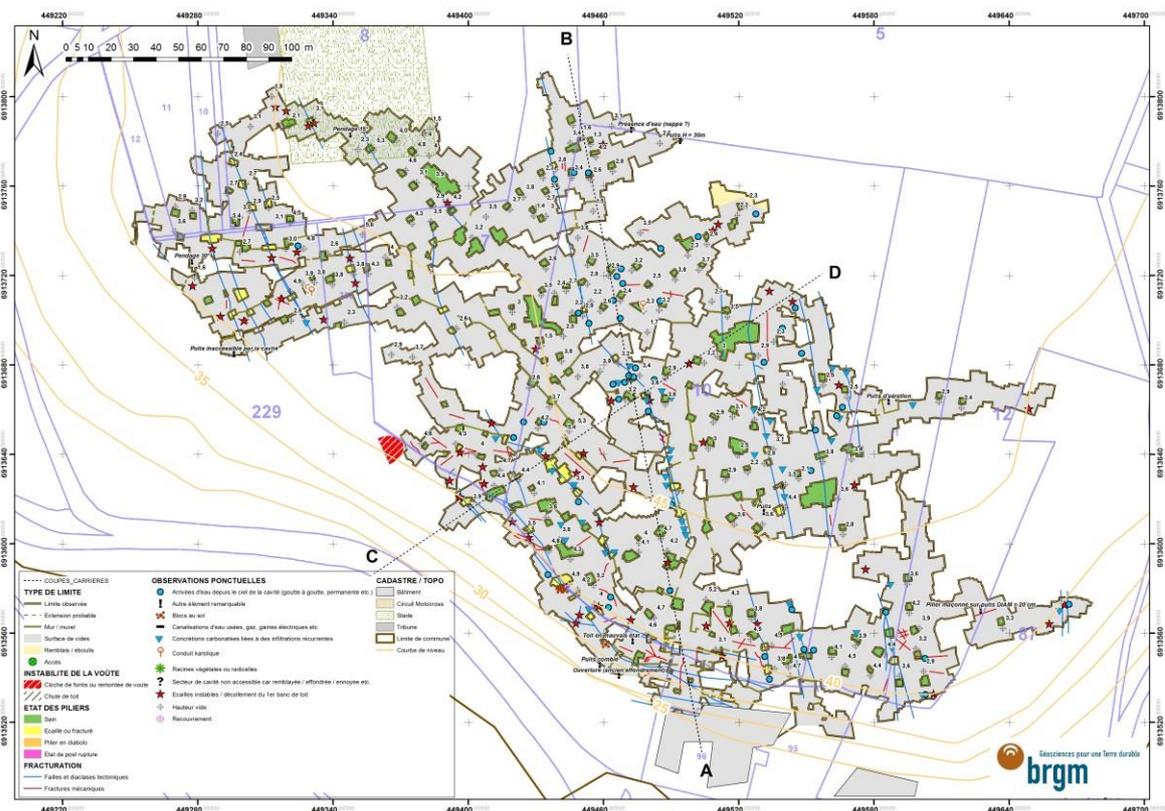


Illustration 22 : Exemple d'un plan détaillé de diagnostic (ici pour la carrière souterraine de Bény-sur-Mer « Le Rocreux »)

5.5.3. Liste des fiches

Ainsi, 10 fiches ont été réalisées et sont présentées en annexe (hors-texte) de ce rapport :

Annexe 2 Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Bellavilliers (61) (hors-texte)	63
Annexe 3 Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Saint-Langis-lès-Mortagne (61) (hors-texte).....	65
Annexe 4 Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Mauves-sur-Huisne RD9 (61) (hors texte).....	67
Annexe 5 Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Mauves-sur-Huisne RD5 (61) (hors texte).....	69
Annexe 6 Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Loisail (61) (hors texte).....	71
Annexe 7 Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Bény-sur-Mer BNOAA0002218 (14) (hors-texte)	73
Annexe 8 Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Basly BNOAA0002117 (14) (hors-texte)	75
Annexe 9 Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Basly BNOAA0004048 (14) (hors-texte)	77
Annexe 10 Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Basly BNOAA0004049 (14) (hors-texte)	79
Annexe 11 Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Bény-sur-Mer BNOAA0002207 (14) (hors-texte)	81

6. Application de méthodes géophysiques pour la détection de carrières souterraines abandonnées dans le contexte bas-normand

Les méthodes géophysiques sont depuis longtemps utilisées dans le domaine de la détection des cavités souterraines (*Debeglia et Lebert, 2003 ; Derouin et Beauce, 1997*). Cependant, sur le territoire de l'ex-Basse-Normandie, leur utilisation demeure relativement confidentielle.

L'un des objectifs de ce projet était d'identifier la méthode géophysique la plus pertinente pour localiser de manière indirecte des vides liés à la présence de carrières souterraines abandonnées, lorsqu'il n'existe pas d'accès, dans le contexte bas-normand.

Dans ce cadre, deux méthodes géophysiques *a priori* les plus adaptées à la détection de cavités souterraines ont été retenues puis appliquées sur le site de l'ancienne carrière de Saint-Langis-lès-Mortagne, localisée sur les terrains crayeux du Cénomaniens, dans le Perche (Orne). Les deux méthodes utilisées sont la microgravimétrie et l'électrique (tomographie électrique et OhmMapper).

Les mesures géophysiques ont été réalisées en février 2017 par les équipes de l'unité Risques et Prévention du BRGM.

En ce qui concerne les recommandations qui découlent des résultats, elles sont explicitées dans le compte-rendu de visite de la carrière de Saint-Langis-lès-Mortagne (annexe hors-texte).

6.1. MICROGRAVIMETRIE

6.1.1. Rappel de la méthodologie

La microgravimétrie repose sur le principe d'étudier les variations relatives de l'accélération de la pesanteur, qui sont influencées par des variations de densité dans le sous-sol. Ces variations de densité peuvent être traduites en termes de structures ou d'objets géologiques. La présence d'un vide souterrain induira par exemple un déficit de densité dans le sous-sol, qui peut être décelé par la microgravimétrie.

La mise en œuvre de cette technique nécessite de disposer d'un microgravimètre très sensible (sensibilité de l'ordre du μGal), disposé en stations de mesures. Ces stations de mesures sont généralement réparties avec un espacement constant, qui dépendra de la géométrie du vide recherché : plus la cavité est petite, plus les anomalies de densité engendrées seront faibles et plus le maillage devra être serré, et inversement. Chaque station de mesure nécessite un relevé topographique de précision.

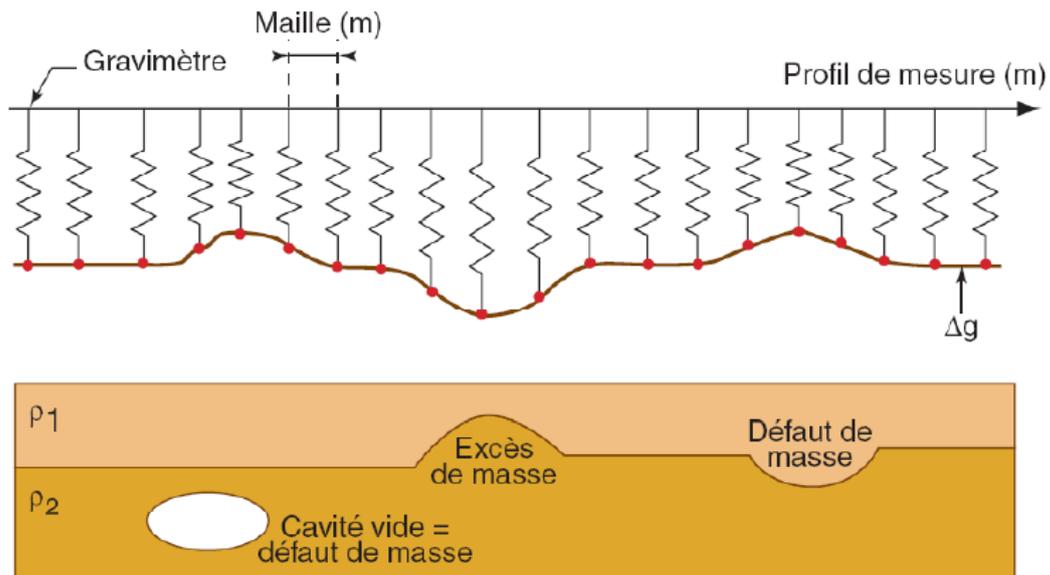


Illustration 23 : Schéma de principe de la méthode gravimétrique (BRGM, 2009)

245 stations gravimétriques ont été implantées, nivelées et mesurées en gravimétrie sur la zone d'étude (Illustration 24) à la maille de 5 x 5 m.

