

La prévention du risque d'effondrement

Les cavités souterraines

DOSSIER DE PRESSE

SOMMAIRE

- Les cavités souterraines et la prévention du risque d'effondrement. Le cadre législatif et ses implications
- Les inventaires départementaux et les bases nationales de données
- Les sapes de guerre du plateau picard
- Les marnières de Normandie
- Les cavités souterraines en milieu urbain de la région Centre et du Loiret
- Les cavités souterraines d'origine minière
- Les méthodes géophysiques de détection et de surveillance des cavités souterraines
- Pour en savoir plus sur les cavités souterraines et les effondrements

Philippe Vesseron, Président du BRGM
Jean-Louis Nédellec, Responsable de l'Unité « Risques et Gestions de Crise »
Hubert Fabriol, Responsable de l'Unité « Mesures, Reconnaissances, Surveillance »
Michel Messin, Responsable de l'Unité « Après-Mine »

Les cavités souterraines et la prévention du risque d'effondrement

Le cadre législatif et ses implications

Les cavités souterraines sont de trois types : les cavités naturelles (elles sont situées dans des formations géologiques sensibles à l'action de l'eau et se forment par dissolution), les cavités artificielles (liées aux différents travaux de l'homme) et les cavités d'origine minière qui représentent une catégorie « à part », au titre de la législation et de la réglementation.

Les cavités souterraines (plus de 500 000 sur tout le territoire, mais aucun recensement n'existe) constituent un des risques majeurs sur le territoire français à la fois en raison de sa géologie, de son histoire et de son développement industriel très important et cela depuis le XIXème siècle. Le BRGM travaille à mettre en place les outils nécessaires à la prévention du risque d'effondrement (inventaires, banques de données, cartographie de l'aléa, recherches de cavités). Son action s'inscrit, entre autres, dans le cadre du droit commun du sol et dans celui de la « Loi Bachelot » du 30 juillet 2003 chargée de renforcer la politique de prévention en redéfinissant les rôles et les responsabilités des propriétaires des terrains et des municipalités concernés par le risque d'effondrement.

Le droit commun du sol

Il est fixé par l'article 552 du code civil qui précise que **la propriété du sol « emporte celle du dessus et du dessous »**.

Le propriétaire d'un terrain possède donc également les cavités souterraines comprises dans le périmètre de sa propriété.

En vertu, de l'article 1384 du code civil qui stipule que l'on est responsable des choses dont on a la garde, ce propriétaire est donc responsable des dommages induits par ces cavités souterraines. Cela signifie qu'il doit indemniser tout sinistre directement lié à l'existence de cavités sur sa propriété et qu'il a la charge de prévoir tout risque d'effondrement au droit de sa parcelle (comblement des vides par exemple), ce qui, dans la quasi-totalité des cas, pose d'énormes problèmes financiers.

On soulignera que cette disposition ne s'applique pas dans le cas des cavités minières (extraction de substances concessibles). En effet, selon la situation administrative de la concession où se trouvent les cavités, la responsabilité des dommages appartient à l'exploitant, à l'Etat ou au Maire. Dans le cas de mines orphelines (concessionnaire disparu ou non solvable), c'est l'Etat qui est chargé de la mise en sécurité des sites à risques. D'une manière générale, c'est le code minier (révisé en mars 1999) qui s'applique jusqu'à renonciation du titre de la concession.

La « Loi Bachelot » du 30 juillet 2003

Cette loi n° 2003-699, dans son article 43, complète la démarche de prévention des risques qui était déjà en vigueur. A ce titre, elle comporte les orientations suivantes :

- les citoyens doivent communiquer aux maires toutes les informations relatives à l'existence de cavités sur la commune
- les maires doivent élaborer des cartes délimitant les sites contenant des cavités souterraines susceptibles de s'effondrer
- les maires des communes soumises à PPR (Plans de Prévention des Risques) doivent informer leurs administrés, tous les deux ans, de la politique de prévention des risques
- le futur occupant d'un bien exposé aux risques selon un PPR ou ayant été endommagé par des risques naturels doit en être informé lors de sa vente ou de sa location
- le fonds Barnier peut, sous conditions, servir aux reconnaissances et au traitement de cavités à risques pour éviter l'expropriation de biens.

La démarche classique de prévention des risques

Elle se décline en 6 phases :

- phase législative conduisant à la définition d'outils à portée réglementaire
- inventaires nationaux et départementaux conduisant à l'alimentation de bases de données
- identification des bassins de risque afin de localiser les communes potentiellement les plus exposées
- évaluation de l'aléa dans les bassins de risque pour hiérarchiser les communes exposées
- définition de mesures de prévention communale adaptées au contexte et conduisant à la préconisation de PPR (Plans de Prévention des Risques), de DICRIM (Documents d'Information Communale sur les Risques Majeurs) ou de DCS (Documents Communaux Synthétiques)
- étude plus fine d'aléa à l'échelle cadastrale pour élaboration d'un zonage réglementaire en cas de PPR

Les inventaires en cours et la base de données cavités (www.bdcavite.net) élaborés par le BRGM constituent donc des outils majeurs pour la mise en application de la « Loi Bachelot ». Cependant, les données issues des inventaires ne pouvant être exhaustives, la base nationale sera alimentée par des données complémentaires transmises notamment par les mairies.

