



HAL
open science

Les mécanismes de ruptures des carrières souterraines abandonnées

Jean-Jacques Tritsch

► **To cite this version:**

Jean-Jacques Tritsch. Les mécanismes de ruptures des carrières souterraines abandonnées. Evaluation et gestion des risques liés aux carrières souterraines abandonnées : séminaire de restitution et de valorisation des travaux INERIS -réseau des LPC, May 2005, Paris, France. pp.74-92. ineris-00972493

HAL Id: ineris-00972493

<https://ineris.hal.science/ineris-00972493>

Submitted on 3 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LES MÉCANISMES DE RUPTURES DES CARRIÈRES SOUTERRAINES ABANDONNÉES

Jean-Jacques TRITSCH

INERIS, Verneuil-en-Halatte, France

Résumé

Le territoire national recèle de nombreuses cavités souterraines modelées par l'homme depuis des temps très anciens. Parmi ces cavités, les carrières souterraines sont de loin les plus préoccupantes, par leur nombre, l'importance de leurs vides et surtout par les dangers latents qu'elles représentent pour les populations exposées. Les solutions mises en œuvre par les autorités compétentes en matière de prévention des risques et de gestion de la sécurité publique reposent, avant toute considération, sur une bonne connaissance des mécanismes physiques à l'origine des phénomènes de rupture. Si certains mécanismes simples paraissent évidents au vu des dégradations, d'autres, plus complexes, peuvent échapper à un examen trop superficiel. L'objet de cet article est de synthétiser les différents mécanismes de rupture, identifiés au travers d'une rétroanalyse des accidents passés.

1. Historique

L'exploitation des matériaux destinés à la construction a été de tous temps une source de développement économique. Dès l'Antiquité, le calcaire fut utilisé pour la pierre à bâtir ou le ciment, le gypse pour la fabrication du plâtre, la craie pour la chaux et l'amendement des sols, l'argile pour la fabrication des tuiles et des briques.

Si les plus anciennes exploitations souterraines remontent à l'époque gallo-romaine, le développement des carrières importantes semble débiter au IX^{ème} siècle comme dans la carrière de Lezennes dans la région lilloise, et aux X-XII^{èmes} siècles comme dans les célèbres carrières de la Maladrerie près de Caen ou celles de Paris. L'exploitation des carrières, permit, dès cette époque, le développement de grandes agglomérations telles que Paris, Bordeaux, Lille, Tours ou Caen.

Ce n'est toutefois qu'à partir du XIV^{ème} siècle que l'exploitation en souterrain pour l'extraction de pierres à bâtir fut réalisée de façon intensive et généralisée pour atteindre son apogée entre le XVII^{ème} et le XIX^{ème} siècle.

A l'origine, les exploitations souterraines étaient entreprises en périphérie de l'enceinte des villes, mais, avec le développement croissant de celles-ci, les cavités abandonnées se sont rapidement retrouvées sous l'emprise des faubourgs urbains, avec les conséquences inéluctables et parfois tragiques que la présence de vides importants entraînait vis-à-vis de la sécurité des populations.

Ce sont les accidents répétés et la perte de vies humaines au cours du XVIIIème siècle, comme l'effondrement de la route d'Orléans en 1774, qui amenèrent par arrêt du Conseil d'Etat du 4 avril 1777 la création à Paris du premier Service de contrôle, l'Inspection Générale des Carrières, placé en 1810, par décret impérial, sous la direction d'un ingénieur en chef des Mines.

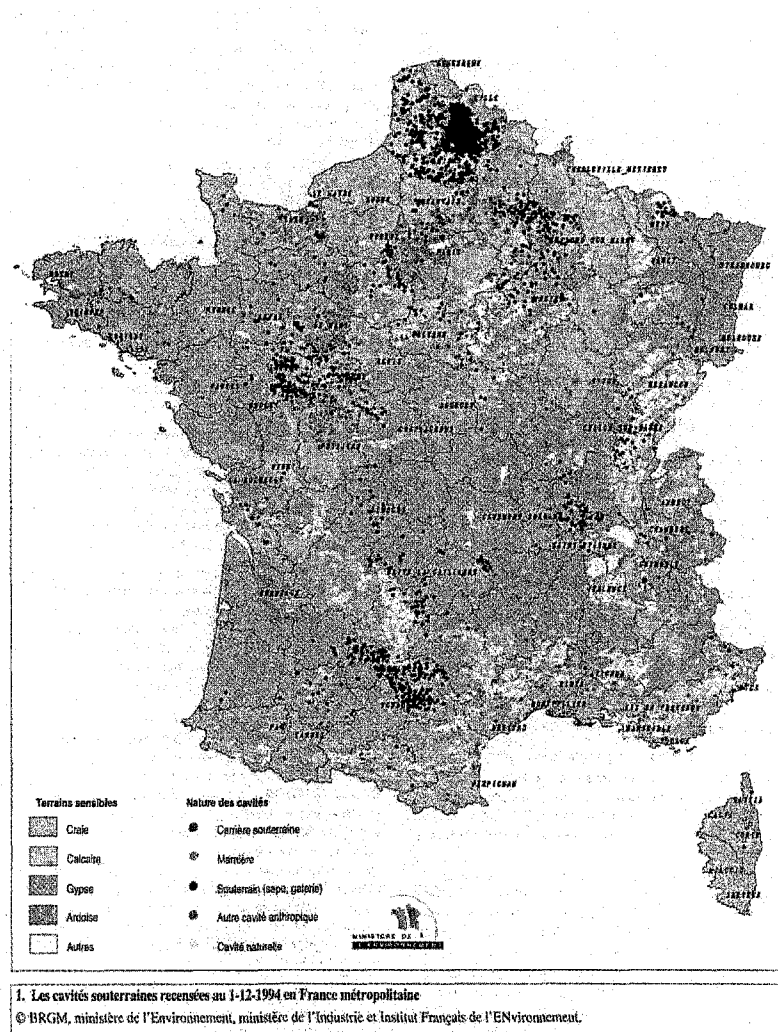


Figure 1. Carte des cavités souterraines recensées au 01-12-1994, en France métropolitaine (d'après l'inventaire du BRGM effectué pour le ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement).

