

ETABLISSEMENTS SABOULARD

PRAT-BONREPAUX

**Mise en sécurité de la carrière
souterraine de gypse**

Etude géologique générale

dossier 03.09.027 du 22 février 2003

DESTINATAIRES

ETABLISSEMENTS SABOULARD

73, route des Pyrénées

31 220 MARTES-TOLOSANE

à l'attention de Monsieur SABOULARD.....1 ex.

* Cabinet ECTARE

Centre commercial Belbèze - B.P. 8

31 240 SAINT JEAN

à l'attention de Monsieur FARRUGIA..... 1 ex. + 1 repro.

• **GEOBILAN**.....1 ex.

SOMMAIRE

RAPPORT

- 1/ Cadre de notre intervention
- 2/ Cadre géologique
- 3/ Données géotechniques
- 4/ Mise en sécurité de la carrière
 - 4.1/ Données générales
 - 4.2/ Plan de zonage des risques
 - 4.3/ Mesures confortatives
- 5/ Conclusion

ANNEXE

- 1/ Plan de zonage au 1/2500
- 2/ Dossier INERIS du 14 février 1991 (extraits)

1/ CADRE DE NOTRE INTERVENTION

A la demande des Etablissements SABOULARD, la société GEOBILAN a procédé à l'étude géologique générale de la mise en sécurité de la carrière souterraine de gypse située sur les communes de Prat-Bonrepaux et de Mercenac.

La carrière d'une quinzaine d'hectares a cessé toute activité depuis le 22 décembre 2000 et sa demande de réouverture a été rejetée par arrêté préfectoral du 10 décembre 2002.

La mission de type G12 qui nous a été confiée par acceptation du devis n° 03.31.024 du 4 février 2003 a été faite par levés géologiques visuels, analyse des archives INERIS et de divers plans, sans sondage, pour :

- préciser le cadre géologique du site,
- Actualiser le zonage des terrains de surface concernés par l'exploitation souterraine,
- Estimer le risque subi par l'habitation existante située au-dessus de la carrière,
- Proposer, si cela s'avère nécessaire, des principes confortatifs pour l'habitation.

Les dossiers INERIS qui nous ont été communiqués sont référencés GAI-JMW/JS71.6139/R01 (14/02/91), DRS-00-26524/R01 (24/12/00) et DRS-01-26524/R02 (23/01/01).

Les plans utilisés dans cette étude (dossier 98-394) ont été établis et mis à jour en décembre 2000 par J.P. VINCENT, géomètre expert. Le cabinet ECTARE a également communiqué un extrait du plan cadastral au 1/2500 sur lequel l'exploitation a été reportée ainsi que l'épaisseur du recouvrement, par tranche de 5 mètres.

2/ CADRE GEOLOGIQUE

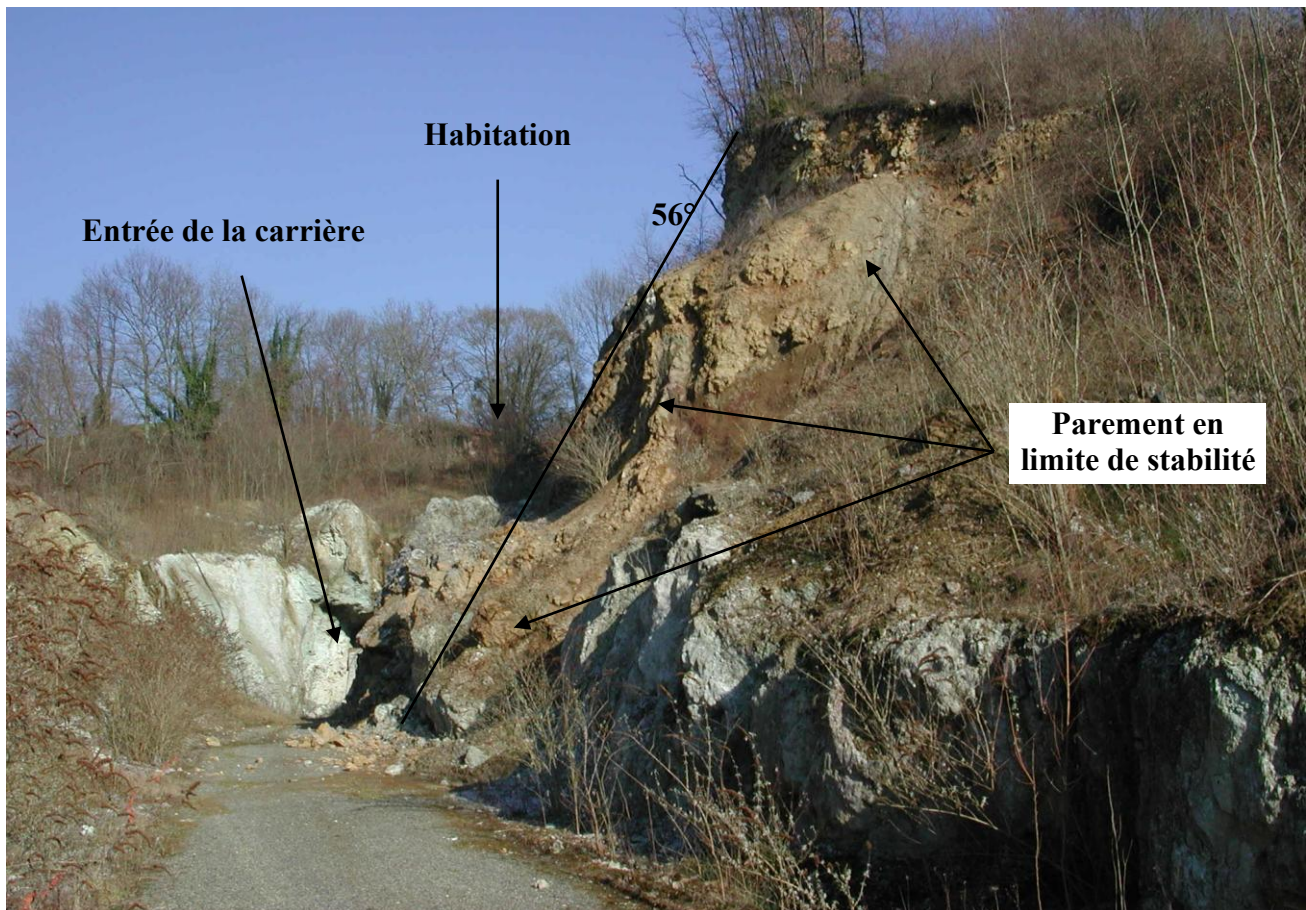
La carrière souterraine exploite les formations de gypse du Trias dans une zone sismique classée Ib.

