



pièce n° 4

**PLACOPLATRE**

6784.05-RN001c

22 janvier 2016

**SITE DE CORMEILLES EN PARISIS - PROJET D'EXPLOI-  
TATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE DE GYPSE**

# **TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES DE DIMENSIONNE- MENT**

**BG Ingénieurs Conseils SAS**

13 rue des Emeraudes - F-69006 Lyon

Siège social: Immeuble METROSUD, 1, bd Hippolyte Marques - 94200 Ivry sur Seine - SAS au capital de 216 800 €

RCS Lyon 2007B04453 - SIRET 303.559.249.00121 - Code APE 7112B

T +33 4 72 56 36 00 – F +33 4 72 56 36 01 – [lyon@bg-21.com](mailto:lyon@bg-21.com) – [www.bg-21.com](http://www.bg-21.com)

FR 493 035 592 49 TVA

**n INGENIOUS SOLUTIONS**





SITE DE CORMEILLES EN PARISIS - PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE DE GYPSE

## TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES DE DIMENSIONNEMENT

---

VERSION	-	b	c
DOCUMENT	6784.05-RN001b		6784.05-RN001c
DATE	21 décembre 2015		22 janvier 2016
ELABORATION	Daniel Collomb		Daniel Collomb
VISA	_____		
COLLABORATION	François Martin		François Martin
DISTRIBUTION	Mme Ségolène Dubois Gilles Bouchet		Mme Ségolène Dubois Gilles Bouchet



## PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES

### TABLE DES MATIÈRES

	Page
<b>1. Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2. Déroulement de l'expertise</b>	<b>1</b>
2.1 Réunion de lancement	1
2.2 Visite du site	2
2.3 Rapport intermédiaire	2
<b>3. Bases de l'expertise</b>	<b>2</b>
3.1 Documents reçus en début d'expertise	2
3.2 Compléments reçus fin novembre	3
<b>4. Analyse des principaux documents</b>	<b>3</b>
4.1 Rapport de dimensionnement de l'exploitation en carrière souterraine	3
4.1.1 Analyse détaillée / reformulation	3
4.1.2 Avis sur les conclusions du rapport	14
4.2 Rapport de dimensionnement des galeries d'accès à la carrière souterraine	23
4.2.1 Analyse détaillée / reformulation	23
4.2.2 Avis sur les conclusions du rapport	26
4.3 Rapport de dimensionnement de l'exploitation à proximité de la carrière à ciel ouvert	27
4.3.1 Analyse détaillée / reformulation	27
4.3.2 Avis sur les conclusions du rapport	30
<b>5. Réponse aux questions posées par la DRIEE</b>	<b>31</b>
5.1 Avis général sur l'étude de dimensionnement des galeries, des piliers, ...	31
5.2 Avis sur la gestion des zones exploitées à proximité des habitations (distance de recul, objectif en termes de vibrations maximales, ...)	33
5.3 Avis sur les modalités d'exploitation sous le front de taille actuel (tunnels provisoires, dimension des galeries et des piliers, dimensionnement de la casquette protégeant l'accès provisoire)	33
5.4 Avis sur les modalités et les délais de remblaiement, notamment au regard des risques de fluage ou de soufflage	35
5.5 Avis sur les possibles remontées de désordres en surface	36
5.6 Avis sur la résistance de la structure vis-à-vis d'un accident lors d'un transport ou sur un stockage temporaire d'explosifs	36



**PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES  
ÉTUDES**

**ANNEXES**

Aucune



## PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 1

### 1. Introduction

L'exploitation du gisement de gypse de Cormeilles-en-Parisis est réalisée jusqu'à présent à ciel ouvert. Il est prévu de poursuivre l'exploitation en souterrain par la méthode des chambres et piliers.

La société Placoplatre, qui exploite la carrière actuelle, a déposé un dossier de demande de renouvellement partiel à ciel ouvert et d'extension en souterrain de l'autorisation d'exploiter au titre des rubriques 2510, 2515, 2517 et 2720 des ICPE.

Dans ce cadre, la DRIEE\_Île-de-France (Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement et de l'Énergie) a souhaité que soit réalisée une expertise **sur les études de dimensionnement menées à ce jour** et qui ont fait l'objet des trois rapports de synthèse listés ci-après:

- "Dimensionnement de l'exploitation de la première masse de gypse en carrière souterraine à Cormeilles-en-Parisis" – ARMINES - avril 2009,
- "Dimensionnement des galeries d'accès dans la future carrière de gypse de Cormeilles-en-Parisis" – ARMINES – mars 2014,
- "Exploitation à proximité de la carrière à ciel ouvert – Analyse géotechnique" – Jacques Fine – 22 mai 2015,

Daniel Collomb est l'expert chargé de ce travail. Il est assisté par François Martin, Ingénieur Senior qui connaît bien le contexte du projet pour avoir réalisé plusieurs missions récentes pour Placoplatre.

Le présent document constitue la synthèse de l'expertise.

### 2. Déroulement de l'expertise

#### 2.1 Réunion de lancement

La réunion de lancement de la mission d'expertise s'est tenue le 21 septembre 2015 à Versailles au siège de la DRIEE.

Les représentants de la DRIEE ont à cette occasion précisé les questions à traiter par Placoplatre et Daniel Collomb, à savoir :

- 1) Avis général sur l'étude de dimensionnement des galeries, des piliers, ... ;
- 2) **Avis sur la gestion des zones exploitées à proximité des habitations (distance de recul, objectif en termes de vibrations maximales, ...)** ;
- 3) Avis sur les modalités d'exploitation sous le front de taille actuel (tunnels provisoires, dimension des galeries et des piliers, dimensionnement de la casquette protégeant l'accès provisoire) ;

## PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 2

- 4) Avis sur les modalités et les délais de remblaiement, notamment au regard des risques de fluage ou de soufflage ;
- 5) Avis sur les possibles remontées de désordres en surface ;
- 6) Avis sur la résistance de la structure vis-à-vis d'un accident lors d'un transport ou sur un stockage temporaire d'explosifs ;

Le présent rapport traite des points 1), 3), 4) et 5) de cette liste

### 2.2 Visite du site

Une visite de la carrière actuelle de Cormeilles-en-Parisis a été effectuée le 21 septembre 2015 (après la réunion de lancement tenue à Versailles) par Daniel Collomb et François Martin, accompagnés de Ségolène Dubois et José Cardoso.

### 2.3 Rapport intermédiaire

Une version intermédiaire du rapport d'expertise datée du 26 octobre 2015 a été remise à Placoplatre.

Cette version comportait des interrogations, notamment quant à la représentativité des valeurs d'essais rapportées pour Montmorency, ainsi que sur des points de détail de la méthodologie mise en œuvre pour les études objets du rapport d'avril 2009.

Elle a fait l'objet d'échanges entre le soussigné, Ségolène Dubois et Gilles Bouchet, ainsi que d'un retour de Faouzi Hadj-Hassen daté de novembre 2005.

## 3. Bases de l'expertise

### 3.1 Documents reçus en début d'expertise

Les documents reçus au début de l'expertise et analysés par le soussigné sont listés ci-après :

- Rapport "Dimensionnement de l'exploitation de la première masse de gypse en carrière souterraine à Cormeilles-en-Parisis" – ARMINES - avril 2009,
- Rapport "Dimensionnement des galeries d'accès dans la future carrière de gypse de Cormeilles-en-Parisis" – ARMINES – mars 2014,
- Rapport "Exploitation à proximité de la carrière à ciel ouvert – Analyse géotechnique" – Jacques Fine – 22 mai 2015,
- "Dossier de demande de renouvellement partiel à ciel ouvert et d'extension en souterrain de l'autorisation d'exploiter – Tome 2 v2 - Mémoire Technique" – Placo\_Saint Gobain – mai 2015, complété en octobre 2015,
- Plan des réserves exploitables – GE\_GéoPlusenvironnement – échelle 1/12500,



## PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 3

- Plan localisation de l'ancienne carrière de Biaunes – échelle 1/5000,
- Rapport IGC 2009 sur l'ancienne carrière de Biaune.

### 3.2 Compléments reçus fin novembre

Les documents reçus fin novembre 2015, suite aux interrogations du soussigné consignées dans son rapport intermédiaire, sont listés ci-après:

- Rapport "Caractérisations géo-mécaniques des terrains de la carrière souterraine de Cormeilles-en-Parisis" – ARMINES – janvier 2008,
- Note "Éléments de réponse à la tierce expertise sur l'étude de dimensionnement de la future exploitation souterraine gypse de Cormeilles-en-Parisis" – ARMINES – novembre 2015,
- Rapport de dimensionnement de Montmorency de 1999 et comprenant les essais de laboratoire – réf. LP-BPB/MONT/993,
- Planches - graphiques du rapport 1999 – réf. LP-BPB-MONT-993,
- Note sur notre méthodologie de dimensionnement des chambres et piliers,
- Graphique montrant l'évolution de la résistance le long de la première masse de gypse (dimension réduite : profondeur à partir du toit / épaisseur de la première masse) et rassemblant les données de Taverny, Villiers-Adam, Montmorency, Cormeilles,
- Plan de phasage quinquennal de l'extension souterraine de la carrière de Cormeilles,
- Extraits de l'étude d'impact de Cormeilles concernant les mesures pour assurer la stabilité des sols (il est indiqué notamment p373 : « Remblayage total des galeries en fin d'exploitation » et « Remblayage partiel des galeries mis en place sur une hauteur de 3,5m au pied des piliers, à la fin de la phase de levage, afin de stabiliser ces zones à court terme. Ce remblayage se fera dans un délai d'un an (correspondant à la fin d'un panneau d'exploitation,
- Extraits du dossier de Bernouille concernant le dimensionnement et le remblayage.

## 4. Analyse des principaux documents

### 4.1 Rapport de dimensionnement de l'exploitation en carrière souterraine

#### 4.1.1 Analyse détaillée / reformulation

Notre analyse "point par point" des chapitres 1 à 4 du rapport " Dimensionnement de de l'exploitation de la première masse de gypse en carrière souterraine à Cormeilles-en-Parisis" – ARMINES - avril 2009 est donnée dans les tableaux ci-après.



## PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 4

Pos.	Thème / Chapitre	Sujet / argument de l'auteur du rapport	Note de lecture / commentaire de l'expert
A.01	Contexte et objectif de l'étude / chap. 1	<p>L'étude en objet fait suite à une étude de laboratoire de janvier 2008 réalisée par ARMINES de caractérisation géomécanique des terrains de la future carrière de Cormeilles-en-Parisis et de synthèse comparative des propriétés mesurées par rapport aux propriétés connues dans les autres exploitations.</p> <p>Son objectif est l'analyse des conditions de stabilité lors de l'exploitation de la 1<sup>ère</sup> masse de gypse dans la future carrière de Cormeilles-en-Parisis et le dimensionnement des ouvrages correspondants.</p>	<p>La synthèse de l'étude de laboratoire citée ici a fait l'objet du rapport "Caractérisation géomécanique des terrains de la carrière de Cormeilles-en-Parisis" – ARMINES de janvier 2008. Ce rapport nous a été transmis le 27-11-2015.</p> <p>On en tire notamment les compléments d'information suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Profondeur des échantillons prélevés et résultats essais de laboratoire pour les sondages S2 et S5,</li><li>• Mention que la 1<sup>ère</sup> masse de gypse peut être subdivisée en 4 parties : sommitale (G11), haute (G12), médiane (G13) et basse (G14), la <b>partie médiane étant homogène, concernée par un gypse de meilleures caractéristiques géomécaniques</b> et représentée par l'essentiel des éprouvettes testées.</li></ul>
A.02	Constitution du rapport / chap. 1	<p>Partie 1 : Synthèse et analyse des propriétés de terrain mesurées en laboratoire.</p> <p>Partie 2 : Description du comportement des terrains dans les exploitations souterraines de gypse de la société Placoplatre.</p> <p>Partie 3 : dimensionnement des ouvrages et analyse des conditions de stabilité de l'exploitation souterraine projetée.</p>	
A.03	Stratigraphie du site / chap. 2	<p>L'ensemble des couches géologiques présente un léger pendage vers l'Est, au niveau de la carrière actuellement en exploitation.</p>	<p>Les coupes stratigraphiques détaillées sont données dans le rapport pour les argiles vertes, les marnes bleues, la 1<sup>ère</sup> masse de gypse, les marnes d'entre deux masses et la deuxième masse de gypse.</p>

**PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 5**

		<p>La coupe stratigraphique générale de la butte de Cormeilles fait l'objet de la figure 1. La coupe stratigraphique de détail de la 1<sup>ère</sup> masse de gypse fait l'objet de la figure 5.</p> <p>La 1<sup>ère</sup> masse de gypse présente une variation du niveau du toit et des phénomènes de dissolution.</p> <p>La dissolution complète du gypse a été observée une fois dans la partie Est de la carrière à ciel ouvert actuelle, avec pour corollaire un fléchissement à grande échelle des couches supragypseuses.</p>	<p>La question se pose de l'éventualité d'un tel contexte dans le périmètre de la future carrière, ceci d'autant qu'une petite doline causée par la dissolution de la 2<sup>ème</sup> masse de gypse (fléchissement de la 1<sup>ère</sup> masse) a été observée le 21 septembre dernier lors de la visite de la carrière actuelle.</p> <p>Interrogé sur les sondages réalisés à Cormeilles, l'auteur du rapport a indiqué que l'épaisseur réduite à 13,2 m de la 1<sup>ère</sup> masse du gypse au sondage CS07-06 (fort de Cormeilles) est due à un phénomène de dissolution partielle et localisée.</p>
A.04	Conditions structurales / chap. 2	La direction principale des structures est NO/SE. Cela étant, aucune grande structure de type cassante n'a été observée dans la carrière actuelle, la tectonique n'ayant que très peu affecté le site de Cormeilles, à l'instar de l'entier du bassin parisien.	
A.05	Hydrogéologie / chap. 2	L'ensemble des flancs de la butte de Cormeilles présente des écoulements diffus. La nappe perchée supportée par l'ensemble Sables de Fontainebleau – Marnes à huitres - Calcaires de Sannois s'exute à l'interface Calcaires de Sannois / Marnes vertes.	
A.06	Campagne d'essais 2007-2008 / chap. 2 et 3.1	Placoplatre a réalisé 6 sondages (HQ : 63,5 mm) en 2007 (dénommés CS07-01 à CS07-06) qui recoupent les formations du toit et les masses de gypse. Leur localisation fait l'objet de la figure 2.	On observe que CS07-01 est situé non loin mais cependant à l'extérieur du périmètre de la carrière souterraine projetée (immédiatement à l'Est).
		Des tests de laboratoire ont été réalisés sur des échantillons prélevés dans les deux masses de gypse et les marnes d'entre deux masses à partir de 3 sondages : CS07-01, CS07-02 et CS07-05.	Les échantillons testés dans les masses et marnes du gypse proviennent des sondages CS07-01 et CS07-05, le 1 <sup>er</sup> sondage étant situé en partie Est de la future carrière, le second en partie Ouest.

**PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 6**

A.07

Résultats d'essais / chap. 3.2

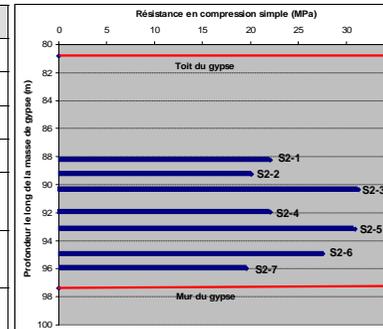
Les propriétés mesurées ont été : masse volumique, vitesse du son, compression simple, traction indirecte (essai brésilien), module de Young et coefficient de Poisson. Le tableau récapitulatif des résultats fait l'objet du tableau 2.

À noter que le tableau 2 constitue la synthèse des résultats des essais de laboratoire consignés dans le rapport AR-MINES de janvier 2008 mentionné précédemment.

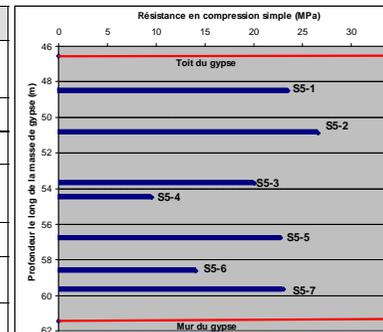
Sur 14 échantillons testés dans la 1<sup>ère</sup> masse de gypse, **12 montrent des valeurs élevées** de résistance (RC et RB) et de module élastique (des RC supérieurs à 20 MPa notamment), tandis que 2 échantillons donnent des valeurs plus basses, S5-4 notamment avec un RC de 9,6 MPa.

La figure ci-après montre les lithologies et valeurs RC obtenues sur la hauteur de la 1<sup>ère</sup> masse.

Eprouvette	Lithologie	Profondeur (m)	Résistance Rc (MPa)
S2-1	Gypse très induré ++ lité, très homogène	88.25	22.08
S2-2	Gypse très induré ++ lité, très homogène.	89.25	20.1
S2-3	Gypse très induré ++ lité, très homogène.	90.36	31.29
S2-4	Gypse très induré ++ lité, très homogène.	91.97	22.08
S2-5	Matrice gypseuse grisâtre indurée avec cristaux. Importance des cristaux varie avec la profondeur, gris ou marron.	93.17	30.91
S2-6	Matrice avec cristaux dont l'importance varie en profondeur. Ques passages cmq de gypse cristallisé	94.92	27.56
S2-7	Gypse marneux induré . homogène, fin, sans cristaux. De + en + mameux à la base	95.99	19.59



Eprouvette	Lithologie	Profondeur (m)	Résistance Rc (MPa)
S5-1	Gypse clair brun orangé qques lits <mmque d'argile, litage en granulo, qques trou de dissolution, cristaux dans matrice fine	48.51	23.45
S5-2	Gypse à cristaux + gros, beige clair, matrice + épaisse	50.87	26.58
S5-3	Gypse brun translucide, litage de couleur (variation matrice, grain)	53.7	20.05
S5-4	Gypse : matrice extrêmement fine, très claire, puis brun translucide avec litage de couleur (dont bancs très bruns), peu de cristaux	54.49	9.6
S5-5	Gypse : réapparition des cristaux de taille importante dans matrice fine	56.76	22.75
S5-6	Gypse entièrement cristallisé. Matrice quasi-inexistante. Aspect gros sal	58.62	14.06
S5-7	Gypse cristallisé dans matrice fine	59.66	23.04



**PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 7**

A.08	Exploitation des résultats / chap. 3.2	<p>Choix d'une loi normale de gauss pour une approche statistique des résultats de résistance à la compression simple en vue du dimensionnement des piliers.</p> <p>Valeurs ultimes (Vu) de résistance déduites des valeurs moyennes tirées d'essai (Vm) diminuées d'une certaine proportion de l'écart-type. Pour des proportions de 2 et 2,33 écart-types, il en ressort des probabilités respectives de 2,5% et 1% de résistance effective plus faible que les Vu ainsi définies.</p> <p>L'auteur propose de retenir le fractile 1% pour le dimensionnement des piliers selon cette approche. Le tableau 4 donne les caractéristiques mécaniques correspondantes pour Cormeilles et Montmorency, ce dernier site étant considéré ici à titre de comparaison.</p>	<p>L'approche statistique effectuée ici appelle de notre part les commentaires suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• L'échantillonnage réalisé n'est pas suffisant pour permettre une approche statistique totalement fiable,</li> <li>• Le calage des résultats sur une courbe de Gauss nous paraît sujet à caution.</li> </ul> <p>L'auteur du rapport complète cependant cette approche théorique par une réflexion sur la crédibilité des valeurs obtenues. Il compare pour cela les valeurs globales et locales obtenues avec les écarts entre les RC et les limites élastiques tirées des essais.</p> <p>Interrogé sur cette méthodologie, l'auteur du rapport justifie la démarche en précisant qu'elle est sécuritaire par comparaison avec celle suivie par le bureau Simecsol en 2002 pour Montmorency.</p>
A.09	Conclusions tirées des essais / chap. 3.2	<p>Des caractéristiques mécaniques faibles et équivalentes pour les argiles vertes et les marnes bleues.</p> <p>Les Caractéristiques mécaniques de la 1<sup>ère</sup> masse de gypse légèrement supérieures à celles de la 2<sup>ème</sup> masse.</p>	
A.10	Résultats d'essais à Montmorency (pour comparaison) / chap. 3.2	<p>Le tableau 3 donne la synthèse des résultats d'essais de laboratoire pour la carrière de Montmorency</p>	
A.11	Comparaison valeurs Cormeilles et Montmorency / chap. 3.2	<p>Caractéristiques mécaniques des marnes d'entre deux masses plus faibles que celles du gypse, mais supérieures à celles des argiles vertes et des argiles bleues.</p> <p>Les deux masses de gypse et les marnes d'entre deux masses de Cormeilles sont plus résistantes que celles de Montmorency et les différences</p>	<p>On relève les points suivants pour la comparaison entre Cormeilles et Montmorency :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Un échantillonnage notablement plus important pour Montmorency que pour Cormeilles (ex. 108 essais RC dans la 1<sup>ère</sup> masse de gypse à Montmorency contre 14 à Cormeilles),</li> </ul>

**PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 8**

entre les deux masses de gypse sont plus faibles à Cormeilles, notamment en termes de résistance et de déformabilité.

- Une distinction des résultats pour le toit et pour le mur de la 1ère masse du gypse à Montmorency, contrairement à Cormeilles,
- Des valeurs RC et RT notamment bien plus basses à Montmorency qu'à Cormeilles,

Au plan statistique, il paraît judicieux de considérer les valeurs de Montmorency, mais le fait qu'elles soient bien plus basses que celles obtenues à Cormeilles nous interpelle. On s'interroge notamment sur le type de sondage réalisé à Montmorency, depuis la surface ou depuis l'intérieur des galeries existantes.

Interrogé à ce sujet dans le cadre de la présente expertise, l'auteur du rapport nous a confirmé que les échantillons de Montmorency ont été prélevés depuis les galeries existantes.

La microfissuration au toit et au mur induite par le minage à Montmorency, de même que celle induite par la flexion dans la planche de toit des galeries, expliquent selon nous très bien le fait que les valeurs de RC et de module d'élasticité obtenues pour Montmorency soient notablement plus basses que pour Cormeilles. On rappelle en effet que pour Cormeilles, les échantillons testés proviennent de forages réalisés depuis la surface.

Ainsi, les résultats d'essai obtenus pour Cormeilles sont bien représentatifs de la roche intacte, tandis que ceux obtenus pour Montmorency concernent une roche microfissurée par la réalisation des galeries. La comparaison directe des résultats d'essai entre Montmorency et Cormeilles n'est donc pas légitime selon nous en l'état.

