



Laboratoire Central
des Ponts et Chaussées

techniques et méthodes
des laboratoires des ponts et chaussées



Guide technique

**Les marnières
de Haute-Normandie**
*Méthodologies d'étude
et de prévention*

Les marnières de Haute-Normandie

Méthodologies d'étude et de prévention

Guide technique

Septembre 2008



Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
58, bd Lefebvre, F 75732 Paris Cedex 15

Ce document a été élaboré à partir des travaux réalisés au LRPC de Rouen, par :

- Céline ADAM (LRPC de Rouen),
 - Emmanuel MANIER (LCPC),
 - Nathalie BERENGER (LRPC d'Angers),
 - Jean-Louis DURVILLE (CGPC) sur la base d'une version initiale rédigée par Céline ADAM.
- Hélène De SOLERE, Fabrice MORONVAL et François HEDOU (DPPR) ont également participé à sa rédaction.

Les auteurs remercient, pour leurs contributions, les membres du groupe de travail et de relecture de ce guide et en particulier :

- Marcel TOULEMONT (DPPR),
- Didier PHILIPPE et Véronique LE BRIS (DDE 27),
- Frédéric GRESSELIN (DIREN Basse-Normandie),
- Mélanie GODEFROY (DDE 14),
- Arnaud QUINIOU (DDE 76),

ainsi que l'équipe de « Marniérologues » actuels et anciens, du LRPC de Rouen :

- Virginie AMANT, Yannick REDOR, Sylvain RENAUD, Maud DELAUNAY, Reynald FLAHAUT, Aline GRANDJEAN, Sylvain HAUSSARD, Mario ROMERA, Robert VOIMENT, Henri EVRARD, Christian SINELLE.

Pour commander cet ouvrage :

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

DISTC-Diffusion des éditions

58, boulevard Lefebvre
F-75732 PARIS CEDEX 15
Téléphone : 01 40 43 50 20
Télécopie : 01 40 43 54 95
Internet : <http://www.lcpc.fr>

Prix : 45 € HT

En couverture : Effondrement sur une voie communale de Seine-Maritime survenu en 2007.

Ce document est propriété du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et ne peut être reproduit, même partiellement, sans l'autorisation de son directeur général (ou de ses représentants autorisés).

© 2008 - LCPC

ISSN 1151-1516

ISBN 978-2-7208-2518-2

N° DOI/Crossref 10.3829/gt-gtmarn-fr

Sommaire

| | |
|--|-----|
| Introduction | 5 |
| Chapitre 1 - Contexte géologique et géographique des marnières | 7 |
| 1. Le contexte géologique | 7 |
| 2. Les départements concernés par les marnières | 10 |
| Chapitre 2 - L'exploitation des marnières | 11 |
| 1. Historique | 12 |
| 2. Les types d'accès | 13 |
| 3. Les caractéristiques des marnières | 16 |
| 4. La procédure d'abandon | 22 |
| Chapitre 3 - Les phénomènes d'instabilité | 25 |
| 1. Les manifestations au fond | 25 |
| 2. Les manifestations de surface | 28 |
| 3. Les facteurs responsables de la ruine des marnières | 33 |
| Chapitre 4 - Méthodologie de recherche, de reconnaissance et de traitement des marnières | 37 |
| 1. Méthodologie de recherche | 38 |
| 2. Les reconnaissances | 57 |
| 3. Le traitement du risque associé à la marnière | 71 |
| Chapitre 5 - L'analyse globale du risque lié aux marnières et des modalités de prévention | 75 |
| 1. L'analyse globale du risque | 75 |
| 2. La prévention | 84 |
| 3. Les aides et les indemnisations | 89 |
| Conclusion | 91 |
| Annexes | 93 |
| Annexe I - Lexique | 95 |
| Annexe II - L'application des méthodes géophysiques actuelles et en développement pour la détection des marnières | 97 |
| Annexe III - Extrait d'un Plan d'Indices de Cavités Souterraines (PICS) et sa légende | 103 |
| Annexe IV - Fiche d'indice de cavité souterraine associée à la marnière n° 27XXX-019 | 105 |
| Annexe V - Organigramme synthétisant l'ensemble des investigations complémentaires à réaliser sur un indice de carrière souterraine non visible sur le terrain | 109 |
| Annexe VI - Organigramme synthétisant l'ensemble des investigations complémentaires à réaliser sur un indice de carrière souterraine visible sur le terrain | 111 |
| Bibliographie | 112 |

PIERROT

Tout le monde pouvait entrer dans le jardin. Pierrot allait caresser chaque nouveau venu, et demeurait absolument muet.

Mme Lefèvre cependant s'était accoutumée à cette bête. Elle en arrivait même à l'aimer, et à lui donner de sa main, de temps en temps, des bouchées de pain trempées dans la sauce de son fricot. Mais elle n'avait nullement songé à l'impôt, et quand on lui réclama huit francs, – huit francs, Madame ! – pour ce freluquet de quin qui ne jappait seulement point, elle faillit s'évanouir de saisissement.

Il fut immédiatement décidé qu'on se débarrasserait de Pierrot. Personne n'en voulut. Tous les habitants le refusèrent à dix lieues aux environs. Alors on se résolut, faute d'autre moyen, à lui faire « piquer du mas ».

« Piquer du mas », c'est « manger de la marne ». On fait piquer du mas à tous les chiens dont on veut se débarrasser.

Au milieu d'une vaste plaine, on aperçoit une espèce de hutte, ou plutôt un tout petit toit de chaume, posé sur le sol. C'est l'entrée de la marnière. Un grand puits tout droit s'enfonce jusqu'à vingt mètres sous terre, pour aboutir à une série de longues galeries de mines.

On descend une fois par an dans cette carrière, à l'époque où l'on marne les terres. Tout le reste du temps elle sert de cimetière aux chiens condamnés ; et souvent, quand on passe auprès de l'orifice, des hurlements plaintifs, des aboiements furieux ou désespérés, des appels lamentables montent jusqu'à vous.

GUY DE MAUPASSANT

Extrait du conte « Pierrot »
paru le 09 octobre 1882, dans le journal « Le Gaulois »

Introduction

Le sous-sol crayeux de Normandie recèle de nombreuses cavités souterraines, soit naturelles, soit taillées de la main de l'homme. Parmi ces cavités, les carrières de craie, dites « marnières », sont de loin les plus problématiques quant à leurs effets.*

L'urbanisation progressive dans la seconde partie du 20e siècle des terrains agricoles des villes et villages de Normandie, associée au souvenir estompé de la présence de ces carrières anciennes et abandonnées, expose de plus en plus les populations aux dangers que la présence de ces vides peut provoquer.

Ces dernières années, des événements spectaculaires ont alerté les pouvoirs publics et les particuliers sur la nécessité de prendre en compte le risque inhérent à l'existence de ces carrières souterraines.

En effet, en 1995 dans la commune de Mesnil-Panneville (Seine-Maritime - 76), une maison a été entièrement engloutie dans un « cratère » de 40 mètres d'envergure. En 1998, à Hauville (Eure - 27), un abri bus scolaire a disparu dans le sol. À la fin du mois de mars 2001, à La Neuville-sur-Authou (27), les terres se sont dérochées sous les pieds d'un jeune homme, l'ensevelissant à plus de 10 mètres de profondeur à côté de la maison familiale.



■ Fontis : 3 m de diamètre, 2 m de profondeur (Seine-Maritime, 2001).



■ Fontis : 12 m de diamètre, 7 m de profondeur (Eure, 2001).

Effondrements de marnières affectant des bâtiments.



■ Fontis : 15 m de diamètre, 5 m de profondeur (Seine-Maritime, 2000).

¹ Les termes marqués d'un astérisque* renvoient au lexique placé à la fin de l'ouvrage (annexe I).

Dans ces conditions, il a paru opportun d'élaborer et de diffuser un guide méthodologique sur l'étude et la gestion des marnières, reposant essentiellement sur l'expérience acquise depuis une trentaine d'années par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Rouen.

*Le présent guide concerne donc les aléas dus aux carrières souterraines abandonnées de craie en Normandie : **les marnières.***

■ *Le premier chapitre présente le contexte géologique et géographique de la Normandie crayeuse concernée par les marnières.*

■ *Le deuxième chapitre dresse un historique législatif relatif à ces exploitations ainsi qu'un inventaire des différentes techniques d'exploitation utilisées.*

■ *Le troisième chapitre expose les différents phénomènes d'instabilité affectant ces carrières de craie.*

Ces trois premiers chapitres, relatifs à la description de l'aléa et à ses conséquences, ont vocation à informer l'ensemble des acteurs concernés directement ou non par la problématique des marnières.

■ *Le quatrième chapitre présente une méthodologie de recherche, de reconnaissance et de traitement de ces marnières pouvant être adaptée à tout projet d'infrastructure (tracé linéaire, aménagements de ZAC, de lotissements, etc.) ainsi qu'à l'établissement de cartes informatives et préventives. Ce chapitre est principalement destiné aux Maîtres d'œuvres et Bureaux d'Études Techniques.*

■ *Le dernier chapitre propose une analyse du risque et les modalités de prévention susceptibles d'être mises en place pour gérer au mieux cette problématique régionale. Il est destiné plus spécifiquement aux Maîtres d'ouvrages et aux particuliers ainsi qu'à l'ensemble des acteurs sociaux concernés : notaires, promoteurs, constructeurs, etc.*

Chapitre 1

Le contexte géologique et géographique des marnières

La notion de terrain favorable à l'ouverture d'une marnière est principalement liée à la nature lithologique des matériaux du sous-sol normand. D'autres facteurs comme la topographie et la présence d'eaux souterraines jouent également un rôle important dans la répartition de ces carrières souterraines.

❖ 1. LE CONTEXTE GÉOLOGIQUE

La région normande est située à cheval sur deux grands ensembles géologiques distincts : à l'Ouest et au Sud-Ouest se trouve le Massif armoricain, socle ancien composé de roches cristallines (principalement schisto-gréseuses ou granitiques) et de roches sédimentaires précambriennes et primaires plissées. À l'Est, se trouve la Normandie sédimentaire d'architecture tabulaire, d'assises jurassiques et crétacées sub-horizontales, appartenant au Bassin Parisien.

Les surfaces couvertes par les craies du Crétacé sont les plus importantes et intéressent tout particulièrement les départements de l'Eure et de la Seine-Maritime (hormis le Pays de Bray), une frange du Calvados (le Pays d'Auge) et une région de l'Orne (le Perche).

Sur les plateaux, le substrat crayeux est totalement masqué par les argiles à silex tertiaires et quaternaires puis par les dépôts quaternaires éoliens (limons des plateaux) ou par des colluvions sur les versants et dans le fond des vallons (Fig. 1).

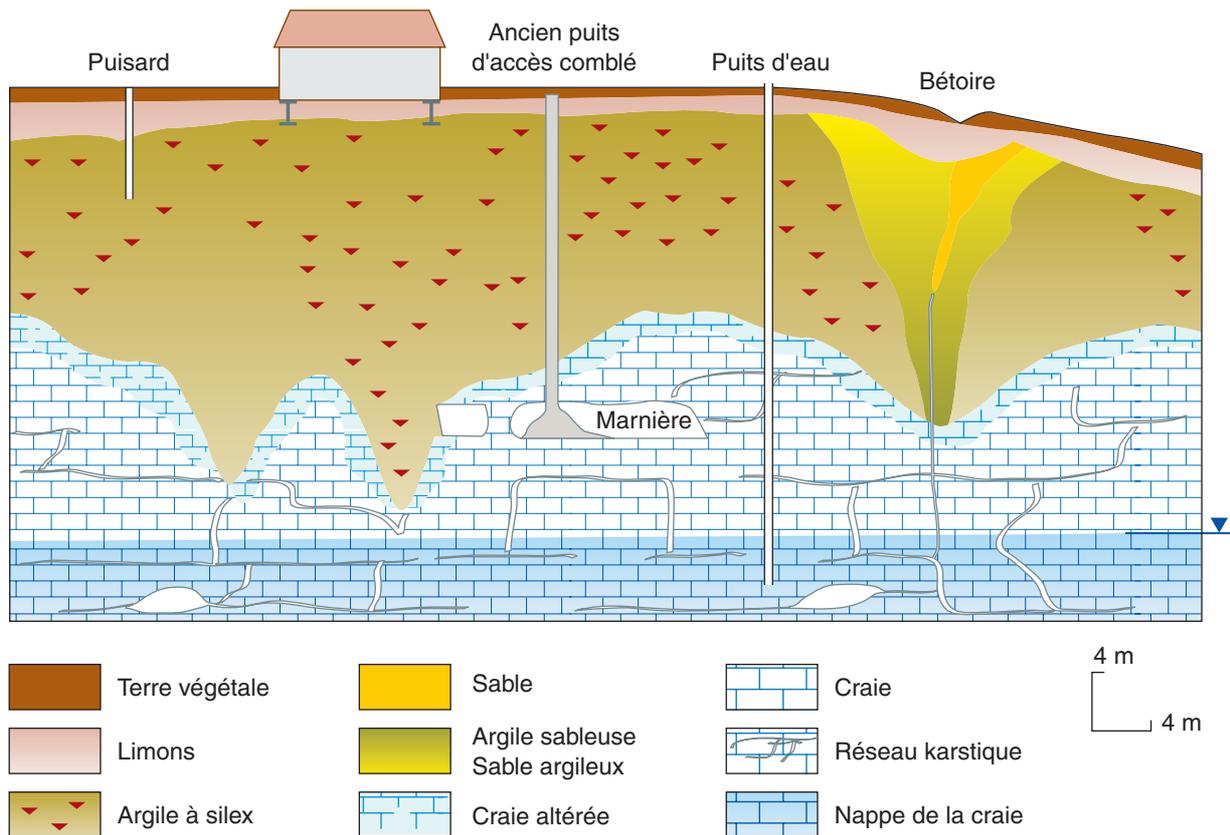
1.1. La craie

La craie est une roche composée à plus de 90% de carbonate de calcium (CaCO_3), à grain très fin, blanche, poreuse, tendre et friable. Elle est formée essentiellement d'une accumulation de coccolithes*. Elle est largement représentée au Crétacé supérieur, en particulier dans le Bassin parisien.

Les formations crayeuses constituent l'ossature des plateaux de la Haute-Normandie. Plusieurs niveaux crayeux se succèdent au-dessus de la couche imperméable des Argiles du Gault avec, de bas en haut :

- *Cénomaniens* : craie grise glauconieuse homogène à bancs de silex. Cette formation a par endroit été exploitée pour la pierre de taille ;
- *Turonien* : craie gris blanchâtre marneuse, généralement tendre, s'appauvrissant en silex vers la base. Cette formation a été exploitée pour l'amendement* des terres agricoles (« marne* »).
- *Sénonien* :
 - Coniacien : craie blanche assez grossière, en bancs* épais séparés par des cordons de silex ;
 - Santonien : craie blanche très peu argileuse, à silex abondants groupés en bancs rapprochés ;
 - Campanien : craie blanche, tendre, traçante et gélive à silex abondants.

Compte tenu de l'importance de la fracturation de la craie d'une part et de la solubilité du CaCO_3 , d'autre part, un important réseau karstique* s'est développé dans les formations crayeuses.



■ Fig. 1 - Contexte géologique des marnières (Manier ; 2002 modifié).

1.2. Les formations de couverture

1.2.1. La craie altérée

Cette zone correspond au toit* de la craie, en contact ou à proximité de l'argile à silex ou d'une poche de sable. La craie altérée, qui est en cours de décarbonatation, possède une teneur en eau élevée et est tendre. L'épaisseur de cette frange de craie altérée est variable, allant de quelques décimètres à plus du mètre.

1.2.2. Les argiles à silex

Les argiles à silex ou « Formation résiduelle à silex » sont le produit de décalcification de la craie en milieu continental. Il s'agit d'un mélange de silex plus ou moins entiers, contigus, jamais roulés, de limons et d'argiles rouges de décalcification, qui peut être localement sableux.

Les argiles à silex sont fréquemment solifluées sur les pentes et au bas des versants. Considérée comme imperméable et impropre à la culture, la formation des argiles à silex est presque toujours couverte de forêts. Cette formation est présente partout sous les limons de plateaux, remplissant les anfractuosités de la craie : elle est donc d'une épaisseur très variable (de quelques mètres à une vingtaine de mètres).

1.2.3. Les biefs à silex

Les biefs à silex sont situés en partie supérieure de la formation des argiles à silex souvent remaniée par un ruissellement local ou la cryoturbation. Ils sont composés de silex fragmentés et parfois de galets, de petits blocs de grès, etc., emballés dans une matrice argilo-sableuse réduite.

Les biefs, épais de quelques décimètres à plus du mètre parfois, existent sur les plateaux et sur les versants à faible pente.

1.2.4. Les limons de plateaux

Les limons de plateaux ou lœss sont des dépôts éoliens quaternaires composés principalement de fines particules de quartz. Ils forment une couverture meuble presque continue à la surface des plateaux. Les limons recouvrent aussi les pentes des versants faiblement inclinés et protégés des vents dominants. La puissance de cette formation, de l'ordre de 2 mètres sur les plateaux, diminue jusqu'à devenir nulle en bordure. La partie superficielle de cette formation, lavée par les eaux de pluie, fait l'objet d'amendement. Les limons de plateaux ont parfois été exploités comme terre à brique. Ils donnent des terres agricoles de bonne qualité et sont généralement cultivés de manière intensive.

1.2.5. Les colluvions

Les colluvions sont situées dans les fonds de vallées sèches et constituent les glacis visibles en pieds de versants. Mises en place par des phénomènes répétés de solifluxion, elles sont constituées de limons bruns et fins provenant du lessivage des formations résiduelles à silex et des limons de bordure de plateaux. Ces colluvions comportent parfois des silex isolés ou des formations résiduelles à silex. Leur épaisseur très variable, faible en tête de vallon, peut atteindre 10 à 20 mètres dans les fonds de vallons.

1.3. L'hydrogéologie

1.3.1. L'alimentation des nappes aquifères

La craie, roche poreuse (30 à 40 %), constitue un bon aquifère. La surface de la nappe de la craie est influencée par la topographie. Les écoulements souterrains se propagent vers les vallées sèches qui constituent les axes d'écoulement privilégiés, la craie y étant souvent fracturée et parfois karstifiée.

Localement en plateaux ou en vallées sèches, lors des orages les plus violents, d'importants ruissellements sont observés. Ces eaux pluviales sont soit captées par des bétoires* (points d'infiltration naturelle des eaux) soit infiltrées en plateaux. Dans le premier cas, les eaux parviennent rapidement à la nappe par le réseau de fissures qui se développe dans la craie à la racine des bétoires, dans le second cas, les eaux infiltrées en plateaux transitent par percolation à travers les terrains sus-jacents à la nappe. Ce contexte hydrogéologique fait qu'il existe très peu de cours d'eau à la surface des plateaux haut-normands.

1.3.2. Les nappes aquifères

Il existe cinq nappes avec de haut en bas : la nappe des alluvions et graviers, la nappe du Coniacien, la nappe du Turonien (dite nappe de la craie), la nappe du Cénomaniens sableux et la nappe des sables albiens. La nappe concernant les marnières est la nappe du Turonien.

La nappe du Turonien ou nappe de la craie est de loin la nappe la plus importante de la région. La craie a une double perméabilité : une perméabilité, faible, de micro-fissures liée à la porosité et une perméabilité, forte, liée aux diaclases* agrandies par dissolution.

Les zones principales de diaclases au-dessous du niveau piézométrique se situent aux fonds des vallées, même sèches, ou à leurs abords immédiats. Sous les plateaux, les fissures sont moins développées. La perméabilité peut ainsi être réduite dans certains niveaux peu fracturés.

La nappe de la craie est une nappe libre alimentée par l'infiltration des précipitations au travers de ses formations de couverture, limons et argile à silex. Les argiles du Gault (ou localement la base de la craie du Cénomaniens qui peut être silicifiée) en forment le mur.

D'une manière générale, la nappe s'écoule vers les vallées humides qui constituent son niveau de base ; les drainages sont importants sous les vallées sèches. La profondeur du plan d'eau varie de 50 à 100 mètres sous les plateaux, à 1 mètre dans les vallées humides. Les fluctuations piézométriques inter-annuelles peuvent atteindre 15 à 20 mètres dans les zones de plateau peu perméables ; en vallées, elles sont de l'ordre de 0,50 mètre.

Le sens d'écoulement général de la nappe se fait en direction de la côte. Un drainage général est effectué par les vallées sèches ou humides. Des intercalations de niveaux marneux, des bancs de silex ou des niveaux durcis de craie, constituent dans la craie plusieurs niveaux moins perméables qui donnent lieu localement à des écoulements préférentiels.

❖ 2. LES DÉPARTEMENTS CONCERNÉS PAR LES MARNIÈRES

Pratiquement tous les plateaux crétacés de la Normandie sont affectés par la présence de marnières qui se rencontrent principalement dans quatre départements : l'Eure et la Seine-Maritime dans leur totalité (à l'exception des vallées et de la boutonnière du Pays de Bray), la moitié du Calvados (à l'Est de la Dives) ainsi qu'une partie de l'Orne (le Perche et le Nord-Est du département). D'autres départements limitrophes (Eure-et-Loir, Somme, Sarthe, etc.) peuvent être concernés.

Un moyen d'estimer le nombre de marnières consiste à apprécier le volume de marne qui a été nécessaire pour chauler les terres agricoles.

D'après les anciens marnerons et les baux du 19^e ou du début du 20^e siècle, la règle habituelle était d'apporter en moyenne 1 mètre cube de marne/an/hectare de terrain. Sur la base de ce chiffre, en considérant une taille moyenne de 350 mètres cubes par marnière, une période d'exploitation à cette intensité de 70 ans et une surface cultivée de 70 %, on peut considérer qu'il existe, sur l'ensemble des plateaux de Seine-Maritime et de l'Eure, de l'ordre de 14 marnières au kilomètre carré.

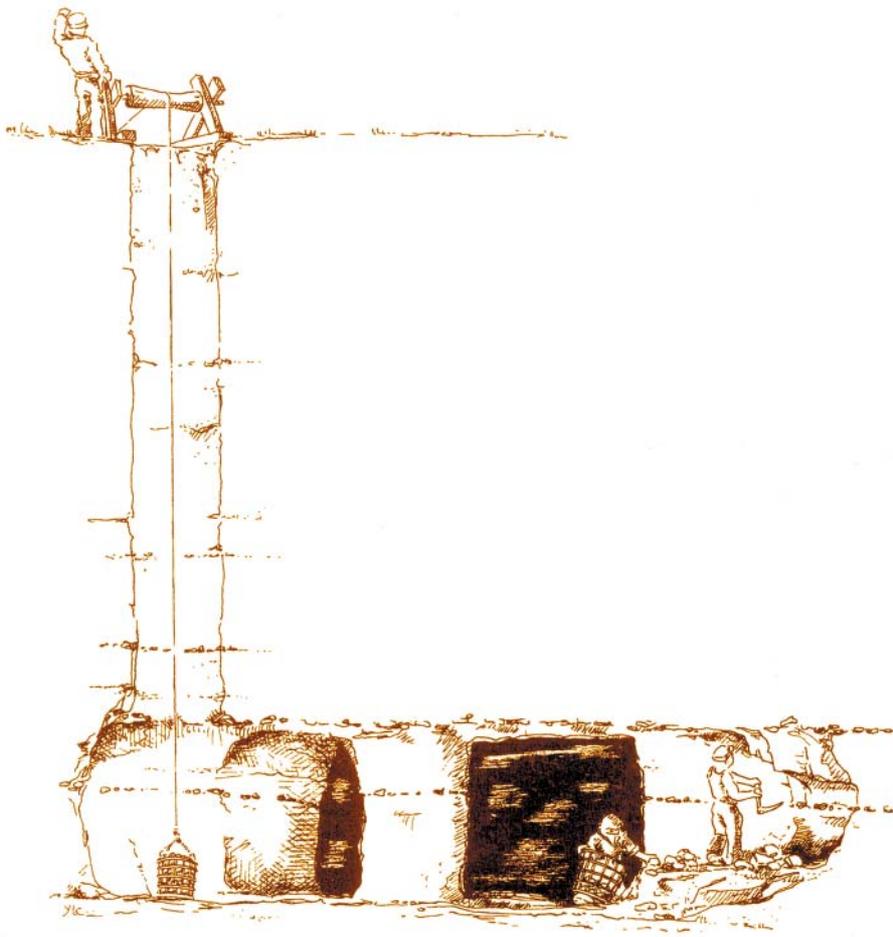
Un chiffre comparable a été déterminé lors de la recherche et du traitement systématique de ces cavités (notamment par le suivi du décapage* de la terre végétale) du chantier de l'autoroute A29, située sur le plateau du Pays de Caux (plateau occidental de la Seine-Maritime). Sur les 100 kilomètres concernés où on peut penser que 95 % des marnières existantes ont pu être repérées, la densité moyenne relevée était de 13 marnières par kilomètre carré.

La région de Haute-Normandie est ainsi marquée par la présence de très nombreuses marnières souterraines par puits estimées à environ 140 000 (80 000 pour la Seine-Maritime et 60 000 pour l'Eure) et dont seulement 20 % sont connues. À ce chiffre, s'ajoutent les autres carrières d'extraction de craie utilisée pour les fours à chaux et comme pierre de taille.

Chapitre 2

L'exploitation des marnières

Une marnière est une exploitation d'extraction de craie destinée à l'amendement des terres agricoles (Fig. 2). Le mot marne (terme utilisé pour désigner la craie tendre adaptée à cet usage en Normandie) est probablement issu du mot gaulois *Marga* qui signifie « argile calcaire » (dictionnaire Robert Historique).



■ Fig. 2 - Gravure illustrant le travail dans une marnière souterraine (source inconnue).

❖ 1. HISTORIQUE

Dès l'Antiquité, la craie fut exploitée pour fabriquer de la chaux et amender les sols. Aux 17^e, 18^e et surtout 19^e siècles, l'exploitation de marnières devient intensive.

Le marnage fait augmenter le pH du sol et améliore la production céréalière. En effet, les horizons de décalcification de la craie sont particulièrement acides. Les campagnes d'épandage de craie étaient renouvelées tous les 15 à 30 ans, au rythme moyen de 1 mètre cube de marne par hectare et par an. Généralement, on extrayait entre 200 et 500 mètres cubes de matériaux par exploitation, même si certaines carrières pouvaient atteindre quelques milliers de mètres cubes.

Avant 1853, l'obligation de déclarer une exploitation, bien qu'elle existe depuis 1810, n'est guère respectée par les exploitants ou les propriétaires et aucune norme d'extraction n'existe. La surveillance de ces exploitations est confiée aux Inspecteurs du Service des Mines.

1.1. La législation de 1780 à 1853

- La « déclaration concernant les carrières » de mars 1780 indique quelques règles générales quant aux exploitations (distances par rapport aux édifices existants, nécessité de rester à l'aplomb de sa propriété, etc.).
- La loi du 21 avril 1810 introduit les notions suivantes :
 - Déclaration au Maire de la commune, qui la transmet au Préfet ;
 - Surveillance des exploitations par l'administration.

Durant cette période, les risques liés au creusement ou à l'existence des marnières ne semblent pas avoir été pris en compte. Les lois de 1791 et de 1810, qui concernaient les mines et les carrières, n'ont manifestement pas été étendues dans leurs applications à ce type de cavité. Ceci provient probablement du fait que :

- Les mines (et l'on ne considérait comme telles à l'époque que celles dont la profondeur excédait 33 mètres) étaient l'objet de concessions gouvernementales ;
- Les marnières, moins profondes et de courte exploitation, ne faisaient pas l'objet de concessions et, de ce fait, les autorités départementales n'ont pas appliqué ces deux lois.

1.2. La législation de 1853 à 1928

À partir de 1853, des règles d'exploitation et de sécurité commencent à apparaître :

- Le décret impérial du 15 février 1853 réglementant les exploitations des carrières de Seine-Maritime, précise que les déclarations doivent mentionner plusieurs éléments importants (lieu, nom du déclarant, nom du propriétaire, position du puits par rapport aux habitations, plan de localisation du puits d'extraction) ;
- La loi du 27 juillet 1880 et le décret du 26 novembre 1889 réglementent les carrières de Seine Inférieure et de l'Eure : ils rendent obligatoires la déclaration et la localisation de chaque marnière, fournissent des normes d'exploitation à respecter et précisent qu'aucune excavation à ouvrir ou poursuivie ne devra se trouver à moins de 10 mètres de bâtiments ou de constructions quelconques, des routes, des chemins, des cours d'eau et des mares ;
- L'arrêté préfectoral du 18 novembre 1912 régleme le confortement des puits en exploitation et précise que les puits supplémentaires devront se situer à au moins 12 mètres les uns des autres. Il précise aussi les conditions de sécurité en surface et sous terre, les normes d'exploitation à observer (espacement entre les piliers, hauteur et largeur des galeries*) ainsi que l'obligation de condamner l'accès du puits à la fin de chaque exploitation et en toute sécurité ;
- La circulaire du 30 juin 1928, qui fut quasiment sans suite, oblige les communes à faire un état précis et complet de la situation des marnières.

Au début du 20^e siècle, le développement des amendements chimiques et l'amélioration des conditions de transport sont à l'origine de la baisse d'activité liée à l'exploitation des marnières, jusqu'à leur abandon vers la fin des années 1950.

❖ 2. LES TYPES D'ACCÈS

Il existe deux modes d'exploitations : le mode à ciel ouvert et le mode souterrain. Parmi les exploitations souterraines, on rencontre les carrières accessibles en cavage*, par une descenderie* ou par un puits vertical.

Les carrières souterraines accessibles par puits sont de loin les plus représentées en Normandie pour plusieurs raisons :

- *L'épaisseur de recouvrement* souvent importante* (la craie recherchée se situe en général en plateau, en moyenne à 25 mètres de profondeur), interdisait une exploitation à ciel ouvert ;
- *La grande majorité de la surface agricole se situant en plateau et le coût du transport étant important*, les exploitations devaient se situer à proximité des terrains à amender.

2.1. Les accès à ciel ouvert

Lorsque la topographie le permettait (flanc de coteau) ou que la craie était très proche de la surface, l'extraction était pratiquée à ciel ouvert.

La marne extraite de ces exploitations était peu prisée par les exploitants car de moindre qualité que celle extraite des carrières souterraines.

2.2. Les accès en cavage

Ces exploitations sont accessibles à flanc de coteau. La marnière était creusée directement dans la craie par l'intermédiaire de galeries horizontales (il ne faut toutefois pas exclure l'existence de puits verticaux d'accès ou d'aéragé*).

On peut noter l'existence d'exploitations combinées entre un mode à ciel ouvert et un mode en cavage (Fig. 3) et d'exploitations à niveaux superposés (Fig. 4).



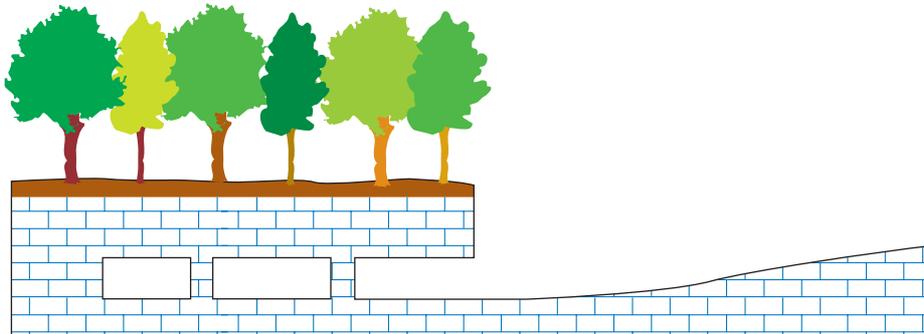
■ Fig. 3 - Entrée d'une marnière accessible en galeries horizontales à partir du front de taille* d'une exploitation à ciel ouvert.



■ Fig. 4 - Entrées superposées de deux niveaux d'exploitation.

2.3. Les accès par un plan incliné

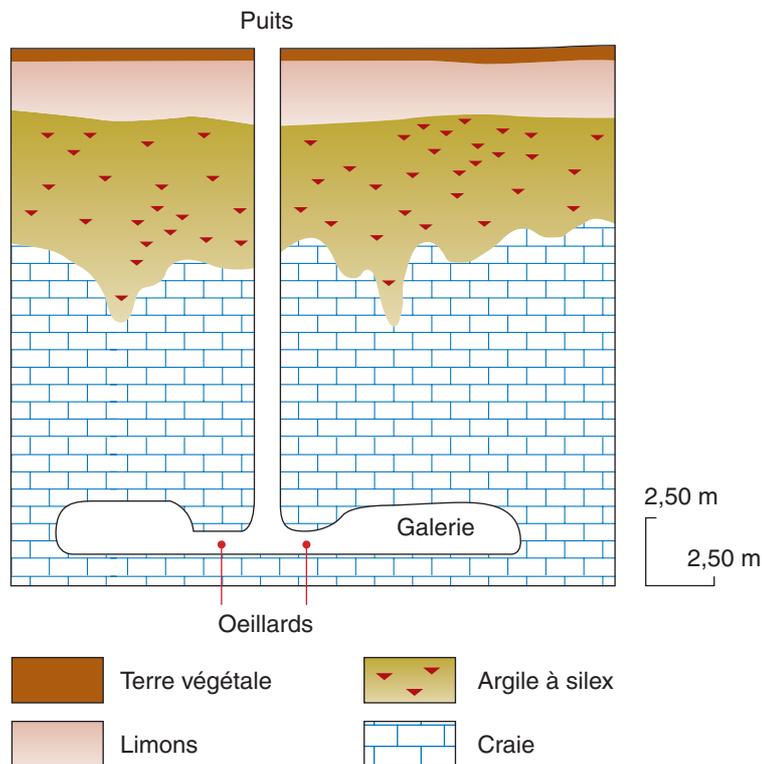
Lorsque le recouvrement présentait une faible épaisseur, une tranchée inclinée était réalisée dans le sol puis l'extraction était pratiquée comme pour une exploitation accessible à flanc de coteau (Fig. 5).



■ Fig. 5 - Schéma d'une marnière accessible par un plan incliné.

2.4. Les accès par puits

Ces exploitations sont situées en plateau. L'accès à la craie se faisait par un puits d'environ 1,20 mètre de diamètre, foncé au travers des formations superficielles (limons puis argiles à silex et/ou sable) (Fig. 6). Le puits pouvait être maçonné ou conforté de la surface au toit de la craie. La règle était de commencer l'extraction latérale sous le premier banc de silex dur, 3 à 4 mètres sous l'interface argile à silex/craie. Ce banc siliceux formait ainsi le ciel* de la future exploitation (Fig. 7). Les matériaux non exploitables (stériles) étaient généralement laissés sur le plancher des galeries (Fig. 8).



■ Fig. 6 - Coupe simplifiée d'une marnière accessible par un puits vertical.



■ Fig. 7 - Toit d'une galerie correspondant à un lit de silex.



■ Fig. 8 - Galerie de marnière dont le plancher est recouvert de stériles.

ENCADRÉ 1

LA LOCALISATION DES MARNIERES

Les marnières par puits sont généralement implantées en « point haut » topographique de façon à limiter l'effort d'épandage de la marne sur les parcelles et ne pas subir d'inondations lors de fortes pluies. On trouve des exceptions à cette règle : de la marne a parfois été extraite dans des puits d'eau, les galeries étant situées au-dessus du niveau d'eau ou encore dans des thalwegs, l'extraction ayant alors lieu en saison peu pluvieuse et la nappe de la craie à l'étiage. Par souci d'économie de place, on trouve aussi des puits implantés en limite de parcelles, dans des haies, voire dans des forêts. Les figures de l'encadré montrent un puits de marnière ouvert à quelques mètres de la lisière d'un bois. L'arbre a très certainement servi à l'accrochage du matériel visant à remonter les hommes et la marne. Ces puits peuvent être la source d'accident si ils ne sont pas signalés ou protégés.



Le plus souvent, les marnerons réalisaient de part et d'autre du puits une galerie horizontale de 1 à 3 mètres de large pour 1 mètre de haut : l'œillard* (cf. Fig. 6), qui amorçait l'exploitation en chambre*. Cette zone servait au remplissage des paniers remontant la marne, les marnerons étant ainsi à l'abri de chute d'objets dans le puits, mais aussi de refuge aux ouvriers lors de l'effondrement du ciel d'une chambre.

❖ 3. LES CARACTÉRISTIQUES DES MARNIÈRES

3.1. Les types d'exploitation

La forme et la taille des exploitations dépendent de nombreux paramètres :

- *La nature et les caractéristiques des matériaux* rencontrés lors de l'exploitation :
 - Extension du banc exploitable ;
 - Caractéristiques mécaniques de la craie² ;
 - Fracturation ;
 - Présence de poche d'argile : l'argile à silex remplissant les anfractuosités de la craie sous la forme de poches d'altération plus ou moins profondes (Fig. 9), il n'était pas rare, au cours de l'extraction de la craie, de recouper de telles poches qu'il fallait alors contourner. Lorsque ces poches apparaissaient trop importantes, les exploitants approfondissaient alors le puits sur plusieurs mètres (5 à 15 mètres), puis reprenaient l'extraction au niveau inférieur. Les marnières à deux niveaux sont ainsi assez fréquentes, et il en existe, plus rarement, qui présentent 3 ou 4 niveaux.
- *La durée de l'exploitation* qui conditionne le volume de l'exploitation ;
- *Le type d'exploitant* (marneron ou agriculteur) dont dépend la géométrie de la marnière.