Les filonnets de gypse sont inclus dans une gangue d'argilite verte à grise. Il y a également des lentilles d'anhydrite grise dans la partie est de l'exploitation.

De grands accidents tectoniques recoupent la carrière sous la forme de fractures, karstifiées ou à remplissage argileux. Ces failles marquent souvent les limites de l'exploitation.

Le gisement proprement-dit a 2 familles de fractures principales orientées N60° à 70° (pendage vers le sud) et N100° à 120°.

Comme le montre la photo ci-dessous, la coupe géologique de la descenderie montre des terrains assez hétérogènes dans le détail.



3/ DONNEES GEOTECHNIQUES

Les caractéristiques mécaniques du gypse ont été déterminées par INERIS par des essais de compression uniaxiale et de traction (Cf. dossier GAI-JMW/JS71.6139/R01 en annexe).

Les essais ont été réalisés en décembre 1990 sur des échantillons de gypse prélevés en quatre points au parement des piliers de la partie récente de l'exploitation.

Ces essais, les seuls qui aient été exécutés récemment dans la carrière, ont servi aux calculs de condition de stabilité de la carrière donnée par INERIS, détaillés dans les trois dossiers cités précédemment.

Les essais de compression uniaxiale sur des éprouvettes $\varnothing$ 36 mm (élancement = 2), avec enregistrement de la courbe effort / déformation, ont apporté les résultats suivants :

- ☞ **Très forte dispersion des résultats**, avec des écarts de 1 à 10 dans les résistances,
- ☞ Comportement du matériau à la rupture de type élastoplastique radoucissant, c'est à dire sans rupture brutale,
- ☞ **Forte sensibilité à l'eau**, avec une augmentation de 150 à 200 % de la résistance mécanique lorsque les échantillons ne sont pas saturés.

INERIS propose alors de conserver deux valeurs corrigées de résistance ultime R_U obtenues statistiquement :

$R_U = 1.8$ MPa en condition saturée (à long terme)

$R_U = 3.5$ MPa en l'absence d'eau (état de la carrière jusqu'en 2000)

INERIS précise que la valeur de 1.8 MPa "*correspond à l'évolution à long terme de la résistance, si l'on ne prend pas garde de se prémunir des venues d'eau en cours d'exploitation*".

4/ MISE EN SECURITE DE LA CARRIERE

Les considérations qui suivent proviennent de l'analyse des dossiers INERIS et des résultats obtenus par les essais de compression uniaxiale données ci-dessus.

4.1/ Données générales

La carrière a une forme allongée, orientée sud-ouest/nord-est, d'environ 750 mètres de longueur pour 300 mètres de largeur maximale.

L'exploitation du gisement par chambres et piliers abandonnés s'est faite en deux phases distinctes, avec des quartiers anciens coté sud-ouest et des quartiers beaucoup plus récents coté nord-est.

Les quartiers anciens, complètement abandonnés depuis une dizaine d'années (en 1990, ils servaient encore d'accès à l'exploitation récente), ont un taux de défrètement élevé ($\cong$ 80%) et un état général mauvais qui s'est traduit par des effondrements en surface, modélisés par les calculs avec un coefficient de sécurité (F) inférieur à 1.

Les quartiers récents, accessibles par une descenderie coté sud-ouest, ont été exploités par piliers carrés de 12 mètres de coté et chambres de 8 mètres de largeur moyenne et 6 à 9 mètres d'ouverture. La hauteur de recouvrement varie de 25 à 50 mètres pour cette partie nord-est de la carrière.

Le taux moyen de défrètement des quartiers récents est de 60 % et leur état général est globalement sain, même s'il y a ponctuellement des arrivées d'eau (ennoyage partiel de certaines parties de la carrière en 2000), principalement dans des zones karstifiées, et des failles à remplissage argileux.

Ces zones faillées argileuses, lorsqu'elles sont rencontrées au fond, entraînent un risque d'effondrement (avec un affaissement de terrain en surface) et, si elles sont importantes, elles marquent l'arrêt de l'exploitation, comme cela a été le cas au "Barbut", en limite nord-est.

En condition non saturée, INERIS a montré que la stabilité générale des quartiers récents est généralement assurée ($F \geq 1.5$ avec une contrainte verticale ≤ 2.25 MPa sur les piliers) mais un surcreusement de 3 mètres augmente l'élancement des piliers et diminue le coefficient de sécurité.

Ainsi, avec $R_U = 3.5$ MPa, une ouverture des chambres de 9 mètres fait passer l'élancement de 0.5 à 0.9 et le coefficient de sécurité F n'est plus que de 1.2, ce qui est assez limite compte tenu des hétérogénéités du gisement.

En condition saturée, dans la même configuration géométrique, **le coefficient de sécurité est inférieur à 1 et la stabilité n'est plus assurée.**

Dans l'état actuel des quartiers récents, selon INERIS, *le risque de rupture généralisé est très faible à négligeable* (il n'est donc pas nul) et *le risque d'effondrement localisé n'est pas à exclure dans les secteurs plus argileux ou plus dégradés.*

Si les caractéristiques mécaniques des matériaux diminuent du fait de leur saturation, il est évident que le risque augmentera énormément et, à long terme, les quartiers récents seront aussi instables que les quartiers anciens.

Comme il est certain que personne ne peut garantir à l'échelle de une ou de plusieurs vies humaines que les quartiers dits "récents" de la carrière ne se satureront pas (les circulations d'eau actuelles en témoignent), le risque d'avoir en surface des effondrements est élevé.

4.2/ Plan de zonage des risques

Pour estimer en surface l'incidence d'un effondrement de l'exploitation sous une couverture de plusieurs dizaines de mètres, plusieurs approches sont possibles :

- ☞ Une approche théorique, prenant en compte l'angle moyen de frottement interne des matériaux, proche de 30 à 35°, par expérience peu réaliste,
- ☞ Une approche pratique, tenant compte des phénomènes actuels, préférable à la première.

Les éléments observables et exploitables sont ainsi actuellement les suivants :

- o La pente déblai de la descenderie, en état d'équilibre limite,
- o L'affaissement de terrain, cartographié 15mx25m au nord-est des quartiers récents, avec environ 40 mètres de recouvrement, correspondant à deux ou trois fois la largeur de la galerie effondrée.

Ces éléments donnent en vraie grandeur une idée de la valeur de la pente de stabilité d'un effondrement, synthétisée ci-dessous :

	Pente minimale	Pente maximale
Descenderie	56°	56°
Affaissement de 15 m ou 25 m de largeur	63°	76°

Par sécurité, nous préconisons de retenir la plus faible des valeurs observées, soit 56°.