La présence de nombreuses carrières étendues ou de marnières souterraines en forte concentration marque désormais de leur empreinte le sous-sol de vastes régions telles que le Nord, la Normandie, les pays de la Loire, la région parisienne, l'Aquitaine, et à moindre titre, les Pyrénées, la Provence, le Lyonnais, le Jura, la Bourgogne, etc.

Aucune région de France n'est totalement exempte de vides souterrains. Leur concentration peut devenir imposante dans certaines régions, lorsque les conditions d'exploitation ou la qualité du matériau sont particulièrement favorables, ainsi que le montre les résultats de l'inventaire national établi par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières, à la demande du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.

2. Typologie des carrières souterraines

2.1 Configurations

Les carrières souterraines présentent des configurations très diversifiées liées à la topographie et géologie du gisement, aux caractéristiques mécaniques du matériau extrait et aux méthodes d'exploitation utilisées.

Ces conditions permettent de les exploiter jusqu'à un certain taux, appelé « taux d'exploitation » ou « taux de défrètement », qui correspond au pourcentage surfacique de vides laissés au sein de la couche. Ce taux est généralement compris entre 60 et 80 % avec des valeurs plus exceptionnelles de 90 à 95 %.

L'accès au gisement se fait, soit par un puits ou une descenderie dans le cas des carrières implantées sur un plateau, soit par une entrée à flanc de coteau, dite entrée en cavage, depuis le fond de vallée ou depuis un front de taille d'une première exploitation à ciel ouvert.

La hauteur exploitée ou « ouverture », comme la largeur des galeries ou des chambres, est très variable et dépend, outre de la puissance de la couche, de la résistance du matériau, en particulier de la tenue des piliers et de la qualité du toit ou « ciel ». La hauteur des vides, souvent de 2 mètres voire moins, peut atteindre 15 à 20 mètres dans les anciennes carrières de gypse de l'Ouest du bassin de Paris. La largeur des galeries est généralement comprise entre 3 et 15 mètres.

La profondeur habituelle des exploitations est comprise entre 5 et 50 mètres, parfois inférieure à 5 mètres, comme en Gironde. Plus rarement, elle peut atteindre 60 à 70 mètres, dans certaines exploitations de craie, aux environs de Meudon (Hauts-de-Seine), ou de gypse, dans le Bassin de Paris, la Provence ou le Jura, et exceptionnellement, plus d'une centaine de mètres pour certaines exploitations en roches dures situées à flanc de montagne (Jura, Pyrénées, Alpes).

La géométrie de ces exploitations n'est devenue régulière qu'à partir de la fin du XIX^{ème} siècle. Avant cette date, la plupart des travaux d'extraction étaient réalisés de manière désordonnée, en fonction de la qualité du gisement ou de la contrainte imposée par les droits de forage (autorisation d'exploiter ou possession des terrains de surface).

En outre, les techniques de creusement ont évolué au cours du temps en même temps que la production. L'extraction manuelle de pierres de taille, réalisée au pic ou à la lance, a été mécanisée par l'introduction d'engins de découpe au fil, par sciage, ou avec des haveuses. Les matériaux moins nobles (pierres à chaux ou gypse) ont été extraits dès le XIX^{ème} siècle à l'explosif, d'abord à la poudre noire puis à la dynamite et à l'explosif nitraté vers la seconde moitié du XX^{ème} siècle.

2.2 Méthodes d'exploitation

La typologie des carrières souterraines repose sur la diversité des méthodes d'exploitation utilisées.

2.2.1 Exploitation par traçage de galeries

Selon les traditions et les périodes, on distingue plusieurs variantes de découpage du gisement par galeries :

- les galeries « filantes » laissant des piliers très longs et sensiblement parallèles entre eux (tuffeau du Val de Loire) ;
- les galeries en rameaux dans les sables de Fontainebleau et le travertin de Brie formant un réseau de galeries étroites laissant un étau de masse important.

2.2.2 Exploitation par chambres et piliers abandonnés

C'est la méthode d'exploitation la plus généralement utilisée et la plus ancienne. Elle se caractérise par une répartition plus ou moins bien ordonnée des ouvrages et par des sections très différentes des piliers laissés en place pour assurer une stabilité suffisante à l'exploitation. Le mode de découpage le plus classique est désigné sous le terme de « piliers tournés ».

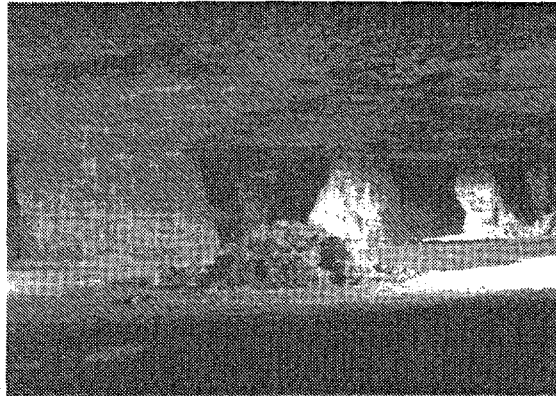


Figure 2. Exploitation de calcaire par chambres et piliers irréguliers (Charente).

