

SOMMAIRE

1 - INTRODUCTION : OBJECTIFS DE L'ETUDE	5
2 - PRESENTATION DU CONTEXTE	7
2.1 - Géologie	7
2.1.1 - Des craies du Crétacé Supérieur	7
2.1.2 - La formation à silex (Rs)	7
2.1.3 - Les limons (LP)	7
2.1.4 - Les colluvions (C ou CLP)	8
2.2 - Hydrogéologie	10
2.2.1 - Les nappes des formations superficielles	10
2.2.2 - La nappe de la craie	10
3 - DETERMINATION ET REGLES DE LOCALISATION DES CAVITES SOUTERRAINES	11
3.1 - Typologie des indices recensés	11
3.1.1 - Les carrières souterraines	11
3.1.2 - Les bétoires.....	13
3.1.3 - Les puisards – puits filtrants.....	14
3.1.4 - Les puisards à chambre	14
3.1.5 - Les puits à eau	15
3.2 - Règles de localisation	15
3.2.1 - Les marnières	15
3.2.2 - Les bétoires.....	17
3.2.3 - Les puits à eau	18
3.2.4 - Les puisards et puits filtrants.....	18
4 - DANGERS, IMPACTS ET REGLEMENTATION LIES AUX CAVITES SOUTERRAINES	19
4.1 - Risques humains, risques matériels et environnementaux.....	19
4.2 - Quelques points réglementaires liés à la problématique des cavités	22
4.2.1 - La responsabilité civile du préfet, du maire et de toute personne à informer de l'existence d'une marnière	22
4.2.2 - Le maire face aux effondrements	22
4.2.3 - La responsabilité du maire	23
4.2.4 - Le maire, les cavités souterraines et l'urbanisme.....	23
4.2.5 - Périmètre de sécurité	23
4.2.6 - Législation régissant l'exploitation des carrières	24
5 - METHODOLOGIE DU RECENSEMENT DES INDICES DE CAVITES SOUTERRAINES	25
5.1 - Enquête Bibliographique	25
5.1.1 - Collecte et exploitation des documents d'archives anciens et de cartes anciennes	25
5.1.2 - Collecte et exploitation des documents d'archives récents	27
5.2 - Exploitation des photographies aériennes	28
5.3 - Enquête locale.....	29
5.4 - Reconnaissance de terrain	29
5.4.1 - Recherche de nouveaux indices auprès de la population et des responsables de la commune.....	29

5.4.2 - Modalités de l'enquête terrain	29
5.4.3 - Compte-rendu de l'étude.....	31
6 - RESULTATS DE L'ETUDE	33
6.1 - Les réponses au questionnaire.....	33
6.2 - Typologie des indices de cavités souterraines	34
6.3 - Remarques	35
6.4 - Recommandations	36
7 - DEMARCHES POUR LEVER UN INDICE	37
7.1 - Les méthodes de prospection géophysique.....	37
7.1.1 - La microgravimétrie	37
7.1.2 - Les méthodes sismiques	38
7.1.3 - Les méthodes de géophysique électriques	38
7.1.4 - Les méthodes électromagnétiques.....	39
7.1.5 - Etude géophysique électrique – dispositif Wenner	39
7.1.6 - La « polarisation spontanée »	40
7.2 - Le décapage.....	43
7.3 - Les forages	44
7.4 - Réalisation d'un puits et d'une expertise de la cavité	45
7.5 - Les travaux de comblement de la cavité	46
8 - LA DEMARCHE D'ALISE POUR LEVER UN INDICE	47
8.1 - Assistance à maîtrise d'ouvrage.....	47
8.2 - Maîtrise d'œuvre.....	48
9 - CONCLUSION	49

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation de la commune de Darnétal	6
Figure 2 : Coupe géologique type du plateau crayeux en Seine-Maritime	8
Figure 3 : Extrait de la carte géologique de Rouen (Est) (Carte n°100).....	9
Figure 4 : Vues en coupe et en plan d'une marnière.....	12
Figure 5 : Vues en coupe et en plan d'une marnière.....	12
Figure 6 : Vue en coupe d'une bétoire	13
Figure 7 : Les différentes phases d'évolution d'une bétoire.	14
Figure 8 : Formation d'un fontis, vidange d'une racine d'altération.....	20
Figure 9 : Extrait du cadastre napoléonien de Darnétal (Tableau d'assemblage)	26
Figure 10 : Exemple de fiche signalétique	32
Figure 11 : Présentation des résultats de la consultation	33
Figure 12 : Typologie des indices de cavités souterraines	34
Figure 13 : Profil passant par une bétoire active et 2 bétoires bouchées par l'exploitant.....	41
Figure 14 : Profil 3D de polarisation spontanée dans un talweg du secteur de Bouville	41
Figure 15 : Cartographie 2D d'une marnière du secteur de Bouville	42

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Précision des indices	35
---	----

TABLE DES PHOTOGRAPHIES

Photographie n° 1 : Axe du talweg, bétoires en chapelet	17
Photographie n° 2 : Puits à eau	18
Photographie n° 3 : Effondrement d'une cheminée	19
Photographie n° 4 : Exemples de dangers liés aux cavités	21
Photographie n° 5 : Indice direct lié à un puits protégé par une plaque	30
Photographie n° 6 : Indices directs liés à la présence de remblais.....	30
Photographie n° 7 : Indice de surface de cavités souterraines par changement de végétation	30
Photographie n° 8 : Indice lié à la présence d'une décharge sauvage	31
Photographies n° 9: Découverte d'un puits de marnière lors d'un décapage	43
Photographies n° 10: Exemple de forages	44
Photographies n° 11: Réalisation d'un puits et expertise d'une marnière	45
Photographies n° 12: Remblaiement d'une marnière.....	46

1 - INTRODUCTION : OBJECTIFS DE L'ETUDE

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la politique de prévention des risques naturels et technologiques.

En effet, l'article L563-6 (*inséré par la Loi n° 2003-699 du 30 juillet 2003 art. 43 du Journal Officiel du 31 juillet 2003*) paragraphe I demande que « **les communes ou leurs groupements compétents en matière de documents d'urbanisme élaborent, si besoin, des cartes délimitant les sites où sont situées des cavités souterraines et des marnières susceptibles de provoquer l'effondrement du sol** ».

Dans ce cadre réglementaire, la commune de Darnétal a décidé de confier cette étude au bureau d'études ALISE.

Cette commune est localisée en Seine-Maritime (76), au Sud-Est du département, et à l'Est de Rouen (cf. Figure 1).

Le recensement des indices de cavités souterraines est élaboré selon la démarche suivante :

- Phase 1 – Enquête bibliographique,
- Phase 2 – Exploitation des photographies aériennes,
- Phase 3 – Enquête locale,
- Phase 4 – Reconnaissance de terrain.

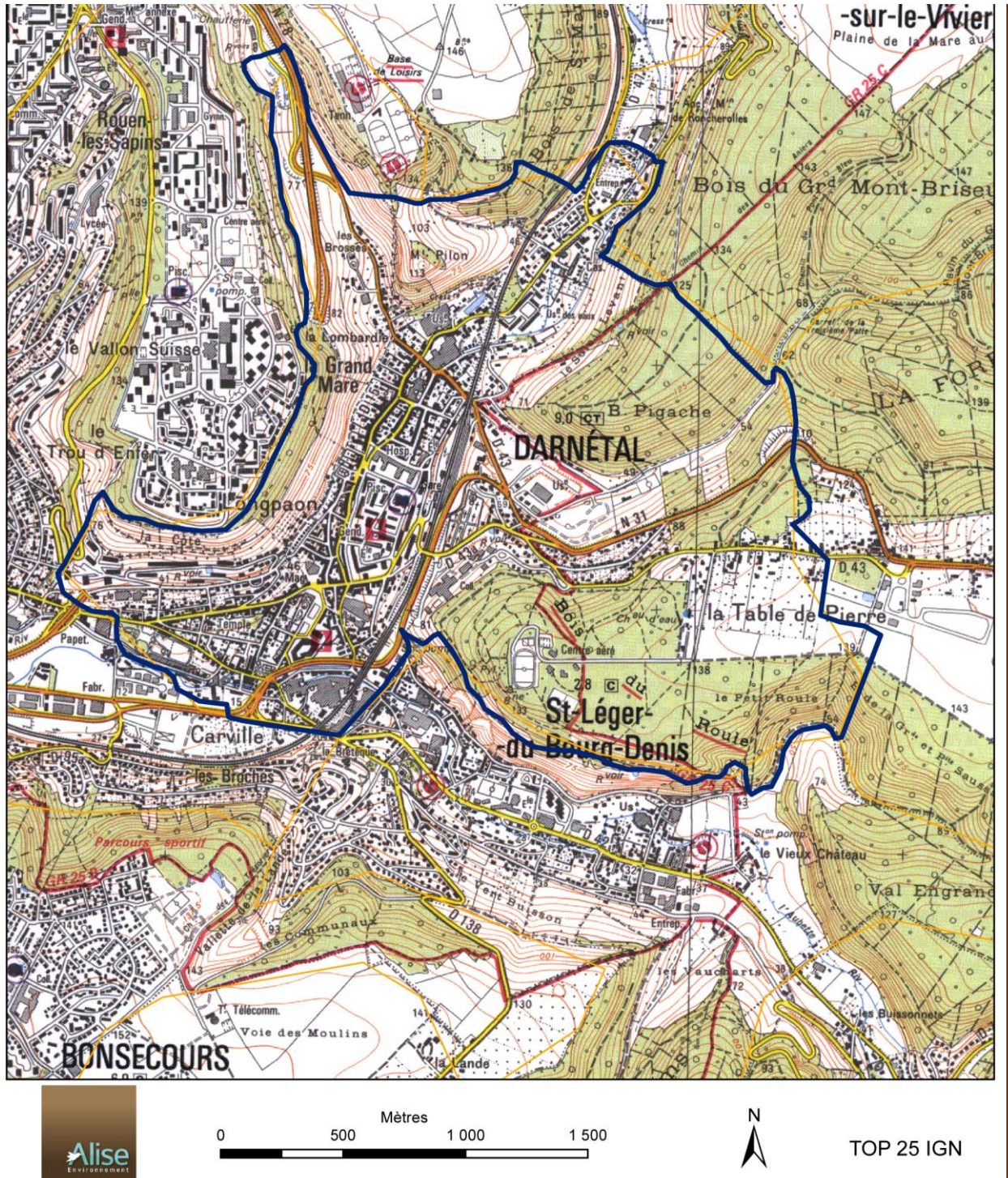


Figure 1 : Localisation de la commune de Darnétal

2 - PRESENTATION DU CONTEXTE

2.1 - Géologie

↳ cf. **Figure 2** et **Figure 3**

Le territoire de Darnétal est localisé au sein d'un vaste bassin de roches sédimentaires. Elle est représentée sur les cartes géologiques au 1/50 000 (carte de Rouen (Est) n°100 - édition B.R.G.M.). On note la présence de roches crayeuses, recouvertes de formations résiduelles (argiles à silex) et de placages limoneux. Les formations géologiques se trouvant sur la commune de Darnétal depuis la profondeur vers la surface sont les suivantes :

2.1.1 - Des craies du Crétacé Supérieur

Ce sont des craies blanches ou grises à silex, relativement dures et dont les bancs sont assez peu nets. Lorsqu'elles affleurent, ces craies sont marquées par la présence de nombreuses diaclases verticales (cassures dans la roche, sans déplacement). Les silex, à écorce épaisse sont fréquents dans toute la formation. Cette formation présente une microfaune riche ainsi que de nombreux Foraminifères.

2.1.2 - La formation à silex (Rs)

C'est une formation superficielle d'argile à silex d'épaisseur pluri-métrique variable en général. Les argiles à silex sont issues de la décalcification de la craie et reposent sur le toit irrégulier du substratum crayeux. Très localement, des poches de sables peuvent parfois y être observées.

2.1.3 - Les limons (LP)

Sur les plateaux, les craies du Crétacé Supérieur sont recouvertes de limons des plateaux de couleur jaune-beige, brun ou rouge. Ces limons sont, pour la plupart, non différenciés et sont constitués pour l'essentiel de quartz très fin. Ils ont été mis en place initialement par le vent, lors des différentes périodes froides du Quaternaire. Leur épaisseur est très variable, de quelques décimètres à plusieurs mètres (jusqu'à une quinzaine de mètres au maximum).