C'est au final l'exploitation des données du gypse de 1ère masse du site voisin de Villiers-Adam développée aux pages

**PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 9**

			16 et 17 ci-après qui permet de confirmer la bonne qualité du gypse de Cormeilles.
A.12	REX Montmorency – Caractéristiques principales / chap. 3.4	<p>L'auteur du rapport a réalisé une visite des travaux miniers dans la carrière de Montmorency le 3 avril 2008, carrière dont le recouvrement est de même ordre de grandeur que Cormeilles et varie d'un quartier à l'autre entre 55 et 85 m environ.</p> <p>L'exploitation est conduite par chambres et piliers dans la 1<sup>ère</sup> masse du gypse uniquement et selon deux schémas principaux : maille de 18 x 18 (piliers carrés de 10 m et galeries de 8m), soit un défruitement surfacique de 69%; maille de 24 x 24 m (piliers carrés de 16 m et galeries de 8m), soit un défruitement surfacique de 56%.</p> <p>L'exploitation est réalisée avec une planche de gypse au toit de 2 m et pour une hauteur de 7 m en 1<sup>ère</sup> configuration. En 2<sup>ème</sup> configuration, un levage de 2 m est réalisé qui porte la hauteur des chambres à 9 m et une planche au mur de 1 m est conservée.</p> <p>Les galeries ont une forme trapézoïdale avec une ouverture de 8 m à la base et une portée de l'ordre de 3 m au toit. Les conditions de foration et de tir aboutissent le plus souvent à des galeries en forme de voûte. Les toits des carrefours sont renforcés pas un boulonnage à ancrage réparti à la résine (9 boulons diamètre 22 mm, L = 1,75 m).</p> <p>La remise en état de la carrière est réalisée par comblement des vides avec un remblai poussé jusqu'au toit des chambres et clavé.</p>	<p>Une amélioration du découpage pourrait probablement être obtenue / aurait probablement pu être obtenue, par l'optimisation du plan de tir dans le sens d'une limitation des vibrations (diamètre et espacement des trous, géométrie du bouchon et réduction des charges unitaires), ainsi que par l'automatisation de la foration.</p>
A.13	REX Montmorency – Comportement du terrain / chap. 3.4	<p>L'auteur du rapport a identifié et analysé le comportement de 5 zones différentes dans la carrière. On en fait la synthèse suivante :</p> <p>Zone 1 : galerie de roulage :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• En dépit d'une portée limitée du toit (ordre de 3 m), une fracturation centrale est bien visible,</li> </ul>	

**PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 10**

		<p>Zone 2 : Quartier exploité avec des piliers en quinconce dans les années 1950 – 1960 dans une zone située sous 60 m de recouvrement environ :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Taux de défrètement de 75 % environ, avec des galeries de 8 m de large et de 8,5 m de hauteur après levage,</li> <li>• Planche au toit de 2 m mais planche au mur très faible voire nulle compte tenue de l'épaisseur limitée de la 1<sup>ère</sup> masse de gypse,</li> <li>• L'exploitation en quinconce avait pour but de limiter la portée des carrefours aux intersections des galeries,</li> <li>• Deux modes de rupture observés : 1 – Rupture en base de pilier par excès de compression (fractures tangentielles jusqu'au cœur des piliers). 2 – Soufflage de la planche au mur par excès de flexion (fractures longitudinales),</li> <li>• Il est noté que le 2<sup>ème</sup> mode de rupture (soufflage du mur) concerne uniquement des zones qui ont été immergées entre 1983 et 1990,</li> <li>• Il est noté également que le taux de défrètement réalisé a conduit une compression effective moyenne de 5,9 MPa à la base des piliers, valeur qui de facto s'est avérée excessive ici,</li> <li>• La prise en compte de l'élanement du pilier par la formule empirique de Salomon permet à l'auteur de remonter à une résistance ultime de la 1<sup>ère</sup> masse de 9,3 MPa.</li> </ul>	<p>Il y a lieu tout d'abord de relever que les phénomènes de soufflage n'ont pas été observés dans les zones où il n'y a pas eu de stockage d'eau. Le rapport de cause à effet paraît très clair ici pour expliquer le soufflage.</p> <p>Cela étant, l'auteur du rapport calcule la contrainte moyenne effective en base des piliers avec une couverture de terrain de 70 m.</p> <p>En considérant plutôt 60 m jusqu'au toit et en ajoutant le poids du terrain sur la hauteur du pilier, toute autre chose restant égale par ailleurs, on obtient une contrainte effective moyenne d'environ 5,3 MPa, c'est-à-dire un peu inférieure à celle calculée par l'auteur du rapport.</p> <p>On en déduit à partir de la formule de Salomon une <b>résistance ultime de la 1<sup>ère</sup> masse de 8,4 MPa</b>.</p> <p>Cette valeur doit évidemment être considérée comme un ordre de grandeur, le calcul avec une masse spécifique uniforme de 2100 kg/m<sup>3</sup> pour l'entier des terrains de recouvrement étant probablement sujet à caution.</p>
		<p>Zone 3 : Quartier exploité avec des piliers de 10 x 10 m dans une zone située sous 80 m de recouvrement environ :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Taux de défrètement de 69 % environ, avec des galeries de 8 m de large et de 9 m de hauteur après un levage de 2 m,</li> <li>• Planche au toit de 2 m et planche au mur de 1 m,</li> <li>• Aucune instabilité au toit et au mur, mais fractures d'extension limitée et jusqu'à un maximum de 2 m à la base des piliers. Ces fractures demeurent acceptables selon l'auteur étant donné le remblayage ultérieur et le fait qu'elles ne remettent pas en cause la stabilité locale et générale de l'exploitation,</li> </ul>	<p>En considérant plutôt 70 m jusqu'au toit et en ajoutant le poids du terrain sur la hauteur du pilier, toute autre chose restant égale par ailleurs, on obtient une contrainte effective moyenne d'environ 6,1 MPa.</p> <p>On en déduit à partir de la formule de Salomon une <b>résistance ultime de la 1<sup>ère</sup> masse de précisément 9 MPa</b>.</p>

**PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 11**

		<ul style="list-style-type: none"> <li>Le même calcul que précédemment réaliser pour un recouvrement de 90 m conduit à estimer une résistance effective des piliers inférieure à 6 MPa et une résistance ultime de la 1<sup>ère</sup> masse inférieure à 9 MPa.</li> </ul>	
		<p>Zone 4 : Quartier exploité avec des piliers de 16 x 16 m dans une zone située sous 70 m de recouvrement environ :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Taux de défrètement de 56 % environ, avec des galeries de 8 m de large et de 7 m de hauteur jusqu'à ce jour,</li> <li>Planche au toit de 2 m et planche au mur de 1 m,</li> <li>Quelques fractures superficielles non significatives observées au niveau des piliers, mais aucun signe d'instabilité.</li> </ul>	<p>L'ordre de grandeur de la sollicitation effective du pilier est de 3,5 MPa, valeur à priori assez éloignée de sa résistance effective pour l'échelle de temps considérée ici (le levage n'a pas encore été réalisé à la date de la visite).</p>
		<p>Zone 5 : Quartier du Plumet ; exploité avec des piliers de 10 x 10 m dans une zone située sous 55 m de recouvrement environ :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Zone caractérisée par une forte altération des terrains et la présence de fractures importantes à remplissage argileux sur plusieurs centimètres d'épaisseur,</li> <li>Taux de défrètement de 69 % environ, avec des galeries de 8 m de large et de 7 m de hauteur,</li> <li>Des instabilités se sont produites au toit des chambres et au niveau de piliers,</li> <li>L'exploitation dans cette direction a été arrêtée.</li> </ul>	
		<p>Synthèse des observations :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Le schéma avec maille 16 x 16 et levage amenant les galeries à 9 m de hauteur ne permet pas d'assurer l'exploitation de galeries à long terme,</li> <li>Le schéma avec maille 18 x 18 permet d'assurer des conditions de stabilité meilleures mais un remblayage est nécessaire à moyen terme,</li> <li>Le schéma avec maille 24 x 24 avec ou sans levage offre des conditions de stabilité suffisantes. Un remblayage après le levage permet de garantir la sécurité à très long terme,</li> </ul>	<p>On tire de cette synthèse que le schéma avec maille de 18 x 18 est celui préconisé par l'auteur pour la hauteur totale d'exploitation de 9 m réalisée à Montmorency, avec cependant la nécessité de remblayage à moyen termes.</p> <p>Nous partageons les principaux enseignements tirés par l'auteur du rapport, avec une nuance cependant pour le dernier point évoqué. Considérant que l'auteur traite ici de la résistance intrinsèque du pilier, c'est-à-dire avec le seul effet d'échelle correspondant à sa section, mais sans prise en compte de son élancement, les 3,8 MPa indiqués en valeur basse de la fourchette nous paraissent en effet très / trop</p>

**PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 12**

		<ul style="list-style-type: none"> <li>Des planches de gypse de 2 m au toit et 1 m au mur sont nécessaires et suffisantes pour se protéger contre les marnes de mauvaise tenue mécanique,</li> <li>Le développement de l'exploitation dans les zones altérées et marquées par une fracturation intense et un remplissage argileux est très difficile. Il est important de reconnaître ces zones pour organiser l'exploitation,</li> <li>Les calculs inverses effectués montrent que la résistance en compression simple ultime de la 1<sup>ère</sup> masse de gypse à l'échelle des piliers se situe entre 3,8 et 9 MPa et que la résistance des marnes d'entre deux masses est inférieure à 3,8 MPa.</li> </ul>	<p>prudents eu égard au REX des 5 zones analysées à Montmorency</p>
<p>A.14</p>	<p>Dimensionnement des ouvrages / chap. 4</p>	<p>Schéma d'exploitation :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Exploitation de la 1<sup>ère</sup> masse de gypse sur une hauteur moyenne de 12,5 m (14,5 maxi), avec planche de gypse de 2 m au toit et de 1 m au mur,</li> <li>Exploitation en 2 phases avec traçage entre 7 et 9 m puis levage,</li> <li>Remblayage des piliers sur une hauteur de 3,5 m à la fin de l'opération de levage,</li> <li>Schéma d'exploitation avec maille de 18 x 18 (piliers de 10 x 10 et galeries de 8 m).</li> </ul> <p>Commentaires principaux de l'auteur :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Ce schéma correspond à un taux de défrètement de 69%.</li> <li>La contrainte moyenne effective dans la section des piliers est de 4,76 MPa,</li> <li>Pour une résistance effective du pilier de 5,78 MPa, il est obtenu un facteur de sécurité de 1,21,</li> <li>L'étape de traçage ne pose aucun problème de stabilité à moyen terme (résistance effective de la 1<sup>ère</sup> masse réalisée pour cette phase avec le fractile 2,5 %),</li> <li>L'homogénéité de la 1<sup>ère</sup> masse de gypse et l'élançement proche de 1 des piliers sont des éléments favorables pour la stabilité.</li> </ul> <p>La géométrie proposée pour les galeries est donnée à la figure 15.</p>	<p>L'auteur du rapport considère une résistance effective du pilier de 5,78 MPa calculée à partir d'une <b>résistance ultime du gypse de 10,61 MPa</b> (Moyenne – 2 x Ecart-types : fractile 2,5 %) et d'un élançement de 1,25 (12,5 / 10).</p> <p>Il y aurait également lieu selon nous de considérer les conditions suivantes pour le dimensionnement :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>L'extension envisagée à 14 m de hauteur de l'exploitation,</li> <li>Les valeurs basses de RC obtenues sur les échantillons S5-4 et S5-6 mentionnées précédemment au point A.7.</li> </ul>

**PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 13**

<p>A.15</p>	<p>Calcul aux éléments finis / chap. 4</p>	<p>Caractéristiques / hypothèses principales :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Calcul pour un recouvrement de 70 m à partir du toit,</li> <li>• Modèle aux éléments finis 2D,</li> <li>• En élastoplasticité parfaite avec critère de rupture Mohr-Coulomb pour tous les terrains,</li> <li>• Coefficient de terre au repos <math>K = 0,5</math>,</li> <li>• Valeurs géomécaniques correspondant au fractile 1% du tableau 4, sauf pour le RC de la 1<sup>ère</sup> masse de gypse où c'est le fractile 2,5% qui a été considéré et pour lequel a été appliquée la réduction selon la formule empirique de Salomon pour tenir compte de l'élançement du pilier.</li> </ul>	<p>Modèle 2D axisymétrique, l'axe de révolution étant vertical et au centre d'un pilier. Le pilier modélisé est cylindrique, comme le terrain au-dessus et celui au-dessous.</p> <p>Le diamètre du cylindre de pilier modélisé étant 10 m, sa section est de 78,5 m<sup>2</sup>. Elle est donc inférieure à la section réelle du pilier qui est 100 m<sup>2</sup>. De même, le diamètre du cylindre de terrain modélisé étant 18 m, sa section est de 254,5 m<sup>2</sup>. Elle est inférieure à la section réelle du terrain au-dessus et au-dessous qui est 324 m<sup>2</sup>. Les rapports de section étant identiques, la contrainte moyenne est donc conservée.</p> <p>Il est à noter que la concentration des contraintes dans les zones d'angles des piliers (carrefours) n'est pas simulée avec ce modèle.</p> <p>On constate par ailleurs que la résistance en compression simple considérée dans le modèle pour la 1<sup>ère</sup> masse de gypse correspond à la valeur réduite pour tenir compte de l'élançement du pilier.</p> <p>Interrogé à ce sujet dans le cadre de la présente expertise, l'auteur du rapport nous a précisé qu'il est difficile de mettre en évidence, avec le type de modélisation utilisée ici, une différence de répartition de contraintes dans les piliers pour les élançements envisagés. La réduction de la résistance du pilier en fonction de son élançement permet dans ce cas d'intégrer l'effet de la fracturation ou d'hétérogénéités. L'approche retenue ici est donc sécuritaire.</p>
<p>A.16</p>	<p>Calcul aux éléments finis – résultats / chap. 4.2</p>	<p>Le profil de la contrainte verticale au milieu du pilier est donné à la figure 18. On en tire une valeur moyenne égale à 5,1 MPa, une maximale à 5,4 MPa.</p>	<p>On constate une contrainte verticale (tangentielle) de 4,8 MPa en paroi du pilier. Cela étant, la distribution des contraintes principales n'est pas fournie.</p>

**PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 14**

		<p>La vue déformée de la structure et celle des zones de rupture sont données à la figure 19.</p> <p>On en tire notamment l'existence d'une zone plastique (rupture) principale à la base des piédroits et une zone secondaire à l'angle en haut des piédroits.</p> <p>Le remblayage qui serait mis en place sur une hauteur de 3,5 m permettrait de stabiliser totalement les zones soufflées au mur et les zones fracturées à la base des piliers.</p>	<p>On peut lire sur la déformée des déformations maxi d'environ 2 cm en clef de voûte et des déformations insignifiantes en piédroit.</p> <p>On y lit aussi un soulèvement théorique du radier d'environ 3 cm, valeur probablement surestimée selon nous, le module de décharge du rocher n'étant pas différencié du module de charge dans la loi de comportement considérée par le calcul.</p> <p>À noter également une déformation d'environ 15 mm mesurée au niveau des marnes bleues d'Argenteuil.</p>
--	--	--	--

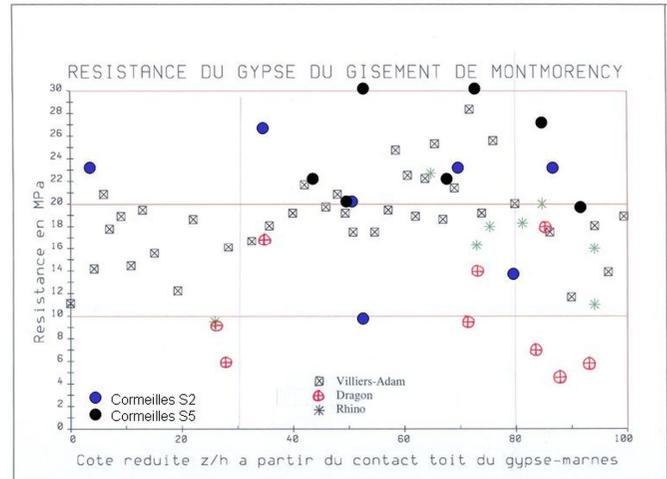
**4.1.2 Avis sur les conclusions du rapport**

Les conclusions de l'auteur du rapport sont données au chapitre 5. Elles sont résumées et commentées dans le tableau suivant.

<b>Conclusions principales du rapport</b>	<b>Avis de l'expert</b>
<p>Avec une profondeur moyenne de l'ordre de 60 m et des quartiers jusqu'à 85 m de profondeur, les conditions d'exploitation de la future carrière de Cormeilles sont très similaires à celles de l'exploitation actuelle de Montmorency.</p>	<p>Nous partageons ce constat qui amène cependant à s'interroger sur les variations possibles des conditions d'exploitation à Cormeilles selon les secteurs, eu égard aux variations constatées à Montmorency (cf. exploitations des zones identifiées 1 à 5 dans le rapport en objet, avec notamment l'abandon du quartier du Plumet).</p> <p>Interrogé à ce sujet, Placoplatre nous a indiqué que de l'abandon du quartier du Plumet avait été décidé suite à des problèmes de qualité insuffisante du gypse rencontrés localement (présence de marnes), problèmes qui se sont notamment traduits par des retours des cimentiers.</p>

**PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 15**

<p>Les terrains de recouvrement sont constitués par des formations de faible tenue mécanique.</p>	<p>Nous partageons ce constat.</p>
<p>La 1<sup>ère</sup> masse de gypse a une épaisseur moyenne de 15,5 m et comprend une partie sommitale marquée par des intercalations argileuses. La partie basse est également marquée par des passages de gypse marneux</p>	<p>Cette affirmation est basée sur 6 sondages et probablement sur le REX de la carrière à ciel ouvert.</p> <p>Pour préciser les conditions d'exploitation à attendre selon les secteurs, il y a lieu de prendre en compte les éléments suivants:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• l'échelle de variation du niveau du toit en lien avec d'éventuels phénomènes de dissolution,</li> <li>• les conditions de tenue des planches au toit et au mur associées aux variations de l'épaisseur de la 1<sup>ère</sup> masse de gypse.</li> </ul> <p>On rappelle à ce propos :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• que la dissolution complète du gypse a été observée une fois dans les années 1990 en partie Est de la carrière à ciel ouvert actuelle, avec pour corollaire un fléchissement à grande échelle des couches supragypseuses. Cela étant, aucun autre évènement de ce type n'a été observé pour l'exploitation actuelle,</li> <li>• que l'épaisseur réduite à 13,2 m de la 1<sup>ère</sup> masse du gypse au sondage CS07-06 (fort de Cormeilles) a probablement pour origine un phénomène de dissolution localisé.</li> </ul>
<p>Les marnes d'entre deux masses ont une épaisseur moyenne de 3,5 m et sont constituées par 2 niveaux indurés séparés par un niveau plastique d'une quarantaine de cm</p>	<p>La question de la qualité des marnes d'entre deux masses est pertinente principalement dans le cas où la planche de mur est réduite à moins d'1 m, ou bien si la qualité de cette planche devait s'avérer médiocre.</p>
<p>Les deux masses de gypses et des marnes intermédiaires sont plus résistantes dans la zone étudiée de Cormeilles que dans la carrière de Montmorency</p>	<p>Cette affirmation doit être nuancée selon nous, du fait des circonstances énoncées à la position A.11 du chapitre précédent et résumées ci-après :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Un échantillonnage faible à Cormeilles, comparativement à Montmorency (par exemple 14 RC à Cormeilles contre 108 à Montmorency),</li> <li>• Le fait qu'à Montmorency les carottes ont été prélevées en toit ou en mur de la carrière existante explique des valeurs d'essai basses comparativement aux autres sites (péjoration des résultats par la microfissuration de la 1<sup>ère</sup> masse consécutive au minage et aux sollicitations de flexion en toit et en mur).</li> </ul> <p>Interrogé à ce sujet dans le cadre de la présente expertise, l'auteur du rapport nous a transmis la compilation ci-après de valeurs RC pour les carrières de Montmorency (Dragon et Rhino), Villiers-Adam et Cormeilles. À noter que l'échelle des abscisses est normée est rapportée à la hauteur de la couche de 1<sup>ère</sup> masse pour chacun des sondages considérés.</p>



Les indications figurant en partie basse à gauche et au centre de la figure étant des indications de légende uniquement, on relève les points suivants :

- L'absence de valeurs RC sur l'intervalle  $z/h = 0,3 - 0,5$  environ pour Montmorency (Dragon et Rhino). Cette situation tient bien sûr au fait que les prélèvements ont été réalisés ici au toit et au mur des galeries existantes,
- Des RC bas à Montmorency, dans la majorité des cas **plus faibles que l'ordre de grandeur de 9 MPa estimé pour la contrainte ultime de la 1<sup>ère</sup> masse à partir de l'analyse des conditions de stabilité dans 5 zones** de la carrière de Montmorency reportée au point A13 précédent,
- Un nombre très significatif de RC pour Villiers-Adam, avec notamment des valeurs plutôt élevées (fourchette 17 à 28 MPa) sur l'intervalle  $z/h = 0,3 - 0,8$ ,
- Sur le même intervalle  $z/h = 0,3 - 0,8$ , les RC les plus élevés sont obtenus pour les sondages Cormeilles, à l'exception de deux valeurs : 9,6 MPa et 14,06 MPa respectivement pour S5-4 et S5-6.

