RECHERCHE D'UNE CORRELATION ENTRE LES ESSAIS PRESSIOMETRIQUE ET LES ESSAIS DE CISAILLEMENT REALISES EN LABORATOIRE
APPLICATION AUX GRES VOSGIENS

Bosseler O., Al Heib M., Masrouri F., et Wojtkowiak F.
(LAEGO - INPL - INERIS)

RÉSUMÉ - L'exploitation des mines de charbon en France se terminera au courant de l'année 2004. Comme dans de nombreux pays de longue tradition minière, les anciennes exploitations souterraines se comptent par centaines en France. A leur fermeture, il est nécessaire de mettre en sécurité les orifices des ouvrages d'infrastructure minière débouchant au jour tels que les puits. Parmi les méthodes de mise en sécurité des puits de mine, on peut citer la réalisation de bouchons (autoportants ou non) ou de serrements au sein de la colonne de puits. Le positionnement précis de ces bouchons est déterminé en fonction de la nature et de la compétence des terrains traversés par ces ouvrages.

La reconnaissance des terrains est généralement réalisée par sondages carottés et/ou pressiométriques, ces derniers étant plutôt destinés à caractériser des terrains peu cohérents. Les Houillères du Bassin de Lorraine ont entrepris une campagne d'essais de cisaillement en laboratoire et de sondages pressiométriques pour caractériser la formation des Grès Vosgiens traversée par de nombreux puits de mine. L'objectif de cette étude, effectuée en étroite collaboration entre l'INERIS et le LAEGO, était d'établir une éventuelle corrélation entre les différents paramètres déterminés à partir de ces deux types d'essai, et de pouvoir ensuite utiliser les méthodes classiques de dimensionnement des bouchons basées sur la résistance au cisaillement des terrains environnants.

Afin d'établir une méthodologie simple et efficace pouvant être appliquée à la mise en sécurité de la plupart des puits du bassin houiller lorrain, nous avons analysé 14 sondages pressiométriques, réalisés à une profondeur comprise entre 30 et 50 m, et localisés dans un rayon de 40 m au maximum de l'axe des puits de mine étudiés. Dans notre analyse, nous avons retenu, entre autres, les paramètres suivants : la pression limite et les modules pressiométriques maximal et moyen. Des essais de compression simple et de cisaillement rectiligne à la boîte de Casagrande ont été réalisés en laboratoire sur des échantillons carottés provenant des mêmes sondages. La méthode de corrélation utilisée est celle de Combarieu (1995) car elle permet d'estimer les caractéristiques de résistance au cisaillement (cohésion et angle de frottement interne) à partir des paramètres de l'essai pressiométrique.

1. Introduction

En France comme dans de nombreux autres pays d'Europe, les anciennes exploitations minières se comptent par milliers.

L'article 12 de la loi n°2004-105 du 3 février précise que l'exploitant a pour mission l'exécution et la mise en sécurité et la réhabilitation des sites d'exploitation.

La mise en sécurité des anciens puits est conditionnée par de nombreuses contraintes techniques, financières et socio-politiques. L'existence des anciens puits abandonnés présente des risques évidents pour la population et les activités humaines. Ces risques peuvent se rattacher à deux types de phénomène : les risques d'effondrement des terrains et les risques de dégagement de gaz. La prise en compte simultané de ces deux grands types de risque conduit à définir une zone de protection autour de chaque puits et à mettre en oeuvre un traitement adapté du puits assurant la sécurité vis-à-vis des risques mentionnés précédemment.

2. Méthodes de traitement des anciens puits miniers

Les principales méthodes classiquement mises en œuvre pour traiter les anciens puits de mine sont (Wojtkowiak et Didier, 1999) :

- les fermetures dites légères principalement adaptées aux anciens orifices situés dans des zones très difficilement accessibles ;
- le remblayage intégral, simple ou contrôlé ;
- la réalisation de dalles ou de couvertures réalisées en surface ou au sommet du massif rocheux ;
- la mise en place de serrements ;
- la construction de bouchons auto-portants ou non en béton réalisés au sein des ouvrages.

