

RAPPORT DE RECHERCHE

NEUTRALISATION DU POTENTIEL DE
GONFLEMENT DES REMBLAIS DE FONDATION
PAR DES INJECTIONS DE COULIS SPÉCIAUX

SÉRIE SUR
LES TECHNOLOGIES
DU BÂTIMENT



AU COEUR DE L'HABITATION
Canada

LA SCHL : AU CŒUR DE L'HABITATION

La Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL) est l'organisme fédéral responsable de l'habitation. Elle aide les Canadiens à avoir accès à un vaste choix de logements de qualité, à prix abordable.

Le Programme d'assurance prêt hypothécaire de la SCHL a aidé de nombreux Canadiens à réaliser leur rêve de posséder une habitation. La SCHL offre une aide financière pour que les Canadiens les plus démunis puissent se procurer un logement convenable, à prix abordable. Par l'entremise de ses activités de recherche, la SCHL stimule l'innovation dans les domaines suivants: conception des habitations, technologie du bâtiment, urbanisme, options de logement et financement. La SCHL s'associe également avec le secteur de l'habitation et les autres membres d'Équipe Canada afin de vendre les produits et le savoir-faire canadiens sur les marchés étrangers et, ainsi, de créer des emplois ici-même, au pays.

La SCHL offre aux consommateurs et aux membres du secteur de l'habitation une vaste gamme de produits d'information susceptibles de les aider à prendre des décisions éclairées concernant leurs achats ou leurs affaires. Avec la plus vaste gamme d'information sur l'habitation et les logements au Canada, la SCHL est le plus important diffuseur d'information sur l'habitation au pays.

Par ses activités, la SCHL contribue à l'amélioration de la qualité de vie des Canadiens, dans toutes les collectivités du pays. Elle les aide à vivre dans des maisons sûres à tout point de vue. Elle est vraiment « au cœur de l'habitation ».

Les Canadiens peuvent se procurer l'information diffusée par la SCHL dans différents points de vente et dans ses bureaux régionaux.

Vous pouvez aussi communiquer avec nous par téléphone : 1 800 668-2642
(à l'extérieur du Canada : 613 748-2003)
ou par télécopieur : 1 800 245-9274
(à l'extérieur du Canada : 613 748-2016)

Pour nous joindre en direct, visitez notre site Web à l'adresse www.schl.ca

La Société canadienne d'hypothèques et de logement souscrit à la politique du gouvernement fédéral sur l'accès des personnes handicapées à l'information. Si vous désirez obtenir la présente publication sur des supports de substitution, composez le 1 800 668-2642.

**NEUTRALISATION DU POTENTIEL DE GONFLEMENT DES
REMBLAIS DE FONDATION PAR DES INJECTIONS DE COULIS SPÉCIAUX**

Rapport Final

Présenté à la

**Société canadienne d'hypothèques et de logement
(SCHL)**

Rédigé par

Achour Bellaloui

Gérard Ballivy

Patrice Rivard



**Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée
de l'Université de Sherbrooke (LMRGA)**

GR 03-05-01

Mai 2003

Ce projet a été réalisé grâce au soutien financier de la Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL) dans le cadre de son Programme de subventions de recherche, les idées et conclusions exprimées dans ce rapport étant toutefois celles des auteurs et non la position officielle de la SCHL.

EXTRAIT

De nombreux cas de soulèvement de dalle ont été rapportés dans les Basses-Terres du St-Laurent et sont reliés à l'oxydation des sulfures (pyrite, principalement) présents dans les granulats du remblais ou dans le roc sous-jacent. Une méthode ayant pour but d'arrêter l'expansion des remblais doit donc être développée et validée. Le Laboratoire de Mécanique des Roches et de Géologie Appliquée de l'Université de Sherbrooke (LMRGA) a présenté une proposition de recherche à la Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL) afin de réaliser la faisabilité technique de l'injection de coulis de ciment dans un remblai de fondation. Des essais visant à arrêter l'expansion ont été entrepris afin de provoquer un enrobage des granulats et éviter, par conséquent, l'oxydation des sulfures responsables du gonflement après leur processus d'oxydation/neutralisation.