■ Fig. 9 - Affleurement mettant en évidence les entonnoirs de dissolution de la craie (Seine-Maritime).

3.1.1. Les exploitations par puits et par chambres

La chambre était amorcée par l'intermédiaire d'une galerie horizontale réalisée au fond du puits avec une progression soit sommaire (Fig. 10), soit régulière (Fig. 11). Ses dimensions pouvaient atteindre jusqu'à 30 mètres de long pour 15 mètres de large.

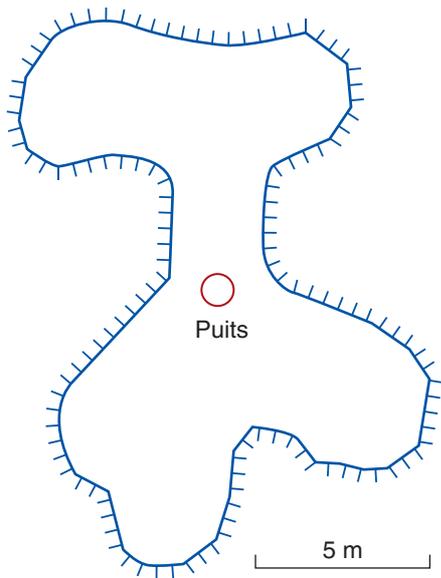
Il pouvait y avoir une seule chambre ou, plus souvent, deux chambres réalisées de part et d'autre du puits.

3.1.2. Les exploitations par chambres et piliers

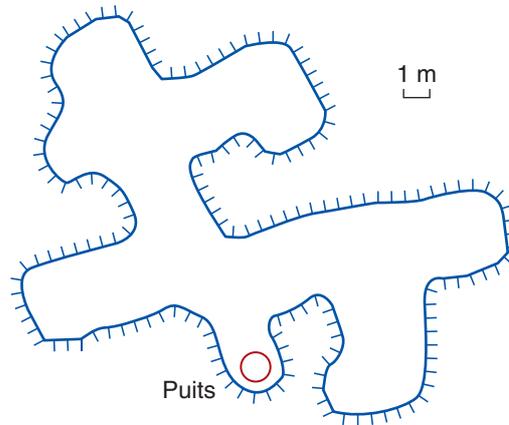
Appelées aussi en galeries et piliers ou encore à piliers tournés, ces exploitations étaient également réalisées à partir de puits verticaux, ou lorsque la topographie le permettait, à partir d'entrées implantées à flanc de coteau.

Il était ainsi réalisé un véritable réseau de galeries dont la stabilité était assurée par les piliers. Généralement, les marnières de ce type réalisées par des marnerons professionnels présentent des galeries orthogonales (Fig. 12), les marnières réalisées par des ouvriers agricoles ont une géométrie plus anarchique (Fig. 13). Les chambres pouvaient y atteindre des hauteurs de toit de 5 à 6 mètres (double hauteur de travail) comme pour les carrières de pierre de taille et les carrières de craie destinées à produire de la chaux.

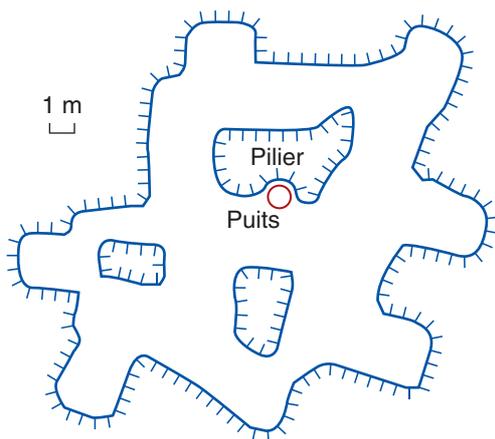
² Par exemple une craie trop dure ou trop charpentée posait des problèmes d'exploitation et ne constituait pas un bon matériau d'amendement.



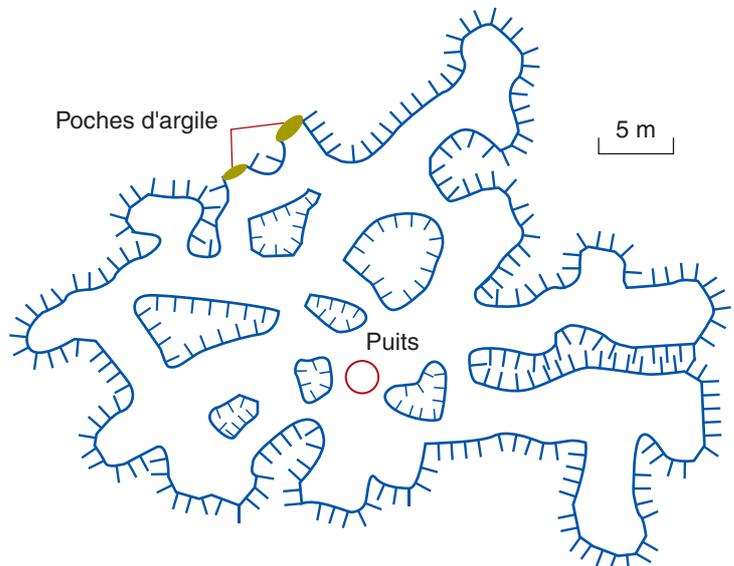
■ Fig. 10 - Schéma en plan d'une exploitation sommaire par puits et chambres.



■ Fig. 11 - Schéma en plan d'une exploitation étudiée par puits et chambres.



■ Fig. 12 - Schéma en plan d'une marnière à puits exploitée par chambres et piliers réalisée par un marneron.



■ Fig. 13 - Schéma en plan d'une marnière à puits exploitée par chambres et piliers réalisée par des ouvriers agricoles.

Ce type de carrière était souvent choisi par les marneron qui décidaient des directions principales d'exploitation en fonction de la fracturation naturelle de la craie (Fig. 14).

3.1.3. Les exploitations par hagues* et bourrage

Le banc est totalement exploité, la tenue du toit étant assurée par des empilements de blocs (Fig. 15) ou par bourrage de stériles. Cette technique fut très peu utilisée pour les marnières en Normandie.

3.1.4. Les exploitations en bouteilles ou catiches

Ce type de cavité, très fréquent en Picardie et dans le Nord (catiche), est peu répandu en Normandie.

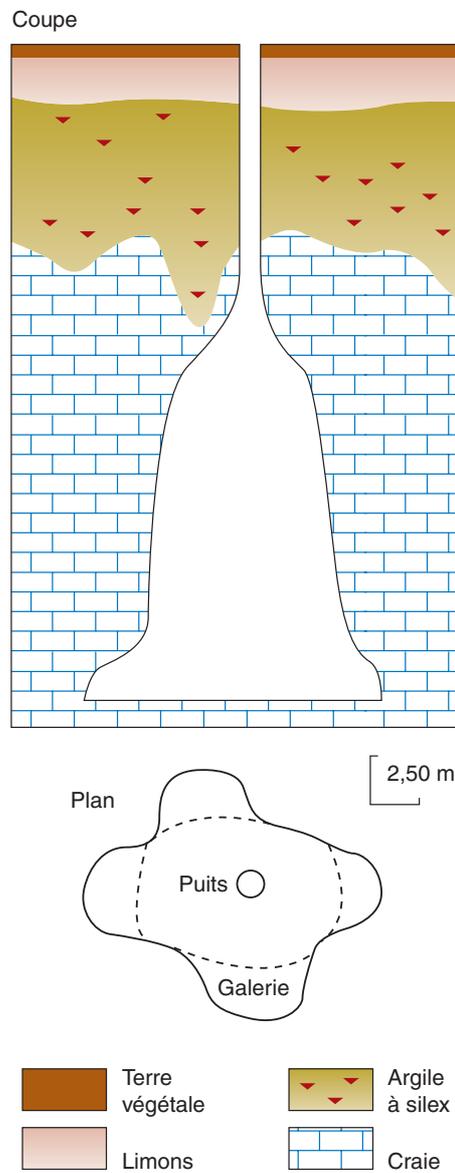
Un puits de 1 à 1,5 mètre de diamètre traverse les terrains de recouvrement et est élargi progressivement à partir du toit de la craie, donnant ainsi à la cavité une forme de bouteille (Fig. 16 et 17). La hauteur de ces exploitations varie généralement entre 7 et 15 mètres.



■ Fig. 14 - Pilier de manière souterraine : ruine du pilier sur la gauche et exploitation suivant la fracturation sur la droite.



■ Fig. 15 - Marnière partiellement exploitée par hagues et bourrage.



■ Fig. 16 - Schéma d'une marnière en bouteille.



■ Fig. 17 - Marnière partiellement exploitée en catiche.

3.2. La géométrie des exploitations

3.2.1. La profondeur des exploitations

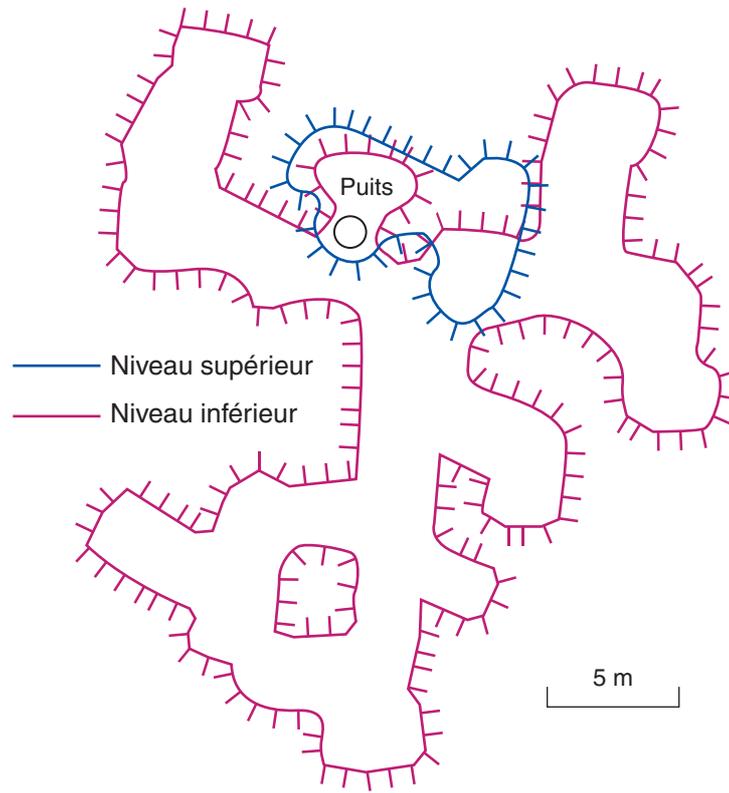
La profondeur des marnières est très variable car elle dépend d'une part, de la profondeur à laquelle la craie tendre a été rencontrée lors de la réalisation du puits d'accès et d'autre part, de la profondeur de la nappe. Généralement, on trouve les exploitations entre 20 et 30 mètres sous la surface du terrain naturel sous un recouvrement de 5 à 15 mètres de craie. Il arrivait, néanmoins, que des galeries soient creusées à quelques dizaines de centimètres seulement au-dessous du toit de la craie.

Les marnières peuvent présenter plusieurs niveaux d'exploitation :

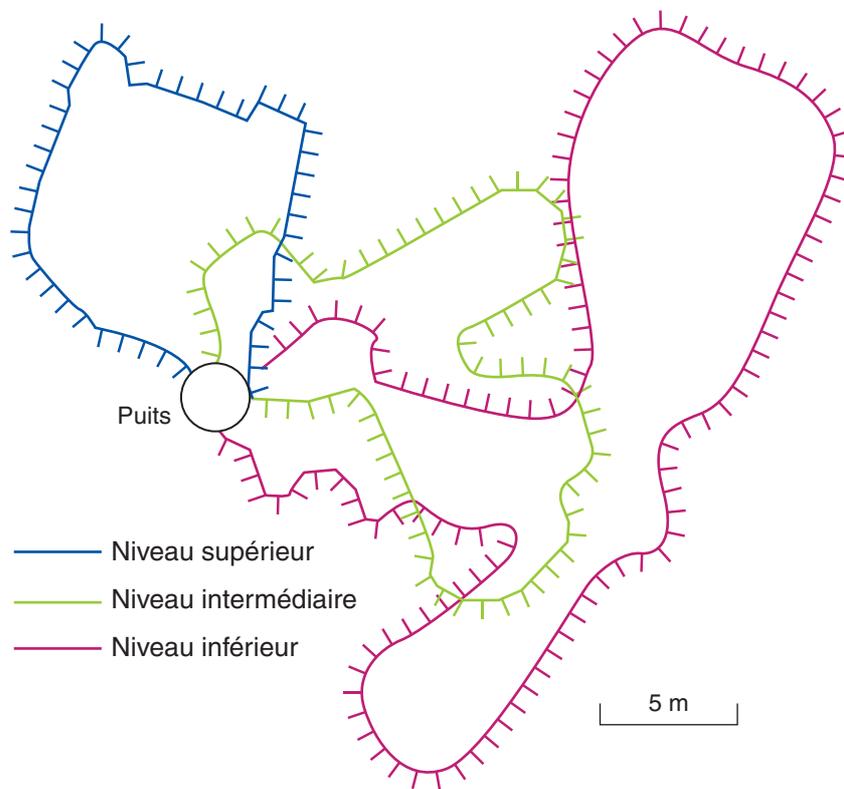
- Environ 90 % des marnières possèdent un seul niveau ;
- Environ 10 % des marnières possèdent deux niveaux (Fig. 18) ;
- Les marnières possédant trois niveaux d'exploitation (Fig. 19), représentent moins de 1% de l'ensemble.

3.2.2. La hauteur des galeries

La hauteur des galeries correspond généralement à la hauteur exploitable par un ouvrier muni d'un pic, c'est-à-dire entre 2 et 3 mètres. Il n'est toutefois pas rare de rencontrer des hauteurs d'exploitation atteignant 5 mètres, qui correspondraient à une reprise d'extraction depuis le plancher de la marnière (Fig. 20).



■ Fig. 18 - Schéma en plan d'une marnière exploitée sur deux niveaux.



■ Fig. 19 - Schéma en plan d'une marnière exploitée sur trois niveaux.



■ Fig. 20 - Chambre de marnière à simple et double hauteur d'exploitation.

3.2.3. La superficie exploitée

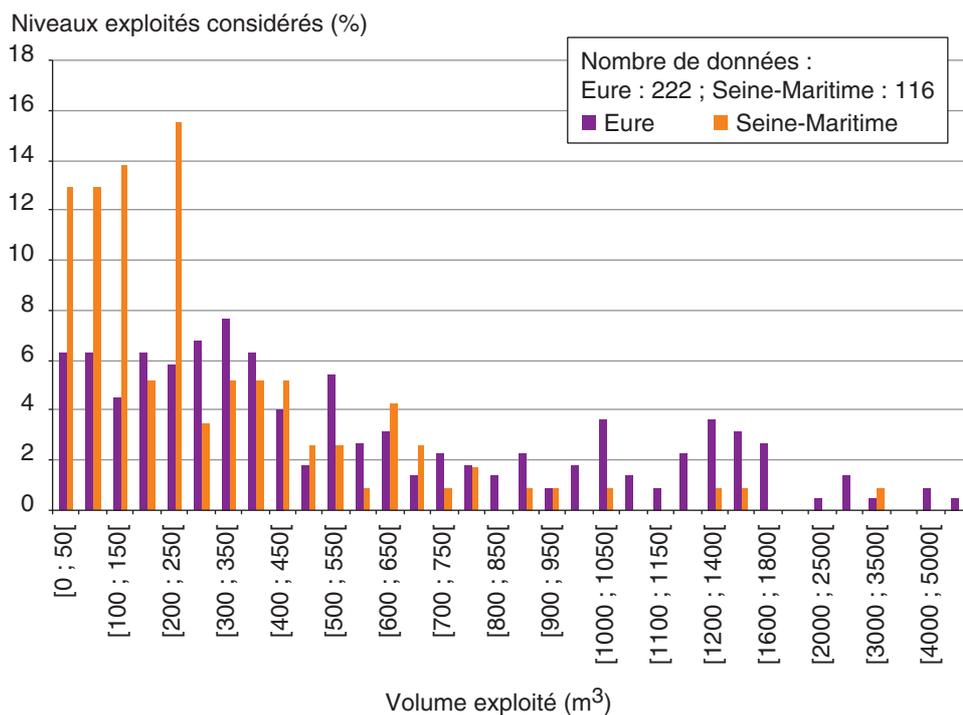
Pour les exploitations à plusieurs niveaux, la règle générale veut que la surface d'exploitation des niveaux augmente avec la profondeur.

Généralement, les niveaux supérieurs sont des niveaux « avortés » dans lesquels l'exploitation a été arrêtée en raison de la présence d'une poche d'argile ou d'une craie de mauvaise qualité.

3.2.4. Le volume de vide

La figure 21 représente la distribution des marnières en fonction de leurs volumes. Si le volume médian est d'environ 300 mètres cubes, on peut constater une différence entre le département de l'Eure (27) et celui de la Seine-Maritime (76). Ainsi, si environ 60% des marnières de la Seine-Maritime présentent des volumes de vide inférieurs à 300 mètres cubes, ce chiffre n'est que de 35% dans l'Eure. En outre, plus de 20% des exploitations de craie de l'Eure présentent des volumes de vide compris entre 1000 et 6000 mètres cubes contre seulement 5% dans la Seine-Maritime.

Pour les exploitations de grande dimension avec piliers, le taux de défrètement* (rapport de la surface exploitée sur la surface totale) est d'environ 90 %, les deux départements confondus.

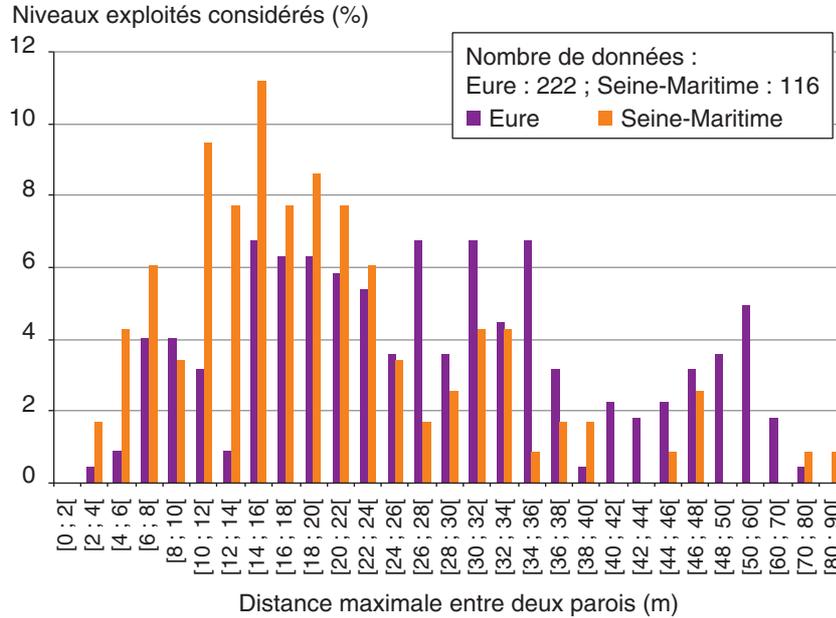


■ Fig. 21 - Distribution graphique du volume exploité pour chaque niveau exploité de Haute-Normandie.

3.2.5. L'envergure des exploitations

La figure 22 représente la distribution des marnières en fonction de leur extension maximale (plus grande distance entre deux parois).

La même différenciation s'observe entre les deux départements, les carrières de Seine-Maritime sont en général d'extension moins importante que celles de l'Eure.



■ Fig. 22 - Distribution graphique de l'extension maximale d'un niveau exploité pour chaque niveau exploité de Haute-Normandie.

❖ 4. LA PROCÉDURE D'ABANDON

Pour des raisons techniques et économiques, peu de marnières ont été confortées, et quasiment aucune n'a été comblée. Dès qu'une exploitation n'était plus jugée rentable ou devenait dangereuse, il était procédé soit au comblement*, partiel ou total du puits, soit au simple masquage de l'ouverture (œil* de la marnière). Parfois le puits était laissé ouvert.

4.1. Le puits ouvert signalé

En surface, il arrivait que l'on obstrue le puits par un ouvrage en pierres sèches en forme de voûte (Fig. 23) ou qu'on l'entoure de pieux ou de haies.



■ Fig. 23 - Dôme recouvrant un puits d'exploitation.

4.2. Le puits masqué

Le puits pouvait être simplement obturé par une dalle de béton, une plaque de tôle ou par une voûte en briques (Fig. 24).



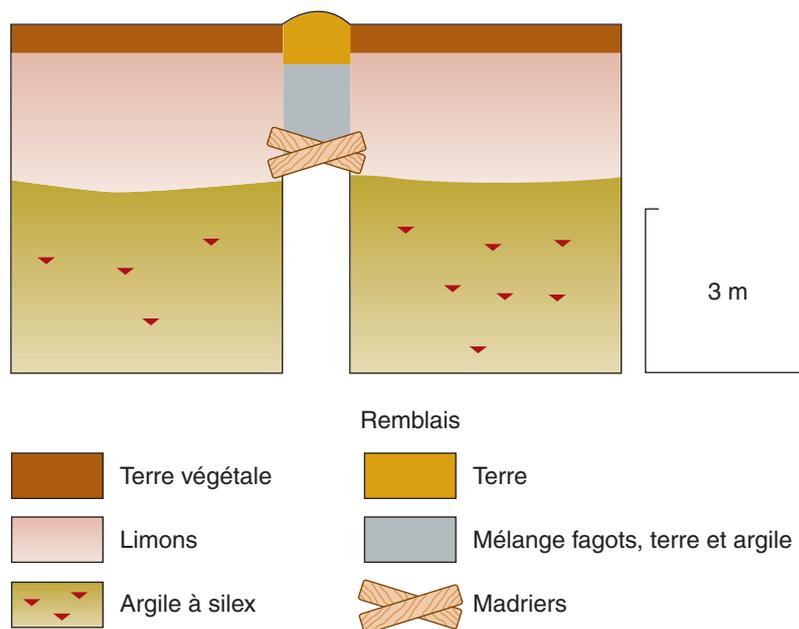
■ Fig. 24 - Puits dont l'orifice était fermé par une voûte briquetée.

Les exploitants recouraient aussi à la plantation d'un arbre ou d'un bosquet près du puits de la marnière pour signaler son emplacement et éviter de passer dessus avec un engin.

4.3. Le comblement partiel du puits

Dans le cas d'un comblement partiel, des madriers étaient encastrés dans le puits à 2 ou 3 mètres de profondeur et étaient recouverts d'argiles, loess, fagots ou remblais* divers pour former un bouchon, puis le terrain était nivelé à la surface (Fig. 25).

Les exploitations en bouteilles étaient fermées à la base du puits par une voûte en moellons de craie non cimentés et le col de la bouteille était rebouché, comme pour les puits des autres marnières.



■ Fig. 25 - Schéma d'un puits partiellement comblé.

4.4. Le comblement total du puits

Les techniques de comblement total du puits sont diverses. La plus commune était le déversement de matériaux dans le puits jusqu'à son obstruction complète. Une autre technique, plus anecdotique, consistait à empiler des souches d'arbres sur toute la hauteur du puits. Ces souches se désagrègent avec le temps, ce type de comblement n'était pas pérenne. Dans certaines carrières, avant le comblement du puits, des murs maçonnés ont été dressés par les marnerons à l'entrée des chambres formant ainsi une tombe*, afin d'éviter que les matériaux de remblais se déversent dans les galeries. Quelquefois, des dalles de silex étaient empilées de bas en haut du puits.

S'il est vraisemblable que guère plus de 50 % des puits étaient à l'origine entièrement comblés, la très grande majorité des puits le sont aujourd'hui. En effet, au cours du temps, les bouchons des puits partiellement remblayés ont cédé ou sont descendus progressivement dans le puits et l'effondrement ainsi généré était alors régulièrement remblayé.

Chapitre 3

Les phénomènes d'instabilité

La lente altération des matériaux et leur comportement différé sous l'effet des contraintes sont à l'origine de la dégradation des conditions de stabilité des carrières souterraines.

Le processus de dégradation qui s'est développé lentement au cours des siècles a pu s'accélérer sous l'effet des actions anthropiques : par exemple les infiltrations d'eau, les vibrations, la réalisation d'ouvrages et d'infrastructures à l'aplomb.

Enfin, le souci premier des exploitants était, hormis la stabilité à court terme pendant l'exploitation, la rentabilité de leur exploitation et non la stabilité à long terme. Ainsi, sur certains sites, dans le cas d'exploitations par piliers tournés, les piliers ont été retaillés avant abandon. Il arrivait aussi qu'avant de sortir pour la dernière fois de la marnière, certains exploitants récupéraient rapidement la marne des piliers les plus proches du puits d'accès. Les matériaux ayant été extraits jusqu'à la limite de stabilité des cavités, on assiste à une évolution plus ou moins rapide de ces exploitations vers la ruine.

❖ 1. LES MANIFESTATIONS AU FOND

Le processus de dégradation d'un vide résulte d'une redistribution des contraintes naturelles liée à l'excavation, à laquelle s'ajoute l'influence de divers facteurs liés au site.

Les contraintes verticales liées au poids du recouvrement se reportent sur les appuis, ce qui provoque une augmentation de la contrainte verticale sur ceux-ci et engendre des décollements de toit*. La rupture se produit lorsque la résistance d'un élément ou d'une structure est atteinte et dépassée par la sollicitation qui s'y exerce.

Les signes visibles d'instabilité sont les fissures mécaniques au toit et dans les piliers ainsi que l'écaillage* de ces derniers. Les désordres les plus fréquents sont la rupture des piliers, la montée de cloche de fontis*, la vidange des matériaux de remblai du puits d'accès et la vidange de poches d'argile recoupées lors de l'exploitation.

1.1. La rupture des piliers

Les charges naturelles des terrains de recouvrement sont reportées sur les éléments de soutènement qui subsistent dans les excavations : les piliers. Si la contrainte qui s'exerce sur un pilier est supérieure à sa résistance ultime, le pilier entre progressivement en rupture (Fig. 26).

Ce phénomène concerne tout particulièrement les piliers sous-dimensionnés ou surexploités (Fig. 27) et ceux préalablement affectés par des discontinuités naturelles. Ils prennent alors par écaillages successifs une forme en diabolo (Fig. 28) puis se rompent en emportant une partie du toit. La rupture d'un pilier entraîne un report des charges sur les piliers voisins qui peuvent à leur tour céder provoquant ainsi de proche en proche un effondrement important.



■ Fig. 26 - Pillier présentant des fractures biaises annonçant une rupture prochaine.



■ Fig. 27 - Pillier surexploité.



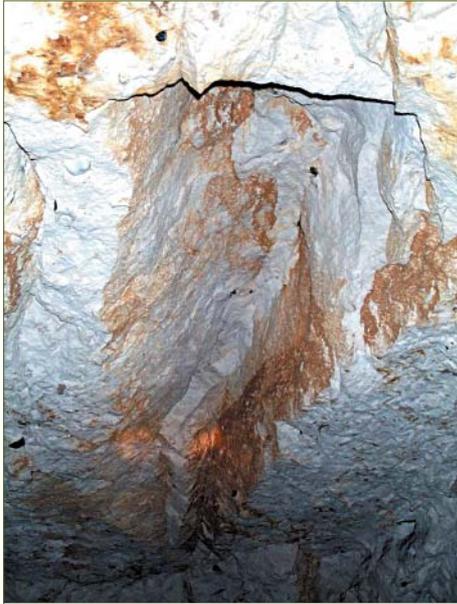
■ Fig. 28 - Écaillage de pied de pilier.

1.2. La montée de cloche de fontis

On appelle montée de cloche de fontis un vide qui progresse vers la surface par ruptures successives des terrains surmontant le vide initial. Ce processus est amorcé par un décollement de banc puis par une rupture locale au toit de la carrière (Fig. 29 à 31). Cette chute de toit se produit lorsque le premier banc du toit n'est pas suffisamment résistant vis-à-vis des contraintes à reprendre. Le mécanisme prend généralement naissance à l'intersection des galeries, où les portées entre appuis sont les plus importantes.

Soit le processus s'arrête de lui-même à une hauteur correspondant à la voûte stable, soit il se développe verticalement jusqu'à atteindre les matériaux meubles de la couverture puis la surface. La vitesse de progression du fontis, et donc le temps compris entre l'effondrement en profondeur et la manifestation en surface, est extrêmement variable ; elle dépend de la taille du fontis, de la nature des matériaux et de conditions locales. La présence d'une nappe aquifère ou d'une circulation d'eau, qui va étaler les éboulis dans les galeries, favorise le développement de la cloche de fontis vers la surface.

Il y a donc « compétition » entre la tendance à l'amortissement lié au foisonnement des matériaux et la tendance à l'augmentation en cas d'étalement du cône d'éboulis dans la cavité. Plus les vides sont petits et la manière profonde, plus le désordre généré en surface sera limité.



■ Fig. 29 - Cloche de fontis : le bloc s'est détaché du ciel sous la forme d'un dièdre.



■ Fig. 30 - Ciel tombé.



■ Fig. 31 - Éboulis de craie issu d'une cloche de fontis.

1.3. La vidange des matériaux de comblement du puits

Dans le cas d'un puits partiellement comblé, les matériaux de remblai chutent lors de la rupture des madriers soutenant le remblai superficiel ou se tassent au cours du temps en fonction de l'état de décomposition des matériaux. Les matériaux de remblai envahissent progressivement les chambres, créant ainsi un cône au sein de la cavité.

Dans le cas d'un puits comblé en totalité, le cône d'éboulis situé à la base de la colonne de remblais peut être déstabilisé et s'aplanir par le jeu d'infiltrations d'eau ou du fait de la remontée de la nappe de la craie dans la cavité.

1.4. La vidange des poches d'argile

Lorsque les exploitants des marnières avaient la malchance de recouper une poche d'argile et/ou de sable lors du creusement d'une galerie, celle-ci pouvait se vidanger dans l'exploitation (Fig. 32). Ils appelaient la chambre aboutissant sur cette poche d'argile la Mal-Chambre et l'abandonnaient. Lorsque la « racine » d'une telle poche était située à quelques mètres au-dessus du toit de la chambre, le risque d'un effondrement du toit accompagné d'une vidange des matériaux dans la cavité était élevé ; diverses archives témoignent d'accidents liés à ce phénomène.



■ Fig. 32 - Poche d'argile se déversant dans une galerie de marnière.

1.5. La synthèse des phénomènes

La figure 33 récapitule une grande partie des phénomènes susceptibles de se produire dans une marnière souterraine, accessible par un puits vertical.

❖ 2. LES MANIFESTATIONS DE SURFACE

Les désordres affectant les marnières peuvent se propager jusqu'à la surface. Leur manifestation en surface sera alors fonction de l'importance et de la profondeur des vides, du mode de rupture et de la nature des terrains de recouvrement.

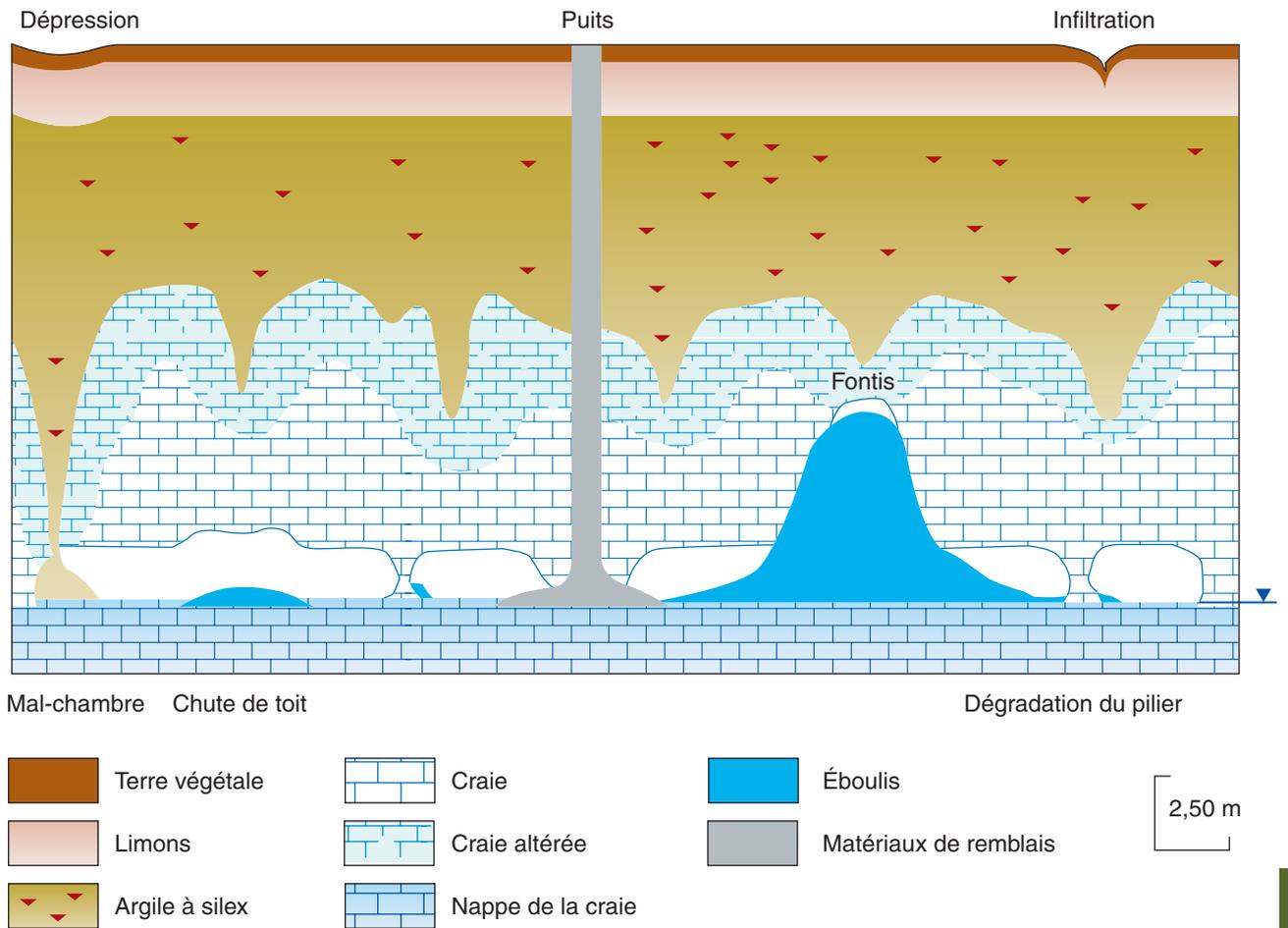
La rupture d'une cavité souterraine sur une superficie importante se traduit par un affaissement* ou un effondrement. L'affaissement est favorisé par la présence de terrains de recouvrement au comportement plastique ou par une épaisseur de recouvrement suffisamment importante par rapport aux dimensions de la cavité.

Globalement, les effondrements de diamètres limités sont des phénomènes beaucoup plus fréquents que les affaissements.

2.1. Les affaissements

L'affaissement résulte d'une déformation progressive et souple du recouvrement. Dans le cas d'une montée de fontis, il se traduit par une dépression topographique de la surface en forme de cuvette à fond plat et à bords fléchis sans qu'apparaissent de fissures sur les bords (Fig. 34).

L'amplitude d'affaissement est maximale lorsque la décompression des terrains est quasi nulle. Le mouvement peut également se faire par une succession de mouvements de sol plus brutaux, par éboulements successifs des bancs du toit et du recouvrement qui peuvent foisonner et parvenir à combler en plus ou moins grande partie le vide si la profondeur est suffisante.



■ Fig. 33 - Schéma récapitulatif des phénomènes souterrains affectant une marnière.



■ Fig. 34 - Dépression topographique de petite dimension.

En raison de sa progressivité, l'affaissement ne provoque généralement pas de désordres brutaux. Il peut endommager gravement les habitations exposées (fissuration des murs et des fondations) mais sans mettre en péril immédiatement la sécurité des personnes. La composante verticale du mouvement est maximale au centre de la dépression, mais ce sont dans les zones de bordure que se manifestent les efforts de traction ou de flexion particulièrement dommageables pour les structures.

Les affaissements de grandes dimensions peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres de diamètre pour une profondeur, au centre, parfois largement supérieure au mètre (Fig. 35). Ils sont facilement repérables sur le terrain.



■ Fig. 35 - Dépression topographique de grande dimension en liaison avec la ruine d'une chambre de marnière : on peut observer l'ancien puits d'accès au centre de la photo.

Le tassement progressif des matériaux de remblai d'un puits (que ce remblai soit total ou partiel), se manifestera par un tassement de faible profondeur et d'un diamètre limité, de l'ordre du mètre. Ce genre de tassement se rencontre très fréquemment (Fig. 36 en bas à gauche). Il est courant que les agriculteurs rebouchent ces petites dépressions, car elles se reproduisent au même endroit régulièrement.