Le bouchon (ou le serrement) doit être réalisé au regard de terrains compétents et suffisamment résistants pour reprendre les efforts exercés par le bouchon de béton (figure 1). Afin de déterminer la profondeur de ces terrains suffisamment résistant, on recommande la réalisation d'au moins un sondage carotté implanté à proximité immédiate du puits. Des essais pressiométriques à différentes profondeurs sont également à effectuer dans le sondage à différentes profondeurs. Il en résulte qu'un terrain « rocheux » est considéré comme acceptable pour la réalisation d'un bouchon quand la pression de fluage obtenue par un essai pressiométrique est supérieure ou égale à 2,5 MPa au refus.

3. Contexte géographique et géologique du gisement houiller lorrain

Le bassin houiller sarro-lorrain s'étend sur une superficie d'environ 140 km de long sur 70 à 80 km de large. Il est situé, en partie, au Nord-Est du département de la Moselle, à 35 km environ à l'Est de Metz et se poursuit au-delà de la frontière allemande (Land de Sarre). L'ensemble du gisement forme une série d'anticlinaux et de synclinaux d'orientation générale NE-SW (figure 2). Le bassin lorrain constitue la partie française de ce gisement.

La série lithographique comporte, de haut en bas : la formation des grès bigarrés, d'une puissance de 40 à 50 m, elle-même constituée par les grès à Voltzia, les grès Intermédiaires et le Conglomérat Principal (Buntsandstein supérieur). Les grès Bigarrés recouvrent la formation des Grès Vosgiens, d'une puissance moyenne de l'ordre de 300 m (Buntsandstein moyen). L'importante épaisseur de la formation des Grès Vosgiens explique, en partie, pourquoi elle a été très fortement exploitée dans des carrières à ciel ouvert, notamment pour la production de matériaux de remblai mis en place par voie hydraulique dans les chantiers miniers. La formation montre de fréquentes figures de stratification entrecroisée découpées par de nombreux chenaux.

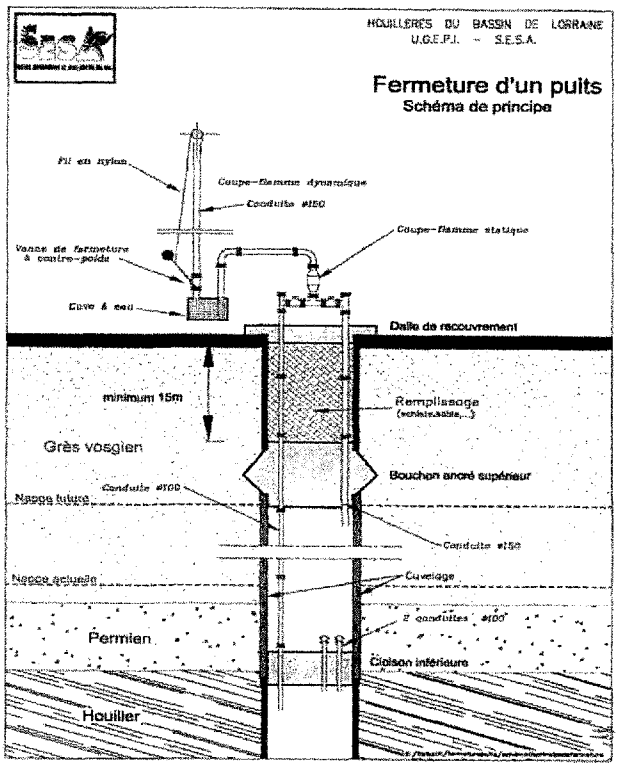


Figure 1 : Schéma de principe de fermeture d'un puits utilisant un bouchon localisé dans le grés vosgien de HBL et équipé d'un dispositif de sécurité vis-à-vis des risques d'émanation de gaz de mine (document HBL)

Sur le plan hydrogéologique (Degas et al. 2003), la formation des Grès Vosgiens est très fortement aquifère puisqu'elle présente une double porosité (de pore et de fissure) avec une perméabilité globale généralement comprise entre 5.10^{-7} et 10^{-6} m/s.