Notons que la partie superficielle de cette formation, lavée par les eaux de pluie, est souvent décalcifiée. Les agriculteurs doivent donc procéder à l'amendement de leurs terres par marnage.

2.1.4 - Les colluvions (C ou CLP)

Sur les versants et les bas de pentes se sont déposées des colluvions formées de limons bruns altérés parfois sableux et jaunes, souvent mêlés à des silex.

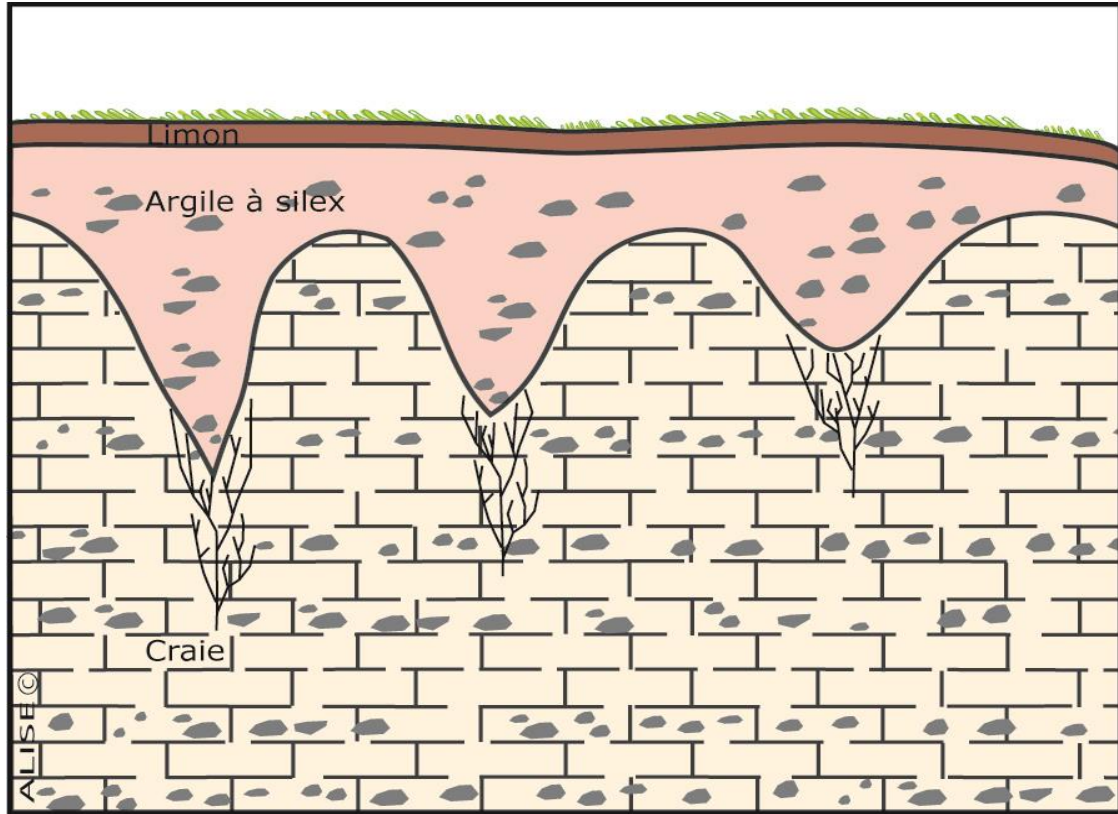


Figure 2 : Coupe géologique type du plateau crayeux en Seine-Maritime

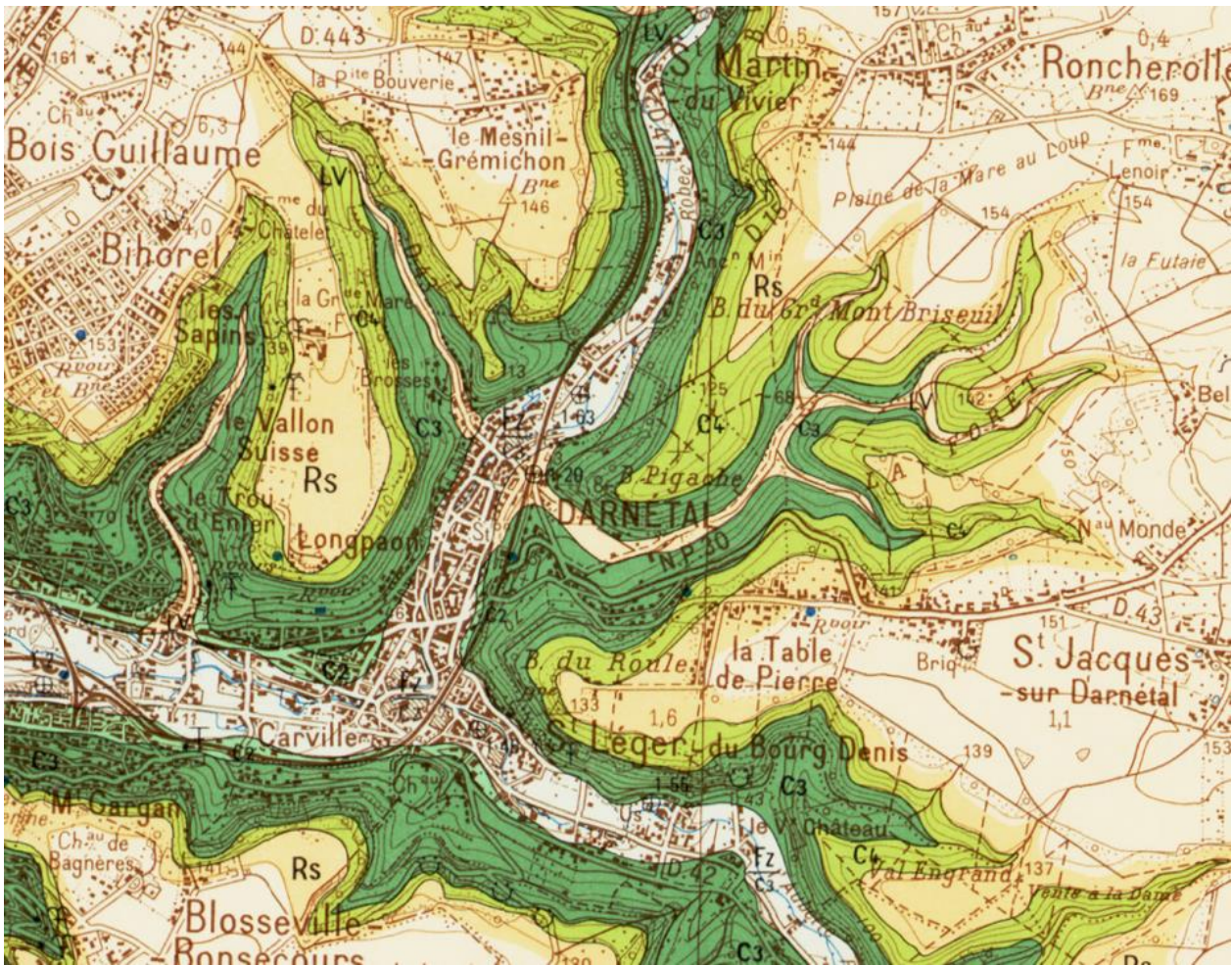
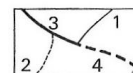


Figure 3 : Extrait de la carte géologique de Rouen (Est) (Carte n°100)

Légende de la carte géologique :

FORMATIONS SUPERFICIELLES

LP	Limons des plateaux
LV	Limons des fonds de vallées sèches
Rs	Formations à silex



- 1 - Contour géologique
- 2 - Contour géologique masqué par les alluvions
- 3 - Faille
- 4 - Faille masquée ou supposée

TERRAINS SÉDIMENTAIRES

Fz C3	Nature d'une alluvion avec indication de la formation qu'elle recouvre
C6-5	Campanien, Santonien Craie blanche à silex traçante
C4	Coniacien Craie jaunâtre à silex dolomitique
C3	Turonien Craie marseuse blanche à silex rares
C2	Cénomaniens Craie glauconieuse grise

∩
Carrière

∩
Carrière abandonnée

∩
Bouche de carrière souterraine abandonnée

*
Principaux affleurements visibles en 1966

2.2 - Hydrogéologie

Dans la région, nous pouvons distinguer plusieurs types de nappes aquifères : les nappes des formations superficielles et celles des formations du Secondaire.

2.2.1 - Les nappes des formations superficielles

➤ Les nappes des limons des plateaux

Certaines poches sableuses des limons des plateaux sont susceptibles de renfermer une petite nappe phréatique, qui n'est toutefois pas exploitable.

➤ Les nappes des alluvions

Seules les alluvions grossières (notamment celles situées sous le lit de la Seine) présentent un intérêt. Leur alimentation se fait par la nappe de la craie ou par les rivières, mais les débits sont plus faibles que ceux trouvés dans la craie.

2.2.2 - La nappe de la craie

C'est la seule qui soit exploitable dans la région. La craie présente une double perméabilité, une perméabilité en petit entre les grains de la roche et une perméabilité en grand dans un réseau de fissures agrandies par dissolution. Ce réseau est notamment bien développé sous les vallées à écoulement pérenne ou non. Par contre, sous les plateaux, le réseau de fissures est souvent cantonné à la partie supérieure de la craie, sous l'argile à silex et au-dessus du niveau piézométrique de la nappe. En profondeur, les fissures ouvertes sont relativement rares.

Les limites des bassins versants souterrains correspondent souvent aux bassins versants orographiques. Les eaux de la nappe crayeuse sont souvent drainées par les cours d'eau au moyen de leurs alluvions. L'écoulement souterrain favorise donc la propagation des eaux en direction des vallées humides via les vallées sèches qui constituent des axes d'écoulement privilégiés puisque la craie y est souvent plus fracturée et karstifiée. Sous les vallées sèches, la nappe est présente à quelques mètres. Dans les alluvions des cours d'eau et des vallées humides, son niveau s'établit à moins d'1 mètre, sous la surface.

En ce qui concerne Darnétal, la nappe se situe entre 20 et 50 mètres NGF, avec un écoulement général vers le Sud en direction de la Seine.

3 - DETERMINATION ET REGLES DE LOCALISATION DES CAVITES SOUTERRAINES

3.1 - Typologie des indices recensés

On distingue principalement 2 grands types de cavités souterraines :

- celles d'origine anthropique,
- celles d'origine naturelle.

3.1.1 - Les carrières souterraines

↪ cf. **Figure 4** et **Figure 5**

Nous pouvons distinguer plusieurs types de carrières souterraines. Les plus fréquentes sont les marnières. Cependant, des extractions de sable, d'argile ou bien encore de silex ont quelquefois pu être réalisées sous forme d'extractions souterraines.

La présence de marnières dans le sous-sol crayeux de la région provient de l'activité humaine. En effet, le lessivage des sols par les pluies a décalcifié ces derniers. Ainsi, afin de neutraliser leur acidité et d'augmenter les rendements, les agriculteurs ont procédé à la pratique du chaulage nécessitant l'extraction de la roche calcaire. Cette pratique remonte à plusieurs siècles, elle s'est poursuivie jusqu'au milieu du XX^{ème} siècle.

La craie de nombreuses marnières a également été utilisée comme matériau de construction ou bien encore pour la fabrication de la chaux.

Les marnières sont composées :

- d'un puits dont le diamètre moyen est de 1 mètre et dont la profondeur moyenne est située entre 15 et 25m. Certains peuvent descendre jusqu'à une profondeur de 60 m pour atteindre la marnière proprement dite.
- d'une ou de plusieurs chambres et / ou d'une ou de plusieurs galeries dont les dimensions sont extrêmement variables (de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres).

Sachant que le volume moyen d'une marnière est de l'ordre de 400 m³ et que la quantité de craie en amendement était d'environ 1 m³/ha/an, on peut estimer que l'ordre de grandeur du nombre de marnières est de 10 par km². Leur nombre est estimé à plusieurs dizaines de milliers sur la Normandie.

