



HAL
open science

Évaluation du risque d'instabilité en surface à l'aplomb d'une ancienne carrière souterraine. Principes d'une analyse par configurations types.

Christophe Didier, Jean-Jacques Tritsch, Jean-Marc Watelet, A. Armangue

► To cite this version:

Christophe Didier, Jean-Jacques Tritsch, Jean-Marc Watelet, A. Armangue. Évaluation du risque d'instabilité en surface à l'aplomb d'une ancienne carrière souterraine. Principes d'une analyse par configurations types.. 9. Congrès International de Mécanique des Roches, Aug 1999, Paris, France. pp.9-14. ineris-00972172

HAL Id: ineris-00972172

<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00972172>

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.

Evaluation du risque d'instabilité en surface à l'aplomb d'une ancienne carrière souterraine. Principes d'une analyse par configurations types.

Surface subsidence hazard and risk assessment above an old underground gypsum mine.
Principles of an analysis based on representative configurations.

Berechnung der Bodenbewegungsgefahr über einer Gipsgrube.

Prinzipien einer Risikoanalyse nach Untersuchung von Standardkonfigurationen.

C. DIDIER, J.J. TRITSCH, J.M. WATELET, Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques,
Verneuil-en-Halatte, France.

A. ARMANGUE, Gypse SAMC, Cormeille-en-Parisis, France.

RÉSUMÉ: L'INERIS a développé une technique d'évaluation de l'aléa « mouvement de terrain » au surplomb d'anciennes cavités souterraines. Cette technique s'appuie sur la définition de configurations types représentatives des différents secteurs d'exploitation étudiés. Chaque configuration fait l'objet d'une analyse spécifique visant à déterminer les différents scénarios de rupture possibles et les conséquences prévisibles en surface. En étendant les résultats de cette analyse à l'ensemble des secteurs présentant une configuration sensiblement similaire, il est possible d'établir une cartographie globale de l'aléa en surface. La démarche est appliquée à une carrière de gypse située dans l'Est de la France.

ZUSAMMENFASSUNG: INERIS hat eine Methode zur Risikoanalyse von Bodenbewegungen über unterirdischen Hohlräumen entwickelt. Diese Technik basiert auf der Definition von sogenannten Standardkonfigurationen die die Charakteristiken der verschiedenen, zu untersuchenden Sektoren, repräsentieren. Jede Standardkonfiguration wird dann individuell auf Bodenbewegungsgefahren sowie deren Konsequenzen auf der Oberfläche hin untersucht. Die Resultate dieser individuellen Risikoanalysen werden dann auf die Sektoren ausdehnt, die weitgehend identische Charakteristiken aufweisen. So ist es möglich, eine auf den gesamten zu untersuchenden Sektor eint globale herzustellen. In diesem Bericht beschreiben die Autoren die Anwendung dieser Methode an einer im Osten Frankreichs gelegenen Gipsgrube.

ABSTRACT: INERIS developed a method for the assessment of surface subsidence hazard above old mine workings. This method is based on the definition of representative configurations characterised by the main causative factors in inducing instability. Each representative configuration is subjected to a systematic analysis in terms of potential movements that can occur from the mine to the surface. A surface subsidence hazard mapping is completed by extending the results of the analysis to any zone presenting a similar configuration. This method is applied for the assessment of old gypsum mine workings located in the East of France.

1 EXTENDED SUMMARY

Classical hazard and risk assessment methods become quite tedious and inaccurate when they deal with surface instabilities resulting from particularly extended old mine workings. INERIS developed a method based on the analysis of the representative configurations characterised by the main factors that can induce instability. By the use of this method, a risk assessment map was plotted for an area extended over 330 hectares, overlying old gypsum mine workings located in the East of France. The predominant benefit of this method consisted in the definition the main representative configurations that characterise the many different cases existing in this particular site. It also enables to limit site investigations.