Sur le plan géotechnique (Thoraval et al. 2003), l'ensemble des résultats dont on dispose actuellement sur les Grès Vosgiens permet de se faire une idée globale des caractéristiques géomécaniques des Grès Vosgiens dans la région de Forbach en particulier. En revanche, l'origine fluviatile de ces dépôts en fait une formation aux variations latérales de faciès parfois très importantes, ce qui complique toute recherche de corrélation entre sondages. En effet, il ressort de l'ensemble de ces résultats que les Grès Vosgiens se caractérisent par une alternance de bancs durs et de bancs beaucoup moins indurés, dont les caractéristiques géomécaniques se rapprochent, pour certains niveaux, de celles d'un sable. Compte tenu des variations latérales de faciès très importantes au sein de la formation des Grès Vosgiens, ces bancs ont une continuité horizontale limitée. Ces niveaux de sable peu consolidé peuvent se situer en surface comme au sein du massif mais sont néanmoins difficilement repérables. De manière très générale, on peut aussi constater que les Grès Vosgiens de Merlebach possèdent de meilleures caractéristiques mécaniques que ceux de Forbach. Enfin, les Grès Vosgiens restent un matériau très sensible aux phénomènes d'érosion et d'altération météorique. De ce fait, la tranche altérée de surface, de quelques mètres d'épaisseur, constitue un horizon gréseux peu cohérent.

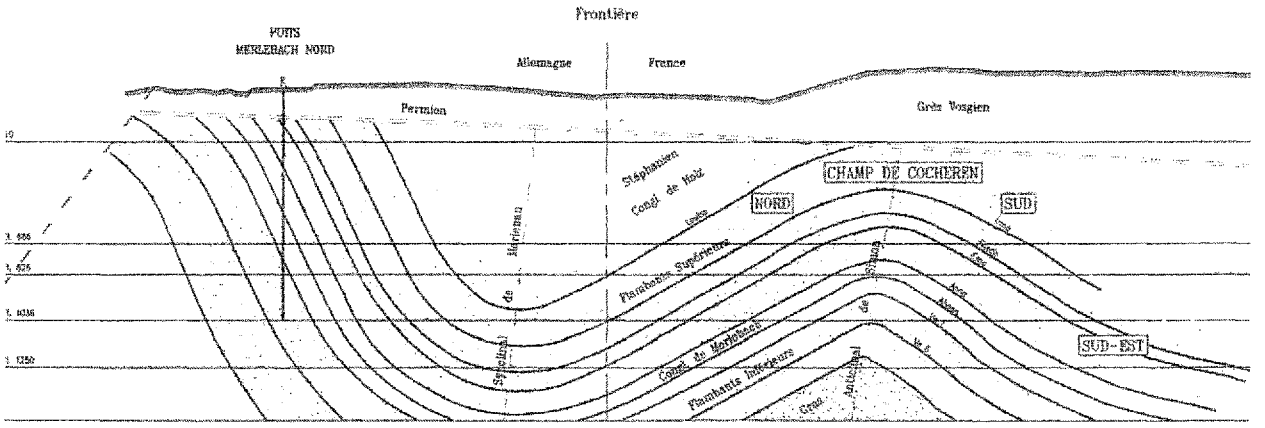


Figure 2 : Coupe géologique de terrain houiller en Lorraine

4. Localisation des puits étudiés

Les houillères du bassin de Lorraine (HBL) exploitent depuis la seconde moitié du 19ème siècle la plus importante ressource de charbon de l'est de la France à la limite de la frontière franco-allemande. Les exploitations des veines de charbons se situent entre 500 m et 1250 m de profondeur. Des nombreux puits (on parle de fonçage de puits) et des centaines de kilomètres des galeries ont été creusés pour atteindre les zones exploitées. Les HBL conduisent actuellement un programme important pour sécuriser les orifices miniers débouchant en surface. Cette étude concerne plus particulièrement les puits du bassin houiller des HBL.