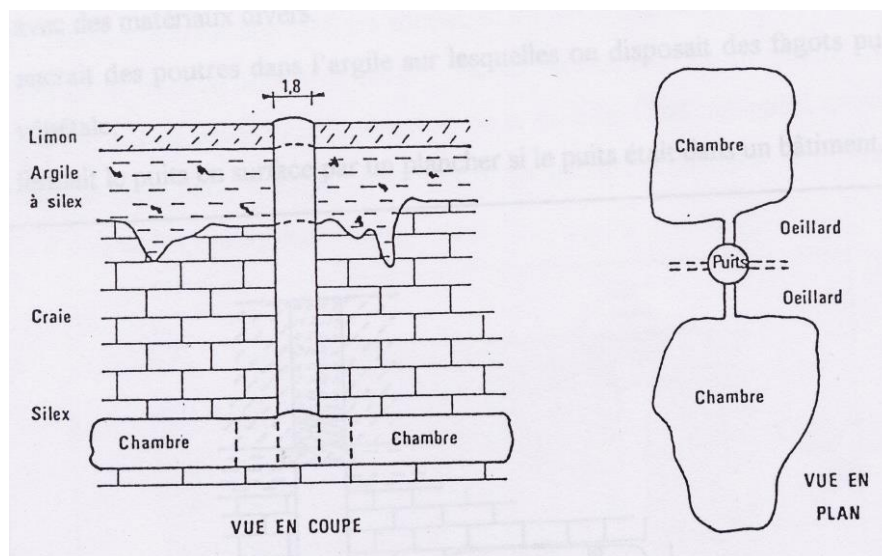


Figure 4 : Vues en coupe et en plan d'une marnière

Une fois l'exploitation de la marne terminée, trois techniques étaient utilisées pour reboucher un puits¹ :

- le couloir d'accès était muré et le puits comblé avec des matériaux divers,
- des poutres étaient ancrées dans l'argile, poutres sur lesquelles on disposait des fagots de bois et de la terre végétale,
- le puits était fermé en surface par un plancher.

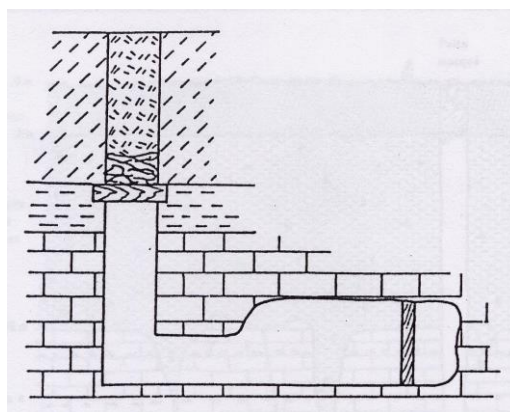


Figure 5 : Vues en coupe et en plan d'une marnière

D'un point de vue législatif, c'est à partir de 1853 que les propriétaires de carrières se sont vus obliger de déclarer leur ouverture et de s'acquitter du paiement d'une taxe. Taxe qui a contribué à l'ouverture illicite de nombreuses marnières.

A partir de 1853, une série de textes législatifs (cf. chapitre 4.2.6 -) a contribué à l'évolution des méthodes de réalisation des marnières

¹ A Valette, mémoire de DEA "Les marnières : méthodologie pour leur localisation et règles de localisation", Université de Rouen, laboratoire MTG - UMR IDEES, 1996

3.1.2 - Les bétoires

↪ cf. **Figure 6** et **Figure 7**

Mot d'origine normande, il provient de l'expression "bois-tout", en patois normand. Les bétoires sont liées au phénomène de karstification. Ce dernier est l'ensemble des processus d'érosion et d'altération physicochimiques que subissent les formations carbonatées. Ces processus sont à l'origine d'un accroissement des vides originels (porosité primaire et secondaire) et donnent aux formations carbonatées une porosité pouvant atteindre 15 % à l'échelle du massif (Marsaud, 1996). La karstification est liée en grande partie à la capacité des roches calcaires, et plus précisément des minéraux (calcite, aragonite, dolomite) qui les composent, d'être solubles dans l'eau. Le phénomène de karstification reste lié à plusieurs facteurs favorisant les processus de l'érosion et la karstification :

- présence d'un réseau de fractures tectoniques dans les formations carbonatées;
- forte pluviosité;
- température assez basse qui favorise la solubilité du CO₂;
- couvert végétal assez dense pour augmenter la pression partielle de CO₂.

Elles sont en relation avec les fracturations du sous-sol et les eaux circulent alors dans le réseau karstique, à une vitesse de l'ordre de la centaine de mètres à l'heure.

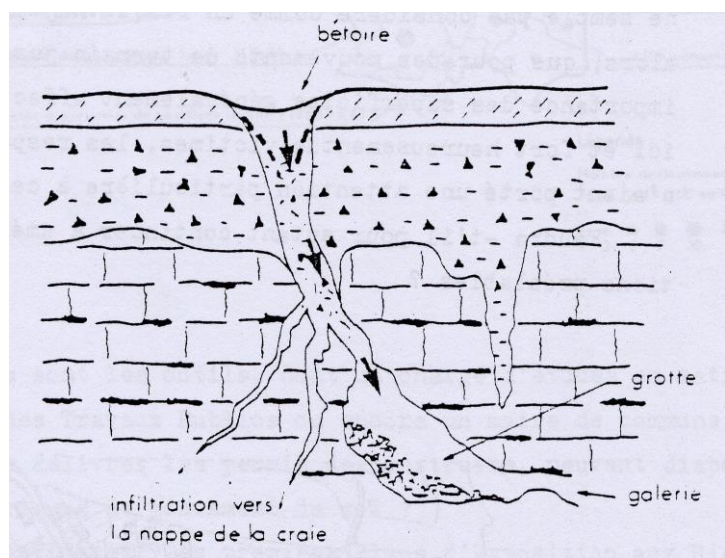


Figure 6 : Vue en coupe d'une bétoire

Il est important de signaler que les phénomènes de karstification ne sont pas toujours visibles en surface. Il est possible de schématiser les différentes phases d'évolution d'une bétoire (cf. figure 7).

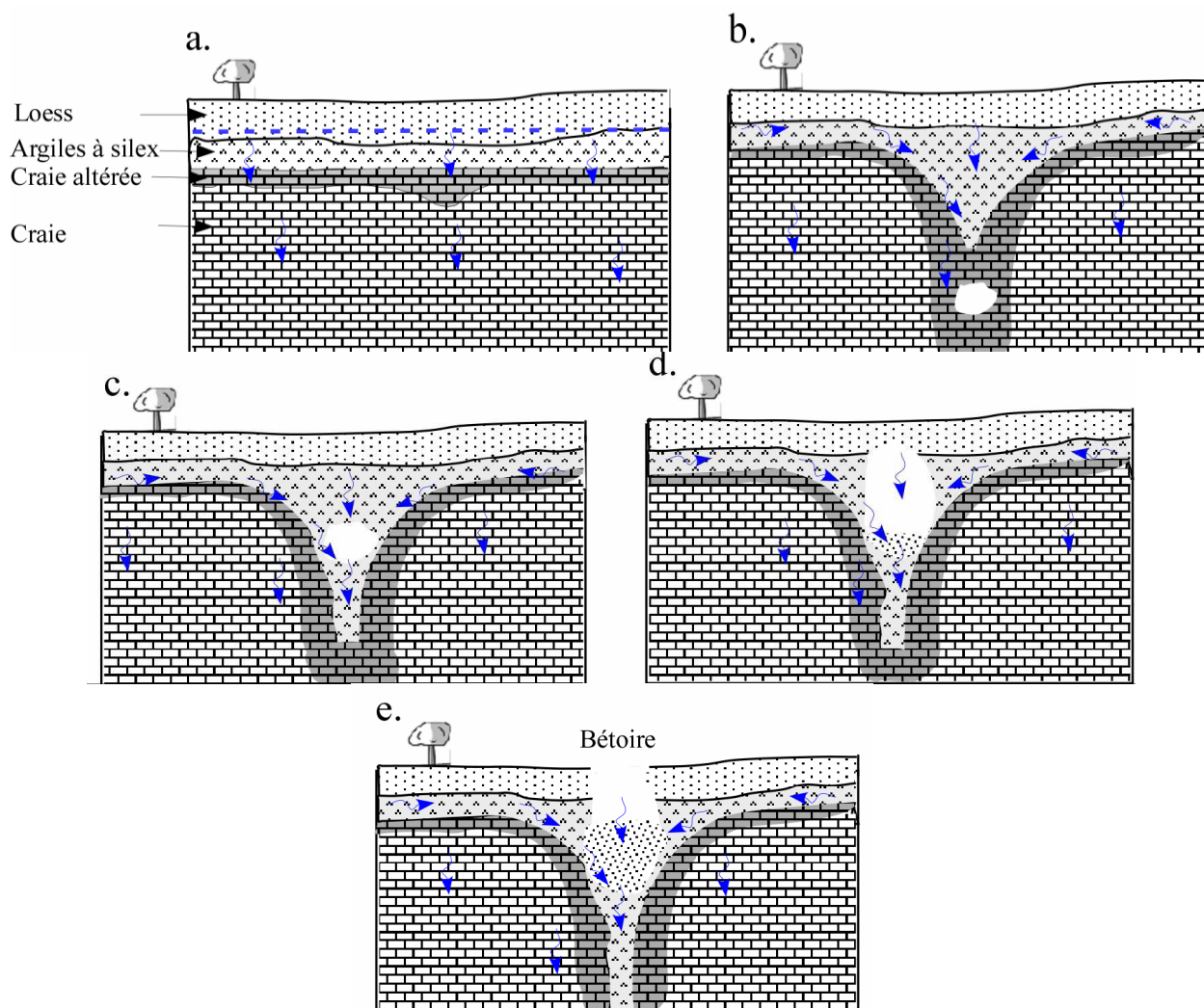


Figure 7 : Les différentes phases d'évolution d'une bétoire.

Il faut remarquer que certaines bétoires ont été aménagées comme collecteurs d'eaux usées et/ou de ruissellement et sont ainsi utilisées comme des puisards.

3.1.3 - Les puisards – puits filtrants

De la même manière que les bétoires, les puisards traversent les formations superficielles pour atteindre le substrat crayeux et tirer profit de la porosité et de la fissuration. Ces derniers sont d'origine anthropique et créés afin de collecter les eaux de ruissellement et les eaux usées des habitations individuelles ou des constructions collectives.

3.1.4 - Les puisards à chambre

Il s'agit de puisards dont le puits débouche sur une petite chambre servant à diffuser dans le sous-sol les eaux de ruissellement ou/et les eaux usées.

3.1.5 - Les puits à eau

Les puits à eau sont d'origine anthropique. Ils ont été creusés afin de palier au problème d'alimentation en eau directement lié au maigre réseau hydrographique pérenne de notre région. Leur profondeur varie en fonction de la profondeur de la nappe phréatique (de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres).

3.2 - Règles de localisation

3.2.1 - Les marnières

Globalement, on trouvera des marnières dans des endroits correspondant au profil suivant² :

- au niveau du plateau crayeux recouvert de limons et d'argile,
- lorsque le toit de la craie est peu profond,
- lorsque la partie supérieure de la craie est en dehors de la nappe,
- en présence, en surface de sols acides et argileux nécessitant un amendement calcaire.

Ce profil correspond à 85 % du territoire de la Haute-Normandie.

A petite échelle, des études indiquent que la localisation des marnières répond à une certaine logique³. Il s'agissait notamment de limiter l'emprise en surface pour conserver la vocation première du terrain.

Plusieurs critères peuvent être pris en compte :

- l'ancienneté de l'habitat,
- l'ancienneté d'un chemin,
- la présence de talweg,
- les versants.

3.2.1.1 Présence d'anciens chemins

Afin de faciliter le transport de la marne extraite, les exploitations souterraines étaient souvent creusées soit à proximité immédiate des champs à chauler, soit à proximité de chemins permettant de la répartir. Les remembrements successifs ont toutefois considérablement modifié les chemins, les effaçant pour bon nombre d'entre eux.

² A. Beauce, J.P. Deroin (1999) – Détection des cavités souterraines par méthodes géophysiques en Région Haute Normandie : guide de synthèse. Rap. BRGM R 40626, 18 p.

³ - Ph Beguin, JP Lautridou, mémoire de DEA "Pour une approche géographique du milieu souterrain artificiel en Haute Normandie", Université de Caen, U.F.R. des Sciences de la Terre et de l'Aménagement Régional, 1991.