Cette pente d'équilibre permet de cartographier en surface l'incidence d'un effondrement de l'exploitation (Cf. plan au 1/2500 annexe 1), fonction de la hauteur de recouvrement.

Hauteur de recouvrement	Marge de sécurité (reculement) en surface	
	Calculée avec un angle de 56°	Préconisée (par arrondi)
25 à 30 m	19 m	20 m
30 à 35 m	22 m	25 m
35 à 40 m	25 m	30 m
40 à 45 m	29 m	30 m
45 à 50 m	32 m	35 m

Pour tenir compte des incertitudes de levés, l'incidence des quartiers anciens est fixée à 30 mètres.

Le plan de zonage au 1/2500 diffère en fait assez peu de celui établi par INERIS en janvier 2001, avec une incidence constante de 30 mètres, si ce n'est qu'à très long terme, le risque d'effondrement en masse (Z1) est généralisé à toute la carrière si aucune mesure confortative n'est prise.

Les terrains situés au-dessus et entre 20 et 35 m de la carrière, concernés par un risque d'effondrement figurant sur le plan cadastral au 1/25000, doivent être classés en zone inconstructible.

4.3/ Mesures confortatives

Comme le signale à juste titre INERIS, la seule mesure confortative efficace est la suppression des cavités par foudroyage ou remplissage.

Le cerclage ou le boulonnage des piliers ne permet en effet pas d'éviter à très long terme leur saturation et la diminution par deux de leur résistance.

La présence de chemins carrossés et d'une maison d'habitation, 40 à 45 mètres au-dessus des quartiers récents, pose à terme un problème de sécurité.

- o A court et moyen terme, le risque d'effondrement est négligeable mais pas nul.
- o A long et très long terme, le risque d'effondrement est certain et il faut dès à présent envisager des mesures confortatives.

Pour éviter tout mouvement sous la maison, les solutions confortatives habituelles sont soit un remplissage des galeries avec un clavage, soit un renforcement des piliers.

Au fond, avec une pente de 56°, la surface de l'exploitation ayant potentiellement une incidence sur la maison est proche de 3000 m² avec un taux de défrètement de 60 % soit, avec une ouverture moyenne des galeries de 6.5 mètres, un volume de vides voisin de 20 000 m³.

Le remplissage des vides nécessiterait ainsi la mise en œuvre d'environ 36 000 tonnes (densité non compactée estimée à 18 kN/m³) de matériaux insensibles à l'eau, de type rocheux pour être mis en œuvre sans compactage.

Un remplissage méticuleux de la carrière sur 6 à 9 mètres de hauteur constitue cependant un travail très délicat à réaliser.

Pour éviter tout risque de mouvement au toit, il faudra aussi mettre en œuvre un clavage une fois obtenu le tassement du remblai de remplissage sous son propre poids.

Ce clavage pourra se faire avec 1500 à 2000 m³ de béton maigre de type B15 à B20, selon l'importance des vides à combler.

Le renforcement des piliers en solution pérenne peut s'envisager par projection de béton sur du treillis soudé de manière à former une coque limitant la dégradation du gypse et susceptible de reprendre une partie des contraintes verticales.

Avec des piliers carrés de 12 m de côté et de 6.5 m de hauteur, la surface unitaire à renforcer par une épaisseur minimale de béton de 0.20 mètre serait de 312 m².

En considérant qu'il y aurait sous l'habitation 15 piliers à renforcer par ce procédé, la surface totale à projeter sur deux nappes de treillis soudé ST10 et ST35 serait de 4680 m², à confirmer plus précisément si cette solution est adoptée.

Cette confortation par travaux dits "spéciaux" ne résout cependant que les problèmes de dégradation des piliers et pas ceux du toit, rendant la méthode "béton projeté" moins efficace qu'un remplissage sur le très long terme.

Il faut enfin noter que des effondrements se produiront toujours hors zone confortée, par exemple dans les prairies et les chemins qui resteront soumis à une fréquentation humaine.

5/ CONCLUSION

L'étude géologique générale de la carrière de gypse de Prat-Bonrepoux et de Mercenac, appartenant aux Etablissements SABOULARD, a été faite par des levés géologiques visuels et par analyse des archives géotechniques de l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, INERIS.

Le gisement de gypse du Trias est affecté de fractures à remplissage argileux et de dissolutions karstiques, aquifères. Il est surmonté par 25 à 50 mètres de sols à dominante argileuse qui sont ponctuellement victimes d'effondrement et d'affaissement en liaison avec le fond.

L'étude a montré que le gisement, constitué de filonnets de gypse à caractéristiques mécaniques hétérogènes, très sensibles à l'eau, avait été exploité en deux phases par chambres de 6 à 9 mètres d'ouverture et piliers abandonnés, de section généralement carrée avec 12 mètres de côté.

Les quartiers anciens, situés au sud-ouest, sont en mauvais état et déjà partiellement effondrés alors que les quartiers récents sont actuellement stables et en bon état général.

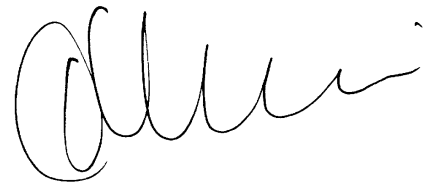
Avec un taux minimal de défrètement de 60% et des contraintes verticales comprises entre 1.5 et 2.25 MPa selon l'épaisseur du recouvrement, les piliers des quartiers récents ne supporteront pas une diminution de leur résistance mécanique, inéluctable par saturation à long ou très long terme.

Les risques d'effondrement plus ou moins généralisé des quartiers récents sont donc réels et, à l'échelle d'une ou de plusieurs vies humaines, il n'y aura plus de différence entre ce qui est actuellement dénommé "quartiers anciens" ou "récents".

La surface totale de la carrière, majorée d'une marge de reculement de 20 à 35 mètres, présente à terme un risque certain d'instabilité si des travaux confortatifs ne sont pas entrepris.