La prévention locale du risque dans les zones particulièrement exposées

Dans le cas où la position des cavités est parfaitement connue

- cartographie de l'aléa débouchant vers une gestion de l'urbanisme via un PPR annexé au Plan d'Occupation des Sols (POS/PLU)
- les terrains peuvent devenir inconstructibles au droit des cavités
- s'il est projeté de construire sur des terrains contenant des cavités à risques, il convient de mettre en œuvre des parades passives (fondation monolithique sur radier, ou sur pieux ou sur puits) ou des parades actives (maîtrises des eaux pluviales et usées, comblement des cavités, foudroyage des cavités, remblaiements)
- en cas de constructions existantes au droit de cavités à risques : parades passives (renforcement du monolithisme par chaînage, reprise en sous-œuvre sur micro-pieux, voire sur puits) ou parades actives (comblement).

Dans le cas où la position des cavités est mal connue

- cartographie des zones de susceptibilité de présence de cavités instables, si possible en mettant en œuvre des moyens de reconnaissance afin d'améliorer la fiabilité de l'analyse
- cartographie de l'aléa débouchant sur une gestion de l'urbanisme via un PPR annexé au POS (Plan d'Occupation des Sols)
- déclaration d'inconstructibilité des terrains au droit des zones à forte susceptibilité
- en cas de projet de constructions neuves sur terrain exposé: recherche de cavité imposée et mise en œuvre de parades passives ou actives, si la présence de cavités est avérée.

Dans le cas d'un effondrement dans une zone où la position des cavités est mal connue

- investigations obligatoires dans la zone sinistrée par excavation, sondages destructifs, puits de visite et éventuellement reconnaissance géophysique
- en l'absence de constructions : délimitation de périmètres de sécurité inconstructibles
- comblement de la cavité, si nécessaire
- en présence de constructions existantes, mise en œuvre de parades adaptées à la nature et à la géométrie de la cavité reconnue, ainsi qu'au type des constructions à protéger
- initiation d'une démarche de gestion préventive sur la commune : élaboration d'un PPR

Les inventaires départementaux des cavités souterraines et les bases nationales de données

La mission du BRGM

En 2000, le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD) a confié au BRGM une mission nationale d'inventaire des cavités souterraines connues. Depuis 2001 et jusqu'en 2006, le BRGM devra recenser les cavités souterraines abandonnées (hors mines) de 35 départements. Les données issues de ces inventaires départementaux sont progressivement intégrées dans la banque nationale de données consultable sur le site www.bdcavite.net. A ce jour, les inventaires de 13 départements sont achevés et environ 240 000 localisations sont venues enrichir la base.

Inventaires départementaux : diffuser largement les informations pour mieux gérer les risques (cf. carte d'avancement des inventaires 2001 à 2006)

Les inventaires départementaux ont pour objectifs principaux **le recensement, la localisation et la caractérisation des principales cavités souterraines** afin de favoriser la prévention des risques d'effondrement de ces cavités. A ce titre, ils permettent :

- de conserver la mémoire des cavités souterraines
- d'analyser les caractéristiques des cavités recensées
- d'aider à la réalisation des cartes d'aléa conduisant à l'établissement de PPR
- d'alimenter la base nationale de données
- d'élaborer des outils d'aide à la gestion des risques (statistiques, SIG - systèmes d'informations géographiques -...)
- de réaliser des cartes d'aléas à vaste échelle afin de hiérarchiser les zones exposées au sein de bassins de risques (afin, par exemple, de hiérarchiser les communes devant faire l'objet de DCS mais également de PPR).

Inventaires départementaux, une méthodologie clairement codifiée

Ces inventaires sont réalisés à partir :

- **d'enquêtes documentaires** : archives des DRIRE, archives départementales et communales, cadastres, préfectures, archives militaires, archives de la presse locale, dossiers des donneurs d'ordre publics (SNCF...), dossiers « catastrophes naturelles »...
- **d'informations recueillies par questionnaires auprès des mairies.**
- **d'observations travaux de terrains**

Les données ainsi obtenues sont analysées puis validées par des opérations de terrain. Elles font l'objet **d'un rapport de synthèse accompagné de cartes** et sont **intégrées dans la base nationale de données.**

Les cavités recensées sont :

- des carrières abandonnées (hors mines) : exploitations souterraines de pierres de taille, de craie, de gypse, d'ardoise, d'argile, d'ocre...
- des ouvrages civils abandonnés à vocation industrielle ou agricole (caves à vin, à bière, entrepôts, champignonnières...)
- des ouvrages civils abandonnés à usage de transport (tunnels, aqueducs) ou à vocations de refuge (souterrains)



- des cavités naturelles ou anthropiques abandonnées et à usage troglodytique
- des ouvrages militaires abandonnés (sapes de guerre, dépôts d'armes, casemates et fortins enterrés)
- des cavités naturelles (karsts calcaires ou gypseux, cavernes naturelles)

La base nationale de données sur les cavités souterraines consultable sur le site Internet www.bdcavite.net (cf. carte d'alimentation de la base)

Chaque année, en France, les dommages occasionnés par des mouvements de terrain liés à des cavités souterraines (effondrements, fontis, affaissement...) ont des conséquences socio-économiques considérables. Les coûts consécutifs à ces dommages s'avèrent très élevés et les solutions sont encore trop souvent apportées au coup par coup.