La zone d'étude est située entre Petite-Rosselle, Forbach et Schoeneck (Moselle). Dans cette zone ont été recensés 23 puits, atteignant pour certains une profondeur de l'ordre de 1000 m. La figure 3 présente la localisation géographique des puits étudiés. La solution adoptée pour leur mise en sécurité est la réalisation d'un bouchon au niveau d'un banc de Grès Vosgien suffisamment résistant.

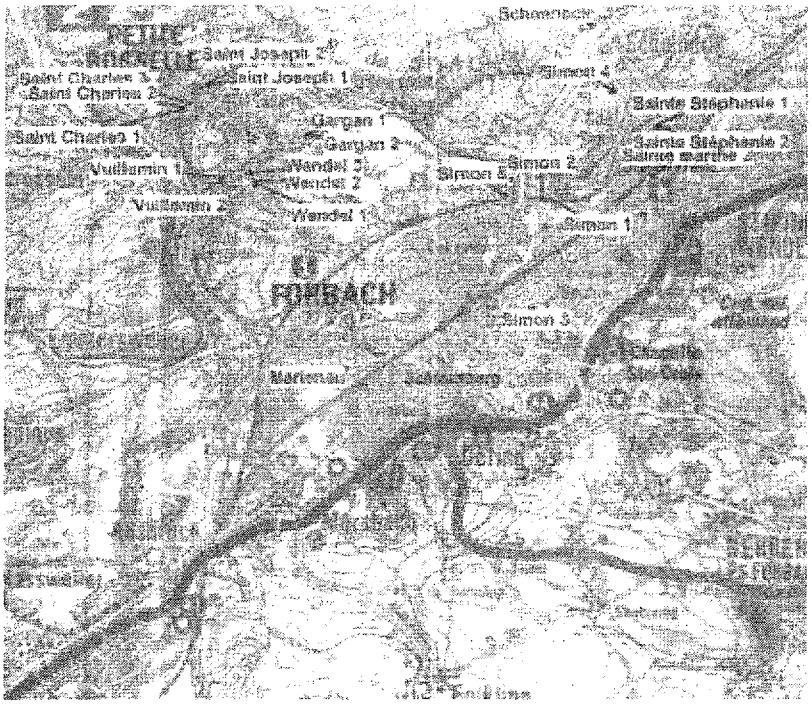


Figure 3 : Localisation des puits miniers HBL- Forbach (57)

Un sondage carotté a été réalisé à proximité du puits, pratiquement à 40 m. Des essais pressiométriques ont également été effectués au voisinage immédiat de ce sondage. Les

pressions limites et de fluages déterminés à partir de ces essais permettent, dans le cas d'un sol, de qualifier la résistance du sol (Filliat, 1981). Pour l'établissement d'une corrélation propre aux faciès peu cimentés et/ou très altérés du Grès Vosgien, des essais en laboratoire ont été réalisés à la boîte de cisaillement sur des échantillons provenant des sondages carottés, les échantillons ayant été prélevés à une profondeur identique à celles des essais pressiométriques.

5. Recherche d'une corrélation

Dans le cadre de cette étude, nous avons appliqué les méthodes de corrélation existantes qui permettent, à partir des essais pressiométriques, de déterminer les paramètres de résistance au cisaillement que sont la cohésion et l'angle de frottement.

5.1 *Essai pressiométrique*

La réalisation des ouvrages en contact avec les terrains nécessite leur reconnaissance et de préciser leurs caractéristiques géotechniques. L'essai pressiométrique est développé par Ménard en 1957. Depuis cette date plusieurs générations de pressiomètre ont vu le jour. Il est aujourd'hui un essai normalisé (AFNOR, 2000).