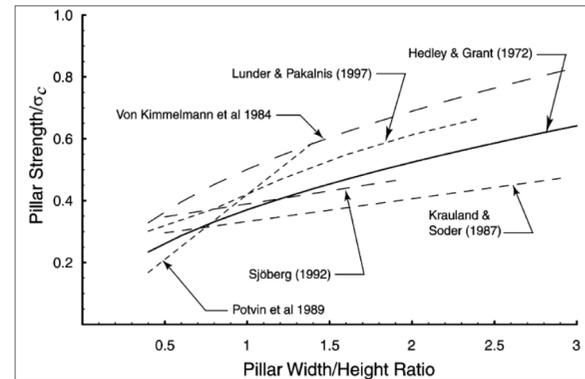
Comme déjà indiqué, la comparaison directe des valeurs d'essais Montmorency et Cormeilles n'a que peu d'intérêt ici selon nous, les valeurs RC plus basses que **la résistance ultime estimée par rétroanalyse des conditions de stabilité des piliers attestant d'une microfissuration des échantillons objets des tests RC**. Il nous paraît plus pertinent de comparer les valeurs d'essais de Villiers-Adam avec celles de Cormeilles, étant données les circonstances suivantes :

**PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 17**

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La proximité des carrières de Villiers-Adam et de Montmorency, avec par ailleurs un positionnement plus central dans le massif de gypse et un gisement plus épais pour Montmorency. Cette situation donne à penser que les caractéristiques de la 1<sup>ère</sup> masse de gypses doivent être assez peu différentes sur les 2 sites,</li> <li>• Les valeurs RC ci-avant pour Villiers-Adam sont des valeurs "roche intacte", puisque les échantillons prélevés l'ont été à partir de sondages réalisés depuis la surface,</li> <li>• Une <b>fourchette RC de 17 à 28 MPa</b> sur l'intervalle z/h = 0,3 – 0,8 pour la 1<sup>ère</sup> masse de gypse de <b>Villiers-Adam cohérente avec l'ordre de grandeur de 9 MPa estimé pour la résistance ultime Ru</b> de la 1<sup>ère</sup> masse dans la rétro analyse de 5 zones de la carrière de <b>Montmorency</b> (voir position A.13 au chapitre 4.1.1),</li> <li>• Le nombre assez important de valeurs RC disponibles pour Villiers-Adam.</li> </ul>
<p>Les phénomènes d'échelle et du comportement à long terme ont été pris en compte par le biais d'une distribution gaussienne de la résistance du rocher avec des valeurs ultimes considérées pour le dimensionnement correspondant aux fractiles 2,5% (2 écart-types) et 1% (2,33 écart-types) respectivement pour les situations moyen terme et long terme.</p>	<p>La méthode considérée ici pour prendre en compte les phénomènes d'échelle et de comportement à long terme du rocher est discutable selon nous pour les raisons suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pour un même terrain, le facteur d'échelle entre un échantillon testé en laboratoire et un pilier de carrière n'est pas de même nature que le facteur rhéologie (évolution des caractéristiques géomécaniques avec le temps). L'association des deux phénomènes dans un même modèle est donc sujette à caution selon nous,</li> <li>• L'échantillonnage réalisé est trop faible à Cormeilles pour permettre une approche statistique des caractéristiques géomécaniques. À contrario, une telle approche serait à priori légitime à Montmorency compte tenu du nombre d'essais réalisés,</li> <li>• Rien ne prouve "l'universalité" de la loi de Gauss pour la géotechnique en général et pour les lithologies du site de Cormeilles en particulier. Il nous semblerait opportun de citer un exemple d'étude antérieure où cette approche a montré sa pertinence et son efficacité. Faute de connaître le détail des essais réalisés à Cormeilles (non plus qu'à Montmorency d'ailleurs), il n'est pas possible ici de comparer la distribution des résultats obtenus avec une courbe de Gauss,</li> <li>• Le calage réalisé en figure 8 considère la valeur moyenne (22,37 MPa) et l'écart-type (5,88 MPa) obtenus à partir de 14 essais RC sur la 1<sup>ère</sup> masse de gypse. L'auteur aurait obtenu un résultat très différent s'il avait calé sa courbe de Gauss sur RC obtenus à Montmorency (RC moyen de 10,1 MPa) ou à Villiers-Adam.</li> </ul> <p>On propose de prendre en compte les phénomènes en objet (facteur d'échelle et comportement mécanique à long terme) par le biais du rapport entre la résistance ultime Ru et la résistance en compression simple RC du gypse de 1<sup>ère</sup> masse tiré de l'expérience d'autres carrières de gypse et de la rétro-analyse des conditions de stabilité de la zone 3 de Montmorency. Voir pages 20 – 21 du présent document.</p>
<p>L'influence de l'élanement du pilier sur sa résistance effective est approchée par la formule empirique de Salomon</p>	<p>Il est effectivement nécessaire de considérer l'influence de l'élanement dans les calculs analytiques simples tels que celui de l'aire participative. S'agissant d'une méthode empirique, il s'agit cependant d'en vérifier le domaine de validité.</p>

Selon l'auteur, la formule de Salomon est validée pour les piliers de mines de fer. Les terrains concernés n'ayant pas les mêmes propriétés que le gypse (pas ou peu de fluage par exemple), des références bibliographiques complémentaires ou des retours d'expérience sont nécessaires pour confirmer la validité de la méthode.

Interrogé à ce sujet dans le cadre de la présente expertise, l'auteur du rapport nous a transmis la figure ci-après qui superpose des approches empiriques, utilisées pour le charbon, des roches massives ou des calcaires, de la résistance d'un pilier en fonction de son élancement.



Pour un pilier de 10 x 10, on en tire les fourchettes suivantes du facteur multiplicatif selon la référence considérée:

- Entre 0,34 et 0,56 pour une hauteur d'exploitation de 9 m ( $W/H = 1,1$ ),
- Entre 0,32 à 0,45, pour une hauteur d'exploitation de 12,5 m ( $W/H = 0,8$ ),

Pour comparaison, on obtient avec la formule de Salomon (celle utilisée dans le rapport) 0,67 et 0,54 respectivement pour les deux hauteurs d'exploitation considérées.

Force est donc de constater que les valeurs tirées de la figure ci-avant sont plus prudentes que celles obtenues avec la formule de Salomon.

Le dimensionnement des ouvrages intègre un facteur de sécurité

Étant données nos réflexions précédentes sur la prise en compte les phénomènes d'échelle et de comportement à long terme du rocher dans l'étude, il vient que le facteur de sécurité proposé dans le rapport n'a que peu de signification selon nous.

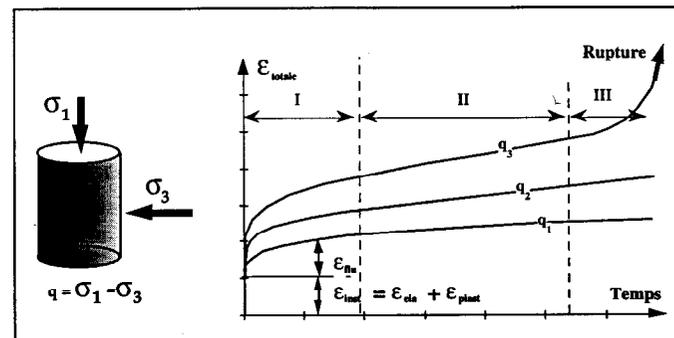
Dans un contexte minier, il convient selon nous d'adopter une démarche visant à fixer a priori, à partir de retours d'expérience d'autres carrières, une contrainte admissible de compression du gypse (résistance ultime), puis de comparer le résultat des calculs avec cette valeur de contrainte.

C'est cette démarche qui est proposée dans le rapport ARMINES de mars 2014 sur le dimensionnement des galeries d'accès et qu'il convient selon nous de considérer pour l'entier de l'exploitation souterraine.

La contrainte admissible (résistance ultime) proposée dans ce rapport est définie à partir de la limite élastique mesurée lors d'un essai de compression simple, ladite limite élastique correspondant à la sollicitation à partir de laquelle le volume de l'éprouvette commence à augmenter (dilatance).

Par ailleurs, il y a lieu selon nous d'avoir à l'esprit le comportement ductile du gypse et des marnes avant rupture, cette caractéristique étant éminemment favorable pour la sécurité de l'exploitation dans le sens qu'elle prévient avant rupture.

La figure suivante, qui représente l'évolution des déformations en fonction du temps en fonction du niveau de contrainte appliqué dans un essai de fluage, illustre cette caractéristique du gypse.



Selon la contrainte appliquée, deux ou trois phases peuvent être distinguées :

- La phase I (phase primaire) est caractérisée par une vitesse initialement élevée du fluage qui décroît rapidement;
- La phase II (phase stationnaire) est caractérisée par une vitesse de fluage relativement constante,
- Selon l'état de contrainte, la phase III (phase tertiaire) peut apparaître ou non. Elle est caractérisée par une augmentation de la vitesse de fluage jusqu'à la rupture.

Interrogé à ce sujet, l'auteur du rapport a fourni les informations suivantes quant aux principes de dimensionnement considérés :

**PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 20**

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dans son principe, la méthodologie mise en œuvre pour l'étude ARMINES de 2009 est équivalente à celle de 2014. Dans une première phase, la résistance ultime du gypse a été évaluée par rapport à la notion de limite élastique, à l'expérience, aux observations et aux rétro-analyses effectuées sur la carrière de Montmorency. Une fois la résistance ultime du gypse évaluée, l'effet de l'élançement a été pris en compte par une formule empirique faute d'autres moyens pour aborder cette question,</li> <li>• Le dimensionnement des piliers a été effectué par la suite, dans un premier temps, avec la méthode classique de l'aire tributaire en utilisant un facteur de sécurité minimal de 1.2 car les galeries sont amenées à être partiellement puis totalement remblayées. Ce dimensionnement a été validé, dans un second temps, par un calcul numérique dans lequel la résistance du gypse a été affaiblie pour rendre compte de l'élançement des piliers (approche sécuritaire).</li> </ul>
<p>L'exploitation de la 1<sup>ère</sup> masse de gypse peut se faire dans les conditions suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Récupération d'une hauteur moyenne de 12,5 m de gypse, selon maille de 18 m (piliers carrés e 10 m et galeries de 8 m), avec planches de gypse au toit et au mur de 2 m et 1 m respectivement,</li> <li>• Excavation en 2 phases : traçage et levage, le traçage étant réalisé sur 7 à 9 m de hauteur (aucun risque d'instabilité à long terme pour le traçage),</li> <li>• Remblayage sur 3,5 m pour conforter les bases de pilier et réduire leur élançement</li> </ul>	<p>En vue du dimensionnement de l'exploitation future à Cormeilles, il y a lieu de s'interroger sur la cause des fractures observées à la base des piliers dans la zone 3 à Montmorency (fractures d'extension limitée et jusqu'à un maximum de 2 m), quand bien même, selon l'auteur du rapport, lesdites fractures ne remettent pas en cause la stabilité locale et la stabilité globale de l'exploitation.</p> <p>Les fractures en question peuvent avoir pour cause l'élançement du pilier, une résistance un peu faible du gypse au niveau du mur (hauteur de la planche au mur : 1 m) ou bien encore la seule discontinuité géométrique correspondant à l'angle base de piédroit-mur. Il est probable que le phénomène résulte d'une combinaison de ces facteurs, sachant par ailleurs que le calcul aux éléments finis réalisé pour Cormeilles a montré l'apparition d'une zone de rupture en base de piédroit.</p> <p>Pour Cormeilles, l'élançement des piliers sera identique pour la phase de traçage à celui de la zone 3 après levage à Montmorency (hauteur 9 m).</p> <p>Il sera cependant notablement augmenté au levage puisque, pour les hauteurs d'exploitation de 12,5 m et 14 m envisagées, il sera porté à 1,25 et 1,4 respectivement, soit des augmentations de 39 et 56%. L'application de la formule empirique de Salomon conduit à considérer une diminution de la résistance effective du pilier de 20 et 25 % (le facteur correctif de la résistance du rocher passe de 0,67 à 0,54 et 0,48 respectivement).</p> <p>Les situations pour 70 m de recouvrement et jusqu'à 85 m sont distinguées ci-après à partir du rapport entre la résistance ultime Ru et la résistance en compression simple RC pour le gypse de 1<sup>ère</sup> masse. On <b>retient la valeur de 0,45 pour ce rapport</b> sur la base des considérations suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 0,45 est précisément la valeur obtenue du rapport entre 9 MPa de Ru estimé à partir du REX de la zone 3 à Montmorency (position A.13 au chapitre 4.1.1 de ce rapport) et 20 MPa de moyenne RC roche intacte obtenue pour Villiers-Adam (sur les 24 valeurs de la tranche z/h = 0,15 et z/h = 0,9 selon figure "Résistance du gypse du gisement</li> </ul>

**PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 21**

de Montmorency" au chapitre 4.1.2), la 1<sup>ère</sup> masse de gypse de Villiers-Adam ayant très probablement des caractéristiques géomécaniques sinon identique du moins très proches de celles de Montmorency du fait de la proximité des 2 carrières,

- 0,45 a été retenu comme valeur de référence de  $R_u / R_c$  pour le gypse de 1<sup>ère</sup> masse dans le rapport TEC du 10-07 2002 pour l'étude géotechnique de dimensionnement de l'exploitation de la carrière souterraine de Coubron (zone delta et Bois de Bernouille), rapport qui faisait suite à celui de l'École nationale Supérieure des Mines de Paris du 10-10-1997,

Exploitation pour 70 m de recouvrement :

Pour la contrainte verticale moyenne dans le pilier de 5,1 MPa donnée par le calcul aux éléments finis, il vient que **la résistance ultime de la 1<sup>ère</sup> masse** de gypse à Cormeilles doit, pour le mode d'exploitation considéré, être supérieur ou égale à 7,6 MPa, 9,5 MPa ou 10,2 MPa pour 70 m de recouvrement, selon qu'on considère la phase de traçage à 9 m, la phase de levage à 12,5 m ou celle à 14 m.