L'implantation des stations et les mesures gravimétriques ont été réalisés par deux agents du BRGM, ingénieur et technicien en géophysique, entre le 6 et le 8 février 2017.

Une station totale Trimble S7 a été utilisée pour déterminer l'altimétrie et le positionnement relatif des points, et un GPS différentiel Trimble Geo7X a été utilisé pour le recalage de l'étude dans le référentiel Lambert 93. Ce recalage a été effectué par l'obtention de coordonnées, précises à 1 cm, de deux stations de base topographique (utilisées pour la mise en station de la station totale) par des mesures d'au moins 30 minutes au GPS différentiel sur chaque station. Le positionnement des stations et la topographie de la zone d'étude sont présentés sur l'illustration 24.

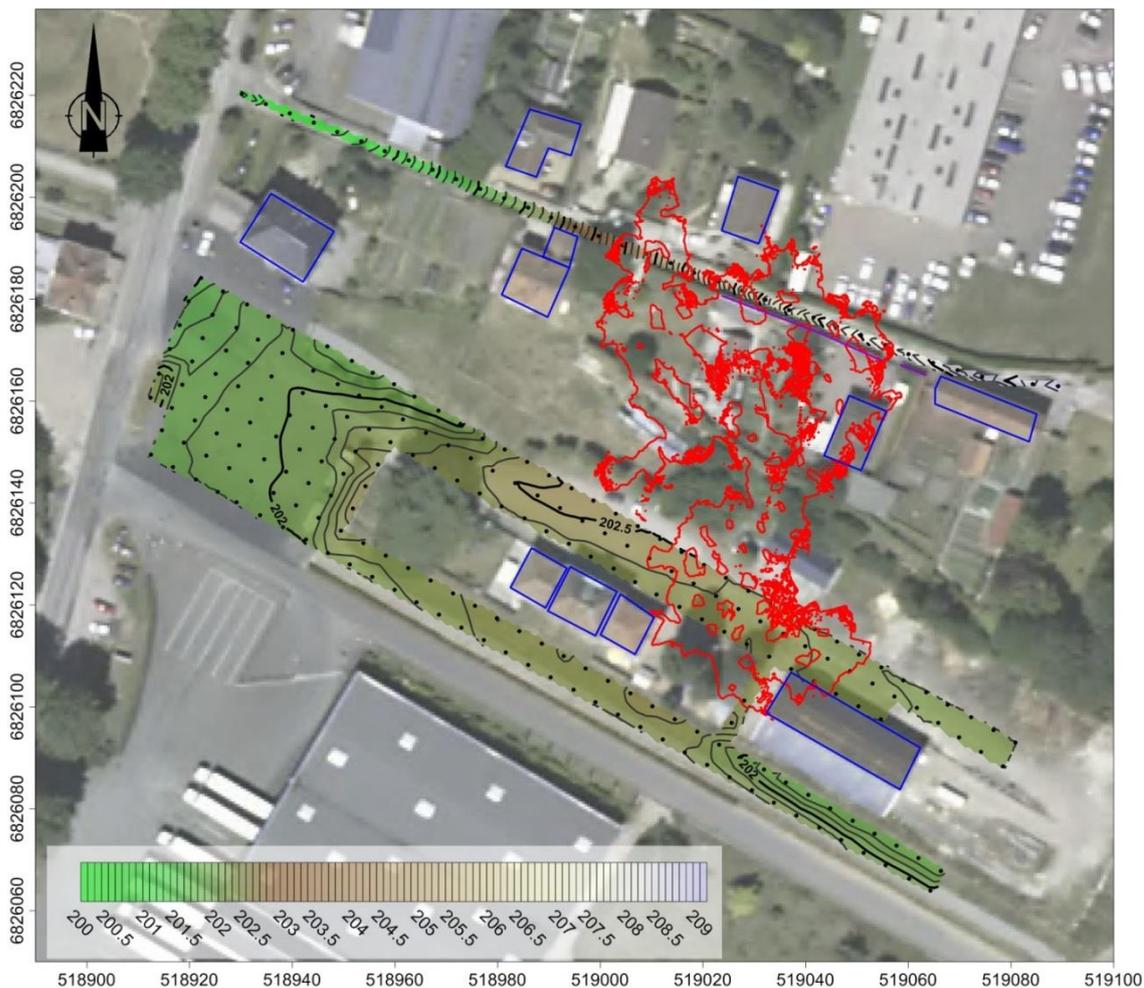


Illustration 24 : Topographie de la zone d'étude (m) montrant les stations gravimétriques (points noirs). Les bâtiments sont marqués par des polygones bleus, les murs par des traits violet et l'emprise de la carrière par un polygone rouge.

6.1.2. Résultats

L'anomalie résiduelle fait ressortir les variations de gravité en lien avec les variations de densité de la subsurface, objet de cette étude. Elle est présentée à l'illustration 25.

L'anomalie résiduelle a une dynamique de 0,066 mgal, variant de -0,042 mGal à 0,026 mGal.

Les anomalies positives ne feront pas l'objet d'une analyse détaillée, car elles marquent les excès de masse, qui ne sont pas l'objet de cette étude.

Les anomalies négatives sont retenues selon les critères suivants :

- Les anomalies sont retenues si et seulement si leur amplitude est supérieure à 0.015 mgal (seuil de signification de l'étude). Cette valeur est choisie car elle correspond typiquement à l'amplitude du bruit géologique, lié aux variations d'épaisseur de remblais, aux variations de facies... ;

- Les anomalies doivent affecter au moins 2 stations contiguës, mais des anomalies affectant une seule station peuvent être retenues si celles-ci se présentent selon des axes négatifs, ou si elles sont proches d'anomalies proches ou de vides connus.

Selon les critères énoncés précédemment, 8 anomalies sont retenues (Illustration 25). Les anomalies A1, A4 et A5 sont morcelées et sont subdivisées en plusieurs anomalies contiguës A1, A1', A1'', A4, A4', A4'', A5, A5'.