La procédure de l'essai pressiométrique consiste à imposer dans la sonde une pression croissante par palier tout en enregistrant les variations de volume induites dans celle-ci. La courbe pressiométrique ($p=f(\Delta V/V)$ est alors déduite des données brutes, corrigées de la charge hydraulique, de la dilatation des tubulures et de l'inertie de la sonde (figure 4).

L'essai pressiométrique permet d'avoir accès aux caractéristiques élastiques (module pressiométrique E_m) et de rupture (pression limite Pl) du terrain. Cependant de nombreuses approches ont été développées pour exploiter de manière plus complète ce type d'essai (Filliat, 1981, Abderrahim et Tisot, 1992, Sahrour et al. 1995, Zentar, 1999).

Les différentes méthodes d'interprétation peuvent être séparées en trois catégories (Rangeard, 2002) :

- méthodes directes : elles sont notamment utilisées pour le dimensionnement des ouvrages de fondation. Ces méthodes permettent notamment d'évaluer la valeur de la cohésion non drainé Cu à partir de la pression limite Pl ;
- méthodes analytiques : elles sont principalement basées sur la solution de l'expansion d'une cavité cylindrique dans un milieu élasto-plastique. On y distingue les méthodes qui ne tiennent pas compte de la variation du volume de celles qui intègrent cette variation ;
- méthodes numériques : le développement des moyens informatiques a conduit à la mise au point de codes de calcul de plus en plus élaborés.

5.2 *Synthèse des essais pressiométriques*

La profondeur maximale des essais pressiométriques réalisés sur le site étudié est de 50 m. Les essais (plusieurs essais par sondages) ont été réalisés dans des sondages se trouvant à proximité des puits. L'analyse des carottes a montré que les premiers mètres de sondage correspondent à une couche métrique de remblai gris-noirâtre. Elle est suivie par une couche de sable fin marron-jaunâtre, et une couche très altérée de sable gréseux avant d'atteindre le grès proprement dit. Les passages gréseux altérés concernent généralement les 5 à 7 premiers mètres des sondages, au-delà la roche gréseuse semble être saine sauf certaine exception où les formations altérées perdurent jusqu'à 50 m de profondeur. La roche gréseuse est considérée comme suffisamment résistante pour la réalisation du bouchon (serrement). La figure 5 présente un échantillon de grès prélevé dans le sondage du puits Vuillemin 1-II.

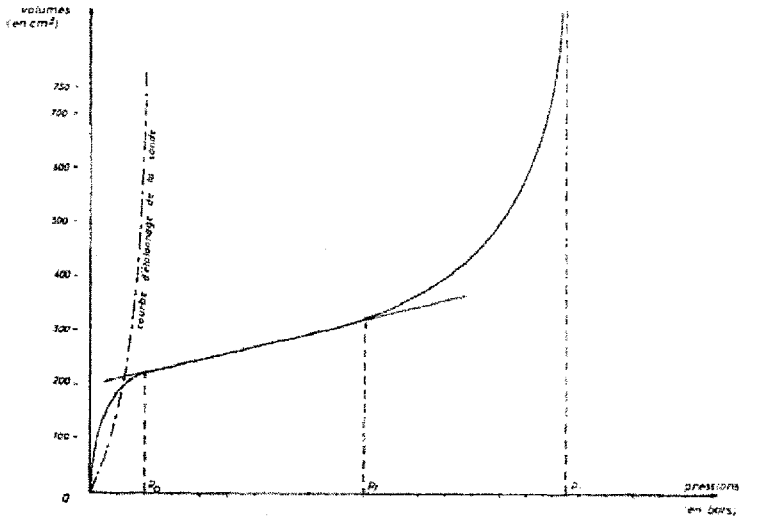


Figure 4 : Courbe classique d'un essai pressiométrique standard

Les paramètres issus des essais pressiométriques, réalisés dans les sondages du site étudié, ont été analysés. Nous avons présenté la pression limite et le module pressiométrique maximal relevés dans chaque sondage (tableau 1). On note que globalement le module de Young et la pression limite varient en fonction de la profondeur. Les deux paramètres se stabilisent à 10 m de profondeur, leurs valeurs moyennes sur l'ensemble des essais réalisés sont respectivement égales à 5,8 MPa et 415 MPa. La couche compétente et suffisamment résistante se trouve à une profondeur supérieure à 10 m où la valeur de la pression limite est supérieure à la valeur minimale 2,5 MPa (cf. § 2).

