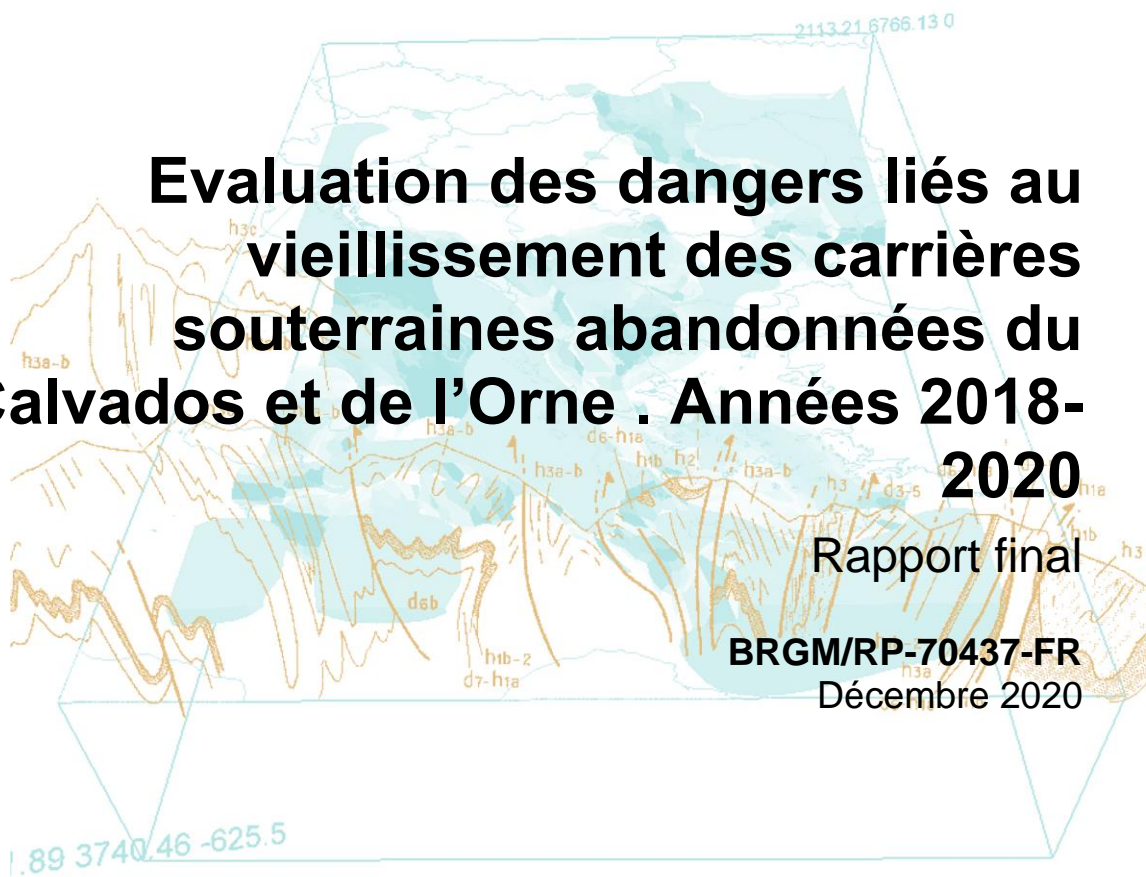


Document public



Evaluation des dangers liés au vieillissement des carrières souterraines abandonnées du Calvados et de l'Orne . Années 2018-2020

Rapport final

BRGM/RP-70437-FR
Décembre 2020


Evaluation des dangers liés au vieillissement des carrières souterraines abandonnées du Calvados et de l'Orne. Années 2018-2020

Rapport final

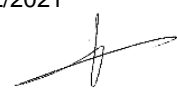
BRGM/RP-70437-FR
Décembre 2020

B. Meire, D. Ribes
Avec la collaboration de
K. Batut, S. Yart, F. Masson, M. Poncelet, V. Hugot

Vérificateur :

Nom : G. Noury
Fonction : Ingénieur géotechnicien
Date : 02/02/2021
Signature : 

Approbateur :

Nom : D. Pennequin
Fonction : Directeur régional de Normandie
Date : 26/02/2021
Signature : 

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr

Mots-clés : carrière souterraine, diagnostic de stabilité, base de données, topographies souterraines, plan de détail, Beaufour-Druval, Bonnebosq, Courgeon, Cour-Maugis-sur-Huisne, Rémalard-en-Perche, Coulonges-sur-Sarthe, Calvados, Orne, Normandie

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

Meire B., Ribes D. (2020) – Evaluation des dangers liés au vieillissement des carrières souterraines abandonnées du Calvados et de l'Orne – Années 2018-2020. Rapport final. BRGM/RP-70437-FR, 83 p., 32 ill., 2 tabl., 11 ann., 1 Clé Usb.

Synthèse

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, granulats, calcaires pour l'amendement ou la chaux 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 ont entraîné des désordres au sein ou à proximité de zones urbanisées (Saint-Pierre-Canivet dans le Calvados, Courgeon dans l'Orne). En 2013, des effondrements se sont également déclarés dans la ville de Caen. Plus récemment, des effondrements spectaculaires se sont produits dans le pays d'Auge (Formentin en 2016, Bonnebosq en 2018), entraînant pour l'un d'entre eux l'expropriation d'une maison d'habitation.

Ces désordres sont tous liés à la ruine de carrières souterraines anthropiques, aujourd'hui abandonnées. Il est donc apparu nécessaire de lancer un programme de repérages en surface et de diagnostics en souterrain pour évaluer leur état de stabilité. L'intérêt de ce programme est triple : cela permet (1) d'améliorer nos connaissances sur la répartition et les typologies des cavités bas-normandes, (2) de porter à connaissance l'existence et les risques liés au vieillissement de ces carrières souterraines à partir notamment d'investigations en souterrain, et (3) de préconiser d'éventuels travaux de mise en sécurité, de surveillance et de prévention.

Dans le cadre de ses missions d'appuis aux politiques publiques, 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 les départements de l'Orne et du Calvados, sur la base de diagnostics de stabilité de niveau 1 (selon le guide de l'IFSTTAR, 2014).

- Une première étude (tranche 1 - année 2014) a permis de diagnostiquer une quinzaine de carrières souterraines, creusées dans les calcaires bathoniens des environs de Caen. Les comptes rendus des visites ont fait l'objet du rapport référencé BRGM/RP-61117-FR ;
- Une seconde étude (tranche 2 - années 2016-2017) a permis de poursuivre le travail initié en 2014 en menant des investigations dans d'autres secteurs géographiques, comme le Perche, le pays d'Auge ou le nord de la plaine de Caen. Ce travail, mené à l'échelle de la communauté de communes pour répondre aux demandes liées à la réforme territoriale de 2016, a permis d'améliorer les connaissances sur les carrières souterraines abandonnées dans les terrains sédimentaires du Calvados et de l'Orne (Bathonien et Cénomaniens) en réalisant notamment des recherches bibliographiques et des investigations en surface, ainsi que 10 diagnostics de carrières souterraines abandonnées (niveau 1 selon le guide de l'IFSTTAR). Cette seconde étude a fait l'objet d'un rapport référencé BRGM/RP-66828-FR.

Les investigations réalisées en 2016-2017 ont mis en évidence l'état de stabilité dégradé de plusieurs carrières, notamment celles creusées dans les craies cénomaniennes. Ces résultats ont donc montré la nécessité de continuer les efforts menés depuis plus de 5 ans pour améliorer les connaissances sur ces vieilles carrières souterraines, notamment via la poursuite des investigations de terrain et des diagnostics de stabilité de niveau 1. C'est dans ce cadre qu'a été proposé la poursuite des investigations, objet du présent rapport. Les objectifs de cette troisième tranche sont les suivants :

- Poursuivre les investigations de surface pour repérer les entrées des carrières souterraines de pierre de taille sur les communautés de communes les plus concernées par la problématique de cavité et non traitées au cours de la tranche 2 (secteur nord du Bassin de Mortagne-au-Perche, Perche Rémalardais et Haut-Perche dans l'Orne, communauté de communes de Cambremer dans le Calvados) ;
- Réaliser les plans de détail et les diagnostics de stabilité de niveau 1 des carrières souterraines dont les entrées auront été identifiées sur le terrain ;
- Poursuivre l'alimentation de la base de données dédiée aux diagnostics ;
- Faire état des observations réalisées et formuler les recommandations nécessaires en matière de sécurisation et des enjeux qui les surplombent.

Les investigations de surface menées sur 317 indices de carrières ont permis de retrouver 17 cavités accessibles, dont 12 ont fait l'objet de levés géométriques au scanner laser 3D, dont 8 sont inédits (premiers plans réalisés). Parmi ces 12 carrières, 10 ont fait l'objet d'un diagnostic de niveau 1. Le choix des sites ayant été réalisé en concertation avec les services de l'Etat sur la base d'un croisement entre la nature des enjeux potentiellement sous-cavés et l'évaluation préliminaire de leur état de stabilité.

Les visites de ces carrières ont ensuite abouti à la rédaction de 10 comptes rendus détaillés qui viennent compléter ceux réalisés en 2014 et en 2016-2017 (rapports BRGM/RP-64117-FR et RP-66828-FR). Ces comptes rendus permettent d'une part de faire un état des lieux de la stabilité des carrières souterraines diagnostiquées, et d'autre part, en fonction de leur état géotechnique, de proposer des recommandations en matière de sécurisation. L'ensemble des observations réalisées sur le terrain ont été compilées dans la base de données SIG créée au cours de la tranche 2. Elles ont par ailleurs été utilisées pour mettre à jour la base de données nationale des cavités souterraines BD Cavité, gérée par le BRGM.

Au total, les travaux réalisés dans le cadre de cette étude ont permis de cartographier plus de **5,5** ha de vides, dont plus de **3** ha inédits, et d'identifier plus de 1500 désordres, instabilités ou fractures, tous caractérisés (typologie, ouverture etc.), décrits, précisément positionnés sur les plans des cavités et dûment photographiés (numérotation, localisation et orientation de la photographie). Ce travail a également été réalisé sur l'ensemble des piliers, qui ont tous été décrits et photographiés (plus de 1200 piliers étudiés). Au total, ce sont près de 3000 observations qui ont été bancarisées dans la base de données SIG dédiée au projet.

L'état général des carrières varie donc de bon à mauvais, avec des cavités généralement en plus mauvais état et moins profondes dans les craies du Perche que dans celles du pays d'Auge. Toutefois, toutes les cavités diagnostiquées dans le cadre de cette étude sont situées dans des zones rurales où les enjeux en surface restent pour la plupart relativement limités.

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| 1. Contexte et objectifs de l'étude..... | 9 |
| 1.1. CADRE DE L'ETUDE ET RAPPEL DES RESULTATS PRECEDENTS | 9 |
| 1.2. OBJECTIFS DE L'ETUDE..... | 10 |
| 2. Contexte général | 13 |
| 2.1. CADRE GEOLOGIQUE GENERAL | 13 |
| 2.2. CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE..... | 13 |
| 2.3. LES CARRIERES SOUTERRAINES DU CALVADOS ET DE L'ORNE | 15 |
| 2.3.1. Les principales formations géologiques exploitées..... | 15 |
| 2.3.2. Les méthodes d'exploitation, les types d'accès, les configurations géométriques et la réutilisation des carrières souterraines | 16 |
| 2.3.3. Les risques liés aux cavités souterraines | 18 |
| 3. Investigations de surface et sélection des cavités à diagnostiquer | 23 |
| 3.1. INVESTIGATIONS DE SURFACE – RECHERCHE DES CARRIERES SOUTERRAINES ABANDONNEES | 23 |
| 3.1.1. Hiérarchisation des communautés de communes à investiguer | 23 |
| 3.1.2. Investigations de surface et enquêtes de voisinage | 25 |
| 3.1.3. Bilan des investigations de surface | 27 |
| 3.2. CHOIX DES CARRIERES SOUTERRAINES A DIAGNOSTIQUER..... | 28 |
| 4. Inspection et diagnostic de stabilité des carrières souterraines | 31 |
| 4.1. METHODOLOGIE : NIVEAU DE DIAGNOSTIC ET DONNEES UTILISEES..... | 31 |
| 4.1.1. Niveau de diagnostic..... | 31 |
| 4.1.2. Données utilisées – analyse des informations existantes..... | 32 |
| 4.2. LEVES GEOMETRIQUES ET CARTOGRAPHIE DES CAVITES | 34 |
| 4.3. OBSERVATIONS EN SOUTERRAIN – RELEVES DES DESORDRES..... | 36 |
| 4.3.1. Instabilité des piliers et des parements | 36 |
| 4.3.2. Instabilités de la voûte | 38 |
| 4.3.3. Diaclases et conduits karstiques | 39 |
| 4.3.4. Instabilités ponctuelles : écaillages et blocs instables | 42 |
| 4.3.5. Informations géométriques : limites d'exploitation et zones inaccessibles..... | 42 |
| 4.3.6. Observations diverses | 43 |
| 4.4. EVALUATION QUALITATIVE DE L'ETAT GENERAL DES CARRIERES SOUTERRAINES..... | 43 |

| | |
|--|-----------|
| 5. Formalisation des observations - Base de données SIG | 45 |
| 5.1.1.Comptes rendus détaillés | 45 |
| 5.1.2.Base de données SIG et mise en forme cartographique..... | 45 |
| 5.1.3.Bilan chiffré | 47 |
| 6. Conclusions et perspectives..... | 51 |
| 6.1.1.Principaux résultats | 52 |
| 6.1.2.Analyse par secteur géographique | 52 |
| 6.1.3.Perspectives et recommandations..... | 53 |
| 6.1.4.Tableau de synthèse | 54 |
| 7. Bibliographie..... | 59 |

Liste des illustrations

| | |
|--|----|
| Illustration 1 : Carte géologique de l'ex-Basse-Normandie (BRGM)..... | 13 |
| 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) | 14 |
| Illustration 3 : Exploitation des terrains sédimentaires du Bassin parisien en Normandie (Evrard, 1987) . | 15 |
| Illustration 4 : Répartition des calcaires du Bathonien (Jurassique moyen – en bleu clair) et du Cénomani (Crétacé supérieur – en vert) sur le territoire de l'ex-Basse-Normandie (d'après les cartes géologiques harmonisées – BRGM) | 16 |
| Illustration 5 : Schéma des différents types d'accès aux carrières souterraines (IFSTTAR, 2014) | 17 |
| Illustration 6 : Synthèse des données géométriques sur les 23 carrières souterraines étudiées au cours des tranches 2 et 3 du projet (6 carrières dans les calcaires, et 17 carrières dans les craies) | 18 |
| Illustration 7 : Schéma de principe d'un effondrement localisé (ou fontis) (IFSTTAR, 2014) | 19 |
| Illustration 8 : Schéma de principe d'un effondrement généralisé (IFSTTAR, 2014)..... | 19 |
| Illustration 9 : Schéma de principe de l'affaissement (IFSTTAR, 2014) | 20 |
| Illustration 10 : Exemples d'effondrements survenus dans le Pays d'Auge suite à la ruine de carrières souterraines anthropiques (à gauche, Bonnebosq (2018) et à droite, Formentin (2016))..... | 20 |
| Illustration 11 : Large cuvette d'affaissement associée à la présence d'une carrière souterraine, actuellement inaccessible (commune de Cour-Maugis-sur-Huisne)..... | 20 |
| Illustration 12 : Exemple d'écailles et de blocs instables (flèches rouges) au niveau de l'entrée de la carrière de Beaufour-Druval (14). Certains étant déjà tombés (cercle rouge) | 21 |
| Illustration 13 : Etape de présélection des indices potentiellement intéressants pour l'étude (carrières souterraines probables) à partir de la base de données de la DREAL | 23 |
| Illustration 14 : Répartition des indices potentiellement associés à des carrières souterraines par communauté de communes de l'Orne et du Calvados | 24 |
| Illustration 15 : Situation des communautés de communes investiguées au cours des tranches 2 et 3 | 25 |
| Illustration 16 : Méthode utilisée pour les recherches en surface | 26 |
| Illustration 17 : Exemple de traitement des indices pré-sélectionnés suite aux repérages en surface (ici pour la communauté de communes du Perche Rémalardais (Orne))..... | 27 |
| Illustration 18 : Définition des niveaux de diagnostics (IFSTTAR, 2014) | 31 |
| Illustration 19 : Eléments à prendre en compte pour les différents niveaux de diagnostics (IFSTTAR, 2014) | 32 |
| Illustration 20 : Exemple du cadastre de 1812 de la commune de Bonnebosq (14) qui mentionne la présence de la « Carrière Lépinay », actuellement située au lieu-dit « le Fief Dame Alix ». La carrière située au nord, au lieu dit « Carrière Pouchain », n'a pas fait l'objet de visites..... | 34 |
| Illustration 21 : Exemple de l'intérêt des levés 3D dans des zones à enjeux : comparaison des nuages de points fond/jour au droit d'une route pour quantifier les épaisseurs de recouvrement (ici, exemple de la carrière « nord » de Pontillon – Rémalard en Perche (61)) | 35 |
| Illustration 22 : Exemple de résultats des cartographies 3D (à gauche, carrière du Clos-Saint-Marc à Cour-Maugis-sur-Huisne et à droite, carrière des Petites-Hayes à Coulonges-sur-Sarthe)..... | 36 |
| Illustration 23 : Illustration des 4 classes de stabilité des piliers | 37 |
| Illustration 24 : Stade d'évolution des instabilités de la voûte | 38 |
| Illustration 25 : Exemple d'instabilité « évoluée » dans la carrière des Petites Hayes (Coulounges-sur-Sarthe – Orne)..... | 39 |

| | |
|---|----|
| Illustration 26 : Exemple d'un conduit karstique vertical en cours de débouillage dans la carrière des Curiers à Courgeon (Orne)..... | 40 |
| Illustration 27 : Situation des carrières souterraines dans le « bassin tectonique de Rémalard », encadré par les failles de Bellême, de l'Eure, du fossé de Longny et de La Loupe (hors carte). Les failles en tirets sont des structures supposées et/ou masquées. Les failles en trait plein à barboles sont les structures avérées (barboles du côté abaissé) | 41 |
| Illustration 28 : Exemple d'une limite supposée (ici dans la carrière Pontillon à Rémalard-en-Perche), qui correspond à une zone remblayée inaccessible. L'état des galeries et leur extension au-delà de cette limite ne sont pas connus..... | 42 |
| Illustration 29 : Illustration de la base de données dédiée aux diagnostics réalisée sur le logiciel de SIG ARCGIS® | 46 |
| Illustration 30 : Exemple d'un plan de relevé des désordres. Ici, pour la carrière souterraine de Boissy-Maugis « Maisonnelle » | 47 |
| Illustration 31 : Légende des plans de relevés des désordres | 47 |
| Illustration 32 : Tableau récapitulatif des principales informations géométriques pour les 10 carrières souterraines diagnostiquées (les trois carrières de Pontillon étant considérées comme une seule vaste cavité) | 49 |
| Tableau 1 : Bilan des investigations de surface (*dans le Calvados, beaucoup d'indices n'ont pas été sélectionnés ou n'ont pas été visités car associés à des indices de marnières en plateau) | 28 |
| Tableau 2 : Evaluation qualitative de l'état général des carrières souterraines d'après les observations effectuées en souterrain (état de la voûte, des piliers etc.) et de l'impression générale de stabilité ressentie par les intervenants au cours des visites..... | 43 |

Liste des annexes

| | |
|---|----|
| Annexe 1 - Nomenclature spécifique liée aux carrières souterraines | 61 |
| Annexe 2 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Coulonges-sur-Sarthe (n°12) (hors-texte)..... | 65 |
| Annexe 3 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Boissy-Maugis « Maisonnelle » (n°13) (hors-texte) | 67 |
| Annexe 4 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Bellou-sur-Huisne « la Carrière » (n°14) (hors-texte)..... | 69 |
| Annexe 5 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité des carrières souterraines de Rémalard « Pontillon » (n°15a, 15b et 15c) (hors-texte)..... | 71 |
| Annexe 6 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Beaufour-Druval « cimetière mérovingien » (n°16) (hors-texte) | 73 |
| Annexe 7 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Beaufour-Druval « la Butte n°1 » (n°17) (hors-texte)..... | 75 |
| Annexe 8 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Courgeon « Curiers » (n°18) (hors-texte)..... | 77 |
| Annexe 9 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Bonnebosq « le Fief Dame Alix » (hors-texte) | 79 |
| Annexe 10 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Sablons-sur-Huisne « Condeau » (n°20) (hors-texte)..... | 81 |
| Annexe 11 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Boissy-Maugis « Clos-Saint-Marc » (n°21) (hors-texte)..... | 83 |

1. Contexte et objectifs de l'étude

1.1. CADRE DE L'ETUDE ET RAPPEL DES RESULTATS PRECEDENTS

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, granulats, calcaires pour l'amendement ou la chaux 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.