Each representative configuration is analysed under the view of the movements that can occur from the mine to the surface. For every configuration the analysis consists on the specification of the corresponding mine sections, the various instabilities already observed in these specified sections and the various movements that could affect the old workings.

Hazard refers to the probability that a danger of a given intensity occurs, given a particular site, during a given period. Hence, hazard is the crossing result of the intensity of

a potential danger with its probability of occurrence. Four classes of intensity have been defined (subsidence, small sinkholes, larger sinkholes, extended collapses). The probability of occurrence (negligible to high) is based on the factors describing the sensitivity of the site (or the mine section) to a given type of instability.

For each configuration, a probability of occurrence is connected to every class of intensity. With the use of a risk assessment matrix, the crossing of these two parameters define one of the four hazard levels (negligible to high) that can affect every type of instability. The greatest hazard level is systematically considered to be the predominant hazard of the studied configuration.

When all representative configurations have been subjected to this analysis, a map giving the surface subsidence hazard areas is plotted. Each representative configuration is connected to a hazard level (resulting from the above analysis) and plotted on the hazard area map. Such a map could be used as a reference document for immediate public safety as well as for Land Use Planning purposes.

As far as the gypsum mine in the east of France is concerned, most of the areas correspond to a low to moderate hazard level. Few zones have a high hazard level (moderate to high probability of occurrence of an extended collapse).

The method developed by INERIS appears to be fairly adapted to the surface subsidence hazard assessment of this particular mine. It has been used in other geologic and mining hazard assessments, and for the assessment of other type of hazards (landslides, rock falls,...) as well. Resulting from a need to rationalise and to give adapted tools to the expert dealing in the risk evaluation of extended and complex sites, this method facilitates the evaluation procedures and guarantees a sufficient accuracy that allow the right effective preventive decisions to be made.

2 INTRODUCTION

L'évaluation du risque d'instabilité de la surface qui résulte de la présence d'anciennes carrières souterraines présentant des conditions de site (géologie, topographie...) et d'exploitation (méthode d'exploitation, schéma de dimensionnement...) très variées, conduit rapidement à une analyse très délicate.

- ⇒ Lorsque la surface exploitée excède plusieurs dizaines d'hectares, il devient en effet souvent très difficile d'envisager une analyse de la stabilité de chaque secteur s'appuyant sur une reconnaissance exhaustive et détaillée du toit, des piliers et du mur de la carrière (sans présumer de l'inaccessibilité de certains secteurs parfois étendus de l'exploitation).
- ⇒ La globalisation de l'analyse qui consiste à uniformiser l'ensemble de l'exploitation est une approche simplificatrice qui n'est guère plus satisfaisante. Pour ne pas bloquer systématiquement tout projet de développement et l'urbanisation de la surface, il est en effet indispensable d'identifier, avec une précision satisfaisante, les zones susceptibles de présenter à terme d'éventuels dangers pour les personnes et les biens existants en surface.

En collaboration directe avec la société Gypse SAMC, l'INERIS a développé une alternative aux deux méthodes d'évaluation classiquement mises en oeuvre et sommairement présentées ci-dessus. L'objectif de la méthode d'analyse mise au point consiste à définir un certain nombre de configurations types établies à l'aide des paramètres qui caractérisent le mieux le comportement des exploitations souterraines et l'évolution à long terme de leur stabilité.

Cette méthode a été développée et testée sur le site d'une ancienne carrière souterraine de gypse triasique située dans l'Est de la France (figure 1). Le gisement, situé sous une butte orientée globalement Nord-Sud, est constitué d'un ensemble de quatre couches gypseuses, séparées par de fines alternances de dolomie et de marnes gypseuses, dont seules deux couches ont été exploitées (le banc supérieur appelé banc n°1 et le banc n°3).