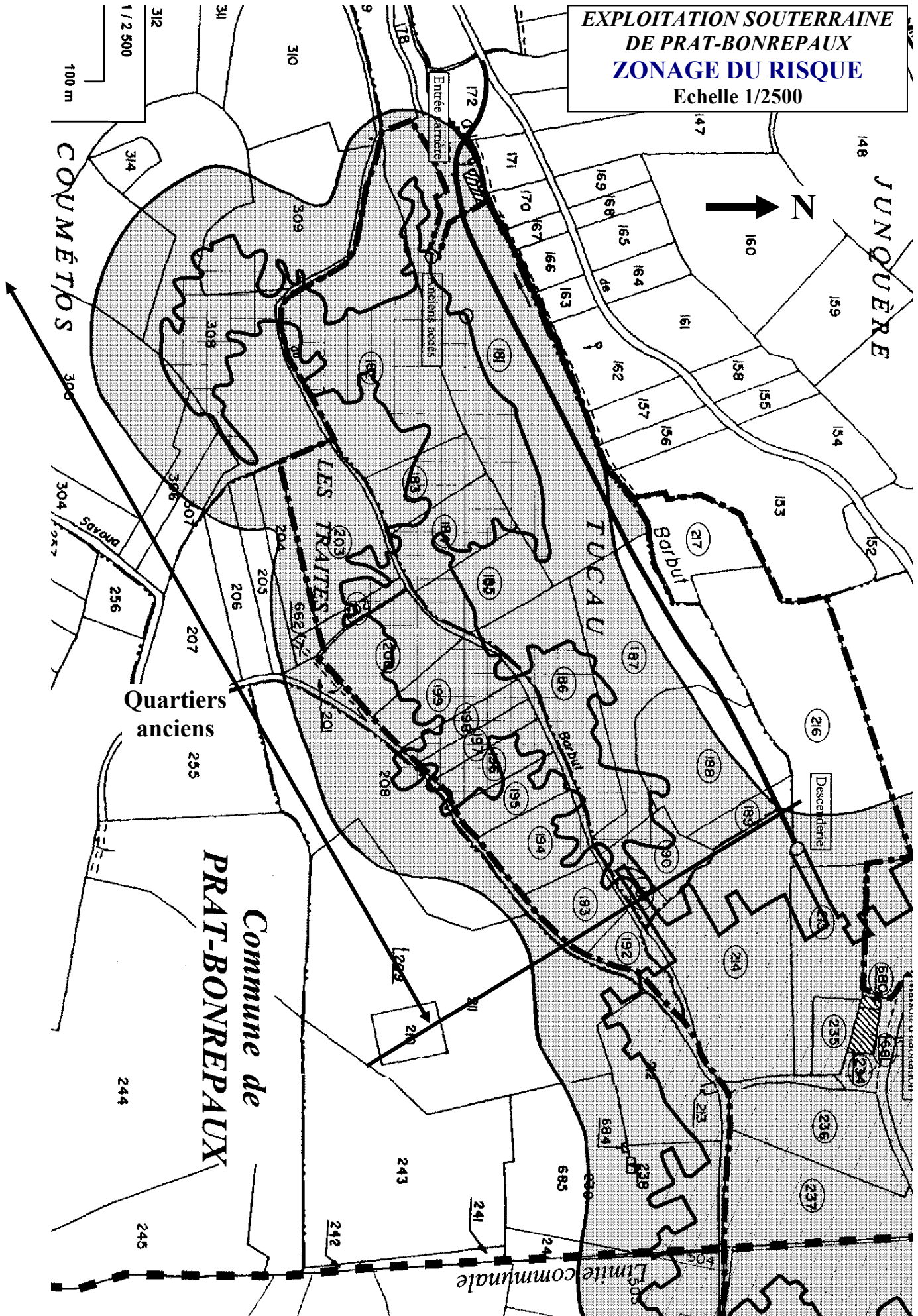
Les solutions confortatives les plus efficaces consistent à supprimer les vides par foudroyage ou remplissage, avec dans ce dernier cas un clavage sous l'habitation située au-dessus des quartiers récents pour être certain qu'elle ne subira pas de mouvement.

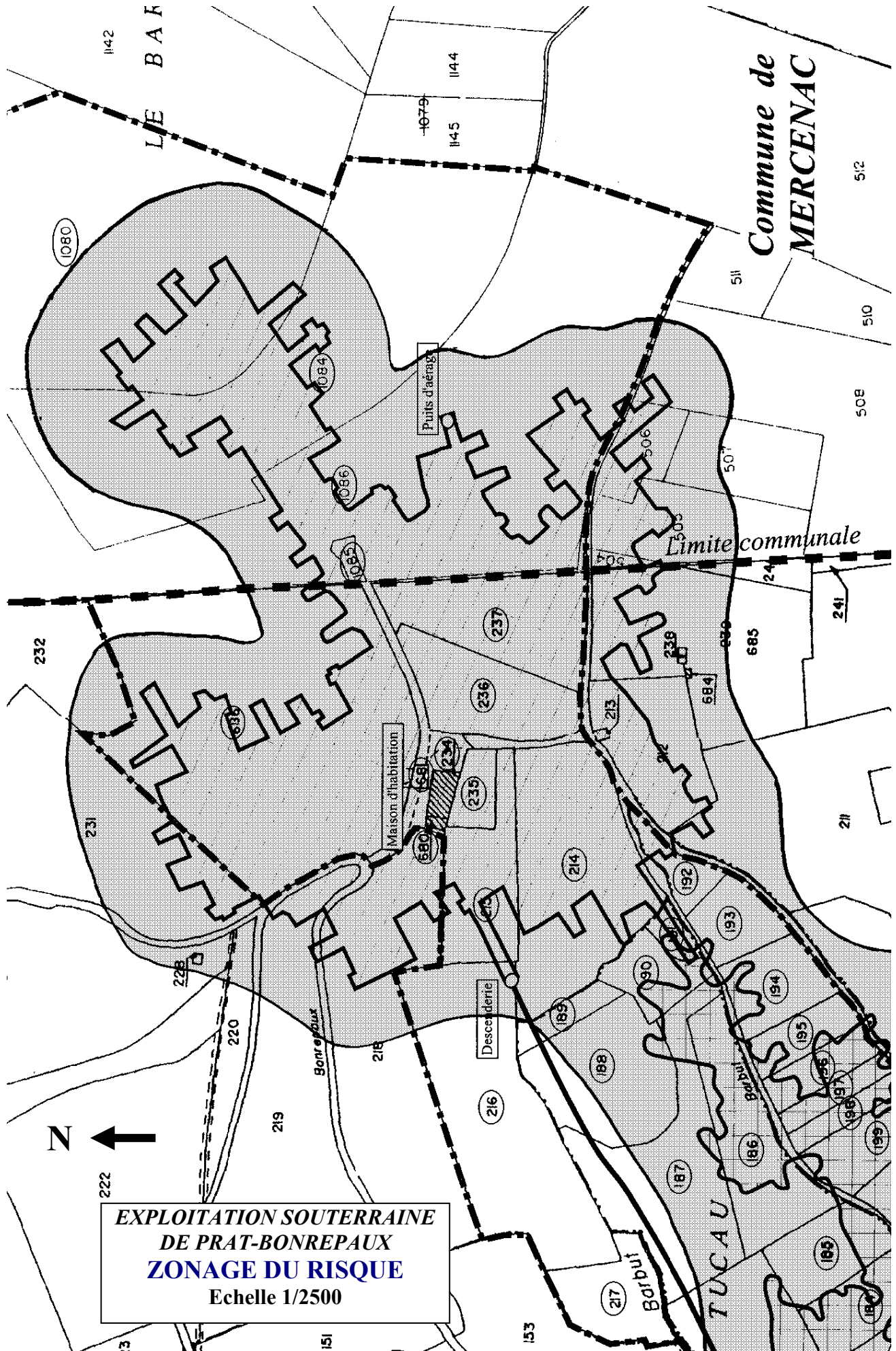
Ces travaux confortatifs, délicats à réaliser, seront bien évidemment inutiles s'il n'y a plus de maison d'habitation.