Considérant le rapport de 0,45 entre  $R_u$  et  $R_c$ , on tire les valeurs  $R_c$  minimales nécessaires suivantes pour l'exploitation sous 70 m de recouvrement :

- Pour le traçage à 9 m, un  $R_c$  d'au moins 16,9 MPa,
- Pour le levage à 12,5 m, un  $R_c$  d'au moins 21,1 MPa,
- Pour le levage à 14 m, un  $R_c$  d'au moins 22,7 MPa.

Avec la valeur moyenne  $R_c$  de 22,4 MPa tirée du tableau 2 du rapport en objet, il vient que **les garanties de stabilité à long terme pour 70 m de recouvrement sont suffisantes pour le traçage à 9 m et pour le levage à 12,5 m.**

Considérant cependant d'une part, le faible échantillonnage de valeurs  $R_c$  disponible à ce jour (14 essais seulement) et, d'autre part, le constat d'une valeur particulièrement basse (9,6 MPa) obtenue sur l'échantillon 4 du sondage S5 (secteur Ouest de la future carrière), il y a selon nous lieu de rester prudent, pour le mode d'exploitation considéré, quant aux conditions de stabilité à long terme du levage à 12,5 m. **Le remblayage sur 3,5 m** proposé dans le rapport en objet nous semble effectivement devoir être prévu au stade actuel du projet. Sous réserve d'informations complémentaires sur la rhéologie des gypses de la 1<sup>ère</sup> masse, on propose de retenir pour cette opération une durée **d'un an maximum après le levage.**

Quant au **levage à 14 m**, le dimensionnement réalisé ne permet pas selon nous d'en garantir la faisabilité pour le mode d'exploitation considéré. La réalisation d'un tel levage nécessite probablement la mise en œuvre de dispositions particulières de fretage type élargissement des bases de pilier (patte d'éléphant) et/ou boulonnage à mi-hauteur des piliers.

**PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 22**

	<p><u>Exploitation jusqu'à 85 m de recouvrement :</u></p> <p>Pour un recouvrement jusqu'à 85 m, tel qu'indiqué dans la conclusion du rapport en objet, il y a lieu de considérer des sollicitations plus élevées de 20% environ par rapport à celles définies précédemment. Il vient que <b>la résistance ultime de la 1<sup>ère</sup> masse</b> de gypse à Cormeilles doit, pour le mode d'exploitation considéré, être supérieur ou égale à 9,2 MPa, 11,5 MPa ou 12,3 MPa pour 85 m de recouvrement, selon qu'on considère la phase de traçage à 9 m, la phase de levage à 12,5 m ou celle à 14 m.</p> <p>Considérant le même rapport de 0,45 précédent entre Ru et RC, on tire les valeurs RC minimales nécessaires suivantes pour l'exploitation sous 85 m de recouvrement :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pour le traçage à 9 m, un RC d'au moins 20,4 MPa,</li> <li>• Pour le levage à 12,5 m, un RC d'au moins 25,6 MPa,</li> <li>• Pour le levage à 14 m, un RC d'au moins 27,3 MPa.</li> </ul> <p>Avec la valeur moyenne RC de 22,4 MPa, il vient que <b>les garanties de stabilité à long terme pour 85 m de recouvrement semblent suffisantes uniquement pour le traçage à 9 m</b> pour le mode d'exploitation considéré.</p> <p>La faisabilité du <b>levage à 12,5 m n'est probablement pas garantie partout pour ce recouvrement</b>. Elle sera possible dans les meilleurs faciès de gypse constatés après le traçage et <b>moyennant un remblayage sur 3,5 m de hauteur avant 1 an</b>. Pour des faciès de qualité "plus moyenne", il y lieu d'instrumenter les piliers (cordes de convergences, mesures topographiques et/ou extensomètres par exemple) pour évaluer de cas en cas les conditions de levage jusqu'à 12,5 m et le délai de remblayage.</p> <p>Quant au <b>levage à 14 m</b>, sa mise en œuvre pour les plus forts recouvrements n'est envisageable selon nous que dans les meilleurs faciès de gypse constatés après le traçage et moyennant <b>des dispositions particulières de frettage</b> type élargissement des bases de pilier (patte d'éléphant) et/ou boulonnage ou encore tirantage à mi-hauteur des piliers.</p>
<p>En raison du litage en partie supérieur du gypse, il est recommandé de boulonner les carrefours des galeries avant 40 mois à l'instar de ce qui se pratique dans les autres carrières souterraines</p>	<p>Nous approuvons le principe du boulonnage des carrefours, mais le délai 40 mois prescrit nous paraît trop important.</p> <p>Il y a probablement lieu de raccourcir cette durée de cas en cas selon les conditions de tenue observées, mais sans dépasser toutefois 2 ans.</p>



## PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 23

Il est recommandé de procéder au remblayage des galeries sur 3,5 m de hauteur à chaque fin de panneau d'exploitation, c'est-à-dire après 1 an environ,	Nous approuvons cette recommandation.
--	---------------------------------------

### 4.2 Rapport de dimensionnement des galeries d'accès à la carrière souterraine

#### 4.2.1 Analyse détaillée / reformulation

Notre analyse "point par point" des chapitres 1 à 4 du rapport "Dimensionnement des galeries d'accès dans la future carrière de gypse de Cormeilles-en-Parisis" – ARMINES de mars 2014 est donnée sous forme de tableau ci-après.

Pos.	Thème / Chapitre	Sujet / argument de l'auteur du rapport	Note de lecture / commentaire de l'expert
B.01	Contexte et objectif de l'étude / Chap. 1	<p>L'étude a pour objet le dimensionnement des galeries d'accès pour deux configurations d'exploitation de la carrière : une configuration d'accès provisoire à partir du front actuel de la carrière à ciel ouvert et une configuration d'accès définitif à partir d'une route existante.</p> <p>L'étude traite successivement des points suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Positionnement des galeries dans les bancs de gypse,</li><li>• Définition du profil es galeries,</li><li>• Besoin ou non de boulonnage,</li><li>• Optimisation des piliers de séparation des galeries.</li></ul>	

**PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 24**

<p>B.02</p>	<p>Caractéristiques géotechniques / Chap. 2.2</p>	<p>Le tableau 2 et la figure 8 donnent une synthèse des essais de laboratoire réalisés en 2008 à partir des 3 sondages mentionnés dans le rapport de dimensionnement précédent (exploitation de la 1<sup>ère</sup> masse).</p> <p>L'auteur présente à la figure 10 le diagramme des valeurs RC sur la hauteur de la couche de 1<sup>ère</sup> masse de gypse mesurées dans les exploitations de Taverny et Villiers-Adam avec superposition des valeurs obtenues pour le site de Cormeilles. Il en déduit notamment que le gypse de Cormeilles n'est pas significativement différent des autres sites de l'Ouest parisien.</p>	<p>Étant donnée la synthèse des RC présentée à la figure 10, nous partageons l'appréciation de l'auteur selon laquelle le gypse de Cormeilles n'est pas significativement différent des autres sites de l'Ouest parisien.</p> <p>On retient de cette figure les ordres de grandeur suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Des valeurs de RC dans les fourchettes 11 à 20 MPa, 17 à 26 MPa et 20 à 12 MPa respectivement sur le tiers supérieur, le tiers central et le tiers inférieur de la 1<sup>ère</sup> masse,</li> <li>• Un RC moyen d'environ 16, 22 et 14 MPa respectivement sur les mêmes hauteurs.</li> </ul>
<p>B.03</p>	<p>Résistance ultime du gypse / Chap. 3.1.1</p>	<p>La résistance ultime du gypse est définie à partir de la limite élastique mesurée lors d'un essai de compression simple, ladite limite élastique correspondant à la sollicitation à partir de laquelle le volume de l'éprouvette commence à augmenter (dilatance).</p> <p>On considère que si l'effort appliqué se situe au-delà de la limite élastique, son maintien constant conduira inévitablement à la rupture de l'éprouvette après un certain temps, temps d'autant plus court que la charge appliquée est élevée par rapport à la limite élastique.</p>	<p>Nous approuvons ce principe de définition de la résistance ultime à partir de la limite élastique. Il est cohérent avec la définition des degrés de fluage donnée au chapitre 3.1.2 ci-avant.</p> <p>Considérant par ailleurs le rapport entre la moyenne de la limite élastique et la moyenne RC des essais mesuré pour Cormeilles (=0,68; nous disposons des limites élastiques pour les seuls essais de Cormeilles), on propose ici un ordre de grandeur de 0,6 RC à retenir pour la résistance ultime du gypse.</p>
<p>B.04</p>	<p>Planche de toit / Chap. 3.2</p>	<p>La planche de toit doit être dimensionnée de telle sorte qu'elle se comporte comme une dalle unique. Un boulonnage peut être nécessaire à cette fin (cas de comportement en dalles multiples superposées).</p>	<p>Nous approuvons ces dispositions.</p>

**PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 25**

		<p>Le REX des exploitations de gypse en région parisienne permet de retenir comme étant acceptables les configurations suivantes de planche au toit pour une hauteur de recouvrement de 80 m environ et une section trapézoïdale des galeries :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Portée de 3 m pour une épaisseur de 2 m,</li> <li>• Portée de 3,5 m pour une épaisseur de 2,2 m.</li> </ul>	
B.05	Calculs numériques / Chap. 3.2	<p>Des calculs aux éléments finis sont présentés qui simulent la réalisation d'une galerie (largeur 8 m, hauteur 6 m) sous 60 m de recouvrement pour différents profils : profil trapézoïdal standard des carrières souterraines parisiennes (3 m au toit), profil rectangulaire (8 m au toit) et profil intermédiaire (5 m au toit).</p> <p>Caractéristiques / hypothèses principales :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Calcul pour un recouvrement de 60 m,</li> <li>• Modèle aux éléments finis 2D,</li> <li>• Calcul G1 en comportement élastique,</li> <li>• Calculs G11 et G12 en élastoplasticité et pour résistance nulle en traction,</li> <li>• Coefficient de terre au repos <math>K = 0</math> pour G1 et G11, <math>K = 1</math> pour G12,</li> <li>• <math>C = 5</math> MPa; dilatance = 1,5 et Résistance traction = 0 pour la 1<sup>ère</sup> masse de gypse.</li> </ul> <p>Résultats principaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La contrainte horizontale de compression ne dépasse pas 5 MPa dans tous les cas,</li> <li>• Existence d'une zone en traction au milieu de la planche, avec contrainte de 2,5 MPa maxi donnée par le calcul élastique (valeur nulle bien sûr pour les autres calculs),</li> <li>• Pas de glissement possible entre les strates avec une cohésion de 0,6 MPa et un angle de frottement de 40°,</li> <li>• Pour le même angle de frottement (40°), il y a glissement si cohésion nulle, avec propagation de fissures vers le haut jusqu'à 1,5 m.</li> </ul>	<p>La valeur d'angle de frottement de 40 ° considérée entre les strates de la 1<sup>ère</sup> masse de gypse nous paraît trop élevée. Il est à noter d'ailleurs qu'elle est très sensiblement plus élevée que celle retenue (25°) au tableau 4 du rapport ARMINES de 2009.</p>
B.06	Distance entre deux galeries / Chap. 3.2	<p>Les calculs G8 et G9 concernent la réalisation des deux galeries d'accès définitif avec un pilier de 20 m. Ils permettent à l'auteur de conclure à l'absence d'interférence notables sur la répartition des contraintes. Cette largeur de pilier est donc suffisante.</p>	<p>Nous partageons ces conclusions</p>



## PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 26

		Le calcul G81 concerne la réalisation des 3 galeries parallèle pour l'accès provisoire avec des piliers de 10 m. Il permet à l'auteur de conclure ici encore à l'absence d'interférence notables sur la répartition des contraintes. Cette largeur de pilier est donc également suffisante.	
--	--	---	--

### 4.2.2 Avis sur les conclusions du rapport

Les conclusions de l'auteur du rapport sont données au chapitre 5. Elles sont résumées et commentées dans le tableau suivant.