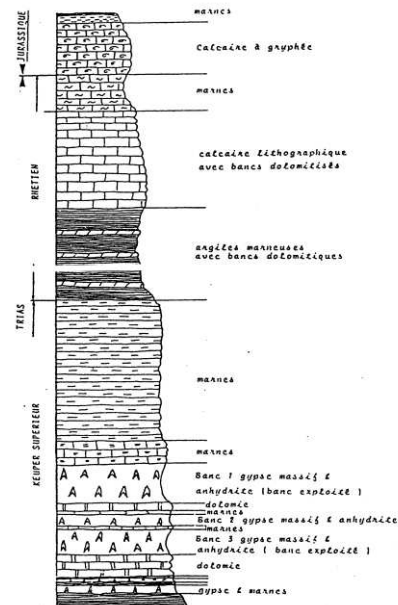


Figure 1 : Log stratigraphique du gisement.

La superficie de la carrière est particulièrement étendue (330 ha) et l'extraction du gypse a débuté dès la seconde moitié du siècle dernier. L'exploitation est aujourd'hui constituée de secteurs encore en activité, d'anciens travaux demeurant accessibles et de quartiers désormais inaccessibles mais pour lesquels on dispose de relevés sur d'anciens plans d'archives.

Les différents quartiers de la carrière présentent des contextes très différents les uns des autres. Outre un environnement géologique, géomorphologique et tectonique assez perturbé (présence de failles avec ou sans rejet, existence de zones de dissolution du gypse...), l'évolution et le perfectionnement des techniques d'exploitation ont, avec le temps, modifié progressivement les schémas d'exploitation et de dimensionnement des piliers (nature de la couche exploitée, existence d'exploitations multi-niveaux, précision de la superposition des piliers...).

Cette importante variabilité des secteurs de la carrière nécessite (et permet) que l'analyse de stabilité soit menée par configurations types capables de caractériser des contextes géologiques et d'exploitation bien individualisés.

3 PRINCIPES D'UNE ANALYSE PAR CONFIGURATIONS TYPES

3.1 Identification des principaux paramètres physiques et d'exploitation à prendre en compte dans l'analyse

Pour définir les différentes configurations types capables de caractériser les secteurs représentatifs de l'exploitation, la première étape fondamentale de l'analyse consiste à identifier les principaux paramètres susceptibles d'influer sur le comportement à long terme des cavités ainsi que sur la nature et la probabilité d'apparition d'éventuels désordres en surface.

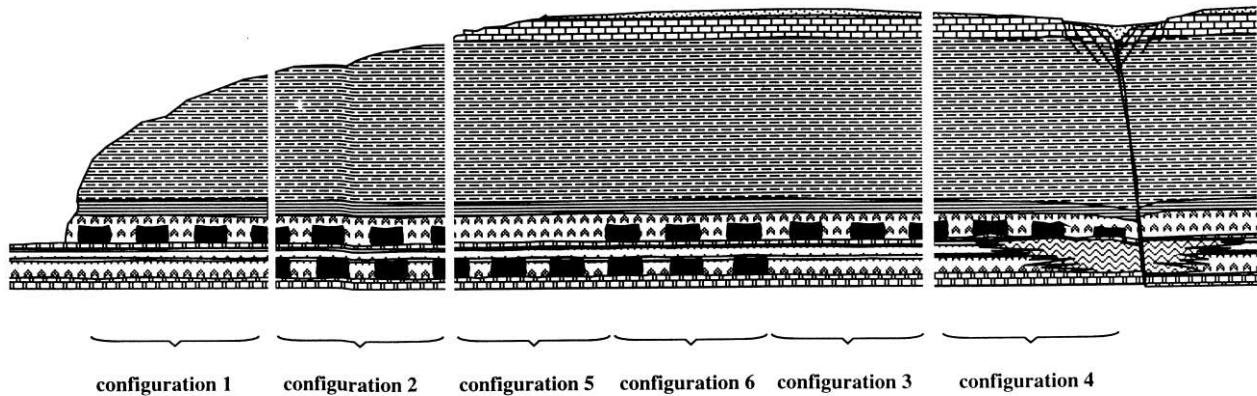


Figure 2 : Coupe schématique des 6 configurations types retenues.