L'abandon de ces ouvrages souterrains peut entraîner leur dégradation irrémédiable ce qui peut avoir pour conséquence, à terme, de provoquer des mouvements de terrain en surface (affaissements, effondrements). Ces phénomènes sont courants en Normandie sédimentaire, et surviennent parfois à proximité d'enjeux. Au cours de l'année 2011, plusieurs effondrements ont entraîné des désordres au sein ou à proximité de zones urbanisées (Saint-Pierre-Canivet dans le Calvados, Courgeon dans l'Orne). En 2013, des effondrements se sont également déclarés dans la ville de Caen. Plus récemment, des effondrements spectaculaires se sont produits dans le pays d'Auge (Formentin en 2016, Bonnebosq en 2018), entraînant pour l'un d'entre eux l'expropriation d'une maison d'habitation.

Ces désordres sont tous liés à la ruine de carrières souterraines anthropiques, aujourd'hui abandonnées. Il est donc apparu nécessaire de lancer un programme de repérages en surface et de diagnostics en souterrain pour évaluer leur état de stabilité. L'intérêt de ce programme est triple : cela permet (1) d'améliorer nos connaissances sur la répartition et les typologies des cavités bas-normandes, (2) de porter à connaissance l'existence et les risques liés au vieillissement de ces carrières souterraines à partir notamment d'investigations en souterrain, et (3) de préconiser d'éventuels travaux de mise en sécurité, de surveillance et de prévention.

Dans le cadre de ses missions d'appuis aux politiques publiques, 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 les départements de l'Orne et du Calvados, sur la base de diagnostics de stabilité de niveau 1 (selon le guide de l'IFSTTAR, 2014).

Une première étude (tranche 1 - année 2014) a permis de diagnostiquer une quinzaine de carrières souterraines, creusées dans les calcaires bathoniens des environs de Caen. Les comptes rendus des visites ont fait l'objet du rapport référencé BRGM/RP-61117-FR.

Une seconde étude (tranche 2 - années 2016-2017), a permis de poursuivre le travail initié en 2014 en menant des investigations dans d'autres secteurs géographiques, comme le Perche, le pays d'Auge ou le nord de la plaine de Caen. Ce travail, mené à l'échelle de la communauté de communes pour répondre aux demandes liées à la réforme territoriale de 2016, a permis d'améliorer les connaissances sur les carrières souterraines abandonnées dans les terrains sédimentaires du Calvados et de l'Orne (Bathonien et Cénomaniens) en réalisant notamment :

- Des recherches bibliographiques et des investigations de terrain (visuelles en surface). Celles-ci ont notamment permis de repérer les entrées de carrières souterraines accessibles et de hiérarchiser les communautés de communes les plus concernées par la problématique des cavités souterraines (de type carrière de pierre de taille – hors marnières) ;

- Des visites sur le terrain (visuelles en souterrain) pour réaliser des diagnostics de niveau 1 selon le guide de l'IFSTTAR, pour 10 carrières souterraines de pierres de taille creusées dans les craies du Perche ornais ou les calcaires de la plaine de Caen ;
- De créer une base de données cartographique SIG dédiée aux diagnostics de stabilité, avec pour objectif de synthétiser l'ensemble des observations dans une base unique ;
- D'appliquer deux méthodes géophysiques pour la détection indirecte de vides souterrains anthropiques (microgravimétrie et électrique) ;
- Tester différentes méthodes de topographie souterraine.

Cette seconde étude a fait l'objet d'un rapport référencé BRGM/RP-66828-FR.

1.2. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Les investigations réalisées en 2016-2017 ont mis en évidence l'état de stabilité dégradé de plusieurs carrières, notamment celles creusées dans les craies cénomaniennes. Ces résultats ont donc montré la nécessité de continuer les efforts menés depuis plus de 5 ans pour améliorer les connaissances sur ces vieilles carrières souterraines de pierre de taille, notamment via la poursuite des investigations de terrain et des diagnostics de stabilité de niveau 1. C'est dans ce cadre qu'a été proposée la poursuite des investigations, objet du présent rapport. Les objectifs de cette troisième tranche sont les suivants :

- Poursuivre les investigations de surface pour repérer les entrées des carrières souterraines de pierre de taille sur les communautés de communes les plus concernées par la problématique de cavité et non traitées au cours de la tranche 2 (secteur nord du Bassin de Mortagne-au-Perche, Perche Rémalardais et Haut-Perche dans l'Orne, communauté de communes de Cambremer dans le Calvados) ;
- Réaliser les plans de détail et les diagnostics de stabilité de niveau 1 des carrières souterraines dont les entrées auront été identifiées sur le terrain ;
- Poursuivre l'alimentation de la base de données dédiée aux diagnostics ;
- Faire état des observations réalisées et formuler les recommandations nécessaires en matière de sécurisation et des enjeux qui les surplombent.

La méthodologie générale mise en œuvre pour cette troisième tranche est la même que celle précédemment utilisée en 2016-2017, à savoir :

- 1^{ère} étape : investigations de surface et recherches bibliographiques pour retrouver les carrières souterraines de pierres de taille accessibles (cf. chapitre 3) ;
- 2^{ème} étape : réalisation des diagnostics de stabilité de niveau 1 des cavités identifiées (selon le guide de l'IFSTTAR) (cf. chapitre 4) ;
- 3^{ème} étape : alimenter la base de données dédiée au projet, synthétiser et diffuser les résultats sous la forme de compte-rendu (cf. chapitre 5).

Ce projet vise donc à étudier l'état de stabilité des carrières souterraines de pierre de taille, librement accessibles. Les carrières souterraines de type « marnières », les ouvrages civils et militaires, et les cavités naturelles n'ont pas été étudiées.

2. Contexte général

2.1. CADRE GEOLOGIQUE GENERAL

Le territoire de l'ex-Basse-Normandie présente une diversité géologique remarquable, puisqu'il est situé à cheval sur deux grands ensembles géologiques : le Massif Armoricain, à l'ouest, caractérisé par des roches « anciennes » plutoniques, métamorphiques ou sédimentaires d'âge protérozoïque ou paléozoïque, et à l'est par la bordure occidentale du Bassin Parisien, caractérisé par des roches sédimentaires mésozoïques et cénozoïques (Illustration 1).

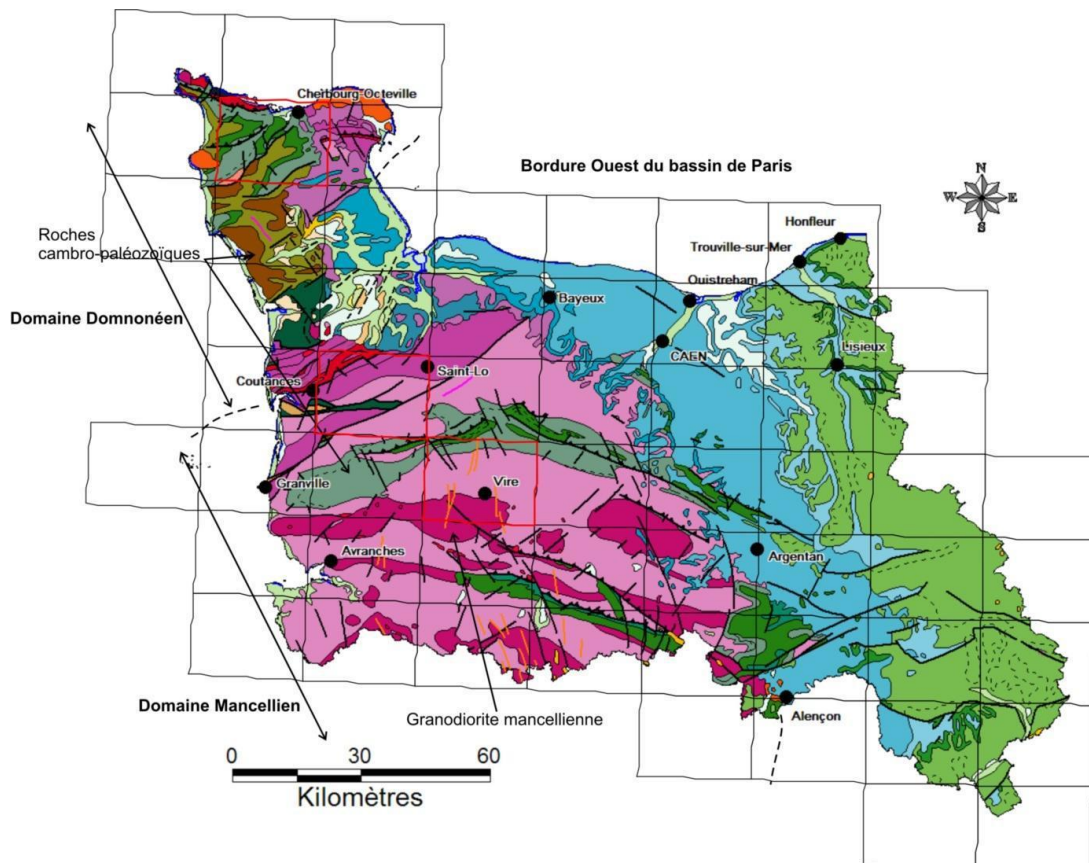


Illustration 1 : Carte géologique de l'ex-Basse-Normandie (BRGM)

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, de minerai pour les forges, ou encore de marne pour l'amendement des terres agricoles ou la chaux.

2.2. CONTEXTE 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 (Illustration 2) :

- 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 Ornaïs, 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.

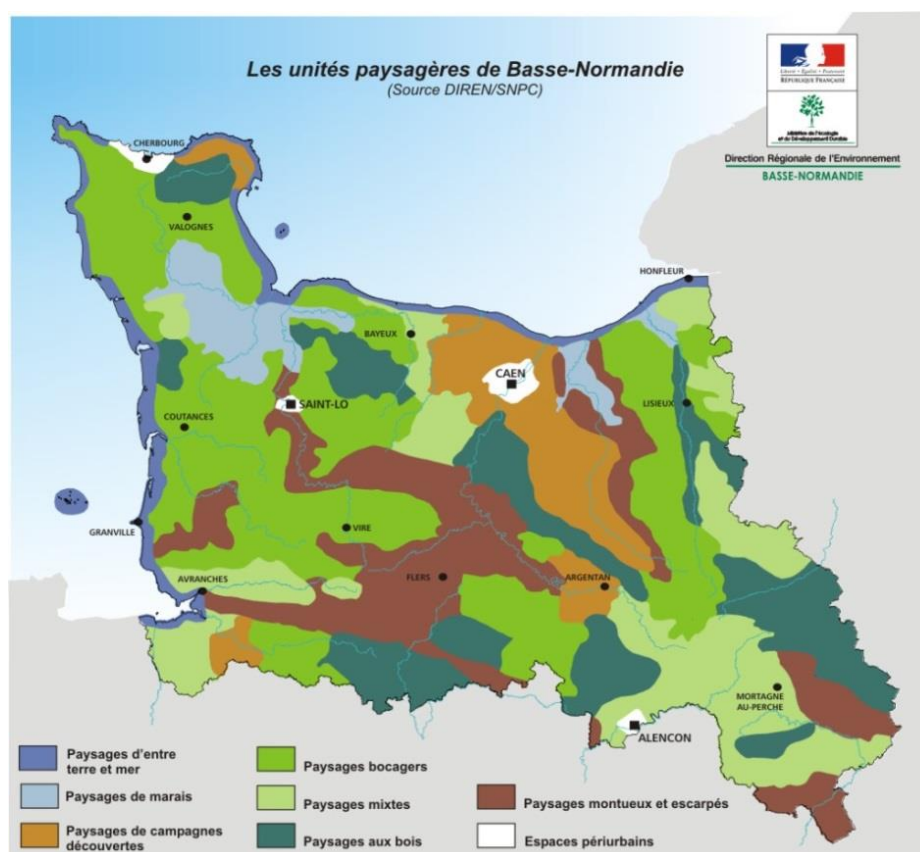


Illustration 2 : Les paysages de l'ex Basse-Normandie, intimement liés à la nature géologique du substratum (source : <http://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr>)

2.3. LES CARRIERES SOUTERRAINES DU CALVADOS ET DE L'ORNE

2.3.1. Les principales formations géologiques exploitées

Les départements du Calvados et de l'Orne présentent donc un contexte géologique varié, où l'on rencontre des roches de natures très différentes (grès, schistes, granites, calcaires, sables, craies, etc.). Cette diversité a favorisé la mise en place d'une riche activité extractive (minerai de fer dans le Pays de l'Aigle ou le Bocage Normand, pierres de tailles dans la Plaine de Caen, marnières dans le Pays d'Auge etc.). Dans les terrains sédimentaires, situés dans la moitié orientale des deux départements, le contexte morphologique et l'accessibilité à la ressource a souvent conduit les exploitants à extraire le matériau depuis des excavations souterraines, dont la plupart sont actuellement abandonnées. Deux formations géologiques y ont été intensément exploitées (Illustration 3 et Illustration 4) :

- Les calcaires du Bathonien (Jurassique moyen), dont le plus célèbre est le Calcaire de Caen. Ces formations ont été utilisées depuis l'antiquité pour la construction et 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 extraite 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 Cénomanien (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 des terres agricoles ou la production de chaux.

| Étages | | Principaux faciès | Matériau exploité | Principales localités |
|------------|-------------------------|--|---|---|
| Tertiaire | Sparnacien Thanetien | 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 | Seine-Maritime + Eure Calvados Caumont... |
| | 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-glaucconieuse | 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)

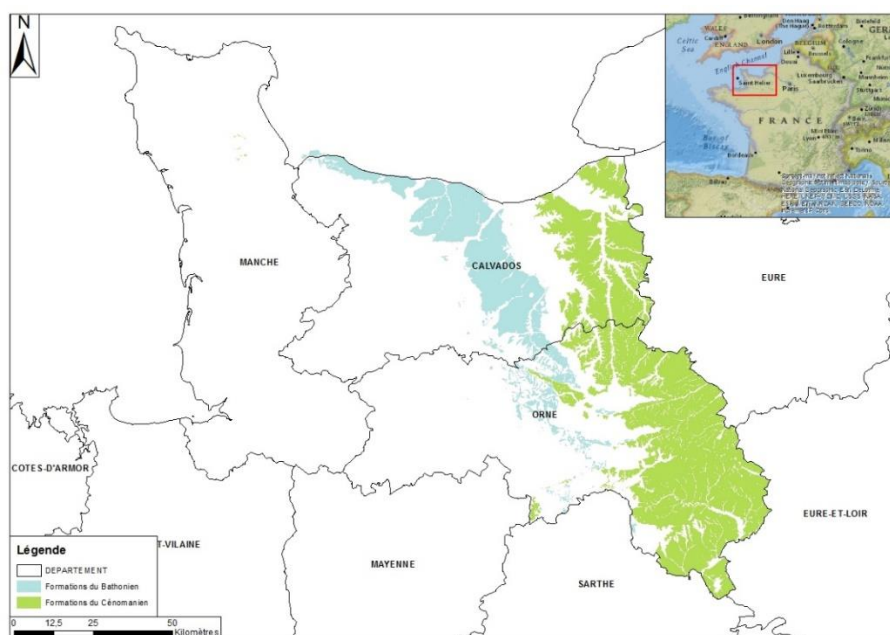


Illustration 4 : Répartition des calcaires du Bathonien (Jurassique moyen – en bleu clair) et du Cénomanien (Crétacé supérieur – en vert) sur le territoire de l'ex-Basse-Normandie (d'après les cartes géologiques harmonisées – BRGM)

2.3.2. Les méthodes d'exploitation, les types d'accès, les configurations géométriques et la réutilisation des carrières souterraines

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 a été exploitée soit par chambres et piliers, 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.

Généralement, le creusement se faisait au pic, sauf pour les exploitations les plus récentes.

- Carrières souterraines exploitées en chambres et piliers

La grande majorité des carrières souterraines de pierres de taille ont été exploitées selon la technique des chambres et piliers. Cette technique permet d'exploiter une grande surface en conservant une certaine stabilité si la géométrie des piliers, leur nombre et leur disposition est bien dimensionnée pour supporter le toit. Les piliers peuvent être soit alignés, soit disposés de façon anarchique sans organisation spécifique : c'est le cas de 9 des 10 carrières visitées dans le cadre de cette étude. La disposition des piliers donne des indications sur la période d'activité, puisque les carrières à géométrie désordonnée sont généralement anciennes (avant le XIX^{ème} siècle), et souvent en mauvais état. A l'inverse, les carrières souterraines à piliers alignés sont la plupart du temps les plus récentes (IFSTTAR, 2014).