Conclusions du rapport	Avis de l'expert
Il est acceptable de réaliser des descenderies ou voies d'accès de 8 m de largeur selon la section trapézoïdale traditionnelle avec une planche de 3 m de largeur pour au moins 2,5 m d'épaisseur.	Nous partageons cette appréciation.
Il semble possible de réaliser des galeries de section rectangulaire de 8 m de largeur à condition que la planche au toit soit d'au minimum 6 m et que le toit immédiat ne soit pas constitué par un ensemble de strates d'épaisseur décimétriques.	Nous partageons cette appréciation au plan théorique. Cela étant, la condition posée sur la qualité nécessaire de la planche au toit rend cette solution assez peu crédible dans la pratique.  Interrogé à ce sujet, Placoplatre nous a indiqué que ce profil n'était pas retenu pour le projet d'extension de la carrière.
Il paraît très acceptable de réaliser des galeries trapézoïdales de 8 m de largeur avec une planche de 5 m de largeur pour 6 m d'épaisseur.	Nous partageons ici encore l'appréciation au plan théorique, mais soulignons que la condition posée sur la qualité nécessaire de la planche au toit rend cette solution assez peu robuste sans soutènement.  Interrogé à ce sujet, Placoplatre nous a indiqué qu'un boulonnage est prévu pour ce profil.



## PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 27

<p>Dans tous les cas, il faudra mettre en place un boulonnage afin d'assurer la stabilité à long terme.</p>	<p>Nous partageons cette préconisation et précisons à ce sujet que le besoin en boulonnage sera plus important pour la planche de 5 m de largeur que pour celle de 3 m.</p> <p>Par ailleurs, il nous semble envisageable pour les galeries en objet d'opter pour un profil type fer à cheval avec une voûte plutôt qu'un profil trapézoïdal ou rectangulaire. Avec une voûte, il est possible de réduire fortement voire de supprimer le boulonnage dans les meilleurs faciès de 1<sup>ère</sup> masse.</p> <p>On rappelle à ce propos la position A.12 du 1<sup>er</sup> tableau de ce rapport, relative au REX de Montmorency. Il est mentionné que les conditions de foration et de tir à Montmorency aboutissent le plus souvent à des galeries en forme de voûte alors que la forme trapézoïdale était recherchée.</p> <p>Interrogé à ce sujet, Placoplatre nous a précisé que la section trapézoïdale était préférable pour la circulation des poids lourds.</p>
<p>Les trois galeries d'accès provisoire peuvent être réalisées avec des piliers de 10 m, une plus grande largeur étant à fortiori acceptable également.</p>	<p>Nous partageons cette préconisation</p>

### 4.3 Rapport de dimensionnement de l'exploitation à proximité de la carrière à ciel ouvert

#### 4.3.1 Analyse détaillée / reformulation

Notre analyse "point par point" des chapitres 1 à 4 du rapport "Exploitation à proximité de la carrière à ciel ouvert – Analyse géotechnique" – Jacques Fine – 22 mai 2015 est donnée sous forme de tableau ci-après.

**PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 28**

Pos.	Thème / Chapitre	Sujet / argument de l'auteur du rapport	Note de lecture / commentaire de l'expert
C.01	Contexte et objectif de l'étude / Chap. 1	L'étude a pour objet le dimensionnement de l'exploitation de la carrière souterraine dans une zone située en bordure de la fosse actuelle d'exploitation à ciel ouvert.  Elle complète en cela l'étude 2009 analysée plus haut dans ce rapport.	
C.02	Dimensionnement / Chap. 2	Le dimensionnement retenu pour l'exploitation sous les talus est identique à celui défini dans le rapport 2009 d'ARMINES.  Pour une hauteur de recouvrement de 60 m, la charge moyenne sur les paliers est de 4,3 MPa, valeur qui est comparée à la fourchette 15 – 18 MPa de la limite élastique du gypse de 1 <sup>ère</sup> masse tirée des essais de laboratoire réalisés pour Cormeilles	Voir position A.14 de ce rapport.
C.03	Situation de l'extension / Chap. 3	La différence fondamentale au plan topographique entre l'extension et les autres zones tient à la proximité du talus penté à 35° de la carrière existante à ciel ouvert.  Il existera une zone de 100 m environ de recouvrement croissant linéairement d'une hauteur minimum à définir jusqu'à 70 environ.	
C.04	Stabilité – analyse qualitative / Chap. 4.1	Charge sur les piliers : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Charge fortement diminuée à proximité du front à ciel ouvert, mais,</li> <li>• Existence possible d'une dégradation de la résistance de la 1<sup>ère</sup> masse de gypse consécutive à l'abattage à l'explosif de l'exploitation à ciel ouvert.</li> </ul> Préconisation de laisser un stot de 20 m.	Nous partageons cette analyse.
		Charge sur les planches de toit : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Charge fortement diminuée à proximité du front à ciel ouvert, mais,</li> <li>• Réduction du frettage horizontal près du talus, et</li> <li>• Risque altération du toit si venues d'eau à travers les marnes sus-jacentes.</li> </ul> Préconisation réitérée du stot de 20 m.	Nous partageons cette analyse.

**PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 29**

		<p>Tenue des marnes d'entre deux masses :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction du frettage horizontal près du talus est défavorable à la portance des marnes,</li> <li>• Nécessité de les protéger de l'altération par une banquette de gypse de 1 m d'épaisseur,</li> <li>• Un talus à 45° max pour éviter un sous-cavage sous la plane de gypse.</li> </ul>	<p>Nous partageons cette analyse.</p>
		<p>Instabilité du talus des terrains de recouvrement :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rupture par loupes de glissement dans les terrains types marnes, argiles sableuses et sables recouvrement du gypse,</li> <li>• État de contraintes modifié dans le massif par la réalisation des galeries, mais modification jugée minime si les piliers ne s'effondrent pas,</li> </ul> <p>Conviction de l'auteur que le creusement des galeries ne peut pas conduire à une déstabilisation du talus.</p> <p>Préconisation d'un coefficient de sécurité de 1,5 pour les talus, point à vérifier par la modélisation.</p>	<p>Nous partageons cette analyse.</p>
<p>C.05</p>	<p>Stabilité – approche numérique / Chap. 4.2</p>	<p>Calculs aux éléments finis 2D pour modélisation d'une tranche verticale.</p> <p>Caractéristiques / hypothèses principales :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La simulation du contexte tridimensionnel de l'exploitation par un modèle de calcul bidimensionnel nécessite des adaptations géométriques. Pour obtenir la contrainte verticale correcte des piliers, l'adaptation géométrique théorique réalisée consiste à augmenter la largeur des galeries (12,4 m au lieu de 8 m) et à réduire les piliers (5,6 m, au lieu de 10 m),</li> <li>• Mêmes caractéristiques mécaniques que pour le calcul de 2009, avec notamment un RC = 5,78 MPa pour la 1ère masse de gypse,</li> <li>• Calcul pour une bande de 75 m de largeur en bordure du ciel avec stot de 20 m.</li> <li>• Réalisation d'un 2<sup>ième</sup> calcul sans la carrière à ciel ouvert pour permettre la comparaison,</li> <li>• Réalisation d'un 3<sup>ième</sup> calcul pour simuler l'exploitation à ciel ouvert en l'absence de travaux souterrains.</li> </ul>	<p>Nous avons vérifié le calage du modèle en l'absence de talus (pour recouvrement de 70 m, avec contraintes effective moyenne de 4,7 MPa pour un défrètement de 69 %). C'est correct.</p>

**PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 30**

		<p>Principaux résultats :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zones plastiques pas significativement différentes pour les modèles avec ou sans exploitation souterraine,</li> <li>• Pas de modification significative du déviateur des contraintes pour les modèles avec ou sans exploitation souterraine,</li> <li>• Pas de modification significative du facteur de sécurité au glissement du talus pour les modèles avec ou sans exploitation souterraine (réduction de 2,4%)</li> </ul>	<p>Les résultats obtenus nous semblent corrects dans l'ensemble.</p> <p>Trois remarques cependant :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Le constat d'une forte dissymétrie des contraintes sur la galerie d'exploitation la plus proche du ciel ouvert,</li> <li>• Concernant la sécurité au glissement du talus, le constat que le mode de glissement obtenu par le calcul aux éléments finis est un glissement en grand, non pas une loupe telle qu'indiqué par l'auteur du rapport (cf. dernier point de la position C.04).</li> <li>• Des coefficients de sécurité calculés avec ou sans exploitation souterraine sensiblement plus bas que le 1,5 préconisé par l'auteur du rapport (position C.04 encore)</li> </ul>
C.06	Percements galeries d'aéragé / Chap. 4.2	<p>Proposition de galeries de 6 m de largeur et 6 à 8 m de hauteur, espacés d'une cinquantaines de mètres et positionnées de manière centrée dans la 1<sup>ère</sup> masse de gypse.</p> <p>Ce schéma d'exploitation n'est pas susceptible de perturber la stabilité.</p>	<p>Nous partageons cette analyse.</p>

**4.3.2 Avis sur les conclusions du rapport**

Les conclusions de l'auteur du rapport sont données au chapitre 5. Elles sont résumées et commentées dans le tableau suivant.



## PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 31

Conclusions du rapport	Avis de l'expert
<p>L'analyse réalisée montre que le schéma suivant doit garantir la stabilité des travaux souterrains:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Galeries de 8 m de largeur et environ 12 à 13 m de hauteur,</li><li>• Planche de toit de 2 m d'épaisseur et 3 m de portée,</li><li>• Planche de mur de 1 m d'épaisseur,</li><li>• Stot de 20 m de largeur entre le front du ciel ouvert et les galeries d'exploitation,</li><li>• Petite banquette en 2<sup>ème</sup> masse permettant un talus dans les marnes d'entre eux masses.</li></ul>	<p>La variabilité des conditions de stabilité rencontrées à Montmorency explicitée en position A.13 au chapitre 4.1 du présent document (analyse du rapport 2009) nous amène à faire une réserve quant à la largeur du stot ou à la possibilité de réaliser le levage prévu pour la galerie d'exploitation la plus proche du ciel ouvert.</p> <p>Le constat d'une forte dissymétrie des contraintes en paroi de la galerie d'exploitation la plus proche du ciel ouvert n'est en effet acceptable selon nous que pour des caractéristiques excellentes de la 1<sup>ère</sup> masse de gypse dans ce secteur.</p> <p>Au final, en l'état actuel des informations à notre disposition, nous proposons l'une ou l'autre des solutions suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Augmenter le stot : le passer de 20 à 30 m, ou bien,</li><li>• Sursoir au projet de levage pour la galerie la plus proche du ciel ouvert jusqu'à ce que des reconnaissances complémentaires ou la découverte du terrain lors au traçage permettent de confirmer la faisabilité du levage.</li></ul> <p>Interrogé à ce sujet, Placoplatre nous a indiqué sa préférence pour la 2<sup>ème</sup> solution.</p>
<p>Outre les 3 galeries d'accès au gisement, des ouvertures de dimensions réduites dirigées perpendiculairement au front du ciel ouvert pourront être réalisées pour faciliter l'aérage.</p>	<p>Nous partageons cette appréciation.</p>

## 5. Réponse aux questions posées par la DRIEE

### 5.1 Avis général sur l'étude de dimensionnement des galeries, des piliers, ...

L'étude de dimensionnement des galeries s'appuie sur les deux éléments ci-après du REX Montmorency pour justifier le schéma préconisé d'une maille de 18 m avec des piliers carrés de 10 m et une exploitation en 2 phases : traçage et levage :



## PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 32

- L'analyse du comportement de 5 zones / quartiers de l'exploitation souterraine de Montmorency,
- Les caractéristiques géomécaniques tirées d'un nombre important d'essais de laboratoires sur le gypse de Montmorency.

Le 1<sup>er</sup> élément permet à l'auteur du rapport d'estimer la résistance ultime du gypse de Montmorency à environ 9 MPa. Par comparaison avec les résultats d'essai sur des échantillons tirés de 2 sondages à Cormeilles, l'auteur tire du 2<sup>ème</sup> élément l'enseignement d'un différentiel de résistance important entre le gypse de Cormeilles et celui de Montmorency.

C'est sur cette base et après vérification par un calcul aux éléments finis 2D axisymétrique que l'auteur justifie le dimensionnement de l'exploitation à Cormeilles pour un traçage de 9 m et des levages de 12,5 m et 14 m.

Nous partageons pour l'essentiel la méthodologie suivie par l'auteur du rapport, à la nuance près que les caractéristiques géomécaniques considérées pour Montmorency ne sont selon nous pas représentatives de la "roche intacte" du fait que les échantillons ont été prélevés au toit et au mur des galeries existantes, non pas à partir de forages réalisés depuis la surface.

Il en ressort une surestimation selon nous du différentiel de résistance entre le gypse de Cormeilles et celui de Montmorency, avec pour corollaire la proposition d'exploiter la 1<sup>ère</sup> masse sur des hauteurs beaucoup plus importantes à Cormeilles qu'à Montmorency.

Nous proposons de considérer les essais réalisés sur la 1<sup>ère</sup> masse de Villiers-Adam, plutôt que ceux de Montmorency, étant donné la proximité des deux carrières et surtout le fait que les échantillons de Villiers-Adam concernaient la roche intacte. Il en ressort le constat d'une résistance du gypse effectivement meilleure à Cormeilles qu'à Montmorency, mais pas dans les proportions considérées par l'auteur du rapport (différentiel de moyenne RC de 2,5 MPa environ).

Cette approche nous conduit à confirmer la **faisabilité du traçage à 9 m et du levage à 12,5 m pour Cormeilles** aux conditions proposées par l'auteur du rapport. Elle nous conduit cependant à nuancer assez fortement la **possibilité d'extension du levage à 14 m**, sauf à envisager la mise en œuvre de **dispositions particulières de fretage** type élargissement des bases de pilier (patte d'éléphant) et/ou boulonnage ou encore tirantage à mi-hauteur des piliers.

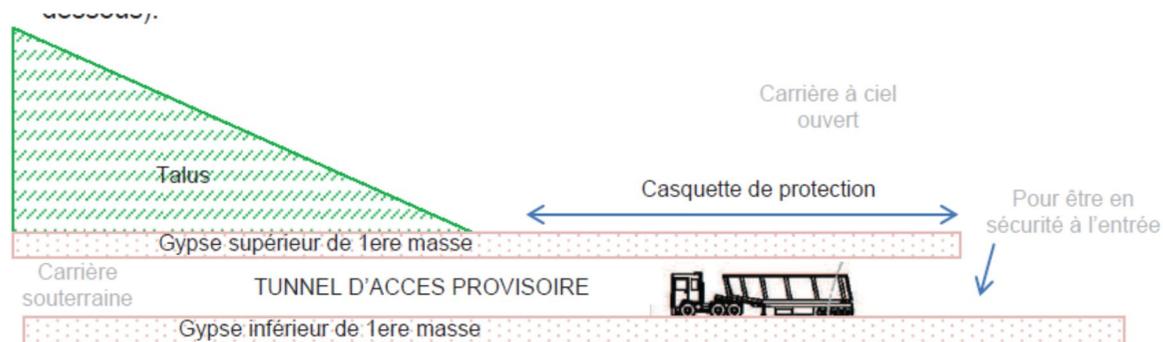
## 5.2 Avis sur la gestion des zones exploitées à proximité des habitations (distance de recul, objectif en termes de vibrations maximales, ...)

Ce point est traité par Placoplatre.

## 5.3 Avis sur les modalités d'exploitation sous le front de taille actuel (tunnels provisoires, dimension des galeries et des piliers, dimensionnement de la casquette protégeant l'accès provisoire)

Un accès provisoire à la carrière souterraine est prévu via 3 galeries parallèles de 8 m de largeur creusées dans la 1<sup>ère</sup> masse de gypse à partir du front de l'exploitation actuelle. Les galeries sont réalisées avec des piliers de 10 m et sont prolongées côté carrière actuelle par une casquette de protection longue de 25 m pour en sécuriser l'entrée.

La coupe schématique ci-après montre le dispositif prévu.



L'accès définitif est prévu via une descenderie (pente de 10% maximum) réalisée en tranchée dans les remblais existants avec soutènement en parois parisiennes. Son prolongement en souterrain est réalisé dans la 1<sup>ère</sup> masse de gypse par une galerie de roulage de section trapézoïdale de 8 m de largeur en pied. Deux autres galeries parallèles à celle-ci, également creusées dans la 1<sup>ère</sup> masse, complètent le dispositif, la 1<sup>ère</sup> pour le retour des camions, la seconde pour l'aéragé. Un pilier de 10 m est prévu entre la galerie de roulage et celle de retour des camions. Un pilier de 20 m est prévu entre la galerie de retour et la galerie d'aéragé.



## PROJET D'EXPLOITATION SOUTERRAINE DE LA CARRIÈRE - TIERCE EXPERTISE DES ÉTUDES 34

**La conception générale et les dimensions retenues pour les deux étapes d'accès à la future carrière (accès provisoire puis accès définitif) offrent selon nous les garanties nécessaires de sécurité pour la stabilité des parois de l'exploitation actuelle et pour l'exploitation de la future carrière.**

Concernant l'exploitation souterraine sous le talus de la carrière actuelle, l'auteur du rapport préconise quasiment le même schéma que défini précédemment pour le secteur principal de la carrière (zone de plus forts recouvrements), à savoir :

- Galeries de 8 m de largeur et environ 12 à 13 m de hauteur,
- Piliers de 10 x 10 m,
- Planche de toit de 2 m d'épaisseur et 3 m de portée,
- Planche de mur de 1 m d'épaisseur,

et pour le secteur proche du talus de l'exploitation actuelle :

- Stot de 20 m de largeur entre le front du ciel ouvert et les galeries d'exploitation,
- Petite banquette en 2<sup>ème</sup> masse permettant un talus dans les marnes d'entre eux masses.

L'auteur justifie cette conception notamment à partir d'un calcul aux éléments finis 2D.

**Les dispositions prévues nous paraissent pertinentes, à la réserve près du levage à 12 ou 13 m pour la galerie la plus proche du talus.**

Étant donné la forte dissymétrie des contraintes en paroi de cette galerie révélée par le calcul aux éléments finis, nous proposons l'une ou l'autre des solutions suivantes :

- Augmenter le stot : le passer de 20 à 30 m, ou bien,
- Sursoir au projet de levage pour cette galerie (la plus proche du ciel ouvert) jusqu'à ce que des reconnaissances complémentaires ou la découverte du terrain lors au traçage permettent de confirmer la qualité nécessaire du gypse dans ce secteur, donc la faisabilité du levage.



#### 5.4 Avis sur les modalités et les délais de remblaiement, notamment au regard des risques de fluage ou de soufflage

Il nous semble nécessaire de s'interroger sur la réalité du risque de soufflage à Corneilles, mis en évidence par le calcul numérique.

Par expérience la plasticité en radier d'excavation souterraine est très souvent surévaluée par les lois de comportement de roches classiques.

Les angles droits dans les modèles numériques sont également de nature à augmenter artificiellement le niveau de contrainte et l'apparition de bandes plastiques.

Pour les déformations également, les calculs montrent souvent des soulèvements assez importants (soufflage) qui ne sont pas vérifiés à la réalisation. Le problème tient en partie au moins au fait que la plupart des logiciels ne permettent pas de distinguer les modules de charge des modules de décharge (modules d'élasticité).

Les éléments ci-avant vont tous dans le sens d'une minimisation du risque de soufflage.

**Au plan pratique, la mise en place de remblais en première phase, sur une hauteur de 3,5 m et dans un délai d'un an environ, est de nature à ralentir sensiblement voire de stopper le fluage long terme des pieds des piliers et le risque de soufflage des planches.**

C'est donc une disposition favorable au plan de la sécurité.

Le délai proposé d'environ 1 an pour ce remblayage est basé sur l'expérience dans d'autres exploitations souterraines, étant entendu que l'approche théorique de cette problématique avec un modèle de comportement du terrain qui prendrait explicitement en compte le fluage n'est probablement pas très réaliste ici (difficulté pour caler une loi de fluage réellement représentative).

Moyennant une observation régulière de l'état du mur en toit et des piliers, de manière à **pouvoir anticiper toute évolution défavorable des déformations** (comportement ductile du gypse avant rupture), **le délai proposé est réaliste selon nous.**



### 5.5 Avis sur les possibles remontées de désordres en surface

Les calculs réalisés n'indiquent pas de plasticité ou de déformations excessives de la planche au toit en zone courante. La déformation calculée par ARMINES avec le modèle aux éléments finis est en effet 15 mm environ au niveau des marnes bleues d'Argenteuil.

En outre, le rapport précise que dans les zones de carrefour un boulonnage du même type que celui appliqué à Montmorency est recommandé. Nous approuvons cette disposition issue de l'expérience.

Les deux éléments ci-avant, associés à l'observation régulière de l'état de la planche au toit ainsi que des piliers permettent de conclure que le **risque de remontée de désordre important en surface est quasi nul pendant l'exploitation** de la future carrière.

Pour la situation après achèvement de l'exploitation, le **remblaiement total prévu supprimera définitivement tout risque de remontée de fontis à long terme.**

Cela étant, sur la base des calculs réalisés, 1 à 2 cm de tassements en surface nous paraît un ordre de grandeur représentatif des déformations à attendre la / les 1<sup>ères</sup> année(s). Pour le long terme, c'est-à-dire après stabilisation définitive du fluage des piliers frettés par le remblai et, le cas échéant, relaxation des efforts des planches de toit sur le remblai, un ordre de grandeur de quelques centimètres de tassements en surface nous paraît réaliste.

### 5.6 Avis sur la résistance de la structure vis-à-vis d'un accident lors d'un transport ou sur un stockage temporaire d'explosifs

Ce point est traité par Placoplatre.