La forme et l'alignement des piliers sont d'autant plus réguliers que les exploitations sont plus récentes. Les piliers sont parfois décalés en quinconce pour assurer une meilleure stabilité du toit en présence de fractures.

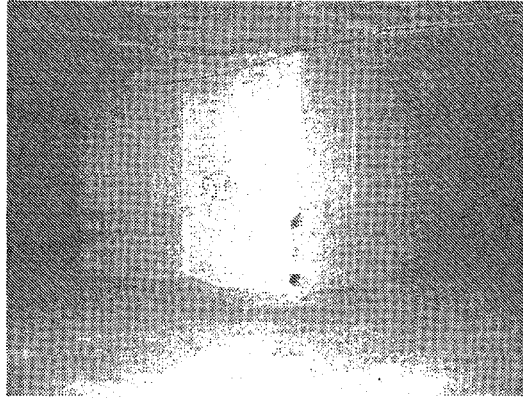


Figure 3. Carrière de calcaire, exploitée par chambres et piliers réguliers (Charente).

La géométrie des chambres et des piliers varie selon la résistance mécanique de la roche, l'épaisseur et les ondulations de l'horizon exploitable. Elle a pu en outre évoluer au cours du temps avec d'une part, la mécanisation de l'extraction, et d'autre part, l'application de schémas d'exploitation imposés par le Service des mines. Ainsi, dans les exploitations de gypse de la région parisienne, la section des galeries est trapézoïdale.

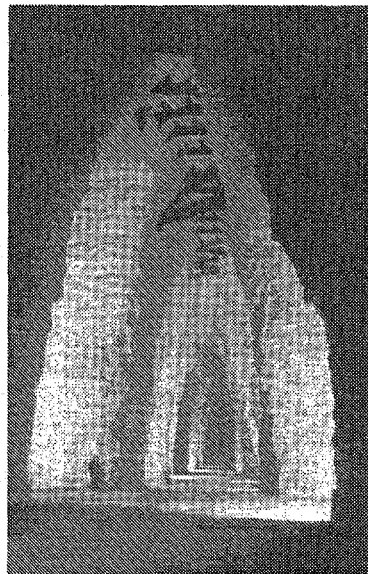


Figure 4. Carrière de gypse avec galeries trapézoïdales (Est de Paris).

A cette méthode d'exploitation très classique, viennent s'ajouter des variantes originales comme la méthode d'exploitation par petits piliers et rideaux ou celles consistant à prendre la couche en étages, par superposition de plusieurs niveaux d'extraction (carrières de craie du Bassin de Paris ou de Touraine, de gypse de l'Est

parisien, qui comportent deux à trois niveaux superposés, carrières de Gironde qui peuvent atteindre jusqu'à 5 niveaux superposés).

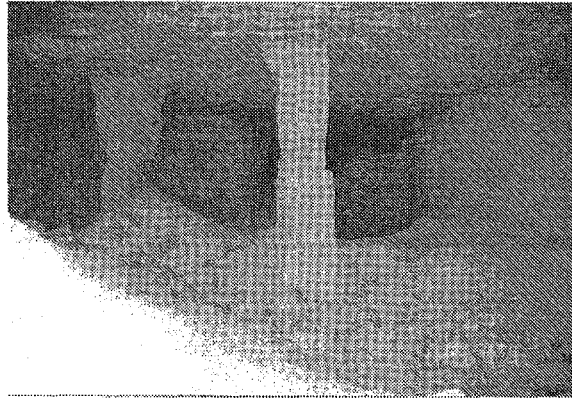


Figure 5. Exploitation par petits piliers et piliers « rideaux », région de Caen.

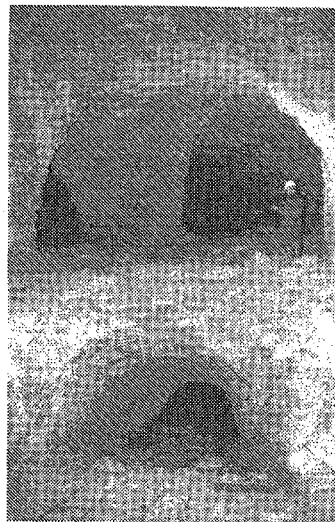


Figure 6. Carrière de gypse en Provence exploitée sur plusieurs niveaux.

2.2.3 Exploitations par puits et chambres de type « catiches ou bouteilles »

Il peut s'agir soit d'excavations isolées, telles que les marnières de Haute-Normandie en général, soit d'exploitations constituées de puits adjacents, disposés en lignes plus ou moins régulières. C'est le cas des catiches de la région lilloise, des exploitations par chambres hautes du falun de Doué-la-Fontaine près de Saumur ou des crayères pyramidales de la craie champenoise.



Figure 7. Exploitation par puits et chambres dans le falun de Touraine (Doué-la-Fontaine).

Les puits sont de faible diamètre, quelques mètres au maximum, avant de s'élargir progressivement à la traversée de l'horizon exploitable. A la base des chambres, des galeries, généralement de faible hauteur, peuvent relier les catiches entre elles.