Le recensement de ces paramètres exige une visite et une analyse informative détaillées du site qui permettent de recenser les différents désordres ayant affecté la surface par le passé et de déterminer les zones dans lesquelles ces désordres se sont préférentiellement développés.

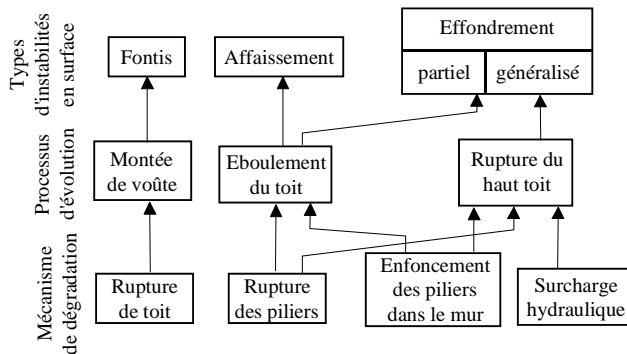


Tableau 1 : Principaux scénarios de rupture.

Une démarche d'expertise permet alors d'identifier les scénarios de rupture susceptibles d'affecter les trois principales structures assurant la stabilité des cavités souterraines : les piliers, le toit et le mur. Le tableau 1 synthétise les principales causes des désordres affectant le plus classiquement les carrières souterraines. Lorsque les différents scénarios de rupture susceptibles de se développer sur le site ont pu être identifiés, on détermine les principales caractéristiques physiques et d'exploitation du site capables d'influer sur le développement des instabilités (épaisseur et nature des terrains de recouvrement, schéma de dimensionnement...).

Dans le cas de la carrière étudiée, trois paramètres fondamentaux ont été retenus.

• La nature et l'épaisseur du recouvrement.

La rétro-analyse des différents désordres ayant affecté la surface par le passé a mis en évidence l'importance de la nature et de l'épaisseur des terrains de recouvrement situés à l'aplomb des exploitations souterraines. L'identification des mécanismes de rupture susceptibles d'affecter les travaux et la modélisation analytique de la propaga-

tion du phénomène de fontis au sein des marnes supragypseuses ont permis de différencier deux types d'exploitation (figure 2) :

- les travaux situés à flanc de coteau sous un recouvrement exclusivement marneux,
- les travaux situés sous un entablement matérialisé par la présence à proximité de la surface d'une dalle calcaire.

• Le nombre et la nature des bancs exploités.

Le second paramètre correspond au schéma d'exploitation des différentes couches de gypse. Certains secteurs ont été exploités par niveaux superposés. Dans d'autres secteurs, en revanche, l'exploitation n'a pu être menée qu'en un seul niveau : parfois le niveau supérieur (banc 1), parfois le niveau inférieur (banc 3) (figure 2).

• Les instabilités potentielles du mur de la carrière.

De telles instabilités, très caractéristiques, semblent se développer préférentiellement dans deux types de configurations : à proximité des grandes failles inverses affectant le gisement ainsi que dans les zones exploitées par petits piliers situés sous un fort recouvrement et mettant en évidence la dissolution des couches inférieures de gypse et de dolomie.

3.2 Etablissement des configurations types

Le croisement entre eux des paramètres fondamentaux identifiés dans la première phase de l'analyse permet de définir des configurations types regroupant des secteurs homogènes entre eux. Par volonté de simplification, il est préférable de limiter le nombre de configurations types. Toutefois, à l'intérieur de ces configurations globales, des différenciations peuvent exister.

Pour la carrière étudiée, six configurations types, numérotées de 1 à 6, ont été établies à partir de deux contextes géomorphologiques différents. La démarche d'identification des configuration est précisée par

l'organigramme de la figure 3, les configurations étant pour leur part illustrées sur la figure 2.