- A Valette, mémoire de DEA "Les marnières : méthodologie pour leur localisation et règles de localisation", Université de Rouen, laboratoire MTG - UMR IDEES, 1996

- P Guillopé, JC Flageollet, mémoire de maîtrise de géographie physique "La carte des indices de cavités souterraines : un outil pour l'aménagement", Université de Caen, U.F.R. des Sciences de la Terre et de l'Aménagement Régional, 1986.

3.2.1.2 Présence de talweg

La présence de talweg et de vallons secs est un facteur limitant puisqu'il s'agit du chemin préférentiel de circulation des eaux superficielles. La présence d'une marnière en fond de vallée provoquerait son inondation fréquente, la rendant alors non seulement dangereuse, mais aussi inutilisable.

3.2.1.3 Les versants

Sur les plateaux, si la pente est faible, il y a une forte épaisseur de limons, rendant le travail d'excavation plus long et difficile. Par contre, si la pente est forte (entre 1,5 et 6 %), il y n'a pas ou peu de colluvions et de limons. La probabilité de trouver une marnière est donc assez forte, les exploitations étant préférentiellement situées dans la partie sommitale des talus et dans la partie convexe du sommet de la pente.

L'évolution du climat au cours du Quaternaire a modelé le paysage, creusant des vallons de manière souvent dissymétrique : un des versants sera plus doux que l'autre. L'érosion périglaciaire s'étant manifestée sur les versants exposés au sud-ouest et à l'ouest, ceux-ci ont été modelés en versants raides.

Les marnières seront donc préférentiellement situées dans la partie sommitale de versants exposés au sud-ouest ou à l'ouest, où les pentes sont assez raides.

Ceci ne signifie pas qu'on ne trouve pas d'exploitation de la marne au milieu des plateaux. Dans ce cas, en raison de l'épaisseur des limons, les puits étaient plus profonds. Pour continuer à extraire de la craie là où l'accès existait déjà, ces marnières disposaient d'un chemin d'accès direct ou étaient disposées à proximité immédiate d'une voirie, pour le transport de celle-ci.

Les exploitations de la marne seront donc préférentiellement :

- en dehors des noyaux urbains anciens ;
- pas trop éloignées d'un chemin (les carrefours sont donc des lieux privilégiés) ;
- à proximité d'une maison lorsque l'habitat est de type lâche et s'il n'y a pas de chemins alentours ;
- localisées dans une zone où l'épaisseur des limons est moindre, soit sur le sommet d'un terrain, soit en pente assez forte ;
- situées dans des secteurs où elles ne seront pas inondées.

3.2.2 - Les bétoires

Leur distribution peut sembler aléatoire mais elles s'organisent souvent sur des axes de talwegs. Les talwegs sont généralement associés à des directions de fracturation et sont caractérisés par un fort potentiel de karstification. Elles sont donc le plus souvent situées en tête de vallons secs et sur le passage des eaux de ruissellement.

De plus, l'évolution du paysage agricole (disparitions des mares, des haies, augmentation des surfaces cultivées, etc.) et l'augmentation des surfaces urbanisées ont augmenté la quantité des eaux ruisselées et ont donc accentué le phénomène de karstification.

Il est difficile de les recenser pour des raisons différentes de celles des marnières ; même si la présence de vallée sèche est un indice de leur éventuelle présence. Les zones d'infiltration rapide peuvent être soit des bétoires isolées, soit des bétoires en chapelet qui forment une succession de points d'engouffrement sur quelques dizaines de mètres dans le fond des vallons secs.

Quelques cas sont toutefois répertoriés sur le plateau, sous des fossés ou encore sous des bassins de rétention d'eau pluviale.



© ALISE Environnement

Photographie n° 1 : Axe du talweg, bétoires en chapelet

3.2.3 - Les puits à eau

On les trouve principalement en fond de talweg, là où la nappe phréatique est la moins profonde, à quelques mètres sous le sol. Néanmoins, des puits à eaux ont aussi été réalisés sur le plateau. Ces derniers peuvent atteindre des profondeurs pouvant dépasser la centaine de mètres.



© ALISE Environnement

Photographie n° 2 : Puits à eau

3.2.4 - Les puisards et puits filtrants

Ces derniers ont essentiellement été réalisés sur les plateaux, là où l'évacuation des eaux pluviales et usées était délicate à gérer (infrastructure urbaine, lotissement, etc.)

4 - DANGERS, IMPACTS ET REGLEMENTATION LIES AUX CAVITES SOUTERRAINES

4.1 - Risques humains, risques matériels et environnementaux

Quelle que soient leurs origines, les cavités souterraines sont responsables de deux formes de mouvement de terrain : les affaissements et les effondrements. La différence entre les premiers et les seconds se place au niveau de la vitesse du mouvement. Les affaissements sont lents et continus, sans rupture apparente, alors que les effondrements correspondent à un mouvement brusque et laissent apparaître une rupture nette. Les origines de ces mouvements sont différentes.

Lorsque les effondrements sont circulaires, de faible diamètre (entre 1 et 2 mètres), il s'agit de l'effondrement d'un puits. Il est dû à la surcharge se trouvant au-dessus du recouvrement, aux vibrations provoquées par le passage de poids lourds, sur une route ou dans un champ, ou encore, il peut être dû au pourrissement des poutres de support du remblai.



© ALISE Environnement

Photographie n° 3 : Effondrement d'une cheminée

Par contre, lorsque la surface de l'effondrement est plus importante, celui-ci sera probablement dû à la rupture du toit de la chambre d'exploitation. Cette rupture du toit est appelée fontis. Il peut être la conséquence de l'action de contraintes mécaniques qui provoquent le cisaillement d'un pilier de soutènement. Mais l'eau peut aussi jouer un rôle d'agent déstabilisateur, le remplissage régulier des cavités par des eaux agressives va éroder la craie, rendant les piliers plus fragiles ou donnant lieu à la formation de cloches d'effondrement au niveau du toit de la chambre. Ce remplissage

d'eau peut être naturel (cas de marnières dont une ou plusieurs chambres seraient situées à proximité d'un talweg) mais peut aussi être créé par l'homme. Les marnières sont alors utilisées comme décharges, bétoires ou puisards et les eaux sont alors souvent concentrées en charges polluantes, le processus d'altération de la craie s'en trouve alors accéléré.

Dans ce dernier cas, les premiers symptômes vont se traduire par un effondrement en surface dû à la vidange d'une langue ou racine d'altération dans la chambre vide. Celui-ci peut se mettre en place sur une vingtaine d'heures si le fontis est important. L'effondrement s'arrête une fois que la totalité de l'argile à silex ou du sable s'est déversée dans la chambre. Si le processus d'altération se poursuit, alors les piliers se fragilisent et peuvent se rompre.

Si le fontis est étroit, la vidange du matériel de remplissage par les eaux d'infiltration est progressive, le sol en surface s'affaissant petit à petit. Mais le processus est inéluctable à moins que la chambre ne soit comblée ou effondrée artificiellement.

Les effondrements dans le cadre des puisards et des bétoires suivent le même processus : vidange de matériel d'altération de la craie dans la cavité souterraine, celui-ci étant entraîné par les eaux de ruissellement circulant dans la conduite lors de leur infiltration dans le sous-sol.

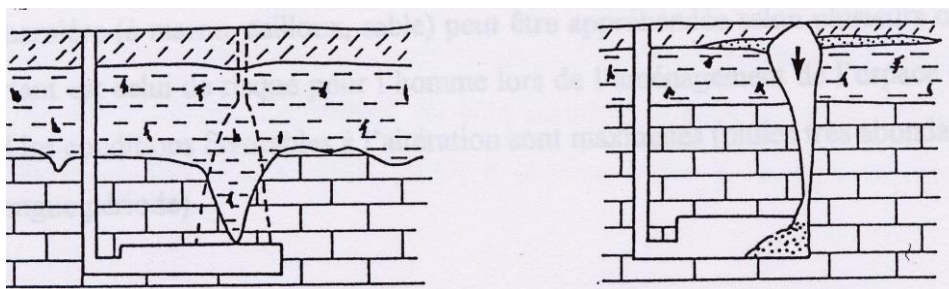


Figure 8 : Formation d'un fontis, vidange d'une racine d'altération

Leur présence entraîne un risque pour les personnes et les constructions d'ouvrages et d'habitat. En effet, un affaissement ou un effondrement du sol / sous-sol peut alors occasionner des risques de chute pour les hommes, les animaux, et des dommages importants sur les constructions situées dans les périmètres de l'affaissement, etc.



Photographie n° 4 : Exemples de dangers liés aux cavités

En Haute-Normandie, la présence de bétoires (points d'engouffrement des eaux de surface en plateaux) et de marnières est à l'origine de connexions directes avec les ressources exploitées. En effet, elles recueillent les lessivats et lixiviats de voirie et drainent les effluents d'origines diverses (pollution par des engrais, pollution fécale due à l'élevage...). La turbidité créée par l'engouffrement des eaux de surface transportant les produits de l'érosion des plateaux dans l'aquifère via les bétoires pose un problème essentiel d'alimentation en eau. Celles-ci circulent à grande vitesse alors que le pouvoir épurateur est faible à très faible.

4.2 - Quelques points réglementaires liés à la problématique des cavités

Cette partie reprend les différents points du « **guide à l'usage des maires** » réalisé par la préfecture et le Conseil Général de Seine-Maritime en février 2007.

4.2.1 - La responsabilité civile du préfet, du maire et de toute personne à informer de l'existence d'une marnière

Le code de l'environnement prévoit l'obligation d'information en matière de cavités souterraines notamment suite à la loi relative aux risques naturels et technologiques et à la réparation des dommages.

Ainsi, l'article L 563-6 du code de l'environnement stipule que « *les communes ou leurs groupements compétents en matière de documents d'urbanisme élaborent, en tant que de besoin, des cartes délimitant les sites où sont situées des cavités souterraines et des marnières susceptibles de provoquer l'effondrement du sol. Toute personne qui a connaissance de l'existence d'une cavité souterraine ou d'une marnière dont l'effondrement est susceptible de porter atteinte aux personnes ou aux biens, ou d'un indice susceptible de révéler cette existence, doit en informer le maire, qui communique sans délai au représentant de l'État dans le département, et au président du Département les éléments dont il dispose à ce sujet* ».

« *La diffusion d'informations manifestement erronées, mensongères, ou résultant d'une intention dolosive relative à l'existence d'une cavité souterraine ou d'une marnière, est punie d'une amende de 30 000 euros* ».

Le représentant de l'État dans le département publie et met à jour, selon des modalités fixées par décret en Conseil d'État, la liste des communes pour lesquelles il a été informé par le maire, de l'existence d'une cavité souterraine ou d'une marnière et de celles où existe une présomption réelle et sérieuse de l'existence d'une telle cavité ».

4.2.2 - Le maire face aux effondrements

Le maire prescrit les mesures de sûreté exigées par les circonstances sur les domaines privés et publics du territoire communal : il prescrit les travaux, interdit l'accès aux propriétés menacées, ordonne l'évacuation des immeubles sinistrés. Il peut engager une procédure de demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle.

4.2.3 - La responsabilité du maire

Celle-ci s'exerce à 3 niveaux :

- La responsabilité administrative : articles L 2 212-2 5°, L 2 212-4 du code général des collectivités territoriales et articles R 111-2, R 121-1, R 442-6, du code de l'urbanisme.
- La responsabilité pénale : articles 221-6 et 222-19 du code pénal.
- La responsabilité civile : article L 563-6 du code de l'environnement.

4.2.4 - Le maire, les cavités souterraines et l'urbanisme

La connaissance d'un risque doit être traduite dans les documents d'urbanisme :

- les documents de planification (à l'exception des SCOT) : PLU, carte communale,
- les documents d'autorisation d'occuper le sol : permis de construire, autorisations de lotir,
- certificats d'urbanisme.

Cela passe par la mise en place de périmètre de sécurité dont les rayons sont déterminés par un arrêté de la préfecture de Seine-Maritime (*cf. chapitre suivant*).

4.2.5 - Périmètre de sécurité

Le risque lié à l'existence ou à la présomption d'existence d'une cavité souterraine est traduit dans les documents d'urbanisme par l'instauration d'un périmètre de sécurité déterminé par un arrêté du Préfet de Seine-Maritime.