- Carrières souterraines exploitées en chambres et galeries

Cette technique d'exploitation est généralement utilisée pour des exploitations de plus faibles extensions. C'est le cas notamment des « marnières », creusées pour l'exploitation de craie à des fins d'amendement. Aucune carrière souterraine visitée dans le cadre de cette étude a été exploitée selon cette technique.

Typologie des accès

Il existe trois grands types d'accès aux carrières souterraines : les entrées en cavage, les puits et les descenderies (Illustration 5). 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 Coulonges-sur-Sarthe, 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 du Pays d'Auge dans le Calvados), tandis que les puits et les descenderies seront préférentiellement situés en plateau ;

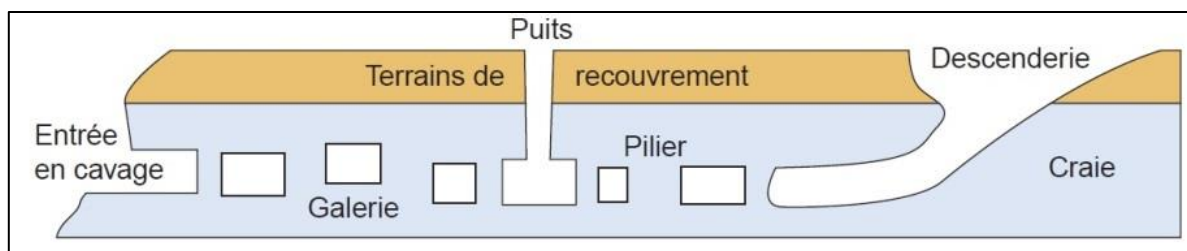


Illustration 5 : Schéma des différents types d'accès aux carrières souterraines (IFSTTAR, 2014)

Configurations géométriques

Les tableaux suivants présentent une synthèse des configurations géométriques (surfaces de vide, taux de défrètement, hauteurs de vide) des carrières souterraines étudiées dans le cadre de ce projet, en fonction de leur contexte géologique (calcaire / craie).

| | | | |
|-----------|------------------------------|---------|-----------------------|
| CALCAIRES | Superficie (m ²) | Moyenne | 10 500 m ² |
| | | Min. | 1 900 m ² |
| | | Max. | 42 000 m ² |
| | Taux de défruitement (%) | Moyenne | 95 % |
| | | Min. | 91 % |
| | | Max. | 97 % |
| | Hauteurs de vides (m) | Moyenne | 3,4 m |
| | | Min. | 2,9 m |
| | | Max. | 4,6 m |
| CRAIES | Superficie (m ²) | Moyenne | 4 700 m ² |
| | | Min. | 600 m ² |
| | | Max. | 20 800 m ² |
| | Taux de défruitement (%) | Moyenne | 90 % |
| | | Min. | 84 % |
| | | Max. | 96 % |
| | Hauteurs de vides (m) | Moyenne | 1,8 m |
| | | Min. | 0,9 m |
| | | Max. | 2,9 m |

Illustration 6 : Synthèse des données géométriques sur les 23 carrières souterraines étudiée au cours des tranches 2 et 3 du projet (6 carrières dans les calcaires, et 17 carrières dans les craies)

Il ressort de cette analyse que les carrières creusées dans les calcaires sont globalement plus vastes, plus hautes, et ont un taux de défruitement plus élevé que les carrières creusées dans les craies.

A noter que la très grande majorité des carrières visitées dans le cadre de cette étude ont été creusées sur un seul niveau. Seule la grande carrière souterraine de Loisail (61), diagnostiquée au cours de la tranche 2, est localement constituée de deux niveaux, mais il s'agit vraisemblablement d'un cas exceptionnel (recoupement probable de la carrière de pierre de taille avec une ancienne marnière accessible par puits).

Réutilisation des carrières souterraines

Après leur abandon, de nombreuses carrières souterraines ont été réutilisées pour la culture des champignons, c'est le cas par exemple des carrières de Beaufour-Druval et de Bonnebosq dans le Calvados, ou celles de Coulonges-sur-Sarthe et de Rémalard dans l'Orne. Pour cette dernière, la mise en place des sacs de culture a nécessité d'excaver des secteurs entièrement remblayés par les carriers, ce qui a pu avoir localement une incidence sur sa stabilité.

2.3.3. Les risques liés aux cavités souterraines

Les désordres en surface

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 débouillage 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 ;

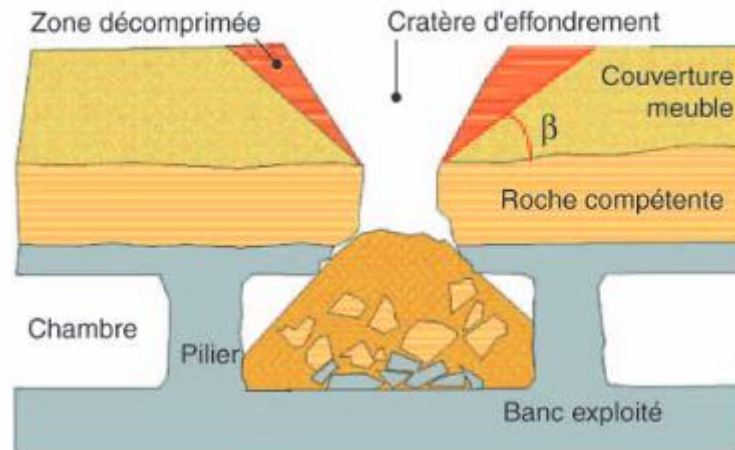


Illustration 7 : Schéma de principe d'un effondrement localisé (ou fontis) (IFSTTAR, 2014)

- **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 ;

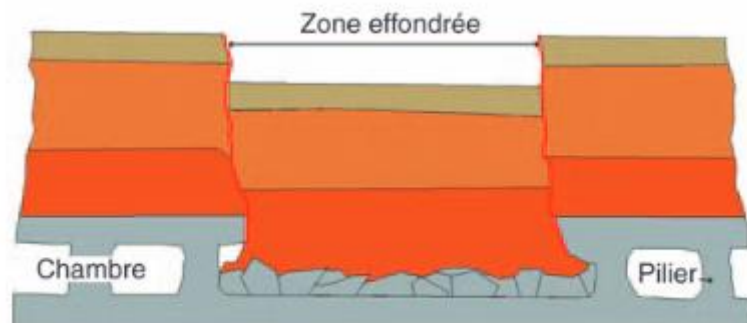


Illustration 8 : Schéma de principe d'un effondrement généralisé (IFSTTAR, 2014)

- **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 dépression fermée à bords fléchis dont la taille varie selon la taille de l'exploitation souterraine (de quelques décimètres à plusieurs dizaines de mètres de diamètre).

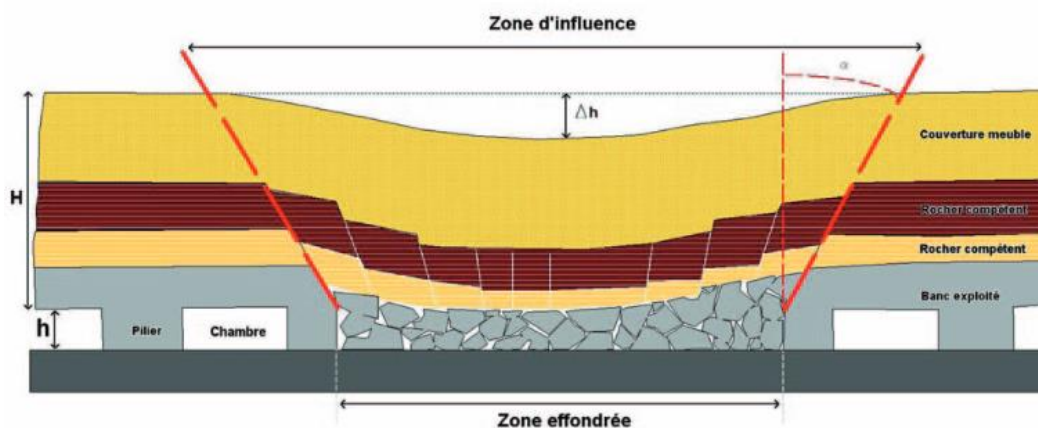


Illustration 9 : Schéma de principe de l'affaissement (IFSTTAR, 2014)



Illustration 10 : Exemples d'effondrements survenus dans le Pays d'Auge suite à la ruine de carrières souterraines anthropiques (à gauche, Bonnebosq (2018) et à droite, Formentin (2016))



Illustration 11 : Large cuvette d'affaissement associée à la présence d'une carrière souterraine, actuellement inaccessible (commune de Cour-Maugis-sur-Huisne)

Les autres risques

Pour les carrières souterraines accessibles par cavage ou par descenderie, les entrées peuvent être concernées par la problématique de chutes de blocs ou d'écailles instables (Illustration 12), voire de mouvements de terrain de plus grande ampleur, comme des éboulements. Ces risques n'ont pas fait l'objet d'une étude systématique, mais en cas de danger avéré, ils ont été signalés dans les comptes rendus des diagnostics.



Illustration 12 : Exemple d'écailles et de blocs instables (flèches rouges) au niveau de l'entrée de la carrière de Beaufour-Druval (14). Certains étant déjà tombés (cercle rouge)

Enfin, les carrières souterraines présentent d'autres dangers qui peuvent menacer les intervenants, et notamment la présence d'atmosphère viciée (gaz). C'est le cas par exemple de la carrière souterraine de Saint-Langis-lès-Mortagne (Orne), étudiée au cours de la tranche 2 de l'étude.

3. Investigations de surface et sélection des cavités à diagnostiquer

L'objectif de ce chapitre est de présenter la stratégie mise en œuvre pour sélectionner les carrières souterraines à diagnostiquer. En 2016, dans le cadre de la tranche 2 de l'étude (rapport BRGM/RP-66828-FR), il avait été décidé en concertation avec la DREAL Normandie que le travail devait être réalisé à l'échelle des communautés de communes, pour répondre aux demandes liées à la réforme territoriale. La même stratégie a donc été utilisée pour cette 3^{ème} tranche. Elle est constituée de plusieurs étapes successives qui seront détaillées ci-dessous.

3.1. INVESTIGATIONS DE SURFACE – RECHERCHE DES CARRIERES SOUTERRAINES ABANDONNEES

3.1.1. Hiérarchisation des communautés de communes à investiguer

Le travail réalisé au cours de la tranche 2 avait permis de lister les communautés de communes les plus concernées par la présence de carrières souterraines potentielles, et donc prioritaires pour y réaliser des investigations (Illustration 14).

Cette sélection était basée sur le croisement entre une sélection d'indices de cavités souterraines issues de la base de données de la DREAL Normandie (jugée la plus complète pour l'étude puisqu'elle regroupe notamment les bases de données BDCavité du BRGM, des DDT(M), le Plan Marnières du CEREMA etc.) avec l'emprise des territoires des communautés de communes de l'Orne et du Calvados (Illustration 14).

Pour rappel (cf. rapport BRGM/RP-66828-FR – chapitre 4.1), la sélection préliminaire des indices de cavités souterraines avait été réalisée à partir de plusieurs critères (précision de localisation de l'indice, typologie, géologie etc.), et avait permis de retenir **1814** indices de carrières souterraines potentielles, sur les **4627** indices bancarisés dans la base de données de la DREAL en mars 2016, soit 39 % des données (Illustration 13).

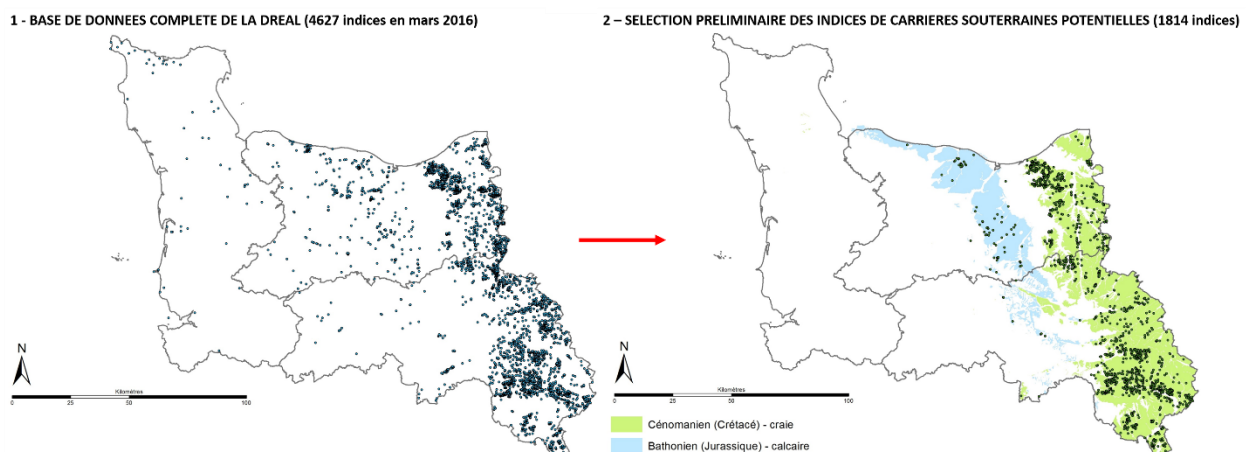


Illustration 13 : Etape de présélection des indices potentiellement intéressants pour l'étude (carrières souterraines probables) à partir de la base de données de la DREAL

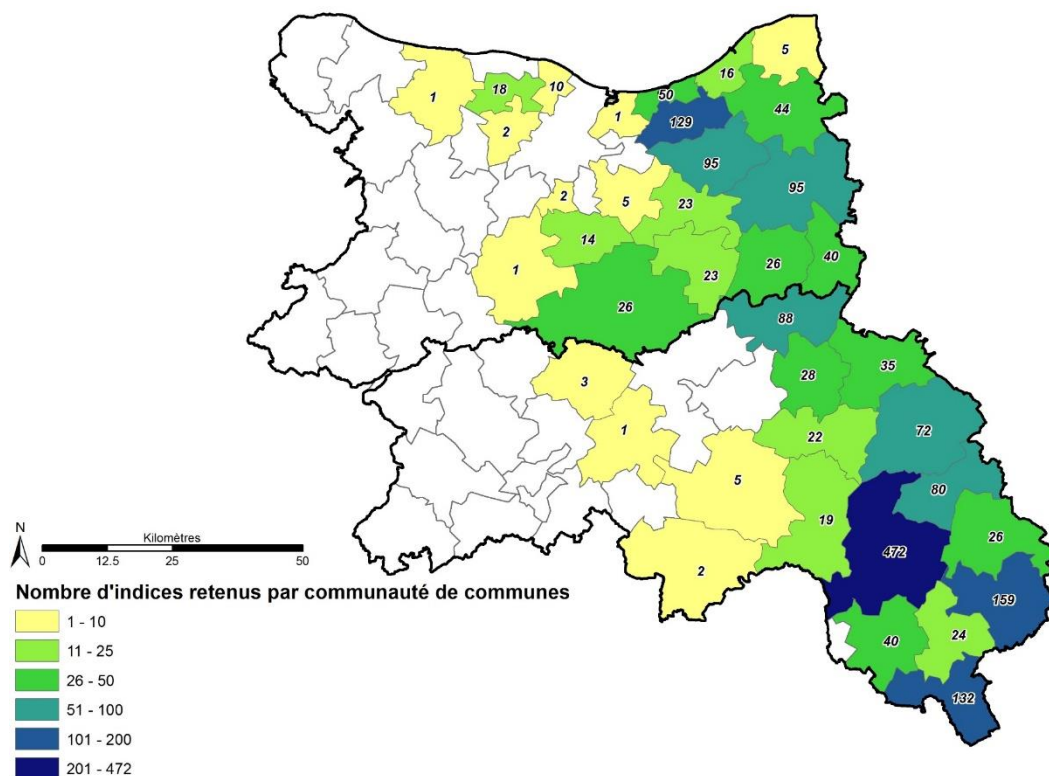


Illustration 14 : Répartition des indices potentiellement associés à des carrières souterraines par communauté de communes de l'Orne et du Calvados

Les communautés de communes retenues suite à ce croisement étaient (Illustration 15):

- la communauté de communes du Bassin de Mortagne-au-Perche (Orne) ;
 - partie « nord »
 - partie « sud »
- les communautés de communes d'Orival et Cœur de Nacre (Calvados) ;
- la communauté de communes du Perche Rémalardais (Orne) ;
- la communauté de communes du Haut-Perche (Orne)
- la communauté de communes de Cambremer (Calvados).

Les communautés de communes en vert correspondent aux territoires étudiés au cours de la tranche 2. En concertation avec les services de l'Etat (DREAL, DDTM14 et DDT61), il a donc été décidé de poursuivre le travail initié en 2016 sur les autres communautés de communes identifiées comme prioritaires (en bleu dans la liste ci-dessus).