Après exploitation les puits ont été généralement obturés, soit par des voûtes constituées d'un appareillage de pierres taillées ou bouchon, soit par la mise en place de planches ou de plaques métalliques fichées dans les terrains meubles de couverture. Ces « bouchons » sont souvent recouverts de remblais déversés depuis la surface.

Beaucoup de ces anciennes exploitations, en particulier les marnières, ont été oubliées et ne sont redécouvertes qu'en exhumant le bouchon ou lorsqu'un effondrement se produit.

2.2.4 Exploitation par chambres : technique particulière des ardoisières

Les exploitations d'ardoise sont assez peu nombreuses en France et développent des méthodes d'extraction par chambres particulières, liées à la structure de ce type de gisement. La résistance mécanique du massif rocheux autorise des volumes de vides importants à des profondeurs qui varient de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres.

2.2.5 Exploitation par hagues et bourrages

Il s'agit d'une méthode par dépilage intégral qui ne semble avoir été appliquée qu'à partir du XVI^{ème} siècle uniquement en région parisienne et dans la région de Reims, dans des carrières de calcaire grossier. Ne laissant aucun pilier en arrière du front de taille, elle permet une extraction de la quasi totalité de la couche.

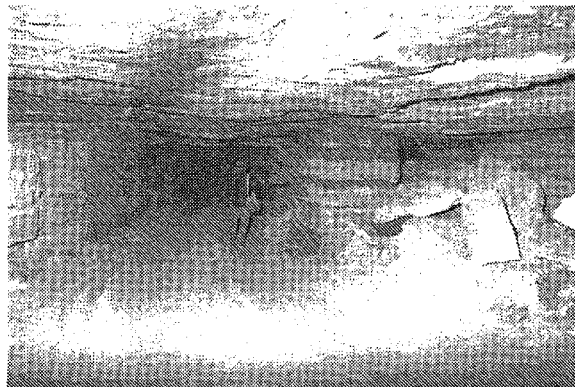


Figure 8. Carrière de calcaire grossier exploitée par hagues et bourrages au début du XX^e siècle (région de Reims).

La stabilité du toit à proximité du front d'extraction, encore appelé front de masse, était assurée dans un premier temps par des empilements de moellons non liés entre eux appelés « piliers à bras », ensuite par un remblaiement (bourrage) à l'aide de résidus d'exploitation ou de matériaux d'apport. Les zones remblayées étaient délimitées et cloisonnées par des murets en pierres sèches appelés « hagues » ; ces hagues encadrent les cheminements appelés « rues de service » qui relient le front de masse à l'entrée de l'exploitation. Pour pallier localement une stabilité jugée très précaire, un pilier de section importante appelé « étai de masse » était maintenu en place.

Ce mode d'exploitation a été localement appliqué sur deux voire trois niveaux, notamment dans la capitale.

2.2.6 Exploitation par foudroyage ou affaissement dirigé

Une des premières applications de cette méthode d'exploitation remonte au XVIII^{ème} siècle avec l'obligation de foudroyer à la poudre noire d'anciens cavages d'extraction de gypse dans le Nord et l'Est de Paris (arrêté royal de 1779). Comme la méthode par hagues et bourrages, il s'agit d'une méthode de dépilage intégral dont la suppression des piliers résiduels est réalisée par un torpillage à l'explosif.

Cette méthode, bien connue pour l'extraction du gypse en région parisienne, est délicate à mettre en œuvre. Elle doit être planifiée, dès le départ, dans la stratégie et le schéma d'exploitation. Les réajustements des terrains foudroyés entraînent inévitablement des tassements différés de la surface qui peuvent subsister longtemps après l'exploitation.

3. Phénomènes et mécanismes de rupture des cavités souterraines

Le processus de dégradation est engagé dès la création d'un vide. Ce processus induit une redistribution des contraintes naturelles influencée par différents facteurs de prédisposition liés aux conditions naturelles et d'exploitation du site.

Une détente des contraintes verticales appliquée par les terrains sus-jacents, dans le toit des cavités, s'opère en se reportant sur les appuis. Cela se traduit par une augmentation de la contrainte verticale sur les piliers et engendre des efforts de flexion sur le toit et le mur des cavités. Dans le massif, on observe également une augmentation de la contrainte verticale sur les bords de la cavité.

Le mécanisme de rupture est le processus selon lequel la résistance limite d'un élément ou d'une structure est atteinte et dépassée par la sollicitation qui s'y exerce.

Des variations de température ou d'hygrométrie ainsi que l'influence du temps peuvent diminuer progressivement la résistance de la roche jusqu'à une valeur voisine des sollicitations auxquelles sont soumises les structures. A ce stade, des dégradations, propre au processus de ruine, peuvent apparaître au fond et évoluer plus ou moins rapidement jusqu'en surface. Les phénomènes accidentels induits sont d'importance variable selon le mode de rupture et à la prédisposition du site.

Il faut préciser que les ruptures d'exploitations souterraines résultent généralement de schémas de dimensionnement insuffisants, établis jadis sur des considérations de productivité et de sécurité du personnel durant l'exploitation, plutôt que sur le souci du maintien de la stabilité des cavités dans le long terme.

3.1 Les effondrements localisés (fontis)

Les effondrements localisés sont essentiellement liés aux exploitations partielles proches de la surface, qu'il s'agisse d'exploitations par chambres et piliers abandonnés ou par galeries filantes. Ils concernent également les ouvrages d'infrastructure tels que les puits (en particulier dans le cas des marnières ou des catiches), les descenderies ou les galeries isolées situées à faible profondeur. Ils peuvent survenir également dans les exploitations dites « totales » si des vides suffisamment importants ont pu subsister (cas des exploitations foudroyées de gypse du bassin de Paris).