Tableau I : Synthèse de différentes valeurs des essais pressiométriques réalisés dans les sondages de reconnaissance de puits des Houillères du Bassin de Lorraine (HBL)

Puits	Pl (MPa)	E max (MPa)	Profondeur de la nappe
St. Fontaine (SP1)	8	547 à 15 m	15,4 m
Marieneau (SP2)	7	307 à 10 m	
Simon III (SP3)	**4,8**	**292 à 10 m**	
Simon II (SP4)	5	484 à 30 m	
Schoenck (SP5)	7	381 à 25 m	
Simon IV (SP6)	7	393 à 15 m	19,7 m
Ste Stephanie (SP8)	7	396 à 19 m	
Ste Marthe (SP9)	4,8	390 à 20 m	
Vuilleman (SP10)	4,9	390 à 10 m	
Wendel II et II (SP11)	5	495 à 12 m	
Wendel III (SP12)	5,2	422 à 2 m	
St. Joseph (SP13)	4,9	405 à 5 m	
St. Charls (SP14)	4,9	491 à 32	

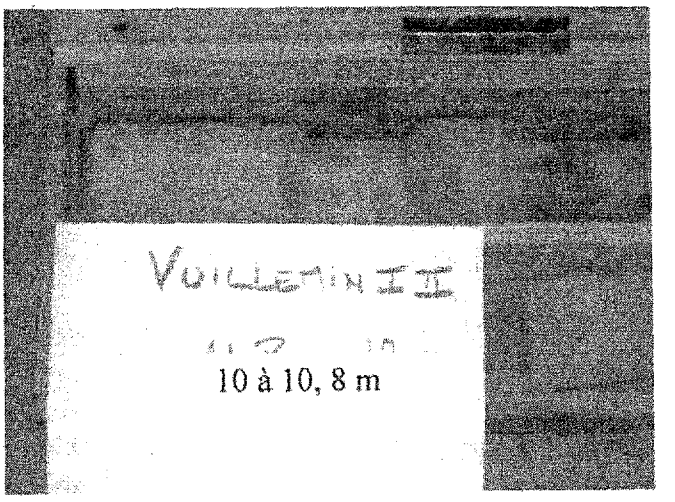


Figure 5 : Echantillon de Grès Vosgien provenant d'un sondage carotté à 40 m à proximité du puits Vuillemin 1-II

5.3 *Application de la méthode*

5.3.1 Essais pressiométriques

Le log du sondage du puits Simon III débute par une couche altérée (stade ultime de l'altération du Grès Vosgien) constituée de sable fin de couleur marron-jaunâtre d'une épaisseur métrique. Dès deux mètres de profondeur, la roche semble être saine. La pression limite corrigée atteint un maximum de 4,8 MPa à partir de 18 mètres de profondeur et ce jusqu'à 38 m de profondeur. Le module pressiométrique atteint une valeur maximale de 293 MPa à une profondeur de 10 m. Des niveaux minces moins résistants existent. La valeur moyenne du module pressiométrique est de 190 MPa.

5.3.2 Essais en laboratoire

Des essais en laboratoire ont été réalisés au LAEGO - ENSG sur des échantillons prélevés à 50 m de profondeur. Les valeurs moyennes suivantes ont été obtenues : un poids volumique sec de 19,4 kN/m^3, un poids volumique humide de 21,4 kN/m^3 pour une teneur en eau de 10,4%. La résistance à la compression simple est égale à 0,54 MPa.