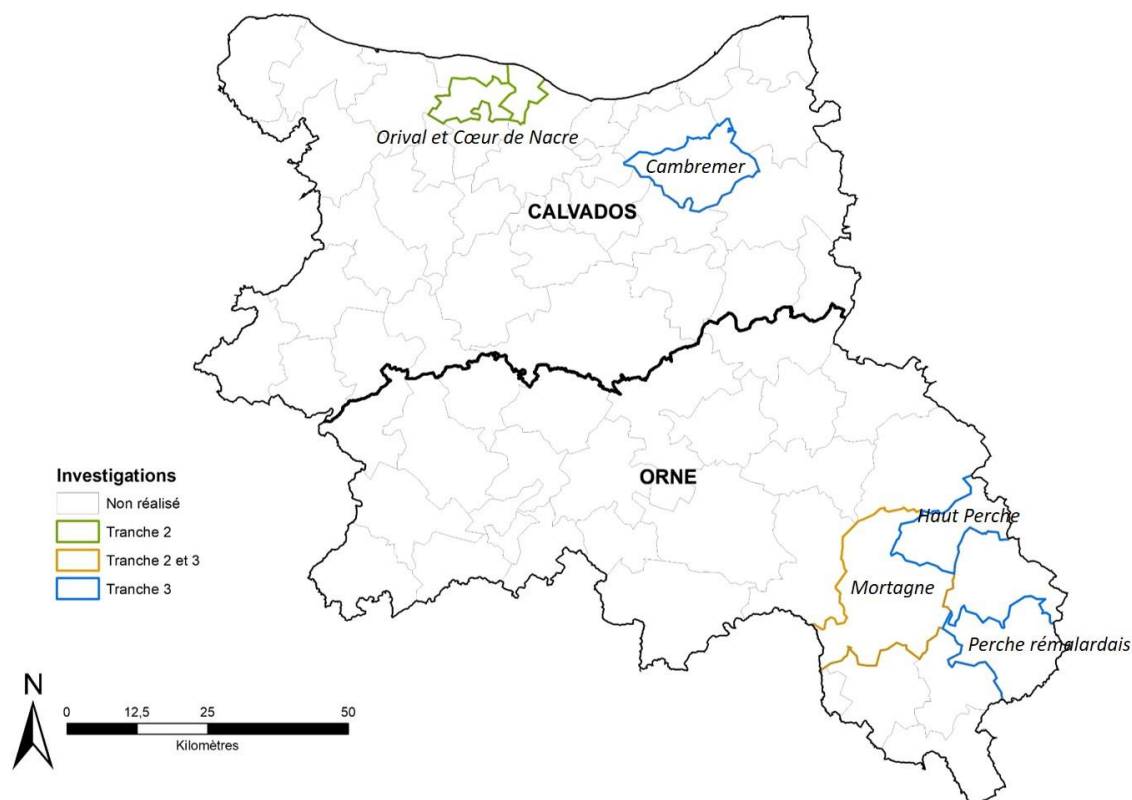


Illustration 15 : Situation des communautés de communes investiguées au cours des tranches 2 et 3

3.1.2. Investigations de surface et enquêtes de voisinage

Suite aux étapes de pré-sélection des indices de cavités (cf. rapport BRGM/RP-66828-FR), des vérifications de terrain de « surface » ont été réalisées avec un double objectif : (1) repérer les carrières souterraines de pierre de taille et leurs conditions d'accès (seules sont intéressantes pour cette étude les carrières librement accessibles, ne nécessitant pas de travaux préalable pour y pénétrer) et (2) mettre à jour la base de données BD Cavité (modification / ajout d'indices de cavités souterraines). Pour rappel, les cavités de type « marnières », les ouvrages civils et militaires et les cavités naturelles n'ont pas été retenus dans la présente étude.

Les vérifications de terrain ont été effectuées à l'échelle communale, commune par commune, pour les 4 communautés de communes sélectionnées. Préalablement aux visites sur le terrain, les mairies ont fait l'objet d'une prospection par courrier et par téléphone pour récupérer le maximum d'informations concernant la présence de carrières souterraines accessibles sur leurs territoires. Quelques maires ou adjoints ont également été rencontrés sur le terrain. Il s'agit globalement de la même démarche que celle employée par le BRGM au début des années 2000 pour l'élaboration des inventaires départementaux des cavités souterraines réalisés à la demande du Ministère de l'Environnement. Les résultats de cette prospection ont été très variables d'une commune à l'autre, mais ont dans tous les cas permis d'informer les mairies des démarches engagées par la DREAL et le BRGM sur leurs territoires.

Afin de garder une traçabilité des visites de terrain réalisées, et dans l'objectif de mettre à jour la BD Cavité (ajout de nouvelles données, modification d'indices), la base de données issue des étapes de pré-sélection des indices a été complétée selon la méthodologie présentée ci-après :

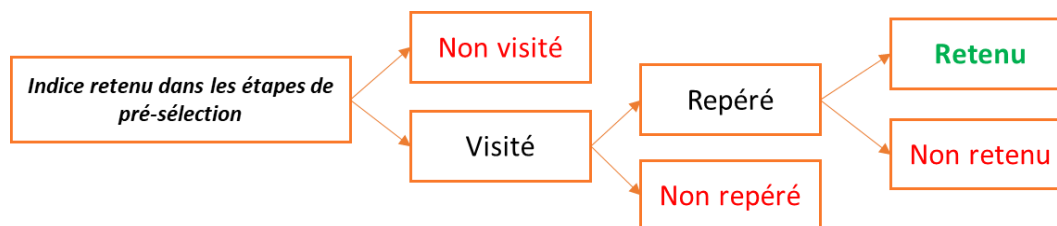


Illustration 16 : Méthode utilisée pour les recherches en surface

- *Indice non visité* : indice de cavité qui n'a pas fait l'objet d'une visite en surface, puisque jugé inintéressant pour l'étude (situé en plateau (marnière), origine naturelle probable, carrière à ciel ouvert etc.). Pour rappel, ce projet vise à étudier uniquement les carrières souterraines de pierre de taille, les marnières et les ouvrages civils ou militaires étant exclus ;
- *Indice non repéré* : indice de cavité visitée mais dont aucune trace n'a été retrouvée en surface (exemple : puits ou entrées de cavité totalement remblayés et pour lesquels aucune trace n'est visible en surface) ;
- *Indice repéré non retenu* : indice de cavité visitée, retrouvé sur le terrain, mais qui ne présente pas d'intérêt pour l'étude (puits de marnières, affaissements, cavité inaccessible) ;
- *Indice repéré retenu* : indice associé à une carrière souterraine de pierre de taille accessible.

A noter que certains indices, pourtant retenus dans les étapes de pré-sélection, n'ont pas fait l'objet de repérage en surface. Il s'agit surtout d'indices décrits comme des « carrières souterraines » dans les bases de données, mais situés en plateau et donc très généralement associés à des marnières (uniquement accessibles par puits, donc inintéressantes pour la présente étude – particulièrement vrai dans le Pays d'Auge – cf. 3.1.3), ou d'indices indéterminés généralement associés à des cavités naturelles, voire à des indices de carrières souterraines correspondant en réalité à d'anciennes exploitations à ciel ouvert (particulièrement présents dans le Perche). L'exclusion de ces indices est surtout basée sur des critères de terrain.

Les repérages de terrain ont été effectués à pied, par deux agents du BRGM Normandie, pour chaque commune située dans les 4 communautés de communes retenues. Compte tenu du temps et du budget alloué à cette tâche, il n'a pas été possible de quadriller sur le terrain l'ensemble de ces territoires, et il a donc fallu cibler les sites d'investigations. Le choix des sites a donc été guidé principalement par la localisation cartographique des indices de cavités retenus suite aux étapes de présélection, et complété au besoin sur le terrain par des analyses morphologiques (investigations dans des talus aux géométries propices à la localisation de carrières souterraines), géologiques (exclusion de secteurs constitués d'épaisses formations géologiques argileuses, sableuses par exemple (hors formations superficielles, qui peuvent recouvrir des formations géologiques propices à la présence de carrières souterraines)), ou toponymique (investigations au niveau des lieux-dits « La Carrière », « Le puits », « Le Gouffre » etc...). De fait, les investigations de terrain n'ont pas permis un relevé totalement exhaustif de l'ensemble des cavités situées sur les 4 communautés de communes.

Ces visites de terrain ont permis de retrouver des indices de cavités non bancarisés dans les bases de données. Sur le même principe que les indices sélectionnés pour les visites de surface, ces indices ont été catégorisés en « indice non recensé – non retenu » et « indice non recensé –

retenu ». L'une des carrières étudiée dans le cadre de cette étude n'était pas connue des bases de données.

Les résultats de ces étapes de sélection et des visites de surfaces ont été compilés dans un fichier ARCGIS®, inclus dans la base de données dédiée à ce projet (Clé Usb annexée au présent rapport), nommé X_SELECTION_INDICES_BD_DREAL.shp (Illustration 17). Cette table contient le champ OBS_BRGM, qui reprend le lexique présenté en Illustration 16.

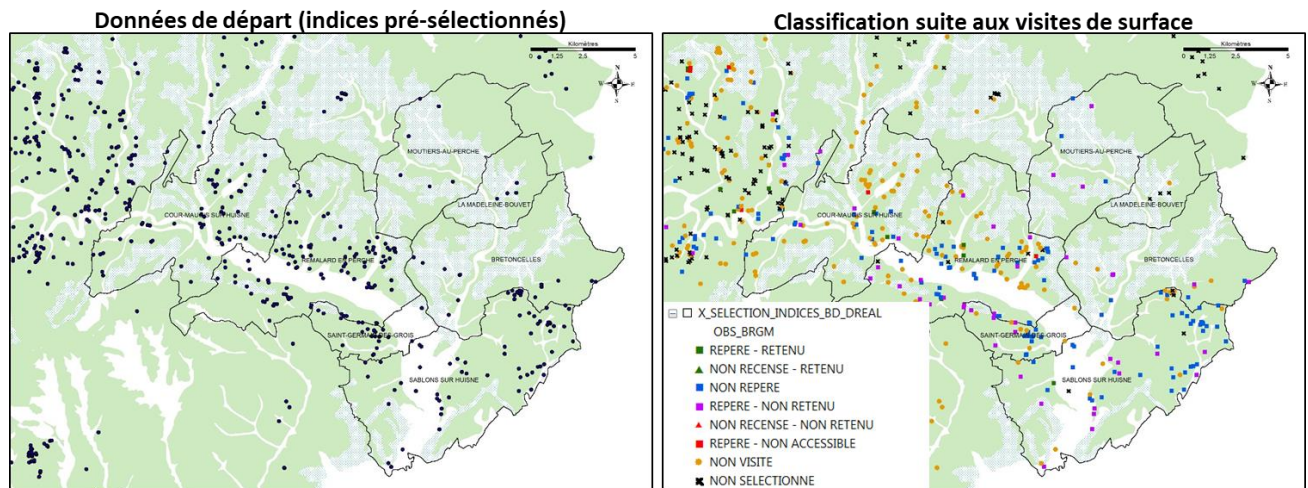


Illustration 17 : Exemple de traitement des indices pré-sélectionnés suite aux repérages en surface (ici pour la communauté de communes du Perche Rémalardais (Orne))

3.1.3. Bilan des investigations de surface

Au total, sur les 650 cavités retenues par les étapes de pré-sélection situées sur les 4 communautés de communes, **317** ont fait l'objet de recherches sur le terrain. Plus de la moitié (58%) n'ont pas été retrouvées. Pour les 132 indices retrouvés, 102 correspondent à des cavités soit inaccessibles (entrée identifiée mais accès impossible sans travaux préalables), soit inintéressantes pour l'étude (marnières, cavité naturelle, désordre en surface – cf. 1.2).

Ces investigations de terrain ont permis de retrouver 16 cavités souterraines non recensées dans les bases de données, dont trois correspondent à des carrières souterraines accessibles.

A noter que le temps et le budget alloué à cette tâche n'ont pas permis de visiter l'ensemble des 650 indices de cavités recensées sur les 4 communautés de communes. Ainsi, 333 indices n'ont pas fait l'objet d'investigations de terrain. Une priorisation des indices a donc été réalisée à partir d'arguments de terrain (critères géologiques et géomorphologiques notamment). De fait, la majorité de ces 333 indices sont soit situés sur formations géologiques peu prédisposées à la présence de cavités et/ou sont situées en plateau et sont donc très probablement associées à des « marnières » (notamment dans le Pays d'Auge).

Au total, **17** carrières souterraines accessibles ont été retrouvées sur le terrain, dont 3 n'étaient pas connues des bases de données.

| DEPARTEMENT ComCom (CC) | Nombre total d'indices investigués sur le terrain | INDICES RECENSES EN BASE DE DONNEES | | | | | | INDICES JUSQUE LA NON RECENSES EN BASE DE DONNEES | |
|-----------------------------------|---|-------------------------------------|------------|---|------------|--------------------------------|------------|---|----------------|
| | | Indices « non repérés » | | Indices repérés mais « non retenus » ou « non accessibles » | | Indices repérés « retenus » | | Retenus | Non retenus |
| Calvados (CC Cambremer) | 28* | 3 | 11% | 17 | 61% | 6 | 21% | 2 | 0 |
| Orne | 289 | 182 | 63% | 85 | 29% | 8 | 3% | 1 | 13 |
| CC Mortagne (Nord) | 107 | 78 | 73% | 23 | 21% | 1 | 1% | 0 | 5 |
| CC Perche Rémalardais | 165 | 101 | 61% | 49 | 30% | 6 | 4% | 1 | 8 |
| CC Haut Perche | 17 | 3 | 18% | 13 | 76% | 1 | 6% | 0 | 0 |
| TOTAL | 317 | 185 | 58% | 102 | 32% | 14 | 4% | 3 | 13 |

Tableau 1 : Bilan des investigations de surface (*dans le Calvados, beaucoup d'indices n'ont pas été sélectionnés ou n'ont pas été visités car associés à des indices de marnières en plateau)

L'un des bilans que l'on peut tirer de ces campagnes d'investigations en surface est que le travail de recherche de carrières souterraines accessibles est plus difficile à mener dans le Perche que dans le Pays d'Auge. Les raisons sont principalement d'ordre géologique et géomorphologique :

- Dans le pays d'Auge, les terrains crayeux sont recouverts sur les plateaux d'une épaisse couche d'altérites à silex, puissante de plus de 10 m, ce qui exclut toute probabilité d'excavation par descenderie. Les seules exploitations de craies situées en plateau ne peuvent être accessibles que par des puits, et correspondent donc essentiellement à des marnières. D'autre part, le paysage est marqué par des vallées assez encaissées délimitées par des versants raides, ce qui favorise l'exploitation par cavage. Cela se confirme sur le terrain, puisque toutes les grandes carrières de pierre de taille identifiées sont accessibles par des cavages creusés dans les versants des vallées ;
- Dans le Perche, l'épaisse couche d'altérites à silex qui caractérise les plateaux augerons est réduite à quelques décimètres, voire à quelques mètres, les paysages sont plus vallonnés et les vallées moins encaissées. La faible profondeur des couches de craies, associée à la morphologie du Perche, a favorisé l'exploitation par descenderies. Certaines de ces descenderies peuvent être situées au cœur de plateaux, comme c'est le cas de la grande carrière des Petites Hayes à Coulonges-sur-Sarthe, et peuvent, de fait, côtoyer des marnières accessibles par puits.

La recherche de carrières souterraines accessibles dans l'Orne exige donc une vérification systématique des indices situés en plateau, indices qui peuvent être mis de côté dans le pays d'Auge car associés à des marnières accessibles par puits.

3.2. CHOIX DES CARRIERES SOUTERRAINES A DIAGNOSTIQUER

Les investigations de surface menées sur les 4 communautés de communes du Bassin de Mortagne-au-Perche (secteur nord), du Perche Rémalardais, du Haut-Perche et de Cambremer ont permis d'identifier 17 carrières souterraines accessibles en cavage ou en descenderie. Pour faciliter le choix des sites à visiter, chacune de ces cavités a fait l'objet d'une priorisation sur la base des enjeux potentiels en surface et d'une évaluation préliminaire de leur état de stabilité. Cette liste a été présentée à la DREAL Normandie et aux DDT(M). Après concertation, 8 carrières

souterraines sur 17 ont été retenues pour les étapes de diagnostic, auxquelles s'ajoutent deux autres carrières situées hors des communautés de communes étudiées mais directement proposées par la DDT de l'Orne.

Pour la communauté de communes de Cambremer, trois carrières ont été retenues :

- La carrière souterraine dite du « Cimetière mérovingien », sur la commune de Beaufour-Druval. Elle correspond à une grande carrière exploitée en chambres et piliers accessible par cavage. Elle sous-cave des pâtures mais est régulièrement visitée pour les comptages de chiroptères (site Natura 2000) ;
- La carrière souterraine sise au lieu-dit « la Butte », sur la commune de Beaufour-Druval. Il s'agit d'une petite carrière en chambres et piliers accessible par cavage, qui sous-cave un chemin carrossable ;
- La carrière souterraine sise au lieu-dit « le Fief Dame Alix », sur la commune de Bonnebosq. Il s'agit d'une grande carrière en chambres et piliers accessible par cavage, qui sous-cave des pâtures et une petite voie communale ;

Pour la communauté de communes du Perche Rémalardais, 5 carrières ont été retenues :

- Les grandes carrières souterraines du lieu-dit « Pontillon », sur la commune de Rémalard (commune nouvelle de Rémalard-en-Perche). Il s'agit de trois vastes carrières souterraines en chambres et piliers, accessibles par cavage ou descenderie, qui sous-cavent des labours et une petite route communale ;
- La carrière souterraine sise au lieu-dit « la Carrière », sur la commune de Bellou-sur-Huisne (commune nouvelle de Rémalard-en-Perche). Elle correspond à une carrière exploitée en chambres et piliers, accessible par descenderie, qui sous-cave une petite route communale. Elle n'était pas recensée dans les bases de données ;
- La carrière souterraine sise au lieu-dit « Maisoncelle », sur la commune de Boissy-Maugis (commune nouvelle de Cour-Maugis-sur-Huisne). Il s'agit d'une carrière exploitée en chambres et piliers, accessible par un petit cavage ouvert et visible depuis un sentier. Elle sous-cave des labours ;
- La carrière souterraine sise au lieu-dit « Clos Saint-Marc », sur la commune de Boissy-Maugis (commune nouvelle de Cour-Maugis-sur-Huisne). Cette carrière, exploitée en chambres et piliers, est accessible par une petite descenderie. Elle sous-cave un chemin carrossable et des labours ;
- La carrière souterraine de Condeau (commune nouvelle de Sablons-sur-Huisne). Elle correspond à une petite carrière exploitée par chambres et piliers, accessible par cavage, qui sous-cave un labour, mais sujette aux intrusions ;

Aucune carrière souterraine n'a été retenue pour les communautés de communes du Haut-Perche et de la partie nord du Bassin de Mortagne-au-Perche.

Les deux cavités proposées par la DDT61 sont :

- La grande carrière dite des « Petites Hayes », sur la commune de Coulonges-sur-Sarthe (communauté de communes de la Vallée de la Haute Sarthe). Il s'agit d'une vaste carrière exploitée selon la technique des chambres et piliers, accessible par une descenderie. Elle

sous-cave des terres agricoles ainsi qu'une route départementale. Elle est également régulièrement visitée pour les comptages de chauves-souris ;

- La carrière souterraine sise au lieu-dit « Curiers », sur la commune de Courgeon (partie sud du Bassin de Mortagne-au-Perche). Il s'agit d'une petite carrière accessible par une descenderie qui sous-cave essentiellement des terres agricoles ;

Ces deux carrières sont situées hors des 4 secteurs identifiés pour effectuer les investigations, mais ont été jugées intéressantes par la DDT61 car elles sont situées à proximité d'enjeux importants (voirie départementale pour la carrière de Coulonges-sur-Sarthe, et maison d'habitation pour la carrière dite de « Curiers » à Courgeon).

4. Inspection et diagnostic de stabilité des carrières souterraines

4.1. METHODOLOGIE : NIVEAU DE DIAGNOSTIC ET DONNEES UTILISEES

4.1.1. 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 (IFSTTAR, 2014). Ce niveau de diagnostic a pour objectif de qualifier l'état de stabilité de la carrière par l'intermédiaire notamment :

- d'une visite du site associée à une cartographie des vides (géométrie de la carrière souterraine) ;
- d'une cartographie géotechnique qui permet de situer les éléments d'instabilités sur le plan de la cavité (fractures, chutes de toit, fontis, écaillages etc.).