Le rayon du périmètre de sécurité est variable selon la typologie de l'indice :

Typologie de l'indice de cavité souterraine	Rayon du périmètre de sécurité
Indice de cavité souterraine lié à une extraction de craie	60m
Indice d'origine indéterminée	60m
Indice de cavité souterraine lié à une extraction de sable, d'argile ou de caillou	35m
Indice de cavité souterraine naturelle	35m

Source : Guide à l'usage des Maires - Gestion et prévention des risques liés à la présence de cavités souterraines en Seine-Maritime (Février 2007, Préfecture et Conseil Général de Seine-Maritime)

4.2.6 - Législation régissant l'exploitation des carrières

- Avril 1806 : Arrêté s afin de prévenir les accidents.
- Avril 1810 : Recommandations concernant la consolidation des puits, les dimensions des piliers dans les chambres.
- Août 1810 : Instruction ministérielle pour l'exécution de la loi d'avril 1810.
- Janvier 1813 : Disposition de polices relatives à l'exploitation des mines.
- Février 1813 : Circulaire préfectorale pour rappeler les dispositions d'avril 1806.
- Mars 1820 : Arrêté sur les formalités à observer pour l'exploitation des carrières souterraines
- Janvier 1821 : Arrêté demandant aux Maires de déclarer les carrières en exploitation ou non existantes dans leur commune.
- Juin 1822 : Arrêté réglementant les extractions de pierres, de sables, de grés, de cailloux et autres matériaux utilisés dans les travaux publics
- Février 1853 : Décret concernant l'exploitation des carrières dans le département de la Seine Inférieure obligeant notamment à :
 - déclarer au Maire l'ouverture de nouvelles carrières ;
 - établir un plan précis de la localisation de la carrière, etc.
- 1874 : Loi prohibant le travail des filles et des femmes dans les carrières souterraines, et réglementant celui des garçons.
- Juillet 1880 : Loi augmentant les contraintes entre la localisation des puits, des galeries et des habitations.
- Juillet 1890 : Loi pour la sécurité des ouvriers mineurs.
- Mars 1893 : Arrêté Préfectoral relatif aux carrières souterraines de marne.
- Novembre 1912 : Arrêté modifiant la réglementation des carrières de la Seine Inférieure
- 1932 : Arrêté Préfectoral, stipulant de creuser 2 puits pour les marnières exploitées pendant plusieurs saisons
- Janvier 1978 : Loi dite Spinetta, relative à la responsabilité et à l'assurance des constructions
- Février 2002 : loi dite de démocratie de proximité considérant les cavités souterraines comme un risque naturel majeur. Le maire peut solliciter pour sa commune la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle (loi de juillet 1982) et faire appel au fond de prévention des risques naturels majeurs (fond Barnier, loi de février 1995)
- Juillet 2003 : Loi n° 2003-699 relative à la prévention des risques technologiques et naturels qui prévoit l'obligation d'information en matière de cavité souterraine

5 - METHODOLOGIE DU RECENSEMENT DES INDICES DE CAVITES SOUTERRAINES

5.1 - Enquête Bibliographique

La première étape de l'étude consiste à examiner les multiples documents existants, allant des archives anciennes aux documents plus récents.

5.1.1 - Collecte et exploitation des documents d'archives anciens et de cartes anciennes

↪ cf. **Figure 9**

L'exploitation ainsi que l'abandon d'une marnière sont soumises à déclaration depuis 1853. Les archives départementales de Seine-Maritime ont donc été consultées afin de rechercher tout document concernant les marnières :

- déclarations d'ouverture,
- déclarations de fermeture,
- rapports établis à la suite d'accidents,
- procès-verbaux de visites,
- arrêtés préfectoraux ordonnant des travaux d'aménagement,
- plans de localisation, etc.

Les répertoires consultés sont les suivants :

- archives du XVI^{ème} au XX^{ème} siècle : série 3 E (archives déposées par les communes),
 - cadastre : série 3 P (cadastre, matrice et plans),
 - archives modernes (1790 à 1940) :
 - série 8 S (travaux publics et transports) : concerne entre autres les autorisations relatives à l'ouverture, la surveillance et la sécurité des mines et carrières (an IX – 1939) et notamment les marnières (sur CD-ROM du Conseil Général de Seine-Maritime)
 - série 2 OP et 3 OP (voirie communale et urbaine)
- ⇒ Le cadastre ancien (cadastre napoléonien) est également examiné : ce cadastre n'apporte pas de renseignements sur les marnières mais permet de localiser les parcelles cadastrales citées dans les archives (cf. Figure 9).

Le cadastre napoléonien de Darnétal est divisé en 4 sections, A1, A2, B et C.



Figure 9 : Extrait du cadastre napoléonien de Darnétal (Tableau d'assemblage)

5.1.2 - Collecte et exploitation des documents d'archives récents

Différents documents d'archives récents ont été consultés.

Les documents provenant des services suivants ont pu être consultés :

- Services décentralisés de l'Etat : DDTM, DDAF ;
- La mairie ;
- Archives départementales de Seine-Maritime ;
- Presse locale et régionale ;
- Bureau de Recherche Géologique et Minière (B.R.G.M.) ;
- Cartes et données géologiques ;
- Institut Géographique National (I.G.N.) ;
- Documents du Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement (C.E.T.E.) ;

Les cartes suivantes sont également consultées :

- ⇒ cartes topographiques série bleue (I.G.N.) au 1/25 000,
- ⇒ carte géologique (B.R.G.M.) au 1/50 000 du site d'étude,
- ⇒ carte hydrogéologique (B.R.G.M.) au 1/100 000 de Seine-Maritime.

5.2 - Exploitation des photographies aériennes

Des photos aériennes anciennes, contemporaines et récentes ont été analysées afin d'obtenir le maximum d'informations et d'écarter les indices qui ne correspondent pas à des cavités souterraines (leurres).

Dans le cas présent, nous avons analysé les photographies des missions aériennes suivantes :

- 1947 (noir et blanc) ;
- 1955 (noir et blanc) ;
- 1963 (noir et blanc) ;
- 1973 (noir et blanc) ;
- 2003 (couleur).

Cette étude est effectuée sur plusieurs séries de clichés de manière à avoir une évolution de la représentation de l'occupation du sol dans le temps. S'il est difficile d'identifier les vides apparents ou les puits d'accès aux chambres d'extraction, les photos peuvent apporter d'autres informations.

On cherchera en particulier des indices tels que :

- la présence d'un bosquet de forme circulaire, d'un arbre isolé aujourd'hui disparu ;
- des dépressions topographiques ;
- des contrastes d'humidité ;
- une zone de circulation préférentielle des eaux ;
- la manifestation d'une extraction de marne ;
- l'étude de ces photos pourra servir à éliminer des leurres :
 - la présence d'anciennes mares (elles forment, elles aussi, des dépressions et, une fois vidées, elles peuvent donc prêter actuellement à des confusions) ;
 - les anciens trous de bombe.

Les indices retenus après cette expertise ont fait l'objet d'une visite de terrain. Certains indices confirmés sur le terrain, par une autre source ou se répétant sur au moins deux campagnes aériennes seront potentiellement retenus en tant que tels.

5.3 - Enquête locale

Un questionnaire a été élaboré par le bureau d'études ALISE et envoyé à tous propriétaires terriens de plus de 2500 m² en accord avec la commune. Ce questionnaire, a été envoyé à ses destinataires, accompagné d'une lettre de la municipalité signée du maire et expliquant l'objet de l'enquête.

Cette démarche est en outre accompagnée d'une enquête sur le terrain auprès des personnes suivantes :

- agriculteurs, anciens et actuels ;
- personnes natives et/ou habitant la commune ;
- personnes « ressources » indiquées par la mairie.

5.4 - Reconnaissance de terrain

5.4.1 - Recherche de nouveaux indices auprès de la population et des responsables de la commune

Lors des visites de terrain, nous avons rencontré un certain nombre de personnes susceptibles de nous renseigner sur la présence et la localisation de cavités souterraines (agriculteurs, propriétaires, personnes ayant travaillé sur la commune, habitants connaissant bien l'histoire de la commune, etc....).

Les renseignements obtenus par ces différents témoignages ont pu être recoupés afin de confirmer l'information et de localiser l'indice le plus précisément possible.

5.4.2 - Modalités de l'enquête terrain

En surface, les indices de présence de cavités dans le sous-sol sont variés, ils peuvent être des signes directs ou indirects.

5.4.2.1 Les signes directs

Parmi ceux-ci, on va trouver notamment :

- la présence d'un puits protégé par une plaque (tôle, ciment, etc..) ;
- la présence d'un effondrement circulaire récent, la rupture du sol étant marquée ;
- la présence d'un remblai récent, ayant servi à combler un effondrement. On note alors la présence de celui-ci à la surface du sol ;
- la présence d'une dépression topographique de forme plus ou moins circulaire.



© ALISE Environnement

Photographie n° 5 : Indice direct lié à un puits protégé par une plaque



© ALISE Environnement

Photographie n° 6 : Indices directs liés à la présence de remblais

5.4.2.2 Les signes indirects

Ces derniers peuvent indiquer la présence de cavités souterraines :

⇒ Un changement de végétation :

Ce changement peut être constitué par la présence d'un bosquet de forme circulaire au milieu d'un champ, d'une prairie, mais peut être aussi formé d'une zone circulaire envahie par les ronces ou les hautes herbes.

Ce changement de végétation peut aussi être lié à une variation de l'humidité dans le sol. En effet, la différence d'humidité entre un puits et le sol environnant sera marquée surtout par un changement de couleur des cultures, des pâtures qui auront du mal à se développer dans un terrain extrêmement drainé par endroits en raison de l'existence d'un puits.

⇒ La présence d'un arbre isolé :

Les puits d'accès aux cavités souterraines situées en plein champ peuvent avoir été marqués par un arbre isolé.



© ALISE Environnement



© ALISE Environnement

Photographie n° 7 : Indice de surface de cavités souterraines par changement de végétation

⇒ La présence d'une décharge :

Les marnières ont souvent été utilisées en tant que décharges pour faire disparaître des déchets, des encombrants. La présence d'une décharge sauvage doit entraîner des précautions quant à l'utilisation ultérieure de ce terrain.



© ALISE Environnement

Photographie n° 8 : Indice lié à la présence d'une décharge sauvage

⇒ La présence d'un vallon sec :

Elle va conduire à la recherche de bétoires dans le talweg, notamment de préférence en tête de ces vallons.

5.4.3 - Compte-rendu de l'étude

- **Etablissement des fiches détaillées pour chaque indice de présence de cavités souterraines**

Les informations recueillies durant l'étude ont été reportées dans des fiches détaillées établies pour chaque indice de cavités souterraines.

Ces fiches figurent dans le document intitulé « Recueil des indices de cavités souterraines » et comportent entre autres les informations suivantes :

- ⇒ numérotation de l'indice ;
- ⇒ indications géographiques (parcelles, repères locaux) ;
- ⇒ indications sur les sources des informations ;
- ⇒ nature et description des indices (contexte morphologique, géométrie, etc.) ;
- ⇒ remarques concernant l'indice ;
- ⇒ typologie de l'indice ;
- ⇒ indications pour lever l'indice.

En ce qui concerne la numérotation, chaque numéro d'indice correspond au code du département, suivi du code INSEE de la commune et du numéro d'ordre de chaque indice.


▪ **Positionnement précis des indices sur planches cadastrales et support informatique**

Les indices recensés ont été reportés sur le cadastre fourni par la commune.

Lorsque les indices ont pu faire l'objet d'une reconnaissance de terrain, ils ont été photographiés et localisés par des repères locaux en mesurant les distances vis à vis d'arbres, de clôtures, de routes, de bâtiments, et/ou par GPS pour donner les coordonnées X et Y (cf. figure 10).

Le document final comporte une carte cadastrale au 1/5 000 où est localisé l'ensemble des indices recensés (cf. annexe).

La légende permet de distinguer la typologie des différents indices ainsi que le fait qu'il soit visible ou non.