Cette banque est réalisée à la demande du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD) et gérée par le BRGM. Elle permet le recueil, l'analyse et la restitution des informations de base nécessaires à la connaissance et à l'étude préalable des phénomènes liés à la présence de cavités souterraines. Elle présente l'ensemble des informations disponibles en France : plus de 240 000 données recueillies lors des 11 inventaires départementaux achevés à ce jour et 10 000 données issues d'inventaires partiels. Par ailleurs, plusieurs milliers de données fragmentaires disponibles au BRGM vont être progressivement intégrées.

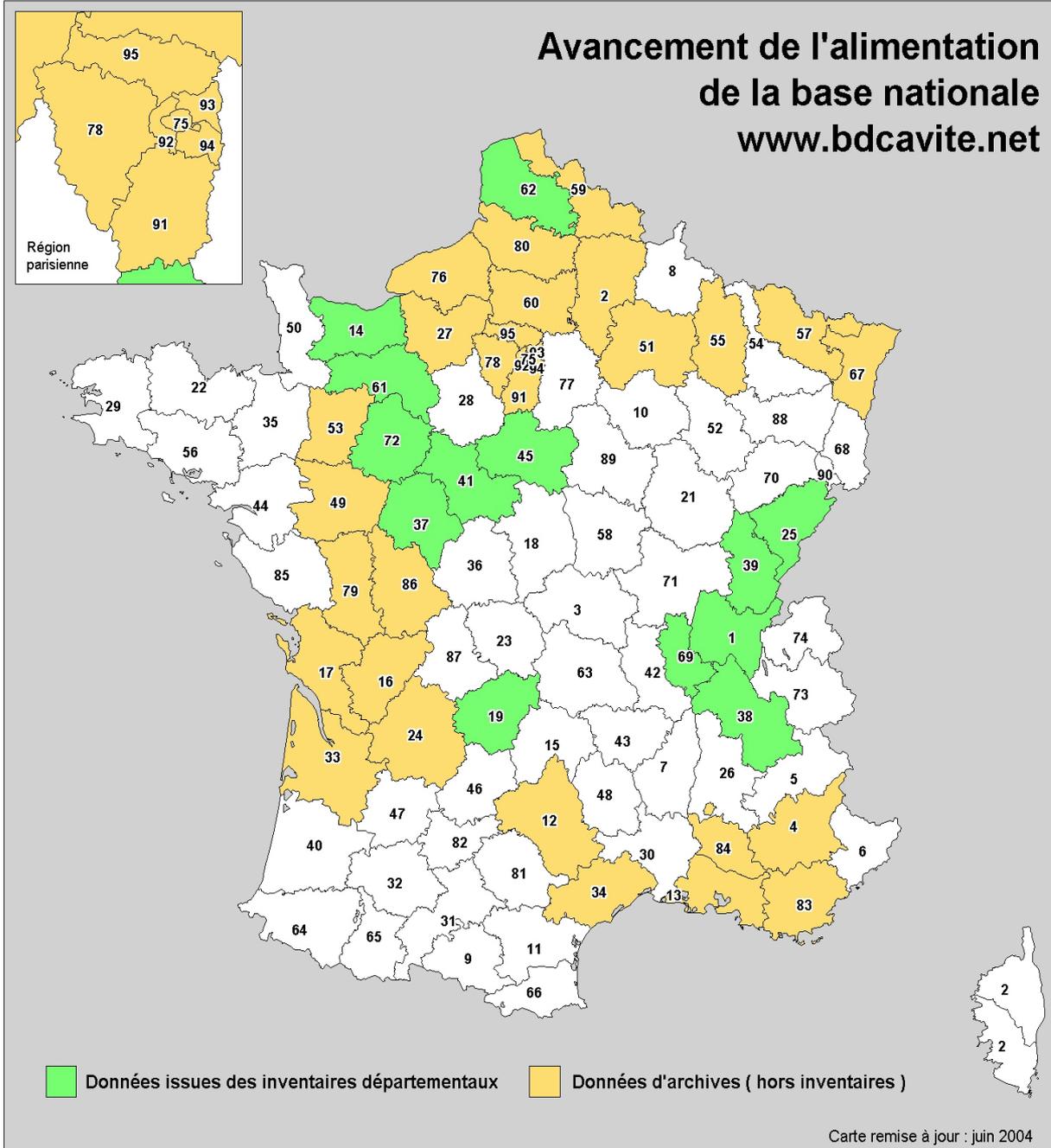
La base nationale de données sur les mouvements de terrains est consultable sur le site Internet www.bdmvt.net

Cette base réalisée à la demande du MEDD et gérée par le BRGM répond également à la politique de prévention des risques naturels mise en place depuis 1981.