Dans un premier temps, la méthode a été testée à l'aide de moules CBR (*California Bearing Ratio*) contenant des granulats réactifs. En second lieu, un cube en béton de volume plus important a été utilisé pour simuler des murs de fondation. Les granulats étudiés sont des shales pyriteux à caractère expansif. Différentes formulations à base de ciment ternaire avec ajout (superplastifiant Eucon 37 et agent anti-ressuage Euco-Nivo L, de la compagnie Adjuvants Euclid Canada) ont été nécessaires pour dégager la procédure convenable pour une injection acceptable.

La réussite de l'injection dépend étroitement de la perméabilité du remblai qui, à son tour, dépend de la répartition granulométrique et du degré de compaction. Comme la hauteur du moule CBR est relativement comparable à celle d'un remblai de sous-sol, la méthode d'injection proposée pourrait être appliquée dans le cas des sous-sols affectés par les problèmes de gonflement. En revanche, l'injection peut s'avérer difficilement réalisable dans un remblai de garage où l'épaisseur est d'environ 1 m.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	1
1 Objectifs du projet de recherche	3
2 Introduction	4
2.1 Historique de cas	4
2.2 Processus d'oxydation de la pyrite.....	6
3 Détermination du potentiel expansif des granulats	9
3.1 Dispositif expérimental pour la détermination du potentiel expansif des granulats	9
3.2 Caractérisation des granulats.....	10
3.2.1 Analyse minéralogique.....	10
3.2.2 Potentiel net de neutralisation des granulats	11
3.2.3 Potentiel générateur de sulfates	11
3.2.4 Détermination de l'adsorption et de l'attrition des granulats.....	12
3.3 Influence de la température sur l'expansion des granulats	12
3.4 Détermination de l'expansion de différents granulats	14
4 Essais de gonflement dans des cubes	16
4.1 Mise en place des granulats et instrumentation	16
4.2 Culture bactérienne.....	18
4.3 Évolution des différents paramètres dans les cubes.....	18
5 Essais d'injection de coulis de ciment	22
5.1 Injection dans des moules	22
5.2 Méthodologie pour l'injection dans les moules CBR	22
5.3 Caractérisation et injectabilité du mélange initial	23
5.3.1 Rhéologie du mélange	23
5.3.2 Injection des granulats par le coulis TER-1.....	24
5.3.3 Optimisation de la formulation	26
6 Conclusion	29
7 Bibliographie	31
Annexe	
Lexique.....	33

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Amplitudes des soulèvements dans les sous-sols et garages de résidences potentiellement touchées par le problème de pyrite	4
Figure 2	Nombre de maisons pour chaque âge.....	5
Figure 3	Mise en place des granulats et dispositif expérimental pour l'évaluation du potentiel expansif	9
Figure 4	Évolution expansive du concassé La Prairie (D).....	13
Figure 5	Population bactérienne type Thiobacillus Ferrooxidans	13
Figure 6	Évolution expansive des granulats A et La Prairie à 38°C et 100% d'humidité.....	17
Figure 7	Cristallites de gypse néoformé	15
Figure 8	Dispositif expérimental utilisé pour l'évaluation du potentiel expansif des granulats	16
Figure 9	Dispositif expérimental et instrumentation des cubes	17
Figure 10	Ajout de la culture bactérienne et vue générale de l'enceinte expérimentale.....	18
Figure 11	Évolution de la température dans les cubes et dans l'enceinte réactionnelle	19
Figure 12	Évolution de l'humidité dans les cubes	19
Figure 13	Évolution du soulèvement des dalles pour les deux shales	20
Figure 14	Évolution de la pression sur les parois du cube et de la pression développée sur la dalle ..	21
Figure 15	Cône Marsh pour l'écoulement et le mini-slump pour l'étalement.....	23
Figure 16	Dispositif d'injection et moule CBR après injection	25
Figure 17	Échantillon B1 (0-20 mm) après injection avec le coulis TER-1	25
Figure 18	Échantillon C1 (5-20 mm) après injection avec le coulis TER-1.....	25
Figure 19	Injection du granulat A-1 par le coulis TER-1	26
Figure 20	Injection des granulats B-2 et C-2 par le coulis TER-3	27

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Nature des dégâts relevés dans les résidences.....	5
Tableau 2	Phases minéralogiques identifiées par diffraction X	10
Tableau 3	Caractéristiques chimiques des granulats	11
Tableau 4	Évolution du pH et du potentiel de génération de sulfates	11
Tableau 5	Caractéristiques physico-mécaniques des granulats.....	12
Tableau 6	Caractéristiques du coulis de ciment initial injecté dans les moules CBR	24
Tableau 7	Caractéristiques des échantillons injectés par le coulis TER-1	24
Tableau 8	Caractéristiques des coulis optimisés avec agent anti-ressuage	26
Tableau 9	Caractéristiques des échantillons injectés par le coulis TER-3	27