Fiche d'indice de cavité souterraine n°	
[]	
Localisation	
Département	[] Précision []
Commune	Coordonnées X []
	Coordonnées Y []
Repères locaux	
Autres (route, chemin,...)	[]
Parcelle cadastrale	[]
Remarque localisation:	[]
Source	
Départementales	[]
Communales	[]
Etudes	[]
Enquête orale	[] Autres []
Nature	
Contexte morphologique	[] Profondeur (en m) []
Type d'effondrement	[] Diamètre (en m) []
Indice de terrain	[] Longueur min (en m) []
Géométrie	[] Longueur max (en m) []
	Observations
Photographie <input type="checkbox"/>	[]
Origine probable de l'indice	
Typologie probable d'indice	[]
Matière probablement extraite	[]
	Investigations possibles à mener
	<input type="checkbox"/> Décapage
	<input type="checkbox"/> Forages
	<input type="checkbox"/> Géophysique
Remarques	[]
Auteur :	

© ALISE Environnement

Figure 10 : Exemple de fiche signalétique

6 - RESULTATS DE L'ETUDE

6.1 - Les réponses au questionnaire

Les résultats de l'enquête réalisée auprès des propriétaires terriens de la commune sont les suivants :

On constate que le taux de réponses est moyen (**49%**), ces réponses étant parvenues à la mairie de Darnétal.

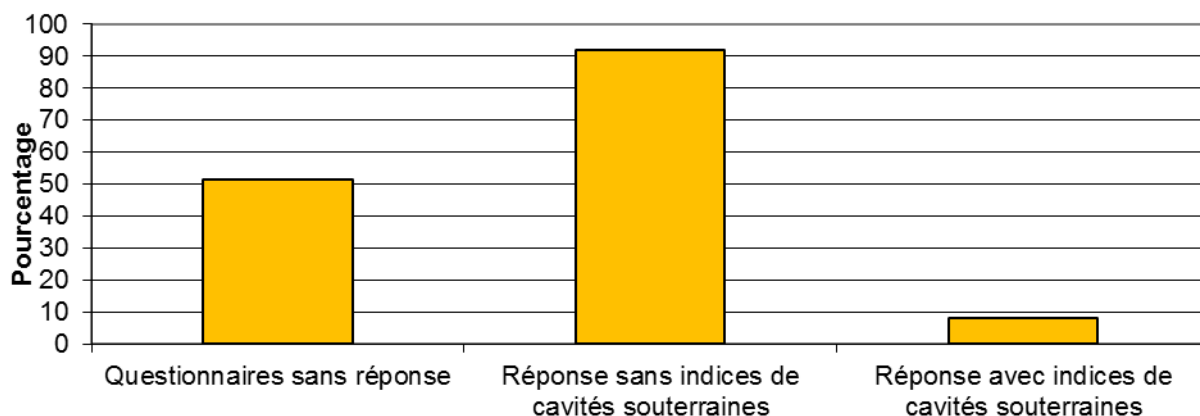


Figure 11 : Présentation des résultats de la consultation

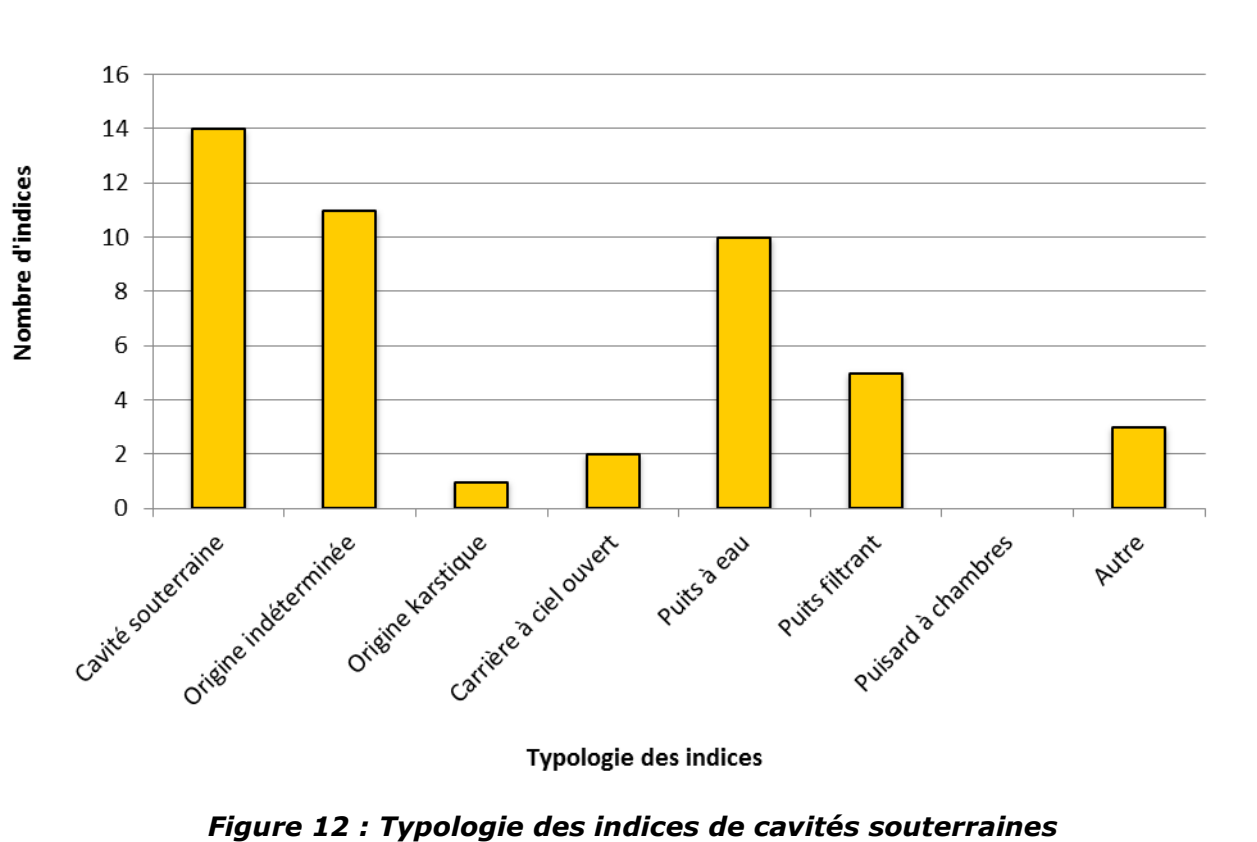
8% des personnes contactées ont fourni des indications sur la présence de cavités souterraines ou d'indices de présence de cavités sur le territoire de la commune.

Suite à cette consultation plus de 5 personnes ont été rencontrées lors des prospections de terrain afin de localiser les indices le plus précisément possible et pour permettre d'affiner les recherches.

6.2 - Typologie des indices de cavités souterraines

Le nombre total d'indices de cavités souterraines recensés au terme de l'étude sur l'ensemble du territoire de Darnétal est de **46**. *Il faut signaler que ce chiffre n'est pas un chiffre définitif, mais correspond à l'état actuel des connaissances.*

Le graphique ci-dessous précise la nature des indices recensés.



Parmi ces indices, on peut noter que approximativement :

- 30 % sont liés à des cavités souterraines (marnières,...),
- 24 % ont une origine indéterminée,
- 2 % sont liés à des karsts
- 4 % sont liés à des carrières à ciel ouvert,
- 22 % sont liés à des puits à eau,
- 11 % sont liés aux puits filtrants,
- autres : 7 %.

Le tableau ci-dessous indique si un indice est visible ou non. Notre étude sur le terrain a permis de préciser que sur la totalité des indices de cavités souterraines recensés sur la commune, **13 sont visibles**.

Précision	Nombre
Visible	13
Invisible	25
Non localisé	8
Total	46

Tableau 1 : Précision des indices

6.3 - Remarques

Il faut noter que la localisation précise des indices est souvent limitée par la qualité du cadastre.

En ce qui concerne les problèmes liés aux archives, la transposition du cadastre napoléonien sur le cadastre actuel peut-être à l'origine d'un risque d'erreur lié à la qualité graphique et / ou géographique du document d'origine.

De la même façon, la localisation des indices de cavités souterraines réalisée lors de l'enquête peut-être approximative dès lors que l'indice n'a pu être confirmé sur le terrain. En effet, ces déclarations reposent sur des souvenirs plus ou moins anciens qu'il est parfois difficile de localiser précisément.

Enfin, le fond de plan utilisé pour cette étude est fourni par la communauté de commune (cadastre digitalisé, ...). L'échelle des cartes produites au cours de l'étude est au 1/5000^{ème} et suit les préconisations de la DDTM.

6.4 - Recommandations

Le travail effectué dans le cadre de cette étude a pour principal résultat de donner une photographie de la connaissance actuelle de la présence d'indices de cavités souterraines sur le territoire communal. Ce recensement ne peut en aucun cas être exhaustif. Ceci est principalement dû à :

- L'absence de législation réglementant les déclarations d'ouverture de carrière avant 1850. Ainsi, avant cette date, aucune marnière n'a été déclarée, alors que beaucoup ont été creusées ;
- Après 1850, malgré la législation en vigueur, beaucoup de marnières ont été creusées sans que pour autant elles aient été déclarées ;
- La photo-interprétation peut-être à l'origine d'un certain nombre de leurres ;
- L'enquête auprès de la population peut-être à l'origine de certaines déclarations erronées ou d'informations oubliées ;
- La reconnaissance de terrain peut-être à l'origine de confusions entre un affaissement et un leurre type trou de bombe, mare remblayée, etc. De plus, la végétation peut jouer le rôle d'écran et empêcher l'observation de certains indices ;
- Le caractère naturel est par définition évolutif. Des problèmes karstiques peuvent être à l'origine de nouveaux effondrements, de même pour les cavités anthropiques inconnues.

Ainsi, en l'état actuel des connaissances, des effondrements liés à des cavités naturelles ou anthropiques peuvent avoir lieu dans des zones dénuées d'indices.

Les précautions à prendre pour diminuer les risques liés aux cavités souterraines se résument de la manière suivante :

- Prise en compte des zones à risques dans les documents d'urbanisme (certificat d'urbanisme, permis de construire, etc.) ;
- Communication auprès de la population ;
- Actualisation de la liste des indices de cavités souterraines à chaque nouvelle information (nouvel effondrement, informations supplémentaires pour un indice, levée d'un indice, etc.). Cela nécessite la mise en place d'une démarche visant par exemple à responsabiliser une personne pour le dossier et sa gestion afin de tenir à jour le recueil des fiches d'indices et la cartographie de ces derniers.

7 - DEMARCHES POUR LEVER UN INDICE

Les investigations complémentaires possibles pour déterminer la présence, l'emprise et le comblement de cavités souterraines sont de plusieurs types :

- Géophysique,
- Décapage,
- Forage,
- Réalisation d'un nouveau puits d'accès,
- Cubage et morphologie de la cavité,
- Remblaiement.

La démarche à entreprendre est variable et dépend de plusieurs critères que sont :

- la typologie du projet,
- les résultats obtenus à chaque phase,
- le coût des investigations à réaliser,
- les choix du maître d'ouvrage.

La gestion des indices de cavités souterraines est présentée dans les pages suivantes.

7.1 - Les méthodes de prospection géophysique

Une étude réalisée par le BRGM⁴ a montré les limites des différentes méthodes et configurations géophysiques traditionnelles.

Leur avantage par rapport au forage vient du fait qu'elles sont non destructives et sont d'un coût plus faible en raison de la surface étudiée. Par contre, la fiabilité d'un diagnostic de présence de cavités souterraines est différente selon les techniques utilisées.

7.1.1 - La microgravimétrie

Cette méthode consiste à mesurer les valeurs relatives de la gravité à la surface du sol, les cavités créant un déficit de densité par rapport aux terrains encaissants, elles sont à priori détectables de cette manière. **Il s'agit de la méthode traditionnelle la plus à même de fournir une réponse sur la présence de cavité en Haute-Normandie.** Il y a toutefois des **limites importantes**, la première venant des caractéristiques de l'anomalie recherchée : plus l'anomalie sera profonde et/ou plus son volume sera faible, moins elle sera détectable.

⁴ Les informations de ce paragraphe sont tirées de A. Beauce, J.P. Deroin (1999) – Détection des cavités souterraines par méthodes géophysiques en région Haute – Normandie : Guide de synthèse. Rap. BRGM R 40626, 18 p.

D'autre part, le résultat de ce type d'étude est sous forme de carte d'anomalies de densité, le signal en surface étant plus ou moins fort en fonction de l'importance des anomalies en profondeur et de leurs signes respectifs. La présence d'une anomalie de "forte densité" (une accumulation de silex, par exemple) peut parfaitement masquer une anomalie de "faible densité" (un vide par exemple). Par ailleurs, une même anomalie peut être produite par une cavité ayant une certaine caractéristique géométrique ou par une poche de sable de dimension adéquate. Il n'y a donc pas de détection véritable des cavités, les résultats devront être vérifiés par des forages.