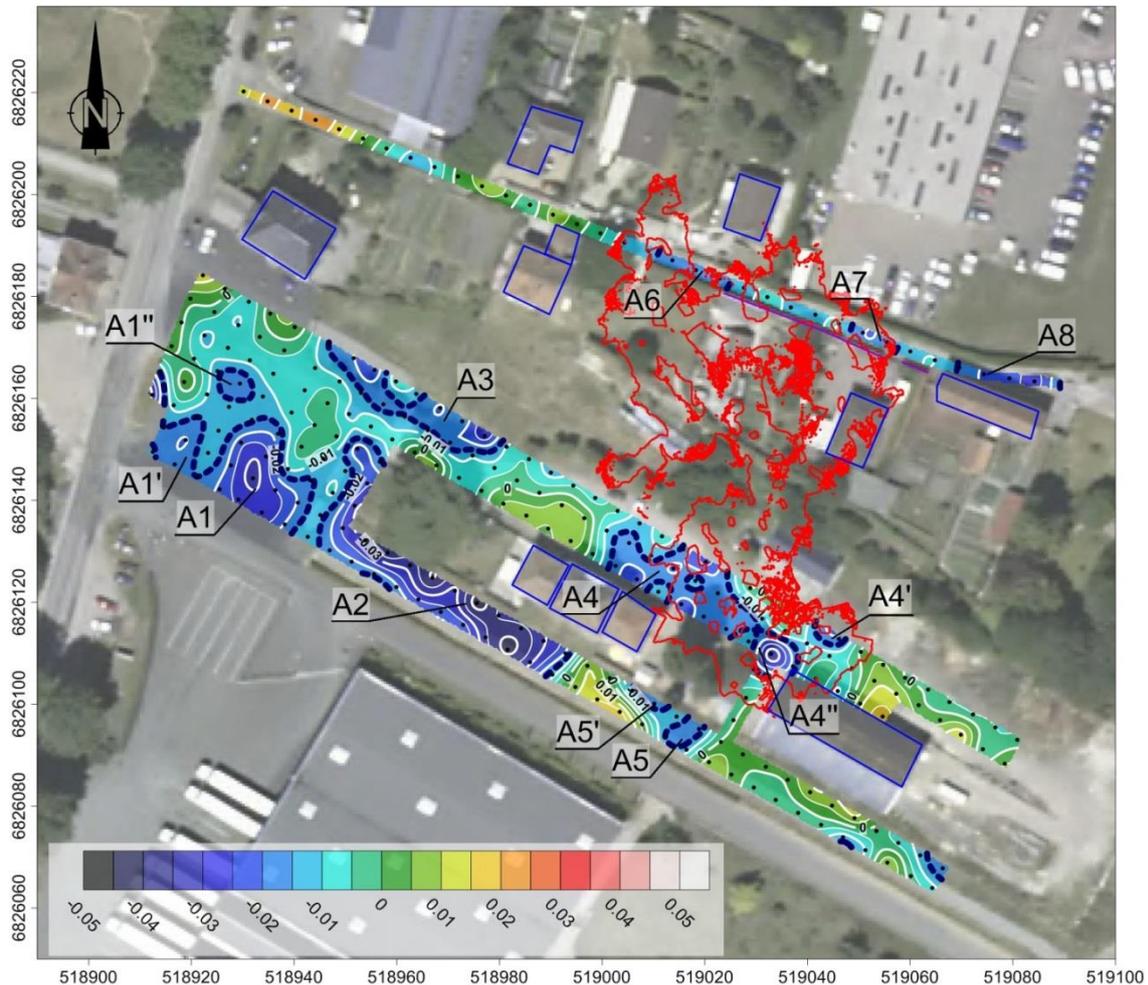


Illustration 25 : Anomalie résiduelle (mGal). Les anomalies négatives significatives sont entourées par un trait discontinu bleu foncé. Les anomalies décelées sont numérotées de A1 à A8.

Les anomalies A4, A4', A4'', A6, et A7 sont localisées en grande partie au droit de l'emprise de la carrière reconnue et accessible. Il est donc fortement plausible que ces anomalies soient générées par le vide de la carrière.

Les anomalies A1 et A2 sont notables par leur large emprise, affectant plus de 10 stations chacune, et leur amplitude importante, supérieure à 0,030 mGal. L'état actuel des connaissances du sous-sol ne permet pas de les relier à des carrières connues, mais cette hypothèse est la plus plausible. En effet, à ce stade des investigations, les anomalies gravimétriques négatives décelées ne peuvent être interprétées de manière univoque, sans informations complémentaires fournies par d'autres méthodes géophysiques et/ou des données de sondages mécaniques. Elles peuvent correspondre :

- à des variations latérales de densités au sein des terrains, liées à leur nature et à leur lithologie, à leur degré d'altération ou à leur degré de compaction ;
- à des cavités vides, ennoyées, ou partiellement remblayées (hypothèse la plus plausible) ;
- à des variations d'épaisseur de remblais peu dense sur un substrat plus dense ;

Pour lever les ambiguïtés d'interprétation, il est donc préconisé d'effectuer des sondages de contrôle jusqu'à une profondeur atteignant au moins 10 m au niveau des zones caractérisées par des anomalies négatives. Le détail des recommandations pour le site de Saint-Langis-lès-Mortagne est compilé dans le compte-rendu de visite (annexe hors-texte).

6.1.3. Conclusions / pertinence de la méthode

Les résultats des mesures microgravimétriques se sont montrés particulièrement concluants dans la mesure où les vides souterrains topographiés sont clairement associés à des anomalies microgravimétriques négatives, signalant un déficit de masse dans le sous-sol. Bien qu'une anomalie gravimétrique ne puisse pas être interprétée de manière univoque sans sondages de contrôle, l'hypothèse d'anomalies liées à la présence de vides souterrains demeure la plus plausible. Cela tend à démontrer la pertinence de l'utilisation de la microgravimétrie pour la détection de vides souterrains anthropiques dans le contexte géologique du Bassin de Mortagne-au-Perche (carrières peu profondes creusées dans la craie).

6.2. METHODES ELECTRIQUES

6.2.1. Rappel de la méthodologie

Dans le cadre de ce projet, deux méthodes électriques ont été utilisées : la tomographie électrique (ERT) et le dispositif OhmMapper. La localisation des profils électriques (ERT et OhmMapper) est figurée sur l'illustration 26.

Les mesures électriques ont été réalisées par deux agents du BRGM, ingénieur et technicien en géophysique, entre le 13 et le 16 février 2017.

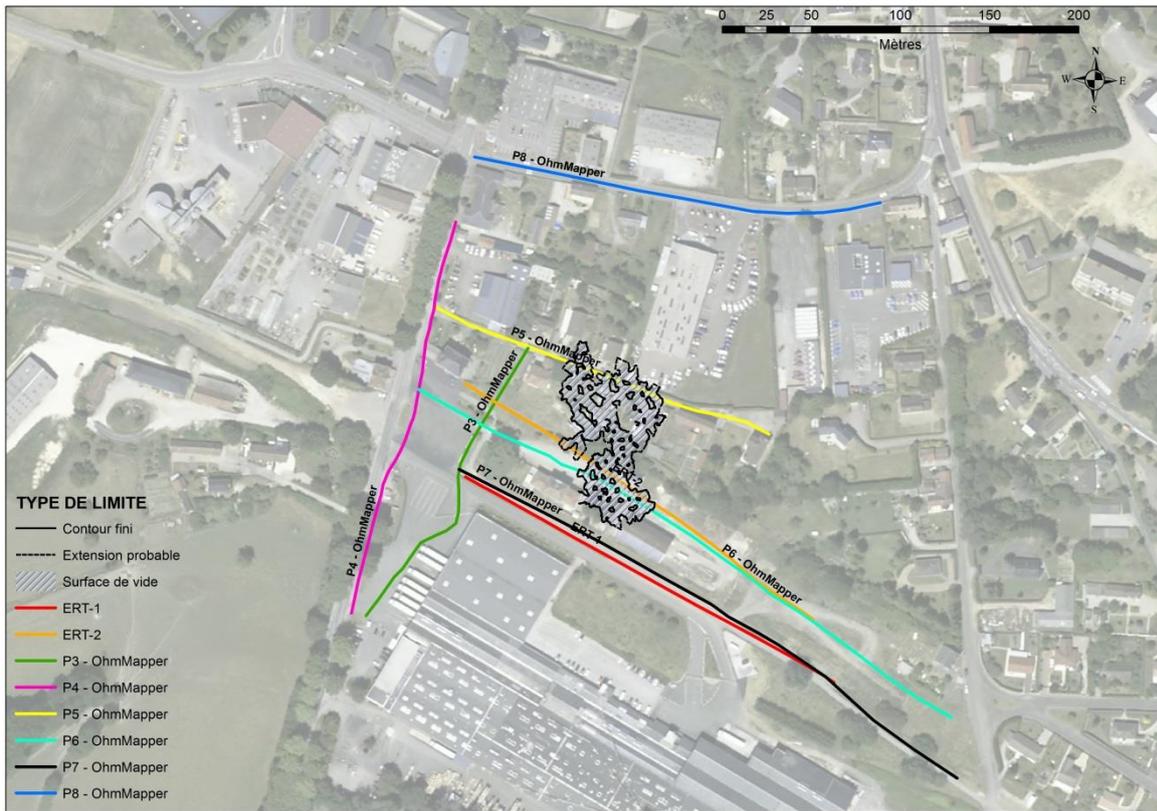


Illustration 26 : Situation des différents profils électriques réalisés au droit de la carrière de Saint-Langis-lès-Mortagne – l'emprise actuelle de la carrière (en noir sur la carte) a été topographiée après les investigations géophysiques

Tomographie électrique

La tomographie électrique (ERT pour Electrical Resistivity Tomography) est une méthode géophysique permettant d'obtenir la distribution de la résistivité des matériaux (roches ou structures) en profondeur à partir de mesures de potentiel électrique en surface. Ce type d'acquisition présente l'avantage de fournir des résultats fiables et d'être rapidement mis en œuvre. Le principe de base de la prospection électrique est d'injecter dans le sol un courant électrique d'intensité I entre deux électrodes A et B et de mesurer la différence de potentiel ΔV induite entre une autre paire d'électrodes M et N (Illustration 27).