Le gérant de GEOBILAN, Denis RUCQUOI

Annexe 2







INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES

GAI-JMW/JS
71-6139/R01

Verneuil-en-Halatte, le 14 février 1991

ETABLISSEMENTS SABOULARD

Carrière souterraine de Gypse
de PRAT-BONREPAUX

Stabilité et dimensionnement.

1. OBJET DE L'ETUDE.

Les Etablissements SABOULARD ont acquis récemment une carrière souterraine de gypse située sur les communes de Prat et de Mercenac, dans le département de l'Ariège.

La Société envisage de poursuivre l'exploitation actuelle vers l'Est et le Nord et de reprendre une partie du gisement par un niveau inférieur.

Le but de l'étude consiste à apprécier la stabilité actuelle de la carrière et à préciser le dimensionnement à adopter en cas de reprise en sous niveau.



2. CARACTERISTIQUES DU SITE.

La carrière souterraine de Prat s'étend selon un axe général Sud-Ouest - Nord-Est. L'exploitation, menée par chambres et piliers abandonnés, couvre une superficie d'environ 10 hectares (figure 1), sous un recouvrement variant entre 20 et 45 m.

Il est possible de distinguer plusieurs secteurs;

- l'ancienne carrière, dans la zone Sud-Ouest, où la méthode d'exploitation apparaît anarchique (schéma annexe I).

Les piliers, étroits et élancés, sont disposés de façon assez irrégulière. On y constate l'existence de plusieurs niveaux plus ou moins bien superposés. Une grande partie de cette ancienne carrière s'est d'ailleurs éboulée.

- l'exploitation récente, située au Nord-Est dans le prolongement de la partie effondrée, présente des caractéristiques géométriques plus homogènes (plan annexe II). Les piliers sont massifs et réguliers, la hauteur des galeries paraît constante.

- la zone effondrée, dont il est impossible de connaître les limites exactes dans sa partie centrale, se situe entre l'entrée principale et le secteur de carrière actuellement exploité.

Le passage du personnel et des engins s'effectue par un niveau inférieur. Ce sous-étage, accessible par descenderies, est séparé du niveau d'exploitation originel par une dalle ayant une épaisseur d'environ 8 m. Les contours du cheminement à travers le niveau inférieur ont été levés sommairement et figurent sur le schéma de l'annexe I.

■■■■■
■■■■■
■■■■■

Une autre sortie possible pour le personnel sera assurée par un puits situé à l'extrémité Nord-Est de la carrière, lorsque son équipement sera terminé.

D'autre part il existe, dans la partie Ouest de la carrière récente (Annexe II), une ancienne exploitation, dénommée "puits" par le personnel. Cette cavité a une forme grossièrement pyramidale et a été excavée depuis la surface. La profondeur estimée est d'environ 20 m avec une base approximative de 15 m de côté. Elle communique avec la carrière par un goulot et peut éventuellement servir de sortie de secours. La cavité se situe à une quinzaine de mètres au-dessus du toit de la carrière souterraine mais ne semble pas lui être directement superposée. D'autres "puits" ont été signalés dans le secteur sans que l'on puisse les localiser précisément.

Les terrains de surface sous-minés par l'exploitation sont constitués par des pâturages, disposés le long du versant Nord d'une colline. Une rapide reconnaissance nous a permis de constater la répercussion des désordres en surface, à l'aplomb de la zone effondrée. Les dépressions importantes visibles à mi-pente ont en effet modifié sensiblement la topographie du site et semblent induire des glissements de terrains évolutifs limités au versant.

Nous avons également observé un certain nombre de dolines dont quelques unes paraissent alignées selon un axe N 90-100°E.

3. ASPECT GEOTECHNIQUE.

3.1. Fracturation

La formation exploitée présente une densité de fracturation assez faible. Les grandes fractures naturelles, relevées dans la partie Est de la carrière, apparaissent relativement continues et affectent le toit et les piliers.



On distingue :

- une famille de fractures, orientées N 60 à 70° E avec un pendage apparent vers le Sud.

- une seconde famille N 100 à 120° E, le plus souvent marquée par des alignements de filonnets argileux, sur laquelle les galeries sont venues buter au Sud de la carrière.

La plupart de ces fractures sont fermées avec un remplissage argileux et ne semblent pas affecter la stabilité générale du site.

On peut néanmoins observer, en particulier le long de la limite Sud de l'exploitation, la présence de grandes fractures karstifiées avec venues d'eau et éboulements localisés. En hauteur, ces fractures sont relativement continues puisqu'on retrouve à leur niveau des coulées des argiles de surface.

3.2. Levé d'état des piliers et du toit.

a) Ancienne carrière et niveau inférieur.

L'absence de plan précis n'a pas permis d'effectuer un levé systématique de ces secteurs. Néanmoins, quelques observations relatives à la stabilité ont été réalisées et sont répertoriées sur le schéma de l'annexe I par des lettres.

A - Les deux piliers situés en bordure de massif apparaissent dégradés (forme en diabolo, chutes de parements récentes). Seule la présence d'un gros pilier à cet endroit paraît avoir stoppé l'évolution de l'effondrement.

B - L'amorce de la descenderie, l'existence de niveaux superposés et le taux de défrètement élevé induisent, dans cette zone, un volume de vides très important. Bien qu'il ne semble pas exister de signes de désordres, cette zone de



passage paraît très sensible en cas d'évolution de la stabilité à moyen terme.

C - L'état général de ce secteur de carrière est mauvais. Les piliers sont très dégradés, voire ruinés, et l'humidité est importante. Cette zone présente un risque d'instabilité à plus ou moins court terme.

D - Le niveau inférieur a été exploité de façon plus régulière et homogène. Les piliers sont massifs ($\sim 20 \times 20$ sous la zone effondrée) et la hauteur des galeries est constante. Exceptée la chute de toit à travers laquelle ruisselle un volume d'eau important, l'état général de l'étage inférieur apparaît sain.

b) Exploitation récente

A partir d'un plan précis et actualisé au 1/500, fourni par l'exploitant, un levé géotechnique détaillé de la zone a été réalisé.