3.1.1 Effets en surface

Un effondrement localisé se caractérise par l'apparition soudaine en surface d'un cratère d'effondrement dont l'extension horizontale varie généralement de quelques mètres à quelques dizaines de mètres de diamètre (cas du massif de l'Hautail, à l'Ouest de Paris). La profondeur du cratère dépend principalement de la profondeur et des dimensions des travaux souterrains mais il n'est pas rare qu'elle atteigne une dizaine de mètres même si, dans la majorité des cas, elle se limite à quelques mètres.

En fonction du mécanisme initiateur du désordre et de la nature des terrains de subsurface, les parois du cratère peuvent être subverticales ou inclinées, donnant ainsi naissance à une forme caractéristique d'entonnoir d'effondrement de forme pseudo-circulaire.

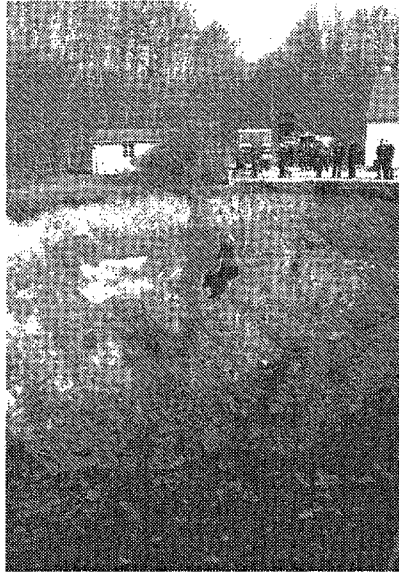


Figure 9. Fontis survenu en 1991 sur le plateau de l'Hautil (Yvelines).

Les conséquences en surface sont, en général, limitées mais elles peuvent s'avérer extrêmement graves si elles se localisent sous une construction ou toute autre infrastructure. C'est ainsi qu'à Paris (villa Saint-Jacques), en 1879, trois maisons furent englouties, avec leurs habitants, dans un fontis au lieu-dit le passage Gourdon (14^{ème} arrondissement). D'autres accidents spectaculaires se produisirent comme en 1880, boulevard Saint-Michel, où un fontis de 11 m de profondeur apparut spontanément sans faire de victimes, et en 1884, où une partie des réservoirs d'eau de Montsouris fut détruite à la suite d'un effondrement qui provoqua une inondation des carrières situées à l'aplomb.

Dans le cas des marnières, on observe des effondrements brutaux des dispositifs de fermeture des puits d'accès (bouchon ou dalle) ainsi que des ruptures en cisaillement des têtes de puits.

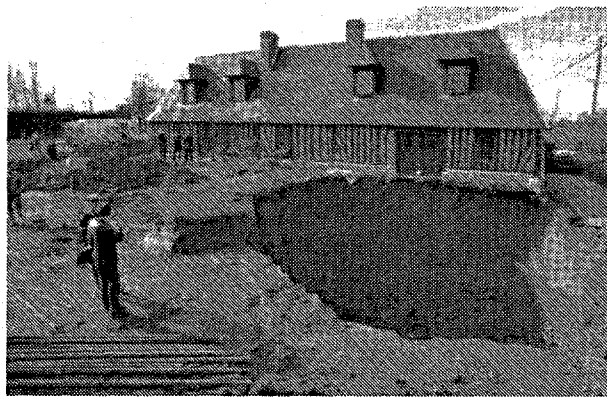


Figure 10. Effondrement d'une marnière dans l'Eure (document LCPC).

3.1.2 Mécanismes initiateurs

- Effondrement par éboulement de toit ou d'une voûte de galerie

On parle de « fontis » lorsque le désordre qui affecte la surface résulte de la remontée au jour d'un éboulement initié au sein d'une excavation souterraine (galerie, chambre d'exploitation, etc.). Lorsque la voûte initiée par la rupture du toit de l'excavation ne se stabilise pas mécaniquement du fait de la présence de bancs résistants et massifs au sein du recouvrement, elle se propage progressivement vers la surface. Dans ce cas, si l'espace disponible au sein des vieux travaux est suffisant pour que les matériaux éboulés et foisonnés puissent s'y accumuler sans bloquer le processus de remontée par « autocomblement », la voûte peut atteindre la surface du sol.

L'apparition de ce type de désordre en surface ne concerne que les travaux peu profonds. Les retours d'expérience ont ainsi montré que, sauf spécificité géologique ou d'exploitation, au-delà d'une cinquantaine de mètres de profondeur, les anciennes cavités (dans des gammes d'ouvertures classiques : 2 à 4 m) n'étaient plus guère susceptibles de provoquer ce phénomène en surface.



Figure 11. Cloche de fontis dans une carrière de calcaire grossier des environs de Paris.

La prédisposition d'un site au développement d'un fontis à l'aplomb de la zone de rupture dépend de la combinaison de deux processus : la rupture de l'ouvrage souterrain en lui-même et la remontée de l'instabilité jusqu'en surface.

La prédisposition à la rupture de l'ouvrage souterrain est liée à la largeur (ou portée) du toit des chambres ou des galeries concernées, ainsi qu'à la nature et à l'épaisseur des premiers bancs rocheux.

La prédisposition conditionnant la remontée de fontis en surface est liée à la nature du recouvrement : présence de bancs homogènes suffisamment épais et résistants favorisant la stabilisation du phénomène par formation d'une voûte stable ou possibilité de stabilisation du phénomène par autocomblement, en fonction du volume des vides résiduels disponibles et de la nature des terrains (épaisseur, foisonnement).