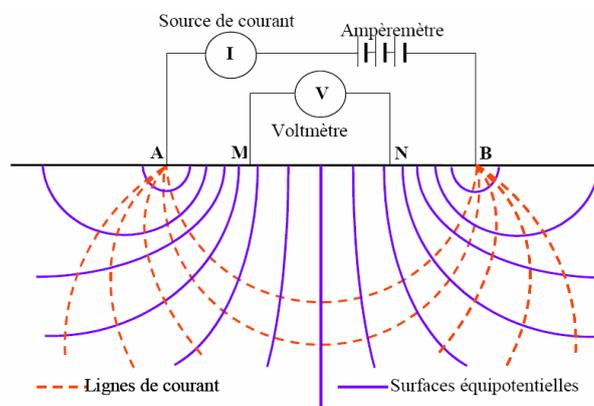


Illustration 27 : Principe de la prospection électrique par courant continu (LCPC, 2004)

Trois configurations d'acquisition / dispositifs d'électrodes existent pour la tomographie électrique (configurations dipôle-dipôle, Schlumberger et Wenner), chacune présentant des avantages et des inconvénients.

L'acquisition des deux profils électriques ERT a été réalisée à l'aide d'un résistivimètre Syscal-Pro (IRIS Instruments, France) en configuration dipôle-dipôle, avec des électrodes métalliques régulièrement espacées de 2,5 m sur une longueur de 237,5 m par profil (soit un total de 475 m de profil ERT). L'espacement inter-électrodes de 2,5 m a été choisi afin d'assurer une bonne résolution des terrains de sub-surface.

OhmMapper

Cette technique de mesure fait appel à des électrodes posées au sol pour l'injection du courant et la mesure du champ électrique. Le système est tracté au sol par un véhicule, et peut fonctionner sur différents types de sols : terrain naturel, asphalte, béton (non armé) etc. L'avantage de cette méthode est d'être plus rapide à mettre en œuvre qu'un profil de tomographie électrique.



Illustration 28 : Dispositif OhmMapper (source : Geometrics)

L'acquisition des profils électriques OhmMapper a été réalisée à l'aide du dispositif OhmMapper (Geometrics, USA) avec des longueurs de dipôle de 5 m. Avec ce dispositif, la profondeur d'investigation est de l'ordre de 8 m.

6.2.2. Résultats

Les résultats sont présentés sous la forme de coupes de résistivité inversées (exemples en Illustration 29 pour un profil ERT et Illustration 30 pour un profil OhmMapper), qui mettent en évidence des variations de la résistivité du sous-sol. Les couleurs chaudes (jaune, rouge, violet) correspondent à des horizons résistants et les couleurs froides (bleu, vert) à des horizons conducteurs. L'ensemble des 8 coupes de résistivité inversées issues des prospections électriques sont présentées dans le compte-rendu de visite de la carrière souterraine de Saint-Langis-lès-Mortagne, en annexe hors-texte de ce rapport.

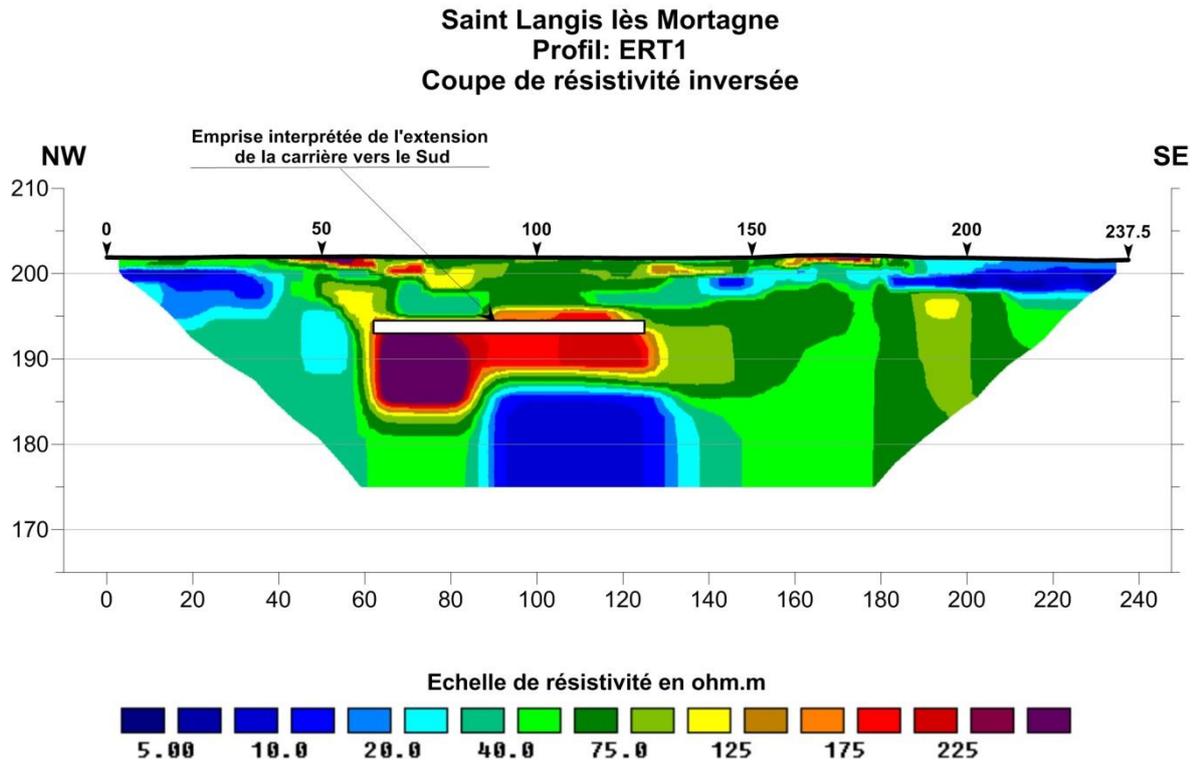


Illustration 29 : Coupe de résistivité inversée du profil de tomographie électrique ERT 1

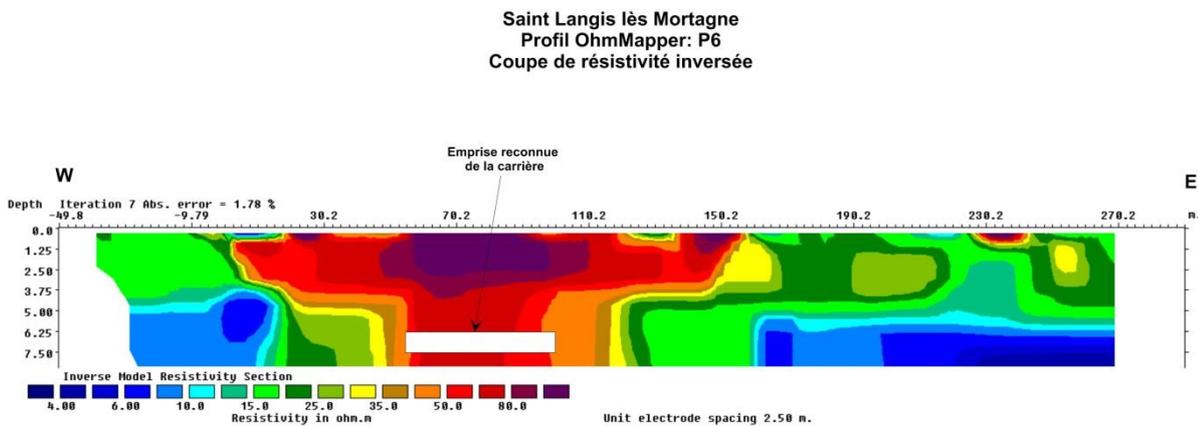


Illustration 30 : Coupe de résistivité inversée du profil OhmMapper P6

En termes de résultats, les coupes de résistivité inversées des profils ERT2, P5, P6 et P7 mettent en évidence des anomalies résistives bien marquées à l'emplacement de l'emprise reconnue de la carrière. Il est donc très plausible que ces anomalies résistives soient générées par le vide de la carrière souterraine (l'air étant résistant), d'autant que ces anomalies sont situées entre 4 et 7 m de profondeur, ce qui correspond globalement à la profondeur de la carrière.

Concernant le profil ERT1, situé au sud de l'emprise actuellement connue de la carrière le long de la voie verte, il met également en évidence une large anomalie résistive vers 5 m de profondeur. Cette anomalie résistive se corrèle avec l'importante anomalie gravimétrique négative A2, ce qui laisse fortement supposer qu'elle est liée à un vide souterrain. Bien que très

plausible, cette hypothèse reste toutefois à vérifier, notamment en implantant un sondage de contrôle.