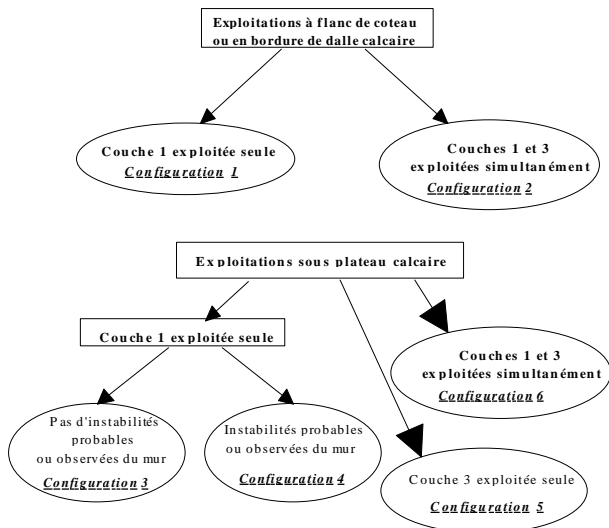


Figure 3 : Etablissement des configurations types.

En conclusion, les différentes configurations retenues sont les suivantes :

- Zones à flanc de coteau ou en bordure de dalle calcaire de surface :
 - couche 1 exploitée seule (1) ;
 - couches 1 et 3 exploitées en niveaux superposés (2) ;
- Zones exploitées sous une dalle calcaire en surface :
 - couche 1 exploitée seule sans instabilité du mur (3) ;
 - couche 1 exploitée seule avec instabilités déclarées ou potentielles du mur (4) ;
 - couche 3 exploitée seule (5) ;
 - couches 1 et 3 exploitées en niveaux superposés (6).

A l'intérieur de chaque configuration, une différenciation a été faite en terme de date d'exploitation : les travaux antérieurs à 1960 ont laissé en place beaucoup plus de petits piliers que les travaux plus récents postérieurs à 1960. La synthèse de la phase préliminaire d'analyse se matérialise par la réalisation d'une cartographie des configurations types permettant de localiser, sur l'ensemble de l'exploitation, les secteurs situés dans des contextes géologiques et d'exploitation globalement homogènes.

3.3 Analyse des instabilités symptomatiques

Pour chaque configuration établie, une analyse systématique de l'évolution des phénomènes d'instabilité prévisibles du fond jusqu'à la surface peut alors être menée. Cette analyse recense l'ensemble des quartiers correspondant à la configuration étudiée, énumère les différents mécanismes d'instabilité susceptibles d'affecter les travaux souterrains (montées de voûte, ruptures de piliers, soufflage du mur...) et définit les différents désordres ayant déjà eu lieu ou susceptibles d'affecter la surface à l'aplomb des quartiers concernés.

3.4 Détermination de l'aléa

L'aléa est un concept spécifique à la terminologie du risque naturel. Il correspond à la probabilité qu'un phénomène se produise sur un site donné, au cours d'une période de référence, en atteignant une intensité ou une gravité qualifiable ou quantifiable. La caractérisation d'un niveau d'aléa repose donc classiquement sur le croisement de l'intensité prévisible du phénomène avec sa probabilité d'occurrence.

Pour chaque configuration type, on évalue l'intensité des phénomènes prévisibles (affaissements, fontis, effondrements localisés, effondrements généralisés) ainsi que la probabilité d'occurrence qui correspond à chacun.

Intensité prévisible des phénomènes

Dans le cas particulier du site étudié, quatre classes d'intensité ont été définies. Elles correspondent essentiellement aux types de manifestations ayant déjà affecté la surface (ou étant susceptibles de l'affecter à terme) et à l'évaluation de leurs conséquences en terme de gravité potentielle des dégâts.

classe 1 : affaissements de faible amplitude.

On parle de « cuvette d'affaissement » lorsque le réajustement des contraintes lié à la présence de vides souterrains se traduit par un fléchissement souple et progressif des terrains sus-jacents.

classe 2 : fontis de petite taille (\varnothing du cratère < 10 m).