Son objectif est d'établir une planification préventive des risques pour avoir une meilleure protection des personnes et des biens. Elle mémorise l'ensemble des données disponibles en France, sur des situations récentes et sur des événements passés et permet la diffusion des connaissances relatives à tous ces phénomènes dont, bien entendu, les effondrements. Les informations proviennent du BRGM, du LCPC et du RTM. A ce jour, la base contient environ 17 000 données recueillies sur 43 départements métropolitains.



Avancement de l'alimentation de la base nationale www.bdcavite.net



Les sapes de guerre du plateau picard

Entre janvier 2000 et mai 2001, de très nombreux effondrements et affaissements de terrain se sont produits sur le plateau picard générant des dégâts sur les constructions et sur les équipements de surface. Ainsi, le BRGM a recensé plus de 4000 effondrements uniquement sur les deux arrondissements de Montdidier (Somme) et de Clermont (Oise), dont plus de 3600 dans ce dernier.

Deux types de cavités sont à l'origine de ces désordres : d'anciennes marnières liées à l'exploitation de la craie pour l'amendement des sols ainsi que les sapes de guerre et ouvrages militaires abandonnés (dépôts d'armes, cantonnements souterrains ou tunnels stratégiques) jalonnant les nombreuses lignes de front de la première guerre mondiale.

Durant cette période, des pluies exceptionnelles et l'ennoiement de certaines cavités par la remontée de la nappe phréatique sont principalement responsables des effondrements survenus par modification des caractéristiques mécaniques des matériaux et surcharge imposée au toit des cavités par les terrains saturés d'eau.

Un inventaire départemental réalisé dans le cadre de la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle

Face à l'ampleur des phénomènes, **un inventaire a été confié au BRGM par la DIREN de Picardie début 2002** pour permettre une reconnaissance des cavités. En effet, un effondrement n'entraînant qu'un comblement partiel du vide, une reconnaissance des vides est indispensable si l'on veut déterminer leur possible évolution et prévenir de nouveaux désordres.

Ce travail d'inventaire, réalisé sur la base des incidents survenus, a été complété par des visites de terrain et des études d'archives, notamment militaires qui ont conduit à remarquer une superposition intéressante dans la localisation des mouvements de terrain et des principales lignes de front françaises et allemandes.

Cependant, ces consultations ont rapidement montré leurs limites, de nombreuses cavités ayant été rebouchées après-guerre et oubliées. De plus, les données de base fournies par les archives militaires étaient très souvent mal géoréférencées voire délibérément falsifiées par les belligérants de l'époque afin de ne pas révéler les emplacements exacts des cavités.

Le contexte de réalisation de l'inventaire s'est donc révélé très proche de celui rencontré lors de la mise en service de la ligne du TGV Nord également confrontée à des effondrements d'anciennes galeries militaires oubliées.

Les travaux d'inventaire ont conduit le BRGM à recommander une série de mesures pour prévenir d'autres effondrements dans cette zone :

- reconnaissances approfondies de cavités
- techniques de stabilisation
- inspections de caves
- maîtrise des eaux pluviales et usées
- reconnaissance préalable des terrains à bâtir
- établissement de cartes d'aléa
- zonage de l'aménagement dans le cadre de PPR

A l'issue de ces travaux, sur vingt communes étudiées, onze ont été déclarées indemnisables au titre de l'état de catastrophe naturelle (effondrements). Les autres communes ayant auparavant été reconnues indemnisables au titre des inondations.

En outre, le BRGM a préconisé d'étendre les reconnaissances sur deux arrondissements limitrophes de Péronne et de Compiègne particulièrement vulnérables au risque d'effondrement.

Les marnières de Normandie

La Normandie est l'une des régions françaises les plus exposées aux risques d'effondrement de cavités souterraines. En Haute-Normandie, on estime à entre 100 000 et 120 000 le nombre de marnières (petites carrières souterraines d'extraction de la craie, utilisées du 17^{ème} au 19^{ème} siècle, servant à l'amendement des champs). Pour ce qui concerne la Basse-Normandie, l'Orne et le Calvados ont fait l'objet d'inventaires des cavités abandonnées (hors mine).

L'inventaire départemental des marnières de Haute-Normandie

Ces cavités souterraines sont abandonnées parfois depuis des siècles sans aucune mesure de sécurité car les cultivateurs qui extrayaient la craie (en patois cauchois, la marne, d'où le nom de marnière) pour amender leurs champs n'en voyaient pas la nécessité. Au mieux, ils plantaient un arbre à côté du puits pour rappeler l'existence du danger. Ces cavités se manifestent parfois de manière dramatique lorsqu'elles se trouvent sous des habitations. En effet, avec l'urbanisation des campagnes de plus en plus d'habitations ou d'infrastructures sont touchées.

On estime le nombre de marnières entre 100 000 et 120 000 (hors autres cavités) dans les deux départements de Haute-Normandie (Eure et Seine-Maritime). Cette estimation est fondée sur des statistiques issues d'inventaires précis, en général communaux, ou sur les données obtenues lors de la construction de grands projets routiers ou autoroutiers.

Une première étape de recensement des données disponibles auprès du BRGM, des DDE, du CETE, de la DIREN, de la Protection Civile est actuellement initiée à la demande MEDD. Les points recensés seront intégrés dans la base nationale de données www.bdcavite.net. Il va de soi que, compte-tenu de la grande quantité de vides souterrains divers de la région, les inventaires des deux départements s'échelonneront dans le temps.