Les essais de cisaillement rectilignes ont été réalisés à la boîte de Casagrande, dans des conditions non drainées et non consolidées (UU). Les courbes des essais permettent de déterminer un angle de frottement de 33° et une cohésion de 0,13 MPa.

Le module de l'essai œdométrique est égal à 198 MPa (établi pour $\Delta\sigma$=1,564-0,785 MPa). Cette valeur est très proche de celle obtenue par l'essai pressiométrique. La teneur en eau est égale à 10% (avant l'essai) et 14 % (après l'essai). Ce qui correspond à un degré de saturation respectivement 61% et 91 % avant et après l'essai.

5.3.3 Corrélation à l'aide de la méthode de Combarieu

La méthode utilisée est la méthode de Combarieu (1995, 2000). Cette méthode vise essentiellement à la détermination des paramètres de cohésion et de frottement d'un sol à partir de l'essai pressiométrique. L'analyse que nous avons adoptée néglige en premier lieu la dilatance, dont nous tenons compte par la suite. Nous avons considéré également un coefficient de Poisson de 0,33, et Ko < 1/(1+sin□).

A partir de ces hypothèses, les relations suivantes sont prises en compte pour réaliser l'estimation de l'angle de frottement :

$$\left[(p_l / q_0).(1+\sin\phi)\right]^{(1-\sin\phi.\sin\psi)} = (\pi/2 - 2.\sin\psi\sin\phi).(E/P_l)^{1+\sin\psi)\sin\phi}$$

et pour l'estimation de la cohésion de terrains frottants et cohérents :

$$(P_l + C.\cos\phi)^{(1+\sin\phi)} = \pi/2.(P_0 + C\cot\phi)E^{\sin\phi}$$

avec :

P_l et P_0 : pression limite et pression initiale respectives.
q_0 : charge verticale initiale, elle est déterminée à partir de poids volumique saturé et de la profondeur de prélèvement de l'échantillon ;
E : module de Young calculé à partir des essais œdométriques en utilisant la relation empirique suivante Eœdo=2/3E Young.
ϕ : angle de frottement moyen calculé en fonction de la dilatance (6 à 15°) et de l'angle de frottement critique ϕ_i;

Le tableau 2 présente les valeurs obtenues en utilisant les deux approches. Nous avons également réalisé cette corrélation pour les puits Vuilleman 1-II et Schoneck. L'analyse des résultats montre clairement l'écart entre les caractéristiques de cisaillement déterminées à partir des essais pressiométriques et celles des essais en laboratoire.

Notons que la valeur de la cohésion estimée par la méthode de Combarieu augmente généralement avec la profondeur. L'angle de frottement varie entre 22,5° et 63°. Cette forte variation pourrait s'expliquer par une importante variation des propriétés du Grès Vosgien, fortement altéré.

Tableau II : Caractéristiques mécaniques du Grès Vosgien altéré et/ou peu cohérent – corrélation entre les valeurs des essais en laboratoire et les essais pressiométriques

Puits	Profodeur (m)	Paramètres obtenus à partir des essais de cisaillement		Paramètres obtenus à partir des essais pressiométriques (Combarieu)			
		C (kPa)	ϕ (°)	ϕi (°)	E (MPa)	C (kPa)	ϕ (°)
Simon III	15	22	21,4	33,7	180	49	40,7
	29,8		38,6				
	36,4		46,3		220	45	46,3
Vuillemin 1-II	10,4	117	29,6	52,5	120	62	58,5
	13,5	200	63,6		234	307	63,6
	24,9	0	59		145	124	59
Schoeneck	8	36	22,5	23	102	482	22,5
	18,4	19	40,1		118	251	39,2
	35,2	0	40,8		189	401	33,9

ϕi : angle de frottement à l'état critique

6. Conclusion

Nous avons tenté une application de l'approche de Combarieu sur une roche tendre (grès Vosgien). La recherche d'une corrélation est faite à partir d'essais de cisaillement en laboratoire et d'essais pressiométriques classiques (type Ménard).