■ Fig. 36 - Effondrements dus à la vidange des matériaux de remblai d'un puits de marnière.

2.2. Les effondrements

Un effondrement résulte de la rupture brutale des terrains de recouvrement.

2.2.1. Le débouchage du puits

Dans le cas du débouchage d'un puits, un effondrement cylindrique de profondeur variable et d'environ 1 à 1,5 mètre de diamètre (cf. Fig. 36) se produit.

Dans l'hypothèse d'un puits comblé sur toute sa hauteur, la vidange des matériaux de remblais sera générée par la rupture des parois de la « tombe » qui les retenaient jusqu'à présent. On aura alors en surface un effondrement cylindrique d'une profondeur modérée allant de quelques centimètres à plus du mètre.

Dans le cas d'un puits partiellement comblé, l'effondrement sera d'un diamètre similaire au cas précédent, mais sa profondeur sera largement supérieure. En effet, le bouchon de matériaux chute généralement jusqu'au fond du puits.

Le nombre de puits comblés seulement partiellement étant faible, le risque d'avoir un effondrement d'une profondeur supérieure à 10 mètres est peu élevé.

2.2.2. Le fontis

Le fontis* est l'effondrement provoqué par l'arrivée à la surface d'une cloche de fontis. Le foisonnement des matériaux au fur et à mesure de la progression de la cloche de fontis limite généralement la profondeur et le diamètre du fontis à quelques mètres (Fig. 37 et 38).



■ Fig. 37 - Effondrement dans un terrain agricole.



■ Fig. 38 - Effondrement touchant la chaussée et une propriété privée.

Lorsque le sommet de la cloche de fontis arrive à la base des matériaux meubles, il provoque une chute en bloc des matériaux de recouvrement, à la manière d'un sablier. Si le volume disponible en profondeur est suffisant, le fontis en surface peut alors atteindre une profondeur très importante de l'ordre de la dizaine de mètres, pour un diamètre du même ordre (Fig. 39 et 40).



■ Fig. 39 - Effondrement ayant entraîné une victime (12 m de diamètre pour 7 m de profondeur).



■ Fig. 40 - Effondrement (diamètre 15 m, profondeur 8 m) dû à la rupture partielle du toit d'une marnière.

Il peut arriver qu'un effondrement soit précédé d'un affaissement évoluant jusqu'à la rupture. Des fissures concentriques à l'effondrement sont alors visibles à la surface du sol.

2.2.3. L'effondrement de grande dimension

On considère comme effondrement de grande dimension, un désordre présentant un diamètre supérieur à 5 mètres.

Ce type d'effondrement est engendré par l'effondrement généralisé de tout ou partie de la marnière. En surface, il aura une forme irrégulière très étendue et une profondeur correspondant à la hauteur de vide initiale (Fig. 41).



■ Fig. 41 - Effondrement généralisé d'une chambre de marnière.

Ce type de désordres survient généralement de façon soudaine, sans signe précurseur visible en surface.

L'effondrement d'une exploitation en bouteille génère un entonnoir d'une profondeur largement supérieure au diamètre. L'origine de l'effondrement de la figure 42 n'a pas été confirmée par des investigations géotechniques, mais il est très probable qu'il soit dû à une exploitation de ce type.



■ Fig. 42 - Effondrement (12 m de diamètre pour plus de 30 m de profondeur) probablement lié à une ancienne exploitation en bouteille.

❖ 3. LES FACTEURS RESPONSABLES DE LA RUINE DES MARNIÈRES

Quelles que soient la nature, la taille ou la forme des marnières, elles sont vouées, à plus ou moins long terme, à la ruine. Le mécanisme aboutissant à la ruine d'une marnière dépend de nombreux paramètres :

- *La résistance et la fracturation du matériau exploité ainsi que la nature et l'épaisseur des formations de recouvrement ;*
- *La montée de la nappe lors de son battement (Fig. 43) faisant généralement suite, à quelques mois d'intervalle, à une forte période pluvieuse comme en 2001 en Normandie ;*
- *La proximité d'un point d'infiltration (naturelle ou artificielle) des eaux superficielles ;*
- *Le mode d'exploitation de la carrière ;*
- *La rencontre d'un boyau karstique (Fig. 44).*



■ Fig. 43 - Marnière ennoyée par la nappe de la craie : le niveau maximal d'ennoyement est indiqué par la limite supérieure du nappage d'argile sur la paroi.



■ Fig. 44 - Boyaux karstiques recoupés par des exploitations.

Tous ces phénomènes conduisent à deux types d'évolutions : les évolutions lentes et progressives d'emprise limitée et les évolutions brutales.

Il faut noter que 90% des marnières se dégradent par le fond. Le facteur prédominant responsable de la ruine des marnières est l'eau sous la forme soit d'infiltrations verticales, soit de battement de nappe (par ennoisement de la cavité ou par capillarité).

3.1. Les caractéristiques mécaniques

Dans le cas des marnières de Haute-Normandie, les terrains meubles de recouvrement ont une épaisseur supérieure à 10 mètres. La craie elle-même a des caractéristiques mécaniques médiocres, particulièrement dans sa partie supérieure.

L'eau a une influence non négligeable dans la ruine des marnières. En effet, elle s'infiltré dans le sol par l'intermédiaire de points d'infiltration karstiques (bétoires) ou par des puits. L'eau d'infiltration et celle de la nappe de la craie amoindrissent peu à peu la résistance des piliers et du ciel* des carrières.

Une modification significative de la teneur en eau du milieu par infiltration d'eaux superficielles ou battement de la nappe, altère considérablement la résistance mécanique du matériau. En passant de l'état sec à l'état saturé, les craies perdent environ les deux tiers de leur résistance en compression uniaxiale.

De nombreux effondrements surviennent ainsi après une longue période pluvieuse, et ceci même pour des marnières dont le dimensionnement initial des piliers aurait pu paraître suffisant.

Une roche soumise à une contrainte sur une longue durée subit, outre une déformation instantanée, une déformation progressive (fluage) qui peut aboutir à la rupture. Ce phénomène dépend de plusieurs facteurs (la nature du matériau, sa teneur en eau, les contraintes exercées, la température, etc.). Les mises en saturation hydraulique conditionnées par les variations pluviométriques saisonnières, semblent aussi favoriser la déformation par effet de fatigue. La résistance des parois de la cavité décroît également dans le temps du fait de l'altération progressive (vieillessement du matériau).

3.2. Le mode d'exploitation

Les paramètres géométriques essentiels déterminant la stabilité d'une carrière souterraine sont la portée du toit et, pour les grandes exploitations, le taux de défrètement. Si ce taux est trop important, les conditions de stabilité deviennent précaires et la rupture de la cavité est certaine à court ou moyen terme.

Certaines méthodes d'exploitation engendrent des configurations défavorables à la stabilité :

- *Un découpage aléatoire ou anarchique*, souvent adopté dans les anciennes carrières (principalement des piliers irréguliers), laissent des vides importants et des piliers sous-dimensionnés de portance insuffisante ;
- *Un élanement excessif* favorise le développement de mécanismes comme le cisaillement le long des fractures naturelles ou des inter-bancs obliques.

Dans le cas des exploitations sur plusieurs niveaux, les planchers intercalaires participent à la stabilité de l'édifice en jouant le rôle de chaînage vis-à-vis des piliers. Outre l'importance des propriétés mécaniques du plancher, un mauvais découpage, ne respectant pas une certaine rigueur dans la superposition des piliers des différents étages, se traduit par l'accroissement important des contraintes de cisaillement dans les planchers et/ou les piliers. Soumis aux charges transmises par le pilier supérieur, l'horizon de séparation, non soutenu, peut s'effondrer en entraînant avec lui l'ensemble pilier-ciel et donner naissance à une cloche de fontis importante.

3.3. Les facteurs anthropiques

Un des facteurs principaux de dégradation des cavités est l'eau. Toute action visant à modifier la circulation et l'infiltration d'eau a des répercussions destructrices non négligeables sur l'état des cavités. Par exemple, un affouillement ou un déboisement de la surface (exemple du remembrement) peut provoquer des modifications du régime des écoulements d'eau superficiels voire souterrains. C'est également le cas des infiltrations d'eau parasites (présence de puisard* à proximité, fuite de canalisation, absence de réseau d'assainissement collectif, etc.).

Dans le cas des carrières situées à des profondeurs faibles, les activités de surface (constructions, dépôts de remblais, circulation, etc.) peuvent provoquer des sur-contraintes et des vibrations susceptibles d'accélérer le processus naturel de dégradation des cavités. Par exemple, le passage d'engins lourds a des répercussions qui sont fonction des caractéristiques du site, de la masse, de la vitesse et de l'accélération des engins. Leur répétition peut entraîner à terme une fatigue de la structure, phénomène d'autant plus sensible que le niveau de contrainte initial est proche de la limite admissible du matériau.

La fréquentation clandestine des carrières accessibles à flanc de coteau et leur utilisation comme décharges sauvages, avec mise en dépôt de matières organiques putrescibles, donnant lieu à un processus de méthanogenèse, à des circulations d'acide acétique et à une libération de gaz carbonique, peuvent accélérer notablement la dégradation des ouvrages souterrains en milieu carbonaté.

Enfin, d'anciennes carrières ont été utilisées comme dépôt de munitions et de divers matériels de guerre. On peut aussi supposer que des matières toxiques ont pu être stockées dans des cavités non encore visitées.

Chapitre 4

La méthodologie de recherche, de reconnaissance et de traitement des marnières

Le contexte géologique de Haute-Normandie est favorable au développement de nombreuses cavités souterraines (artificielles et naturelles). Les marnières sont les cavités les plus représentées. Si on peut connaître approximativement leur nombre, il est en revanche encore impossible de préciser leur localisation. On se trouve par conséquent confronté à un risque statistique, couvrant quasiment l'ensemble de la Haute-Normandie, selon une moyenne d'environ 14 marnières au kilomètre carré.

Compte tenu de la géologie, de la faible dimension des marnières et de leur importante profondeur, les méthodes géophysiques actuelles ne permettent pas de retrouver ces cavités avec efficacité (cf. en annexe II). En effet, si le contexte géologique est d'apparence simple (limon, argile à silex, craie), il l'est beaucoup moins dans le détail : les interfaces limon/argile et surtout argile/craie sont loin d'être régulières et les variations latérales de faciès sont très fortes. On peut ainsi passer latéralement, et sur quelques dizaines de mètres seulement, de la craie à de l'argile riche en silex puis à de l'argile sableuse, à du sable argileux ou à du sable propre. Les propriétés physiques de chacun de ces matériaux (densité, conductivité, etc.) étant différentes, cela complique de façon extrême les interprétations des mesures indirectes de paramètres physiques que l'on peut effectuer. Par ailleurs, il est extrêmement difficile de définir des règles de localisation géographique et/ou de profondeur d'une cavité dans une zone donnée.

Sur les 140 000 carrières souterraines estimées pour les départements réunis de l'Eure et de Seine-Maritime, environ 20% sont aujourd'hui connues et à peine plus de 2000 sont recensées par an. À ce rythme, il faudrait plus de 40 ans pour toutes les localiser. Devant le nombre important de marnières non identifiées et l'étendue du territoire à couvrir (proche de 15 000 kilomètres carrés), seule une méthode empirique à grand rendement est utilisable pour localiser ces marnières.

Le LRPC de Rouen a ainsi développé une méthodologie de recherche, de reconnaissance et de traitement des cavités souterraines, notamment en travaillant sur le chantier autoroutier de l'A29 (Tableau I).

TABLEAU I - Principe d'élaboration de la méthodologie développée au LRPC de Rouen

| | |
|---------------------|---|
| Constat | Absence actuelle de méthode(s) géophysiques(s) de détection efficace(s). Impossibilité d'atteindre le risque zéro à des coûts acceptables |
| Principe | Travailler à ratio $\frac{\text{coût}}{\% \text{ diminution du risque}}$ croissant : <ul style="list-style-type: none"> - du général au particulier ; - du moins cher au plus onéreux. Adapté aux enjeux (aléa → risque). Documents non ambigus et exploitables par les demandeurs. |
| Méthodologie | <ol style="list-style-type: none"> 1 - Recensement le plus exhaustif possible des indices* de cavités souterraines (indices susceptibles d'attester de la présence d'une cavité à son aplomb) + décapage complémentaire lorsque celui-ci est possible ; 2 - Investigations spécifiques progressives sur chaque indice mis en évidence et adaptées à la nature de l'indice ; 3 - Traitement de la cavité adapté à l'aléa et aux enjeux. |

❖ 1. LA MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

La première étape dite de « recensement des indices » consiste à dresser un plan de localisation des cavités souterraines connues ou probables et des indices que ces cavités génèrent. Outre cette cartographie, une fiche de synthèse, décrivant l'origine et les manifestations des indices, est établie pour chacun d'entre eux. Cette étape est peu coûteuse (entre 10 000 et 15 000 euros pour une zone de superficie comprise entre cinq et dix kilomètres carrés) et permet de mieux connaître et localiser le risque.

Le principe du recensement réside en la compilation du maximum de renseignements accessibles et exploitables. Pour cela, des recherches bibliographiques sont réalisées ainsi que l'analyse de photographies aériennes, le tout confirmé par des entretiens avec les habitants et la reconnaissance pédestre du territoire.

Les limites inhérentes à cette méthode (cf. chapitre 1.5, page 55) conduisent à ce que 20 à 30 % de ces indices ne correspondent pas à des cavités souterraines (leurres). Globalement, cette méthode seule permet de retrouver 60 à 70 % des cavités existantes sur le territoire étudié.

1.1. La recherche bibliographique

Cette recherche bibliographique repose sur l'étude de documents d'époque et de documents récents tels que des rapports techniques.

1.1.1. La recherche en archives anciennes

Ces archives peuvent se retrouver en commune, aux Archives Départementales et à la Direction Régionale de l'Industrie de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE).

Juridiquement, l'ouverture ou l'abandon d'une marnière est soumis à déclaration depuis 1810. La consultation des archives départementales et communales permet de recueillir tous les documents concernant les marnières : déclarations d'ouverture, de fermeture et d'abandon des exploitations avec des plans de situation, procès-verbaux de visite ou rapports suite à des accidents ou à des études diverses. À partir des plans cadastraux napoléoniens et parfois des matrices cadastrales utilisées à l'époque, les marnières archivées peuvent être localisées avec plus ou moins de précision.

■ Les déclarations

Il s'agit des déclarations d'ouverture, d'exploitation ou de réexploitation de carrières (parmi lesquelles les marnières), qui étaient déposées en Mairie en deux exemplaires. Un exemplaire restait en Mairie, tandis que le second était transmis à la Préfecture. Ces déclarations étaient inscrites au fur et à mesure de leur arrivée en Préfecture dans un registre que l'on retrouve aujourd'hui, pour la Seine-Maritime, aux Archives Départementales. Aucun registre préfectoral n'a été retrouvé dans l'Eure, seul un registre émanant du Service des Mines mais couvrant une période très limitée (de 1884 à 1890) a été retrouvé dans les archives de la DRIRE³. Le double des déclarations était ensuite transmis au Service des Mines.

Aujourd'hui, les déclarations conservées en Mairie sont rarement retrouvées. Dans l'Eure, la quasi-totalité des archives communales a été transmise à la Préfecture. En Seine-Maritime, seules 37 communes ont versé les archives en rapport avec les cavités souterraines à la Préfecture. Sur les 145 recensements communaux réalisés depuis vingt ans par le LRPC de Rouen, 25 d'entre eux, soit un peu plus de 15 %, ont pu bénéficier de l'existence de déclarations de carrières conservées en Mairie. Cette disparition d'archives est, dans la majorité des cas, involontaire et à mettre en liaison avec les destructions de la deuxième Guerre mondiale. Des disparitions volontaires plus rares ont été observées. Enfin, les déclarations ont pu être versées avec d'autres archives communales au service des Archives Départementales.

Les doubles des déclarations transmis au Service des Mines n'ont pas, pour la période principale couvrant 1850 à 1940, été retrouvés en Seine-Maritime. Dans l'Eure, le dossier « Déclarations de marnières » issu de la série S aux Archives Départementales de l'Eure est noté manquant dans le répertoire. Cette disparition est antérieure aux années 1990 et personne aux Archives Départementales n'a pu éclaircir cette disparition. Toutefois, certaines déclarations accompagnées de plans sont retrouvées avec les dossiers contenant les rapports de visite du Service des Mines.

³ Ce dossier est consultable auprès de la Direction Départementale de l'Équipement de l'Eure, Service Aménagement du Territoire et Environnement.

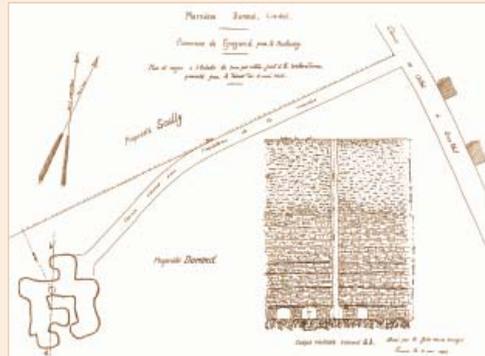
Pour les déclarations plus récentes (de 1940 à la fin des années 1950) et uniquement pour la Seine-Maritime, les doubles, émanant de la Préfecture, sont consultables aux Archives Départementales.

Les déclarations retrouvées en archives, lorsqu'elles sont détaillées, permettent, à l'aide du plan cadastral contemporain (napoléonien ou moderne [modification vers 1935]), un report relativement précis. Dans d'autres cas, le plan est plus succinct, diminuant la précision du report. Enfin, la déclaration peut se limiter aux références cadastrales de la parcelle où se situe la marnière, voire à quelques renseignements sommaires. L'encadré 2 illustre ces différents cas.

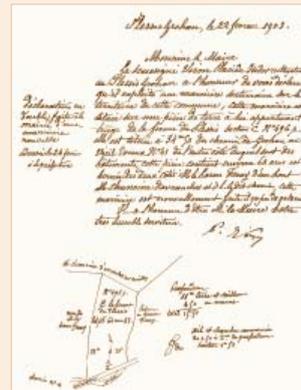
ENCADRÉ 2

EXEMPLES DE DECLARATIONS D'EXPLOITATION RETROUVEES EN ARCHIVES

Les documents retrouvés en archives peuvent être détaillés comme le document ci-contre qui accompagnait la déclaration d'ouverture d'une marnière, avec position du puits de la marnière, plan d'extension et coupe des terrains traversés ; ce type de plan, réalisé à une échelle détaillée, permet un report relativement précis du puits de la marnière, à plus ou moins 20 mètres voire dans certains cas 10 mètres près.



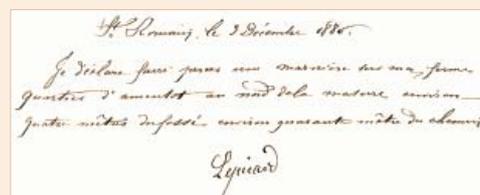
Dans ce deuxième cas, la déclaration est accompagnée uniquement d'un plan de situation du puits. Le plan est issu d'un report à main levée de la parcelle du plan cadastral napoléonien, ce plan est sans échelle, des distances approximatives situent le puits par rapport à une route et aux limites de la parcelle. Le report du puits sur la parcelle actuelle sera beaucoup moins précis que dans le premier cas pouvant aller jusqu'à une imprécision de quelques dizaines de mètres.



Dans ce troisième cas, la déclaration n'est pas accompagnée de plan, le déclarant mentionne uniquement les références cadastrales de la parcelle dans laquelle il compte ouvrir sa carrière. La marnière ne pourra être reportée ponctuellement, seule la parcelle napoléonienne pourra figurer sur le cadastre actuel.



Dans ce dernier cas, la déclaration n'est pas accompagnée de plan et est très succincte : le déclarant mentionne le lieu dit et des distances approximatives par rapport à des éléments non situés (masure, fossé, chemin). Ce type d'information n'est pas localisable, sauf à prendre en compte sur le plan la totalité du lieu dit.

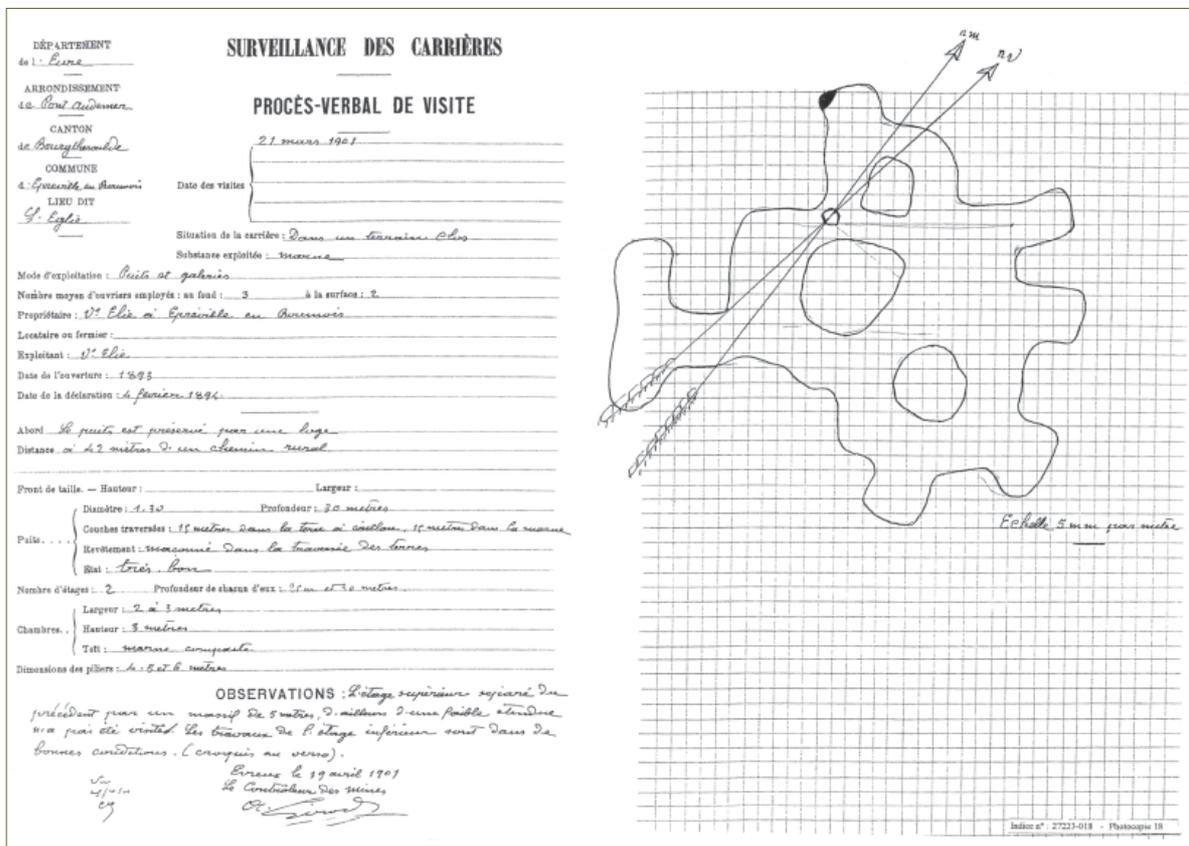


■ Les procès-verbaux de visite des carrières

Les inspecteurs des Mines dressaient un procès-verbal de visite à chaque inspection d'exploitation (Fig. 45). Ces procès-verbaux mentionnent les informations suivantes :

- La localisation : département, arrondissement, canton et lieu-dit ;
- Les dates des visites ;
- La situation de la carrière (dans un terrain clos, en terrain agricole, etc.) ;
- La nature de la carrière : substance exploitée et mode d'exploitation ;
- Le nombre d'ouvriers employés, au fond et à la surface ;
- Le nom du locataire ou du fermier ainsi que le nom de l'exploitant ;
- La date d'ouverture de l'exploitation ainsi que la date de déclaration et celle du plan d'extension et de localisation, la date d'ouverture ne coïncidant que très rarement avec la date de déclaration ;
- Les abords de l'exploitation (matériel présent en surface et éléments de sécurité) ;
- La distance du puits (ou du front de masse) par rapport aux infrastructures voisines ;
- La hauteur et la largeur du front de taille (pour des exploitations accessibles à flanc de coteau) ;
- La description du puits : diamètre, profondeur, terrains traversés (nature et épaisseur), revêtement et état ;
- La géométrie de l'exploitation :
 - Le nombre d'étages (avec la profondeur de chacun d'eux) ;
 - Les chambres : longueur, largeur et nature du ciel (silex ou craie) ;
 - La dimension des piliers.
- Des observations : cette rubrique comprend généralement un schéma succinct à l'échelle du 1/200 de l'exploitation et les commentaires de l'inspecteur sur les prescriptions à établir et l'état général de l'exploitation.

Ces documents sont retrouvés aux Archives Départementales de l'Eure et de la Seine-Maritime. Certains rapports d'inspection, postérieurs à 1930, ont été en outre retrouvés récemment dans les archives de la DRIRE.



■ Fig. 45 - Exemple de procès-verbal de visite de marnière dressé en 1901 par un inspecteur des mines.

■ Les rapports

Il s'agit de rapports émanant du Service des Mines, rédigés suite à des accidents dans les carrières et marnières, à des actions de sauvetage, à des désordres de terrain, à des actes illégaux ou à des dénonciations. Ces documents sont retrouvés aux Archives Départementales de l'Eure et de la Seine-Maritime. Certains rapports, postérieurs à 1930, ont été en outre retrouvés récemment dans les archives de la DRIRE.

■ Les plans de carrière souterraine

Il s'agit de plans levés à la demande du Service des Mines après une inspection, soit par les inspecteurs des Services des Mines, soit par des géomètres pour les plus récents. Ces plans sont en général retrouvés aux Archives Départementales, il est probable que certains cabinets de géomètres en possèdent un certain nombre.

■ Les décisions du Conseil Municipal

Leur consultation peut parfois fournir des renseignements sur les lieux d'extraction destinés à l'entretien des chemins vicinaux et des bâtiments communaux.

■ La construction des voies de chemin de fer

Le remblai mis en place pour la construction des voies provient d'extractions effectuées dans les parcelles voisines.

L'extraction se faisait soit par un accord à l'amiable entre le propriétaire du terrain de l'époque et la société de Chemin de Fer de l'Ouest de la France, soit par arrêté préfectoral ordonnant l'occupation des terrains pour y extraire des matériaux. Suivant le contexte topographique et le matériau extrait, ces extractions pouvaient avoir lieu en souterrain ou à ciel ouvert. Cette information n'est que rarement mentionnée sur les documents. En prenant l'exemple de la ligne Paris - Le Havre, qui se trouve en plateau, on peut penser que la majorité des extractions a été souterraine.

Les voies de chemin de fer ont été construites entre 1850 et 1900 pour relier les bourgs de différentes agglomérations. Suite à la révolution industrielle, de nombreuses industries se sont implantées le long de ces voies. Les bourgs desservis se sont urbanisés et agrandis du côté des voies de chemin de fer. Il est donc possible que les aménagements proches des voies de chemin de fer soient situés à l'aplomb d'anciennes carrières souterraines ayant servi à l'édification de ces voies ferrées.

À l'heure actuelle, les recherches n'ont été effectuées qu'aux Archives Départementales de la Seine-Maritime. Elles restent à faire pour l'Eure.

■ La construction et l'entretien des routes

En Seine-Maritime, des informations, concernant l'extraction de matériaux (marne et silex) pour l'entretien des 20 routes nationales et des 40 routes départementales ainsi que l'extraction de matériaux pour l'entretien des 145 chemins de grande communication, peuvent être retrouvées. Le résultat de cette recherche devrait approcher les 10 000 déclarations concernant des carrières souterraines et des carrières à ciel ouvert. Cette recherche est toutefois fastidieuse, les registres étant classés par route et non par commune. Les routes ayant pu changer de numéros, il est parfois difficile de trouver le dossier correspondant à la zone étudiée. En outre, peu de plans existent. Les informations recueillies concernent le numéro du cadastre, le nom du propriétaire, le nom de l'exploitant, la nature des matériaux extraits ; le type de l'exploitation (en souterrain ou à ciel ouvert) est rarement mentionné. De ce fait, ces carrières sont pour la plupart prises en compte comme étant d'origine indéterminée, leur report se fait au mieux à la parcelle.

Le dépouillement des archives concernant les routes nationales, départementales et les chemins de grande communication n'a pour l'instant pas été réalisé dans l'Eure.

Dans les deux départements de la Seine-Maritime et de l'Eure, sont également retrouvés des éléments sur l'exploitation et l'entretien des chemins vicinaux. Un classement par communes facilite la recherche.

■ Les établissements insalubres et installations dangereuses

Ces documents sont classés dans les archives émanant de l'Administration et sont répertoriés, en Seine-Maritime, par commune. Parmi ces installations insalubres et dangereuses, sont classées

certaines carrières causant des nuisances ainsi que les fours à chaux, en général situés à proximité du lieu d'extraction de la craie.

Pour l'Eure, la recherche de ces documents n'a pour l'instant pas été réalisée.

■ Les séries disponibles aux Archives Départementales

En résumé, le tableau II récapitule, pour les deux départements, les séries et répertoires qui doivent être au minimum consultés pour une enquête bibliographique la plus exhaustive possible. Il est probable que d'autres répertoires seront retrouvés dans les prochaines années (en particulier dans l'Eure), ils devront être rajoutés.

Tableau II - Séries et répertoires à consulter aux archives départementales dans le cadre d'un recensement d'indices souterraines en Haute-Normandie

| Séries | Contenus | |
|---|--|---|
| | Seine-Maritime | Eure |
| E Dépôt archives communales | 3E : Exemplaires des déclarations conservées en Mairie | 3E série Edt : Exemplaires des déclarations conservées en Mairie |
| M Administration générale et économie du département | 5M : Logements et établissements insalubres | À faire |
| O Administration communale | 30P : Voiries communales et voiries urbaines - Extraction de matériaux pour la construction et l'entretien des routes <i>Affaires mixtes : 135 indices disponibles sur les arrondissements de Dieppe et de Rouen ;</i> <i>Chemins de grandes communications : 2916 indices disponibles</i> | 3305 : Voiries communales et voiries urbaines - Extraction de matériaux pour la construction et l'entretien des routes |
| S Mines, carrières, transports | 2SP : Archives Ponts et Chaussées – Routes départementales et nationales – Extraction de matériaux pour la construction et l'entretien des routes impériales et royales | À faire |
| | 5SP : Archives Chemins de Fer – Extractions de matériaux pour construction et entretien des voies ferrées | À faire |
| | 8S : Archives Service des Mines 8S14 et 15 : Réglementation et affaires générales concernant les carrières 8S16 : États mines et carrières, états des exploitations souterraines à dispenser de délégués mineurs 8S17-18 : Rapports de surveillance 8S19, 20, 21, 198 : Registres d'enregistrement des déclarations d'ouverture de carrières (par ordre chronologique) 8S22 à 45 : Surveillance des carrières : déclarations, rapports, contraventions, plaintes, accidents, désordres, etc. (par ordre alphabétique) | 33S6 : Surveillance des carrières : déclarations, rapports, contraventions, plaintes, accidents, désordres, etc. |
| Z Archives Préfecture | Z840 à 842, Z13112, Z52507 : Ouvertures de carrières, effondrements, éboulements Z70280 : Documentation Z48257 : Fonds Ponts et Chaussées – Routes nationales (extraction de la série 2SP) – Carrières, entretien, extractions | À faire |
| Plans cadastraux napoléoniens + matrices cadastrales anciennes 1830-1930 | Consultables aux archives départementales et/ou dans les Mairies | Consultables aux archives départementales et/ou dans les Mairies |

■ Les limites

Les limites de cette collecte des archives anciennes sont les suivantes :

➤ La non exhaustivité :

- Marnières non déclarées : l'obligation de déclarer une marnière n'a pas toujours été respectée et les marnières ouvertes avant le décret de 1853 n'ont, pour la plupart, jamais été déclarées ;
- Disparition d'un grand nombre d'archives : en liaison avec la deuxième Guerre Mondiale ou disparitions volontaires ;

➤ L'imprécision :

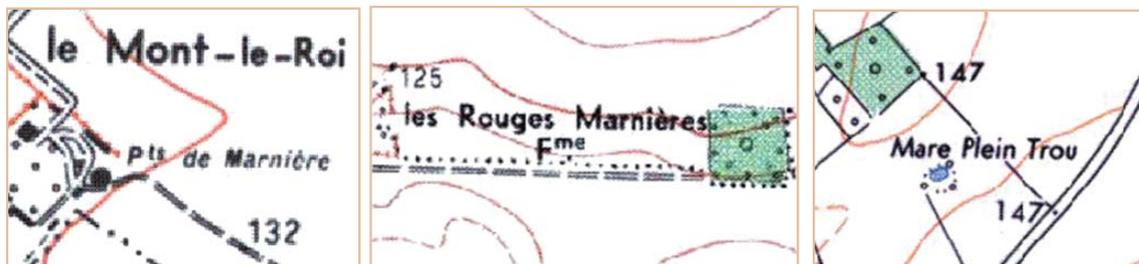
- Défaut de localisation pour nombre de marnières déclarées : certaines déclarations n'ont pas de plan, les rapports de visite indiquent très souvent l'existence d'une marnière dans un lieu dit sans mieux la situer et ces lieux dits peuvent ne plus exister ;
- Manque de précision des plans de situation : erreurs sur les distances, mauvaise orientation du nord, erreurs sur les références parcellaires ;
- Différences entre plan cadastral ancien et récent : les anciens plans n'ont pas la précision de ceux réalisés aujourd'hui et sont souvent entachés d'erreurs.

Ainsi, la localisation des archives peut être de type « point » (à partir d'un plan relativement précis), de type « ligne » (matérialisant une distance par rapport à une route ou un chemin) ou de type « aire limitée » (par exemple une parcelle napoléonienne). La précision du report d'un point sera comprise entre 10 et 20 mètres suivant la qualité des informations.

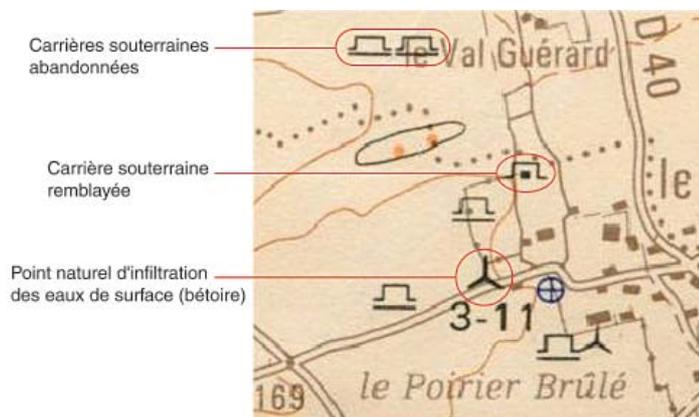
En raison de ces limites, seulement 10 à 20% des marnières sont retrouvées à l'issue de la collecte des archives anciennes.

1.1.2. L'étude des cartes existantes

Les cartes géologiques, hydrogéologiques, topographiques ainsi que les plans cadastraux anciens et récents, contiennent des informations concernant la présence potentielle de cavités dans un site donné : toponymie significative (lieux dits évoquant d'anciennes exploitations ou bétaires⁴, Fig. 46), emplacements de carrières, d'anciennes marnières et d'effondrements, bétaires, fosses, puits perdus, etc. (Fig. 47).



■ Fig. 46 - Exemples d'informations géographiques et toponymiques retenues sur les cartes topographiques.



■ Fig. 47 - Exemples de données observées sur les cartes géologiques.

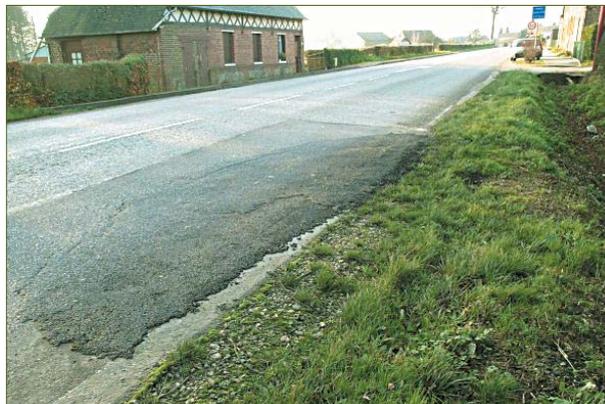
⁴ Les exemples de toponymes révélateurs sont nombreux, citons les lieux dits dénommés « Les Marnières », « La Fosse », « Le Fossard », « Le Puits Fondu », « Le Trou d'Enfer », « Le Faux Buisson », etc.

Les limites sont la non exhaustivité et l'imprécision des informations : par exemple, l'emplacement d'un puits de marnière sur une carte géologique au 1/80000 a une précision de +/- 80 mètres (le symbole s'étend sur 2 millimètres, ce qui représente en réalité 160 mètres).