L'inventaire départemental des cavités abandonnées de Basse-Normandie

Un inventaire a déjà été réalisé dans l'Orne et dans le Calvados. Plus de 3000 points ont été recensés et intégrés dans la base de données. Cependant ces deux inventaires ne peuvent pas être considérés comme exhaustifs tant le nombre de cavités dont on ne conserve plus la mémoire est important.

Ces inventaires sont avant tout fondés sur des consultations d'archives publiques (BRGM, DRIRE, DDE, DDAF, Préfectures, archives départementales, cartes géologiques ou topographiques) ou privées (clubs de spéléologie...) et d'enquêtes auprès des mairies.

Les très nombreuses données recueillies à partir des archives n'ont pas encore été toutes prises en compte et la validation de terrain reste à faire. Toutefois, on constate que la répartition géographique des cavités est en étroite corrélation avec la géologie du sous-sol. Ainsi, l'Ouest de la région fondé sur un socle ancien est plutôt le siège de cavités minières (non répertoriées lors des deux inventaires départementaux), le Centre plutôt calcaire correspond à une concentration de carrières pour de la pierre à bâtir (pierre de Caen) et l'Est plus crayeux renferme des carrières souterraines et également des marnières comme en Haute-Normandie.

Les cavités souterraines en milieu urbain de la région Centre et du Loiret

Trois inventaires départementaux ont été réalisés à ce jour en Indre-et-Loire, Loir-et-Cher et Loiret. L'inventaire de l'Eure-et-Loire a débuté en 2004.

La région Centre, une région particulièrement riche en cavités souterraines

Le Nord-Ouest de la région Centre est particulièrement riche en cavités souterraines. Les trois inventaires déjà réalisés ont conduit au recensement de 11 000 cavités dont les caractéristiques ont été intégrées dans la base nationale de données www.bdcavite.net

- **Plus de 70 % des cavités** répertoriées correspondent à d'anciennes caves principalement réparties sur les côteaux de la Loire ou de ses affluents (Indre-et-Loire et Loir-et-Cher) qui servent de caves à vin, de champignonnières ou encore d'habitations troglodytes.
- **Près de 20 % des cavités** sont des vides naturels de dissolution qui sont localisés en majeure partie dans la région d'Orléans (Loiret) ou dans les plateaux crayeux du Gâtinais (Loiret).
- **Enfin, la dernière grande catégorie de cavités, 5 %**, est constituée de carrières souterraines, principalement présentes dans le Loiret.

Département du Loiret, une carte d'aléa communal à l'échelle du 1/25 000

A partir de la réalisation d'un inventaire des cavités connues, des désordres de surface observés d'après les cartes topographiques et géologiques et en fonction de la nature et la profondeur, par rapport à la surface, des formations calcaires susceptibles de contenir des cavités souterraines, **trois classes d'aléas ont été cartographiées :**

- aléa faible : 74 communes (23 %)
- aléa moyen : 138 communes (41 %)
- aléa fort : 122 communes (36 %)

L'essentiel des zones exposées est situé dans la région d'Orléans et dans le Gâtinais et, dans une moindre mesure, dans les secteurs de Briare et de Pithiviers.

Cette répartition correspond bien aux zones où le calcaire de Beauce et le toit de la craie sont situés à moins de 20 mètres de profondeurs.

De plus, en croisant la carte d'aléa à la carte d'enjeux (principalement établie à partir de la densité de population par commune) il a été possible de définir **quatre bassins de risques au sein des bassins d'exposition préalablement définis.**

Sur cette base et à titre purement informatif, il a été proposé de mettre en place une politique de prévention adaptée :

- **pour les communes en aléa fort, urbaines et semi-urbaines (49) :** établissement d'un PPR, en priorité sur les 12 communes les plus urbanisées
- **pour les communes rurales en aléa élevé, urbaines ou semi-urbaines sans sinistre connu en aléa moyen (79 communes) :** établissement d'un DICRIM ou d'un DCS détaillé annexé au PLU
- **pour les communes en aléa moyen semi-urbaines, sans sinistres ou rurales (132 communes) :** établissements de DCS annexés au PLU
- **pour les communes en faible aléa (74 communes) :** établissement de DCS

Les cavités souterraines d'origine minière

Nulle part en France, les problèmes de cavités souterraines ne se posent de manière aussi criante qu'en Lorraine. En effet, cette région est parcourue par 60 000 km de galeries souterraines, vestiges de l'exploitation du fer, du sel et du charbon. Par ailleurs, on estime à environ 2500 le nombre de communes françaises concernées par les séquelles de l'exploitation minière, soit environ 7% des communes françaises, et 900 d'entre elles sont directement menacées par des risques d'effondrement.

Octobre 1996, avec l'effondrement survenu sur la commune d'Auboué (Meurthe-et-Moselle) a ouvert l'ère de l'après-mine dans le Bassin ferrifère de Lorraine et en France et c'est en 1999 que le code minier a subi une modification majeure matérialisant une véritable prise en compte de la problématique de l'après-mine.