Les essais réalisés en laboratoire et les essais pressiométriques montrent clairement que les caractéristiques de résistance au cisaillement du Grès Vosgien à faible profondeur sont très variables. Elles dépendent fortement de la nature des grès, et de leur degré d'altération.

Les résultats de l'étude ont montré qu'il est possible d'établir des corrélations partielles entre les paramètres pressiométriques et les caractéristiques de cisaillement du Grès Vosgien. Ceci dit, il est à souligner que l'écart entre les différents paramètres peut être très important. Il s'explique en grande partie par les conditions de réalisation des essais, la très forte hétérogénéité lithologique et les variations de faciès caractéristiques du mode de dépôt de la formation des Grès Vosgiens, et peut-être pour la limite de l'approche adoptée développée plutôt pour un sol.

L'essai pressiométrique est un bon moyen pour caractériser le grès et identifier les horizons de terrains suffisamment résistants à condition de :

- réaliser un essai cyclique (chargement-déchargement) avant la pression de fluage ;
- réaliser des essais à une pression élevée compatible avec des roches tendres mais plus résistantes que la majeure partie du sol ;
- réaliser une classification propre aux grès.

7. Références

Abderrahim A. et Tisot J.P. 1992 : Utilisation d'un mini pressiomètre pour la mesure directe du frottement à l'interface sol pulvérulent-inclusion. *Revue française de géotechnique, n°61, pp. 63-74.*

AFNOR 2000 : Norme française sur l'essai pressiométrique Ménard. *Association française de normalisation, 2ème tirage, 43P.*

Combarieu O. 1995 : L'essai pressiométrique et la résistance au cisaillement des sols. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et des Chaussées, vol. 196, pp. 43-51.*

Combarieu O. 2000 : Proposition d'évolution pour le calcul du facteur de pryance pressiométrique des fondations profondes. . *Bulletin des Laboratoires des Ponts et des Chaussées, vol. 229, pp 21-31.*

Degas M., Wojtkowiak F., Metz M. et Branchet M. 2003 : Stabilité de la surface après exploitation totale du charbon et l'arrêt des pompages d'exhaure minière. *Colloque international Après-mine 2003, Nancy, février 2003, CD Rom JSBN2-85555-057-2.*

Filliat G. 1981 : La pratique des sols et fondations. *Ed. Moniteur, pp. 223-230.*

Rangeard D. 2002 : Identification des caractéristiques hydromécaniques d'un argile par analyse inverse d'essais pressiométriques. *Thèse de doctorant, Ecole centrale de Nantes, p.166.*

Shahrour I. Kasdi.A. Abriak N. 1995 : Utilisation de l'essai pressiométrique pour la détermination des propriétés mécaniques des sables obéissant au critère de Mohr-Coulomb avec une règle d'écoulement non associée. *Revue française de Géotechnique, n°73, pp. 27-33.*

Thoraval A., Wojtkowiak F., Metz M. et Branchet M., 2003 : Effets prévisibles en surface et traitement de galleries minières creusées à faible profondeur dans les Grès Vosgiens. Exemple de la galerie de Falck . *Colloque international Après-mine 2003, Nancy, février 2003, CD Rom JSBN2-85.555-057-2.*

Zentar R. 1999, Analyse inverse des essais pressiométriques – Application à l'argile de Saint-Herblain, *thèse de doctorant, Ecole centrale de Nantes.*

Wojtkowiak F. et Didier C. 1999 : Principes de traitement d'anciens ouvrages miniers débouchant en surface. *9ème Congrès International de Mécaniques des Roches, Paris. Vol. 1, pp. 25-30.*

8. Remerciements

Les auteurs remercient l'Unité de Gestion de l'Environnement et du Patrimoine Industriel des Houillères du Bassin de Lorraine pour le soutien technique et financier apporté à cette étude.