1.1.3. La recherche en archives récentes

Des documents plus récents sont aussi exploités :

- *Des rapports d'intervention* de différents bureaux d'études sur des effondrements ou des recherches de cavités ;
- *L'inventaire des cavités souterraines de Haute-Normandie* demandé par le Préfet aux communes en 1995⁵ ;
- *Les archives des subdivisions du Département et de l'Équipement* qui remblaient souvent des effondrements et/ou affaissements sous et le long des voies (Fig. 48) ;
- *Les articles de la presse locale*, consultables aux Archives Départementales, qui parfois relatent des effondrements ;
- *Les comptes-rendus de visite de cavités* par des spéléologues ou des puisatiers ;
- « *L'Atlas des cavités souterraines* » de la DDE de l'Eure qui présente la cartographie non exhaustive des cavités souterraines et mouvements de terrain répertoriés sur le territoire départemental. Environ 13000 données sont disponibles en 2007 ;
- *La base de données « BDCavités »* recensant les cavités sur le territoire national, constituée et mise à jour par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et l'Institut National de l'Environnement industriel et des RISques (INERIS). La BDCavités est cofinancée par le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT) ;
- *La Banque du Sous-Sol (BSS)* du BRGM qui répertorie et localise en coordonnées Lambert II les puits d'eau* et puisards présents sur le territoire des communes ainsi que quelques anciens puits de marnières.



■ Fig. 48 - Exemple de réparation effectuée sur une voirie par les services de la DDE : dépression nivelée deux fois par ajout d'enrobé.

Les limites sont la non exhaustivité et l'imprécision. D'une part, toutes les sources ne sont pas connues et certaines ne tiennent pas à donner les éléments qu'elles connaissent. Ainsi, les cercles spéléologiques sont très réticents à fournir leurs informations. D'autre part, certaines sources sont peu fiables. Par exemple, l'inventaire de 1995 est très incomplet et imprécis : en moyenne et par commune, quatre ou cinq cavités sont recensées sur un fond de plan d'échelle peu adaptée (1/25000 le plus souvent), les informations étant peu voire pas détaillées (rien sur la source à l'origine de la suspicion de cavité).

⁵ Cet inventaire, demandé à toutes les communes suite à une période de fortes précipitations à l'origine de nombreux désordres de surface, a été relancé en 2001 dans l'Eure.

1.1.4. Le coût

La recherche bibliographique ne nécessite pas l'utilisation de techniques onéreuses, le travail consistant en la consultation et le dépouillement d'archives. Le coût d'une telle prestation peut donc s'exprimer en temps passé. Pour une zone d'étude d'environ 10 kilomètres carrés, environ quatre jours sont nécessaires à la réalisation de cette prestation. Le coût de ce travail est ainsi estimé à 4000 euros HT⁶.

1.2. La photo-interprétation

Dans le cadre de la recherche d'indices de cavités souterraines, deux types de photographies aériennes peuvent être étudiés : photographies verticales et obliques.

1.2.1. Les photographies aériennes verticales

Ces photographies sont disponibles à l'Institut Géographique National (IGN), lequel assure une couverture aérienne régulière du territoire français depuis plus de 60 ans à des échelles variées.

La photo-interprétation sur photographies aériennes verticales demande une formation de base, mais c'est surtout la pratique et l'expérience du photo-interprète qui vont être déterminantes.

Pour tirer le meilleur parti possible de la photo-interprétation, il est important de choisir les photos les mieux adaptées (échelle, émulsion), de les étudier en stéréoscopie (restitution du relief) et de réaliser une analyse multi-dates.

■ L'analyse stéréoscopique

Le recouvrement de deux clichés consécutifs autorise la vision du relief à l'aide de lunettes stéréoscopiques. Certaines lunettes permettent en outre de grossir l'image ce qui accentue l'impression de relief. Grâce à ce procédé, il est possible de détecter les différences de relief même infimes. Pour la recherche d'indices de cavités souterraines, il est conseillé d'utiliser le plus fort grossissement ($\times 8$) ; le grossissement intermédiaire ($\times 3$) est toutefois utile pour avoir une vue d'ensemble de la zone étudiée et bien se repérer.

À noter que le stéréoscope de terrain n'a pas un grossissement suffisant pour repérer les indices de cavités souterraines.

■ L'analyse multi-dates

Il est indispensable d'étudier, pour une même zone, des clichés pris à plusieurs années d'intervalle. L'étude multi-dates permet d'éliminer un certain nombre de leurres.

L'étude de cinq à six missions sur les 60 dernières années est recommandée, avec deux consultations impératives : celle de la mission la plus ancienne existante (en général 1946-1947, parfois 1937-1939) et celle de la plus récente. Les autres missions seront choisies en fonction de leur date et de leur échelle (Encadré 3).

Les missions les plus anciennes sont très intéressantes car elles sont le reflet du paysage contemporain des dernières marnières en activité. Elles permettent en outre d'obtenir de nombreuses informations disparues aujourd'hui (parcellaire ancien, constructions détruites, traces d'exploitations, trous de bombes, etc.), ainsi qu'une vision du sol nu avant son urbanisation. Mais leur mauvaise qualité rend souvent difficile leur analyse.

■ Le choix des photographies

Le choix des photographies porte sur deux critères : le type d'émulsion et l'échelle.

- Le type de l'émulsion

Le type d'émulsion recommandé pour la recherche d'anomalies potentiellement liées à des cavités souterraines est le noir et blanc (panchromatique) ; les photographies couleur n'apportent pas de plus-value.

⁶ Tous les tarifs donnés dans ce guide sont basés sur une référence 2007.

ENCADRÉ 3

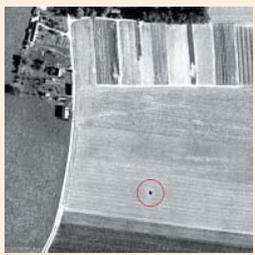
EXEMPLE D'UNE ÉTUDE MULTI-DATE DE PHOTO-INTERPRÉTATION

Une étude multi-date peut permettre de préciser à quelle période s'est produit un désordre aujourd'hui remblayé, de localiser avec plus ou moins de précision un indice mentionné oralement ou encore de répertorier des indices qui ne sont plus visibles sur le terrain (construction ou remblais) et dont personne n'a fait mention lors de l'enquête orale.

L'étude multi-date ne doit pas se faire sur un nombre trop restreint de missions : plus le nombre de missions étudiées est important, plus la détection est efficace. Un certain nombre de leurres peut être supprimé et l'observation de secteurs actuellement bâtis ou occupés peut être réalisée.

Les extraits photographiques suivants montrent l'intérêt de consulter plusieurs missions : ici l'indice (effondrement) a été mis en évidence sur une mission aérienne de 1985 au 1/14500. L'examen de ce secteur sur les deux missions antérieures et les trois missions postérieures retenues pour l'étude ne laissent pas apparaître cet indice. Cet indice n'ayant pas été répertorié par les autres moyens de recherche (bibliographie, enquête orale et reconnaissance de terrain), il n'aurait pu être recensé si la mission de 1985 n'avait pas été étudiée.

Cet exemple montre également l'importance du choix des échelles : l'indice n'a été constaté que sur une photographie à grande échelle. Les échelles trop petites permettent difficilement de mettre en évidence des objets de petite taille.

| | | | |
|---|--|--|-----------------------------------|
|  | <p>Mission aérienne de 1985 au 1/14500</p> |  | <p>Mission de 1978 au 1/14500</p> |
|  | <p>Mission de 1947 au 1/25000</p> |  | <p>Mission de 1999 au 1/30000</p> |
|  | <p>Mission de 1968 au 1/20000</p> |  | <p>Mission de 1999 au 1/20000</p> |
| <p>Secteur de l'indice visible sur deux missions aériennes de 1999 à des échelles différentes</p> | | | |

Il est intéressant d'étudier également une ou deux missions infrarouges noir et blanc : cette émulsion permet de bien repérer les rivières, mares et zone humides qui apparaissent en noir ; toutefois, d'autres indices peuvent disparaître, il est donc conseillé d'étudier en parallèle la même mission en noir et blanc.

- L'échelle

Le choix des échelles va dépendre de ce qui existe dans un secteur donné. Les échelles les plus courantes sur tout secteur d'étude varient du 1/20000 au 1/30000. Plus rarement, on dispose d'échelles plus grandes, allant du 1/15000 au 1/5000. Le choix va donc se faire au cas par cas, après recherche des missions existantes en consultant le site Internet de l'IGN⁷ ou en se renseignant directement auprès d'une agence régionale.

Il est conseillé de choisir si possible les grandes échelles (1/5000 à 1/15000), même s'il est difficile de se repérer. Il convient également d'éviter les échelles inférieures au 1/25000, car même avec le grossissement maximal, très peu d'anomalies sont repérées.

1.2.2. Les photographies aériennes obliques

Ces photographies sont réalisées au cas par cas, dans le cadre d'une étude spécifique. Leur étude vient en complément de l'étude stéréoscopique de photographies verticales, en faisant ressortir certains indices difficilement ou non visibles sur les photographies verticales.

Dans le cadre des études réalisées par le LRPC de Rouen, ces photographies sont prises à partir d'ULM (Fig. 49).



■ Fig. 49 - Exemple d'indice de cavité souterraine repéré en photographie aérienne oblique prise d'un ULM : cet effondrement de terrain est dû à la présence d'une cavité souterraine ; on peut observer les traces de l'engin agricole qui contournent l'effondrement.

■ Les avantages

Par rapport aux photographies verticales réalisées par l'IGN, les avantages sont les suivants :

- *Mise en œuvre plus souple* : les interventions peuvent être rapides, le matériel utilisé est simple, le coût de réalisation est relativement peu élevé ;
- *Obliquité et éclairage* : les photographies prises avec un certain angle et un certain éclairage font ressortir les ombres et accentuent les reliefs, mettant en évidence des anomalies de très faible amplitude (quelques centimètres) ;
- *Photographies prises à basse altitude* : ces photographies permettent de voir nettement les effondrements récents, qui peuvent être photographiés sous des angles différents ;
- *Choix de la date d'intervention* : la mission étant commandée spécialement pour une étude, il est possible de choisir la période la plus adaptée pour le survol. On privilégiera la sortie de l'hiver après

⁷ Ce site donne une liste non exhaustive des missions ayant survolé une commune ; par simple demande électronique, il est possible d'obtenir une liste complète auprès du correspondant photos aériennes de l'IGN France.

les intempéries (période au cours de laquelle survient la plupart des effondrements et où les terrains ne sont pas encore masqués par les cultures). Il est conseillé d'éviter la période comprise entre juin et septembre, les cultures étant trop avancées pour bien voir les effondrements et les anomalies de relief ;

➤ *Choix de l'heure d'intervention* : à condition que le temps soit clair et net, il est conseillé de réaliser les prises de vue en début ou fin de journée, afin de bénéficier des ombres rasantes qui accentuent le relief.

■ Les limites de la méthode

Les inconvénients relatifs à la prise de photographies obliques à basse altitude sont les suivants :

➤ *Importance des conditions météorologiques* : la réalisation de ces photographies nécessite un temps clair et net, sans brume atmosphérique pouvant altérer la netteté des photos. En fonction des délais de réalisation des études, il ne sera peut-être pas toujours possible de choisir la meilleure journée de survol ;

➤ *Difficultés de repérage* : la faible altitude de prise de vue limite le champ restitué sur la photographie ;

➤ *Difficultés de report cartographique* : l'échelle de prise de vue n'est pas connue et la visée oblique entraîne une certaine distorsion de l'image.

1.2.3. Les anomalies recherchées

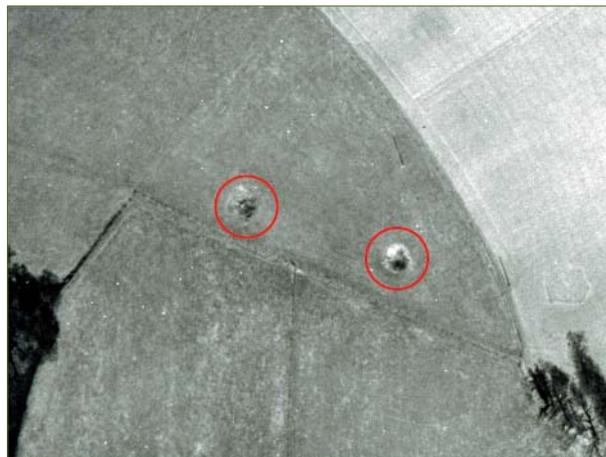
■ Les anomalies pouvant être liées à des cavités souterraines

- Les dépressions

Que ce soit en photographies verticales ou obliques, des dépressions de différentes tailles sont facilement mises en évidence. Ces anomalies peuvent être en liaison avec des cavités souterraines ou correspondre à des leurres (anciennes mares aujourd'hui à sec, anciennes extractions à ciel ouvert, etc.).

- Les effondrements

Des effondrements sont parfois visibles sur les photographies verticales, à condition que l'échelle soit suffisamment grande (1/15000 au minimum) et que l'effondrement ait quelques mètres de diamètre (Fig. 50). Mais les effondrements sont surtout visibles sur les photographies obliques, et ceci quelle que soit la taille de l'effondrement.



■ Fig. 50 - Effondrements visibles sur une mission de 1956.
(Photographie IGN référencée : CDP 1072 n° 84)

- Les zones d'humidité différentielle

L'étude des photographies verticales et obliques permet de repérer des zones humides, pouvant témoigner de la présence de cavités souterraines. Sur des photographies verticales, il est conseillé dans un premier temps de regarder l'ensemble de la zone étudiée en grossissement moyen ($\times 3$),

afin de repérer les axes de drainage superficiel. Puis, avec le plus fort grossissement ($\times 8$), on s'attachera à relever dans ces axes les taches sombres parfois associées à des dépressions, indiquant l'emplacement d'une zone humide susceptible d'évoluer en point d'infiltration. Les photographies obliques permettront d'affiner le travail de repérage des zones d'infiltration, à condition qu'elles aient été prises à la bonne période, c'est-à-dire après des précipitations suffisamment importantes pour que le cheminement des eaux de surface soit bien visible.

Des zones humides peuvent être également mises en évidence sur les plateaux : il peut s'agir d'effondrements remblayés, dans lesquels l'infiltration des eaux est soit facilitée soit restreinte, ou de leurres (anciennes mares, dépôts de matériaux humides, etc.).

La recherche de ces zones humides peut être facilitée par l'étude de photographies verticales infrarouges sur lesquelles les zones humides apparaissent en noir.

- Les zones de remblai possibles

Certaines anomalies apparaissent sur les photographies aériennes sous la forme de taches de couleur claire, en liaison avec la nature des matériaux de surface. Ces taches claires peuvent correspondre à des désordres de surface remblayés ou à des leurres (dépôts divers, zone terrassée, etc.).

- Les zones non cultivées ou à végétation différente

Visibles sur les photographies obliques prises à faible altitude, elles peuvent indiquer un effondrement ou un affaissement remblayé ou correspondre à un leurre lié à l'activité agricole.

- Les arbres isolés et les bosquets

Sur les missions les plus anciennes, les arbres isolés et les petits bosquets en plein champ doivent être relevés. En effet, comme expliqué dans le chapitre 3, ils sont très souvent en relation avec des puits de marnière ou des effondrements (Fig. 51). Ces arbres et bosquets n'existant plus aujourd'hui (Fig. 52), seules ces photographies anciennes permettent d'en retrouver la trace.



■ Fig. 51 - Bosquet dissimulant un fontis.



■ Fig. 52 - Souche d'arbre isolé signalant la présence d'un puits.

Attention toutefois aux leurres : certains arbres isolés faisaient autrefois partie d'un verger, d'autres marquent une limite de parcelle et des bosquets peuvent être le reliquat d'un bois défriché. L'étude des anciens plans cadastraux permet souvent d'éliminer ces leurres.

- Les traces d'exploitations anciennes

Sur les missions les plus anciennes, il est parfois possible de repérer des traces liées à l'exploitation des carrières souterraines. Par exemple, une piste en plein champ s'arrêtant à côté d'un dépôt de craie (le puits est probablement à côté) ou un front de taille en versant (possibilité de départs de galeries souterraines horizontales), sont à relever.

■ Les éléments non liés à des cavités souterraines

Dans le cadre de ces recensements, certains éléments sont recherchés sur les photographies aériennes verticales et reportés sur plan, afin d'éliminer certains leurres et de se repérer le plus précisément possible.

- Le parcellaire et le réseau routier

Le parcellaire et le tracé des anciennes routes et chemins sont bien visibles sur les missions des années 1930 à 1940. Ces éléments sont souvent très différents aujourd'hui et, afin de faciliter le report des anomalies photographiques et éliminer certains leurres, il est utile de reporter cet ancien parcellaire sur le plan actuel.

- Les mares

Les mares sont en général bien visibles même sur les photographies aériennes les plus anciennes. L'intérêt de leur report réside dans le fait que nombre d'entre elles ont été rebouchées depuis, ne laissant en surface qu'une dépression à sec pouvant être confondue avec un indice de cavité souterraine.

- Les bois et vergers

Les anciens bois et vergers doivent être reportés, afin de pouvoir éliminer facilement certains leurres photographiques sur des missions plus récentes, comme des zones humides dans des anciens bois défrichés ou un arbre isolé dans une ancienne parcelle en verger.

- Les constructions

Certains bâtiments et maisons visibles sur les missions photographiques les plus anciennes ont pu être détruits depuis. Sur les missions les plus récentes, il se peut que des anomalies apparaissent à leur emplacement (zones humides, zones de remblai).

- Les trous de bombes

Sur les missions photographiques prises juste après la guerre, on distingue souvent nettement les trous de bombe, identifiables par leur concentration importante dans des zones limitées, par leur forme parfaitement circulaire et leur alignement en chapelet (Fig. 53). Il est important de les repérer pour éviter de les noter en indice sur les missions plus récentes ou lors de la reconnaissance de terrain.



■ Fig. 53 - Impacts de bombes visibles sur une mission de 1947.
(Photographie IGN)

- Les réseaux aériens

L'emplacement des réseaux aériens doit être repéré afin d'éviter de noter un pylône en indice; ces réseaux se reconnaissent par l'alignement de points noirs en relief.

1.2.4. Les limites

■ Les leurres

Même si l'analyse multi-dates permet de supprimer un certain nombre de leurres, il en reste toujours qui ne peuvent être identifiés simplement par l'étude des photographies aériennes. Citons par exemple :

- Les zones de dépôt d'origine agricole ;
- Les emplacements des bacs à eau pour les bêtes ;
- Les anciennes extractions de matériaux à ciel ouvert ;
- Certaines mares asséchées ou remblayées ;
- Certains trous de bombe ;
- Les traces de tracteur (souvent aux angles des labours) ;
- Certains arbres arrachés ;
- Certains arbres isolés ;
- Les brûlis.

Chaque indice photographique doit donc faire l'objet d'une recherche complémentaire, soit lors de l'enquête orale, soit lors de la reconnaissance de terrain.

■ Les zones masquées

Certaines zones ne peuvent pas faire l'objet d'une étude de photo-interprétation, du fait de l'occupation des terrains lors de la prise des clichés : il s'agit des zones urbanisées, des terres cultivées lorsque la végétation est trop haute et des zones boisées.

Les résultats de la photo-interprétation demandent donc à être confirmés et complétés par les autres investigations réalisées dans le cadre d'un recensement d'indices de cavités souterraines, en particulier par l'enquête orale et la reconnaissance de terrain. Toutefois, certains indices photographiques peuvent ne pas être confirmés par d'autres sources et apparaître importants (arbres isolés sur les anciennes missions mais arrachés depuis, effondrements nets mais non confirmés par des témoins ou sur le terrain, zones humides visibles sur plusieurs missions mais sans indice sur le terrain). Dans ce cas, le choix de garder ou non ces indices se fait à partir des critères suivants :

- Anomalie repérée sur trois missions photographiques au minimum ;
- Arbre isolé obligatoirement visible sur la mission la plus ancienne ;
- Anomalie qui n'a pu être contrôlée sur le terrain : occultation par les cultures, propriété privée, zone urbanisée postérieurement à la prise de la photo ;
- Décision du photo-interprète pour les anomalies repérées sur moins de trois missions et non confirmées par ailleurs : le photo-interprète se base alors sur son expérience et l'aspect caractéristique de ces anomalies.

1.2.5. Le coût

Le coût de cette prestation intègre l'achat des photographies et l'interprétation qui en est faite. En cas d'étude de photographies obliques, il convient de rajouter les coûts liés au survol et à la prise de vues. Pour information, le coût d'une prestation simple (photos verticales, stéréoscopie et étude multi-dates) réalisée sur une surface d'environ 10 kilomètres carré est estimé à 2500 euros HT. Le coût d'une prestation complète (photographies verticales et obliques) est estimé à 5500 euros HT.

1.3. L'enquête orale

Le but est de recueillir des archives « orales » auprès de personnes connaissant bien le terrain et les marnières : « Anciens » et exploitants agricoles principalement.

1.3.1. Le principe

Il est recommandé d'initier ce recueil d'informations par le biais d'une réunion en Mairie de la ou les communes concernée(s) par l'étude, en laissant le soin à la Municipalité de lancer les invitations et de choisir les participants. Les renseignements obtenus lors de cette réunion concernent en général la description et la localisation de désordres connus par les participants et, plus rarement, des informations sur d'anciennes exploitations.

Les personnes absentes devront ensuite être rencontrées au cas par cas sur le terrain. En outre, pour les informations recueillies en réunion concernant un indice non visible sur le terrain, l'informateur doit être convié à venir indiquer l'emplacement exact de cet indice.

1.3.2. Les renseignements

La difficulté est d'obtenir un témoignage précis et fiable. Il est donc, dans un premier temps, nécessaire d'éclaircir avec les participants le vocabulaire que chacun utilise pour décrire les cavités souterraines et leurs manifestations de surface. En effet, les témoins utilisent souvent les termes associés aux cavités souterraines avec un sens erroné ou utilisent des termes locaux.

Dans un deuxième temps, il convient d'identifier précisément (nom, coordonnées) le témoin, afin qu'il puisse le cas échéant être contacté ultérieurement, soit pour les besoins du recensement, soit en cas de recherches complémentaires à réaliser.

■ Les informations à recueillir

Les précisions à atteindre lors de ces réunions sont les suivantes :

- *La qualification précise de l'objet concerné* :
 - *Nature* : effondrement ou dépression, bétoire (naturelle) ou puisard ou puits d'eau (artificiels) ;
 - *Dimensions* : diamètre de l'objet : petit, plutôt 1 à 1,5 mètre ou grand, entre 5 et 10 mètres ; profondeur de l'objet : quelques dizaines de centimètres, environ 1 mètre ou plus d'un mètre ;
 - *Forme* : dans le cas d'un effondrement, les bords sont ou étaient-ils verticaux, en forme d'entonnoir (bétoire) ou de cône (fontis) ; pouvait-on voir un départ de galerie(s) ?
- *La localisation de l'objet désigné* : cette localisation nécessite de posséder un plan parcellaire, seul document, en général, sur lequel les habitants arrivent à se recaler plus ou moins précisément ;
- *L'occurrence de l'événement* : s'était-il déjà produit auparavant, si oui combien de fois, quand et quelle quantité de remblai a été mise en œuvre pour remblayer l'excavation⁸ ; dans le cas d'une dépression, depuis combien de temps existe-t-elle et est-elle évolutive ;
- *Le circuit de l'information* : celle-ci est-elle directe ou les faits sont-ils rapportés d'une autre personne (par exemple, il faudra bien différencier une marnière dans laquelle le témoin est descendu, d'une rumeur selon laquelle il existerait une carrière souterraine) ;
- *Les interventions extérieures* (secours ou autres) lors de l'événement ;
- *La visibilité actuelle de l'objet.*

1.3.3. Les limites

La limite de cette investigation est la fragilité du témoignage humain, en particulier en ce qui concerne la véracité de l'information et sa localisation, surtout quand cette information est ancienne. Toute information orale non confirmée par ailleurs doit donc faire l'objet, en cas de besoin, de recherches complémentaires auprès de la personne qui en est à l'origine.

⁸ En général, la quantité de remblai est donnée en nombre de brouettes ou de bennes de tracteur.

1.3.4. Le coût

Cette investigation ne nécessite pas l'utilisation de techniques onéreuses, le coût s'exprime en temps passé. Pour une zone d'étude d'environ 10 kilomètres carré, une demi-journée est nécessaire à la réalisation de cette prestation. Son coût est ainsi estimé à 600 euros HT.

1.4. L'observation *in situ*

1.4.1. Le principe

La reconnaissance pédestre est la dernière étape d'un recensement et elle est essentielle. Ses objectifs sont les suivants :

- *Contrôler visuellement et confirmer (ou infirmer) les indices répertoriés par les premières investigations (Fig. 54) ;*
- *Compléter l'enquête orale en rencontrant des personnes absentes à la réunion (riverains, exploitants agricoles, etc.) ;*
- *Repérer des indices non répertoriés antérieurement, uniquement visibles sur le terrain ;*
- *Repérer précisément, appréhender l'environnement physique, décrire et caractériser les indices visibles : à cette occasion leur origine probable et l'investigation de reconnaissance adaptée sont déterminées.*



■ Fig. 54 - Effondrement visible en photographie aérienne ULM (cf. Fig. 49) retrouvé comblé par des pommes de terre sur le terrain.

Les indices uniquement de terrain peuvent être, outre des effondrements et affaissements, des enclos de taille métrique, des dalles de béton (qui peuvent masquer des puits), des puits maçonnés, des zones remblayées (Fig. 55), des zones à végétation particulière pouvant traduire la présence d'un remblai (Fig. 56), des arbres (Fig. 57), des bosquets ou des dépressions (pouvant correspondre à d'anciens affaissements ou effondrements remblayés) : il s'agit souvent d'indices non évolutifs, rarement indiqués lors des enquêtes orales car non considérés comme pouvant être en liaison avec des cavités souterraines.

Appréhender l'environnement physique consiste à étudier le contexte topographique, l'occupation du sol (présence et nature de bâtiments à proximité), la densité d'indices, afin d'en tirer des conclusions sur l'origine de l'indice ; par exemple, la présence d'un ancien bâtiment agricole (qui peut être rénové et habité) à proximité d'un effondrement ou affaissement peut orienter vers une origine anthropique de cet indice : des puits d'extraction en souterrain ont en effet souvent été creusés à l'intérieur de bâtiments agricoles. Autre exemple, une forte densité d'indices concentrés dans l'axe d'un thalweg signale presque à coup sûr une zone d'infiltration naturelle des eaux de surface, en liaison avec le réseau karstique profond.

Les coordonnées géographiques des indices visibles sur le terrain sont levées systématiquement, à l'aide, dans la majorité des cas, d'un système GPS (Global Positioning System). Ainsi, un indice devenu invisible au cours du temps pourra être retrouvé grâce à la précision de la localisation (les coordonnées en XY sont données avec une incertitude de ± 1 mètre).

■ Fig. 55 - Zone remblayée en cours de végétalisation.



■ Fig. 56 - Zone de végétation différente : le sondage à la pelle confirmera un remblai sous-jacent.



■ Fig. 57 - Arbre dont la base est descendue d'environ 1 m par rapport à la surface topographique.



1.4.2. Les limites

Les limites de cette investigation sont les suivantes :

- *Présence de zones masquées* : les forêts, les zones urbanisées, les cultures à certaines périodes de l'année ;
- *Prise en compte de leurres* : par exemple, l'emplacement d'un arbre arraché montre souvent une petite dépression semblable au tassement des matériaux de remblai d'un puits ;
- *Impossibilité de couvrir intégralement le territoire d'étude* : afin de tenir des délais d'études raisonnables (8 à 12 mois pour une surface moyenne de 10 kilomètres carré) et de limiter les coûts, seuls les indices

préalablement répertoriés (par les archives, par l'analyse de photographies aériennes et/ou par l'enquête orale) sont contrôlés visuellement⁹.

1.4.3. Le coût

Cette prestation fait appel, comme la recherche bibliographique, à du travail intellectuel, réalisé sur le terrain. Elle peut donc également s'exprimer en temps passé. Pour une surface de 10 kilomètres carré, on peut estimer à une semaine le temps nécessaire à cette prestation, ce qui correspond à environ 5000 euros HT.

1.5. Les performances du recensement

En raison des limites inhérentes à chaque investigation, un tel recensement permet de répertorier 60 à 70 % des cavités existantes sur le territoire étudié. La variabilité de cette valeur dépend de la quantité d'informations disponibles, notamment des archives (certaines communes disposent de 100 à 200 documents d'archives, d'autres n'en ont aucun).

Ainsi, les cavités non connues, absentes des archives et qui ne se sont pas encore manifestées en surface (évolution en cours ou absence d'évolution), ne sont pas recensées. De même, les effondrements et affaissements rebouchés sont quelquefois invisibles : si personne ne se rappelle leur existence, ils ne seront pas répertoriés. Enfin, une partie des indices ainsi détectés ne correspond pas à des cavités souterraines mais constitue des leurres (ancien arbre arraché, ancienne mare, ancien emplacement d'un bac à eau, etc.).

1.6. Le coût du recensement

Le coût moyen d'un recensement pour une commune d'environ 10 kilomètres carré est proche de 15 000 euros HT.

1.7. Le plan d'indices de cavités souterraines (PICS)

Le PICS est une carte synthétisant les informations récoltées suivant la méthodologie exposée ci-dessus. Il est recommandé de le réaliser sur un plan à une échelle adaptée à l'objectif recherché : 1/5000 pour une commune, 1/1000 pour un projet routier, etc.

1.7.1. Le document graphique

Sur le plan (voir un exemple en annexe III), chaque indice de cavité souterraine est mentionné par :

- *Un symbole* (qui précise la nature de l'investigation qui a permis de le relever) ;
- *Une couleur* (qui précise la nature supposée de l'indice) ;
- *Un numéro* (qui fait référence à la fiche descriptive de l'indice).

La présence d'un indice ne signifie pas qu'il y ait obligatoirement une cavité à son aplomb.

La localisation des indices sur le plan se fait soit manuellement (par exemple pour le report à partir de plans anciens), soit directement par l'intermédiaire des coordonnées GPS quand elles ont pu être levées sur le terrain. Lorsque la localisation d'un indice est trop imprécise, le report de l'indice est matérialisé par une zone et non un point.

Bien que généralement non liés à des cavités souterraines, les puits d'eau ainsi que les puisards sont, lorsqu'ils sont connus, reportés sur ce plan. Les raisons de ce report sont multiples. Tout d'abord, certains puits d'eau et puisards possèdent des chambres souterraines : pour les puits d'eau,

⁹ D'où l'intérêt de la prise de photographies aériennes obliques sur l'ensemble du territoire étudié, permettant d'avoir une vision rapide mais complète du terrain. Les seuls cas pour lesquels la reconnaissance pedestre est réalisée sur l'ensemble de la zone d'étude sont ceux dont la surface est réduite (projet de lotissement ou de zone artisanale) ou ceux pour lesquels la problématique cavités souterraines est un enjeu fort qui sera traité de la manière la plus complète possible (projets routiers ou autoroutiers). Dans ce cas, la reconnaissance visuelle intégrale du tracé est réalisée le plus souvent postérieurement au recensement, avant le début des travaux.

des cas d'extractions de matériaux au-dessus de la nappe, bien que rares, ont déjà été rencontrés. L'existence de chambres souterraines facilitant l'infiltration des puisards est, en revanche, courante. Ces chambres sont en général de dimensions limitées, quelques mètres en longueur sur un à deux mètres en largeur. En outre, les puisards et puits d'eau, même non dotés de galeries souterraines, sont susceptibles de subir des dégradations. Par exemple, la mise en charge d'un puisard suite à son dysfonctionnement, peut être à l'origine de désordres parfois importants. Des puits d'eau remblayés peuvent également évoluer en affaissement et/ou effondrement, si le matériau mis en place subit des tassements. Enfin, il peut être intéressant de noter l'emplacement des puits d'eau afin que, postérieurement à leur abandon, leur comblement et la destruction de leur appareillage, on ne puisse les confondre avec des puits de marnière remblayés.

À titre indicatif, les carrières à ciel ouvert sont également mentionnées. En effet, leurs manifestations de surface (dépressions, zones remblayées) peuvent aisément se confondre avec des désordres liés à la présence de cavités souterraines. Le fait de noter leurs emplacements permet de ne pas les prendre en compte comme indices de cavités souterraines.

1.7.2. La fiche indice

Chaque indice (désigné par le numéro INSEE de la commune et d'un numéro de référence) fait l'objet de la rédaction d'une fiche descriptive type (un exemple figure en annexe IV). Le but est d'établir, à partir de ces fiches, une base de données qui permettra de disposer à l'avenir :

- D'un recensement des indices de cavités souterraines en Haute-Normandie ;
- D'une trace écrite de chaque indice ;
- D'un suivi de l'évolution de chaque indice.

Sur chaque fiche, sont mentionnées les informations suivantes :

- *La localisation* : quand celle-ci est issue du report sur plan, les coordonnées en Lambert I Nord sont fournies par le logiciel Mapinfo et la précision est estimée par l'opérateur. Quand la localisation s'effectue au moyen du GPS, le point est situé d'après les coordonnées avec une précision de ± 1 mètre ;
- *La source* : archive, enquête orale, photographies aériennes, reconnaissance de terrain ;
- *La description précise de l'indice* : taille, forme, profondeur d'une dépression ou d'un effondrement repéré sur le terrain ou sur une photographie, dates des missions photographiques sur lesquelles l'indice concerné est visible, renseignements oraux, détails des informations issues des archives, etc. ;
- *La nature probable de l'indice* : indéterminée, carrière souterraine, cavité karstique, carrière à ciel ouvert, puits, puisard, etc.
- *Les investigations et traitements réalisés* : dans les cas pour lesquels le LRPC de Rouen réalise ou suit ces investigations.

Pour chaque commune, le contenu de l'ensemble de ces fiches est récapitulé dans un tableau synthétique qui précise pour chaque indice :

- *Son numéro de référence* ;
- *La nature des différentes sources d'information* (archive et/ou enquête orale et/ou photo aérienne et/ou terrain) ;
- *Son origine probable* (indéterminée, carrière souterraine, carrière à ciel ouvert, karst, puits d'eau ou puisard ou ouvrage militaire enterré) ;
- *La nature du matériau extrait* (cailloux, pierre de taille, marne [craie], argile, sable, autre) ;
- *Le type de localisation sur plan* (point, parcelle d'archive(s), aire limitée, non reporté) ;
- *La nature des investigations nécessaires à sa reconnaissance et/ou à son traitement* (aucune, surveillance, débroussaillage, visite, sondage pelle*, décapage spécifique, sondages destructifs, puisatier).

❖ 2. LES RECONNAISSANCES

Ces investigations complémentaires consistent en une reconnaissance spécifique sur un indice. La reconnaissance est plus ou moins poussée selon les enjeux. Le résultat de l'investigation primaire peut mener à l'abandon de l'indice s'il s'avère être un leurre ou à d'autres investigations pouvant aboutir, s'il le faut, au comblement d'une marnière.

Il est très important de bien analyser chaque situation avant de commencer cette étape de reconnaissance. En effet, deux méthodes peuvent avoir une efficacité comparable mais des efficacités bien différentes. Par exemple, sur une dépression d'environ 1 mètre de diamètre pour 0,3 mètre de profondeur, deux options pourraient être prises :

- Réaliser un sondage à la pelle pour déterminer s'il s'agit d'un puits de marnière, d'un point d'infiltration des eaux (bétoire) ou même d'un leurre (ancien arbre arraché, mare asséchée, etc.) ;
- Réaliser 6 sondages destructifs espacés au plus de 2,5 mètres les uns des autres tout autour de la dépression pour repérer d'éventuelles galeries (ce qui signifierait que l'indice correspond à un puits de marnière) et descendus à 30 mètres de profondeur.

L'information finale sera la même : dépression liée à un puits de marnière ou non. En revanche, les coûts sont différents : 1500 euros HT pour la première méthode, environ 13000 euros HT pour la deuxième.

Des organigrammes synthétisant l'enchaînement des investigations à réaliser sur un indice de cavité souterraine visible ou non sur le terrain sont joints en annexes V et VI.

2.1. Les décapages et sondages à la pelle mécanique

Les décapages spécifiques et les sondages à la pelle sont souvent les premières investigations à réaliser. Elles permettent de vérifier la réalité et la nature d'un indice le cas échéant. Le principe consiste à retirer la terre végétale sur toute son épaisseur (de 0,30 à 0,50 mètre selon le site), puis à retirer environ 0,10 mètre d'épaisseur du terrain sous-jacent afin d'avoir accès à la couche de limons, de sable ou d'argile à silex dans laquelle les zones de remblais sont visibles.

Le remblai cherché peut être de différentes natures : on peut soit rencontrer les matériaux de comblement originels pour les puits comblés dès la fin de l'exploitation, soit les matériaux entraînés par les eaux de ruissellement pour des indices permettant l'infiltration des eaux, soit des matériaux actuels (déchets ménagers, de construction ou terre végétale) mis en place pour combler un effondrement ou une dépression. Ces remblais sont généralement bien visibles par leur couleur (qui contraste bien avec celle des terrains encaissants) et leur forme caractéristique.