Etat des piliers : Le figuré, établi à partir de l'auscultation systématique des parements, est le suivant :

* hachures : angle ou parement présentant une fissuration marquée avec risques limités de chutes de blocs au parement. Toutefois, étant donné la méthode d'exploitation par tirs à l'explosif, il est difficile d'apprécier l'origine exacte de ces fissures (mécaniques ou liées entièrement aux tirs).

* quadrillage : dégradations manifestement d'origine mécanique. Il s'agit dans la plupart des cas d'angles de piliers en forme de diabolos.

Etat du toit : Les rares chutes de toit existantes dans ce secteur sont soulignées par un figuré de décrochement. Elles sont limitées et de faible importance.



D'autres observations, telles les fractures principales, les venues d'eau ou les coulées boueuses issues de fractures karstifiées sont également portées sur le plan.

Sauf cas particuliers très localisés (angle aigu de pilier, recoupe dans un pilier) l'état des piliers et du toit apparaît bon. La carrière récente semble globalement saine et ne devrait pas poser de problèmes de stabilité à court terme, dans la mesure où le schéma d'exploitation est respecté et où l'exploitation ne recoupe pas de zones humides importantes.

3.3. Action de l'eau.

Il convient d'attacher une attention particulière à la sensibilité à l'eau des roches évaporitiques (gypse, anhydrite). De nombreux travaux ont mis en évidence le rôle prépondérant des eaux d'infiltration dans l'action de dissolution des roches sulfatées. Le développement du processus karstique est, par ailleurs, nettement plus rapide dans le gypse et l'anhydrite que dans les terrains calcaires.

Dans le cas de la carrière de Prat, la formation gypseuse apparaît relativement imperméable en grand. Pourtant, la percolation des eaux de surface, par l'intermédiaire de quelques grandes fractures karstifiées et surtout à partir des effondrements, favorise l'apparition de zones humides. Dans ces secteurs, on observe une certaine désagrégation au niveau des parements qui pourrait aboutir, à une perte de la résistance mécanique des piliers.

4. CARACTERISATION DU MATERIAU.

4.1. Cadre géologique.

Le matériau exploité dans la carrière souterraine de Prat-Mercenac est un gypse blanc du Trias. Le minerai se



présente sous forme de filonnets dans une gangue d'argilite verte à grise. La masse gypseuse comporte des lentilles d'anhydrite grise en particulier dans la partie Est du gisement. Le creusement du puits de secours a permis de constater que cette masse était homogène au toit de la carrière, c'est-à-dire jusqu'aux argiles de surface (information donnée par l'exploitant).

4.2. Prélèvements.

Il a été procédé à un échantillonnage dans la partie récente de l'exploitation afin de connaître les caractéristiques mécaniques du matériau, nécessaires aux calculs de stabilité et de dimensionnement.

Quatre prélèvements de blocs ont été effectués, trois au niveau de l'exploitation actuelle, un dans le sous-étage. Ils sont répertoriés P1 à P4 sur le plan de l'annexe II.

On notera toutefois que les blocs ont été prélevés au parement des piliers, dans des zones tirées à l'explosif, ce qui peut conduire à une légère sous-estimation des caractéristiques mécaniques.

4.3. Caractérisation géomécanique.

Des essais de résistance à la compression uniaxiale et des essais de traction indirecte du type "essai brésilien" ont été réalisés sur chaque bloc.

a) Compression uniaxiale.

Les essais de résistance à la compression uniaxiale, avec l'enregistrement de la courbe effort-déformation, permettent de déterminer les paramètres suivants :

- module d'élasticité longitudinal (module d'Young), E, exprimé en bar (1 bar = 10^5 Pascals ou 1 MPa = 10 bars).



- résistance limite élastique, R_E , mêmes unités.
- résistance maximale à la compression simple, R_C , exprimée dans les mêmes unités.

Conditions expérimentales.

Compression uniaxiale sur presse 250 kN, à vitesse de déformation contrôlée constante, égale à $72 \mu\text{m}/\text{minute}$, soit $1.10^{-3} \epsilon$ (déformation relative) par minute.

Dimensions des éprouvettes : $\phi = 36 \text{ mm}$, élancement = 2, avec rectification des faces.

b) Traction indirecte par essai brésilien.

Cet essai établit la résistance à la traction indirecte donnée en bars, qui est voisine de la traction directe toujours difficile à mesurer.

Dimensions des éprouvettes : $\phi = 50 \text{ mm}$, $L = 50 \text{ mm}$.

Les conditions expérimentales sont identiques à la compression uniaxiale, l'échantillon étant placé diamétralement à l'axe de la presse.

Etant donné la sensibilité à l'eau du matériau, une grande partie des essais a été réalisée en conditions saturées.

Les courbes d'essais sont fournies en annexe III et les résultats sont portés sur les tableaux I à VII.

On observe principalement :

- une très forte dispersion des résultats tant au niveau de chaque échantillonnage, qu'au niveau des différents



prélèvements. Ainsi, localement, on constate des valeurs de résistance très faibles (valeur moyenne du prélèvement 3 : 15 bars) et des valeurs élevées (prélèvement 3bis : anhydrite : 120 bars).

- un comportement du matériau à la rupture, du type élastoplastique radoucissant, c'est-à-dire sans rupture brutale, observable à partir de la forme des courbes effort-déformation.

- la sensibilité à l'eau du matériau au niveau des caractéristiques mécaniques. La comparaison des résultats avec une petite série d'échantillons testés dans des conditions normales de laboratoire (tableau VII) fait apparaître une augmentation de la résistance mécanique très importante (150 à 200 %).

Au niveau des calculs, ces valeurs de résistance instantanée ne peuvent être adoptées telles quelles pour évaluer la stabilité à long terme des piliers. A cet effet, il est plus habituel de considérer une valeur de résistance "ultime" R_u .

L'hétérogénéité des résultats obtenus sur ce type de matériau a conduit à adopter une fourchette pour R_u ;

- une valeur basse définie à partir de la moyenne des résistances mécaniques les plus faibles obtenues pour les essais en conditions saturées. Cette estimation pessimiste donne R_u : 18 bars.