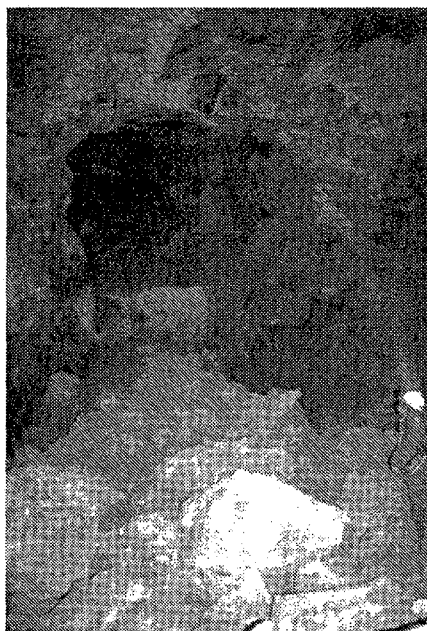


Figure 12. Cloche de fontis débouchant au jour (carrière de gypse du Jura).

- Effondrement par rupture de pilier(s) isolé(s)

Au sein d'une exploitation menée par la méthode des chambres et piliers abandonnés, la ruine d'un (ou de quelques) pilier(s) peut se traduire, en surface, par un effondrement localisé lorsque la profondeur des travaux et la résistance des terrains du recouvrement ne sont pas suffisamment importantes.

La dimension de la zone affectée en surface est généralement plus étendue que celle résultant d'un simple fontis mais sensiblement plus réduite que dans le cas d'un effondrement généralisé décrit plus loin. Comme les fontis, les ruptures de piliers isolés sont des phénomènes purement locaux qui ne dépendent pas tant de la géométrie de l'exploitation que de conditions locales défavorables. Ces conditions défavorables peuvent résulter de la méthode d'exploitation ayant conduit, dans certains secteurs, à des extractions locales trop intenses laissant des piliers sous-dimensionnés, fragilisés ou mal superposés. Elles peuvent aussi résulter de paramètres géologiques (zones fracturées ou faillées, venues d'eau, etc.).

Comme les fontis, l'apparition de ce type de désordre en surface ne concerne que les travaux peu profonds.

La prédisposition à la rupture des piliers dépend principalement des contraintes qui s'y exercent (contraintes tributaires du taux de défrètement local et de la profondeur des travaux), de leurs caractéristiques (résistance, sensibilité à l'eau, élancement, forme, régularité), de leur bonne ou mauvaise superposition (carrières à plusieurs niveaux) et de la présence de failles ou d'accidents structuraux, etc.).

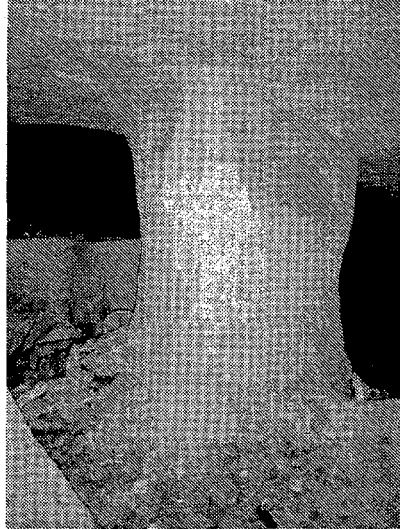


Figure 13. Pilier dégradé prenant forme de diabolo (carrière de calcaire de Charente).

- Effondrement par débouillage de puits ou rupture de la tête de puits

Les anciens puits d'exploitation (marnières ou têtes de catiches), mal traités ou mal remblayés (à l'aide de matériaux qui peuvent être remobilisés, notamment en présence d'eau), peuvent débouiller, c'est-à-dire voir les remblais s'écouler au sein des ouvrages souterrains, avec pour conséquence la formation d'un cratère présentant des caractéristiques proches d'un fontis.

Ce débouillage peut, dans certains cas, s'accompagner ou être suivi d'une rupture des terrains autour de la tête de puits. Il se produit alors un cône d'effondrement dont les dimensions dépendent de l'épaisseur et des caractéristiques géologiques et mécaniques locales des terrains.

La manifestation en surface peut ainsi se restreindre à un cratère de petite taille (quelques mètres de diamètre au maximum) ou générer des désordres plus importants (diamètre de l'ordre d'une dizaine de mètres).

Le principal facteur de prédisposition identifié dépend des caractéristiques de la structure mise en place en tête du puits (plancher, bouchon, etc), en particulier de sa pérennité et de la nature des terrains encaissants.

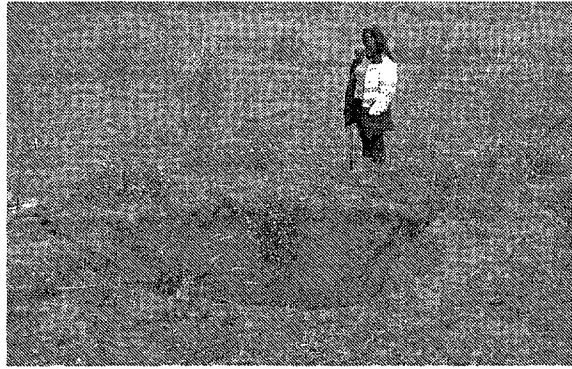


Figure 14. Effondrement d'une tête de puits de marnière en Haute-Normandie.