2.1.1. Les décapages

Cette investigation a été développée spécifiquement par le LRPC de Rouen pour la détection des carrières souterraines de plateau (marnières principalement) dans les zones non construites. L'objectif de cette investigation est en effet de compléter le recensement d'indices de cavités souterraines en repérant les puits d'accès à ces carrières, remblayés à l'arrêt des exploitations et maintenant invisibles. Il s'avère que d'autres indices indirects de la présence de cavités souterraines peuvent être également mis en évidence : les anciens fontis et les bétoires remblayées.

■ Le principe

Le principe de cette investigation consiste à procéder au décapage de la terre végétale (0,30 à 0,50 mètre d'épaisseur, Fig. 58) par un engin adapté (pelle mécanique, buteur, etc.) puis à ausculter visuellement le fond de fouille.

■ Les indices recherchés

Cette technique vise à mettre en évidence, dans les terrains non remaniés par l'activité humaine (en particulier agricole), les anomalies lithologiques correspondant à des zones de remblai anthropique, pouvant être en relation avec des cavités souterraines :

- Puits remblayés : caractérisés par une auréole circulaire de petit diamètre (entre 1 et 1,50 mètre), constituée des matériaux de remplissage du puits (limon, argile, silex, blocs de craie, déchets, etc.), qui seront de couleur et texture en général nettement différents des terrains en place autour ;

- *Anciens effondrements ou affaissements remblayés* : caractérisés par des zones de remblais anthropiques de formes et dimensions variables suivant les caractéristiques du désordre d'origine ;
- *Bétoires colmatées* : caractérisées par la présence de matériaux entraînés par les eaux de ruissellement.

Cette méthode est aussi utilisée pour les indices dont la localisation est peu précise comme, par exemple, pour le cas d'indices issus de la photo-interprétation¹⁰. On replace alors le plus précisément possible l'indice sur le terrain puis on effectue un décapage circulaire d'un rayon tenant compte de l'imprécision de l'indice (entre 20 et 50 mètres en général), centré sur l'emplacement supposé de l'indice.



■ Fig. 58 - Exemple du décapage spécifique d'une parcelle pour recherche d'éventuels indices de puits.

■ La mise en œuvre

Cette investigation nécessite l'utilisation d'un engin adapté, c'est-à-dire autorisant une lecture optimale du fond de fouille. Pour ce faire, ce fond de fouille doit être le plus lisse possible sans remaniement des matériaux. Pour arriver à ce résultat, l'utilisation d'une lame lisse donne les meilleurs résultats : une pelle mécanique ou hydraulique équipée d'un godet de curage (sans dents) est donc préconisée pour les petites surfaces. Pour des surfaces plus importantes, un bouteur peut être utilisé, à condition de réaliser l'auscultation visuelle immédiatement, sans attendre que le terrain sèche. Dans le cadre de travaux de terrassement importants (routes, autoroutes, etc.), une niveleuse, intervenant après les engins de terrassement (Scraper), donnera également de très bons résultats. Dans ce cas, l'auscultation visuelle sera réalisée en suivant l'engin. Suivant l'épaisseur de terre végétale, la profondeur du décapage pourra varier, elle est en moyenne de 0,50 mètre. Aucune trace de racine ou matière organique ne doit subsister sur le fond de fouille, sous peine de masquer des anomalies, parfois difficilement visibles.

■ Les résultats attendus

Lorsqu'il est possible de réaliser un décapage élargi de quelques dizaines de mètres autour de la zone à étudier, quasiment 100% des marnières seront détectées. Dans ce cas en effet, il sera possible de repérer des puits situés hors emprise du projet, mais dont les travaux souterrains peuvent s'étendre sous le projet. En revanche, si le décapage est réalisé uniquement sous les emprises¹¹, environ 80% des cavités souterraines réellement existantes seront mises en évidence¹².

■ Le coût de mise en œuvre

Ce coût doit intégrer la location de l'engin et le suivi du décapage par un organisme compétent. En ordre de grandeur, le décapage d'une surface de 1500 mètres carrés par une pelle mécanique se fait

¹⁰ Par exemple, un arbre isolé repéré sur une mission aérienne de 1947 et disparu aujourd'hui.

¹¹ Cas courant lorsque les terrains autour appartiennent à d'autres propriétaires ou lorsque les alentours sont déjà urbanisés.

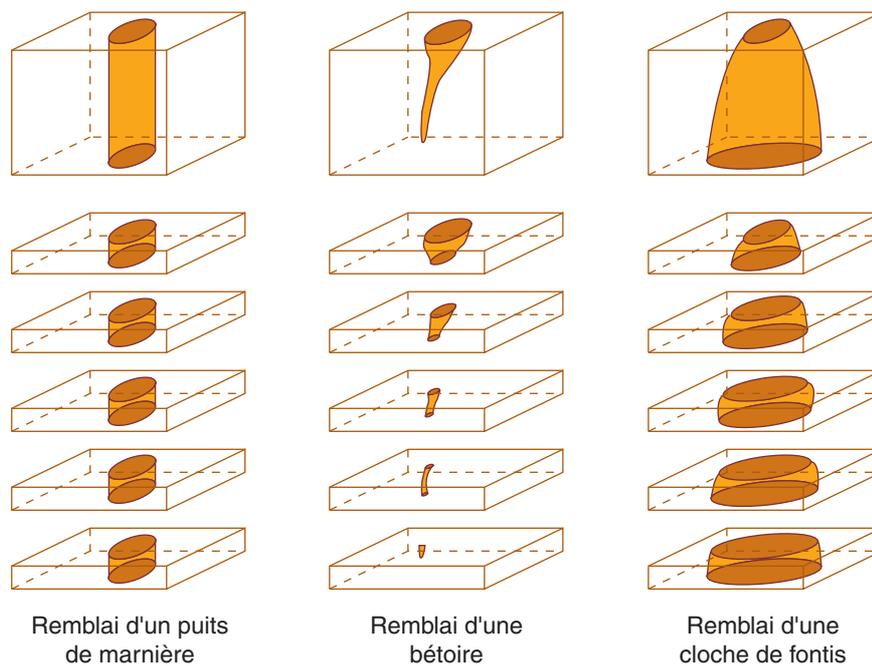
¹² Ce chiffre est une estimation basée sur les observations réalisées à l'occasion d'études menées par le LRPC de Rouen, en particulier sur l'autoroute A29, infrastructure pour laquelle une auscultation des décapages généraux a été réalisée et sur laquelle des cavités sont pourtant actuellement découvertes ; après reconnaissance, il s'avère que leurs puits d'accès se situent dans des zones non décapées lors des travaux (hauts de talus, délaissés, etc.).

en une journée. Le coût de la prestation globale (la location d'une pelle pour cette durée – 1000 euros HT environ – le suivi et l'interprétation du décapage) s'élève à environ 2500 euros HT.

2.1.2. Les sondages à la pelle mécanique

Cette méthode est employée quand l'indice étudié est parfaitement localisé (visible sur le terrain). Ce type d'investigation est notamment utilisé pour déterminer l'origine d'un effondrement de faible diamètre ou suite à la découverte d'une zone de remblai lors d'un décapage spécifique.

L'utilisation d'une pelle mécanique équipée d'un godet de curage (sans dents) est fortement préconisée, afin de découper en tranches lisses les matériaux du sol. La forme du remblai est un élément du diagnostic sur l'origine de l'indice (Fig. 59). Dans la plupart des cas, la zone de remblai apparaît de couleur différente de celle de l'encaissant.



■ Fig. 59 - Schémas des différentes formes de remblais rencontrés lors de sondages à la pelle.

Comme l'indique la figure 59, on rencontre différents types d'indices :

- *Un indice lié à une béttoire* : le remblai aura une manifestation peu profonde, en forme d'entonnoir dont la base empruntera un cheminement plus ou moins sinueux (Fig. 60) ;
- *Un indice lié à un puits de marnière* (Encadré 4) : le remblai, de forme cylindrique, sera visible sur toute la profondeur de la fouille (profondeur dépendant de la longueur de la flèche de la pelle mécanique, généralement de quatre mètres). Il se peut que le puits soit facile à mettre en évidence car briqueté ou comblé avec des matériaux différents des terrains en place. Parfois, les matériaux de remplissage sont identiques à ceux du terrain encaissant, ce qui rend très difficile l'observation et l'interprétation. Il arrive dans ce cas qu'un puits soit mis en évidence uniquement par un liseré circulaire noir témoignant de la présence de matière organique décomposée et traduisant le confortement des parois du puits à l'aide de planches ;
- *Un indice lié à un fontis* : le remblai aura une forme conique s'évasant vers le fond de la fouille (Fig. 61).

Le suivi d'un sondage à la pelle par un spécialiste revient à environ 1200 euros HT. À cela vient s'ajouter le coût de la location d'une pelle mécanique ou hydraulique, à chenilles ou à pneus, qui revient à environ 700 euros HT.



■ Fig. 60 - Exemple de béttoire découverte en sondage à la pelle.



■ Fig. 61 - Exemple d'une cloche de fontis comblée découverte en sondage à la pelle.

ENCADRÉ 4

EXEMPLES DE PUIITS COMBLÉS RETROUVÉS LORS D'UN SONDAGE À LA PELLE
OU D'UN DÉCAPAGE SPÉCIFIQUE

L'analyse de la surface de sol décapée demande l'attention d'un œil exercé. Certains puits sont comblés avec des matériaux nettement différents de ceux du sol en place (a, b, c et d) mais ce n'est pas toujours le cas. Il arrive que des puits soient remblayés avec des matériaux dont les caractéristiques sont proches de celles du sol en place tels que du limon (e), de la terre végétale ou des silex (f).



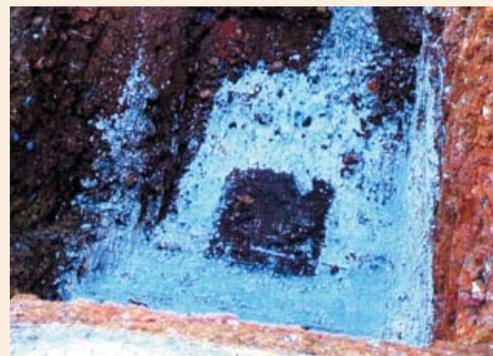
a



b



c



d



e



f

2.1.3. Les limites

Les décapages spécifiques sont impossibles à mettre en œuvre en zone construite ou ayant subi des aménagements importants, par exemple, les terrains remblayés sur au moins 1 mètre de hauteur.

En outre, si l'on ne peut élargir le décapage de quelques dizaines de mètres autour de la zone d'étude, le risque qu'il subsiste une cavité non détectée sous le projet¹³ s'élève à environ 20 %.

Enfin, lors des décapages et des sondages à la pelle, il est parfois difficile de repérer certains puits qui ont été remblayés avec les mêmes matériaux que ceux du terrain encaissant, par exemple des limons déversés dans la formation limoneuse. De même, une confusion peut facilement avoir lieu entre les remblais et les formations de biefs à silex (cf. Encadré 4). En effet, les biefs à silex sont des formations résiduelles contenant 55 à 80 % de silex éclatés au sein d'une matrice argileuse. Le lessivage intense qui s'opère dans les biefs rend parfois les silex jointifs laissant des vides interstitiels. Ces formations se rencontrent dans des poches, sur les versants des vallées et à la surface des plateaux. La confusion est d'autant plus aisée lorsque les biefs prennent la forme de puits verticaux.

Toutefois, lorsqu'on prend la précaution d'utiliser une pelle mécanique pouvant atteindre 5 à 6 mètres de profondeur, il est possible de faire la différence entre un puits remblayé et un bief à silex, grâce à la forme de la poche de silex.

ENCADRÉ 5

CAS DES PUIITS AVORTÉS ET DES INTENTIONS D'OUVERTURE D'EXPLOITATION

- Les **puits avortés** sont des puits de profondeurs diverses et qui n'ont jamais abouti à des exploitations. Quelquefois, lorsque les matériaux rencontrés lors de la réalisation d'un puits étaient trop difficiles à travailler ou que la marne rencontrée était de trop mauvaise qualité pour l'amendement ou la réalisation d'une excavation, le puits était abandonné. Un autre puits était souvent réalisé dans la même parcelle, au minimum à 10 mètres de distance du premier. C'est pourquoi, lors de la réalisation d'un décapage spécifique ou d'un sondage à la pelle, la découverte d'un puits avorté ne doit jamais conclure à l'absence d'une exploitation sur la parcelle. En effet, la découverte d'un puits avorté à l'emplacement d'une déclaration d'ouverture d'exploitation peut laisser penser qu'un premier puits réalisé à l'emplacement mentionné dans la déclaration n'a jamais abouti à une exploitation pour les raisons précédemment exprimées, et qu'un second puits, celui-ci exploité, a été réalisé quelques mètres plus loin.
- Dans le cadre d'une **déclaration d'intention d'ouverture d'exploitation**, sans confirmation de la réalisation de cette exploitation par d'autres documents, il se peut que l'exploitation considérée n'ait jamais été réalisée. Dans ce contexte, si le décapage ne découvre aucun puits et à condition que l'ensemble de la parcelle de déclaration ait été auscultée, on pourra conclure à l'absence d'exploitation suite à l'abandon du projet. En revanche, si un sondage à la pelle réalisé au droit de l'emplacement d'une intention d'ouverture ne découvre aucun puits, on ne pourra conclure à l'absence d'exploitation : soit l'exploitation n'a pas été ouverte, soit elle a été ouverte à un emplacement différent. En effet, il n'est pas rare que l'emplacement réel des exploitations diffère de celui mentionné dans la déclaration.

2.2. Les sondages destructifs

Pour rechercher d'éventuels vides en profondeur, il est souvent nécessaire de réaliser des sondages. Les sondages adaptés sont les sondages dits « destructifs », c'est-à-dire des sondages qui détruisent le terrain à l'avancement.

Il existe deux familles de sondages destructifs :

- *Ceux réalisés en rotation simple* (type tricône, cf. chapitre 2.2.1) ;
- *Ceux réalisés en roto-percussion*, où l'outil désagrégateur s'enfonce dans le terrain sous l'action de la rotation et d'une percussion générée par un marteau situé le plus souvent en tête.

2.2.1. Les sondages au tricône

Le principe de ce sondage destructif est de réaliser un trou tout en détruisant le matériau à l'avancement, par rotation de la tête du forage (Fig. 62).

¹³ Après le décapage et la réalisation d'un recensement d'indices de cavités souterraines.



■ Fig. 62 - Têtes de tricônes individuelles et sur un train de tiges.

Lorsque les conditions le permettent, les forages* sont réalisés verticalement. Lorsque la cible de la recherche est localisée sous une structure qui ne permet pas le forage vertical, les forages sont réalisés en incliné (Fig. 63). L'inclinaison et l'implantation de ces forages sont fonction de la localisation de la cible à atteindre et de l'accessibilité du site aux engins. La limite de l'angle d'inclinaison, toujours par rapport à la verticale, est de l'ordre de 25°. Cet angle permet de réaliser les investigations complémentaires le cas échéant (tubage, auscultation vidéoscopique, comblement, etc). Un angle d'inclinaison supérieur ne permettrait pas la récupération du matériel vidéo. Il est important de noter qu'à partir d'une certaine inclinaison (environ 10°), la tête de l'outil dévie de sa trajectoire à cause du poids des tiges et de la nature des terrains traversés. La cible du sondage est donc décalée. Ce décalage est à prendre en compte dans l'implantation des cibles de sondages : l'espacement de ces cibles ne doit pas être supérieur à 2 mètres.



■ Fig. 63 - Forages inclinés en parcelle bâtie.

L'enregistrement des paramètres de forages (vitesse d'avancement, poussée sur l'outil, pression d'injection et couple de rotation), réalisé simultanément, fournit des diagraphies instantanées. Ce sont ces diagraphies qui vont être interprétées pour déterminer la présence d'un vide ou d'un ancien effondrement. L'application des sondages destructifs avec enregistrement de paramètres de forage à la recherche de cavités repose sur l'hypothèse que la vitesse d'avancement du forage est directement

fonction de la compacité du terrain. Ainsi, si l'outil chute, on conclura à la présence d'un vide et si l'outil avance vite, à la présence de terrains décomprimés, suite à un ancien effondrement. Deux problèmes se posent néanmoins.

En premier lieu, la vitesse d'avancement ne peut être reliée de façon simple et directe à la compacité du terrain ; elle dépend en effet de nombreux facteurs :

- *La machine utilisée ;*
- *Le sondeur lui-même ;*
- *La pression exercée sur l'outil ;*
- *La pression d'injection du fluide (généralement de l'eau additionnée de polycol) que l'on utilise pour refroidir l'outil d'une part et faire remonter les morceaux de terrain découpés (« cuttings ») d'autre part ;*
- *La nature du terrain traversé (limons, sables, sables argileux, argiles plus ou moins riches en silex, craie, etc.) ;*
- *L'état du terrain (craie fracturée, craie humide, etc.) ;*
- *La profondeur à laquelle se situe l'outil (et donc le poids de tige sus-jacent) ;*
- *Le diamètre de l'outil utilisé ;*
- *Le mode de forage : rotation pure ou roto-percussion (frappe avec un marteau) ;*
- *Et enfin la compacité du terrain.*

Il est donc nécessaire de qualifier le maximum de paramètres possible avant de débiter chaque campagne de forage.

Cela implique notamment de travailler sur un même site avec la même machine et le même sondeur, de garder des poussées sur l'outil (PO) et des pressions d'injection (PI) constantes tout au long du forage et d'étalonner les vitesses obtenues par simulation du vide à différentes hauteurs. Pour que l'étalonnage soit fiable, le forage doit être le plus propre possible, c'est-à-dire qu'il faut s'assurer qu'aucun élément ne va gêner le passage de la tête de forage. Pour cela, il est conseillé de passer le train de tiges plusieurs fois dans le forage.

Certaines sondeuses sont réglées de façon à retenir l'outil lors de la présence de vide. Lorsqu'on utilise ce genre de machine, il est nécessaire de connaître la PO maximale à laquelle va correspondre la détection d'un vide de façon à réaliser l'ensemble du chantier à cette pression sur l'outil précise.

Le deuxième problème est que le plus souvent, l'objectif d'un sondage n'est pas de chercher un vide mais de tenter d'expliquer l'origine d'un indice afin d'être en mesure de proposer des moyens de reconnaissance et de traitement appropriés.

Ainsi la détection de la présence ou l'absence d'un vide n'est généralement pas suffisante pour pouvoir conclure et il est nécessaire d'être en mesure d'interpréter les résultats obtenus. Lorsque l'on observe une vitesse d'avancement élevée, il faut être en mesure d'établir s'il s'agit :

- *D'un passage de craie altérée ;*
- *D'un passage de craie humide ;*
- *D'un boyau* karstique (rempli ou non) ;*
- *D'une chambre de marnière effondrée ;*
- *D'une chambre de marnière remplie par des éboulis.*

Pour obtenir cette précision dans l'interprétation, il convient :

- *De préférer les sondages en rotation pure (type tricône) aux sondages en roto-percussion, qui forent beaucoup plus vite mais lissent ou masquent les différentes anomalies ;*
- *De travailler avec des PO et des PI faibles qui, si elles sont trop élevées, lissent ou masquent les différentes anomalies ;*
- *De travailler avec un diamètre important pour intéresser une surface de terrain suffisante.*

En pratique, l'expérience de plusieurs études de mesures de forage prouve que pour être interprétés correctement, les sondages doivent être réalisés en rotation pure (tricône) avec des PO et PI faibles et constantes et en gros diamètre (diamètre supérieur à 120 mm, l'idéal étant un diamètre supérieur à 140 mm).

Enfin, les sondages tricônes avec enregistrement des paramètres de forage ont une double fonction : d'une part rechercher les vides et zones décomprimées en profondeur et d'autre part permettre le passage d'une caméra vidéo qui donnera un aperçu de ces vides.

2.2.2. La mise en œuvre

Les valeurs de PO et de PI doivent être déterminées après la réalisation du premier forage (les valeurs optimales dépendent en effet de la nature et de l'état des terrains d'une part et du type de machine employée d'autre part).

Le premier sondage sert à étalonner les vitesses obtenues en cas de chute d'outil correspondant à la rencontre d'un vide franc. Cet étalonnage doit être effectué à différentes profondeurs sur l'ensemble du forage préalablement réalisé (par exemple, si les forages sont prévus à 30 mètres et que les tiges sont de 3 mètres, on réalise des simulations de chute avec enregistrement de la vitesse aux profondeurs suivantes : 30/27 m, 27/24 m, 24/21 m, etc. jusqu'à 6/3 mètres). Outre cet étalonnage initial, un nouvel étalonnage doit être réalisé tous les dix sondages, ainsi qu'à chaque changement de matériel ou d'équipe.

2.2.3. L'implantation des sondages

Les sondages doivent être réalisés à environ 2,5 mètres les uns des autres. Un espacement entre deux sondages supérieur à 2,5 mètres devra être justifié par le bureau d'études (contraintes propres au site, réseaux, etc.). En aucun cas l'espacement entre deux sondages ne doit être supérieur à 3 mètres. En effet, la largeur des galeries étant d'environ 2,5 à 3 mètres, on risquerait de forer à côté d'une galerie (dans une paroi ou un pilier).

Le positionnement des sondages et leurs numéros doivent être reportés sur un plan à l'échelle 1/100. Les sondages sont soit relevés précisément en coordonnées X et Y (avec une précision supérieure ou égale à $\pm 0,2$ mètre), soit positionnés (à $\pm 0,1$ mètre) par rapport à un point lui-même relevé en X, Y (avec une précision de $\pm 0,5$ mètre).

La disposition des sondages varie en fonction de l'objectif souhaité :

- Les sondages peuvent être disposés en cercle autour de l'indice (effondrement, puits ou dépression) ;
- Ils peuvent être également disposés en arc de cercle sur un côté de l'indice et en direction de l'objet à préserver.

Dans tous les cas, les sondages doivent être disposés à une distance de 2 mètres de la bordure de l'indice.

Il n'est pas recommandé d'effectuer les sondages directement au cœur de l'indice. Toutefois, cette méthode peut parfois être utile pour vérifier l'existence d'une cavité au droit d'une dépression topographique, lorsque la réalisation d'un sondage à la pelle ne permet pas de répondre à la problématique posée.

Lorsqu'un vide est mis en évidence, des sondages supplémentaires doivent être effectués en arrière des précédents afin de déterminer l'étendue du vide.

2.2.4. La profondeur des sondages

Lorsque la profondeur de la cavité recherchée peut être connue (au moyen des archives, d'études ou d'autres sondages effectués à proximité), les forages sont en général poursuivis jusqu'à une profondeur de 5 mètres en dessous de la profondeur supposée du plancher de la cavité. Si aucune cavité n'a été détectée à cette profondeur, les forages seront prolongés de 5 mètres supplémentaires dans la craie.

Lorsqu'on ne peut pas faire d'hypothèse sur la profondeur de la cavité, le forage doit être poursuivi jusqu'à 15 à 20 mètres en dessous du toit de la craie (profondeur découverte lors des forages). D'après les statistiques réalisées par le LRPC de Rouen, environ 15 % des marnières ont été creusées entre 15 et 20 mètres sous le toit de la craie et environ 8 % au-delà de 20 mètres, soit environ 23 % à plus de 15 mètres dans la craie. Cette profondeur importante s'explique par la présence des poches d'argile dans lesquelles les puits ont pu être creusés.

Lorsqu'une anomalie de terrain a été détectée, les forages doivent être descendus au-delà de la profondeur estimée avant forage. En effet, le forage ne doit pas être stoppé dans un vide ou dans une tranche de terrains décomprimés. Il sera stoppé après avoir de nouveau rencontré la craie encaissante sur 1 mètre de hauteur minimale. Par exemple, un forage ayant détecté une tranche de terrains décomprimés entre 25 et 28 mètres de profondeur sera stoppé au minimum à 29 mètres de profondeur.

Environ 10% des marnières ont été exploitées sur deux niveaux. L'épaisseur du plancher peut atteindre 15 mètres. Sachant qu'environ 81% de ces planchers présentent des épaisseurs comprises entre 1 mètre et 5,5 mètres, il semble donc opportun de prolonger les forages d'au moins 6 mètres sous le plancher d'une galerie, pour prévenir l'éventualité d'un second niveau.

2.2.5. La coupe des sondeurs

Le sondeur doit indiquer sur chaque coupe la nature des terrains qu'il pense avoir recoupé en se basant sur l'observation des cuttings et de la couleur de l'eau (Fig. 64). Il indique aussi toute perte de fluide, qu'elle soit totale ou partielle (Fig. 65). En l'absence de perte il note sur la coupe « pas de perte ». Il doit noter les chutes d'outils même ponctuelles.



■ Fig.64 - Détermination de la nature des matériaux par l'observation des cuttings autour de la tête de forage et de la couleur de l'eau : sur ces clichés, l'eau brune correspond à l'argile à silex, l'eau blanche à la craie.



■ Fig. 65 - Perte d'eau dans le forage.

2.2.6. L'interprétation des diagraphies

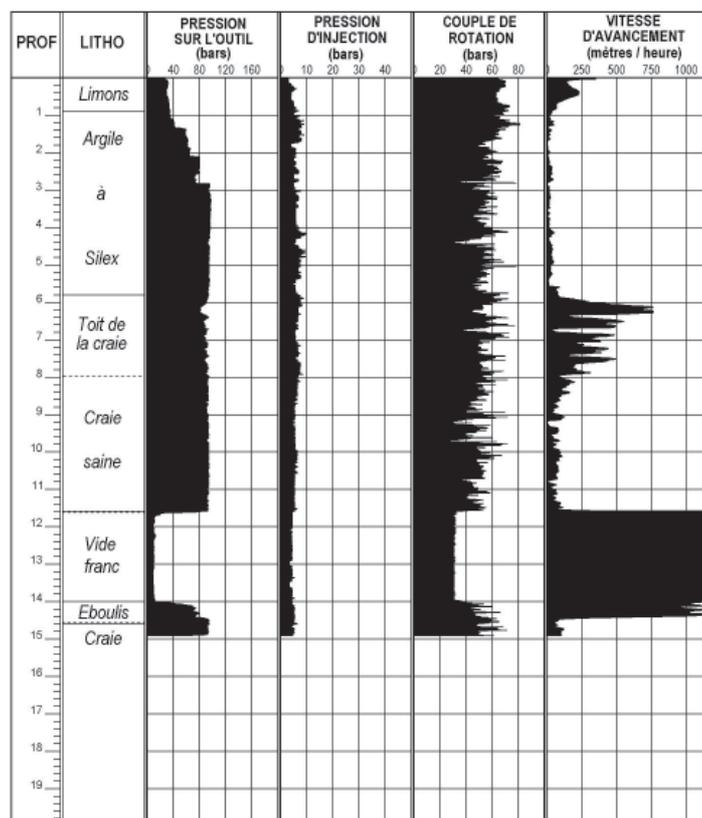
Les appareils d'enregistrement utilisés lors du forage mesurent les paramètres suivants :

- La vitesse instantanée d'avancement (ou vitesse de pénétration) : V_i ou V_{iA} ;
- La poussée sur l'outil : PO ;
- La pression d'injection de fluide : PI ;
- Le couple de rotation : CR ;
- La vitesse de rotation : Vr ;
- Le débit du fluide d'injection.

Lors du forage, les paramètres PO et V_{iA} sont enregistrés. Lorsque l'appareil débouche dans un vide, la PO devient quasi nulle et la percée s'accélère considérablement, le sondeur doit donc noter toute chute d'outil en précisant les cotes entre lesquelles s'est produite cette chute. Une cavité est donc repérée par une chute de la PO et par une V_{iA} élevée. Le forage s'effectuant sous injection d'eau, de boue ou de polymère (permettant de refroidir l'outil et de remonter le matériau), la rencontre d'un vide se manifeste par une perte totale de fluide précisée par l'équipe des sondeurs (absence de remontée de fluide par le point d'entrée du forage).

Comme on l'observe sur la figure 66, la partie supérieure dégradée du toit de la craie s'identifie par une vitesse d'avancement plus rapide que dans l'argile à silex et que dans la craie saine, tout en conservant une PO, une PI et une Vr constantes. La découverte d'un vide franc se traduit par une chute d'outil, une chute de la pression sur l'outil, une perte d'eau, une chute du couple de rotation et une vitesse d'avancement maximale. À la base du vide, on peut rencontrer une zone d'éboulis qui se traduit ici par une légère reprise de la pression sur l'outil, une reprise du couple de rotation et une vitesse d'avancement encore très élevée. La sortie de l'anomalie se traduit par le retour des valeurs des paramètres de forage à celles obtenues dans la craie saine sus-jacente.

L'interprétation des diagraphies est plus délicate quand celles-ci présentent une légère diminution de la pression sur l'outil, une faible augmentation et une irrégularité de la vitesse instantanée accompagnées d'une perte totale d'eau. De telles mesures caractérisent, suivant le contexte, une zone décomprimée (et non un vide), une montée de fontis, une bordure de cavité, une zone karstique ou une irrégularité du substratum.



■ Fig. 66 - Enregistrement de paramètres d'un forage ayant détecté une marnière.

2.2.7. Le rapport

Le rapport doit présenter de façon synthétique les résultats des investigations et donner une interprétation argumentée des conclusions. Il doit détailler explicitement la nature des investigations complémentaires nécessaires ou des traitements à envisager pour supprimer le problème.

Outre le rapport au sens strict, le document final doit inclure un plan de situation général à l'échelle 1/25000, un plan de situation sur fond parcellaire à l'échelle 1/5000 et le plan de situation des sondages à l'échelle 1/100. Les coordonnées des sondages ou celles du point de repère doivent être précisées. Ce rapport doit être accompagné des coupes des sondages.

Les coupes doivent comprendre, en complément du compte rendu graphique des paramètres de sondage, l'interprétation de la nature des terrains traversés.

Pour chaque anomalie repérée en sondage (vitesse d'avancement élevée), il doit être précisé s'il s'agit d'un vide franc ou d'une zone décomprimée. En outre, pour chaque anomalie une interprétation doit être proposée (vide d'origine karstique - vide lié à une marnière, à une argilière - chambre effondrée - chambre remplie par des éboulis, par des limons - boyau karstique rempli de limons, etc.).

Le coût moyen d'une campagne de reconnaissance d'un indice à l'aide de six forages destructifs tricône en gros diamètre descendus à 30 mètres de profondeur est d'environ 13000 euros HT.

2.3. L'auscultation et la reconnaissance d'une marnière

Les sondages en gros diamètre permettent le passage d'une caméra vidéo qui donne un aperçu de la marnière, de son étendue et de son état. Pour cela, la mise en place d'un tubage de diamètre intérieur 100 millimètres est nécessaire. La base de ce tubage doit s'interrompre le plus près possible du toit de la carrière (Fig. 67), afin d'avoir le meilleur aperçu possible de la marnière. Un tubage descendu trop profondément dans la cavité limite l'auscultation de la cavité par caméra vidéo et rend impossible son utilisation comme évènement* lors du remplissage de la cavité. De même, les tubes PVC utilisés dans cette opération doivent être suffisamment épais et résistants de manière à ne pas être trop déformés par la pression exercée par les terrains environnants et à ne pas se briser, ce qui rendrait impossible l'utilisation du forage pour un passage caméra ou un remplissage.



■ Fig. 67 - Fin de tubage d'un forage dans la marnière.

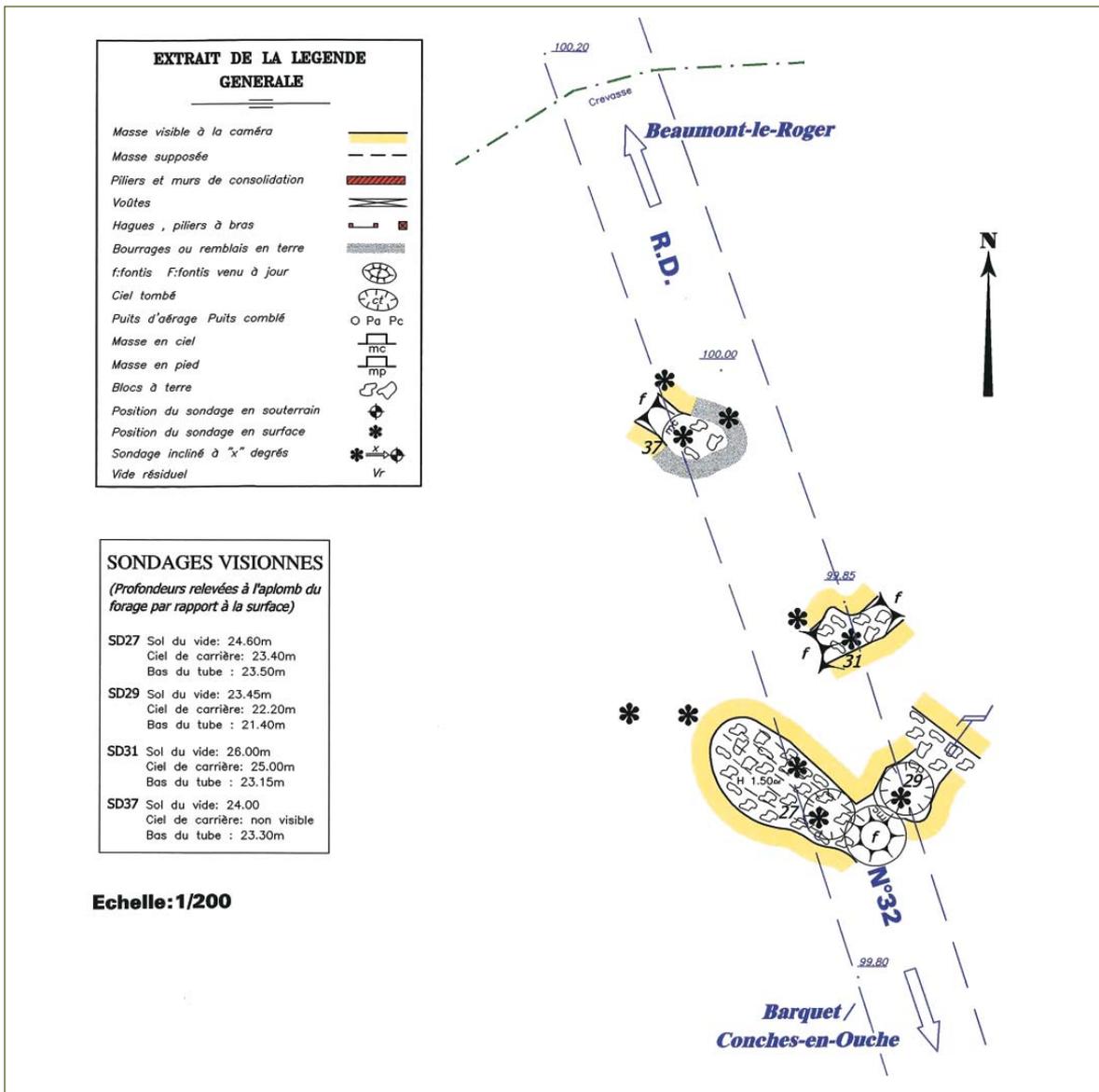
La technique de vidéoscopie en forage permet dans certains cas la reconnaissance de la marnière. Son principe consiste à descendre dans un forage tubé, au bout d'un train de tiges pouvant tourner de 360° sur son axe, un dispositif comprenant une caméra vidéo couplée à un télémètre laser. Ce système permet de visualiser le vide (Fig. 68), de le cartographier et d'en réaliser un diagnostic sommaire de stabilité (Fig. 69), d'apprécier son volume et de définir d'éventuelles investigations complémentaires.

Le tubage d'un forage sur une hauteur de 25 mètres revient à environ 600 euros HT. Une auscultation vidéométrique coûte environ 1200 euros HT.



■ Fig. 68 - Visualisation d'une galerie de marnière par caméra vidéo. (Photographie Introvision - Île-de-France)

68



■ Fig. 69 - Cartographie d'une marnière partiellement éboulée auscultée par télémètre laser. (Plan IGC de Versailles)

Lorsque le puits d'accès à une marnière est accessible et permet la descente après sécurisation ou si la marnière mise en évidence présente une grande complexité, de sorte que la quantité de forages pour réaliser des passages caméra serait considérable, l'intervention d'un puisatier peut être envisagée. Cette prestation consiste soit à réaliser une descente dans un puits ouvert, soit à curer* un puits existant, soit à foncer* un nouveau puits lorsque le curage du puits d'origine n'est pas envisageable. Un forage au grappin de type « Bénoto » de taille métrique est alors réalisé (Fig. 70). La réalisation d'un nouveau puits d'accès à 30 mètres de profondeur revient à environ 6500 euros HT.



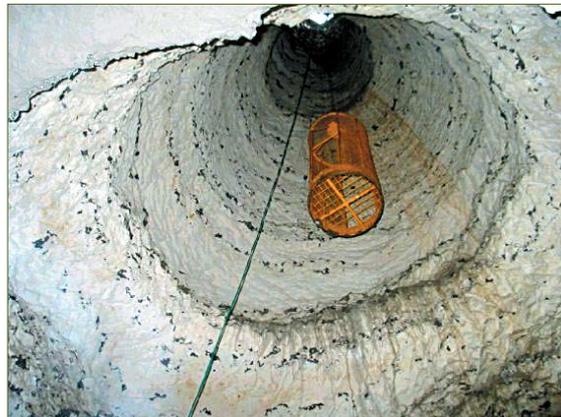
■ Fig. 70 - Curage d'un puits à l'aide d'un forage type « Bénoto ».