Pour donner des ordres de grandeur, dans des conditions géologiques et pédologiques normales (sol et sous-sol), **une cavité de dimension 20 x 20 m, avec une hauteur de vide de 3 m sera tout à fait détectable si elle est à 10 mètres de profondeur** ; sa détection sera plus **problématique entre 20 - 25 mètres** de profondeur en raison des perturbations liées aux terrains superficiels et elle sera **indécelable à 40 mètres** de profondeur.

Les coûts indicatifs sont les suivants : 35 € H.T. (42 € TTC) par point de mesure, sachant qu'il faudrait environ 400 points pour couvrir un terrain de 1 ha, le coût d'une telle étude se monterait à 14 000 € H.T., soit 16 750 € TTC.

7.1.2 - Les méthodes sismiques

Le principe des méthodes sismiques est de provoquer des ébranlements dans le sous-sol et d'observer en surface les ondes générées au cours de ces ébranlements. La présence d'une cavité peut entraîner des perturbations de certains paramètres, tels le temps de trajet, la vitesse de propagation, l'amplitude et la forme des signaux, etc.,... qui révéleront sa présence. Les mesures peuvent se faire sur la **sismique réflexion**, qui mesure les ondes réfléchies par les discontinuités et sur la **sismique réfraction**, qui s'intéresse aux ondes réfractées le long des discontinuités.

L'existence de bruits rend difficile l'utilisation de ces méthodes en milieu périurbain et **l'application de ces méthodes à la détection des cavités souterraines en Haute-Normandie reste pour le moment du domaine de la recherche et développement**. De plus, la présence de limites irrégulières entre les différentes couches géologiques, la faible dimension des cavités sont autant de facteurs limitants quant à l'utilisation de la sismique pour identifier la présence de ces cavités souterraines.

Les coûts varient suivant les techniques utilisées : l'utilisation de la sismique réfraction entraînerait un coût de 2 000 à 2 500 € H.T. par jour pour le déploiement de 3 dispositifs comprenant 24 géophones et la réalisation de 5 tirs à l'explosif. En cas d'utilisation de la sismique réflexion haute résolution, les coûts sont multipliés par 3 ou 4.

7.1.3 - Les méthodes de géophysique électriques

Ces méthodes permettent de mesurer la **résistivité électrique apparente** (intégration des résistivités des différentes couches depuis la profondeur vers la surface), à l'aide de l'injection de courant électrique dans le sous-sol et de sa mesure. La résistivité est une propriété physique caractéristique d'une roche qui conditionne la circulation d'un courant dans un matériau. Plusieurs modes de mesures existent :

le sondage (mesure de la variation verticale de la résistivité) et le traîné (mesure de la variation latérale de la résistivité). La combinaison des 2 donne le panneau électrique.

Théoriquement, l'utilisation de ces méthodes en configuration classique permettrait de mettre en évidence la présence de cavité puisque le vide a une résistivité très importante. Toutefois, si les cavités sont de faible dimension alors les lignes de courant ont vraisemblablement tendance à les «contourner» plutôt qu'à s'y arrêter, et il est alors parfois difficile de mettre en évidence leur présence.

Cependant le couplage de cette méthode avec d'autres, comme la polarisation spontanée, permet d'avoir de bons résultats (cf. 7.1.6 -).

Le coût journalier de ces méthodes s'élève à environ 2 000 € H.T.

7.1.4 - Les méthodes électromagnétiques

Ces méthodes rassemblent celles utilisant les radars, des émetteurs lointains et fixes, des émetteurs mobiles. Le principe est le suivant : un champ électromagnétique primaire passant dans un corps conducteur génère un champ induit, secondaire, qui se superpose au champ primaire. Les mesures de ce champ secondaire vont renseigner sur la conductivité des terrains en sous-sol.

Ces méthodes n'ont pas montré jusqu'à présent une réelle efficacité en ce qui concerne la détection des marnières en Haute Normandie. Pour la plupart, le facteur limitant serait dû à des interférences qui existent localement dans les longueurs d'ondes utilisées, qui sont dues à la présence de lignes à haute-tension, de structures métalliques aériennes ou souterraines. La méthode la plus prometteuse, **le radar géologique, a fait ses preuves dans d'autres contextes**, mais la présence de terrains très conducteurs en surface réduit la profondeur d'investigation. Des recherches sont actuellement en cours pour affiner l'utilisation du radar dans la détection des cavités souterraines.

Le coût moyen d'une journée de mesure radar s'élève à environ 2 500 € H.T. Pour les autres méthodes, le coût d'une journée de mesures est environ de 1 300 € H.T.

7.1.5 - Etude géophysique électrique – dispositif Wenner

Cette méthode s'appuie sur les principes de la géophysique électrique présentés précédemment et a fait ses preuves en recherche archéologique (recherche d'anciennes extractions de silex, dont le schéma est semblable à celui de l'exploitation de la marne : creusement d'un puits d'accès à une chambre d'extraction). La différence vient de la configuration des électrodes utilisées pour injecter le courant électrique et le mesurer : le but est de rechercher non pas la cavité en elle-même, mais de trouver le puits d'accès à la chambre d'exploitation.

La limite vient de la nécessité de travailler en période d'été pour avoir de bons contrastes de résistivité entre le puits comblé par du tout-venant et l'encaissant. Son avantage tient en ses résultats et le fait qu'elle ne soit pas destructrice, qu'elle puisse donc permettre de travailler sur de grandes surfaces, même s'il n'y a pas d'indices apparents. Le coût moyen d'une telle étude, sur un terrain de 2 000 m², s'élève à 3500 € H.T. Il comprend les phases de travail suivantes :

- Une recherche d'archives préalables,
- Une étude géologique et pédologique de la zone (dont la réalisation de sondages),
- Une étude géophysique (dont la mise à disposition du matériel),
- Une interprétation et la rédaction d'un rapport.

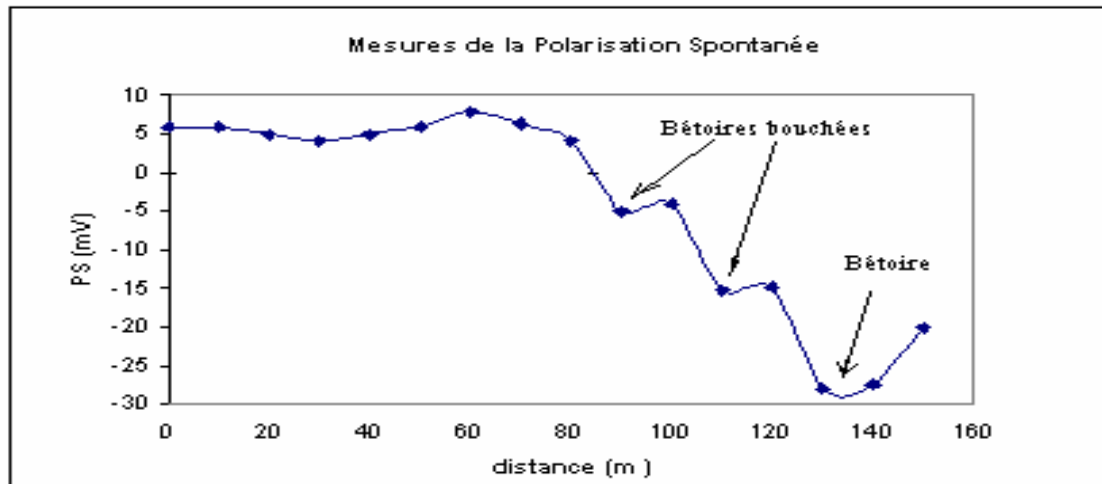
Cette méthode permettrait de préciser par exemple les zones à décaper pour un diagnostic de cavités souterraines.

7.1.6 - La « polarisation spontanée »

Comme nous l'avons expliqué ci-dessus, la prospection géophysique par panneau électrique fournit une imagerie qu'il convient de confronter à une simulation numérique des signaux. La simulation introduit la complexité du système multicouche influencé par la présence de vide. Elle permet de définir la sensibilité de la réponse géoélectrique pour la détection de bétoires et de marnières. Cette sensibilité dépend de l'épaisseur et de la résistivité des formations superficielles et des paramètres du système bétoire (taille, profondeur, résistivité du remplissage qui colmate plus ou moins les vides,...). La géophysique s'avère opérationnelle pour identifier les bétoires majeures mais elle manque de précision pour détecter les systèmes peu développés (crypto-bétoires).

L'application de la polarisation spontanée permet de mesurer le champ naturel entre deux électrodes non-polarisables. Dans le cadre de notre approche, l'objectif est d'identifier les sens d'écoulement des eaux que ce soit au sein des matériaux de couverture comme dans l'aquifère karstifié. Son couplage avec la prospection par panneau électrique permet de localiser les anomalies susceptibles de modifier les écoulements. Elle fournit une approche qui s'applique à la fonctionnalité hydrologique des vides naturels et peut confirmer ou non les hypothèses d'interprétation des données géoélectriques. Par sa sensibilité aux écoulements hypodermiques, elle reste fortement dépendante du contexte météorologique mais permet néanmoins de valider les écoulements associés à l'existence de crypto-bétoires et de zones d'infiltration rapide des eaux superficielles.

L'application à la détection de marnières a été testée sur un exemple connu (localisation probable identifiée par transfert oral intergénération) mais non prospecté du secteur de Bouville (76). Les résultats obtenus et présentés dans la figure démontrent les performances de la technique de détection par polarisation spontanée dans la recherche de cavités.



La méthode passive (mesure le champ naturel) entre deux électrodes non-polarisables permet d'identifier les sens d'écoulement que ce soit au sein des matériaux de couverture comme dans l'aquifère karstifié. Son couplage avec la prospection par panneau électrique doit permettre d'identifier les « crypto-bétoires ».

Figure 13 : Profil passant par une bétoire active et 2 bétoires bouchées par l'exploitant

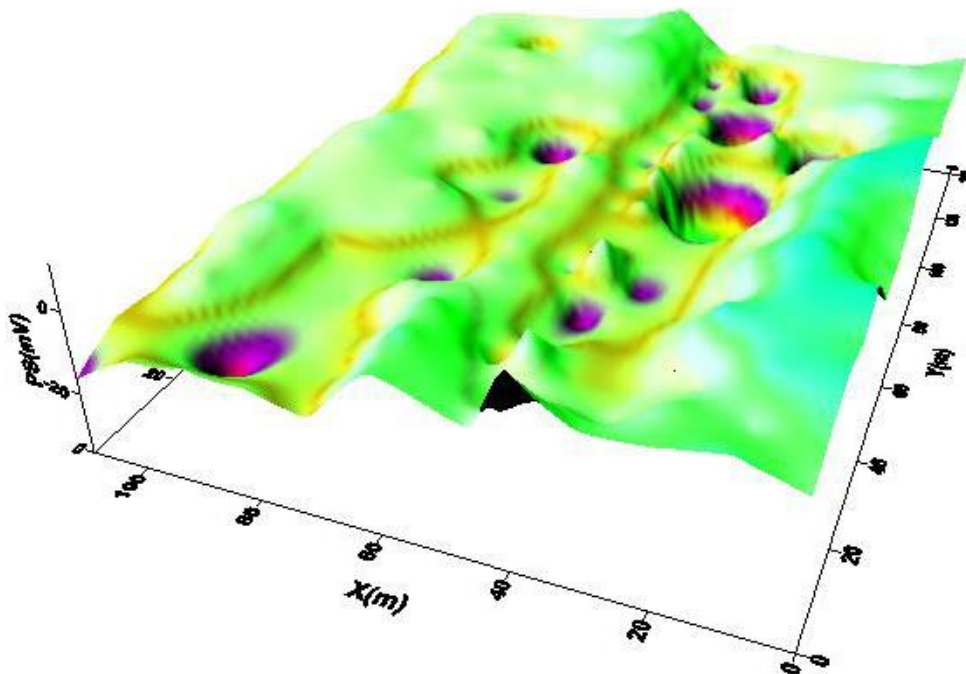


Figure 14 : Profil 3D de polarisation spontanée dans un talweg du secteur de Bouville