Concernant les profils OhmMapper P3, P4 et P8, aucune anomalie résistive importante n'est visible sur les coupes de résistivité inversées. Notons que les profils P3 et P4, situés à l'ouest de l'emprise connue de la carrière souterraine, recourent pourtant des anomalies gravimétriques négatives. A l'heure actuelle, l'origine de la non-corrélation des anomalies électriques et microgravimétriques au niveau de ces deux profils n'est pas connue.

6.2.3. Conclusions / pertinence de la méthode

Les deux profils de tomographie électrique ERT1 et ERT2 ont mis en évidence des anomalies résistives situées à environ 5 m de profondeur, soit globalement à la profondeur de la carrière souterraine. Pour le profil ERT2, l'anomalie résistive est située à l'emplacement de l'emprise actuellement connue de la carrière. Pour le profil ERT1, situé au sud de la gare, l'anomalie résistive se corrèle avec l'anomalie négative A2 mise en évidence sur la carte microgravimétrique, ce qui tend à confirmer la présence d'un vide souterrain (hypothèse qu'il conviendra de vérifier par l'implantation d'un sondage de contrôle).

Concernant les profils OhmMapper, les résultats sont concluants pour les profils P5, P6 et P7 dans la mesure où les anomalies résistives se corrélaient avec l'emprise actuellement connue de la carrière souterraine. Pour les profils P3 et P4, pourtant situés au niveau d'anomalies gravimétriques négatives, aucune anomalie résistive n'est visible sur les coupes de résistivité inversée. A l'heure actuelle, l'origine de la non-corrélation des anomalies électriques et gravimétriques n'est pas connue.

Compte tenu de ces résultats, il apparaît que les méthodes électriques semblent adaptées pour la détection de vides souterrains anthropiques dans le contexte géologique du Bassin de Mortagne-au-Perche (carrières souterraines peu profondes et creusées dans la craie), notamment pour la tomographie électrique. La méthode OhmMapper mériterait toutefois d'être appliquée sur d'autres carrières souterraines de ce type pour être confirmée.

7. Conclusions et perspectives

Le territoire de l'ex-Basse-Normandie, par sa diversité géologique, a été le siège d'une activité extractive foisonnante pour l'extraction de matériaux divers (minerais, granulats et pierres de taille pour la construction, marne pour l'amendement). Pour la pierre de taille et la marne, un grand nombre de carrières ont été exploitées en souterrain et la très grande majorité de ces exploitations sont aujourd'hui abandonnées. A terme, leur vieillissement peut induire des désordres en surface (effondrements, affaissements), comme ce fût par exemple en 2011 à Saint-Pierre-Canivet (Calvados) ou à Courgeon (Orne), et en 2013 à Caen (Calvados).

Dans le cadre de ses missions de service public qui s'inscrivent au contrat d'objectifs Etat-BRGM 2013-2017, le BRGM a initié en 2014, en partenariat avec la DREAL Normandie, un programme d'évaluation des risques liés au vieillissement des anciennes carrières souterraines de pierre de taille situées sur le territoire de l'ex-Basse-Normandie (Calvados, Orne et Manche).

Une première étude a permis de visiter une quinzaine de carrières souterraines de pierres de taille, creusées dans les calcaires du Bathonien des environs de Caen. Les comptes rendus de ces visites ont fait l'objet d'un rapport BRGM (RP-64117-FR). Suite à cette étude, et au regard des observations effectuées lors des visites, il s'est avéré nécessaire de poursuivre les investigations sur d'autres carrières souterraines abandonnées pour évaluer leur vieillissement, et notamment sur des carrières creusées dans les craies cénomaniennes.

Dans ce cadre, et en partenariat avec la DREAL Normandie, le BRGM a poursuivi les investigations sur les carrières souterraines abandonnées du Calvados et de l'Orne, avec pour objectifs de :

- poursuivre le travail initié en 2014, en réalisant de nouvelles inspections de carrières souterraines situées dans les formations sédimentaires du Bathonien (calcaire) et du Cénomaniens (craie) ;
- synthétiser l'ensemble des données dans une base de données dédiée ;
- d'affiner la méthode de suivi des cavités de l'ex-Basse-Normandie en :
 - o testant des méthodes de cartographie/topographie de cavités souterraines ;
 - o appliquant des méthodes géophysiques pour la détection d'anciennes carrières souterraines adaptées au contexte bas-normand.

7.1. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES GENERALES

La première étape du projet a porté sur l'élaboration d'une stratégie de sélection des sites intéressants pour effectuer un diagnostic de stabilité. Pour cela, une série de sélections a été appliquée sur la base de données des cavités souterraines de la DREAL Normandie pour ne retenir que les carrières souterraines potentiellement intéressantes pour cette étude. Suite à cette étape, la liste de carrières sélectionnées a été affinée via des visites de terrain (en surface), pour ne retenir que les carrières souterraines de pierre de taille accessibles, et pour lesquelles il est possible d'effectuer un diagnostic de stabilité. Ainsi, la stratégie élaborée dans le cadre de ce projet a permis d'identifier 46 carrières souterraines accessibles (sur les 325 visitées sur le terrain). Les sélections et les vérifications de terrain ont été menées à l'échelle communale.

Dans un second temps, en collaboration avec les services de l'Etat, les communautés de communes à investiguer ont été priorisées sur la base des investigations de terrain et de la connaissance locale des services de l'Etat. Ainsi, les secteurs retenus dans le cadre de cette étude étaient :

- le secteur sud de la communauté de communes du Bassin de Mortagne-au-Perche, (Orne) ;
- les communautés de communes d'Orival et Cœur de Nacre (Calvados).

Suite à cette hiérarchisation, 10 carrières souterraines situées sur les communautés de communes du Bassin de Mortagne-au-Perche et d'Orival – Cœur-de-Nacre ont été retenues pour les investigations en souterrain et l'élaboration de diagnostics de stabilité. Le choix de ces carrières a été effectué en fonction des enjeux situés en surface (bâtiments, voiries, terrains de sports etc.) ou des risques d'intrusions pour les carrières en accès libre. Parmi ces 10 carrières souterraines, 5 sont creusées dans les craies cénomaniennes du Bassin de Mortagne-au-Perche (Orne) et 5 sont creusées dans les calcaires bathoniens du nord de la plaine de Caen (Calvados).

Les carrières retenues ont fait l'objet d'investigations en souterrain pour :

1. Dresser le plan géométrique de la carrière (si absence de plans) ;
2. Réaliser un diagnostic de niveau 1 (selon le guide de l'IFSTTAR - 2014).

L'ensemble des observations réalisées sur le terrain ont été compilées dans une base de données SIG dédiée au projet et développée dans le cadre de la présente étude. Elles ont par ailleurs été utilisées pour mettre à jour la base nationale des cavités souterraines BDCavité, gérée par le BRGM.

Les visites de ces carrières ont ensuite abouti à la rédaction de 10 comptes rendus détaillés qui viennent compléter ceux réalisés en 2014 (rapport BRGM/RP-64117-FR). Ces comptes rendus permettent d'une part de faire un état des lieux de l'état de stabilité des carrières souterraines diagnostiquées, et d'autre part, en fonction de leur état de stabilité, de proposer des recommandations en matière de sécurisation (sécurisation ou interdiction d'accès, travaux complémentaires, poursuite d'un diagnostic de niveau 2, surveillance etc.).

Outre les étapes de sélection des sites, plusieurs actions ont été réalisées afin d'affiner la stratégie de suivi des cavités en ex-Basse Normandie. En ce qui concerne le levé de la géométrie des cavités, différentes méthodes ont été mises en œuvre : levé « classique » semi-automatisé au laser mètre et à la boussole et mesure innovante au scanner laser 3D portatif « ZEB-REVO ». Il a ainsi été montré leur fiabilité (très peu d'écart entre les deux types de mesures) et leur complémentarité (en fonction de la taille de la cavité : la méthode « classique » demeure néanmoins intéressante sur des cavités de taille inférieure à 1 000 m² et à géométrie peu complexe, ou pour des levés géométriques globaux dans le cadre de diagnostics d'urgence).