Dans le cas de la découverte d'un puits d'accès à une carrière souterraine, il est préférable de le curer plutôt que de le foncer au moyen d'une tarière en gros diamètre. En effet, le curage a l'avantage de permettre une auscultation des parois du puits et de détecter ainsi les différents niveaux d'exploitation le cas échéant. Le puits est ensuite busé (Fig. 71) avec des buses acier ou béton qui sont découpées pour accéder aux niveaux intermédiaires le cas échéant. Dans l'hypothèse où le puits n'est pas retrouvé ou que la présence de remblai à sa base ne permet pas de progression dans la marnière, un nouveau puits doit être creusé.

Une fois cette opération terminée, la descente dans la marnière peut s'effectuer par le puits à l'aide d'une nacelle mécanisée (Fig. 72).



■ Fig. 71 - Puits creusé et busé en acier.



■ Fig. 72 - Descente dans un puits à l'aide d'une nacelle.

Une visite de la marnière permet alors de définir son extension, son volume et son état. Le plan des galeries est alors établi.

Dans les cas pour lesquels un enjeu existe en surface, il est conseillé de faire appel à un géomètre (Fig. 73) afin de réaliser le levé d'une carrière. Il lui sera demandé de réaliser le levé topographique souterrain de la carrière ainsi qu'un levé des éléments de surface (bâtiments, désordres, etc.). Le plan ainsi obtenu positionnera de façon très précise les éléments des deux niveaux topographiques les uns par rapport aux autres.



■ Fig. 73 - Levé d'une carrière souterraine par un géomètre.

Pour établir le diagnostic de stabilité, l'état des piliers et du toit de la cavité est inspecté. Une attention particulière est apportée aux éboulis présents dans la cavité. En effet, lorsque ces cônes se trouvent le long des parois et atteignent le ciel de la cavité, il convient de vérifier s'il s'agit de poches argileuses ou de conduits karstiques vidangés ou bien d'un puits d'accès éboulé.

La présence de plusieurs puits par marnière n'est pas rare et les éboulis provenant d'un puits peuvent cacher une autre cavité en arrière de celui-ci. Par diverses méthodes, il convient de s'assurer de l'existence ou non de cette autre cavité :

- Vérification visuelle d'une continuité de la paroi en arrière de l'éboulis ;
- Passage d'un objet (tige métallique, barre à mine, etc.) au travers de l'éboulis afin de détecter un éventuel vide ;
- Observation de l'orientation des traces d'outils laissées sur les parois (Fig. 74) ;
- Réalisation de sondages en arrière du puits et à partir de la surface¹⁴.

La visite et le diagnostic de la marnière par des spécialistes reviennent à environ 2500 euros HT.

- Fig. 74 - Traces de pics observées sur la paroi saine (originale) d'une carrière souterraine : ces traces, associées à d'autres indices, permettent de préciser le sens de l'exploitation, ici de gauche à droite.



¹⁴ L'implantation des sondages complémentaires nécessite que le plan de la cavité soit précis et bien orienté.

❖ 3. LE TRAITEMENT DU RISQUE ASSOCIÉ À LA MARNIÈRE

Le traitement du risque* associé à la marnière dépend de l'état de la cavité et des enjeux* pris en compte. En effet, on peut envisager la mise en place d'un géotextile dans le cadre d'une surface sans surcharge ponctuelle (parking) ou, dans le cas d'un ouvrage de plus petite taille comme une maison individuelle, prévoir la réalisation d'un radier ou de fondations profondes.

Les méthodes de traitement les plus fréquemment recommandées et utilisées sont l'interdiction de construire au droit de la cavité sans investigations préalables, le déplacement du projet, la visite régulière de la marnière ou le comblement partiel ou total de la cavité.

3.1. La neutralisation d'un secteur

Dans l'hypothèse d'une marnière localisée (mais non visitée) en zone dépourvue de projet d'urbanisme, comme une zone agricole ou forestière, la règle générale est de ne préconiser aucune investigation lourde de reconnaissance. En revanche, un périmètre de « non constructibilité » est mis en place, correspondant à l'extension possible de la marnière.

De même dans le cas d'une marnière visitée et reconnue, la mise en place d'un périmètre de taille plus limitée interdisant tout aménagement est préconisée au droit de la cavité, avec une marge de reculement dont la largeur sera fonction de la profondeur de la cavité et de la nature et de l'épaisseur des formations de recouvrement.

3.2. Le déplacement du projet

Dans l'hypothèse où un projet est prévu à proximité d'une marnière, une solution peut être, lorsque cela est possible, de déplacer le projet de façon à s'éloigner de la zone de risques liée à la présence de la carrière. Cette solution est applicable à la fois pour des projets de construction d'un bâtiment et de tracés routiers.

3.3. L'inspection régulière

La gestion du risque associé à une marnière peut consister, dans quelques cas et en fonction du projet, en une visite régulière de la cavité, réalisée par un spécialiste. Ces inspections interviennent pour des marnières entièrement reconnues et dont les caractéristiques sont les suivantes :

- *Enjeux associés faibles* (espaces verts, parking, etc.) ;
- *Diagnostic attestant de la stabilité de l'ensemble ;*
- *Entrée de la carrière facilement accessible :*
 - Entrée à flanc de coteau aménagée ;
 - Puits sécurisé et stable.

Dans le cas des marnières en bon état, les visites peuvent avoir lieu de façon annuelle à pluriannuelle, avec un maximum de 5 ans. Il est nécessaire de maintenir l'accès en bon état. À chaque visite, un nouveau diagnostic de stabilité est réalisé. L'évolution des enjeux associés à une telle marnière, ainsi que la dégradation de sa stabilité, nécessitent une révision du traitement à y apporter.

3.4. Le comblement

Quand l'enjeu le nécessite, on procède au comblement de la marnière. Celui-ci peut être partiel ou total, gravitaire ou par injection*.

3.4.1. Les marnières accessibles

Dans le cas d'un comblement circonscrit, les zones à combler sont délimitées en fonction de l'enjeu en surface (passage d'une route ou présence d'un bâtiment à proximité ou à l'aplomb). Les parties de la carrière à combler sont isolées par des parois maçonnées (Fig. 75) ou à l'aide d'injections de barrage.

■ Fig. 75 - Mur maçonné réalisé dans une marnière en vue d'un comblement partiel : la fenêtre laissée dans le mur permet de surveiller le bon déroulement du comblement sur plusieurs jours, elle sera fermée au fur et à mesure de la montée du coulis. Une reprise du comblement par les événements peut être ensuite entreprise.



La composition des injections de barrage est en général la suivante :

- Ciment : 200 kg/m³ ;
- Sablon : 650 kg/m³ ;
- Eau : 300 l/m³ ;
- Silicate de soude : 30 kg/m³ (soit 15 % de la masse de ciment).

Ce mélange s'étale peu et constitue un mur permettant de contenir un comblement à l'aide de matériaux plus fluides.

Dans le cas d'un comblement total, la géométrie de la cavité doit être parfaitement reconnue et l'on doit s'assurer de l'absence de connexion avec un karst. Pour le remplissage, on injecte un coulis de ciment à base de sable ou de limons. Le mélange le plus classique est le suivant :

- Sable 0/2 à 0/4 mm : 1000 à 1200 kg/m³ ;
- Ciment CEM II ou CEM III : 80 à 100 kg/m³ ;
- Eau : 400 à 500 l/m³ ;
- Bentonite (facultatif) : 10 à 20 kg/m³.

L'ajout d'un entraîneur d'air n'est pas utile pour du sable 0/4 mm. La résistance à la compression (Rc) acquise à 90 jours doit être de 1 à 1,5 MPa, valeurs au moins équivalentes à celles de l'encaissant.

Cette composition permet d'obtenir un mélange très liquide (Fig. 76 et 77), évitant la formation de cône de remplissage au niveau du puits d'injection et faisant prise rapidement (Fig. 78). On évite ainsi de laisser des vides résiduels* autour du puits, susceptibles d'évoluer en désordres de surface.

Le coût d'un coulis de ciment de cette composition est d'environ 100 euros/m³.

On peut réaliser ensuite un clavage* (comblement des vides résiduel par injection) avec un coulis de ciment ou de bentonite ciment dosé à 250 kg/m³.

Le volume de coulis nécessaire (égal à celui de la marnière) est déterminé grâce au plan. Il est calculé à partir de la superficie et de la hauteur ; on y ajoute le volume des puits et on en déduit le volume des différents cônes d'éboulis, levées de silex, etc.

Dans le cas de l'utilisation de limons, il est nécessaire de procéder à un important malaxage du mélange avant utilisation. Cette utilisation est limitée aux chantiers de grande ampleur car elle nécessite la mise en place coûteuse d'une centrale à limon.

Le coulis est déversé de façon gravitaire (ou amené par une pompe) dans les événements dans un premier temps (Fig. 79), puis au travers du puits pour terminer (Fig. 80). Les événements, qui sont soit des forages existants soit des forages spécialement percés dans le cadre du comblement, permettent d'évacuer l'air au fur et à mesure du remplissage.

Les événements sont implantés en fonction de la géométrie de la marnière, c'est-à-dire dans des endroits où le remplissage par écoulement gravitaire du coulis s'effectuerait avec difficulté et où de l'air pourrait rester piégé. Ils sont localisés à partir du plan, généralement dans des chambres assez bien fermées, en zones excentrées ou éloignées du puits et surtout dans les points hauts (zones de ciel tombé ou de plafond surélevé). Plus la morphologie de la marnière est complexe et le puits d'accès excentré, plus le nombre d'événements sera important.

Dans le cas d'un remplissage par les événements et lorsque cela est possible, on peut vérifier le bon étalement du coulis dans la cavité par descente dans le puits.



■ Fig. 76 - Déversement du coulis de ciment dans la cavité.



■ Fig. 77 - Coulis de ciment s'étalant progressivement dans la marnière.



■ Fig. 78 - Coulis de ciment ayant fait prise entre deux phases de comblement d'une marnière.



■ Fig. 79 - Remplissage d'une marnière par les événements.



■ Fig. 80 - Comblement gravitaire d'une marnière par le puits.

3.4.2. *Les marnières inaccessibles*

Les effondrements de tout ou partie d'une marnière peuvent rendre impossible la visite de celle-ci. Dans ce cas, on réalise une série de sondages destructifs à maille serrée (tous les 2,50 mètres) autour de la ou les zones effondrée(s). Ces sondages permettent de détecter les vides résiduels et servent d'événements de remplissage.

Au début du comblement, les premières toupies de ciment permettent de vérifier les communications entre les vides d'une part et de connaître le volume de la marnière en mesurant la remontée du coulis dans chaque événement d'autre part.

3.4.3. *Les marnières ennoyées*

Quand les marnières sont ennoyées durant certaines périodes de l'année, le remplissage doit s'effectuer autant que faire se peut quand elles sont « hors d'eau ». Lorsqu'elles sont inondées toute l'année, le comblement doit avoir lieu si possible en période d'étiage de la nappe et, pour éviter des problèmes de différenciation du coulis, celui-ci doit être injecté au moyen d'un tube plongeant au fond de la marnière, pendant qu'un pompage de la nappe est effectué par les événements les plus éloignés de la zone d'injection ou plus facilement par le puits d'accès.

Chapitre 5

Analyse globale du risque lié aux marnières et des modalités de prévention possibles

❖ 1. L'ANALYSE GLOBALE DU RISQUE

Le risque* peut être défini comme la superposition d'un aléa* (ici les effondrements de surface liés aux marnières situées en profondeur) et d'un enjeu*. L'effondrement d'une marnière située en plein champ ne présente qu'un risque faible ; de même, les zones, même densément habitées situées en dehors des plateaux crayeux, comme l'essentiel de la ville de Rouen par exemple, ne constituent pas des secteurs à risque vis-à-vis des marnières.

La prévention, qui est un des objectifs de ce guide, a pour but de diminuer le risque ou au moins de tenter de le restreindre à des limites jugées collectivement ou socialement acceptables par une gestion du risque. Cette maîtrise ne peut se faire qu'en s'appuyant sur des méthodes et des techniques visant à mieux caractériser l'aléa (localisation, intensité, etc.) et à réduire sa probabilité d'occurrence et/ou en limitant les enjeux sur les zones d'aléa.

Enfin, il est possible de définir la gestion des risques comme le processus d'intégration de l'analyse des risques dans un contexte global de considérations sociales, économiques et politiques visant à établir la (les) décision(s) (Leroy et Signoret, 1992).

Ainsi, comme schématisé sur la figure 81, cette gestion n'est possible qu'au travers de la compréhension de l'objet cause de l'aléa (les marnières), d'une analyse détaillée au cas par cas des enjeux (le niveau de caractérisation de l'aléa peut dépendre des enjeux) mais aussi du contexte global intégrant notamment la perception du risque et les enjeux économiques et sociaux associés.



■ Fig. 81 - Représentation schématique de la gestion du risque depuis la connaissance de l'aléa à la prise en compte du contexte.

1.1. L'aléa

1.1.1. Les composantes de l'aléa

L'aléa principal correspond à l'apparition en surface d'affaissements plus ou moins progressifs et d'effondrements brutaux, de diamètres allant de quelques décimètres à quelques décimètres (les dimensions maximales observées atteignent 50 à 60 mètres). Ces phénomènes et leur genèse sont décrits et illustrés dans le chapitre 3 et notamment dans le paragraphe 2 (page 28).

Classiquement, l'aléa doit être défini par :

- La description du phénomène ;
- Sa localisation et son extension ;
- Sa probabilité d'occurrence ;
- Son intensité.

Dans les cas des effondrements de marnière de Haute-Normandie, si nous sommes en mesure de définir correctement le phénomène attendu et à peu près correctement l'intensité de celui-ci, il est, comme le montrent les chapitres précédents, très difficile de préciser les localisations de l'aléa et d'en quantifier les probabilités d'occurrence.

1.1.2. La localisation de l'aléa

Dans l'état actuel il n'existe pas de techniques suffisamment fiables et pertinentes permettant de détecter, avec une incertitude qui soit acceptable, les marnières (chapitre 4).

1.2.3. La probabilité d'occurrence

Il est impossible d'estimer avec précision la probabilité d'occurrence de cet aléa pour plusieurs raisons :

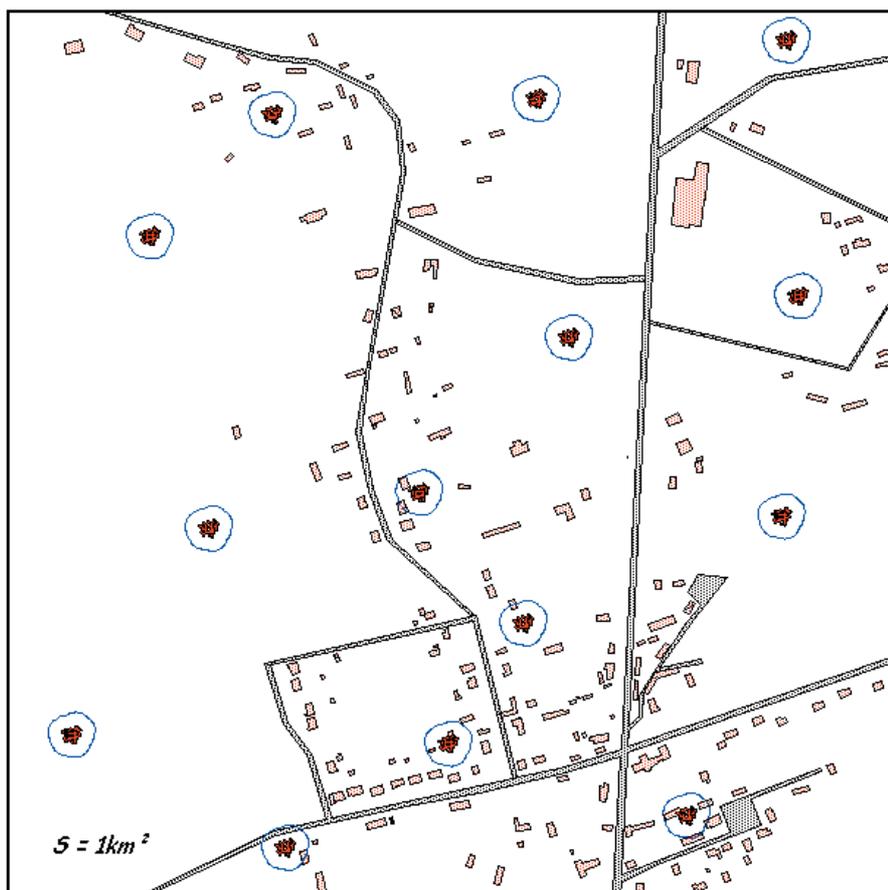
- *La connaissance des événements passés est très incomplète* : la majorité des désordres survenus dans des sections sans enjeux n'est pas signalée. Seuls les événements de très grande ampleur ou ceux concernant des routes ou des habitations sont, plus ou moins, répertoriés ; même dans ces cas on ne dispose pas toujours d'informations suffisamment précises pour savoir si le désordre peut être rattaché ou non à l'existence d'une cavité souterraine : l'observation phénoménologique est donc imprécise.
- *La prise de conscience progressive et récente du risque « marnière »* fait que les désordres sont beaucoup plus déclarés aujourd'hui (en Mairie essentiellement), qu'il y a quelques années. L'impression que le nombre d'effondrements augmente ces dernières années peut être en grande partie, sinon exclusivement liée à cette évolution. Les effondrements de marnières se produisent depuis plusieurs dizaines d'années. Nous avons même retrouvé des déclarations d'accidents suite à des effondrements sur des routes relatifs à « d'anciennes marnières dont plus personne n'avait connaissance » dans la seconde moitié du 19^e siècle. Nous n'avons pas d'idée de la proportion des marnières déjà partiellement ou totalement effondrées sur le nombre total de marnières creusées, ce qui rend, bien sûr, difficile d'estimer le risque résiduel.

Néanmoins, malgré toutes ces difficultés et les incertitudes qui en découlent, il est important de tenter d'apprécier l'ordre de grandeur de cette occurrence.

■ La probabilité spatiale d'occurrence des marnières

Sachant que la surface moyenne d'une marnière est de l'ordre de 250 mètres carrés (chapitre 2), et que le nombre de marnières creusées est de l'ordre d'une dizaine par kilomètre carré, nous pouvons estimer qu'en moyenne environ 0,25 % d'une surface donnée est concernée par l'existence d'une marnière qui se situerait à l'aplomb.

À cela, nous ajoutons une « zone d'influence » (zone suffisamment proche des bords de la cavité pour subir l'influence des désordres générés par son effondrement) de l'ordre de 15 mètres et nous représentons cette marnière par un rectangle de 20 mètres par 15 mètres ; nous pouvons alors constater qu'en moyenne environ 3 % d'une surface donnée sont concernées par l'existence d'une marnière. La figure 82 ci-après représente de façon graphique cette probabilité de surfaces relatives.



■ Fig. 82 - Représentation sur une surface de 1 km² d'une occupation classique du territoire et de 14 marnières moyennes (250 m²) avec leur « zone d'influence potentielle » de 15 mètres autour.

■ L'estimation du nombre d'effondrements liés aux marnières

Estimer la probabilité d'occurrence, non pas des marnières, mais des désordres qu'elles génèrent et qu'elles peuvent générer dans l'avenir est beaucoup plus compliqué, ne serait-ce que parce qu'intervient le facteur temps.

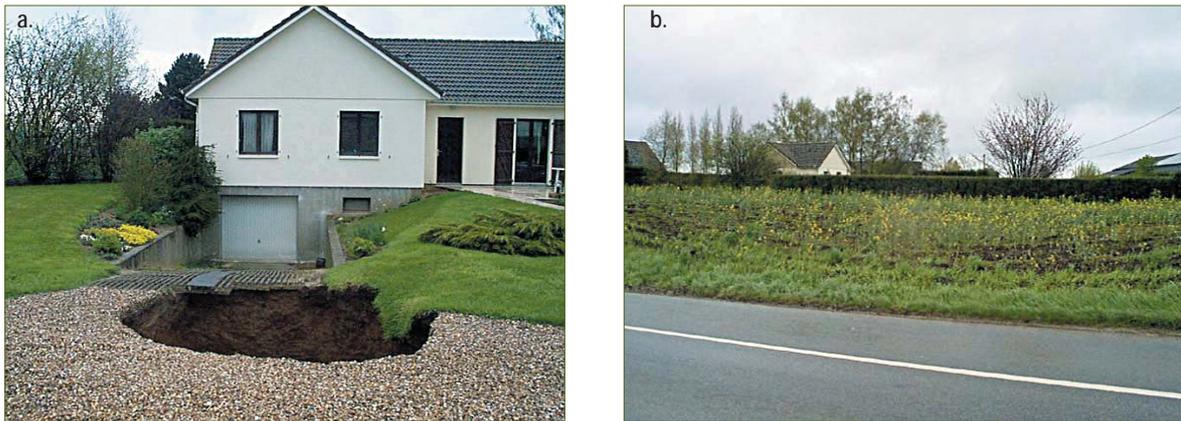
En posant comme hypothèse que toute marnière s'effondrera au bout d'un certain temps, celui-ci peut être très long. Certaines marnières creusées dans la première moitié du 19^e siècle sont encore en parfait état et des marnières des 15^e et 16^e siècles ont pu être retrouvées et visitées. La « durée de vie » d'une marnière peut donc, dans certains cas, atteindre ou dépasser 500 ans !

En outre, il convient de considérer qu'une même cavité peut-être à l'origine de plusieurs désordres. Les effondrements généralisés ne sont pas très fréquents ; souvent la ruine s'effectue de façon progressive avec des ruptures partielles de toits ou de piliers affectant une chambre de la marnière. Une cavité peut être à l'origine de plusieurs désordres parfois séparés de plusieurs décennies. La figure 83 montre ainsi un effondrement survenu en 2001 (Fig. 83a) à proximité d'une habitation située à 25 mètres d'un ancien effondrement (Fig.83b) survenu il y a plus de 40 ans. Ainsi, on doit associer aux 140 000 marnières initialement creusées en Haute-Normandie, un « potentiel d'effondrements » nettement plus fort évalué à au moins 250 000.

Enfin, et ce qui complique encore l'estimation de l'occurrence d'effondrement, il nous faut considérer qu'une part non négligeable de ces « effondrements potentiels » se sont déjà produits.

Il est vraisemblable que les cavités peu stables dès l'origine ont dû s'effondrer rapidement, de quelques années à quelques décennies après leur abandon. Les effondrements actuels sont liés au vieillissement progressif des marnières sauf les années pour lesquelles les facteurs externes sont très importants : années pluvieuses et/ou années où la nappe remonte de façon importante.

Il est donc possible, en première approximation, d'estimer que le « taux d'effondrement » doit être, sauf les années particulières, relativement constant depuis plusieurs décennies et le restera dans le futur.



■ Fig. 83a et 83b - Effondrements de chambres d'une même marnière survenus à plusieurs décennies d'intervalle.

Ainsi, en considérant qu'un tiers des cavités, fragiles, s'est effondré « rapidement », qu'un dixième, *a contrario*, est particulièrement stable et résistera très longtemps, le nombre d'effondrements dans cette période à taux constant est de l'ordre de : 250 000 (nombre d'effondrements potentiels initial) moins 85 000 (effondrements liés aux marnières fragiles qui se sont déjà produits il y a longtemps) moins 25 000 (effondrements potentiels liés aux marnières très stables qui ne se produiront que dans très longtemps), soit environ 140 000 effondrements.

■ L'estimation des fréquences annuelles d'effondrements liés aux marnières

En ordre de grandeur, le nombre d'effondrements par année dite « normale », est de quelques centaines avec une dizaine d'effondrements affectant les routes et les habitations. Ces chiffres atteignent, pour les années « exceptionnelles » (années à fortes pluviométries associées à une position haute de la nappe, du type 1995 ou 2001), plusieurs milliers d'effondrements dont une petite centaine affectant les routes ou les habitations.

En 1995, année exceptionnelle, le BRGM estimait qu'il y avait eu de l'ordre de 1000 à 1500 effondrements liés à des cavités souterraines pour le seul département de la Seine-Maritime. En 2001, le LRPC de Rouen a réalisé 67 interventions (43 en Seine-Maritime et 24 dans l'Eure) liées à des effondrements de marnières concernant des routes ou des habitations.

■ L'estimation des fréquences pour le futur

En retenant les estimations des deux paragraphes précédents, et en considérant que la majorité des marnières a été creusée entre 1850 et 1920, soit il y a 120 ans en moyenne, il est possible pour l'ensemble de la Haute-Normandie, en ordre de grandeur, que quelques centaines d'effondrements se produisent par an avec tous les 10 à 20 ans en moyenne des années « exceptionnelles » avec quelques milliers d'effondrements, et ce pendant encore une centaine d'années. Pour les « années normales », quelques effondrements à une dizaine concerneront des routes ou des habitations et, pour les « années exceptionnelles », plusieurs dizaines à une centaine d'effondrements affecteront ces mêmes routes ou habitations.

■ L'estimation de la probabilité d'occurrence

Pour environ une centaine d'années donc, et en l'absence d'actions visant à localiser et à traiter les marnières, on peut considérer qu'une parcelle de 1000 mètres carrés située dans une zone de plateau pour laquelle aucun travail de recherche de cavités n'a été effectué, a un risque de l'ordre de quelques pour-cent d'être concernée par un désordre consécutif à l'existence d'une cavité lors des 100 prochaines années.

Cette probabilité résiduelle peut être notablement diminuée par des actions de recherche et de traitement des marnières : établissement de Plans d'Indices de Cavités Souterraines, et, pour les constructions nouvelles, réalisation systématique de décapages spécifiques pour retrouver d'éventuels anciens puits d'accès (cf. Chapitre 4 et paragraphe 2.1, page 57).

1.2. La vulnérabilité et les enjeux

Les enjeux essentiels se limitent aux zones habitées ou relativement circulées. Pour ces zones, la probabilité d'occurrence reste faible. Bien entendu, les enjeux doivent s'apprécier au cas par cas en fonction des impacts d'un effondrement même si la probabilité d'occurrence de ce dernier reste faible. Ainsi, il est évident que les reconnaissances visant à diminuer le risque ne peuvent être identiques pour un hôpital ou une maison isolée ou pour une voie intensément circulée ou un chemin utilisé de façon très occasionnelle. Compte tenu de la relative homogénéité de la probabilité d'occurrence, cette approche par les enjeux est essentielle.

En revanche, il est difficile de retenir une approche par la vulnérabilité pour ces cavités anthropiques, car la dimension des désordres, atteignant plusieurs dizaines de mètres de diamètre et quelques mètres de profondeur, rend impossible ou extrêmement onéreuses les méthodes de mitigation (mesures prises pour réduire le risque en diminuant ses impacts). Dans certains cas, à enjeux très élevés, on pourra néanmoins comparer le coût d'une disposition constructive au coût d'une reconnaissance très détaillée.

Néanmoins, la précision et l'importance de la caractérisation de l'aléa vont dépendre des enjeux. Ainsi, si en tout état de cause il convient d'abord de faire établir une recherche des Indices de Cavités Souterraines, pour d'emblée retrouver 60 à 70 % des cavités potentiellement existantes à tel ou tel endroit, il reste possible de diminuer encore le risque résiduel : décapage spécifique ou par exemple, si l'enjeu le nécessite, sondages destructifs au droit des appuis de la construction (Chapitre 4). Ainsi, sur l'autoroute A29, la stratégie de recherche des cavités a consisté à rechercher et localiser tous les indices (puis à réaliser des investigations sur chaque indice), à procéder au décapage de la terre végétale sur l'ensemble du tracé et à réaliser des sondages destructifs au droit de chaque appui des ouvrages d'art pour éviter le risque, certes minime, d'avoir un pieu fondé juste au-dessus du toit d'une marnière.

Caractériser, de façon adaptée aux enjeux, l'aléa « marnière » ne suffit pas. Pour qu'il puisse réellement y avoir un acte de prévention, il est absolument nécessaire de développer une réelle gestion du risque. Cette gestion n'est possible que si, au delà de l'information, la perception du risque par les différents acteurs est suffisamment grande et suffisamment précise pour que chacun puisse s'approprier le problème et soit un acteur de la prévention.

1.3. La perception du risque « marnière » en Haute-Normandie

1.3.1. L'évolution de la perception du risque au cours du temps

La perception de l'aléa cavité souterraine en Haute-Normandie et des risques humains et matériels qu'il engendre, a notablement évolué, mais essentiellement de façon récente. Nous distinguons de façon très synthétique trois périodes :

- ▶ 1800 - 1940 : *Période d'exploitation des marnières* pendant laquelle le souci de prévention concerne essentiellement les risques liés à l'exploitation : les conditions de travail sont souvent mauvaises et les accidents mortels fréquents.
- ▶ 1940 - 1995 : *Période « d'oubli »* pendant laquelle les cavités et leurs conséquences (effondrements périodiques dans les champs mais pouvant aussi affecter des routes), sont considérées comme « normales » c'est à dire faisant partie de l'histoire de la région.
- ▶ *À partir de 1995*, où émerge de façon assez brutale une *perception du danger*.

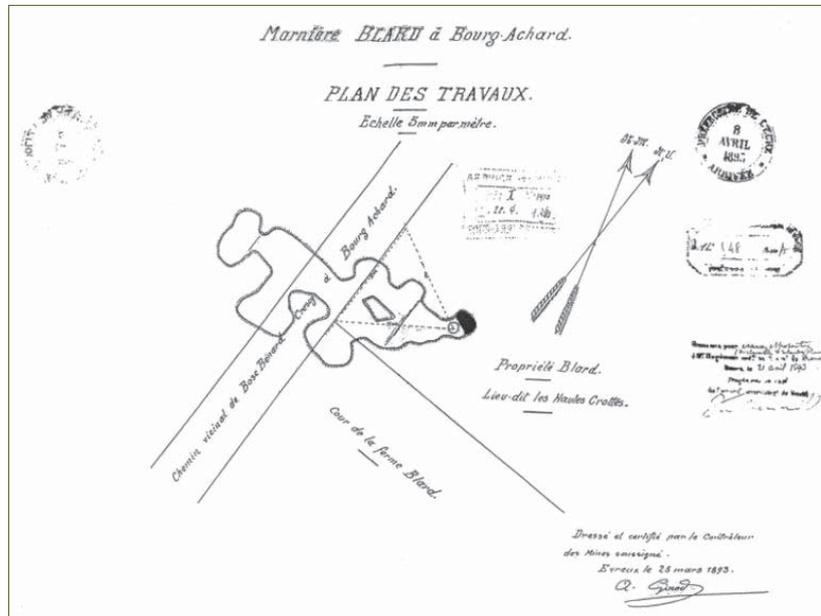
Une dernière phase, *depuis 2001*, année marquée par de nombreux effondrements spectaculaires dans un contexte où la connaissance de l'existence des cavités est déjà élevée, semble se mettre en place avec *l'émergence d'une culture de gestion de ce risque*.

1.3.2. 1800-1940 : la période d'exploitation

L'étude d'une part, des rapports des Ingénieurs des Mines du 19^e siècle et d'autre part, de l'évolution de la législation (cf. Encadré 6) concernant ces cavités anthropiques, rend compte que la perception de l'aléa est à cette période essentiellement limitée aux risques d'accidents liés à l'exploitation elle-même. La perception d'un risque à long terme sur les biens et les personnes par une urbanisation au droit d'anciennes exploitations ne commence que très tardivement.

La loi du 26 novembre 1889 précise qu'aucune excavation ne peut être ouverte ou poursuivie à moins de 10 mètres des bâtiments, routes, chemins, cours d'eau et mares, en revanche rien n'est précisé sur la réciproque : règles de construction à proximité d'une éventuelle cavité (Quelles précautions préalables ? Quelles investigations éventuelles ? etc.).

La règle de ne pas exploiter à proximité d'habitation ou sous une route (décret du 26/11/1889) n'était d'ailleurs pas toujours respectée, comme en témoigne le relevé du contrôleur des mines du 25 mars 1893 (Fig. 84).



■ Fig. 84 - Relevé de 1893 d'une cavité montrant que la marnière s'étend notablement sous la route.

Au cours de cette phase (1800 – 1940), l'acteur « Etat » cherche à savoir, à recenser (cf. Encadré 7). Néanmoins, les tentatives de l'Etat sont globalement des échecs. Ces échecs ont probablement différentes causes, détaillées dans les paragraphes suivants.

■ Les tentatives de recensements réalisées par des Ingénieurs des Mines

Ces ingénieurs des Mines s'intéressent culturellement plus au mode d'exploitation et aux dangers pour les exploitants qu'aux éventuels risques futurs concernant le « dessus ». En outre, ces exploitations n'étaient probablement pas à leurs yeux aussi remarquables que les mines : profondeurs faibles (de l'ordre de 25 à 35 mètres), superficies limitées (quelques centaines de mètres carré le plus souvent) et fruit de l'exploitation à vocation agricole et non industrielle.

■ La réticence des agriculteurs à déclarer leurs exploitations

À ce sujet, on peut retenir la note établie en 1832 par l'Ingénieur en Chef des Mines qui, constatant que très peu de déclarations lui étaient parvenues suite à l'arrêté du 02 janvier 1821, considérait que les Maires chargés du recensement et souvent propriétaires de marnières « ne se souciaient pas d'être sévères pour leurs propres exploitations, ne peuvent pas l'être d'avantage pour celles des administrés ».

De même, l'Ingénieur en Chef des Mines dans son rapport sur les carrières de Seine Inférieure du 25/03/1851, considère que « les Maires, souvent propriétaires ou fermiers sont amenés à ouvrir des exploitations et privilégient leur intérêt personnel ».

■ L'absence de communication sur les dangers futurs

S'il est bien fait obligation de déclarer, à aucun moment n'est expliqué aux exploitants en quoi ces déclarations sont nécessaires et comment elles seront utilisées. Cette obligation de déclaration est ainsi plus perçue comme de la surveillance et non comme un outil nécessaire à la sécurité publique. Pourtant, des effondrements de marnières affectant des biens se produisent déjà au 19e siècle ; ces faits n'ont pas été utilisés pour rendre le suivi plus efficace.

ENCADRÉ 6

PRINCIPAUX TEXTES DE LOIS SPÉCIFIQUES SUR LES MARNIÈRES EN NORMANDIE

Arrêté du 21/04/1806

- Obligation de demander au Maire l'autorisation d'ouvrir une carrière ;
- Obligation de reboucher le puits d'extraction entièrement par « de la terre ou autres matériaux ».

Arrêté du 21/04/1810

- Obligation de demander au Maire l'autorisation d'ouvrir une carrière ;
- Transmission du double de l'autorisation au Préfet ;
- Surveillance des exploitations par l'administration.

Décret du 15/02/1853

- Napoléon III abroge la loi de Louis XVI de 1780 qui obligeait l'amendement des terres de culture avec la marne.

Décret du 08/03/1853

- Obligation de mentionner dans les déclarations le lieu, le nom du déclarant, le nom du propriétaire et la position du puits par rapport aux habitations.

Loi du 27/07/1880 et décret du 26/11/1889

- Réglementation des carrières de Seine-Maritime et de l'Eure ;
- Obligation de déclarer et localiser chaque marnière ;
- Interdiction de réaliser toute excavation à moins de 10 mètres de bâtiments, routes, chemins, cours d'eau et mares.

Arrêté préfectoral du 18/12/1912

- Réglementation du confortement des puits en exploitation ;
- Précision sur les normes d'exploitation (hauteur et largeur des galeries, espacement entre les piliers) ;
- Obligation de condamner l'accès (puits) à la fin de chaque exploitation.

ENCADRÉ 7

L'ÉTAT CHERCHE À SAVOIR

Arrêté du 02/01/1821

Il demande aux Maires d'adresser à MM. les sous-Préfets un état des « mines, marnières ou carrières » exploitées ou non sur leurs communes.

En 1832, l'Ingénieur en Chef des Mines de la Seine Inférieure constatait que très peu de déclarations lui étaient parvenues.

Circulaire du 30/05/1821

Elle annonce une tournée générale des Ingénieurs des Mines dans chaque localité.

Cette tournée n'a jamais eu lieu...

1850

Les Ingénieurs des Mines sont chargés de la surveillance des exploitations.

Trois ingénieurs seulement sont affectés pour ce travail pour la Seine Inférieure.

Circulaire du 30/06/1928 (Louis Leprince-Ringuet)

Elle demande aux communes de faire un état précis et complet de la situation des carrières.

A priori sans suite : très peu de réponses.

Circulaire du 24/07/1995 (Préfet de Région Haute-Normandie)

Elle demande aux Maires d'indiquer l'emplacement des marnières et autres cavités existantes sur leur commune y compris en recherchant dans les archives communales.

Les réponses, assez nombreuses, mais très disparates et souvent peu précises, sont difficiles à exploiter.