On appelle « fontis », un mouvement gravitaire qui résulte de phénomènes d'instabilité affectant le toit d'une exploitation. Ce phénomène se traduit en surface par une dépression topographique plus marquée qu'une cuvette d'affaissement, faisant généralement apparaître des fractures ou des ruptures franches.

classe 3 : effondrements localisés ($\varnothing > 10$ m).

Lorsque les instabilités résultent de la rupture d'un ou de plusieurs petits piliers, le diamètre du cratère en surface est plus important que celui résultant d'un fontis classique. On parle « d'effondrement localisé ». Plus rares que les précédents, les effondrements localisés se développent essentiellement sous un recouvrement rocheux suffisant pour engendrer une sollicitation excessive des piliers.

classe 4 : effondrements spontanés en masse.

Phénomènes exceptionnels, les « effondrements spontanés en masse » résultent de la rupture en chaîne des piliers présents dans un quartier entier de la carrière. Ce type de phénomène engendre un abaissement brutal de la surface, généralement accompagné de fractures et d'une importante libération d'énergie.

La définition de ces classes n'est pas normative. Elle varie d'un site à l'autre suivant les configurations géologiques et d'exploitation.

Probabilité d'occurrence

La détermination de la probabilité d'occurrence des désordres pose le difficile problème de la prévision dans le temps de la rupture des terrains. Si une approche probabiliste semble bien adaptée aux séismes et aux inondations, phénomènes cycliques, les mouvements de terrain sont au

contraire des phénomènes non périodiques qui évoluent de manière quasi-imperceptible durant de longues périodes avant de subir une accélération soudaine. Ils sont donc très difficilement prévisibles.

Plutôt que d'estimer une probabilité d'occurrence correspondant à une période donnée (annuelle, décennale, centennale...), qui laisse une grande place à la subjectivité et à l'incertitude, l'approche de ce concept est menée en terme de prédisposition du site vis-à-vis d'un type donné de rupture.

Cette prédisposition est évaluée en fonction de paramètres caractérisant l'environnement du secteur considéré (épaisseur de recouvrement, présence de failles...) et la technique d'exploitation correspondante (par multi-niveaux, petits piliers...), autant de facteurs exprimant la « sensibilité » du site.

Cinq classes de probabilité d'occurrence sont classiquement définies pour caractériser les phénomènes d'instabilité cités précédemment : nulle à négligeable, très faible, faible, moyenne ou forte.

Pour chaque configuration type, il est alors possible de déterminer une classe de probabilité d'occurrence correspondant aux différents désordres susceptibles d'affecter la surface.

Cette détermination s'appuie sur l'analyse des scénarios et mécanismes de rupture susceptibles d'affecter les cavités souterraines. Une épaisseur de recouvrement importante et la présence d'horizons résistants dans le recouvrement rendra ainsi un site moins sensible à l'apparition de fontis qu'un quartier situé sous un recouvrement exclusivement marneux et de faible épaisseur.

Configuration	Date d'exploitation et type de piliers	Classe d'intensité	Probabilité d'occurrence
Configuration de type 2	Avant 1960 petits piliers assez peu réguliers	Classe 1	Forte
		Classe 2	Forte
		Classe 3	Moyenne
		Classe 4	Faible
	Après 1960 par piliers réguliers	Classe 1	Moyenne
		Classe 2	Moyenne
		Classe 3	Faible
		Classe 4	Très faible
Configuration de type 6	Avant 1960 piliers carrés mal superposés	Classe 1	Forte
		Classe 2	Faible
		Classe 3	Moyenne
		Classe 4	Moyenne
	Après 1960 par piliers carrés	Classe 1	Moyenne
		Classe 2	Faible
		Classe 3	Faible
		Classe 4	Faible
	Après 1960 par piliers longs	Classe 1	Moyenne
		Classe 2	Faible
		Classe 3	Très faible
		Classe 4	Très faible

Tableau 2 : Détermination de la classe de probabilité d'occurrence correspondant à chaque type d'instabilité.