3.2 Les effondrements généralisés

Les effondrements généralisés sont exclusivement liés aux exploitations partielles, proches de la surface ou plus profondes, comme, par exemple, les exploitations par chambres et piliers abandonnés.

3.2.1 Effets en surface

Les effondrements généralisés, également appelés effondrements en masse, se manifestent par la rupture spontanée ou par saccades, de tout ou partie d'une exploitation, en affectant la stabilité de la surface sur des étendues pouvant atteindre plusieurs hectares. La hauteur d'effondrement affectant la partie centrale est sensiblement proportionnelle à l'ouverture exploitée et au taux de défrètement et peut atteindre plusieurs mètres. Cette zone centrale est bordée par des fractures franches, ouvertes et sub-verticales, délimitant des « marches d'escalier ». Les conséquences peuvent, ainsi, s'avérer très dommageables pour les personnes et les biens situés en surface.



Figure 15. Effondrement généralisé à l'aplomb d'une carrière de craie (Indre-et-Loire).

Ils traduisent une instabilité d'ensemble de l'exploitation résultant généralement d'une extraction trop intensive. Ce sont des événements heureusement très rares mais dont les conséquences sont particulièrement graves en raison de la brutalité du phénomène. Ils peuvent aussi s'accompagner de secousses vibratoires du sol, parfois détectables à des centaines de kilomètres du secteur concerné. Ils produisent également un effet de souffle susceptible de projeter, sur de grandes distances, des matériaux par les galeries et les puits ouverts et de mettre en péril les personnes et installations se trouvant à proximité.

Les effondrements généralisés peuvent affecter des exploitations relativement profondes, comparativement aux effondrements localisés. Leur développement exige également une extension horizontale des travaux suffisante au regard de leur profondeur.

3.2.2 Mécanismes initiateurs

- Rupture en chaîne des piliers par écrasement

C'est le mode de rupture le plus classique des carrières souterraines anciennes comportant de nombreux piliers sous-dimensionnés ou dimensionnés pour le court terme.

La déstabilisation d'un grand nombre de piliers ne se traduit pas inéluctablement par un effondrement brutal accompagné d'une secousse vibratoire importante. L'instabilité peut résulter d'une rupture progressive « en chaîne » des piliers adjacents.

Ce type de manifestation, exige que les piliers aient, dans leur grande majorité, atteint un « état-limite » de stabilité (proche de la ruine). L'évolution d'un facteur déclenchant (eau, altération, vieillissement, surcharge, etc.) peut alors suffire à initier la rupture d'une partie des piliers. En se ruinant, ces derniers induisent un report de charge sur les piliers voisins qui se rompent, à leur tour. Le recouvrement s'effondre alors en suivant le front de rupture souterrain. La cinétique de l'effondrement (quelques minutes à quelques heures) suffit à rendre ce phénomène potentiellement très dangereux pour les personnes et les biens situés dans son emprise lorsque l'amplitude des mouvements prévus en surface est importante (catastrophe de Clamart et Issy-les-Moulineaux (92), en 1961).

La prédisposition à la rupture de l'ouvrage souterrain dépend principalement :

- des contraintes s'exerçant au sein des piliers, tributaires notamment du taux de défrèvement, de la profondeur des travaux et des conditions d'exploitation des secteurs adjacents à la zone considérée ;
- de géométries particulières des structures, défavorables à la stabilité (piliers de fort élancement, mauvaises superposition des piliers, etc.) ;
- de l'absence de gros piliers faisant « piliers barrières », susceptibles de bloquer la propagation d'un front d'effondrement ;
- de la sensibilité du site, comme par exemple : la présence d'eau dans un milieu poreux ou altérable, l'existence de nombreux accidents structuraux, tels que les diaclases, ou de phénomènes de dissolution tels que les karsts, etc.



Figure 16. Carrière de craie instable montrant de gros piliers fortement dégradés (Indre-et-Loire).

- L'effondrement brutal de piliers abandonnés résultant d'une rupture du toit

Les effondrements brutaux exigent une combinaison de critères défavorables à la stabilité d'ensemble qui repose sur une rupture simultanée des piliers et des terrains de recouvrement marqués par la présence de bancs raides.

Sous l'effet du temps ou d'une sollicitation différée, les bancs raides du toit peuvent atteindre leur limite élastique et fléchir de manière excessive. La déflexion du toit transmet une surcharge aux piliers, généralement sous-dimensionnés, qui se retrouvent brutalement soumis à l'intégralité du poids du recouvrement. Les piliers peuvent se rompre alors de manière simultanée en entraînant la rupture du recouvrement, par cisaillement le long des bords fermes, dans un mouvement brutal et spontané.

La prédisposition du site à ce phénomène exige, généralement, deux conditions :

- une configuration d'exploitation « fragile » : l'existence de vides importants et la présence de structures peu robustes (piliers sous-dimensionnés, trop élancés, ou mal superposés) sont autant de paramètres de prédisposition favorables à une rupture en masse des cavités.
- une concomitance de la rupture des piliers et de celle des terrains de recouvrement : ce phénomène se développe préférentiellement en présence d'un (ou plusieurs) horizon(s) raide(s) dans le recouvrement. Cette raideur, permet de reporter, en tout ou partie, la charge des terrains de surface sur les bords fermes, ce qui soulage (temporairement) les piliers et autorise, indirectement, une exploitation excessive avec un sous-dimensionnement des piliers.

Ce type de mécanisme est probablement le plus dangereux car le plus difficilement identifiable : les observations d'amorce de rupture sont souvent rares et les signes précurseurs de l'événement trop tardifs (éclatements de roches, émissions acoustiques).