SOMMAIRE

Certains remblais peuvent contenir des granulats qui, sous certaines conditions environnementales, vont gonfler et conduire à une série de problèmes allant du soulèvement de la dalle reposant sur le remblai à l'écartement des murs de fondation. De nombreux cas ont été rapportés dans les Basses-Terres du St-Laurent et sont reliés à l'oxydation des sulfures (pyrite, principalement) présents dans les granulats ou dans le roc.

Si les conditions environnementales ne changent pas, le processus du gonflement peut se poursuivre sur plusieurs années et causer d'importants dommages. Une méthode ayant pour but d'arrêter l'expansion des remblais doit donc être développée et validée.

Comme les deux principaux agents responsables du processus de gonflement sont la disponibilité en oxygène et en humidité, la méthode développée visera donc à couper l'apport de ces agents aux granulats. C'est pourquoi une méthode d'enrobage des granulats à l'aide de coulis de ciment a été préconisée.

Comme le stipule la proposition de recherche intitulée « Neutralisation du potentiel de gonflement des remblais de fondation par des injections de coulis spéciaux », la présente étude concerne la faisabilité technique de l'injection de coulis de ciment dans un remblai de fondation. Dans un premier temps, la méthode a été testée à l'aide de moules CBR (*California Bearing Ratio*) contenant des granulats réactifs. En second lieu, un cube en béton de volume plus important a été utilisé pour simuler des murs de fondation. Les granulats étudiés sont des shales pyriteux à caractère expansif dont certains ont été récupérés dans trois résidences retenues suite aux différentes investigations réalisées sur la rive sud de Montréal.

Le rapport décrit les essais de gonflement menés à l'aide des moules CBR utilisant deux granulats de type shale, identifiés par le Comité technique comme granulat A et granulat La Prairie (voir lexique). Des essais visant à arrêter l'expansion ont été entrepris afin de provoquer un enrobage des granulats et éviter, par conséquent, l'oxydation des sulfures responsables du gonflement après leur processus d'oxydation/neutralisation. Différentes formulations à base de ciment ternaire et divers scénarios ont été nécessaires pour dégager la procédure convenable pour une injection acceptable.

La caractérisation expansive des granulats A et La Prairie a été réalisée à l'aide d'un ensemble expérimental faisant appel à un moule type CBR. Afin d'accélérer le gonflement, le dispositif a été

maintenu à 38°C en présence d'un taux d'humidité relative de près de 100%. De plus, une culture bactérienne (*Thiobacillus Ferrooxidans* et *Thioparus*) a été ajoutée comme catalyseur de la réaction.

En ce qui concerne les essais menés à l'aide des cubes en béton, il a été montré, après expansion, qu'un lavage à l'eau permettait une réduction considérable de l'expansion; celle-ci peut être expliquée principalement par une solubilisation du gypse néoformé (minéral gonflant). Cette approche pourrait être mise à contribution pour réduire le gonflement dans le cas des garages. Certains problèmes pourraient néanmoins survenir en pratiquant cette technique. Par exemple, dans le cas où la teneur en eau du remblai est faible, le fait d'y apporter une grande quantité d'eau pourrait provoquer le gonflement des granulats présentant un fort pourcentage de minéraux argileux. De plus, il est possible que de nouveaux sulfates gonflants soient progressivement formés si les agents réactifs (sulfures, carbonates) ne sont pas épuisés.

Des essais d'injection de coulis ont été réalisés dans les moules avec des granulats expansifs selon deux fractions granulométriques, soit de 0-20 mm et de 5-20 mm. Le premier cas est représentatif d'un granulat destiné aux garages et le second sert de simulation pour les sous-sols. Un coulis d'injection à base de ciment ternaire (composé d'un mélange de ciment Portland ordinaire, de laitier de haut-fourneau et de fumée de silice) a été choisi pour ces caractéristiques supérieures, notamment du point de vue de la résistance aux sulfates. Afin d'obtenir un coulis relativement fluide, la formulation initiale du coulis consiste en un rapport massique eau/liant de 0,8 et un dosage en superplastifiant de 1,0%. Ce mélange, bien qu'ayant montré une certaine efficacité, s'est avéré trop peu stable et a montré un ressuage important. Un agent anti-ressuage a donc été ajouté au mélange initial pour pallier ce défaut.