Le niveau de diagnostic proposé dans le cadre de cette étude ne se limite toutefois pas aux éléments strictement nécessaires pour le niveau 1, puisque les levés géométriques ont été réalisés au scanner laser 3D (cf. § 4.2), ce qui permet de dresser des plans de détail.

Les éléments à prendre en compte pour un diagnostic de niveau 1 sont récapitulés dans les tableaux ci-dessous (Illustration 18 et Illustration 19).

| 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 18 : Définition des niveaux de diagnostics (IFSTTAR, 2014)

| Éléments | Moyens | Niveaux de diagnostic | | | |
|---|--|-----------------------|----|----|----|
| | | DU | N1 | N2 | N3 |
| Données existantes | | | | | |
| Données géologiques et hydrogéologiques | <ul style="list-style-type: none">• Carte géologique et hydrogéologique, base de données du sous-sol (BSS)• Bibliographie (rapports, thèses, articles...) | | | | |
| Données historiques sur l'exploitation | <ul style="list-style-type: none">• Archives écrites• Archives numériques• Enquêtes orales | | | * | * |
| Données issues de supports cartographiques | <ul style="list-style-type: none">• Carte topographique et géomorphologique, toponymie• Cadastre• Modèle numérique de terrain | | | * | |
| Données issues de la télédétection | <ul style="list-style-type: none">• Images aériennes | | | | |
| Données géomécaniques | <ul style="list-style-type: none">• Bibliographie | | | | |
| Données sur l'environnement de la carrière | <ul style="list-style-type: none">• Bibliographie, plans, schéma d'assainissement... | | | | |
| Reconnaisances et investigations de terrain | | | | | |
| Environnement de la carrière | <ul style="list-style-type: none">• Visite de terrain, observation• Études spécifiques (topographie, hydraulique, vibrations, réseaux...) | | | * | * |
| Géologie et hydrogéologie | <ul style="list-style-type: none">• Observation• Levés géologiques• Sondages• Suivi piézométrique | | | * | * |
| Géométrie de l'exploitation | <ul style="list-style-type: none">• Levé métrique - Géométrie globale• Levé décimétrique - Plan de détail | | | | |
| Relevé de désordres | <ul style="list-style-type: none">• Observation, photographies, description succincte• Description détaillée et localisation précise | | | * | * |
| Données géomécaniques | <ul style="list-style-type: none">• Essais de laboratoire• Essais <i>in situ</i> (dont géophysique) | | | | |
| Données acquises sur le long terme | <ul style="list-style-type: none">• Visite régulière• Instrumentation | | | | |

Non nécessaire ou inadapté Possible Indispensable

* Mise à jour ou complément

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

Illustration 19 : Éléments à prendre en compte pour les différents niveaux de diagnostics (IFSTTAR, 2014)

4.1.2. Données utilisées – analyse des informations existantes

L'élaboration de diagnostics de niveau 1 nécessite de placer les sites dans leurs contextes, à partir des données existantes. Ce travail a été réalisé pour chaque cavité diagnostiquée, à partir notamment des données IGN (géographie, géomorphologie, photographies aériennes), BRGM (cartes géologiques, hydrogéologie) et des informations récupérées dans les archives (données historiques). Ces informations constituent les deux premiers chapitres de chaque compte rendu (cf. annexes hors-texte).

Données géographiques et morphologiques

Les plans des carrières souterraines visitées ont été géoréférencés et recalés sur les cartes topographiques de l'IGN (Scan25®), ce qui a permis de décrire l'environnement géographique (localisation, accès etc.) et morphologique du site (plateau, versant etc.).

Données géologiques, hydrogéologiques et hydrologiques

Chaque carrière diagnostiquée a été replacée dans son contexte géologique et hydrogéologique à partir notamment des cartes à 1/50.000 du BRGM, et éventuellement des données disponibles dans la Banque du Sous-Sol (BSS). Ces informations cartographiques ont pu être complétées et/ou précisées par les observations de terrain, ainsi que par une analyse bibliographique plus approfondie pour certaines carrières (consultations de thèses, de publications etc.).

Données historiques sur l'exploitation

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 observations en souterrain (inscriptions, graffitis) ou des enquêtes de voisinages. Les principales informations recherchées concernent : des indications sur les dates d'ouverture et/ou de fermeture des exploitations, l'emprise géométrique (plans), la nature des roches exploitées, éventuellement des données sur la période d'exploitation (nombre d'ouvriers, données de production, tailles des blocs ou du banc exploité etc.), ainsi que d'éventuelles informations sur les désordres en surface (effondrements ou affaissements). Les principales sources de données utilisées ont été :

- Les cadastres anciens (dits « napoléoniens ») datés du début du XIX^{ème} siècle et qui mentionnent parfois la présence de carrières souterraines (exemple en Illustration 20) ;
- Les cartes de Cassini, datées du XVIII^{ème} siècle, sur lesquelles la présence de carrière et/ou de lieu-dit éponyme est parfois (rarement) mentionnée ;
- Les archives départementales de l'Orne et du Calvados, et notamment la série S8 associée aux « mines et carrières ». Pour le département de l'Orne, ce travail a été facilité par la mise à disposition par la DDT61 d'une base de données numérique des archives associées aux carrières ;
- Les photographies aériennes anciennes : disponibles depuis 1947, l'analyse de ces données permet de préciser l'évolution de l'environnement de surface de la cavité depuis la moitié du XX^{ème} siècle, et notamment l'occurrence de désordres en surface ;
- Les cartes postales ou des photographies anciennes prises depuis la surface du sol, qui permettent de témoigner de l'état des accès au début du XX^{ème} siècle ;
- Des blogs ou sites internet divers, qui permettent parfois de retrouver des anciens plans ou des informations historiques intéressantes ;
- Les notices des cartes géologiques, qui pour certaines contiennent de précieuses informations historiques ;
- Des publications ou des rapports anciens ;
- Les observations de terrain (inscriptions, graffitis) et les enquêtes de voisinage ;

Toutefois, la plupart des carrières visitées sont peu documentées, et les documents historiques sont rares.

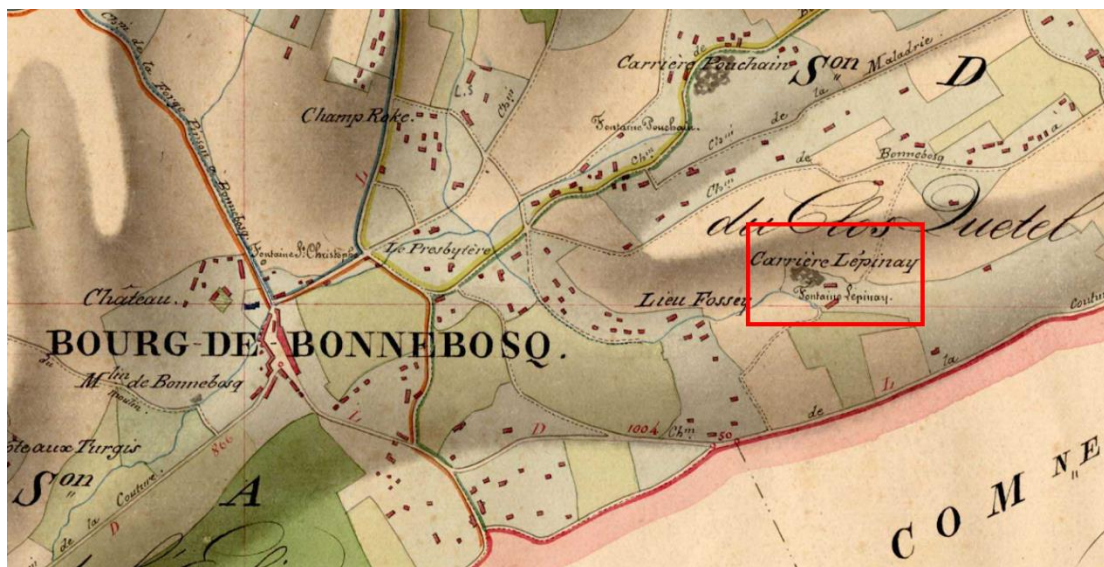


Illustration 20 : Exemple du cadastre de 1812 de la commune de Bonnebosq (14) qui mentionne la présence de la « Carrière Lépinay », actuellement située au lieu-dit « le Fief Dame Alix ». La carrière située au nord, au lieu dit « Carrière Pouchain », n'a pas fait l'objet de visites

Connaissance des cavités souterraines – informations des bases de données

L'un des objectifs de ce projet est de mettre à jour les principales bases de données relatives aux cavités souterraines à partir des informations recueillies sur le terrain. Pour cela, les informations disponibles dans les bases de données ont été croisées avec les observations de terrain pour 1) mettre à jour les informations si nécessaire (modification des coordonnées, compléter les fiches etc.) et 2) contrôler la présence d'éventuels doublons et les supprimer le cas échéant.

Pour les cavités souterraines retrouvées sur le terrain mais qui n'étaient pas bancarisées dans les bases de données, une fiche a été créée dans la BDCavité du BRGM.

Environnement de surface et enjeux

Le calage des plans des carrières souterraines sur les documents cartographiques (cadastre, cartes topographiques, photographies aériennes) a permis de préciser leur environnement de surface. Ce travail, complété par les observations de surface, a permis d'identifier les enjeux sous-cavés par les vides et d'établir une cartographie des enjeux selon leur nature (voirie, habitations, labours etc.).

4.2. LEVES GEOMETRIQUES ET CARTOGRAPHIE DES CAVITES

Dans le cadre de la tranche 2 de l'étude (années 2016-2017 – rapport BRGM/RP-66828-FR), deux méthodes de topographie souterraine avaient été testées : la méthode dite « classique » (distance-mètre laser et boussole), et la méthode innovante au scanner laser portatif 3D « ZEB-REVO ». L'objectif étant d'évaluer les avantages et les inconvénients de chaque méthode pour retenir la plus efficace pour la réalisation de diagnostics de niveau 1.

Cette comparaison avait clairement montré que le scanner laser portatif était le plus approprié pour effectuer les cartographies des réseaux souterraines nécessaires aux diagnostics de stabilité. En effet, les avantages de cette méthode sont nombreux :

- La précision des levés est très satisfaisante, ce qui permet d'élaborer des plans de détail ;
- Les vitesses d'acquisition sont plus élevées qu'avec la méthode classique, ce qui permet de réduire la durée de la présence d'intervenants dans des secteurs potentiellement instables et/ou d'air vicié ;
- Le rendu est en trois dimensions, ce qui permet d'apprécier les volumes et de réaliser des traitements de nuages de points (plans, coupes, quantification de volumes pour la mise en œuvre de sécurisation par exemple) ;
- La comparaison entre les levés réalisés au « fond » avec ceux réalisés en surface permet de dresser les plans des épaisseurs de recouvrement, qui correspondent à une donnée indispensable pour l'évaluation des aléas ;
- Pour la mise en place d'une surveillance régulière, il est possible de comparer deux nuages de points réalisés à plusieurs mois ou années d'intervalle pour situer précisément et quantifier les zones en mouvement (chutes de toits, fontis, écaillages etc.).

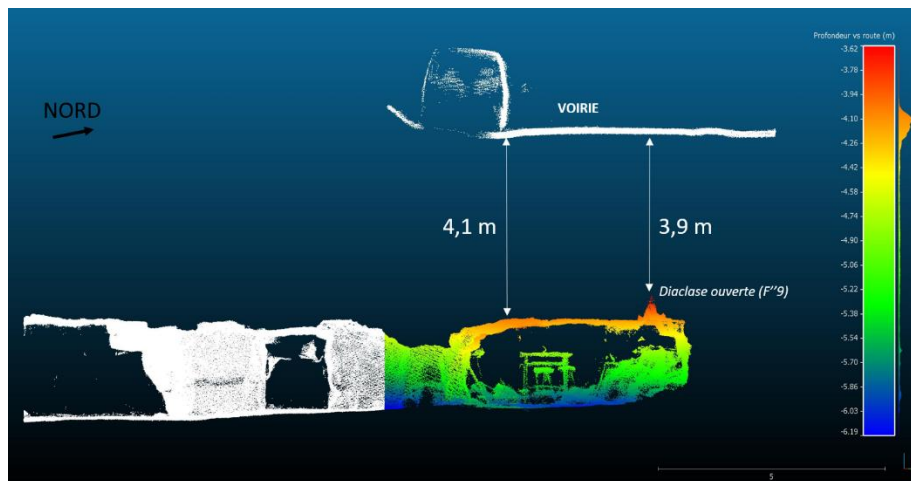


Illustration 21 : Exemple de l'intérêt des levés 3D dans des zones à enjeux : comparaison des nuages de points fond/jour au droit d'une route pour quantifier les épaisseurs de recouvrement (ici, exemple de la carrière « nord » de Pontillon – Rémalard en Perche (61))

L'ensemble des cavités diagnostiquées ont donc fait l'objet d'une topographie au scanner laser 3D par le BRGM, à l'aide des scanners « ZEB-REVO » et « ZEB-HORIZON » (Geoslam). Les nuages de points 3D ont été géoréférencés à partir de repères en surface préalablement positionnés au GPS centimétrique (Trimble Geo7X).

Ces levés ont permis de dresser, pour chaque cavité :

- La carte de l'emprise (géométrie des vides) ;
- La carte des épaisseurs de recouvrement :
 - o Pour l'ensemble des cavités, cette carte a été élaborée à partir de la comparaison entre le nuage de points réalisé au fond avec les données IGN en surface (modèle numérique de terrain à 1 m ou 5 m selon les secteurs),
 - o Pour les secteurs à enjeux, cette carte a été élaborée à partir de la comparaison entre les deux nuages de points réalisés au scanner laser 3D.

- La carte de l'altitude du sol de la cavité ;
- La carte de l'altitude du toit de la cavité ;
- La carte des hauteurs de vides.

A l'issue de ce projet, 12 carrières souterraines ont ainsi été cartographiées au scanner laser 3D, ce qui correspond à plus de 5,5 hectares dont plus de 3 hectares de levés inédits (pour lesquels aucun plan historique n'a été retrouvé dans les archives). Intégrés dans la base de données sous SIG (cf. chapitre 5.1.2), ces plans ont permis d'extraire certaines données géométriques telles que les emprises, les surfaces exploitées, les taux de défruits, les hauteurs de vides etc. Compte tenu du temps et du budget alloués à cette étude, seules 10 des 12 carrières topographiées ont fait l'objet d'un diagnostic.

L'ensemble de ces plans sont présentés en annexe de chaque compte-rendu, et les données SIG sont enregistrées sur la clé Usb en annexe.

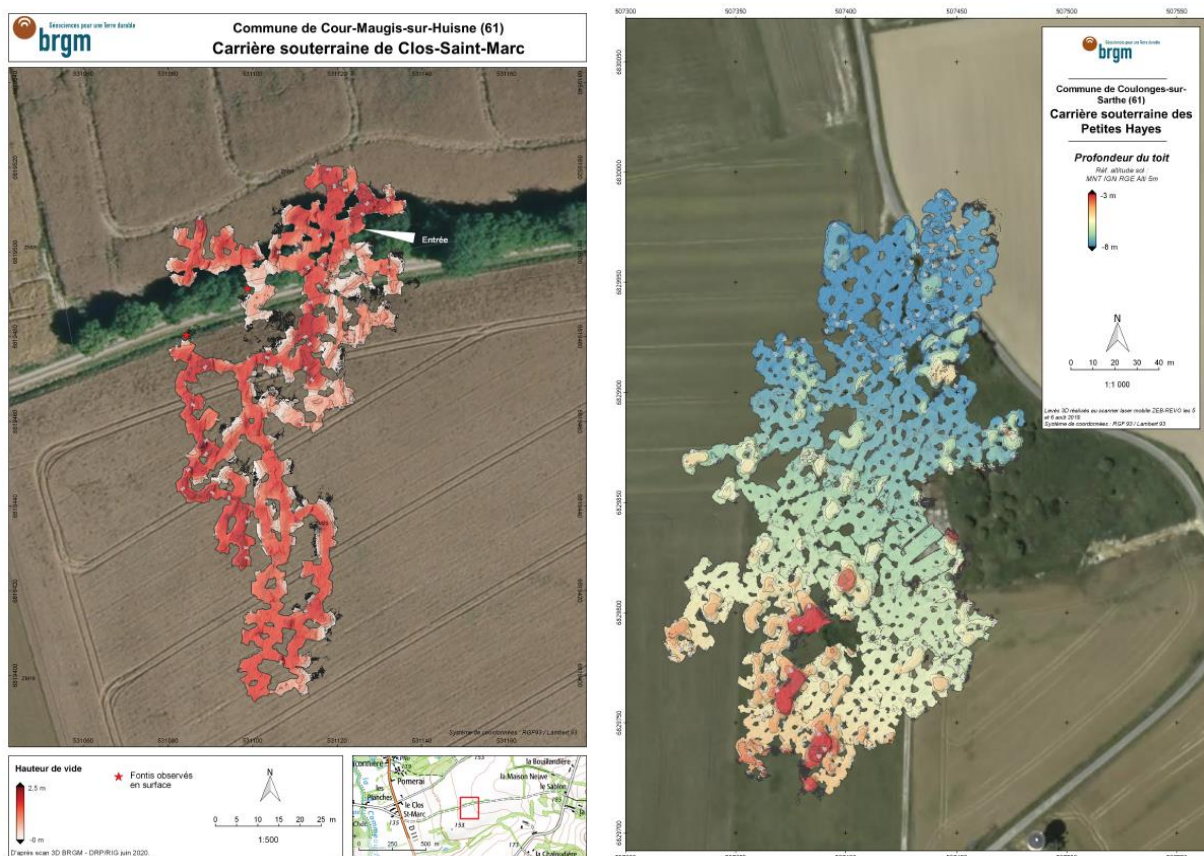


Illustration 22 : Exemple de résultats des cartographies 3D (à gauche, carrière du Clos-Saint-Marc à Cour-Maugis-sur-Huisne et à droite, carrière des Petites-Hayes à Coulonges-sur-Sarthe)

4.3. OBSERVATIONS EN SOUTERRAIN – RELEVES DES DESORDRES

4.3.1. Instabilité des piliers et des parements

L'état de stabilité d'une carrière souterraine exploitée selon la technique des chambres et piliers est en partie lié à l'état de ces derniers, puisqu'ils supportent le toit. La rupture de l'un de ces

piliers entraînerait des fragilités sur le ciel de carrière devenant moins soutenu et sur les piliers alentours. La ruine simultanée de plusieurs piliers peut être la cause, en fonction de l'épaisseur et de la nature du recouvrement, d'effondrements généralisés ou de larges cuvettes d'affaissement.