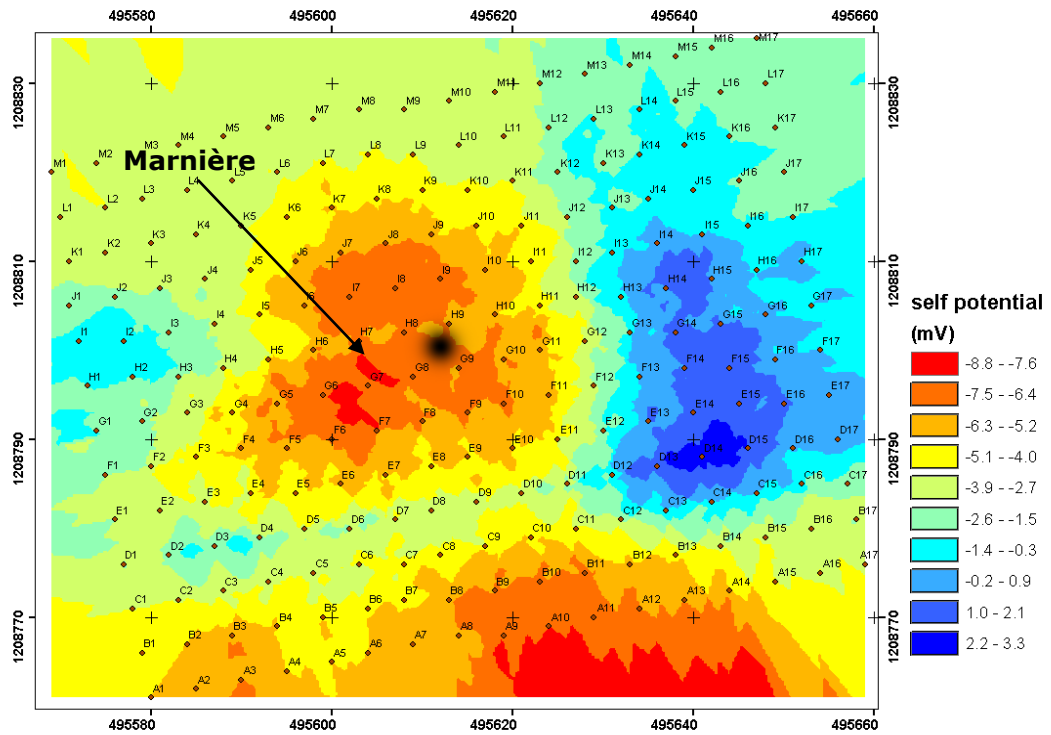


Figure 15 : Cartographie 2D d'une marnière du secteur de Bouville

7.2 - Le décapage

La méthode employée consiste en des travaux de **détection des indices de surface** afin de déterminer leurs natures et de **réaliser un diagnostic** avant de procéder aux **travaux de décapage** (le coût moyen indiqué représente un décapage de 200 m²). L'objectif du décapage est de trouver la tête de puits afin de la mettre à nu et d'analyser les possibilités de **descendre dans la cavité pour en estimer le volume**.

L'intérêt de cette méthode est que le **décapage permet d'identifier de manière certaine la présence d'une cavité souterraine**, que ce soit par son puits d'accès ou par l'effondrement du toit de la chambre. En ce sens, cette méthode est peut-être plus fiable que les méthodes de géophysique présentées ci-précédemment et de moindre coût. Elle présente par contre le désavantage de **nécessiter l'identification d'un indice de surface sous peine de devoir décapier une grande superficie de terrain et donc d'occasionner une destruction importante du sol**. Il faut donc être certain que toutes les cavités de l'aire prospectée ont été identifiées et qu'il n'y ait pas de cavités sans indices visibles dans la zone, pour réaliser un diagnostic exhaustif. En cas d'absence d'indices de surface ou simplement pour faire une étude exhaustive, il faudrait **coupler cette méthode avec la réalisation d'une étude géophysique permettant de délimiter des indices potentiels non visibles avant de procéder à un décapage**.

Pour **200 m²** de terrain à décapier, le prix de cette phase de reconnaissance serait de 800 € H.T. et de 1 200 € H.T. avec la rédaction du rapport de l'étude.



Photographies n° 9: Découverte d'un puits de marnière lors d'un décapage

7.3 - Les forages

Ils présentent l'avantage de déterminer avec certitude la présence d'une cavité à condition de traverser la chambre vide. Leur inconvénient vient de leur faible rayon d'action (il correspond au diamètre du forage) et donc de leur inadaptabilité à être utilisé comme seule méthode de prospection pour la détermination de la présence de cavités souterraines : **la quantité de forages à réaliser pour avoir une certitude en ce qui concerne les cavités souterraines rendrait cette étude extrêmement coûteuse.**

Le coût moyen unitaire d'un forage est de 1 000 à 1 500 € H.T. (1 200 € à 1 800 € TTC) pour une profondeur de 30 mètres, diamètre 100 à 150 mm.



Photographies n° 10: Exemple de forages

7.4 - Réalisation d'un puits et d'une expertise de la cavité

Si les études effectuées autour d'un indice nous indiquent qu'il s'agit bien d'une marnière, il faudra alors réaliser un puits d'accès pour atteindre la cavité souterraine.

La profondeur des marnières est en moyenne de - 25 m par rapport à la surface du sol, le prix du creusement du puits d'accès est d'environ 8 000 à 9 000 € H.T. en moyenne.

La cavité sera inspectée afin de déterminer sa morphologie et son volume précis. A partir de ces données, un nouveau périmètre de protection pourra être proposé.

Le coût de cette prestation varie en fonction de la morphologie et de la cubature de la cavité. Le prix de cette expertise pour une marnière moyenne est d'environ 1 500 € H.T.

Attention, lorsque les conditions de sécurité ne sont pas garanties, un passage caméra peut-être réalisé.



Photographies n° 11: Réalisation d'un puits et expertise d'une marnière

7.5 - Les travaux de comblement de la cavité

En fonction de l'expertise de la cavité (détermination de son état structurel, de sa morphologie et de son cubage) ainsi que du projet d'urbanisation ou de l'urbanisation existante, afin de lever tout risque, le choix du comblement par injection de coulis de ciment peut être réalisé.

Signalons également qu'en fonction de la morphologie et de la taille de la cavité, des forages d'évents peuvent être nécessaires afin d'éviter des poches de vide lors du remblaiement.

Le comblement de la cavité doit faire l'objet d'une expertise afin de valider ce dernier.

Le coût d'1 m³ de coulis de ciment varie entre 100 et 140 € selon la localisation de la cavité, de son accessibilité et de son volume.

Le coût du remblaiement d'une marnière de 100 m³, s'élève donc entre 10 000 et 14 000 € H.T. en moyenne.



Photographies n° 12: Remblaiement d'une marnière

8 - LA DEMARCHE D'ALISE POUR LEVER UN INDICE

8.1 - Assistance à maîtrise d'ouvrage

Depuis de nombreuses années, **ALISE a pu développer ses connaissances et ses compétences dans le domaine des cavités souterraines**. C'est pour cela qu'aujourd'hui, nous pouvons mettre à votre notre expérience et nos compétences pour lever un indice de cavité souterraine.

Tout d'abord, **notre rôle est de vous présenter les problématiques qu'engendre la présence d'une cavité souterraine et de répondre à l'ensemble des questions que vous vous posez** (« Quelles sont les conséquences de cet indice ? Quelles études faut-il effectuer pour le lever : décapage ? forage, géophysique ?, ... »).

Ensuite, **notre rôle de maître d'ouvrage délégué est d'effectuer l'interface entre le maître d'œuvre (celui qui aura en charge de lever l'indice) et le maître d'ouvrage (vous)** afin de vous aider à définir clairement vos besoins et de vérifier auprès du maître d'œuvre si l'objectif est techniquement réalisable.

8.2 - Maîtrise d'œuvre

Dans le cadre d'une **collaboration quadripartite entre ALISE, le CNRS, l'Université de Rouen et l'ANVAR, nous développons de nouvelles méthodes géophysiques**. Ces dernières sont des outils permettant une aide à la localisation, à la cartographie des cavités souterraines (marnières et bétoires).

En fonction de la configuration du terrain où est localisé l'indice (géologie, occupation du sol, type etc.), nous pouvons effectuer une **prospection du terrain par différentes nouvelles méthodes géophysiques** et traitement du signal (panneaux électriques et polarisation spontanée). Cette étude pourra mener à la réalisation de profils géologiques, à la détection d'anomalies souterraines avec orientation des forages, à l'élaboration d'une cartographie de la localisation des cavités souterraines et de leurs extensions éventuelles.

Les méthodes géophysiques développées par ALISE sont:

- La polarisation spontanée,
- Les méthodes de géophysique électrique,
- Les études géophysiques électriques – dispositif Wenner.

Les coûts de ces méthodes fluctuent en fonction notamment de la surface à prospecter.

ALISE effectue également des **prestations de décapages** (ponctuels ou surfaciques) et des **inspections de cavités avec détermination de la morphologie, le cubage et l'établissement quand cela est possible d'un nouveau périmètre de sécurité**.

9 - CONCLUSION

Plusieurs points ressortent de cette étude :

- De nombreux indices de cavités ont été recensés sur le territoire de la commune de Darnétal: **46 indices ont ainsi été répertoriés. Ce chiffre n'est toutefois pas définitif.**
- Ce document ne constitue pas une fin en soi, les résultats atteints doivent servir de **base à une meilleure connaissance des enjeux liés à la présence de cavités souterraines** afin de diminuer les risques encourus face à cette problématique. Ces risques vont concerner les infrastructures, les habitations, les constructions, mais aussi les eaux souterraines.
- Le plan fourni a été établi en fonction des informations disponibles. **La localisation des indices étant souvent peu précise** (à l'échelle de la parcelle, voire d'une ancienne parcelle positionnée d'après le cadastre napoléonien). **La carte ne constitue pas une source de localisation exhaustive. Les informations les plus précises se trouvent dans le recueil des fiches d'indice**, ce plan ne cherche qu'à donner une vue d'ensemble de la localisation.
- Parmi les mesures les plus importantes, figure **l'intégration des données dans tous les documents d'urbanisme afin de prendre en considération de manière durable les risques liés à la présence de cavités souterraines** sur le territoire de la commune.
- En dehors des précautions à prendre dans les zones sensibles, un aspect revêt une importance particulière : **l'actualisation des informations contenues dans le dossier réalisé**. Elle nécessitera une continuité dans ce qui a été initié, avec la mise en place d'une **procédure** formelle de suivi de ce dossier et avec **la nomination d'un(e) responsable** en mairie. Celui-ci sera ainsi en charge de **réceptionner et centraliser les informations** liées aux cavités souterraines (déclaration, nouvelles découvertes, nouveaux textes de loi et dispositions diverses, levée d'indices, etc. ...).
- Tout nouvel indice impliquera **l'édition d'une fiche** selon le modèle informatique donné, l'addition d'une ligne au **tableau des indices** et la localisation la plus précise possible sur le plan fourni.

- Cette personne responsable du dossier sera consultée à chaque demande de permis de construire, afin de donner un avis qui tiendra compte de la position des indices et de la nécessité d'un périmètre de sécurité autour de chaque indice recensé. Les étapes de consultation du dossier des indices de cavité seraient les suivantes :

- 1. Localisation de la parcelle où se trouve la demande ?**
- 2. Consultation du plan des indices pour voir si un indice se trouve à proximité**
- 3. Consultation du recueil des indices pour connaître la parcelle où sont localisés l'indice ainsi que le périmètre de sécurité qui lui correspond**
- 4. Consultation de ce recueil pour avoir des précisions notamment sur les indices et la levée d'indices.**

- Lorsque les indices de cavités souterraines nécessiteront des investigations supplémentaires pour être confirmés ou infirmés, plusieurs études spécifiques sont possibles en fonction :
 - de la typologie du projet,
 - des résultats obtenus à chaque phase,
 - du coût des investigations à réaliser,
 - des choix du maître d'ouvrage.

La démarche est donc variable et dépendante de plusieurs critères.

- Ces études spécifiques sont de type :
 - Décapage,
 - Forage,
 - Réalisation d'un nouveau puits d'accès,
 - Cubage et morphologie de la cavité,
 - Remblaiement.

ALISE propose de mettre son savoir et ses compétences à votre service concernant la prospection des marnières sur votre commune et leur prise en charge.