■ Les tentatives sont portées par l'État centralisé

Seul l'État est moteur dans cette volonté de recensement des marnières, les Maires ne sont pas responsabilisés. Aucun relais décentralisateur et donc multiplicateur n'est prévu. Il est frappant de constater que lorsque l'on retrouve aujourd'hui la totalité (ou la quasi-totalité) des marnières par les archives, il s'agit de communes pour lesquelles le Maire de l'époque a installé, de sa propre initiative, un système de suivi et a mis en place un responsable (en général un agent voyer) qui relance régulièrement et suit les exploitants.

Au cours de cette période d'exploitation pendant laquelle la très grande majorité des cavités a été ouverte (de l'ordre de 50 000 pour la Seine Maritime et 50 000 pour l'Eure), la perception d'un risque lié aux effondrements de ces cavités n'existe pas. La marnière non seulement « fait partie du paysage », mais elle est indispensable à la vie agricole. Chauler (épandre de la marne) est aussi banal et nécessaire que semer ou faucher. Tous les agriculteurs et ouvriers agricoles en ont visité ou ont travaillé dedans.

1.3.3. 1940-1995 : la période d'oubli et de banalisation

Durant cette période, il n'y a quasiment plus de marnières en activité (la dernière mention en archive retrouvée date de 1956). Cette période correspond à une acceptation culturelle du « phénomène marnière ». Les cavités font partie du patrimoine régional ; on connaît les marnières par son père ou son grand-père et on en voit les manifestations en surface.

La majorité des désordres se produit dans des champs, et certains sont reconnus et décrits comme « une marnière qui défonce » pour un effondrement de chambre, ou « un œil qui se forme » pour « un puits qui tasse ». On rebouche le trou, on sait que cela tassera à nouveau ou que se produira un effondrement un peu plus loin ; on vit avec. En outre, les gens ne connaissent plus personnellement les marnières et l'imaginaire se développe : on les décrit plus grandes qu'elles ne sont en réalité, on les imagine reliées les unes aux autres par des souterrains de plusieurs centaines de mètres, etc.

Les manifestations en surface, déjà fréquentes, ne produisent pas de prise de conscience. Il se produit pourtant des événements spectaculaires : un effondrement provoque la mort d'une personne dans le Pays de Caux dans les années cinquante, et nombreuses sont les routes et les habitations touchées (Fig. 85).



■ Fig. 85 - Effondrement d'une marnière en 1981.

Néanmoins, c'est durant cette période, à partir des années 1980, qu'apparaissent les premiers travaux de recherche systématique d'indices de cavités souterraines et les premières prises de conscience du risque.

En Seine-Maritime, ces travaux sont initiés par les communes¹⁵ et par le Conseil Général 76, qui finance le recensement d'indices pour toutes les communes des cantons d'Yvetot et de Fauville-en-Caux¹⁶.

En outre le Conseil Général décide de favoriser la réalisation de ces cartes d'aléas en aidant les communes à les financer à partir du début des années 1990.

Dans l'Eure, la DDE finance également ces recensements pour les communes jugées à enjeux et/ou celles renouvelant leurs Plans d'Occupation des Sols (POS) ou Modalités d'Application des Règlements Nationaux d'Urbanisme (MARNU).

Certaines communes font également réaliser un recensement sur leurs fonds propres.

Ces démarches sont toujours actives dans ces deux départements et sont d'ailleurs essentiellement soutenues par les mêmes acteurs. En revanche, dans le **Calvados**, certes moins concerné par ce risque, où à la même époque, à la demande de la DDE, des travaux comparables avaient été effectués¹⁷, la dynamique ne s'est pas poursuivie.

Cette prise de conscience qui débouche sur les premières actions est donc plus le fait de quelques individualités que la conséquence d'une politique globale de prévention.

À cette époque, ces premiers documents de recensements d'indices de cavités souterraines sont considérés, que se soit par leurs auteurs ou par les utilisateurs, essentiellement comme des documents d'information. Ainsi, la rigueur dans la recherche et l'exploitation des informations est bien moindre que dans les documents actuels ; par exemple, ces documents représentant les indices sur des cartes ne sont pas accompagnés de fiches descriptives complètes pour chaque indice ; les échelles et les supports cartographiques sont mal adaptés à leurs utilisations¹⁸. Ainsi, certaines Mairies vont fortement utiliser voire compléter ces documents mais d'autres ne vont pas s'en servir ; il n'y a pas d'effet d'entraînement particulier.

1.3.4. 1995 : la prise de conscience

En décembre 1993, le TGV Nord déraile, suite à un effondrement de cavité sous voie. Cet accident va, indirectement, profondément modifier l'impact « cavités souterraines » en Haute-Normandie.

En effet, à cette époque commencent les premiers travaux de la future Autoroute A29, Beuzeville – Le Havre – Yvetot – Saint-Saëns, soit 130 kilomètres d'autoroute dans le « pays des marnières ». Le Maître d'Ouvrage décide suite à l'accident ayant affecté le TGV, de mettre en place toutes les actions nécessaires à la recherche et au traitement des cavités à l'échelle de ce grand chantier (réalisé entre 1993 et 1998).

Toutes les Mairies du Pays de Caux concernées par le tracé de l'A29 étaient régulièrement informées de l'avancement du chantier et donc des travaux liés aux marnières. Ces collectivités territoriales ont donc perçu :

- 1. Que l'existence de ces cavités était reconnue ;
- 2. Que l'on avait besoin d'elles pour traiter le problème ;
- 3. Qu'il existait des méthodes pour retrouver et traiter les marnières.

L'hiver 1993 fut particulièrement pluvieux, l'année 1994 également. Et au printemps 1995 (de février à juillet) les pluies importantes associées à la remontée de la nappe phréatique furent à l'origine de nombreux effondrements. En outre, un événement spectaculaire, la disparition brutale d'un pavillon à Mesnil-Panneville (Seine-Maritime), frappe les imaginations et favorise une prise de conscience, teintée d'inquiétude, de la population.

¹⁵ La première commande d'une carte d'aléa, intitulée Recensement d'Indices de Cavités Souterraines, date de 1983.

¹⁶ Travail réalisé par le LRPC de Rouen en 1984.

¹⁷ Inventaire des effondrements de terrain au 1er janvier 1985 de 6 cantons (77 communes).

¹⁸ Dans le recensement des cantons de Fauville-en-Caux et d'Yvetot, les indices sont reportés sur des fonds types IGN avec des échelles variant de 1/25000 à 1/17000.

Ainsi, contrairement aux périodes comparables qui ont dû exister dans le passé, les Mairies et les particuliers font appel, en 1995, aux spécialistes au lieu de simplement reboucher les trous. La Préfecture s'est également mobilisée en faisant appel aux différents services de l'État pour tenter de répondre aux besoins des collectivités.

Enfin, fait essentiel qui va pérenniser la prise de conscience, les DDE et la Préfecture décident en 1995 d'appliquer des zones de précaution (à l'intérieur desquelles il est interdit de construire) autour de chaque indice dont elles ont connaissance. Au sein de ces zones, aucun certificat d'urbanisme positif ne sera plus délivré ; on passe ainsi, de fait, de l'information à la prévention.

1.3.5. De la prise de conscience à la gestion

À partir de la fin des années 1990, la perception du risque devient de plus en plus marquée avec un effet d'entraînement : de plus en plus de communes font faire des recensements. Ces recensements induisent des zones inconstructibles qui posent des problèmes de gestion de l'urbanisme, on parle donc des marnières, et de proche en proche, la conscience de l'existence de l'aléa mais aussi sa compréhension et sa gestion se développent. L'année 2001, marquée par de très nombreux effondrements et le fait qu'un de ces effondrements (Fig. 39, Chapitre 3) cause une victime, événements relayés par la presse nationale, entérine la prise de conscience qui devient alors nationale.

Sur le plan local, la perception et la connaissance du risque lié aux marnières ainsi que la connaissance de l'aléa par les acteurs locaux sont beaucoup plus élevées que celles que l'on peut rencontrer dans d'autres régions concernées par d'autres risques tels que les inondations, les glissements de terrain, etc. (Colbeau-Justin et Marchand, 2002).

Cette étude (Colbeau-Justin et Marchand, 2002) fait clairement ressortir la volonté des élus de voir se développer, certes avec un appui réglementaire national et un appui technique des services de l'État, y compris par des efforts de recherche, une gestion locale du risque. De fait, les démarches initiées par les élus locaux ont conduit à une évolution de la législation (Article 159 de la loi n° 2002-276 du 27 février 2002 relative à la démocratie de proximité abrogé et remplacé par la loi n° 2003-699 de prévention des risques technologiques et naturels, du 30 juillet 2003, article 82). Dans ces textes apparaît d'ailleurs explicitement le terme de « marnière ».

❖ 2. LA PRÉVENTION

La prévention doit être comprise comme l'ensemble des actions mises en œuvre (informations, réglementation, recherches et études, travaux de reconnaissance, travaux de confortement, etc.) dans l'objectif de diminuer le risque ou au moins de tenter de le restreindre à des limites jugées collectivement ou socialement acceptables par une maîtrise du risque.

2.1. Les acteurs de la prévention et leurs responsabilités

De très nombreux acteurs, directs ou indirects, doivent (obligations légales) ou peuvent jouer un rôle dans la prévention du risque lié aux marnières.

2.1.1. L'État

L'État a un devoir d'information auprès des populations.

« Le représentant de l'Etat dans le département publie et met à jour [...] 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 il existe une présomption réelle et sérieuse de l'existence d'une telle cavité » (Code de l'Environnement, article L563-6). En particulier, la réglementation prévoit l'établissement par le Préfet d'un document général, regroupant les informations relatives aux risques naturels et technologiques auxquels sont soumis les communes (Dossier Départemental des Risques Majeurs, DDRM). Le Préfet porte également à la connaissance des Maires, l'ensemble des informations dont il dispose. À partir de ces éléments, le Maire doit réaliser le Document d'Information Communal sur les Risques Majeurs (DICRIM) en application des articles R125-9 à R125-14 du Code de l'Environnement. Il est à noter

que ces documents (DDRM et DICRIM) sont des documents d'information ; ils n'ont pas de valeur réglementaire et ne sont donc pas opposables aux tiers¹⁹. L'État doit également, lors de l'élaboration des documents d'urbanisme, « porter à la connaissance des communes toutes les informations dont il dispose en terme de risques majeurs » (Code de l'urbanisme, articles L.122-1 et 123-1).

En outre, les DDE, services déconcentrés de l'Etat, jouent un rôle majeur en terme de prévention, au niveau de l'urbanisme (périmètres de sécurité autour des indices dans les documents d'urbanisme, contrôle de légalité sur l'autorisation des permis de construire, etc.), mais aussi au niveau des recherches d'informations pour tenter de localiser au mieux les cavités. Ainsi, les DDE 76 et 27 ont engagé depuis plusieurs années un très important travail de collecte des données issues des archives départementales. Systématiquement consultées lors de demandes de permis de construire, elles peuvent ainsi signaler tout indice situé sur ou à proximité de la zone considérée. Par ailleurs, les DDE peuvent, sur demande du Préfet, engager les moyens nécessaires et piloter la réalisation de Plans de Prévention des risques naturels (PPRN) (cf. paragraphe 2.2.2, page 88).

2.1.2. Les Maires

Les Maires sont directement et fortement concernés par le problème des marnières, que ce soit en termes d'information de la population, de réalisation de cartes communales, ou en terme d'actions à mettre en œuvre en cas de sinistre. Des informations à ce sujet sont disponibles dans le Guide à l'Usage des Maires (Conseil Général de la Seine-Maritime, 1998, mise à jour de 2007) et sont également présentées sous forme de fiches détaillées sur le site www.mementodumaire.net.

En premier lieu, « 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. » (Articles 159 de la loi n° 2002-276 du 27 février 2002 et 43 Loi 2003-699 du 30 juillet 2003). Il est également prévu que le Maire établisse un document d'information, le Document d'Information Communal sur les Risques Majeurs.

En cas d'urgence (mouvement de terrain lié à la présence d'une marnière) le Maire a la responsabilité de mettre en œuvre les mesures d'urgence pour assurer la sécurité publique (article L2212-2 du code général des collectivités locales) et doit informer le représentant de l'État des mesures prises (art. L2212-4). Si le Maire n'a pas pris les mesures nécessaires, le Préfet a le pouvoir de les mettre en œuvre après une mise en demeure adressée au Maire (art. L2215-1). Le Maire a également le pouvoir de prescrire la réparation ou la démolition d'un immeuble menaçant ruine (articles L511-1 à 511-4 du code de la construction et de l'habitat). Enfin, le Maire peut prendre un arrêté municipal d'interdiction d'accéder aux propriétés et/ou de circuler sur une voirie (articles L212-1 et suivants du code général des collectivités territoriales). Des exemples types de ces arrêtés sont donnés dans le Guide à l'Usage des Maires (Conseil Général de la Seine-Maritime, 2007).

2.1.3. Les particuliers

Propriétaires, ils sont concernés en premier lieu. En effet, la propriété du sol et du sous-sol dépend du droit civil. Or, l'article 552 du code civil indique que « la propriété du dessus (fond) emporte la propriété du dessous (tréfonds) ». Le propriétaire d'un terrain est donc, au droit des limites de sa propriété, propriétaire du sous-sol et de ce qu'il contient. Ainsi, le propriétaire d'un terrain sous lequel est situé une marnière est également propriétaire de cette marnière.

De ce fait, beaucoup de particuliers sont concernés directement par le problème des marnières. Il est donc très important avant d'acheter et donc devenir propriétaire du sol et du sous-sol de se renseigner au mieux sur l'existence possible d'une éventuelle cavité. Cette recherche de renseignements peut aller de la simple demande d'informations en Mairie et auprès de la DDE, jusqu'à la réalisation de recherches d'éventuels indices de cavités. Il arrive régulièrement que des vendeurs ou des futurs acheteurs fassent réaliser des recherches d'indices (quand la commune n'a pas de PICS). Il arrive aussi régulièrement que des particuliers fassent procéder au décapage de leur terrain avant la construction de leur habitation. Ces actions pertinentes et efficaces ont un coût (cf. Chapitre 4), mais celui-ci reste faible au regard de celui de l'acquisition ou de la construction envisagée.

¹⁹ Pour plus de détails voir les sites www.prim.net (site du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire), et www.mementodumaire.net.

Par ailleurs, les particuliers ont un devoir d'information auprès des Mairies. Le Code de l'Environnement article L563-6 stipule même que « *Toute personne qui a connaissance de l'existence d'une cavité souterraine [...] ou d'un indice susceptible de révéler cette existence en informe le Maire [...] La diffusion d'informations manifestement erronées, mensongères [...] est punie d'une amende de 30 000 €* ».

2.1.4. Les associations de particuliers

Elles jouent un rôle essentiel dans la prévention par leurs actions d'information et de conseil que ce soit auprès des victimes d'effondrements ou auprès du public en général (voir en particulier le site www.sosmarnieres.com).

Dans certains cas, se constituent des associations « ponctuelles » regroupant des particuliers concernés par un indice ou par un effondrement de façon à gérer au mieux de façon collective, les travaux de reconnaissance et de comblement et à bénéficier de façon plus simple d'aides des collectivités locales.

2.1.5. Les notaires

Les notaires ont de par leur fonction, la mission d'assurer au vendeur et à l'acheteur la qualité « véritable » des biens qui lui sont confiés dans le cadre des actes juridiques dont ils ont la charge. Ils ont donc un rôle d'information essentiel à jouer au moment des achats et ventes des propriétés. Ils peuvent notamment indiquer à l'acheteur si le territoire de l'acquisition est couvert par un PICS ou non et communiquer également toutes les informations utiles relatives aux marnières et à leurs impacts sur les biens, et, le cas échéant, apporter conseil.

Le décret n° 2005-134 du 15 février 2005, en application de l'article L125-5 du Code de l'Environnement, précise l'obligation, pour le vendeur ou le bailleur, d'information des acquéreurs et des locataires de biens immobiliers sur d'une part, les risques naturels et technologiques affectant le bien immobilier, et d'autre part sur les sinistres résultants de catastrophes naturelles ou technologiques reconnues ayant affecté tout ou partie l'immeuble concerné.

La première disposition concerne les biens situés dans des zones couvertes par un PPRN prescrit ou approuvé, ou dans une zone de sismicité.

Le non-respect de ces obligations peut permettre à l'acquéreur ou au locataire de poursuivre la résolution du contrat de vente ou de location ou d'exiger une diminution du prix de la transaction.

2.1.6. Les Conseils Généraux et les Conseils Régionaux

Ces collectivités territoriales peuvent avoir un rôle très important à jouer en matière de prévention que ce soit en terme d'information du public, de soutien technique et d'aides auprès des Maires ou de soutien financier pour les opérations de recensement d'indices, reconnaissances sur indices ou traitement des cavités. Ces rôles sont actuellement joués de façon assez inégale en fonction de la nature des collectivités et des départements.

2.1.7. Les promoteurs

Certains promoteurs, lorsque la commune ne dispose pas de Plan d'Indices de Cavités Souterraines, réalisent, à leurs frais, des recensements systématiques et même des reconnaissances sur indices avant d'acheter un terrain. Ces pratiques, qui participent de façon active à la prévention, sont vivement à encourager.

2.1.8. Les constructeurs

Les constructeurs sont, de fait impliqués, par le code de la construction et de l'habitation qui précise dans son article L111-13 que « *Tout constructeur d'un ouvrage est responsable de plein droit, envers le maître ou l'acquéreur de l'ouvrage, des dommages, même résultant d'un vice du sol, qui compromettent la solidité de l'ouvrage ou qui, l'affectant dans l'un de ses éléments constitutifs ou l'un de ses éléments d'équipement, le rendent impropre à sa destination (...) Une telle responsabilité n'a point lieu si le constructeur prouve que les dommages proviennent d'une cause étrangère.* »

Néanmoins, le plus souvent, les constructeurs ne procèdent qu'aux reconnaissances relatives à la construction des ouvrages (sondages pour mesure de portance). Il serait particulièrement pertinent que se généralise la pratique de réaliser un décapage pour repérer d'éventuels puits de marnière (cf. paragraphe 2.1, page 57) avant la construction.

2.1.9. Les assureurs

Ceux-ci interviennent essentiellement en cas de sinistre (cf. paragraphe 3.4., page 90). Ils participent également à la prévention par des actions d'information (voir notamment le site www.mrn-gpsa.org, site d'une mission des sociétés d'assurances pour la connaissance et la prévention des risques naturels).

2.2. Les modalités de prévention

2.2.1. Le choix d'une stratégie de caractérisation de l'aléa

Compte tenu des éléments présentés dans les paragraphes précédents, le paradoxe est que l'on est confronté à un aléa « connu en grand » (on sait qu'il existe de l'ordre de 100 000 marnières en Haute-Normandie et on en connaît les effets) mais que l'on ne sait pas qualifier suffisamment pour permettre une politique de prévention parfaitement adaptée. La localisation de chacune de ces cavités est inconnue. En outre, compte tenu de la géologie, de la faible dimension des marnières et de leur importante profondeur, les méthodes géophysiques actuelles ne permettent pas de retrouver ces cavités de façon suffisamment efficace (cf. chapitre 4).

En résumé, dans l'état actuel :

- *L'aléa marnière est :*
 - Un aléa diffus réparti de façon quasi uniforme sur les zones de plateaux crayeux (80 % de la superficie de la Haute-Normandie) ;
 - Un aléa d'apparence fort (en moyenne 14 marnières par kilomètre carré), mais d'occurrence relativement faible : la probabilité de construire à moins de 20 mètres d'une marnière est de l'ordre de 3 % et seules deux victimes physiques des effondrements de marnières sont répertoriées depuis 50 ans ;
 - Un aléa mal connu : seule une faible part des marnières existantes est connue, probablement de l'ordre de 25 à 30 %.
- *La perception du risque est élevée avec une réelle implication de nombreux acteurs ;*
- *Cette perception, relativement précise et rationnelle, a évité en 2001 que se développe une panique mais cet équilibre reste fragile : savoir qu'à tout endroit et à tout instant une maison ou une route peut s'effondrer est particulièrement éprouvant ;*
- *La gestion du risque doit être locale car les communes sont directement concernées par les effets sur l'urbanisme de la présence de ces cavités.*

Dans ce contexte, si la finalité du travail de l'expert, spécialiste de l'aléa, est de participer au développement de la prévention, il lui est nécessaire d'intégrer dès la caractérisation de cet aléa et sa représentation, les dimensions humaines et sociales qui permettront ou non une prise en compte de cet aléa.

Ainsi, pour permettre de développer une politique de prévention, la stratégie de recherche et de traitement de ces cavités, qui a été mise en œuvre depuis 20 ans au LRPC de Rouen, repose sur la méthodologie suivante :

- 1 - Recensement le plus exhaustif possible, sur une zone donnée, de tous les « indices » laissant supposer la présence d'une cavité en profondeur à tel ou tel endroit ;
- 2 - Reconnaissances spécifiques et adaptées à la nature de l'indice ;
- 3 - Traitement.

La décision de réaliser les points 2 et 3 et leurs contenus dépendent non seulement des résultats du point précédent mais surtout des enjeux.

Cette méthodologie s'inscrit dans une logique de prévention progressive et adaptée aux enjeux en travaillant avec un ratio « coût / diminution du risque » croissant. Ainsi, la première étape, qui

est d'un coût relativement faible²⁰, permet de repérer de l'ordre de 70 % des marnières réellement existantes. C'est dans cette logique que le LRPC de Rouen a développé depuis 1983 le concept des PICS (Plans d'Indices de Cavités Souterraines, cf. Chapitre 4), qui correspondent à des cartes de localisation représentant les indices issus de différentes sources d'information.

Enfin, il est important de souligner que le mode de représentation de l'information est primordial pour que cette dernière puisse être utilisée et prise en compte dans une logique de prévention. Indiquer qu'il existe une information d'archive (ancienne déclaration d'ouverture de marnière par exemple) sur un fond topographique au 1/25 000 ou au 1/100 000 ne permet pas cette prise en compte et ne débouche pas sur de la prévention.

2.2.2. Les documents supports de la prévention

La prévention passe, dans l'état actuel des techniques de détection, d'abord et impérativement par un recensement des indices de cavités souterraines.

Des actions de recensement peuvent être initiées à différentes échelles, projet ponctuel (construction d'un bâtiment ou vérification sur un ouvrage à enjeux existant), projet linéaire (projet de route ou routes et voies ferrées existantes), projet de lotissement, territoire communal, territoire d'une Communauté de Communes et par des acteurs différents (particuliers, entreprises, gestionnaires de voiries, collectivités locales, État central). L'important est que ce travail soit effectué de façon suffisamment fiable et précise pour permettre la ré-utilisation des résultats par tous les acteurs concernés et éviter de recommencer plusieurs fois les mêmes recherches.

Le document issu de ce travail de recensement doit être conçu pour être utilisé comme support de prévention. Il est essentiel que chacun puisse se l'approprier et donc parfaitement comprendre les modalités de réalisation et les incertitudes qui subsistent. En pratique, cela signifie que ce type de document doit être réalisé à des échelles adaptées (1/1 000 – 1/2 000 pour des projets et 1/5 000 pour des territoires urbanisés) et sur des documents dont les repères soient significatifs pour les utilisateurs (par exemple, plans d'exploitation pour les routes, fonds parcellaires pour les communes ou les groupes de communes). Cela signifie également que les informations relatives à un indice sont regroupées dans une fiche descriptive explicite. Cela signifie, enfin, que les choix de considérer tel indice comme significatif ou non, de le positionner à tel ou tel endroit, doivent être explicités et que les incertitudes doivent être mentionnées et, si possible, quantifiées.

Le PICS (Plan d'Indices de Cavités Souterraines, Chapitre 4, paragraphe 1.7, page 55) servira de référence. Établi de préférence à l'échelle d'une commune, il permet, de fait, d'identifier des zones plus ou moins exposées au risque en fonction du nombre d'indices de cavités souterraines qu'elles contiennent. En outre, document facile à lire, il peut être le support d'informations vis à vis de la population actuelle ou future (acheteurs) et il peut être consulté par les notaires, les promoteurs immobiliers, les constructeurs, etc. Enfin, ce document est un document vivant sur lequel il est facile de reporter des nouvelles informations (indice nouveau donnant lieu à l'ouverture d'une fiche nouvelle ou investigations ou traitements effectués sur un indice). On peut considérer qu'il répond pleinement à l'esprit du législateur qui, dans la loi 2002-276 du 27 Février 2002, incite « *les communes ou les groupements compétents en matière de documents d'urbanisme (à élaborer) des cartes délimitant les sites où sont situés des cavités souterraines et des marnières susceptibles de provoquer l'effondrement du sol* », disposition reprise dans l'article 43 de la loi 2003-699 du 30 juillet 2003.

Par ailleurs, le Code de l'Urbanisme impose aux documents d'urbanisme (SCOT, PLU et cartes communales) de déterminer les conditions permettant d'assurer notamment la prévention des risques naturels prévisibles (articles L. 121-1 du Code de l'Urbanisme).

Ainsi réalisé le PICS est de fait un document de prévention car l'information qu'il contient peut directement être utilisée dans les règles d'urbanisme.

En application des articles L. 562-1 à L. 562-7 du Code de l'Environnement, le Préfet peut prescrire, réaliser et approuver des Plans de Prévention des Risques naturels (PPRN) prenant en compte le risque lié à la présence de cavités souterraines. Le PPRN constitue un document réglementaire spécifique de la prévention des risques naturels majeurs. Son principal objectif est la prise en compte des risques dans l'aménagement du territoire. Les PPRN délimitent les zones directement ou non directement exposées, en tenant compte de la nature et de l'intensité du ou des risques encourus. Ils définissent dans ces zones, des prescriptions relevant notamment des règles de l'urbanisme et de

²⁰ Un recensement des indices coûte, pour une commune moyenne, de l'ordre de 15 000 € (chiffre 2005).

construction qui s'appliqueront aux projets de constructions nouvelles et d'aménagement des biens existants. Ils peuvent également définir et rendre obligatoire dans un délai de 5 ans des mesures sur les biens et activités existants visant notamment à la réduction de la vulnérabilité. Les PPRN peuvent enfin définir des mesures générales de prévention, de protection et de sauvegarde qui doivent être prises en compte par les particuliers et/ou les collectivités publiques. Ils sont établis en association avec les collectivités territoriales et après concertation avec les populations concernées.

Le PPRN permet une meilleure prise en compte du risque dans l'aménagement (notamment par la définition de règles de construction) et un renforcement de la gestion du risque par des mesures imposées le cas échéant sur les biens et activités existants (par exemple par une gestion appropriée de l'eau dans les secteurs concernés). Cependant, la mise en place d'une telle procédure par l'État doit être réservée au traitement des zones où le risque est le plus important tant du point de vue des phénomènes que des enjeux susceptibles d'être exposés.

Actuellement, il n'existe pas de PPRN pour l'aléa « marnières » en Normandie.

❖ 3. LES AIDES ET LES INDEMNISATIONS

Il est impossible de présenter dans ce guide de façon détaillée et complète ce point dans la mesure où les dispositifs actuels dépendent non seulement du cadre législatif, mais aussi des pratiques et politiques des différents acteurs concernés (collectivités locales, assureurs, etc.). S'il nous a semblé important de présenter ici, de façon résumée, les principaux traits de cet aspect du problème, qui est évidemment essentiel, l'attention du lecteur est attirée sur le caractère volontairement simplifié de la présentation et sur le fait que les procédures et dispositifs prévus actuellement sont susceptibles d'évoluer dans le temps.

Des éléments d'information beaucoup plus complets sont disponibles sur les sites www.prim.net (site du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire), et www.mrn-gpsa.org (site d'une mission des sociétés d'assurances pour la connaissance et la prévention des risques naturels). On trouvera sur ces sites, outre les textes de loi et décrets de référence, des explicitations sur les aides possibles ainsi que des conseils sur les démarches à suivre.

Il faut distinguer deux sources de financement pour les aides :

- Les subventions de l'État, qui proviennent d'un fonds de financement dit « fonds Barnier », alimenté par les sociétés d'assurance qui versent une partie de la cotisation perçue au titre des catastrophes naturelles, et dont les montants et pourcentages sont fixés dans le cadre de la loi 2003-699 du 30 juillet 2003 (cf. la circulaire du 23 février 2005). Les procédures d'instruction et de décision afférentes à l'ensemble des subventions sont, à l'exception de l'expropriation, placées sous l'autorité du Préfet ;
- Les aides éventuelles des collectivités locales (Conseils Généraux et Communes) ;

Et, en cas de survenance de désordres, les indemnités des assurances.

3.1. La réalisation des recensements d'indices de cavités souterraines et l'information de la population

Les communes ont maintenant, de par la loi, la responsabilité d'établir des cartes recensant les indices (paragraphe 2.1. page 84). Certains départements encouragent financièrement les communes à établir de tels documents. Ainsi, le Conseil Général de la Seine-Maritime subventionne depuis plus de 10 ans à hauteur de 70 % les recensements d'indices réalisés par les communes sous réserve de l'adoption d'un cahier des charges strict (Conseil Général de la Seine-Maritime, 2007) ayant pour objectif de garantir la qualité du travail effectué.

Dans le cas de réalisation d'un PPRN, ce dernier est entièrement financé et piloté par les services de l'État. Dans les communes dotées d'un PPRN, le Maire informe la population au moins une fois tous les deux ans, par des réunions publiques communales ou tout autre moyen approprié, sur les caractéristiques du ou des risques naturels connus dans la commune, les mesures de prévention et de sauvegarde possibles, les dispositions du plan, les modalités d'alerte, l'organisation des secours, les mesures prises par la commune pour gérer le risque. Pour cela, les collectivités peuvent être aidées par l'État (article L125-2 du Code de l'Environnement).

3.2. Les études spécialisées (reconnaisances ponctuelles)

Dans la limite de ses ressources, le fonds de prévention des risques naturels majeurs peut subventionner les opérations de reconnaissance à hauteur de 30 %. Ne sont éligibles que les cas pour lesquels un danger est avéré pour le bien ou les personnes. Des compléments, parfois importants, peuvent être apportés par les collectivités territoriales (notamment conseils généraux).

3.3. Le traitement (renforcement ou comblement de la cavité)

Dans les mêmes conditions que précédemment, le fonds de prévention peut subventionner les opérations de traitement des cavités à hauteur de 30 %. Seuls les cas de « *menaces graves sur les vies humaines et traitement moins coûteux que l'expropriation* » sont éligibles. Des compléments peuvent, éventuellement, être apportés par les collectivités territoriales.

3.4. Les dommages

Les dommages aux biens rentrent dans le domaine de prise en charge des assurances. Ces dernières ne financent habituellement que les désordres avérés sur le bien assuré. Néanmoins, il arrive que certaines assurances financent des travaux de reconnaissance dans le cas de désordres proches de l'habitation qui sont susceptibles en évoluant d'affecter cette dernière.

Il est à noter que les lois ont récemment évolué en ce qui concerne la considération de « catastrophe naturelle » pour les marnières. Ainsi, avant le 28 février 2002, l'origine anthropique des marnières empêchait, le plus souvent, la reconnaissance des désordres liés aux marnières comme « naturelle ».

La garantie ne peut être mise en jeu que si l'état de catastrophe naturelle a été constaté par un arrêté interministériel. C'est le Préfet qui a pour mission d'avertir la Direction en charge de la Défense Civile et de lui transmettre, sous un mois, un dossier permettant l'examen en commission interministérielle. Ce dossier doit notamment comprendre un rapport géotechnique circonstancié.

Enfin, dans certains cas, peuvent être engagées des procédures d'expropriation du fait de péril important ou des procédures de rachat amiable par la commune, un groupement de communes ou l'État (sous réserve que le prix de l'acquisition s'avère moins coûteux que les moyens de sauvegarde et de protection des populations).

Conclusion

La présence de très nombreuses cavités souterraines anthropiques dans la craie en Normandie, les marnières, constitue un risque naturel majeur important pour cette région. Ces cavités, nombreuses, de l'ordre de 140 000 pour la région Haute-Normandie, sont pour la grande majorité d'entre elles non connues ni même localisées. La gestion du risque lié aux effets des effondrements de ces marnières représente donc un défi particulièrement difficile. Il faut, en effet, faire face à un aléa dont il est impossible de décrire avec précision ni sa localisation ni sa probabilité d'occurrence.

Dans ces conditions, la prévention passe nécessairement par une approche indirecte et progressive impliquant un grand nombre d'acteurs.

Ce guide propose ainsi, en s'aidant de l'expérience acquise depuis une trentaine d'années par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Rouen, de s'appuyer sur la notion d'Indice de Cavités Souterraines, un indice étant défini comme toute information ou observation laissant suspecter à un endroit donné la présence d'une marnière en profondeur (anomalies de surface, document d'archive, etc.).

Le recueil de ces indices doit être effectué avec le plus grand sérieux et la plus grande précision possible. La nature des reconnaissances à effectuer sur ces indices, les techniques à mettre en œuvre et l'interprétation des résultats obtenus nécessitent, de même, la plus grande rigueur. Ce guide présente en détail la méthodologie générale mais aussi les méthodes utilisables et leurs conditions d'emploi.

Enfin, pour que les informations recueillies puissent être utilisées, il est essentiel qu'elles soient bien explicitées (et que notamment les incertitudes soient bien décrites), que leurs représentations graphiques soient claires et adaptées aux enjeux et que les documents puissent en permanence évoluer pour tenir compte des informations nouvelles. Ce guide propose outre la méthodologie d'établissement, des modes de représentation possibles pour de tels Plans d'Indices de Cavités Souterraines.

Si la lecture de ce guide peut convaincre les nombreux acteurs concernés qu'il peuvent agir pour diminuer le risque, s'il peut favoriser l'établissement de Plans d'Indices de Cavités Souterraines de qualité pour l'ensemble des communes concernées, s'il peut conduire à ce que les reconnaissances effectuées soient adaptées et de qualité et s'il peut, enfin, aider à généraliser les reconnaissances préalables (recherches d'indices, décapage de la terre végétale pour recherche d'éventuels anciens puits d'accès, etc.) avant construction (habitations, lotissements, routes, zones industrielles, etc.), alors il aura atteint pleinement son objectif.

Annexes

ANNEXE I

Lexique

| Terme technique | Signification |
|----------------------------|---|
| Affaissement | Mouvement de terrain vertical lent et continu consécutif à un effondrement de cavité souterraine, aboutissant à une dépression topographique |
| Aléa | Phénomène naturel d'occurrence et d'intensité données |
| Amendement ou marnage | Opération consistant à épandre de la craie sur les terrains agricole afin de les rendre moins acides |
| Banc | Niveau de roche de même grain, couleur, aspect, dureté, etc. (épaisseur allant du décimètre à plusieurs mètres) |
| Bétoire | Point d'infiltration naturelle des eaux de surface vers le réseau karstique de la craie en Normandie |
| Boyau | Conduit souterrain d'origine karstique, il peut être horizontal ou vertical |
| Chambre | Vide de carrière terminant une galerie |
| Ciel | Banc rocheux résistant formant le plafond naturel de toute carrière |
| Clavage | Opération complétant une campagne de comblement ou d'injection et destinée à obstruer tous les vides résiduels |
| Cloche de fontis | Évolution et aggravation d'un ciel tombé. Les désordres progressent vers la surface en traversant les couches géologiques susjacentes |
| Coccolithes | Plaques calcaires discoïdes dont l'assemblage forme l'enveloppe sphérique d'algues microscopiques (les coccolithophoridés) et dont l'accumulation après la mort de l'individu peut former des roches calcaires (ex. : la craie) |
| Comblement | Remplissage d'une cavité au moyen de matériaux d'apport |
| Curage d'un puits | Évacuation des matériaux obstruant un puits et empêchant son exploration |
| Décapage | Opération consistant à enlever une couche de matériaux sur une fine épaisseur |
| Décollement de banc | Banc situé en ciel qui fléchit et provoque une ouverture de joint de stratification |
| Descenderie | Accès externe à une carrière souterraine se présentant en pente descendante |
| Diaclase | Fracture assez fine affectant la masse rocheuse, en général à peu près perpendiculaire aux bancs, sans déplacement relatif des compartiments |
| Écaillage | Dégradation par décollement de plaque ou éclat au niveau des pieds et des faces de pilier ou à l'encastrement des dalles de toit |
| Enjeu | Personnes, biens ou activités, moyens, patrimoines, etc., susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel |
| Entrée ou bouche de caveau | Entrée de plain pied vers une carrière souterraine, s'ouvre généralement en pied de falaise ou dans le front de taille d'une ancienne carrière à ciel ouvert |

| | |
|---------------------------|--|
| Évent | Forage permettant l'évacuation de l'air contenu dans une cavité lors de son comblement |
| Forage | Moyen de reconnaissance directe du sous-sol par la réalisation d'un trou de faible diamètre plus ou moins profond |
| Foncer (fonçage) | Action de percer, creuser une excavation |
| Fontis | Excavation en surface formée par l'effondrement brutal et inopiné des terrains consécutivement à l'arrivée au jour d'une cloche de fontis |
| Front de masse, de taille | Limite de la masse exploitée constituée par de la roche crue |
| Galerie | Vides de carrière ou espaces de circulation privilégiés souterrains |
| Hague | Mur en pierres sèches retenant les bourrages |
| Indice | Élément visuel ou non, susceptible de témoigner de la présence d'une cavité souterraine à proximité |
| Injection | Comblement de cavités mis en œuvre depuis la surface et pratiqué avec des produits faisant prise (cendres/ciment, sable/ciment, etc.) |
| Karst, karstique | Zone affectée de dissolution naturelle provoquant un vide parfois rempli par la suite de matériaux issus de la surface |
| Marne | Terme du vocable normand désignant une craie tendre et gélive destinée à l'amendement des sols. Terme sans rapport avec le terme géologique. <i>En géologie : la marne est une roche sédimentaire constituée d'environ 35 % de calcaire pour 65 % d'argile. Elle forme la transition entre les calcaires argileux et les argiles calcaireuses</i> |
| Marnière | Exploitation souterraine de craie en Normandie |
| Œil | Orifice d'un puits en surface (« tête de puits ») en Normandie |
| Œillard | Espace souterrain limité circonscrivant la base du puits d'une marnière |
| Puisard ou puits perdu | Puits destiné à collecter les eaux de ruissellement et à les évacuer dans le sous-sol |
| Puits d'aéragé | Puits de petit diamètre (inférieur au mètre) creusé entre le ciel de la carrière et la surface pour assurer la ventilation du cavage |
| Puits d'eau | Puits, généralement maçonné, qui permet de tirer de l'eau à une certaine profondeur |
| Recouvrement | Désigne les terrains présents au-dessus d'une carrière. |
| Remblai | Ensemble de matériaux rapportés (terre ou autres) destinés à combler une dépression, un effondrement ou une excavation de terrain |
| Risque | Résultat de la confrontation d'un ou plusieurs aléas avec des enjeux |
| Sondage à la pelle | Opération de décapage localisée à l'aplomb d'un indice |
| Taux de défruitement | Rapport, pris dans un plan horizontal, de la superficie exploitée à la superficie totale |
| Toit | Limite supérieure d'un gisement exploitable |
| Tombe | Espace délimité par un mur en maçonnerie érigé à la base du puits d'accès à une marnière et fermant l'accès aux chambres. Ce mur était destiné à bloquer les matériaux de remblai mis en place pour combler le puits lors de l'abandon de la marnière |
| Vide résiduel | Espace libre présent entre le ciel de la carrière et le sommet des remblais |

ANNEXE II

L'application des méthodes géophysiques actuelles et en développement à la détection des marnières

La géophysique est une science ayant pour but d'appliquer les méthodes de la physique à la connaissance de la Terre. Les études géophysiques sont réalisées à partir de la détection de signaux de nature électrique, magnétique, gravimétrique ou sismique. Les méthodes géophysiques sont dites indirectes car elles permettent la reconnaissance de caractéristiques physiques sans contact direct avec les objets géologiques qui les possèdent.