Dans le cadre d'un diagnostic de niveau 1, il est donc indispensable d'évaluer visuellement l'état qualitatif de chaque pilier. L'ensemble des piliers a donc été décrit selon 4 classes, identifiées sur les plans des diagnostics et dans la base de données SIG par un code couleur :

- **Pilier sain** : le pilier est dans un bon état géotechnique. Il paraît visuellement correctement dimensionné pour supporter durablement les contraintes mécaniques verticales exercées par le recouvrement ;
- **Pilier fracturé et/ou écaillé** : le pilier est traversé par des fractures naturelles et/ou est affecté de petites fractures mécaniques sur ses angles à l'origine de légers écaillages. Il s'agit d'un premier stade de dégradation des piliers mais la stabilité du pilier à long terme n'est a priori pas remise en cause ;
- **Pilier très fracturé et/ou en diablo** : le pilier est affecté par de nombreuses fractures mécaniques et/ou le pilier présente une forme caractéristique de ruine amorcée en « diablo », liée à des écaillages successifs. A ce stade, la stabilité du pilier est remise en cause et une ruine à moyen/long terme, voire court terme, n'est pas à exclure ;
- **Pilier en état de post-rupture** : le pilier est foudroyé et n'a plus de rôle mécanique : le poids des terrains de recouvrement est reporté sur les piliers et masses rocheuses proches et une zone de fragilité apparaît au niveau du pilier « disparu ».



Illustration 23 : Illustration des 4 classes de stabilité des piliers

Les investigations ont permis de qualifier l'état de stabilité de plus de 1200 piliers, répartis dans les 10 carrières souterraines diagnostiquées. Tous ces piliers ont été photographiés pour réaliser, à l'avenir et si besoin, une surveillance visuelle.

4.3.2. Instabilités de la voûte

Les instabilités de la voûte se manifestent, de manière croissante par : les fractures mécaniques, les décollements de 1^{er} banc, les chutes de 1^{er} banc de toit, les ébauches de cloches de fontis (remontées de voûte / chutes de toit multiples), les cloches de fontis et les fontis ouverts en surface. Il est possible de différencier ces instabilités en fonction de leur état d'évolution, et de leur susceptibilité d'engendrer des désordres en surface à plus ou moins court terme :

- *Les instabilités peu évoluées* : il s'agit des fractures mécaniques, des décollements de 1^{er} banc et des chutes de 1^{er} banc de toit. Sauf cas exceptionnel (recouvrement très faible par exemple), ces phénomènes ne sont pas susceptibles d'engendrer des désordres en surface à court terme, mais elles reflètent un premier stade d'instabilité de la voûte. En outre, elles peuvent représenter un danger potentiel pour les intervenants en souterrain ;
- *Les instabilités évoluées* : il s'agit des chutes de toit multiples évoluant en cloche de fontis (ébauches de cloches de fontis), des cloches de fontis et des fontis ouverts en surface qui correspondent au stade ultime de l'évolution d'un désordre lié à la voûte. Contrairement aux instabilités peu évoluées, ces instabilités sont susceptibles d'engendrer des effondrements ou des affaissements en surface à plus ou moins court terme.

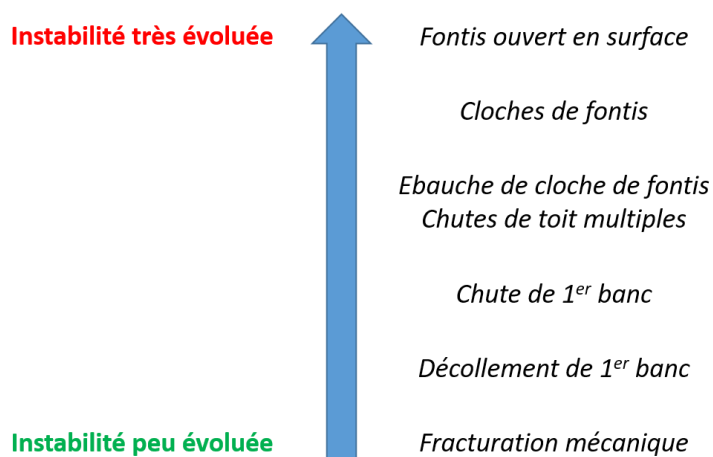


Illustration 24 : Stade d'évolution des instabilités de la voûte

Ces instabilités ont été nommées DXX sur les plans détaillés des diagnostics, et sont associés à un code couleur en fonction de leur typologie. Chaque instabilité a fait l'objet d'une description détaillée : dimensions (longueur, largeur), ouverture (pour les décollements de 1^{er} banc), hauteur de remontée de voûte, commentaire. A l'instar des piliers, toutes les instabilités de toit (hors fractures mécaniques) ont été systématiquement photographiées pour permettre de réaliser, si besoin, une surveillance visuelle de leur évolution.

L'examen de la voûte des 10 carrières souterraines a ainsi permis d'identifier 502 instabilités de toit, dont 14 fontis ouverts en surface. L'ensemble de ces informations a été bancarisé sous SIG dans la base de données dédiée.



Illustration 25 : Exemple d'instabilité « évoluée » dans la carrière des Petites Hayes (Coulonges-sur-Sarthe – Orne)

4.3.3. Diaclases et conduits karstiques

Les massifs rocheux dans lesquels ont été creusées les carrières souterraines sont traversés par un réseau plus ou moins dense de diaclases et de conduits karstiques verticaux, obliques, ou horizontaux.

La densité de fracture joue un rôle notable sur la stabilité de la voûte et des piliers. Les zones de croisement de fractures et/ou les secteurs densément fracturés sont propices au développement d'instabilités de toit telles que des décollements de 1^{er} banc, des chutes de toit, voire des cloches de fontis. C'est le cas de la plupart des instabilités de toit identifiées au cours des diagnostics. Il en va de même pour les conduits karstiques qui peuvent localement favoriser des instabilités de toit (en le découpant de manière prononcée, ce qui implique des porte-à-faux) ou des déboussages de poches de matériaux sensibles à l'eau (remplissage argileux, voire sableux) au niveau du toit, des piliers ou des parois.

A noter également que lorsque les épaisseurs de recouvrement sont faibles, les diaclases et les conduits karstiques sont empruntés par les racines et radicelles des végétaux situés en surface, ce qui peut être à l'origine de zone d'infiltration d'eau préférentielle, généralement néfaste pour la stabilité à long terme.

Le rôle que joue la fracturation et l'état de karstification sur la stabilité de la cavité nécessite d'effectuer le relevé le plus exhaustif possible de l'ensemble des structures visibles en souterrain. Pour chaque structure, les observations suivantes ont été notées sur le terrain et compilées dans la base de données dédiée : typologie (faille, diaclase, conduit karstique, fracture mécanique), azimuth, pendage, rejet éventuel, ouverture, remplissage, présence de suintements, présence de racines ou de radicelles, commentaire général. Les différentes typologies de structures sont différenciées sur les plans des diagnostics et dans la base de données par un code couleur. Les formes karstiques notables ont également été notées ponctuellement sur les plans de diagnostic sous le symbole K.

Au total, 591 fractures et conduits karstiques (linéaires) ont été décrits dans les 10 carrières souterraines diagnostiquées.



Illustration 26 : Exemple d'un conduit karstique vertical en cours de déboufrage dans la carrière des Curiers à Courgeon (Orne)

Cas particulier du « bassin de Rémalard »

Le « bassin de Rémalard » correspond à un secteur tectonique délimité à l'ouest par les failles bordières du fossé d'effondrement de Longny-au-Perche (orientées N040°), au sud par la faille de Bellême (orientée N100°), au nord par la faille de l'Eure (orientée N110°) et à l'est par la faille de la Loupe (orientée N030°). Au sein de ce « bassin », plusieurs petites structures supposées orientées N020° ou N150° ont été cartographiées, les structures N020° étant les relais des structures N150° (Moguedet et al., 2000).

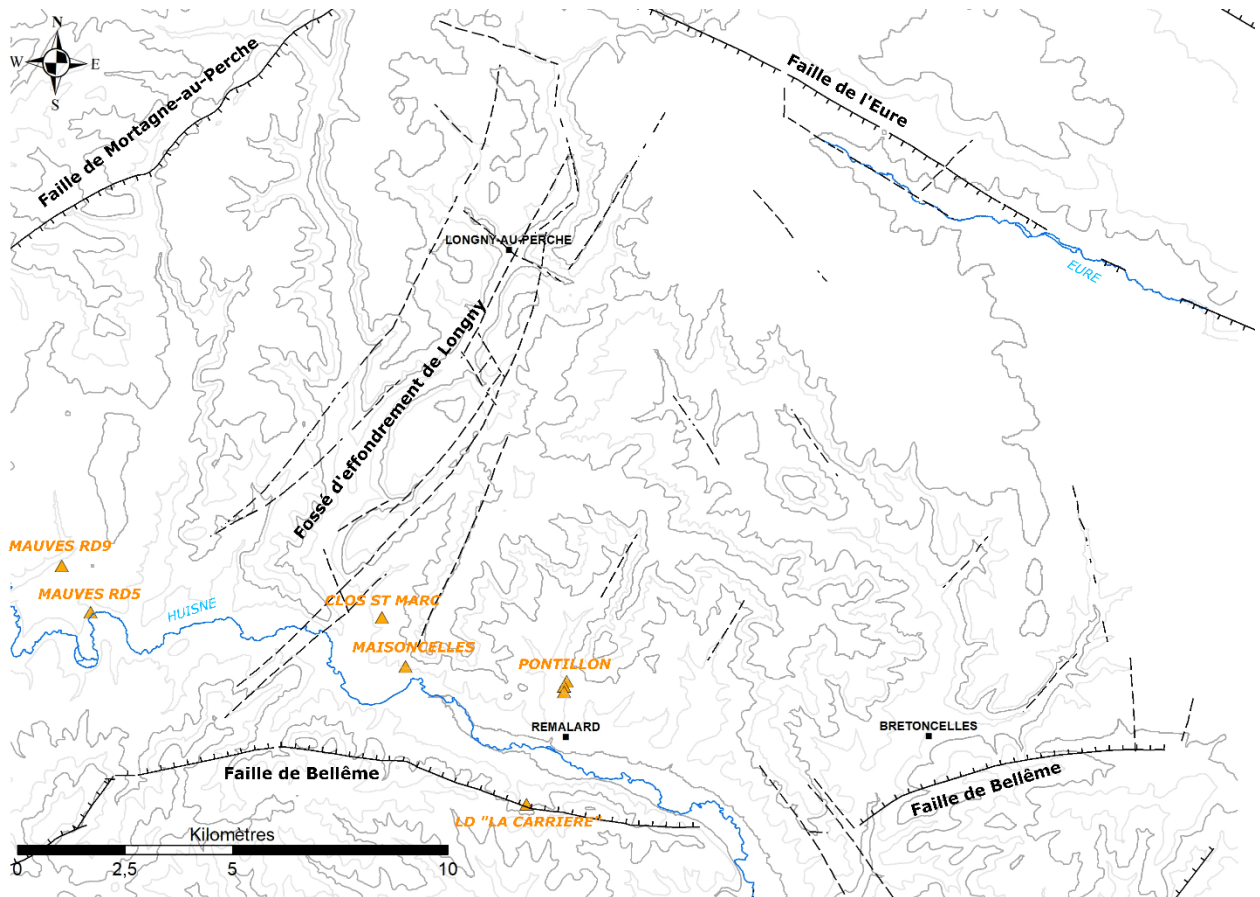


Illustration 27 : Situation des carrières souterraines dans le « bassin tectonique de Rémalard », encadré par les failles de Bellême, de l'Eure, du fossé de Longny et de La Loupe (hors carte). Les failles en tirets sont des structures supposées et/ou masquées. Les failles en trait plein à barbeles sont les structures avérées (barbeles du côté abaissé)

Cette disposition tectonique est sans doute à l'origine de la complexité structurale singulière du massif crayeux propre à ce secteur du Perche. En effet, les relevés structuraux réalisés en souterrain dans les carrières de Rémalard-en-Perche (carrières de « Pontillon » à Rémalard et du lieu-dit « la Carrière » à Bellou-sur-Huisne), et de Cour-Maugis-sur-Huisne (carrières du Clos-Saint-Marc et de Maisoncelle) ont mis en évidence un réseau dense et labyrinthique de diaclases ouvertes et de conduits karstiques verticaux, obliques (pendages de l'ordre de 30 à 70°) ou horizontaux, plus ou moins connectés entre eux, dont l'orientation varie en fonction des accidents tectoniques situés à proximité. Ces observations corroborent celles déjà réalisées dans la champignonnière de la Mansonnière, à Bellou-sur-Huisne (Rodet, 1996). Les conduits karstiques fossiles sont essentiellement comblés d'argiles gris-vertâtre à brunes, glauconieuses, et parfois par du sable grossier quartzueux de couleur ocre, analogue aux faciès de la base de la formation des Sables du Perche (Cénomaniens supérieurs). Leurs dimensions et leurs orientations peuvent être très variables, en passant par exemple d'une ouverture de quelques centimètres à près de 1 mètre, et cela sur quelques mètres de distance.

Cette densité de fracturation et de karstification explique probablement le fait que les craies du secteur de Rémalard étaient réputées de qualité inférieure par les bâtisseurs (Moguedet et al., 2000). Ces observations tendent à confirmer l'importance que peuvent avoir les structures tectoniques sur l'état de fracturation / karstification / altération de la craie, mais également sur l'état de stabilité des carrières souterraines.

4.3.4. Instabilités ponctuelles : écaillages et blocs instables

A l'instar des instabilités de toit « peu évoluées », les instabilités ponctuelles ne sont, en l'état, pas susceptibles d'engendrer de désordres en surface, mais elles représentent un danger pour les intervenants en souterrain. De fait, toutes les instabilités de type « écaillages isolés » ou « blocs instables » ont été nommées (E1, E2 etc.), décrites (taille, ouverture), photographiées et précisément positionnées sur les plans des diagnostics. Cela correspond à près de 500 observations. Dans la plupart des cas, ces instabilités sont situées en bordure d'instabilités plus évoluées, comme des décollements de 1^{er} banc ou des chutes de toit, et régulièrement délimitées par des diaclases ou des fractures mécaniques.

4.3.5. Informations géométriques : limites d'exploitation et zones inaccessibles

Les levés réalisés au scanner laser 3D (cf. chapitre 4.2) permettent de disposer d'un plan de détail de chaque carrière souterraine, mais pour la majorité des cas, ces plans ne reflètent pas entièrement l'emprise originelle des cavités. En effet, certaines carrières présentent des secteurs remblayés et/ou éboulés qui limitent l'accès à des galeries actuellement aveugles. L'un des objectifs du diagnostic de stabilité a été de caractériser, en souterrain, les différentes « limites » de la cavité, pour différencier les fronts de taille des limites supposées au-delà desquelles des vides existent mais où il n'a pas été possible d'intervenir. Pour cela, deux types de contours ont été utilisés pour la digitalisation sous SIG :

- **Les contours avérés** : figurés en trait plein sur les différentes cartographies, il s'agit des « fronts de taille » originels de la carrière. Il s'agit donc de bordures franches qui limitent l'extension de la carrière ;
- **Les contours supposés** : figurés en pointillés, ces contours limitent des zones inaccessibles en souterrain. Il s'agit de secteurs éboulés ou remblayés, au-delà desquels il n'a pas été possible d'intervenir et pour lesquels ni l'extension, ni l'état de stabilité des galeries n'est connu.



Illustration 28 : Exemple d'une limite supposée (ici dans la carrière Pontillon à Rémalard-en-Perche), qui correspond à une zone remblayée inaccessible. L'état des galeries et leur extension au-delà de cette limite ne sont pas connus

4.3.6. Observations diverses

Les observations diverses complètent les informations sur l'état qualitatif des carrières souterraines. Dans le cadre des diagnostics, 8 types d'observations ponctuelles ont été retenues pour être mentionnées sur les plans de diagnostics : les arrivées d'eau depuis le ciel des galeries, les blocs au sol, les canalisations et autres réseaux anthropiques, les racines et radicelles, les secteurs inaccessibles (en complément du contour « supposé ») et les autres éléments remarquables (puits d'aérage, bruits de route, présence de gaz etc...).

4.4. EVALUATION QUALITATIVE DE L'ETAT GENERAL DES CARRIERES SOUTERRAINES

Sur la base des observations réalisées en souterrain, il a été possible d'évaluer qualitativement l'état de chaque carrière souterraine selon 4 classes : bon, médiocre, mauvais, très mauvais. Cette évaluation qualitative de l'état général dépend d'une part de l'état des piliers et de la voûte, mais également de l'impression générale de stabilité perçue par les intervenants lors des visites. Une description 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 généralement 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 2 : Evaluation qualitative de l'état général des carrières souterraines d'après les observations effectuées en souterrain (état de la voûte, des piliers etc.) et de l'impression générale de stabilité ressentie par les intervenants au cours des visites

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

5. Formalisation des observations - Base de données SIG

5.1.1. Comptes rendus détaillés

Pour chaque carrière souterraine diagnostiquée, un rapport détaillé a été rédigé selon les modèles utilisés lors des études de 2014 et 2016, de manière à ce que chacun de ces comptes rendus puisse être utilisé de façon indépendante. Ces rapports permettent notamment de remettre les carrières dans leurs contextes (géographique, géomorphologique, géologique, historique etc.), de lister leurs caractéristiques géométriques (taux de défrètement, emprise, hauteurs de vides etc.), de décrire les principales instabilités identifiées au cours du diagnostic, de présenter les plans détaillés des diagnostics, et de proposer des recommandations en matière de sécurisation.

Ainsi, 10 comptes rendus ont été rédigés. Ils sont présentés en annexe hors-texte de ce rapport :

| | |
|---|----|
| Annexe 1 - Nomenclature spécifique liée aux carrières souterraines | 61 |
| Annexe 2 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Coulonges-sur-Sarthe (n°12) (hors-texte) | 65 |
| Annexe 3 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Boissy-Maugis « Maisoncelle » (n°13) (hors-texte) | 67 |
| Annexe 4 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Bellou-sur-Huisne « la Carrière » (n°14) (hors-texte) | 69 |
| Annexe 5 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité des carrières souterraines de Rémalard « Pontillon » (n°15a, 15b et 15c) (hors-texte) | 71 |
| Annexe 6 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Beaufour-Druval « cimetière mérovingien » (n°16) (hors-texte) | 73 |
| Annexe 7 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Beaufour-Druval « la Butte n°1 » (n°17) (hors-texte) | 75 |
| Annexe 8 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Courgeon « Curiers » (n°18) (hors-texte) | 77 |
| Annexe 9 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Bonnebosq « le Fief Dame Alix » (hors-texte) | 79 |
| Annexe 10 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Sablons-sur-Huisne « Condeau » (n°20) (hors-texte) | 81 |
| Annexe 11 - Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Boissy-Maugis « Clos-Saint-Marc » (n°21) (hors-texte) | 83 |

Ces comptes rendus reflètent donc l'état de stabilité des carrières en 2020, et pourront donc être utilisés si des visites régulières de contrôle sont mises en place à l'avenir.