Par ailleurs, la cavité de Saint-Langis-les-Mortagne (dont la géométrie a été levée au « ZEB-REVO ») a été retenue pour réaliser des mesures géophysiques de manière à montrer la pertinence des mesures micro-gravimétriques et électriques pour la détermination de l'emprise des cavités lorsque celles-ci ne sont pas accessibles dans le contexte bas-normand (ici cavité peu profonde dans la craie). Les résultats des investigations géophysiques se sont montrés particulièrement concluants dans la mesure où les vides topographiés ont été clairement

identifiés par les mesures électriques et micro-gravimétriques. Ces mesures ont par ailleurs permis de mettre en évidence des anomalies dans le prolongement de galeries inaccessibles (secteurs remblayés ou éboulés, présence de CO₂), ce qui souligne très probablement des extensions.

Ainsi, cette étude, menée sur des carrières souterraines de dimensions et d'état général très variés, a permis d'estimer les techniques les plus appropriées à mettre en œuvre pour l'élaboration de diagnostics de stabilité des cavités et de constituer la chaîne de traitement : identification des cavités, investigations non destructives (géophysique), levé géométrique, diagnostic de stabilité, bancarisation et archivage de l'information. La durée nécessaire pour les visites en souterrain est également mieux connue sachant que ce temps nécessaire reste indicatif puisque fonction du site (conditions d'accès, présence de CO₂). En moyenne et en condition normale, le levé géométrique au « ZEB-REVO » peut être réalisé en 1 jour / ha environ (0,1 ha / jour pour la méthode classique) et le diagnostic en 1 jour / ha (selon l'état de la carrière), auquel il faut rajouter le double de temps en post-traitement (traitement des données géométriques, rédaction d'un compte-rendu détaillé, bancarisation des observations). Une manière de diminuer la durée de post-traitement serait d'utiliser des tablettes durcies et de compléter la base de données à l'avancement sur le terrain.

Concernant la base de données créée dans le cadre de ce projet, elle a pour but de bancariser l'ensemble des données et observations disponibles sur les carrières souterraines (emprise, fracturation, état de stabilité, photographies, etc.). Sa conception doit permettre de l'alimenter régulièrement par de nouvelles données (nouvelles cartographies, nouveaux diagnostics etc.). Toutefois, pour que cette base de données devienne, à terme, un vrai outil de gestion du « risque cavité » à différentes échelles (région, département, communauté de communes, commune), il serait intéressant, d'une part, qu'elles puissent être partagées sur une plateforme commune et, d'autre part, qu'y soit intégré un volet sur le « suivi des cavités », qui permettrait de bénéficier de rappel et de suivre l'évolution de leur vieillissement et/ ou la réalisation des travaux menés sur une carrière à plus ou moins long terme. Ce type de base de données existe pour certains territoires très concernés par le risque cavité (exemple de l'Eurométropole de Strasbourg etc...).

7.2. RESULTATS DES DIAGNOSTICS

En termes de résultats, l'analyse des différentes tables de la base de données permet d'extraire quelques chiffres concernant la quantité de données acquises dans le cadre de ce projet : **10** carrières souterraines diagnostiquées, levé de **9** plans inédits (3 à la boussole et 6 au scanner laser 3D portatif « ZEB-REVO »), **8** ha de vides et plus de **25** kilomètres de contours digitalisés et géoréférencés (dont 2 ha inédits), **633** mesures de hauteurs de vide, évaluation qualitative de l'état de **815** piliers, relevé de **449** fractures, localisation de **245** écailles et décollement de toit, identification de **152** désordres de type chutes de toit ou remontée de fontis, prise de plus de **300** photographies.

7.2.1. Tableau de synthèse

Le tableau ci-dessous permet de faire une synthèse des principales conclusions des comptes rendus présentés en annexe pour les 10 carrières souterraines diagnostiquées lors de la présente étude (2016-2017), ainsi que celles diagnostiquées lors de l'étude précédente (2014).

N° CAV	DPT	COM-COM	NOM CAVITE	ID BASE BRGM ID BASE DREAL	ETAT GENERAL	DESCRIPTION SUCCINCTE / COMMENTAIRE SUR LA STABILITE	PHENOMENE REDOUTE / POTENTIEL	EP. RECOUV.	AGE DEBUT EXPLOIT.	RECONNAISSANCE COMPLEMENTAIRE ET TRAVAUX	SUIVI	DATE DIAG
1	61	Bassin de Mortagne-au-Perche	Bellavilliers « La Carrière »	BNOAW0039359 R25_61037P6	BON	Carrière souterraine de pierre de taille exploitée par chambres et galeries pour l'extraction de la craie de Rouen Accès par cavage (accès libre dans une propriété privée) Un effondrement ancien observé en souterrain et en surface qui ne semble pas compromettre la stabilité de la carrière	Chutes de toit	5,5 m (minimum)	XVIII ^{ème} siècle	RAS	5 ans	2016
2	61	Bassin de Mortagne-au-Perche	Saint-Langis-lès-Mortagne « Ancienne gare »	BNOAW0039357 -	MAUVAIS TRES MAUVAIS	Carrière souterraine de pierre de taille exploitée par chambres et piliers pour l'extraction de la craie de Rouen Accès actuel par puits. Nombreuses chutes de toit et remontées de fontis, certains ayant déjà atteint la surface Faibles épaisseurs de recouvrement. Sous-cave des enjeux (voirie, jardins, habitations). Présence de poches de CO ₂ dans la cavité. Extensions supposées	Effondrement localisé par remontée de fontis Effondrement généralisé par rupture de piliers Chutes de toit	1 – 9 m	XIX ^{ème} (avant 1840)	Poursuite du diagnostic de stabilité de niveau 1 pour la partie « nord » Réalisation d'investigations géotechniques (sondages de reconnaissance de vide) pour confirmer les anomalies décelées par la géophysique – éventuellement fonçage de nouveaux puits d'accès ou d'aéragage Poursuite des investigations géophysiques au droit des extensions supposées (Si des vides sont reconnus) – poursuite des investigations souterraines (topographie et diagnostic de stabilité) des extensions	Annuelle	2016
3	61	Bassin de Mortagne-au-Perche	Mauves-sur-Huisne « RD n°9 »	BNOAA0000765 R25_61255P3	MEDIOCRE MAUVAIS	Carrière souterraine de pierre de taille exploitée par chambres et piliers pour l'extraction de la craie de Rouen Accès par cavage (accès libre dans un talus routier) Etat variable selon les secteurs. Nombreuses chutes de toit et remontées de fontis, certains ayant déjà atteint la surface. Faibles épaisseurs de recouvrement. Sous-cave une voirie communale	Effondrement localisé par remontée de fontis Chutes de toit	2 – 3 m	XIX ^{ème} siècle (avant 1886)	Vérifier si des mouvements de terrain ont déjà été recensés sur la voie communale qui relie la RD9 au lieu-dit « Le Cauchis » + traitement d'une cheminée karstique au droit de cette voirie Réaliser des investigations géophysiques pour vérifier l'existence d'extensions de la carrière sous la route départementale 9 Sécurisation des accès Réaliser des investigations géophysiques dans le « bourg » de Mauves-sur-Huisne	2 ans	2016
4	61	Bassin de Mortagne-au-Perche	Mauves-sur-Huisne « RD n°5 »	BNOAW0039358 R25_61255P16	BON	Carrière souterraine de craie cénomaniennne exploitée par chambres et piliers pour la production de chaux, de marne pour l'amendement ou pour la pierre de taille Accès par cavage. Accès libre en bord de route par bouche de cavage. Carrière en bon état général	Effondrement localisé par débouillage de puits	2 – 3 m	Inconnu	Sécurisation des accès Signaler la présence du puits vertical en surface (risque de débouillage)	5 ans	2016
5	61	Bassin de Mortagne-au-Perche	Loisail « Le Bas Champailaume »	BNOAA0000695 R25_61229P3	BON	Vaste carrière souterraine de pierre de taille exploitée par chambres et piliers pour l'extraction de la craie de Rouen Accès par descendrière en bord de route, sécurisé pour la préservation des chiroptères Etat de stabilité globalement bon mais plusieurs instabilités de types chutes de toit ou remontées de fontis, dont un situé sous la RD n°8. Sous-cave une route départementale	Effondrement localisé par remontée de fontis Chutes de toit	4,5 – 18 m	Début XIX ^{ème}	Vérifier si des mouvements de terrain ont déjà été recensés sur la route départementale n°8. Si aucun phénomène n'est recensé, réaliser des sondages de reconnaissance de vide pour intercepter une probable remontée de fontis	2 à 3 ans	2016
6	14	Orival	Bény-sur-Mer « Le Rocreux »	BNOAA0002218 R25_14062P5	BON	Vaste carrière souterraine de pierre de taille exploitée par chambres et piliers pour l'extraction de la pierre de Creully Accès par cavage, sécurisé pour la préservation des chiroptères Carrière en bon état	Chutes de toit Eboulement et/ou chutes de blocs au niveau des entrées	10 – 30 m	XIX ^{ème} siècle (avant 1885)	RAS	5 ans	2016
7	14	Cœur-de-Nacre	Basly « stand de tir »	BNOAA0004050	NON REALISE	Diagnostic non réalisé faute d'accès (accès privé)	-	-	-	-	-	-
8	14	Cœur-de-Nacre	Basly BNOAA0002117	BNOAA0002117 R25_14044P1	MEDIOCRE	Carrière souterraine de pierre de taille exploitée par chambres et piliers pour l'extraction de la pierre de Creully. Accès par trois cavages en libre accès le long d'un sentier de randonnée. Etat de stabilité médiocre : nombreuses fractures au toit, zones de chutes de toit, état des piliers majoritairement fracturés ou écaillé	Chutes de toit Effondrement généralisé par rupture de piliers Eboulement et/ou chutes de blocs au niveau des entrées	10 – 12 m	Période médiévale ?	Sécurisation des accès	2 ans	2017
9	14	Cœur-de-Nacre	Basly BNOAA0004048	BNOAA0004048 R25_14044P3	MEDIOCRE	Carrière souterraine de pierre de taille exploitée par chambres et piliers pour l'extraction de la pierre de Creully Accès par cavage. Accès libre et visible depuis un sentier de randonnée	Chutes de toit Eboulement et/ou chutes de blocs au niveau des entrées	10 – 15 m	Période médiévale ?	Sécurisation des accès	2 ans	2017