GISOS et GEODERIS, deux réponses circonstanciées pour prévenir et traiter le risque minier

- ➊ GISOS, pôle de recherche pour comprendre et modéliser les phénomènes liés aux comportements à long terme des cavités souterraines d'origine minière et mettre au point les méthodes de prévention du risque d'effondrement

Le **BRGM**, l'**INERIS** (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques), l'**INPL** (Institut National Polytechnique de Lorraine) et l'**Ecole des Mines de Nancy** travaillent au sein d'un **groupement d'intérêt scientifique, le GISOS**, (Groupement d'Intérêt Scientifique sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains) depuis **1999**. Plus récemment, l'Ecole des Mines de Paris s'est jointe au groupement implanté à Nancy.

Trois axes de recherche sont développés :

- **le comportement des terrains et l'impact en surface des ouvrages souterrains** (détection, caractérisation et étude des conditions de stabilité des cavités souterraines, évolution dans le temps...)
- **l'impact des ouvrages souterrains sur les eaux** (étude des modalités de dégradation de la qualité des eaux souterraines, des conditions de restauration de cette qualité...)
- **la gestion des risques liés aux ouvrages souterrains** (méthodes de modélisation, d'évaluation, de prévision et de prévention des risques).

En 2002-2003, le GISOS a réalisé une expérimentation en grandeur réelle dans la mine de fer de Tressange (Moselle), dans le nord du Bassin ferrifère lorrain, pour étudier le comportement des chambres et des piliers soumis à l'ennoyage. Cela a consisté à inonder une chambre rendue étanche à 250 mètres de profondeur pendant 1 an. Les différentes méthodes d'auscultation et de surveillance mises en œuvre (géophysiques, hydrologiques et géochimiques) ont permis de caractériser l'évolution d'une mine dans des conditions réelles d'arrêt de pompage des eaux d'exhaure.

Pour 2004, il est prévu de surveiller un site de mine de sel exploitée par dissolution à Cerville Buissoncourt près de Nancy. Dans ce cas également, la cavité de dissolution sera auscultée à partir de la surface à l'aide de méthodes géophysiques, géochimiques et satellitaires afin d'étudier les mécanismes conduisant à l'effondrement.

- ➋ **GEODERIS, pôle de gestion des risques en appui aux pouvoirs publics**

Dans le cadre du **groupement d'intérêt public, GEODERIS** créé en 2001, le BRGM et l'INERIS viennent en **appui aux politiques publiques dans la gestion des séquelles de l'après-mine.** Les



équipes pluridisciplinaires sont basées à Metz, Caen et Alès et étroitement associées aux pôles de l'administration spécialisés dans le domaine de l'après-mine et situés dans ces mêmes villes.

A ce titre, GEODERIS assure les missions suivantes :

- collecte et gestion des informations sur la connaissance des sites
- évaluation des menaces et des risques générés par les anciennes exploitations
- surveillance de l'évolution des sites
- mise en œuvre des travaux destinés à assurer la sécurité des biens et des personnes
- élaboration des plans de préventions des risques miniers (PPRM)
- diffusion des connaissances et de l'information

A la demande de GEODERIS, le BRGM a principalement apporté son savoir-faire à :

- **la conception, la structuration et la réalisation des importantes bases de données associées à des systèmes d'information géographiques** pour l'ensemble des mines de fer et de sel en Lorraine, pour les mines métalliques du reste de la France, avec de nombreux développements environnementaux
- **la recherche de vides en profondeur sur de nombreux sites**, qu'il s'agisse de **vides francs** dans le cas d'exploitations peu profondes (microgravimétrie dans les Bassins ferrifères normands et lorrains), de **vides en partie comblés** par exemple dans le cas de dépilages (effondrements provoqués en fin d'exploitation) profonds (100 à 150 m, par sismique haute résolution ou tomographie dans le Bassin ferrifère lorrain) ou encore de **vides remplis de saumure** laissés par les exploitations de sel par dissolution (méthodes électriques et électromagnétiques dans le Bassin salifère lorrain).
- **l'analyse géologique fine sur de nombreux sondages** du bassin ferrifère **pour l'identification des niveaux repères** (bancs dits raides) pouvant se révéler **favorables à l'apparition de phénomènes d'effondrement**
- **l'identification des risques** (instabilités de terrain, pollution, pénétration accidentelle) présentés par de **nombreuses concessions abandonnées ou orphelines**, notamment dans le domaine minier métallique du Centre et du Sud de la France
- **la réalisation des phases préparatoires des PPRM** (plans de prévention des risques miniers) notamment dans le Bassin charbonnier du Briançonnais et dans le Bassin ferrifère de Segré (Normandie)
- **l'approche des affaissements du sous-sol par comparaisons de MNT** (modèles numériques de terrain) issus de photographies aériennes ou par interférométrie radar.

Le BRGM porte également un effort important sur la méthodologie de prise en compte des impacts environnementaux et sur leur affichage dans les Plans de Prévention des Risques Miniers (PPRM) qui se mettent en place progressivement.

Les méthodes géophysiques

Détecter et surveiller l'évolution des cavités souterraines pour prévenir le risque d'effondrement

Microgravimétrie, radar géologique, méthodes électriques et électromagnétiques, méthodes sismiques... la panoplie des outils géophysiques est sollicitée dans sa totalité pour détecter et surveiller les cavités souterraines et prévenir ainsi le risque d'effondrement.