5.1.2. Base de données SIG et mise en forme cartographique

L'ensemble des observations et des photographies réalisées au cours de la présente étude ont été bancarisées dans une base de données dédiée au projet. Cette base de données a été créée sur le logiciel de SIG ARCGIS® au cours de la tranche précédente (années 2016-2017 – rapport BRGM/RP-68828-FR). Elle contient les informations issues des deux premières phases de

l'étude (années 2014 et 2016-2017), auxquelles s'ajoutent à présent les données issues de la phase 3.

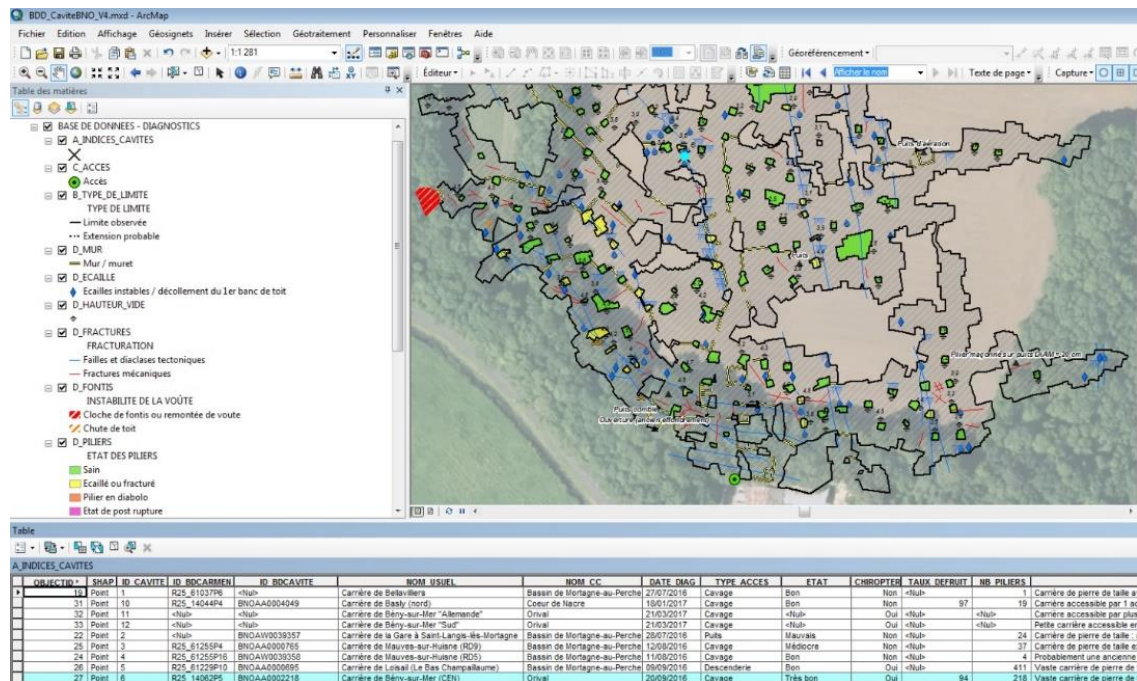


Illustration 29 : Illustration de la base de données dédiée aux diagnostics réalisée sur le logiciel de SIG ARCGIS®

Chaque compte rendu de visite est accompagné d'une cartographie géotechnique qui localise, sur le plan de détail de la carrière souterraine, les instabilités repérées en souterrain, les principales observations et la situation des photographies. Ces plans ont été réalisés à partir des données intégrées dans la base de données SIG dédiée au projet (Illustration 30).

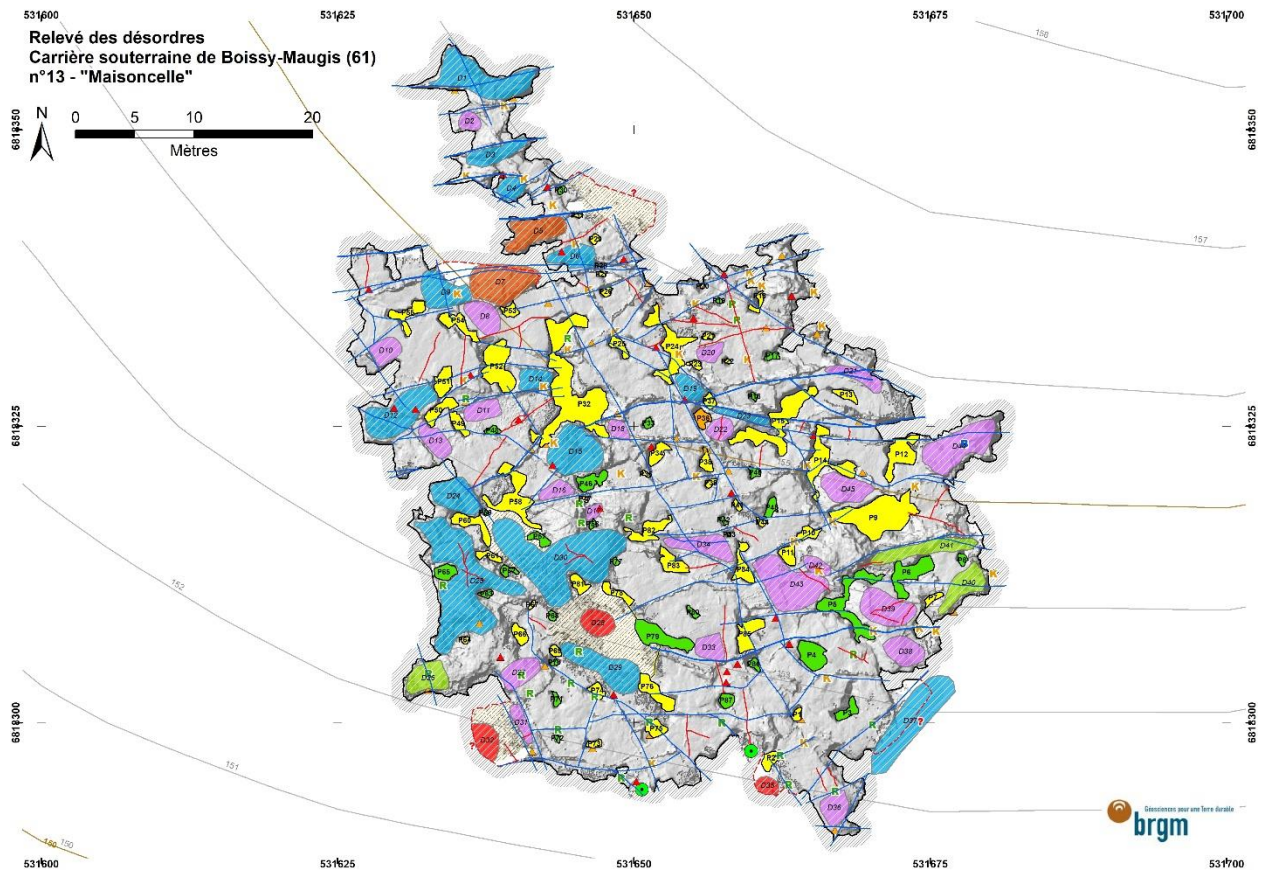


Illustration 30 : Exemple d'un plan de relevé des désordres. Ici, pour la carrière souterraine de Boissy-Maugis « Maisoncelle »

| Informations géométriques | Etat qualitatif des piliers | Instabilités ponctuelles (blocs / écailles) |
|-----------------------------------|--|---|
| ● Accès | ■ Etat de post rupture | ▲ Centimétrique |
| — Contour fini (front de taille) | ■ Piliers en diabolo ou très fracturés | ▲ Décimétrique |
| - - - Extension probable | ■ Fracturé ou écaillé | ▲ Métrique |
| — Murs maçonnés / cloisons | ■ Sain | ▲ Décamétrique |
| ■ Emprise (surface de vides) | Instabilités de toit | Observations diverses |
| ■ Zones de remblais | ■ Fontis ouvert en surface | B Blocs au sol |
| Informations géographiques | ■ Cloche de fontis | Inf Suintements / infiltrations d'eau |
| — Courbes de niveau (5 m - NGF) | ■ Ebauche de cloche de fontis | Ca Concrétions carbonatées liées à des infiltrations récurrentes |
| — Courbes de niveau (1 m - NGF) | ■ Chute de 1er banc de toit | K Conduit karstique |
| | ■ Décollement de 1er banc | R Racines végétales ou radicelles |
| | ■ Zone d'instabilités diffuses | ! Autre élément remarquable |
| | Fractures | ? Secteur de cavité non accessible car remblayée / effondrée / ennoyée etc. |
| | — Conduit karstique | |
| | — Diaclase | |
| | — Fractures mécaniques | |

Illustration 31 : Légende des plans de relevés des désordres

5.1.3. Bilan chiffré

Ce projet a donc permis de réaliser les cartographies au scanner laser 3D de 12 carrières souterraines de pierre de taille, ce qui représente le levé de 5,5 ha de vides, dont plus de la moitié correspondent à des données inédites (3 ha).

Sur ces 12 carrières souterraines, 10 ont fait l'objet d'un diagnostic de stabilité de niveau 1 au cours desquels ont été relevés de manière exhaustive l'ensemble des désordres, des instabilités (ponctuelles et surfaciques) et des fractures. Toutes ces informations ont été dûment décrites, photographiées et bancarisées dans une base de données SIG dédiée au projet. A l'issue de ce travail : plus de 1200 piliers ont été qualifiés ; plus de 500 instabilités surfaciques (chutes de toit, fontis, décollements etc.) et autant d'instabilités ponctuelles (écailles et blocs instables) ont été repérées en voûte et sur les parois ; enfin, les relevés structuraux ont permis d'identifier et de décrire près de 600 fractures en termes de nature, de direction, d'ouverture, de remplissage, etc. Les principales informations géométriques sont synthétisées dans le tableau suivant.

| Carrière souterraine | Géologie | Surface de vides (m ²) | Taux de défruitement moyen | Nombre de piliers | H _{moy} vides | Ep. de recouvrement |
|---|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------|-------------------|------------------------|-------------------------|
| Coulonges / Sarthe Petites Hayes | Cénomaniens – craie glauconieuse | 20 800 m ² | 91 % | 413 | 2,3 m | 0,5 – 11 m (moy : 6,5) |
| Boissy-Maugis Maisoncelle | Cénomaniens – craie de Rouen | 1 750 m ² | 90 % | 87 | 1,5 m | 0,8 – 8 m (moy : 3,9) |
| Bellou-sur-Huisne La Carrière | Cénomaniens – craie de Rouen | 1 145 m ² | 96 % | 29 | 1,3 m | 0,2 – 10,3 (moy : 5,2) |
| Rémalard Pontillon « nord » | Cénomaniens – craie de Rouen | 1 560 m ² | 89 % | 23 | 1,8 m | 1 – 14 m (moy : 6,5) |
| Rémalard Pontillon « Grande Carrière » | | 11 720 m ² | 91 % | 304 | 2,1 m | 0,9 – 15 m (moy : 8,2) |
| Rémalard Pontillon « sud » | | 3 700 m ² | 94 % | 100 | 1,6 m | 0 – 10 m (moy : 5,2) |
| Beaufour-Druval Cimetière mérovingien | Cénomaniens – craie glauconieuse | 4 100 m ² | 89 % | 89 | 1,6 m | 0 – 20,9 m (moy : 10,8) |
| Beaufour-Druval La Butte n°1 | Cénomaniens – craie glauconieuse | 320 m ² | 93 % | 8 | 1,6 m | 8 – 12 m (moy : 9,8) |
| Courgeon Curiers | Cénomaniens – craie de Rouen | 925 m ² | 90 % | 18 | 1,6 m | 1,4 – 7,8 m (moy : 4) |
| Bonnebosq Fief Dame Alix | Cénomaniens – craie glauconieuse | 6 800 m ² | 85 % | 87 | 2,1 m | 0 – 20,3 m (moy : 13,9) |
| Sablons sur Huisne Condeau | Cénomaniens – craie de Rouen | 370 m ² | 94 % | 22 | 1,4 m | 1 – 3 m environ |
| Boissy-Maugis Clos Saint Marc | Cénomaniens – craie de Rouen | 2 700 m ² | 92 % | 42 | 1,3 m | 1 – 6 m (moy : 3,1) |

Illustration 32 : Tableau récapitulatif des principales informations géométriques pour les 10 carrières souterraines diagnostiquées (les trois carrières de Pontillon étant considérées comme une seule vaste cavité)

6. Conclusions et perspectives

Dans le cadre de ses missions d'appuis aux politiques publiques, 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 les départements de l'Orne et du Calvados, sur la base de diagnostics de stabilité de niveau 1 (selon le guide de l'IFSTTAR, 2014).

Une première étude (tranche 1 - année 2014) a permis de diagnostiquer une quinzaine de carrières souterraines de pierres de taille, creusées dans les calcaires bathoniens des environs de Caen. Les comptes rendus des visites ont fait l'objet du rapport référencé BRGM/RP-61117-FR).

Une seconde étude (tranche 2 - années 2016-2017), a permis de poursuivre le travail initié en 2014 en menant des investigations dans d'autres secteurs géographiques, comme le Perche, le pays d'Auge ou le nord de la plaine de Caen. Ce travail, mené à l'échelle de la communauté de communes pour répondre aux demandes liées à la réforme territoriale de 2016, a permis d'améliorer les connaissances sur les carrières souterraines abandonnées dans les terrains sédimentaires du Calvados et de l'Orne (Bathonien et Cénomaniens) en réalisant notamment des investigations en surface et les diagnostics de 10 carrières souterraines creusées dans les craies du Perche ou les calcaires de la plaine de Caen. Cette étude a fait l'objet d'un rapport référencé BRGM/RP-66828-FR.

La mise en évidence au cours de la tranche 2 de plusieurs carrières en mauvais état a montré la nécessité de continuer les efforts menés depuis plus de 5 ans pour améliorer les connaissances sur ces vieilles carrières souterraines, notamment via la poursuite des investigations de terrain et des diagnostics de stabilité de niveau 1. C'est dans ce cadre qu'a été proposé la poursuite des investigations, objet du présent rapport. Les objectifs de cette troisième tranche étaient les suivants :

- Poursuivre les investigations de surface pour repérer les entrées des carrières souterraines de pierre de taille sur les communautés de communes les plus concernées par la problématique de cavité et non traitées au cours de la tranche 2 (secteur nord du Bassin de Mortagne-au-Perche, Perche Rémalardais et Haut-Perche dans l'Orne, communauté de communes de Cambremer dans le Calvados) ;
- Réaliser les plans de détail et les diagnostics de stabilité de niveau 1 des carrières souterraines dont les entrées auront été identifiées sur le terrain ;
- Poursuivre l'alimentation de la base de données dédiée aux diagnostics ;
- Faire état des observations réalisées et formuler les recommandations nécessaires en matière de sécurisation et des enjeux qui les surplombent.

La première étape du projet a consisté à réaliser des recherches bibliographiques et des investigations de surface pour retrouver les entrées de carrières souterraines, pour lesquelles il est possible de réaliser un diagnostic de stabilité. Ce travail, réalisé à l'échelle de la commune sur les 4 communautés de communes retenues, a permis d'identifier 17 carrières souterraines accessibles (sur les 317 indices visités sur le terrain). Sur ces 17 carrières souterraines, 8 ont été retenues sur la base notamment de la nature des enjeux potentiellement sous-cavés et d'une évaluation préliminaire de leur état de stabilité. A cela s'ajoutent deux autres carrières situées

hors des communautés de communes étudiées mais directement proposées par la DDT de l'Orne.

Dans un second temps, ces 10 carrières souterraines ont fait l'objet d'investigations en souterrain avec pour objectifs de :

1. Réaliser un plan de détail de la cavité à l'aide de scanners laser 3D ;
2. Réaliser un diagnostic de niveau 1 ;

Les visites de ces carrières ont ensuite abouti à la rédaction de 10 comptes rendus détaillés qui viennent compléter ceux réalisés en 2014 et en 2016-2017 (rapports BRGM/RP-64117-FR et RP-66828-FR). Ces comptes rendus permettent d'une part de faire un état des lieux de la stabilité des carrières souterraines diagnostiquées, et d'autre part, en fonction de leur état géotechnique, de proposer des recommandations en matière de sécurisation.

L'ensemble des observations réalisées sur le terrain ont été compilées dans la base de données SIG créée au cours de la tranche 2. Elles ont par ailleurs été utilisées pour mettre à jour la base de données nationale des cavités souterraines BDCavité, gérée par le BRGM.

6.1.1. Principaux résultats

Les travaux menés au cours de cette troisième tranche ont permis de dresser les plans de **12** carrières souterraines au scanner laser 3D, dont **10** ont fait l'objet d'un diagnostic de stabilité. Parmi ces 12 plans, **8** sont inédits, c'est-à-dire qu'il s'agit vraisemblablement des premiers plans réalisés dans la mesure où aucun plan historique n'a été retrouvé dans les archives. Pour les 4 autres carrières souterraines qui disposaient déjà d'un plan, les nouveaux levés géométriques 3D ont permis de les compléter et parfois de les préciser, notamment en ce qui concerne les épaisseurs de recouvrement, les hauteurs de vides, la situation ou la forme de certains piliers etc. Ce travail a permis de cartographier plus de **5,5** ha de vides, dont plus de **3** ha inédits. Ces levés représentent plus de 20 kilomètres de contours.

Les observations réalisées au cours des diagnostics ont permis d'identifier plus de 1500 désordres, instabilités ou fractures, tous caractérisés (typologie, ouverture etc.), décrits, précisément positionnés sur les plans des cavités et dûment photographiés (numérotation, localisation et orientation de la photographie). Ce travail a également été réalisé sur l'ensemble des piliers, qui ont tous été décrits et photographiés (plus de 1200 piliers étudiés).

6.1.2. Analyse par secteur géographique

A partir de ces données, il a été possible d'évaluer qualitativement l'état de stabilité de ces 10 carrières (cf. 4.4), qui varie de bon à mauvais, et d'en faire une analyse succincte par secteur géographique.