A l'inverse, les zones les plus sensibles au risque d'effondrement en masse sont les secteurs de petits piliers mal superposés et situés sous fort recouvrement. L'application de la démarche aux configurations 2 et 6 de l'exploitation étudiée est illustrée dans le tableau 2.

Hierarchisation de l'aléa

En s'appuyant sur cette démarche d'analyse, on obtient enfin les différents niveaux d'aléa en croisant les intensités des désordres potentiels avec leur probabilité d'occurrence correspondante. Le tableau 3 fournit le principe du croisement des paramètres :

<i>Probabilité d'occurrence</i>	très faible	faible	moyenne	forte
<i>Intensité</i>				
Classe 1 Affaissements	négligeable	faible	faible	faible
Classe 2 Fontis (Ø<10 m)	faible	faible	moyen	moyen
Classe 3 Fontis (Ø>10 m)	faible	moyen	moyen	fort
Classe 4 Effondrement	faible	moyen	fort	fort

Tableau 3 : Principe de hiérarchisation de l'aléa.

Par mesure conservatoire, lorsqu'un secteur est potentiellement affecté par plusieurs types d'instabilité, on retient le niveau d'aléa le plus élevé.

L'application de cette démarche aux secteurs correspondant à la configuration 2 est illustrée dans le tableau 4. Le niveau d'aléa retenu correspond à un aléa moyen.

Date d'exploitation	Classe d'intensité	Probabilité d'occurrence	Niveau d'aléa global
Avant 1960 petits piliers assez peu réguliers	Classe 1	Forte	Faible
	Classe 2	Forte	Moyen
	Classe 3	Moyenne	Moyen
	Classe 4	Faible	Moyen
Après 1960 par piliers réguliers	Classe 1	Moyenne	Faible
	Classe 2	Moyenne	Faible
	Classe 3	Faible	Moyen
	Classe 4	Très faible	Faible

Tableau 4 : Hiérarchisation de l'aléa.
Cas de la configuration type n°2.

3.5 Cartographie de l'aléa

Une fois la démarche appliquée à l'ensemble des configurations, on reporte, à l'aide de la carte des configurations types, les différentes classes d'aléa déterminées sur un fond topographique afin de réaliser une cartographie de l'aléa couvrant l'ensemble des secteurs exploités (figure 4).

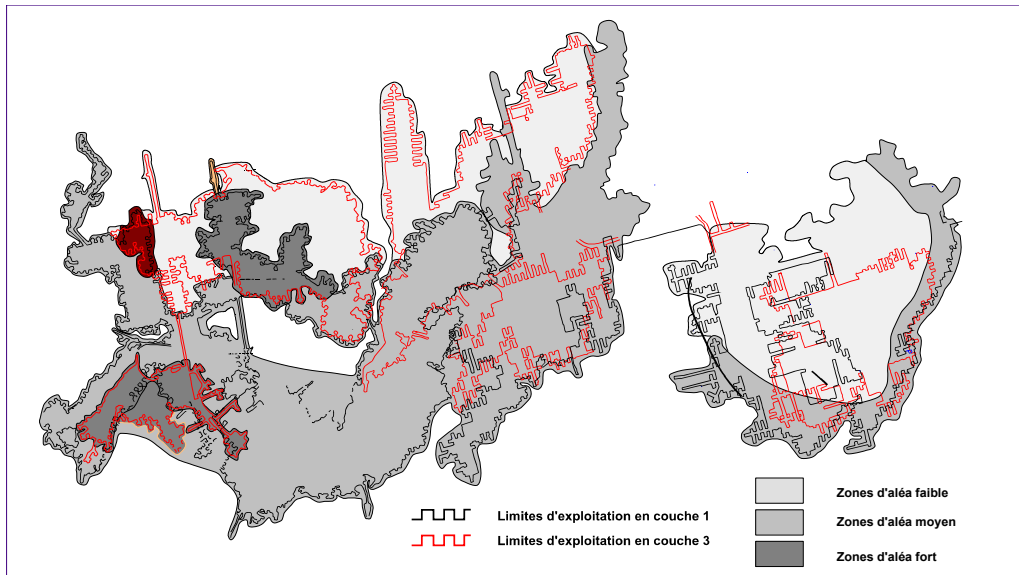


Figure 4 : Cartographie de l'aléa mouvement de terrain aux droit des anciennes cavités souterraines.