- une valeur plus élevée de 35 bars en considérant la moyenne globale de toutes les mesures. Par ailleurs, cette résistance correspond à $R_C/2$ ou $2/3 R_E$ pour les résultats des essais effectués sur échantillons secs, ces valeurs étant souvent admises pour estimer la résistance ultime d'une roche

On peut raisonnablement considérer :



- que le cas $R_u = 35$ bars correspond à la résistance moyenne du gypse en l'absence d'eau, c'est-à-dire en l'état actuel de la carrière,
- que le cas $R_u = 18$ bars correspond à l'évolution à long terme de la résistance, si l'on ne prend pas garde de se prémunir des venues d'eau en cours d'exploitation

5. EXAMEN DES CONDITIONS DE STABILITE PAR LE CALCUL.

La détermination par le calcul des conditions de stabilité d'une exploitation souterraine par chambres et piliers abandonnés peut faire l'objet d'approches différentes en fonction des caractéristiques géométriques, géomécaniques et structurales du site.

Les calculs de stabilité ont été effectués essentiellement :

- pour la partie Nord-Est de la carrière, actuellement en exploitation.
- pour la partie Nord-Est de la carrière, en prévoyant une extension par sous-niveau,
- pour l'ancienne carrière dans la zone Sud-Ouest.

5.1. Carrière actuelle (exploitation Nord-Est)

L'examen général de la stabilité doit se faire au niveau du toit et au niveau des piliers sensés supporter le recouvrement après l'exploitation.

5.1.1. Stabilité du toit.

Lorsqu'il est suffisamment épais, le premier banc de toit présente une bonne résistance mécanique qui lui permet d'être assimilé à une plaque encastree sur des appuis élastiques et



chargée par tout ou partie de recouvrement. En adoptant une valeur quelconque pour l'épaisseur du premier banc, on détermine la contrainte de traction liée à la flexion du toit et la contrainte de cisaillement due à l'effort tranchant. Ces valeurs comparées aux caractéristiques du matériau permettent d'apprécier les conditions nécessaires de stabilité du toit.

Ce type de calcul, facilement informatisé, permet d'examiner de nombreuses hypothèses.

Le résultat des calculs montre que le premier toit doit présenter une épaisseur minimum de 6 m pour supporter la charge du recouvrement sans rompre.

Dans le cas de la carrière de Prat, les observations effectuées vers l'entrée, dans les vieux effondrements et au niveau du goulot d'accès à l'ancienne exploitation par puits, font apparaître la quasi continuité du toit, au moins sur une épaisseur supérieure à 6 m. La stabilité du toit semble donc assurée pour le découpage actuel.

5.1.2. Stabilité des piliers.

Nous avons examiné dans un premier temps la sollicitations sur les piliers à partir d'un calcul d'aire tributaire simple.

Selon ce modèle, la contrainte verticale moyenne exercée par le recouvrement sur les piliers a pour valeur :

$$\sigma_v = \frac{0,1 \cdot \gamma \cdot H}{1 - \tau}$$

avec :

γ = masse volumique du recouvrement ≈ 2 tonnes/m³

H = épaisseur du recouvrement
(comprise entre 30 et 45 m)



τ = taux de défrètement.

Un coefficient de sécurité moyen F peut alors être défini comme le rapport de la résistance ultime du matériau à la contrainte verticale s'exerçant sur les piliers σ_v :

$$F = \frac{R_u}{\sigma_v}$$

On considère couramment que la stabilité des piliers est critique pour F inférieur ou égal à 1 et que, pour assurer la stabilité à long terme, un coefficient minimum de 1,5 est nécessaire.

L'application à la partie centrale de l'exploitation récente où le taux de défrètement moyen est de 60 % amène les résultats suivants :

$$H = 30 \text{ m} \quad \sigma_v = \frac{0,1 \times 2 \times 30}{1 - 0,6} = 15 \text{ bars}$$

$$H = 45 \text{ m} \quad \sigma_v = \frac{0,1 \times 2 \times 45}{1 - 0,6} = 22,5 \text{ bars}$$

Pour une résistance ultime de 35 bars, le coefficient de sécurité varie de 1,6 à 2,3 suivant la hauteur du recouvrement considérée : il apparaît donc nettement suffisant et la stabilité de l'exploitation paraît assurée.

Par contre, pour une résistance ultime de 18 bars, ce même coefficient, voisin de 1 (il varie entre 0,8 et 1,2 suivant la hauteur de recouvrement) apparaît limite : la stabilité de l'exploitation n'est donc assurée que si l'on évite qu'à long terme les venues d'eau ne viennent dégrader les caractéristiques mécaniques de la roche.

N.B. : Un calcul semblable, conduit à titre indicatif au niveau de la zone effondrée de l'ancienne carrière, confirme qu'en prenant un taux de défrètement de 80 % (déterminé à partir d'anciens plans) et une résistance ultime de



18 bars, le coefficient de sécurité de cette zone est très nettement inférieur à 1, dès que le recouvrement dépasse 18 m : en présence d'eau, la valeur $R_u = 18$ bars apparaît donc bien adaptée pour évaluer la stabilité à long terme de l'exploitation.

Pour préciser ces résultats, une analyse plus fine de la stabilité a été conduite à l'aide du logiciel STAB-PILLAR.

La méthode, également basée sur la théorie de l'aire tributaire, prend en outre en compte la géométrie des piliers et permet facilement de simuler différentes géométries d'exploitation.

Les résultats obtenus, consignés dans le tableau IX, confirment les conclusions précédentes et les observations faites sur le site :

. la géométrie actuelle paraît apte à assurer la stabilité à long terme de l'exploitation, en l'absence de toutes venues d'eau importantes dans les chantiers

Il faut toutefois respecter plus scrupuleusement la largeur des piliers qui doit être de 12 m minimum.

. par contre, si à long terme les caractéristiques mécaniques se dégradent par suite d'une humidité permanente dans les chantiers, la largeur actuelle des piliers est nettement inférieure à la largeur minimale de sécurité (15,5 m, cf tableau VIII). Cette largeur ne suffit alors plus pour garantir la stabilité de l'exploitation qui ne pourra être assurée dans ces conditions qu'avec un renforcement des piliers (boulonnage, cerclage,...).

Ces éléments mettent l'accent sur la nécessité vitale pour la stabilité de l'exploitation dans ce type de matériau, l'absence d'eau. Ceci semble être le cas dans l'exploitation actuelle, compte tenu de son état jugé bon par l'observation



directe et compte tenu du très faible taux d'humidité mesuré dans la masse de gypse (0,1 % d'après l'exploitant).

Pour maintenir ces conditions, il est important d'éloigner les chantiers des parties humides que l'on est susceptible de rencontrer, en particulier celles repérées au Sud de l'exploitation actuelle, direction vers laquelle il est conseillé de ne pas s'étendre.