10	14	Cœur-de-Nacre	Basly BNOAA0004049	BNOAA0004049 R25_14044P4	BON	Carrière souterraine de pierre de taille exploitée par chambres et piliers pour l'extraction de la pierre de Creully. Accès par cavage en libre accès le long d'un sentier de randonnée.	Chutes de toit Eboulement et/ou chutes de blocs au niveau des entrées	10 – 12 m	Période médiévale ?	Sécurisation des accès	Tous les 5 ans	2017
11	14	Orival	Bény-sur-Mer BNOAA0002207	BNOAA0002207 R25_14062P4	MEDIOCRE	Carrière souterraine de pierre de taille exploitée par chambres et piliers pour l'extraction de la pierre de Creully Accès par cavage. Accès libre et visible depuis un sentier de randonnée	Chutes de toit Eboulement et/ou chutes de blocs au niveau des entrées	2,5 – 8 m	Inconnu	Sécurisation des accès	2 ans	2017
12	14	Falaise	Aubigny		MEDIOCRE MAUVAIS	Carrière souterraine de pierre de taille exploitée par chambres et piliers tournés (voire hague et bourrage pour certains secteurs) pour l'exploitation de la pierre d'Aubigny Accès par cavage Une zone où les piliers sont en état de post-rupture	Effondrement localisé par remontée de fontis Effondrement généralisé par rupture de piliers Chutes de toit	9 m	XVIII ^{ème} siècle	Levé géométrique Réalisation d'investigations géophysiques pour vérifier l'existence d'extensions de la carrière sous la route départementale et dans le secteur nord		2014
13	14	Caen-la-Mer	Fleury-sur-Orne		BON MAUVAIS	Accès par cavage			Période médiévale	Diagnostic géotechnique complémentaire		2014
14	14	Caen-la-Mer	Hérouville		MAUVAIS		Effondrement localisé par remontée de fontis Débourrage de conduits karstiques	7 m	XV ^{ème} siècle	Levé géométrique Investigations géotechniques complémentaires (sondages) Diagnostic complémentaire	Annuelle	2014
15	14	Caen-la-Mer	Mondeville		MEDIOCRE	Carrière souterraine de pierre de taille exploitée par chambres et piliers tournés pour l'exploitation de la pierre de Creully Accès par cavage chez des particuliers	Chute de 1 ^{er} banc de toit Effondrement généralisé du toit		Période médiévale	Réalisation d'un diagnostic de niveau 3 ou 4	2 ans	2014
16	14	Val Es Dunes	Conteville		MAUVAIS	Accès par cavage, accès actuel par un puits Nombreuses chutes de toit et remontées de fontis, certains ayant déjà atteint la surface	Chutes de blocs Affaissement Effondrement généralisé		Période médiévale	Levé géométrique Confortement de la cavité au niveau de la chaussée Eventuellement mise en place d'investigations géophysiques pour mettre en évidence d'éventuelles continuités		2014

7.2.2. Analyse par communautés de communes

Communauté de communes du Bassin de Mortagne-au-Perche (61)

5 carrières souterraines de pierres de taille ont fait l'objet d'un diagnostic de stabilité dans la partie sud de la communauté de communes du Bassin de Mortagne-au-Perche. Toutes sont creusées dans les craies cénomaniennes.

L'état général de ces carrières souterraines varie de bon (Bellavilliers, Loisail) à mauvais (Mauves-sur-Huisne), voire très mauvais pour la carrière souterraine de Saint-Langis-lès-Mortagne, ce qui reflète une forte variabilité de l'état général des carrières creusées dans les craies du secteur de Mortagne-au-Perche. Notons également que la carrière de Courgeon, diagnostiquée en 2015 par le CEREMA et située à quelques kilomètres au sud de Mortagne-au-Perche, présente également pour certains secteurs un état de stabilité très mauvais.

Il ressort de cette analyse que, d'une part, l'état général des carrières de pierres de taille creusées dans les craies du Bassin de Mortagne-au-Perche varie de bon à très mauvais, ce qui rend impossible une généralisation de l'état des carrières souterraines à l'échelle de la communauté de communes et que, d'autre part, la moitié des carrières actuellement diagnostiquées sur la communauté de communes présente un état général mauvais à très mauvais, avec des faibles épaisseurs de recouvrement (souvent inférieures à 3 m), de nombreuses instabilités ponctuelles (chutes de toit et remontées de fontis), et situées à proximité d'enjeux (voiries, maisons d'habitation). Ces observations doivent nous alerter sur les risques potentiels encourus. En effet, les archives mentionnent d'autres carrières de ce type, actuellement inaccessibles, mais qu'il conviendrait d'étudier, comme par exemple sous le bourg de Mauves-sur-Huisne.

Deux méthodes géophysiques (microgravimétrie et électrique) ont été appliquées sur le site de la carrière de Saint-Langis-lès-Mortagne pour évaluer leur intérêt pour la recherche indirecte de vides souterrains. Les résultats de ces campagnes se sont montrés particulièrement concluants puisque les vides souterrains topographiés ont été identifiés en anomalies négatives sur la carte gravimétrique et en anomalies résistives sur les profils électriques, ce qui démontre la pertinence de ces méthodes pour la recherche de vides anthropiques dans le contexte géologique du Bassin de Mortagne-au-Perche. On notera que des anomalies ne correspondant pas à des vides connus ont été identifiées à proximité d'enjeux. Il conviendra donc d'identifier l'origine de ces anomalies, et le cas échéant, de définir l'état de stabilité des vides.

Au regard de ces résultats, la poursuite des investigations sur la communauté de communes de Mortagne-au-Perche s'avère prioritaire pour continuer à retrouver les carrières souterraines abandonnées afin d'évaluer leur vieillissement. L'utilisation des méthodes géophysiques pourrait s'avérer particulièrement intéressante pour localiser des carrières souterraines actuellement inaccessibles.

Communautés de communes d'Orival et Cœur-de-Nacre (14)

5 carrières souterraines de pierres de taille ont fait l'objet d'un diagnostic de stabilité sur les communautés de communes d'Orival et Cœur-de-Nacre. Toutes sont creusées dans les calcaires bathoniens (Calcaires de Creully).

Malgré l'âge de ces carrières (probablement médiéval), elles présentent un état de dégradation moins avancé (état général jugé bon à médiocre) et ainsi *a priori* un vieillissement plus lent que

celles creusées dans les craies cénomaniennes. Ceci est vraisemblablement à mettre en relation avec la plus grande compétence du bathonien par rapport à la craie cénomanienne.