Dans le cas de la carrière de gypse du Keuper étudiée, la majorité des secteurs correspond à des niveaux d'aléa faibles (essentiellement risques d'affaissement) ou moyens (probabilité élevée d'apparition de fontis de petite taille mais probabilité faible d'effondrement de grande ampleur). Seules quelques zones peu étendues mettent en évidence un niveau d'aléa fort (probabilité moyenne à élevée d'effondrement de grande extension).

3.6 Valorisation de la hiérarchisation de l'aléa

La démarche d'analyse par configurations types prend tout son intérêt dès lors qu'il s'agit de valoriser la phase de hiérarchisation de l'aléa par la définition des mesures qu'il convient de mettre en oeuvre pour garantir une mise en sécurité satisfaisante des personnes et des biens et/ou des principes préventifs relatifs à l'utilisation future de la surface.

La localisation de secteurs homogènes sensibles aux mêmes phénomènes d'instabilité permet d'identifier rapidement les infrastructures sensibles de surface situées dans des zones à risque potentiel. Ces cas particuliers, lorsqu'ils existent, peuvent alors donner lieu à une étude spécifique permettant de définir les principes de surveillance, de comblement ou de confortement qu'il convient d'envisager.

De même, la démarche permet d'identifier aisément les zones les mieux adaptées à d'éventuels projets d'urbanisation (secteurs non soumis à des instabilités ou sensibles à des désordres de faible intensité) et les zones au sein desquelles il semble préférable de geler, a priori, tout projet de développement de la surface (secteurs sensibles à des désordres pouvant s'avérer dangereux pour les personnes et les biens situés dans leur emprise).

4 CONCLUSIONS - PERSPECTIVES

La méthode d'analyse de l'aléa « mouvements de terrain » mise au point pour l'étude des conséquences en surface liées à l'existence d'une ancienne carrière souterraine de

gypse s'est avérée bien adaptée aux objectifs à atteindre et a permis la réalisation d'un zonage capable d'identifier les secteurs les plus sensibles au risque d'apparition de désordres en surface.

Etablie pour une problématique et un environnement spécifiques, cette technique d'analyse a ensuite pu être appliquée à d'autres sites (contextes géologiques et d'exploitation différents) et d'autres problématiques (stabilité de front rocheux, glissement de pente).

Elle permet de clarifier l'expertise et de raccourcir sa durée de mise en oeuvre (puisque'elle n'exige pas une visite exhaustive de tous les secteurs) tout en garantissant un niveau de précision indispensable aux études d'évaluation des risques.

Elle présente également l'avantage de rationaliser, autant que faire se peut, la démarche d'expertise ce qui facilite par la suite sa restitution aux personnes non spécialistes mais concernées par les retombées de l'analyse.

Particulièrement bien adaptée à une démarche d'analyse de type Plan de Prévention des Risques naturels prévisibles (PPR), cette démarche peut s'avérer pertinente lorsque l'exploitation étudiée est de grande extension et présente des secteurs très différents les uns des autres.

Bibliographie

- J.P. JOSIEN, 1995. Carrières souterraines abandonnées. Risques et prévention. Diagnostic et caractérisation des aléas. Synthèse des travaux du Séminaire de Nainville-les-Roches.
- J.J. TRITSCH, C. DIDIER, 1995. Guider méthodologique pour l'identification et la prévision des mouvements de terrain. Rapport de recherche INERIS pour le compte du Ministère de l'Environnement.
- J.M. WATELET, J.J. TRITSCH, 1996. Amélioration de la méthodologie du diagnostic de stabilité des carrières souterraines complexes. Rapport de recherche INERIS pour le compte du Ministère de l'Environnement