Dans ces conditions, l'extension de l'exploitation actuelle peut se faire vers le Nord et vers l'Est. Si l'on s'en tient aux limites fixées par l'arrêté préfectoral autorisant l'exploitation, les dimensions finales de la zone exploitée risquent d'être relativement importantes, surtout compte tenu de la faible profondeur. C'est pourquoi il paraît prudent de laisser en place, dès à présent, une bande de 20 m environ de large, peu défruitée (seules quelques recoupes y seront autorisées) séparant l'exploitation actuelle des futures extensions.

En outre, une zone identique est impérative autour du puits d'aérage, pour garantir sa fonction de secours. Cette zone, véritable stot de protection du puits, aura un rayon de 15 m environ.

5.2. Exploitation par sous-niveau

Une autre manière d'étendre l'exploitation revient à exploiter la masse de gypse située au mur du niveau actuel.

Une première solution envisageable consiste à exploiter cette masse en s'approfondissant à partir des chambres actuelles, c'est-à-dire en augmentant l'ouverture exploitée et la hauteur des piliers (6 m environ actuellement). En supposant que la masse de gypse garde les mêmes caractéristiques que précédemment ($R_u = 35$ bars), une simulation, conduite avec le logiciel STAB-PILLAR, montre que des piliers de 20 m de hauteur sont "géotechniquement" envisageables, si tant est qu'on leur



donne une largeur de 20 m environ à la base. Toutefois, on voit difficilement comment faire "coller" ce schéma avec le découpage pratiqué actuellement dans les chantiers.

Une deuxième solution consiste à ouvrir un sous-niveau d'exploitation sous le niveau actuel. Pour évaluer la stabilité d'une telle configuration il est nécessaire de faire appel à une technique particulière, la méthode des éléments finis, qui consiste à découper le domaine étudié en éléments (triangles) homogènes et à calculer, pour chacun d'eux, les contraintes induites par l'exploitation. Le découpage choisi dans notre cas, le maillage, est représenté sur les figures 2 et 3.

Un premier calcul a été conduit avec une résistance de 35 bars. Les résultats montrent qu'il y a peu d'interinfluence entre les deux niveaux pour une planche séparant les deux niveaux variant de 6 à 10 m (cf figures 4 à 6). Avec une planche de 15 m d'épaisseur, les deux niveaux peuvent être considérés comme indépendants quelle que soit la position relative des piliers.

Des calculs complémentaires ont été réalisés avec une résistance de 18 bars. Avec une épaisseur de planche de 8 m, les zones en rupture sont évidemment plus étendues que dans le cas précédent, de même que l'interinfluence entre les deux niveaux qui est plus manifeste (cf fig.9 par comparaison avec la fig.8). En outre, la situation s'aggrave si l'on considère, non plus des piliers alignés, mais des piliers légèrement décalés entre les deux niveaux (décalage de 2 m). Dans ce cas, il est clair que l'extension des zones en rupture n'est plus compatible avec la stabilité d'ensemble de l'exploitation (cf fig.10).

Ces différents résultats permettent d'avancer les éléments suivants :

- on retrouve le rôle joué par l'eau, déjà évoqué, dans la stabilité de l'exploitation,



- une épaisseur de planche de 8 m entre les deux niveaux paraît la solution la plus naturelle puisqu'elle consiste à amorcer le niveau inférieur à peu près à l'horizontale, à partir de la base du plan incliné donnant accès au niveau actuel. Toutefois, avec une telle épaisseur de planche, il sera nécessaire de garantir entre les deux niveaux un alignement parfait des piliers. Si une telle solution est adoptée, il convient d'être beaucoup plus rigoureux dans le découpage (respect des dimensions, régularité de forme des piliers) et d'appliquer une telle rigueur dès la poursuite de l'exploitation du niveau actuel,

. une épaisseur de planche de 15 m va stériliser une partie importante du gisement ; elle présente toutefois l'avantage d'une plus grande souplesse d'exploitation en tolérant des alignements beaucoup moins stricts des piliers.

5.3. Ancienne carrière Sud-Ouest

Compte tenu des observations faites sur le site, il a déjà été mentionné que cette partie de la carrière était globalement en mauvais état. A partir des taux de défrètement évalués dans les zones visibles, il est clair que certaines zones sont en état de situation instable, ce que confirme toute la partie effondrée située au centre.

Cette situation pose le problème du seul accès aux engins dont dispose la carrière, qui chemine dans cette partie avant d'accéder au niveau d'exploitation actuel. C'est pourquoi une surveillance de la stabilité de cette zone par mesure périodique de la convergence a été mise en place. L'implantation des stations de convergence ainsi que des conseils en matière d'interprétation immédiate des mesures ont été rassemblés en annexe IV.

A plus long terme, il sera nécessaire d'adjoindre au schéma actuel un accès supplémentaire par descenderie, garantissant un déblocage de l'exploitation en toute sécurité.



Compte tenu de l'extension probable de l'exploitation, il serait souhaitable de placer cet accès à l'Est de l'exploitation actuelle.

6. CONCLUSIONS

Les différents travaux qui ont été entrepris sur la carrière permettent d'avancer les diagnostics et conseils suivants :

- l'état de la carrière actuelle paraît bon, ce que confirme l'évaluation de la stabilité réalisée par différentes méthodes. Ces conditions ne se maintiendront à long terme que si l'on évite toute venue d'eau non maîtrisée qui pourrait venir dégrader les caractéristiques mécaniques du gypse. Ceci implique en particulier d'éloigner les chantiers de zones particulièrement humides : vieux travaux dont les "puits", grandes fractures...

- la géométrie actuelle peut donc être conservée, en prenant soin de la respecter plus scrupuleusement :

- . largeur des chambres : 8 m
- . ouverture : 6 m
- . largeur des piliers : 12 m

- le puits d'aérage doit impérativement être protégé par un stot ayant à la base un rayon d'une quinzaine de mètres. En outre, il serait prudent de laisser une bande ferme, peu défilée, de 20 m de large environ, entre l'exploitation actuelle et les futures extensions vers le Nord et l'Est.

- l'extension de l'exploitation peut aussi s'envisager par la prise d'un sous niveau où il sera important de respecter parfaitement l'alignement des piliers si l'épaisseur de la planche entre les deux niveaux est de l'ordre de 8 m. Si cette consigne ne peut être scrupuleusement respectée, l'épaisseur de la planche devra être plus importante (de l'ordre de 15 m).



. tant qu'un accès supplémentaire par descenderie ne pourra être réalisé à l'Est de l'exploitation actuelle, les mesures de convergences devront être suivies et interprétées régulièrement suivant la méthodologie donnée en annexe, de manière à détecter toute évolution anormale pouvant traduire une instabilité des terrains au voisinage de l'accès actuel.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'J-M. Watelet', located below the main text block.

J-M. WATELET

R. REVALOR