Les outils géophysiques ont les avantages des méthodes non destructrices ; ils cherchent à détecter les cavités à partir de la surface en mesurant des anomalies de paramètres physiques (valeur de la gravité, de la résistivité électrique, de la propagation des ondes acoustiques et électromagnétiques dans le sol...). En revanche, comme ces outils sont également sensibles à des variations de ces paramètres non liés directement à la présence d'une cavité, ils peuvent parfois conduire à des incertitudes.

Par ailleurs, les cavités sont des objets de petites dimensions comparées aux gisements pétroliers ou aux amas de minerais. Même si elles sont beaucoup plus proches de la surface du sol, il est nécessaire de faire beaucoup de mesures sur une petite étendue. Cela implique des coûts relativement élevés qui ne sont pas toujours à la portée du particulier qui veut connaître l'état du terrain sur lequel construire sa maison.

L'application de la géophysique est donc réservée à des études d'aménagement de grande ampleur, à l'échelle d'un quartier ou de tracés linéaires (routes, TGV...).

BRGM, une expérience particulièrement forgée depuis plus de dix ans

C'est à partir de 1990, que le BRGM a commencé à intervenir très régulièrement en appliquant les méthodes géophysiques à la problématique des cavités souterraines et à l'ensemble du territoire national. Certaines régions étant plus affectées que d'autres, il a particulièrement travaillé sur les :

- **karsts et les carrières abandonnées dans la région Centre** : 19 interventions
- **anciennes cavités minières (fer, sel) de Lorraine** : 15 interventions
- **cavités naturelles de dissolution en Aquitaine** : 11 interventions
- **carrières, marnières et karsts de Haute et Basse-Normandie** : 11 interventions
- **karsts, cavités minières et carrières de Poitou-Charente** : 7 interventions.

Localiser les cavités

La panoplie des outils géophysiques

☛ **La microgravimétrie.** C'est une méthode qui repose sur la mesure des valeurs relatives de la gravité à la surface du sol. Ces valeurs étant influencées par la répartition des densités dans le proche sous-sol, on peut détecter les cavités par le déficit de densité qu'elles provoquent. Cette technique d'intervention française est couramment utilisée depuis les années 1970.

Les mesures gravimétriques étant réalisées selon une grille déterminée, l'information résultante conduit à la réalisation d'une carte des anomalies microgravimétriques permettant de préciser la position d'une cavité.



☉ **Les méthodes sismiques** (analyse spectrale des ondes de surface, SASW, sismique haute résolution et sismique réfraction). Elles consistent à provoquer des ébranlements dans le sol et à observer en surface les différents types d'ondes générées par ces ébranlements.

La présence d'une cavité dans le sous-sol peut constituer un obstacle à la propagation des ondes et entraîner des modifications (des temps de trajets des ondes, de leur vitesse de propagation, de leurs amplitudes) révélatrices de sa présence.

La sismique réflexion haute résolution s'intéresse aux ondes de volume qui se réfléchissent et se transmettent sur les différents horizons géologiques.

Ces méthodes doivent continuer à faire l'objet de programmes de recherche-développement afin de mieux déterminer leurs capacités et leurs limites et notamment pour être utilisées en milieu urbain à l'aide sources sismiques à chute de poids. Récemment, le BRGM a expérimenté le couplage microgravimétrie-SASW avec succès sur les conduits karstiques du Parc Floral à La Source, au sud d'Orléans.

☉ **Les méthodes électriques et électromagnétiques**. Elles consistent à mesurer la résistivité des roches du sous-sol (propriété physique caractéristique d'une roche et de sa capacité à conduire le courant) en y injectant soit un courant alternatif. Les cavités sont caractérisées par une résistivité importante.

Deux autres méthodes particulières sont exploitées :

- **le radar géologique** : méthode utilisée de manière relativement routinière depuis une dizaine d'années par le génie civil et particulièrement en milieu urbain. Elle est fondée sur l'émission de brèves impulsions électromagnétiques de haute fréquence qui se réfléchissent partiellement sur des interfaces de milieux présentant des caractéristiques électriques différentes. Les échos produits sont enregistrés au moyen d'une antenne réceptrice puis exploités.
- **la résonance magnétique protonique** (RMP, méthode développée par le BRGM depuis 1995) : elle est principalement mise en œuvre pour détecter la présence d'eau dans le sous-sol car c'est la seule méthode géophysique qui soit directement sensible à l'eau. On voit donc bien son intérêt pour détecter des cavités souterraines ennoyées.

Les techniques de complément aux méthodes géophysiques

☉ **La termographie infrarouge**. Cette technique est en cours de développement et de validation. Elle mesure le rayonnement thermique naturel de la surface du terrain étudié en fonction de sa température apparente.

La présence d'une cavité souterraine, dont la température est relativement constante par rapport à l'extérieur, peut dans certaines conditions influencer la température apparente du terrain situé au-dessus.