En outre, les épaisseurs de recouvrement sont généralement plus importantes (supérieures à 10 m dans la plupart des cas visités), et les phénomènes de remontée de fontis sont plus rares que dans les craies cénomaniennes. A noter que les carrières souterraines de ce secteur semblent à la fois en meilleur état et à la fois moins dégradées que les carrières de l'agglomération de Caen la mer (*Plat et al.*, 2014).

7.2.3. Conclusion sur le vieillissement et zones à investiguer

L'état général de ces carrières varie de bon à très mauvais, avec une plus grande diversité pour les carrières creusées dans la craie (bon à très mauvais) que pour celles creusées dans les calcaires (bon à médiocre). L'analyse des résultats indique également que les carrières creusées dans la craie présentent un état général plus mauvais, avec des épaisseurs de recouvrement souvent plus faibles que les carrières creusées dans les calcaires bathoniens. En termes de géométrie, les carrières souterraines creusées dans les calcaires bathoniens sont plus vastes que celles creusées dans la craie.

Au regard de ces résultats, il apparaît que les carrières souterraines creusées dans la craie au niveau de la communauté de Commune de Mortagne-au-Perche présentent un état de vieillissement plus avancé que les carrières souterraines creusées dans les calcaires bathoniens au niveau des communautés de communes d'Orival et Cœur-de-Nacre. Etant donné leur âge plus récent, le vieillissement y semble donc plus rapide. Pour la suite des investigations, il conviendra donc de s'orienter prioritairement vers les carrières situées en contexte crayeux (Bassin de Mortagne-au-Perche, Pays d'Auge notamment). A noter que pour mémoire, la communauté de communes de Falaise semble également concernée par un certain nombre de cavités présentant un mauvais état général dans des zones qui peuvent être urbanisées (Aubigny, Saint Pierre Canivet...).

Enfin, tous les indices de cavités bancarisés dans les bases de données et retenus lors des étapes de sélection n'ont pas fait l'objet d'une vérification sur le terrain. De même, toutes les carrières souterraines accessibles n'ont pas fait l'objet d'un diagnostic de stabilité : ainsi 36 des 46 cavités accessibles n'ont pas pu être visitées (dont a minima deux dans la communauté de Mortagne-au-Perche). Dans ce cadre, nous recommandons de poursuivre ce type d'étude pour continuer à acquérir des données sur les carrières souterraines abandonnées de l'ex-Basse-Normandie, nécessaire pour la gestion du risque « cavité ».

8. Bibliographie

DEBEGLIA N., LEBERT F. (2003) Détection des cavités par géophysique. Bilan des expériences 1990-2002. BRGM/RP-52898-FR, 165 p., 50 ill. 2 ann.

DEROUIN.J.P., BEAUCE.A. (1997) Méthodologie de détection des cavités souterraines en Haute-Normandie par méthodes géophysiques. BRGM/R39567, 47p.

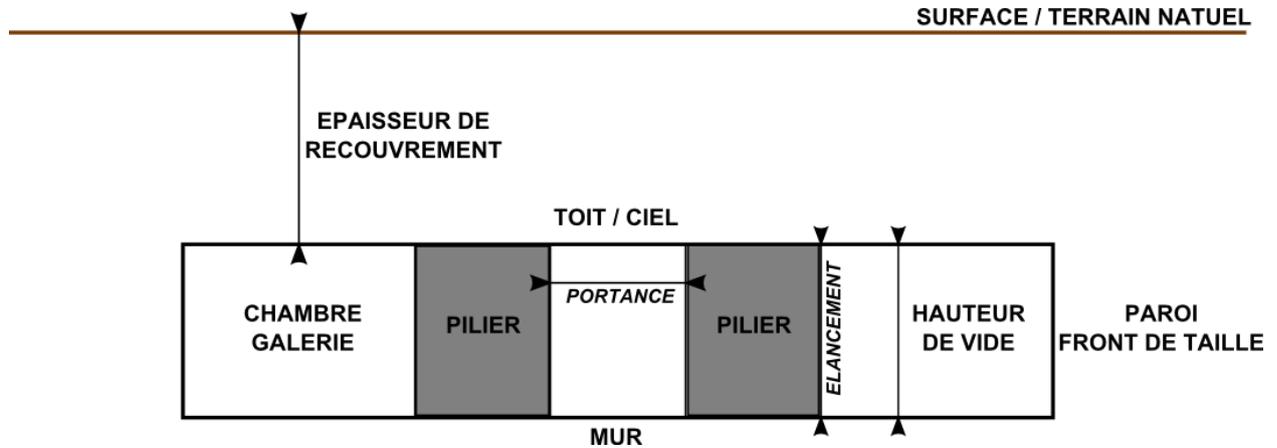
GREGOIRE.S., CHEVREL.S., THAUVIN.M (2009) – Inventaire et logigramme des méthodes de recherches des anciens orifices débouchant au jour. Rapport final. Rapport BRGM/RP-57438-FR. 161 p.

LCPC (2004) – Détection de cavités souterraines par méthodes géophysiques. Guide technique. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

PLAT E., avec la collaboration de COUEFFE R., MATHON C., PICOT J. (2014) – Evaluation des risques liés au vieillissement des carrières souterraines de Basse-Normandie. Année 2014. Rapport BRGM/RP-64117-FR, 198 p., 23 ill., 5 ann.
IFSTTAR (2014) – Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées. Guide méthodologique.

Annexe 1
-
**Nomenclature spécifique liée aux carrières
souterraines**

Les différents comptes rendus de visites reprennent la nomenclature spécifique aux carrières souterraines, dont les principaux termes sont illustrés sur la figure ci-dessous.

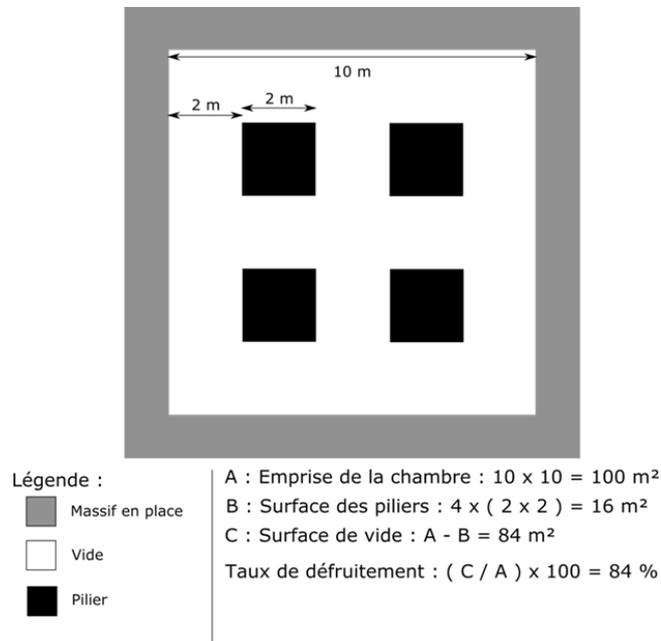


Nomenclature spécifique aux cavités souterraines

En outre, les levés géométriques réalisés dans le cadre de cette étude ont permis d'acquérir des connaissances sur le taux de défrètement des carrières. Ce taux de défrètement correspond à la surface des vides (surface exploitée par les carriers) par rapport à la surface totale de l'exploitation (vides et piliers compris), ce qui se traduit par la formule suivante :

$$[\text{superficie des vides} / \text{superficie totale (vides + piliers)}] \times 100$$

Plus une carrière a été exploitée, plus le taux de défrètement sera élevé.



Représentation schématique du taux de défrètement

Annexe 2

-

Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Bellavilliers (61) (hors-texte)

Annexe 3

-

Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Saint-Langis-lès-Mortagne (61) (hors-texte)

Annexe 4

-

Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Mauves-sur-Huisne RD9 (61) (hors texte)

Annexe 5

-

Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Mauves-sur-Huisne RD5 (61) (hors texte)

Annexe 6

-

Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Loisail (61) (hors texte)

Annexe 7

-

Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Bénvy-sur-Mer BNOAA0002218 (14) (hors-texte)

Annexe 8

-

Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Basly BNOAA0002117 (14) (hors-texte)

Annexe 9

-

Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Basly BNOAA0004048 (14) (hors-texte)

Annexe 10

-

Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Basly BNOAA0004049 (14) (hors-texte)

Annexe 11

-

Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Bénvy-sur-Mer BNOAA0002207 (14) (hors-texte)



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Normandie

14 route d'Houpeville
Parc de la Vatine

76130 – Mont-Saint-Aignan – France

Tél. : 02 35 60 12 00