Les essais d'injection ont montré l'efficacité du coulis pour enrober les particules de granulats. Toutefois, la mise en place avec un degré élevé de compaction du granulat 0-20 mm dans le moule n'a permis aucune pénétration et ce, quelque soit le type de coulis appliqué. Seuls les degrés de compaction inférieurs à 2 g/cm₃ ont permis une injection plus aisée des coulis.

La réussite de l'injection dépend étroitement de la perméabilité du remblai qui, à son tour, dépend de la répartition granulométrique et du degré de compaction. En ce sens, seules les pierres nettes ont montré un meilleur comportement vis-à-vis de l'injectabilité en utilisant un ciment dont les propriétés rhéologiques ont été modifiées par des ajouts (superplastifiant Eucon 37 et agent anti-ressuage Euco-Nivo L, de la compagnie Adjuvants Euclid Canada). Comme la hauteur du moule CBR est relativement comparable à celle d'un remblai de sous-sol, cette méthode d'injection pourrait être appliquée dans le cas des sous-sols affectés par les problèmes de gonflement. En revanche, l'injection peut s'avérer difficilement réalisable dans un remblai de garage où l'épaisseur est d'environ 1 m.

EXECUTIVE SUMMARY

Some backfills may contain aggregates that, in certain environmental conditions, will swell and lead to a series of problems ranging from the heaving of the slab resting on the backfill to the moving apart of the foundation walls. Many cases have been reported in the St. Lawrence Lowlands, related to the oxidation of sulphides (mainly pyrite) present in the aggregates or rock.

If the environmental conditions do not change, the swelling process can continue over several years and cause major damage. A method to stop the expansion of backfills must therefore be developed and validated.

Since the two main agents responsible for the swelling process are available oxygen and humidity, the method that will be developed will therefore aim to cut the supply of these agents to the aggregates. For this reason, a method to coat the aggregates with cement grout is advocated.

As set out in the research proposal on neutralizing the swelling potential of foundation backfills with injections of special grouts, this study concerns the technical feasibility of injecting cement grout in a foundation backfill. First, the method was tested using California Bearing Ratio (CBR) moulds containing reactive aggregates. Then, a concrete cube with a greater volume was used to simulate foundation walls. The aggregates studied were expansive pyritic shales, some of which were recovered from three residences retained following different investigations conducted on the south shore of Montréal.

The report describes the swelling tests performed with CBR moulds using two shale-type aggregates, identified by the technical committee as aggregate A and aggregate La Prairie (see glossary – *granulat La Prairie*). Tests aimed at stopping the expansion were undertaken in order to provoke the coating of the aggregates and consequently prevent the oxidation of the sulphides responsible for the swelling after their oxidation/neutralization process. Different ternary cement based formulations and various scenarios were required to develop a suitable procedure for an acceptable injection method.

Aggregates A and La Prairie were rendered expansive with an experimental kit using a CBR-type mould. In order to accelerate the swelling, the device was maintained at 38°C with nearly 100% relative humidity. As well, a bacterial culture (*Thiobacillus Ferrooxidans* and *Thioparus*) was added as a catalyst in the reaction.

As for the tests performed with the concrete cubes, it was shown, after expansion, that washing them with water considerably reduced the expansion; this was mainly due to a solubilization of the newly formed gypsum (swelling mineral). This approach could be used to reduce swelling in garages. Still, certain problems could occur with this technique. For example, if the backfill has a low water content, the supply of a large quantity of water could cause the swelling of aggregates with a high percentage of clay minerals. Also, it is possible that new swelling sulphates could progressively be formed if the reactive agents (sulphides, carbonates) are not depleted.

Grout injection tests were performed in the moulds with expansive aggregates using two granulometric fractions: 0-20 mm and 5-20 mm. The first is representative of an aggregate used for garages and second served to simulate basements. A ternary cement based grout (composed of a mix of regular Portland cement, blast-furnace slag and silica fume) was chosen for its superior characteristics, particularly from the standpoint of its resistance to sulphates. In order to obtain a relatively fluid grout, the initial formulation of the grout had a water/binder mass ratio of 0.8 and a superplasticizer dosage of 1.0%. While this mix was somewhat effective, it proved to be too unstable and showed significant bleeding. An anti-bleeding agent was therefore added to the initial mix to correct this fault.