- Rupture des piliers par cisaillement ou par traction

Certaines configurations particulières de site peuvent modifier la répartition et l'état des contraintes, et consécutivement le mode de rupture (exploitation sous versant, gisement penté, etc.). La contrainte principale est une pure compression, c'est-à-dire sans effort de cisaillement, ni de traction. Il n'en est pas de même si le champ des contraintes principales est dévié. Dans des conditions d'exploitation très particulières, la rupture des piliers par cisaillement ou traction peut intervenir avec des sollicitations très inférieures à la résistance à la compression uniaxiale du matériau.

La prédisposition à la rupture du site est directement liée à la configuration observée :

- la présence d'un versant à l'aplomb d'une carrière modifie sensiblement la répartition des contraintes naturelles dans le massif, ce qui induit une déviation des contraintes principales vers la pente. Plus la déviation des contraintes est forte, plus la contrainte de cisaillement est importante et susceptible de provoquer la ruine (effondrement de la carrière de Champagnole en 1964). Ce mode de rupture est souvent observable sur des piliers en bordure d'exploitation, à proximité des entrées.
- en gisement penté, du fait du pendage, les exploitations présentent souvent des piliers obliques. Si la contrainte principale demeure verticale, elle forme un angle avec les axes des piliers. Les contraintes de traction et de cisaillement qui se développent dans les piliers, les planches intercalaires et les voûtes de galeries peuvent alors devenir prépondérantes.
- une exploitation découpant des piliers formés par plusieurs bancs d'épaisseur et de résistance très différentes (type pilier « sandwich », au comportement plastique) peut mener à des ruptures de piliers par un déplacement différentiel des bancs. Les bancs les plus résistants peuvent alors se rompre en traction par le « fluage » du banc déformable (carrière de la Brasserie, Bois de Vincennes, à Paris).



Figure 17. Effondrement de la carrière de calcaire de Champagnole (Jura).



Figure 18. Carrière en gisement penté dans les Alpes.

- Les instabilités généralisées par rupture du mur

Ce processus se développe dans les carrières comportant des piliers correctement dimensionnés a priori, mais dont la planche au mur est insuffisante ou trop déformable.

Lorsque la couche exploitée est plus résistante que le mur de l'exploitation, les piliers, sans se rompre, lui transmettent les sollicitations qui leur sont appliquées ; les bancs du mur sont soumis à un poinçonnement au droit des piliers. Les piliers peuvent alors « se dérober » par enfoncement dans le mu, et entraîner le recouvrement dans leur descente.



Figure 19. Phénomène important de soufflage du mur (carrière de gypse du Jura).

4. Conclusion : conséquences pour les personnes

La gravité des phénomènes de mouvements de terrain dépend, outre de leur ampleur, de leur soudaineté et de leur imprévisibilité : c'est le cas d'un fontis provoqué par l'entraînement de sables vers une cavité plus profonde ou le cas d'un effondrement localisé de la surface induit par la rupture d'un pilier entraînant le toit dans sa ruine ou encore de l'effondrement généralisé d'une carrière.

Deux enquêtes, portant sur la sinistralité des événements¹, montrent que la très grande majorité des accidents recensés sont du type effondrement localisé (cratères de quelques mètres à quelques dizaines de mètres de diamètre).

Les effondrements localisés, le plus souvent de type fontis, sont fréquents mais rarement meurtriers. Lorsqu'ils le sont, ils provoquent un faible nombre de victimes, 1 ou 2 le plus souvent. On recense, en moyenne, 0,6 victime/an et 1,3 victimes/événement environ, pour la période 1962-2002. Parmi les derniers accidents connus, on note celui de Chanteloup-les-Vignes (78) en 1991 (un fontis provenant d'une carrière de gypse abandonnée a provoqué la mort d'une personne) et le plus récent, celui de la Neuville-sur-Autoué (Eure) qui fit une victime, suite à l'effondrement d'une marnière en 2001.

Les effondrements généralisés sur un à plusieurs hectares sont heureusement très rares mais très meurtriers (accidents collectifs) : 4 accidents connus depuis 1871, de carrières abandonnées ou en activité, faisant au total 66 tués et 58 blessés.

Un exemple dramatique est celui de l'accident de Clamart et Issy-les-Moulineaux (92) en 1961 : l'effondrement d'une ancienne carrière de craie, exploitée sur plusieurs niveaux, a affecté une superficie de 3 ha et entraîné en particulier la destruction d'une vingtaine de pavillons, d'une usine, et de nombreux dégâts mobiliers et immobiliers faisant 21 morts et 50 blessés.

5. Références bibliographiques

TRITSCH J.-J., TOULEMONT M., DURVILLE J.-L., POTHERAT P. 2002. Guide technique : Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines. *Collection Environnement – Risques naturels, LCPC/INERIS/MATE*, 130 pages.

TRITSCH J.-J., DURVILLE J.-L., POTHERAT P. 2004. Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines : un guide technique. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie*, Lille, pp. 493-502.

SEMINAIRE – Carrières souterraines abandonnées, Risques et prévention – 1993. Synthèse des travaux du séminaire de Nainville-les-Roches des 8, 9, 10 décembre 1993, *Bull. AIGI* n° 51, pp. 91-137.

HABIB P. 2004. La rupture différée en mécanique des roches. *Revue Française de Géotechnique*, n° 108, pp. 71-74.

¹ Enquêtes menées par la Direction des Mines du Ministère de l'Industrie (en 1964) et la Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (en 1999)