☉ **La photo-interprétation**. C'est une méthode de reconnaissance indirecte fondée sur l'analyse de photographies aériennes verticales et /ou obliques. Les photos verticales noir et blanc permettent soit de détecter des indices d'effondrement (fontis, effondrements et affaissements) soit des puits, des cheminées ou des tranchées. Les photos infrarouge et infrarouge couleur permettent de détecter les zones humides et les dépressions envahies par la végétation.

Il est évidemment particulièrement intéressant de faire des examens de photos prises à des dates différentes afin de d'obtenir un suivi de l'évolution d'une zone et de pouvoir corrélérer les informations avec les données météorologiques, par exemple.

☉ **Les sondages et les techniques qui leur sont associées**



- **les sondages** (destructifs ou carottés) : s'ils sont bien implantés et bien valorisés, ils permettent de reconnaître les cavités inaccessibles par vidéoscopie, laser ou sonar. Par ailleurs, les sondages carottés permettent une description très précise, tant géologique que géotechnique, des terrains traversés.
- **les diagraphies instantanées** : elles renseignent sur la présence de cavités en mesurant la vitesse de pénétration de l'outil de forage, la poussée des terrains sur cet outil, la pression du liquide d'injection...
- **les diagraphies différées** : elles s'apparentent aux autres techniques géophysiques (électriques, sismiques, électromagnétiques, diagraphies nucléaires)

☉ **Les techniques de reconnaissance géométrique.** Lorsque les cavités sont accessibles, on réalise un levé topographique et un levé géométrique.

Aujourd'hui, aucune méthode géophysique ne permettant à elle seule de détecter sans ambiguïté une cavité, la combinaison de plusieurs méthodes apparaît de plus en plus comme une solution d'avenir. Fort de quarante ans d'expérience en reconnaissances géophysiques (recherche d'eau et de ressources minérales, cartographie...), le BRGM possède l'expertise et la capacité de mise en œuvre de toutes ces méthodes en complément les unes des autres, en fonction de la nature des terrains à étudier ou de la complexité des milieux (urbains, karsts...).

Surveiller les cavités grâce à la géophysique

Les expériences en ce domaine sont encore très peu nombreuses. Des résultats prometteurs ont cependant été obtenus sur des sites en évolution rapide grâce à la répétition régulière de mesures microgravimétriques. Cette méthode dite « monitoring microgravimétrique 4D » peut permettre de suivre des redistributions de masses en subsurface susceptibles de signaler des effondrements imminents. Ainsi, en Israël, l'évolution de réseaux karstiques à l'origine d'effondrements de grandes dimensions est sous surveillance microgravimétrique.

Cependant, cette application de la microgravimétrie n'est pas encore opérationnelle pour des cavités moins importantes ou à évolution plus lente. Le BRGM expérimente actuellement cette technique dans le cadre de son activité de recherche.

Surveiller les mouvements de surface par méthode satellitaire

Les déformations de surface liées à l'existence de cavités minières sont surveillées grâce à la technique d'interférométrie radar (InSAR) satellitaire. Cette technique a été expérimentée avec succès sur des déformations résultant de l'activité minière (exploitation et post-mine) dans le cas d'un site houiller et d'une saline.

Le principe consiste à combiner la phase de deux images radar prises par le satellite à des dates différentes. La différence de phase, ou interférogramme, permet de mesurer, par analyse multi-temporelle, des déformations de surface lentes, de faible amplitude et d'étendue supérieure à quelques centaines de mètres.

Pour en savoir plus sur les cavités souterraines et les effondrements

Les cavités naturelles

Certaines formations géologiques sont sensibles à l'action de l'eau. En s'infiltrant dans les fissures naturelles du sous-sol, l'eau chargée en gaz carbonique dissout la craie et autres roches calcaires en formant des entonnoirs de dissolutions et parfois d'énormes cavités.

Les cavités artificielles

En quête de ressources minérales, l'homme fouille le sous-sol depuis la nuit des temps. La localisation des anciennes exploitations a souvent été oubliée et, lors d'effondrements, certaines se révèlent brusquement. Au titre de ces cavités artificielles se trouvent également les puits, les sapes et ouvrages de guerre, les infrastructures souterraines (tunnels, caves à vin, caves à bière, ouvrages « culturels », souterrains aqueducs, habitations...)

Les désordres de surface liés aux cavités

- **L'affaissement.** C'est une déformation souple, sans rupture et progressive de la surface du sol se traduisant par une dépression en forme de cuvette, généralement à fond plat et bords fléchis en « S ». Dimensions : plusieurs hectares et plus de 5 mètres de profondeur. En général, les affaissements sont dus aux carrières souterraines mal remblayées ou recouvertes par des formations géologiques « souples ». Ils causent des désordres aux ouvrages mais ne font pas de victimes en raison de la progressivité du phénomène.
- **Le fontis.** C'est un effondrement brutal mais localisé se manifestant sous la forme d'un entonnoir ou d'un cratère. Il est presque circulaire. Le diamètre et la profondeur du cône peuvent varier de quelques mètres à plusieurs mètres. Il fait des victimes.
- **L'effondrement.** C'est un abaissement à la fois violent de la surface pouvant atteindre de plusieurs hectares de surface à plusieurs mètres de profondeur. Il est spécifique des mines et carrières exploitées par chambres et par piliers et fait de nombreuses victimes et sinistrés.