The injection tests showed the effectiveness of the grout to coat the aggregate particles. However, the set-up with a high degree of compaction of the 0-20 mm aggregate in the mould did not allow for any penetration, regardless of the type of grout applied. Only degrees of compaction below 2 g/cm³ permitted an easier injection of the grouts.

A successful injection depends a great deal on the permeability of the backfill, which, in turn, depends on the granulometric distribution and the degree of compaction. In this sense, only the clean stones showed a better injectability behaviour, using a cement with rheological properties that were modified with some additives (Eucon 37 superplasticizer and Euco-Nivo L anti-bleeding agent, from the company Adjuvants Euclid Canada). Since the height of the CBR mould is relatively comparable to that of a basement backfill, this injection method could be applied to basements affected by swelling problems. However, the injection may be difficult to perform in a garage backfill, which is around 1 m thick.



National Office	Bureau national
700 Montreal Road	700 chemin de Montréal
Ottawa ON K1A 0P7	Ottawa ON K1A 0P7
Telephone: (613) 748-2000	Téléphone : (613) 748-2000

Since a limited demand for this research document has been anticipated, only a summary of its contents has been translated

By completing and returning this form you will help us to determine if there is a significant demand for this report in English. Mail the completed form to:

Canadian Housing Information Centre
Canada Mortgage and Housing Corporation
C1-200
700 Montreal Road
Ottawa, Ontario
K1A 0P7

Report Title: _____

I would prefer to have this report made available in English.

Name _____

Address _____

Street _____ Apt. _____

City _____ Province _____ Postal Code _____

Telephone () _____

1. Objectifs du projet de recherche

L'objectif visé par le projet de recherche consiste essentiellement à développer une méthodologie appropriée afin d'arrêter l'expansion due à l'oxydation de la pyrite contenue dans les granulats des remblais de fondation. Devenu un sujet d'actualité, les problèmes liés à la présence des sulfures dans les granulats sont connus par beaucoup de citoyens et suscitent, par conséquent, un intérêt fort croissant du point de vue recherche et développement. En effet, l'investigation proposée rallie parfaitement ce sens et concerne la mise en œuvre de dispositifs expérimentaux, entre autres, des moules CBR (*California Bearing Ratio*) et des cubes en béton destinés à évaluer le potentiel expansif de granulats reconnus gonflants. Le volet subséquent consiste à interrompre l'expansion générée par des injections de coulis de ciment résistant aux sulfates. Après concertation avec Madame Jacqueline Meunier-Bureau, l'essai entrepris à l'aide d'un des deux cubes concerne la pierre nette (5-20 mm) pour le shale A afin de simuler au mieux les granulats fréquemment rencontrés dans les sous-sols des résidences. Le second cube fait intervenir les granulats d'un shale plus réactif (La Prairie) avec une granulométrie comprise entre 0 et 20 mm. Pour ce faire, des lots désignés A par le Comité Technique Québécois chargé des études sur les problèmes de gonflement liés à la pyrite ainsi qu'un autre shale désigné La Prairie sont utilisés à cause de leurs importantes réactivités expansives. Précédent ce volet, des moules CBR contenant les granulats ont été utilisés pour vérifier la faisabilité technique de l'injection en considérant différents degrés de compaction ainsi que des plages granulométriques différentes soit 0-20 mm et 5-20 mm.

Les techniques d'injection du remblai ont été utilisées sporadiquement dans quelques cas majeurs de soulèvement de dalles d'édifices de grande taille. Les résultats obtenus ont néanmoins été discutables. C'est pourquoi une étude systématique en laboratoire, avec contrôle des paramètres, devait être réalisée afin de documenter, valider et optimiser une méthodologie d'injection efficace.

2. Introduction

2.1 Historique de cas

De nombreux cas de soulèvements de dalles répertoriés en particulier dans les Basses-Terres du Saint-Laurent (Ottawa, Montréal, Québec) sont attribués à l'oxydation des sulfures présents dans les granulats ou dans le roc (Bérard, 1970; Quigley, 1970; Penner, 1973; Grattan-Bellew, 1982; Bérubé, 1986, 1997; Côté, 1997; Ballivy *et al.*, 2002). Ce comportement provoque aussi des désordres sulfatiques dans les dalles en béton (Bérard 1997, Divet 1996). Ces dommages représentent, dans certains cas, des pertes économiques très sévères pour les propriétaires des résidences concernées, près de 10 000 maisons seraient touchées dans la région de Montréal (ACQC, 1999). Une étude réalisée en 1999 par Pépin sur la rive-sud de Montréal a permis de dresser une répartition des cas de soulèvements générés par les granulats des remblais de fondation au niveau des sous-sols et des garages sur une base de 224 résidences dont la présence de remblais gonflants était soupçonnée (Figure 1).