Les carrières souterraines du pays d'Auge

3 carrières souterraines de pierres de taille ont été étudiées dans le pays d'Auge. Toutes sont creusées dans les craies cénomaniennes (craie glauconieuse). L'état général de ces carrières, creusées selon la méthode des chambres et piliers est bon. Elles sont accessibles par des cavages creusés dans des versants raides. Les épaisseurs de recouvrement sont de l'ordre d'une dizaine de mètres. A noter que la seule cavité à la géométrie « ordonnée » (dimensions régulières

des chambres et des piliers) étudiée ici est située dans ce secteur, sur la commune de Bonnebosq.

Les carrières souterraines du Perche Ornaïs

7 carrières souterraines de pierres de taille ont été étudiées dans le perche Ornaïs. Leur état varie de bon à mauvais, ce qui confirme les conclusions émises à la fin de la deuxième tranche (cf. rapport BRGM/RP-66828-FR), à savoir qu'il existe une grande variabilité de l'état de stabilité des carrières creusées dans les craies cénomaniennes du Perche (essentiellement la craie de Rouen). D'autre part, ces cavités sont généralement accessibles depuis des descenderies, ce qui induit des épaisseurs de recouvrement faibles à très faibles (parfois réduites à quelques décimètres). Leurs géométries sont désordonnées, avec des piliers de taille et de géométrie très irrégulières. Les instabilités de voûte sont parfois nombreuses (près de 200 chutes de 1^{er} banc de toit ou décollements identifiés pour la seule carrière de Rémalard « Pontillon ») et les fontis ouverts en surface ne sont pas rares. Cela se confirme dans le paysage, puisque les investigations en surface menées dans le bassin de Mortagne-au-Perche, le Haut-Perche et le Perche Rémalardais ont mis en évidence un certain nombre d'affaissements voire d'effondrements plus ou moins importants liés à la ruine de carrières souterraines. Un phénomène d'effondrement généralisé a également été mis en évidence sur la carrière de Coulonges-sur-Sarthe.

Cet état d'instabilité est en partie à mettre en relation avec la fracturation naturelle et la karstification du massif crayeux, qui devient très significative dans certains secteurs du Perche. C'est le cas notamment dans le « bassin de Rémalard » délimité par des accidents tectoniques, au sein duquel la densité de fracturation et de karstification atteint un niveau singulier. Les carrières qui y ont été creusées présentent des états médiocres à mauvais, et cela explique vraisemblablement que les craies de Rémalard étaient considérées de qualité inférieure par les bâtisseurs.

Ces deux secteurs géographiques sont ruraux : les enjeux en surface y sont généralement limités. Les enjeux bâtis (maisons) sont rares. Sur les 10 carrières visitées au cours de cette étude, les enjeux les plus importants sont des voiries (routes départementales (Coulonges-sur-Sarthe)) ou routes communales (Rémalard, Bellou-sur-Huisne, Beaufour-Druval). Toutes ces cavités servent par ailleurs de sites d'hibernation pour les chiroptères : elles font l'objet de visites régulières par des naturalistes pour le comptage des animaux, ce qui constitue un enjeu non négligeable.

6.1.3. Perspectives et recommandations

L'état général des carrières varie donc de bon à mauvais, avec des cavités généralement en plus mauvais état et moins profondes dans les craies du Perche que dans celles du pays d'Auge. Toutefois, ces cavités sont toutes situées dans des zones rurales, que ce soit dans le Perche ou le Pays d'Auge, où les enjeux en surface restent pour la plupart relativement limités.

A l'heure actuelle, les investigations de surface réalisées sur les 4 communautés de communes n'ont pas permis de réaliser un inventaire complètement exhaustif de l'ensemble des carrières souterraines présentes sur ces secteurs. D'autre part, les diagnostics ont porté sur 10 carrières souterraines sur les 17 accessibles. Enfin, d'autres communautés de communes, non retenues dans le cadre de cette étude, semblent également concernées par un certain nombre de carrières souterraines, dont certaines en mauvais état. C'est le cas par exemple de la communauté de communes de la Haute vallée de la Sarthe, sur laquelle est située la carrière de Coulonges-sur-

Sarthe, mais également celle de Falaise où sont situées les carrières d'Aubigny, de Saint-Pierre-Canivet etc.).

Pour ces raisons, nous recommandons de poursuivre le programme pour continuer à acquérir des informations sur les carrières souterraines abandonnées de l'ex-Basse-Normandie, nécessaire pour la gestion du risque « cavité ».

6.1.4. 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, ainsi que celles étudiées au cours des tranches 1 et 2.

| 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. | PRINCIPALES RECOMMANDATIONS | 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 forage de nouveaux puits d'accès ou d'aérage 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 descendie 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 | 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 | 61 | Haute Vallée de la Sarthe | Coulonges-sur-Sarthe Petites Hayes | BNOAA0000263 R25_61126P6 | MEDIOCRE MAUVAIS | Vaste carrière souterraine de pierre de taille exploitée par chambres et piliers pour l'extraction de la craie glauconieuse Accès par descenterie. Accès fermé par le GMN / CEN pour la préservation des chauves-souris (site Natura 2000) Etat général médiocre à mauvais, en raison notamment de larges instabilités de voûte susceptibles d'engendrer des effondrements en surface (épaisseurs de recouvrement < 2 m au droit de ces instabilités) | Effondrement généralisé par rupture de piliers Occurrence d'effondrements localisés liés à des remontées de cloches de fontis Chutes de 1 ^{er} banc de toit et d'écaillies isolées | 0,5 – 11 m | Probablement XVII ^{ème} siècle | Réaliser des investigations géophysiques pour vérifier la présence de galeries aveugles vers le sud (vers la RD911) et l'est (vers la RD509) Vigilance de la part d'éventuels intervenants en souterrain Information auprès des propriétaires du risque de mouvement de terrain, notamment où les épaisseurs de recouvrement sont < 2 m Remblayer les effondrements ouverts en surface à la limite entre les parcelles OD 0390 et OD 0395 | 3 ans | 2020 |
| 13 | 61 | Perche Rémalardais | Boissy-Maugis Maisoncelle | BNOAA0000133 R25_61050P2 | MEDIOCRE | Carrière souterraine de pierre de taille exploitée par chambres et piliers pour l'extraction de la craie de Rouen Accès par un petit cavage ouvert et visible depuis un sentier Carrière en état médiocre, creusée dans un massif crayeux densément fracturé ce qui favorise les instabilités de piliers et les chutes de toit. Epaisseurs de recouvrement généralement faibles à très faibles | Remontée d'une cloche de fontis en surface Ruine de pilier très fracturés Chutes de toit | 0,8 – 8 m | Inconnu | Sécurisation de l'accès Vigilance de la part d'éventuels intervenants en souterrain Information auprès des propriétaires du risque de mouvement de terrain | 5 ans | 2020 |
| 14 | 61 | Perche Rémalardais | Bellou-sur-Huisne « la Carrière » | BNOAW0039361 - | BON MEDIOCRE | Carrière souterraine de pierre de taille exploitée par chambres et piliers pour l'extraction de la craie de Rouen Accès par descenterie, ouvert Etat bon à médiocre, épaisseurs de recouvrement parfois inférieures à 1 m | Remontée de fontis en surface Ruine de piliers très fracturés | 0,2 – 10 m | XVIII ^{ème} siècle | Sécurisation de l'accès Vigilance de la part d'éventuels intervenants en souterrain Information auprès des propriétaires du risque de mouvement de terrain, notamment où les épaisseurs de recouvrement sont < 1 m | 5 ans | 2020 |
| 15 | 61 | Perche Rémalardais | Rémalard « Pontillon » | BNOAA0000485 / 460 / 461 R25_61345P1 / P2 / P23 / P26 | BON MEDIOCRE | Réseau de trois grandes carrières souterraines de pierre de taille exploitées par chambres et piliers pour l'extraction de la craie glauconieuse Accès par trois descenteries situées sur des parcelles privées Etat général bon pour la carrière « nord » et médiocre pour la « grande carrière » et la carrière « sud » | Effondrements ou affaissements liés à la ruine de piliers très fracturés Effondrements localisés liés à la remontée de cloches de fontis Chutes de toit ou d'écaillies isolées | 1 – 15 m | Probablement XVIII ^{ème} siècle Active en 1869 | Vigilance de la part des intervenants en souterrain – ne pas circuler sous les instabilités de toit de type décollement de 1 ^{er} banc ou écaillages isolés Vigilance sur l'apparition de fissures, tassements ou effondrements sur la petite route communale qui relie la RD11 au bourg de Pontillon Prévenir les propriétaires et/ou des exploitants des parcelles agricoles sous-cavées du risque de mouvement de terrain | 5 ans | 2020 |
| 16 | 14 | Cambremer | Beaufour-Druval Cimetière mérovingien | BNOAA0004034 R25_14231P6 | BON | Carrière souterraine de pierre de taille exploitée par chambres et piliers pour l'extraction de la craie glauconieuse Accès par cavage. Accès fermé par le GMN / CEN pour la préservation des chauves-souris Bon état général | Chutes de toit ou d'écaillies isolées | 0 – 20,9 m | Inconnu | Vigilance de la part des intervenants en souterrain – ne pas circuler sous les instabilités de toit de type décollement de 1 ^{er} banc ou écaillages isolés | 5 ans | 2020 |
| 17 | 14 | Cambremer | Beaufour-Druval « la Butte n°1 » | BNOAA0004033 R25_14231P45 | BON | Petite carrière souterraine de pierre de taille exploitée par chambres et piliers pour l'extraction de la craie glauconieuse Accès par cavage, ouvert dans une pâture à vache Bon état général | Décollements de 1 ^{er} banc de toit et écaillages isolés | 8 – 12 m | Inconnu | RAS | 5 ans | 2020 |
| 18 | 61 | Bassin de Mortagne-au-Perche | Courgeon « Curiers » | BNOAA0001136 R25_61129P35 | BON | Petite carrière souterraine de pierre de taille exploitée par chambres et piliers pour l'extraction de la craie glauconieuse Accès par une descenterie ouverte mais sur une parcelle privée Bon état général, mais présence d'instabilités susceptibles d'engendrer des désordres en surface | Effondrement localisés liés à des déboussages karstiques Mouvements de terrain au droit de la grande instabilité D3 Chutes d'écaillies isolées | 1,4 – 7,8 m | Inconnu | Vigilance sur l'apparition de mouvements de terrain au droit de l'instabilité D3, située sous un carré potager Vigilance de la part des intervenants en souterrain – ne pas circuler sous les instabilités ponctuelles (écaillages isolés, blocs instables) | 5 ans | 2020 |

| | | | | | | | | | | | | |
|----|----|-----------------------|---|------------------------------|---------------------|---|--|------------|--|--|----------|------|
| 19 | 14 | Cambremer | Bonnebosq « le Fief Dame Alix » | BNOAA0004041 R25_14083P10 | BON | Carrière souterraine de pierre de taille exploitée par chambres et piliers pour l'extraction de la craie glauconieuse Accès par cavage dans un front de taille, ouvert et visible depuis la route Bon état général, mais nombreux décollements de 1 ^{er} banc et/ou d'écaillages isolés | Décollements de 1 ^{er} bancs et d'écaillages isolés | 0 – 20,3 m | Probablement XVIII ^{ème} siècle | Sécurisation des accès Vigilance de la part des intervenants en souterrain – ne pas circuler sous les instabilités de toit de type décollement de 1 ^{er} banc ou écaillages isolés | 5 ans | 2020 |
| 20 | 61 | Perche Rémalardais | Sablons-sur-Huisne Condeau | BNOAW0039362 R25_61115P7 | MEDIOCRE | Petite carrière souterraine de pierre de taille exploitée par chambres et piliers pour l'extraction de la craie de Rouen Accès par un large cavage ouvert à flanc de coteau, visible depuis la route départementale Etat général médiocre, en raison de la fracturation mécanique de la voûte et des piliers | Ruine de piliers très fracturés Chutes de toit, de blocs ou d'écaillages isolés | 1 - 3 m | Inconnu | Sécurisation des accès Ne pas circuler avec des engins agricoles lourd au droit des vides Vigilance de la part des intervenants en souterrain – ne pas circuler sous les instabilités de toit de type décollement de 1 ^{er} banc ou écaillages isolés | 5 ans | 2020 |
| 21 | 61 | Perche Rémalardais | Boissy-Maugis Clos-Saint-Marc | BNOAA0000135 R25_61050P4 | MAUVAIS | Carrière souterraine de pierre de taille exploitée par chambres et piliers pour l'extraction de la craie de Rouen Accessible par une descendrière en bordure d'un chemin carrossable Carrière en mauvais état général, creusée dans un massif crayeux densément fracturé et karstifié ce qui favorise les instabilités de toit Epaisseurs de recouvrement faibles à très faibles | Remontée de cloche de fontis en surface Chutes de 1 ^{er} banc de toit et d'écaillages isolés | 1 – 6 m | Inconnu | Information auprès des propriétaires du risque de mouvement de terrain, notamment où les épaisseurs de recouvrement sont faibles Vigilance sur l'apparition de désordres sur le chemin communal Vigilance de la part d'éventuels intervenants en souterrain | 3 ans | 2020 |
| 22 | 14 | Cambremer | Beaufour-Druval Lieu Gallet | | NON REALISE | Diagnostic non réalisé – uniquement levé géométrique 3D | - | - | Inconnu | - | - | - |
| 23 | 14 | Cambremer | Auvillars « la Vallée aux Tanneurs » | | NON REALISE | Diagnostic non réalisé – uniquement levé géométrique 3D | - | - | Inconnu | - | - | - |
| X | 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 |
| X | 14 | Caen-la-Mer | Fleury-sur-Orne | | BON MAUVAIS | Accès par cavage | | | Période médiévale | Diagnostic géotechnique complémentaire | | 2014 |
| X | 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 |
| X | 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 |
| X | 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. 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.

IFSTTAR (2014) – Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées. Guide méthodologique. Septembre 2014

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

MEIRE B., PLAT E, MILESI 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.

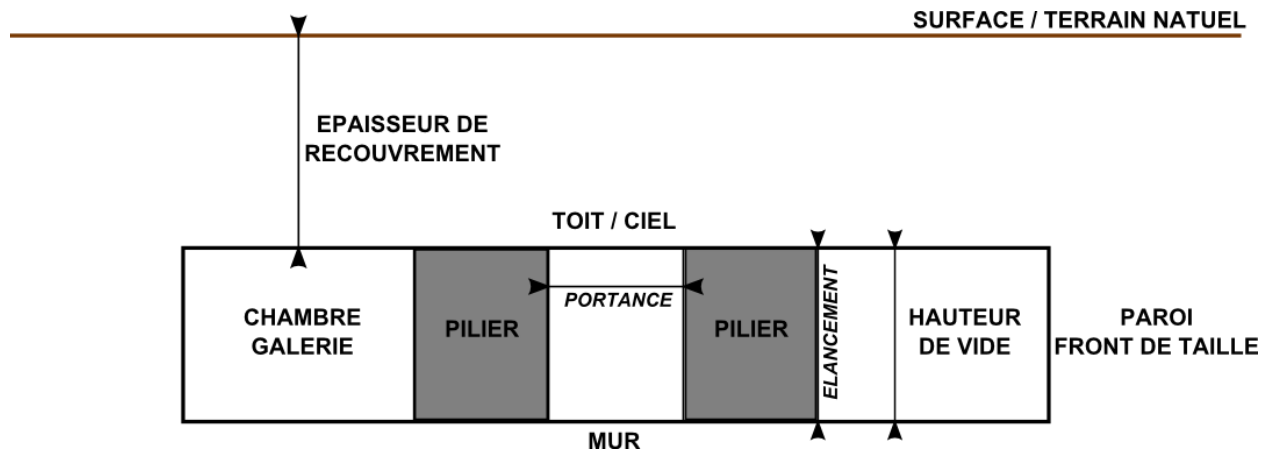
PLAT E., avec la collaboration de COUEFFE R., MATHON C., PICOT J. (2014) – Evaluation des risques liés au vieillissement des carrières souterraines de Basse-Normandie. Année 2014. Rapport BRGM/RP-64117-FR, 198 p., 23 ill., 5 ann.
IFSTTAR (2014) – Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines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

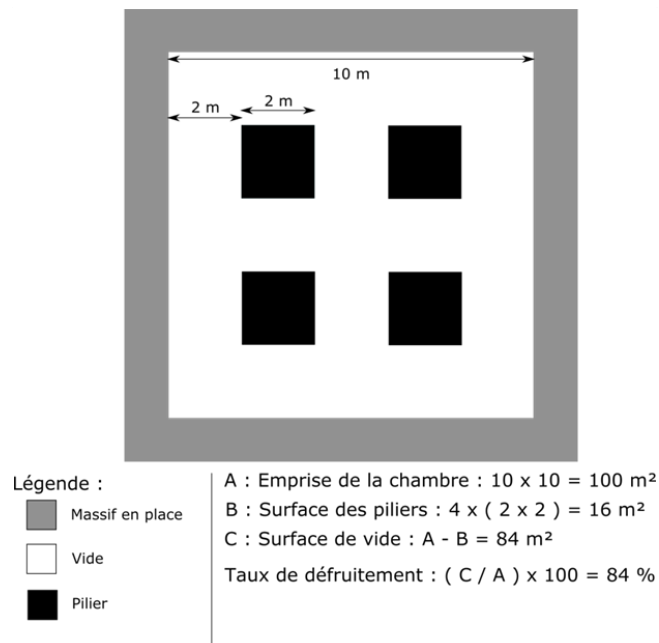


Nomenclature spécifique aux cavités souterraines

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 Coulonges-sur-Sarthe (n°12) (hors-texte)

Annexe 3

-

Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Boissy-Maugis « Maisoncelle » (n°13) (hors-texte)

Annexe 4

-

Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Bellou-sur-Huisne « la Carrière » (n°14) (hors-texte)

Annexe 5

-

Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité des carrières souterraines de Rémalard « Pontillon » (n°15a, 15b et 15c) (hors-texte)

Annexe 6

-

Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Beaufour-Druval « cimetière mérovingien » (n°16) (hors-texte)

Annexe 7

-

Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Beaufour-Druval « la Butte n°1 » (n°17) (hors-texte)

Annexe 8

-

Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Courgeon « Curiers » (n°18) (hors-texte)

Annexe 9

-

Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Bonnebosq « le Fief Dame Alix » (hors-texte)

Annexe 10

-

Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Sablons-sur-Huisne « Condeau » (n°20) (hors-texte)

Annexe 11

-

Compte rendu détaillé du diagnostic de stabilité de la carrière souterraine de Boissy-Maugis « Clos-Saint- Marc » (n°21) (hors-texte)



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Normandie

Parc de la Vatine

14 route d'Houpeville

76130 – Mont-Saint-Aignan – France

Tél. : 02 35 60 12 00