Avant toute mesure géophysique, une analyse du contexte d'étude est nécessaire, ceci afin d'évaluer les performances attendues et d'optimiser la phase des mesures sur le terrain (choix de l'appareil, espacement des mesures, etc.). Il est nécessaire, en effet, de posséder certaines données de base, comme une coupe géologique simplifiée du site, la connaissance de la présence d'une nappe et de sa profondeur, le contexte environnemental du site (zone urbaine ou rurale, topographie, présence de lignes électriques, de canalisations, etc.) et, dans le cadre de la recherche de cavités souterraines, une estimation de leur taille et de leur profondeur. Cette analyse permet d'évaluer sommairement la capacité des différentes méthodes vis-à-vis du problème posé, et de ne retenir que celle(s) susceptible(s) de donner des résultats.

Les méthodes géophysiques ont comme limitation de ne donner qu'une mesure indirecte sous la forme d'anomalies qu'il convient d'interpréter puis de vérifier par sondages sachant qu'il existe toujours plusieurs solutions permettant d'expliquer chaque résultat obtenu.

Actuellement, compte tenu du contexte géologique (épaisseur des formations de surface, irrégularité du toit de la craie), il n'existe pas de méthodes géophysiques fiables et efficaces permettant de détecter les marnières de Haute-Normandie.

❖ 1. LES MÉTHODES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

1.1. Les méthodes invalidées ou non testées

La présence de la couche d'argile à silex limite la profondeur d'investigation de la méthode du radar géologique à environ 1 m, profondeur trop insuffisante pour la recherche de cavités souterraines. Il en est de même pour la méthode de radio magnétotellurie (RMT).

La méthode VLF a été testée sur deux marnières de géométrie connue et n'a pas été validée, les anomalies fournies n'ayant pas ou peu de rapport avec la cavité sous-jacente.

Il faut souligner que les méthodes électromagnétiques sont très sensibles aux infrastructures industrielles et agricoles environnantes. Cette méthode ne peut donc non plus être utilisée en milieu urbanisé et peu urbanisé.

La méthode de résonance magnétique protonique pourrait peut-être s'appliquer à la recherche de cavités ennoyées, mais aucun test n'a été réalisé jusqu'à présent.

1.2. Une méthode en cours de test : la thermographie infrarouge

1.2.1. Le principe

Cette méthode repose sur le principe de l'inertie thermique du conduit d'entrée (le puits) de la carrière souterraine. Ce conduit étant à une température constante d'environ 11°C, on espère détecter deux sortes d'anomalies thermiques :

- *Dans le cas d'un puits partiellement comblé (2 à 3 m en surface) avec des matériaux poreux* : une anomalie froide l'été dans l'après-midi et chaude l'hiver en fin de nuit, signalant un transfert de chaleur du puits vers la surface ;
- *Dans le cas d'un puits comblé sur une hauteur plus importante* : une anomalie chaude l'été dans l'après-midi, froide l'hiver au levé du jour, indiquant une anomalie thermique du remblai à plus faible inertie par rapport à l'encaissant.

Les températures apparentes émises par la surface du sol (longueurs d'onde comprises entre 8 et 15 µm) vont être enregistrées par le biais d'un capteur (scanner) embarqué sur un vecteur (avion). Ce capteur mesure le rayonnement thermique ascendant émis par un objet dont on peut ensuite déduire et calculer la température réelle. Les hétérogénéités du sol et du sous-sol vont ainsi se traduire par des flux de chaleur variables.

Afin de profiter des forts contrastes de température entre le puits et le sol, les images sont enregistrées lors de périodes climatiques extrêmes (canicule en été, grand froid en hiver) et soit en fin de jour, soit en fin de nuit.

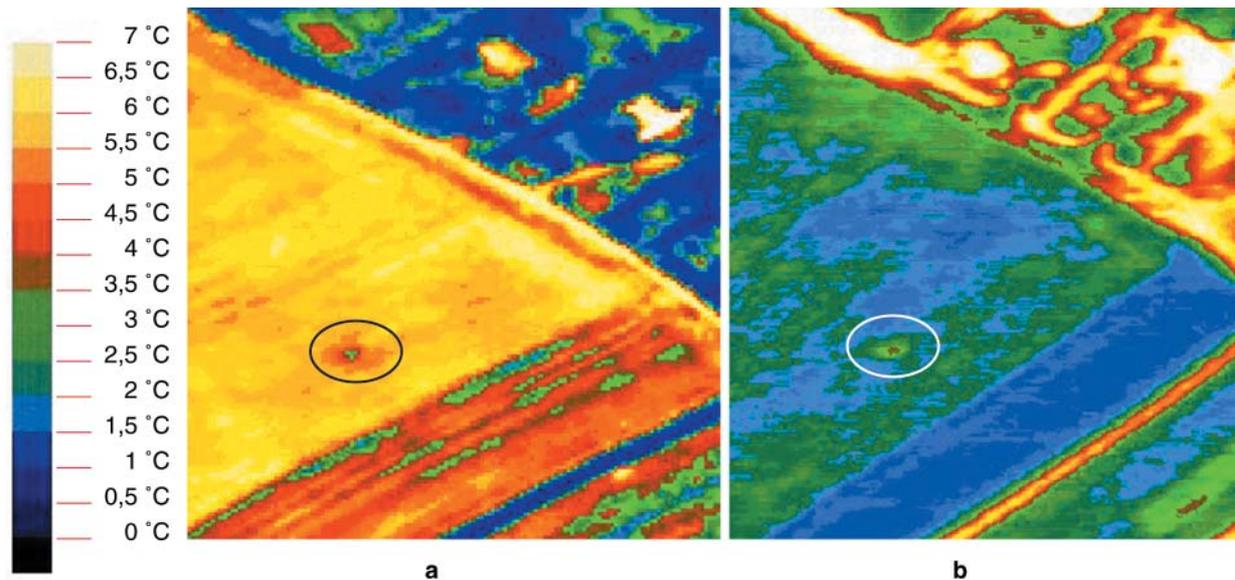
1.2.2. La phase de test

En Haute-Normandie, une expérimentation, décrite dans [Pothérat, 2001], [Bénot et al, 2003] et [Bénot, 2004] a été menée dans une zone test située dans l'Eure, dans la région d'Épreville-en-Roumois, sur une superficie d'environ 100 kilomètres carrés. Le test a été réalisé tout d'abord sur une superficie d'environ 10 kilomètres carrés, sur le territoire communal d'Épreville-en-Roumois, commune ayant fait l'objet au préalable d'un recensement d'indices de cavités souterraines par le LRPC de Rouen (cf. méthodologie Chapitre 4²¹). À l'issue des prises d'images et après traitements, des résultats encourageants ont été obtenus : parmi les indices répertoriés par le recensement, tous les puits de marnières visibles ont été généralement retrouvés grâce à leur localisation dans un buisson ou un bosquet, à l'origine d'une anomalie thermique froide. De même, la plupart des puits invisibles a été retrouvée et une signature thermique a été obtenue pour les indices d'effondrement ou d'affaissement. Enfin, des indices non répertoriés par le recensement (six au total) ont été repérés. Un exemple d'anomalie thermique correspondant à un indice de cavité souterraine est représenté sur les figures 86a et b. Ces résultats encourageants ont conduit à réaliser une expérimentation sur une zone plus élargie (100 kilomètres carrés), sans qu'il y ait eu repérage d'indices au préalable. Environ un millier d'anomalies a été ainsi repéré sur l'ensemble de la zone.

Cette expérimentation a permis de mieux cerner les limites de la méthode ainsi que les conditions optimales de sa mise en œuvre. Ainsi, les meilleurs résultats sont obtenus avec les conditions suivantes :

- *Survol réalisé en été en fin de journée* et dans une moindre mesure, survol en hiver en fin de nuit. Pour une interprétation optimale, des données issues de vols été et hiver sont nécessaires ;
- *Hauteurs de vol comprises entre 350 et 600 mètres* ;
- *État de surface optimal*, donnant les plus forts contrastes de températures avec les anomalies recherchées : par exemple, un champ de maïs à son développement maximal masque les anomalies à certaines heures, les terres fraîchement labourées et ensemencées favorisent le repérage d'anomalies, etc.

²¹ Ce recensement avait permis de répertorier 32 indices de diverses sortes : puits de marnière visibles sur le terrain, puits non visibles, bétoires, effondrements, affaissements, dépressions de terrain, etc.



■ Figure 86a et b - Anomalie 109 repérée en thermographie infrarouge invisible sur le terrain.

a - vol de l'été 2000 à 1800 pieds d'altitude : anomalie plus froide que l'encaissant ;

b - vol d'hiver 2001 à 1800 pieds d'altitude : anomalie plus chaude que l'encaissant.

Les teintes les plus claires de l'image indiquent les zones à luminescences les plus élevées, c'est-à-dire les zones pour lesquelles la quantité d'énergie émise par unité de surface est la plus importante.

En outre, les éléments suivants sont susceptibles de limiter la mise en œuvre de cette méthode :

- *Occultation des indices dans un environnement froid (forêts, bosquets, etc.) ;*
- *Détection difficile en été des indices situés dans les prairies (la température de l'herbe et celle du puits sont très proches) ;*
- *Pas d'anomalie thermique sur les puits comblés sur une hauteur importante ;*
- *Anomalie thermique en liaison avec la présence d'eau ;*
- *Impossibilité de détecter des indices dans les zones urbanisées et les bois.*

Les vérifications terrain de ces anomalies, par sondages à la pelle mécanique à leur aplomb, ont permis dans un premier temps (courant année 2002) de confirmer un indice sur quatre [Bénot et al, 2003], soit 25 %. Mais, en raison de la distorsion des images infrarouge, deux anomalies n'avaient pu être localisées précisément.

Une deuxième campagne de vérifications terrain, dont rend compte [Bénot, 2004], a eu lieu courant 2003, après que vingt anomalies retenues aient fait l'objet d'un redressement des images infrarouge. Ces anomalies ont été ensuite implantées par GPS sur le terrain, bien que des problèmes de précision subsistent, en liaison d'une part avec le redressement des images²² et, d'autre part, avec le fait que les fonds de plans sont issus de plans parcellaires scannés et non géo-référencés. De ce fait, lorsqu'aucun indice n'était visible sur le terrain, des surfaces plus ou moins grandes (de 100 à 225 mètres carré) ont été décapées, avant le cas échéant de réaliser un sondage à la pelle mécanique sur l'indice découvert. Sur les dix-huit anomalies contrôlées, cinq ont été confirmées par les investigations, soit presque 30 %. Un puits remblayé de marnière a été mis en évidence sur deux de ces anomalies, les trois autres sont à mettre en relation avec des effondrements de marnières.

Cette méthode semble donc intéressante pour compléter les recensements d'indices dans les zones non urbanisées, en particulier pour la détection de puits invisibles et la mise en évidence de certains effondrements de marnières caractérisés par leur signature thermique particulière ; toutefois, les limites de cette méthode font qu'une vérification de terrain sera toujours nécessaire pour éliminer les artéfacts et localiser les anomalies intéressantes. En outre, la méthode de localisation des anomalies doit être affinée afin de ne pas les rater lors du contrôle terrain et de ne pas les rechercher sur de trop grandes surfaces. Enfin, un travail complémentaire sur le signal devrait permettre d'éliminer une partie des leurres.

²² Suite au traitement d'image, le point indiquant l'anomalie est transformé en tâche sur le plan, ce qui, compte tenu de l'échelle du plan, représente une surface de plusieurs dizaines de mètres carrés voire plusieurs centaines de mètres carrés sur le terrain.

❖ 2. LES MÉTHODES ÉLECTRIQUES

Le contexte géologique de Haute-Normandie (surface irrégulière du toit de la craie, épaisse couche d'argile) ainsi que la spécificité des marnières (cavités profondes et de faible volume) font qu'aucune méthode électrique n'a été validée jusqu'à présent, faute de résultats probants.

❖ 3. LES MÉTHODES SISMIQUES

La méthode de sismique réflexion haute-résolution, testée sur une marnière, aboutit à la manifestation de la cavité par la désorganisation de certains horizons sismiques à son aplomb (ces mêmes horizons restent parfaitement continus sur les profils réalisés à l'extérieur de l'emprise de la marnière). Toutefois, aucune réflexion particulière n'est mise en évidence au niveau du ciel de la cavité. Celle-ci est donc détectée de façon indirecte par cette méthode mais sans aucune précision sur la profondeur et la géométrie de la cavité.

Le contexte géologique régional et les caractères inhérents aux marnières font que la méthode de sismique réfraction est, dans l'état actuel des connaissances, inefficace dans la détection des marnières.

❖ 4. LA MICROGRAVIMÉTRIE

La microgravimétrie consiste à mesurer en chaque point d'un maillage préétabli le champ de pesanteur à la surface du sol. Après différentes corrections (altitude et latitude), les variations observées sont traduites en termes géologiques (structures ou variations latérales de densité dans le sous-sol). On met ainsi en évidence des zones d'anomalies positives traduisant un « excès de masse » et des zones d'anomalies négatives traduisant un « défaut de masse ». À partir d'hypothèses sur les contrastes de densité entre les terrains, volume et profondeur maximale des cavités pourront être estimés, ces résultats permettant d'implanter des sondages mécaniques destinés à vérifier la présence de vides.

La principale limite de cette méthode est qu'une anomalie est considérée comme significative à condition qu'elle dépasse 20 μgal : si l'amplitude de l'anomalie prévisible est inférieure à 20 μgal , il faut renoncer à la microgravimétrie pour la détection des cavités. La profondeur de détection de la cavité va donc varier en fonction de la forme, de la taille de la cavité et de la masse volumique du terrain encaissant. À noter que si la cavité est noyée ou remblayée par un matériau peu dense, l'anomalie peut ne plus être significative et la capacité de détection est diminuée.

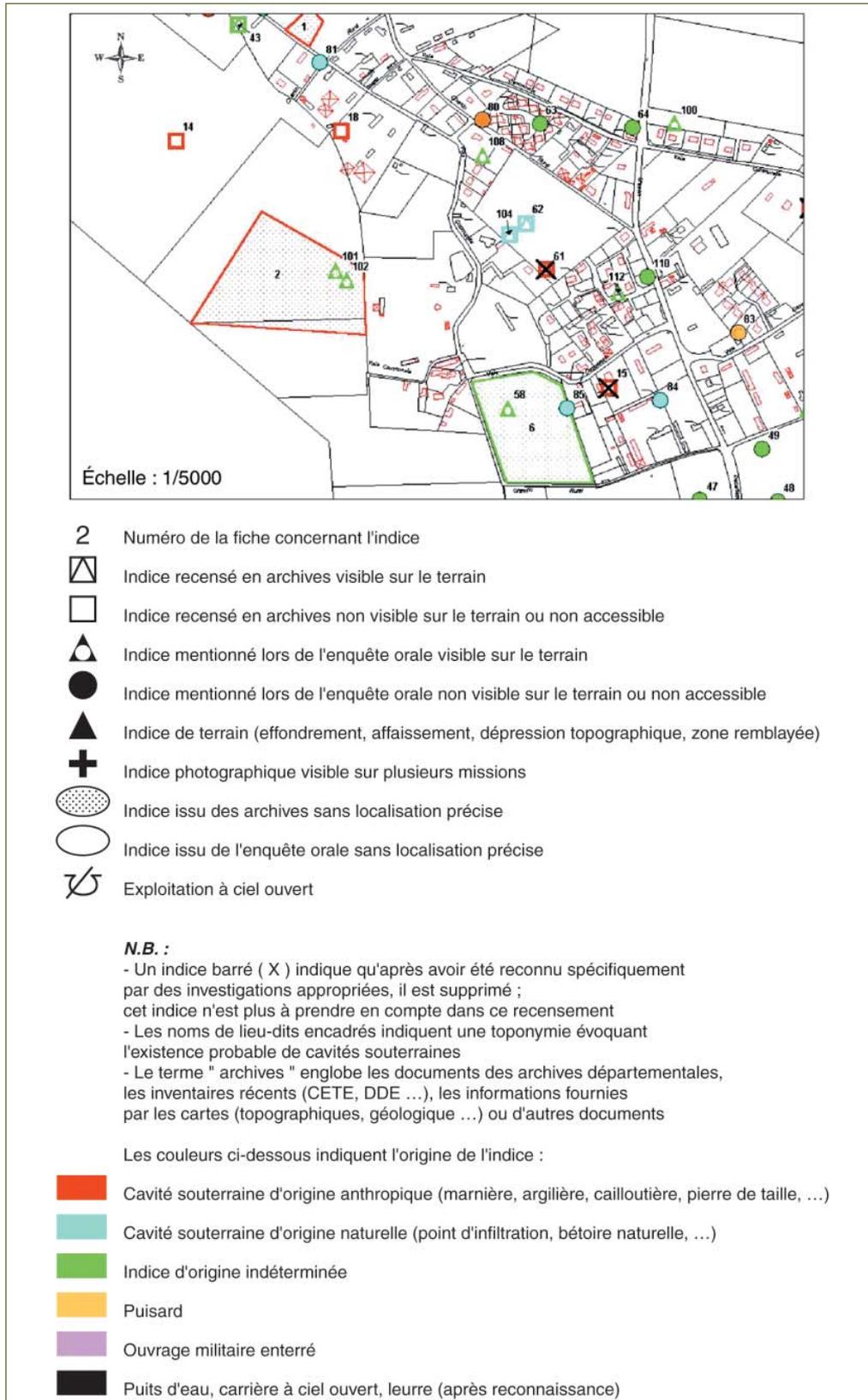
Ainsi, pour une marnière de 20 mètres par 20 mètres de superficie, d'une hauteur de 3 mètres et située à une profondeur de 10 mètres, on obtient une anomalie tout à fait détectable d'environ 40 μgal . La même marnière située à 20 mètres de profondeur générera une anomalie de 25 μgal ; l'anomalie est encore détectable mais se rapproche des limites de la méthode compte tenu des perturbations de mesures liées aux hétérogénéités locales des terrains superficiels. Enfin, à 40 mètres de profondeur, l'anomalie produite n'est plus que de quelques μgal , elle est indétectable avec les instruments actuellement disponibles.

En outre, la variabilité des caractéristiques intrinsèques des marnières (extension, hauteur des vides, profondeur) et surtout la forte hétérogénéité des matériaux la recouvrant, diminue très largement ces capacités théoriques de détection. En effet, les irrégularités des limites des couches géologiques de surface (en particulier argile - craie) perturbent les mesures et peuvent rendre l'information provenant de la cavité difficilement discernable.

Cette méthode a été testée sur une marnière connue (Fig. 87). Les résultats montrent une zone d'anomalie significative (environ -35 μgal) sur la partie nord ouest de la marnière, là où les chambres sont les plus grandes et les plus proches de la surface. Par contre, un excès de masse donnant une anomalie positive est relevée sur la partie sud est de la marnière ; son origine possible est une couche d'empierrement d'une ancienne cour de ferme, la marnière n'étant à cet endroit aucunement mise en évidence. Enfin, des zones d'anomalie négative non liées à des vides mais plus certainement à des surépaisseurs d'argile à silex dans des poches de dissolution ou à des poches de sable, ont été

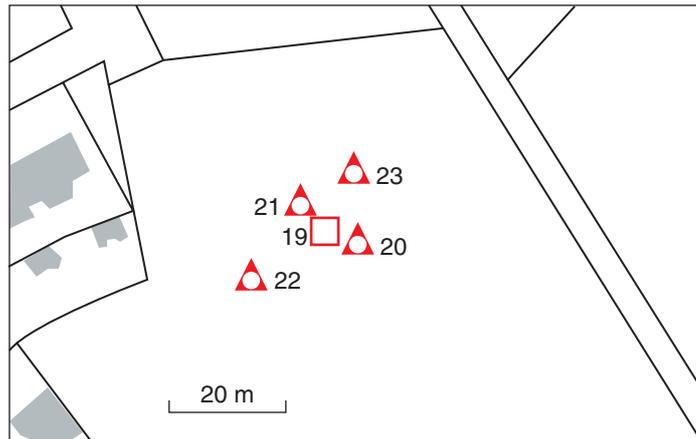
ANNEXE III

Extrait d'un plan d'indices de cavités souterraines (PICS) et sa légende



ANNEXE IV

Fiche d'indice de cavité souterraine associée à la marnière n° 27XXX-019



■ Extrait du plan d'indices de cavités souterraines localisant l'indice n° 27XXX-019.



CAVITES SOUTERRAINES

INDICE N° 270XX-019

| LOCALISATION | |
|--|---|
| Département | 27 - Eure |
| Commune | XXXXXXXXXXXXXXXX |
| Repères locaux Hameau/Lieu-dit : Le Moulin à vent Autre (route, chemin...) : Parcelle(s) cadastrale(s) : | |
| Coordonnées en LAMBERT 1 nord Origine Report plan x : XXXXXX, X y : XXXXXX, X précision : +/- 5m Type de Report point | |
| SOURCE | |
| Indices d'archives Départementales Communales Autres : Inventaire départemental des Cavités souterraines de 1995 06/11/1995 Cartes (géologique, ...) : Etudes (CETE, ...) : affaire CETE XXXXXX 23/11/1987 | |
| Enquête orale connue de la majorité des personnes présentes | |
| Indice photo [] | |
| Indice de terrain <input type="radio"/> effondrement <input type="radio"/> affaissement-dépression <input checked="" type="radio"/> zone remblayée <input type="radio"/> puits <input type="radio"/> entrée à flanc de coteaux <input type="radio"/> arbre isolé <input type="radio"/> autre | |
| Géométrie <input checked="" type="radio"/> circulaire diamètre : 3m00 <input type="radio"/> quelconque longueur min : longueur max : profondeur maxi : type d'effondrement : <input type="radio"/> cylindrique <input type="radio"/> conique <input type="radio"/> en entonnoir | |
| Observations [] | |
| CONTEXTE MORPHOLOGIQUE <input checked="" type="radio"/> plateau <input type="radio"/> talweg <input type="radio"/> flanc de coteau | HYDROGEOLOGIE profondeur de la nappe : 43m d'après Atlas Hydrogéologique |
| ORIGINE PROBABLE DE L'INDICE | |
| Type Probable Indice <input type="radio"/> Carnière à ciel Ouvert <input checked="" type="radio"/> Carnière Souterraine <input type="radio"/> Indéterminée <input type="radio"/> Karstique <input type="radio"/> puisard | Matière Probablement Extraite <input type="radio"/> Cailloux <input type="radio"/> Pierres de taille <input checked="" type="radio"/> Mame <input type="radio"/> Argile <input type="radio"/> Sable <input type="radio"/> Autre |
| Commentaires [] | |
| Investigation à envisager : | Remplissage |

Traitement de l'indice \ observations

Enquête orale : zone concernée par des marnières, plusieurs zones affaissées de 3m de diamètre environ, actuellement remblayées. Entre la première d'un puisatier en 1985 et le deuxième levé effectué par le CETE en 1987, deux galeries se sont effondrées. D'autre part, les extrémités de la galerie orientée W-NE étant obstruées par des éboulis, il est probable que la marnière se prolonge dans ces directions.

Une campagne de microgravimétrie et de sondages tricônes a été réalisée par le CETE. Trois anomalies ont été détectées par microgravimétrie : la première correspond à la marnière, la seconde à une poche de limons et la troisième à un pointement du toit de la craie.

Les indices n°20, 21, 22 et 23 sont des effondrements remblayés qui correspondent vraisemblablement à des effondrements de galeries de cette marnière.

La localisation de cette fiche correspond au puits d'accès ouvert par le puisatier en 1985.

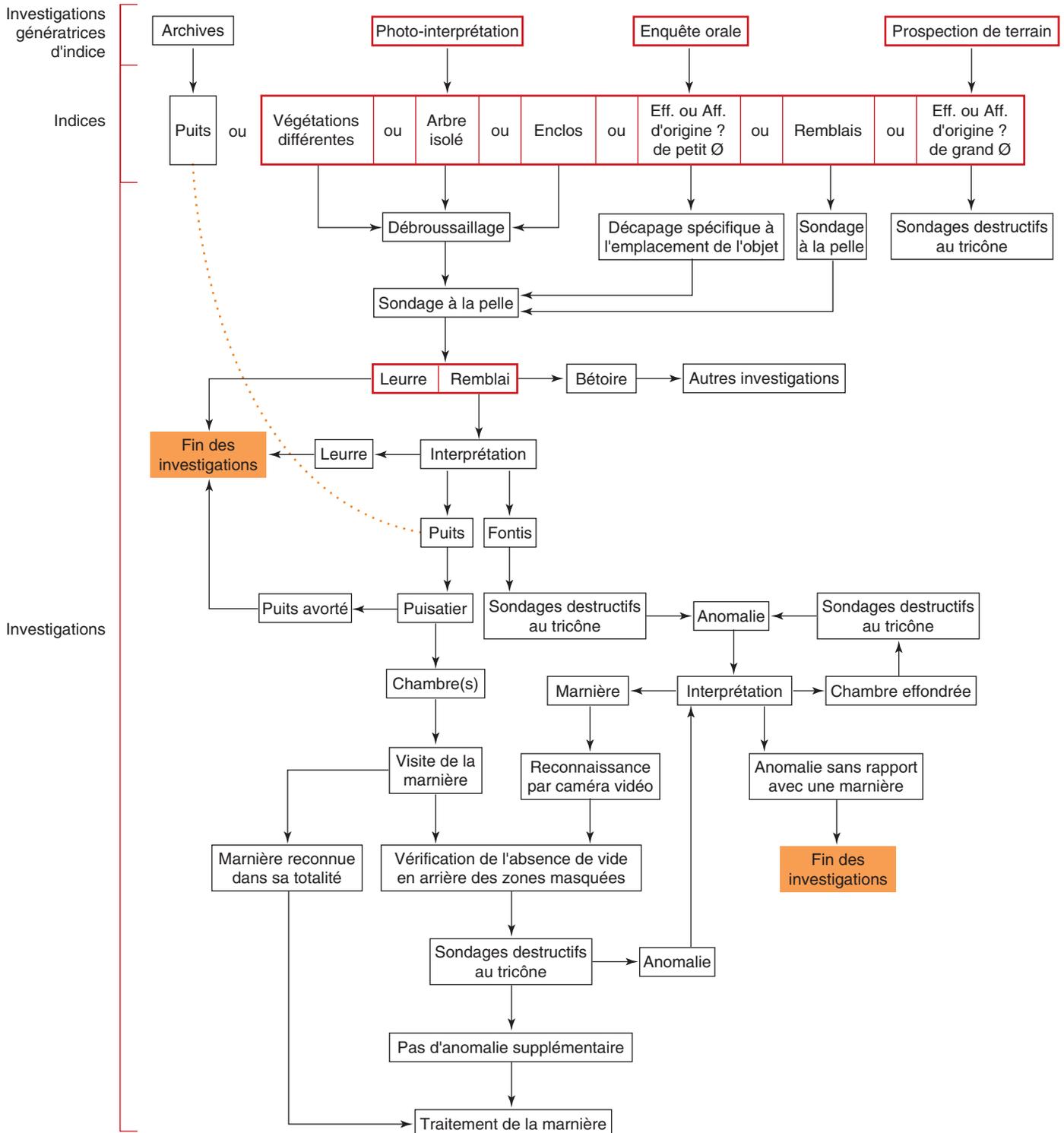
RENSEIGNEMENTS FOURNIS PAR LES ARCHIVES

INDICE N° 27~~XXX~~019

| | | |
|--|--|------------------------|
| Cadastre Napoléonien | Lieu-dit : | |
| | Autre (route,...) : | |
| | Parcelle(s) : | |
| Propriétaire Locataire ou fermier Exploitant de la carrière | | |
| Exploitation | Puits : profondeur: 15m00 diamètre: | |
| | Nombre d'étages : profondeur(s) : | |
| | Chambres : galeries hauteur : min : 2m00 max : 4m00 largeur min : 2m50 max : 4m00 | |
| | Extension minimale | Volume global estimé : |
| | Etat : marnière éboulée en grande partie | |
| | Divers : | |
| Décisions prises | | |

ANNEXE VI

Organigramme synthétisant l'ensemble des investigations complémentaires à réaliser sur un indice de carrière souterraine visible sur le terrain



Bibliographie

- ADAM C., *Le risque cavités souterraines en Haute-Normandie*, mémoire de DESS, Mont-Saint-Aignan, Faculté de Rouen, 2001.
- ADAM C., *Proposition de règlement – Plan de Prévention des Risques Cavités Souterraines, Région Haute-Normandie* ; Paris, MEDD / DPPR / SDPRM, 2003.
- BERENGER N., *Méthode de recherche et de localisation des cavités souterraines de Haute-Normandie : une réponse adaptée à une problématique spécifique*, mémoire d'ingénieur, Paris, CNAM, 2004.
- BÉNOT R., POTHÉRAT P., *La détection de puits de marnières en Normandie par radiométrie infrarouge thermique*, convention DPPR/LCPC, contribution LCPC/LRPC Rouen, Paris, LCPC, 2003.
- BÉNOT R., *Localisation de puits de marnières par thermographie infra-rouge*, Convention LCPC/DPPR, Rouen, LRPC de Rouen, 2004.
- COLBEAU-JUSTIN L., MARCHAND D., *Analyse psychosociologique de la gestion du risque marnière en Seine Maritime et dans l'Eure : de sa perception à l'adoption de mesures préventives*. Rapport de recherche Laboratoire de Psychologie Environnementale Université Paris V, 37 pages, 2002.
- Conseil Général de Seine Maritime, *Gestion et prévention des risques liés à la présence de cavités souterraines – Guide à l'usage des Maires* (deuxième édition : février 2007).
- DUBUC A., *Marnières et carrières en Seine Inférieure*, Actes du 98e Congrès national des sociétés savantes, Tome I, Saint-Etienne, pp. 261-270, 1973.
- DUJARDIN L., *Les carrières souterraines de Caen et du département du Calvados (Basse-Normandie)*, Actes du 2e symposium international sur les carrières souterraines, Meudon, 1991.
- DUJARDIN L., *Les marnières en Normandie (XIIIe - XXe siècle)*, Le monde rural en Normandie, Annales de Normandie, série des congrès des sociétés historiques et archéologiques de Normandie, vol. 3, Caen, Musée de Normandie, 1998.
- EVARD H., *Risques liés aux carrières souterraines abandonnées de Normandie*, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 150/151, pp. 96-108, 1987.
- GAUMET* N., *La photo-interprétation appliquée à la recherche d'indices de cavités souterraines de Haute-Normandie* ; Rouen, CETE Normandie-Centre, 2001.
- LEROY A. & SIGNORET J.-P., *Le risque technologique*, collection « Que Sais-je ? » Presse Universitaires de France, 128 p., 1992.
- MANIER E., *Les plans d'indices de cavités souterraines en Haute-Normandie. Un outil de prévention adapté à un aléa diffus et à la perception du risque*, Rouen, LRPC de Rouen, 2003.

* Nathalie GAUMET, épouse BÉRENGER.

Ouvrages collectifs

- Caractérisation et cartographie de l'aléa dû aux mouvements de terrain*. Guide technique, Collection Environnement : Risques Naturels, LCPC, 91 pages, 2000.
- Évaluation des aléas liés aux cavités souterraines*. Guide technique, Collection Environnement : Risques naturels, LCPC, 130 pages, 2002.
- Évaluation et gestion des risques liés aux carrières souterraines abandonnées*. Séminaire de restitution et de valorisation des travaux INERIS – Réseau des LPC. Actes des journées scientifiques du LCPC / ENPC, Paris, 11 mai 2005.
- Guide PPR Cavités Souterraines (à paraître).
- Plans de Prévention des Risques Naturels (PPR)*, Guide général, la Documentation Française, Paris, 76 pages, 1997.
- Plans de Prévention des Risques Naturels (PPRN), Risques de mouvements de terrain, Guide méthodologique*, La Documentation Française, Paris, 71 pages, 1999.

| | |
|-----------------------------|------------------------------------|
| Document publié par le LCPC | sous le numéro C1502518 |
| Conception et réalisation | LCPC-DISTC, Marie-Christine Pautré |
| Dessins | LCPC-DISTC, Philippe Caquelard |
| Photographies | LRPC de Rouen |
| Impression | Jouve N° |
| Dépôt légal | 3e trimestre 2008 |



La région Haute-Normandie est confrontée à l'existence de très nombreuses cavités souterraines anthropiques sur son territoire. En effet, durant plusieurs siècles ont été creusées en profondeur à partir de puits d'accès, des carrières de craie, appelées « marnières », et destinées à l'amendement des terrains agricoles. Très nombreuses (on peut estimer leur nombre à environ 140 000 pour la région Haute-Normandie), ces marnières s'effondrent progressivement et sont à l'origine de nombreux désordres en surface depuis de simples affaissements jusqu'à la ruine de routes ou d'habitations.

Après avoir présenté en détail l'origine et les désordres dont elles peuvent être à l'origine, ce guide présente une méthodologie de recherche et de traitement de ces cavités. Il détaille les différentes méthodes pour rechercher et qualifier des « Indices de Cavités Souterraines » : recherche en archive, exploitation de photos aériennes... Il définit, les méthodes d'investigations possibles sur ces indices : décapage de la terre végétale, sondages... Il décrit les méthodes de traitement envisageables, une fois la cavité reconnue : confortement, comblement...

En outre, ce guide présente, dans le contexte législatif et réglementaire actuel, les conditions de réalisation de Plans d'Indices de Cavités Souterraines (PICS), véritables documents de référence pour la connaissance de l'aléa, sur lesquels peut s'appuyer une politique de prévention locale ou régionale.

The High-Normandy area, north-west of France, is confronted with the presence of many anthropogenic underground cavities on its territory. In fact, in-depth careers of chalk, started from wells and intended to fertilize the agricultural land, were dug during several centuries. These numerous cavities, called « marnieres » (estimated to approximately 140 000 for the High-Normandy area), are gradually collapsing leading to surface damages going from small settlements up to complete roads and houses destruction.

After a detailed explanation of « marnieres » origin and of damages they can cause, this guide presents a methodology for their location investigation and their treatment. It offers a precise listing of tools and technical means employed to find and qualify the « Underground Cavities Signs »: searching in Historical Archives, aerial photographs examining...The guide describes also the different methods and tools to investigate the detected signs: scouring of vegetable ground, drilling techniques, ...It describes possible cavities treatment methods: reinforcing and filling...

Moreover, this guide presents, under the current legislative and regulatory context, the realization conditions of the « Underground Cavities Signs Plans » (we call it PICS). These are efficient tools for hazard evaluation and can constitute the basis of a local or regional risk prevention policy.