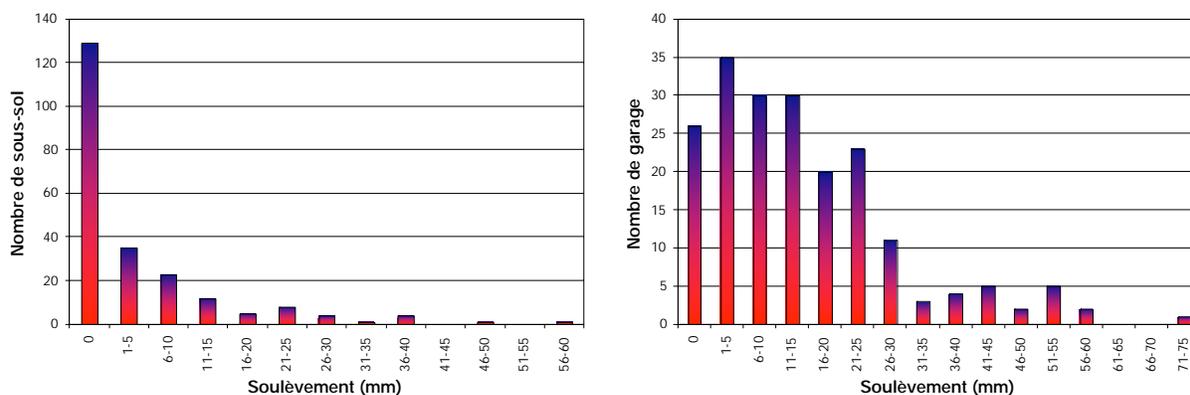


Figure 1 Amplitudes des soulèvements dans les sous-sols et garages de résidences potentiellement touchées par le problème de pyrite (Pépin, 2000)

Le point essentiel qui émerge de l'analyse des histogrammes obtenus se résume par le nombre plus important de soulèvements relevés dans les garages par rapport aux sous-sols. Cette différence trouve son origine essentiellement dans l'épaisseur des remblais qui peut atteindre 1 mètre dans les garages contre 0,20 mètre pour les sous-sols. De plus, la qualité de la pierre sous la dalle du garage est généralement moins bonne que celle trouvée au sous-sol (Cormier, 2000; Ballivy *et al.*, 2002). Cependant et comme le montre le tableau suivant, les garages semblent essentiellement affectés par des problèmes de gonflement tandis que les sous-sols le seraient plutôt par des problèmes de gonflement et de sulfatation associée au gonflement. L'expansion accompagnant la sulfatation peut provenir soit du gonflement du remblai sous la dalle de béton ou soit du gonflement de la dalle de béton (délamination) comme le montre le tableau 1.

Tableau 1 Nature des dégâts relevés dans les résidences (tiré de Pépin, 2000)

	Sulfatation	Gonflement	Sulfatation/gonflement
Garage	1%	89%	10%
Sous-sol	1%	53%	45%

L'étude des principaux symptômes a révélé que les soulèvements ponctuels, dans les 197 garages visités, sont compris entre 1 et 30 mm dans 70% des cas tandis que les soulèvements ponctuels, dans les 224 sous-sols visités, sont compris entre 1 et 15 mm dans près de 32% des cas et qu'il n'y a aucun soulèvement dans près de 58% des cas. Les principaux types de fissures fréquemment rencontrés sont sous forme étoile et longitudinales dans les garages et seulement des fissures en étoile sont relevées dans les sous-sols. L'ouverture des fissures au garage oscille entre 2-5 mm à plus de 5 mm dans 80% des cas contre 58% des cas au sous-sol.

L'ensemble des maisons visitées au cours des investigations se caractérise par un âge situé entre 6 ans et 57 ans. La distribution de l'âge des maisons est illustrée par la figure 2. Le prix d'acquisition des résidences oscille entre 50 000\$ et 240 000\$ dont la majorité est située dans la gamme de 90 000 à 99 999\$.

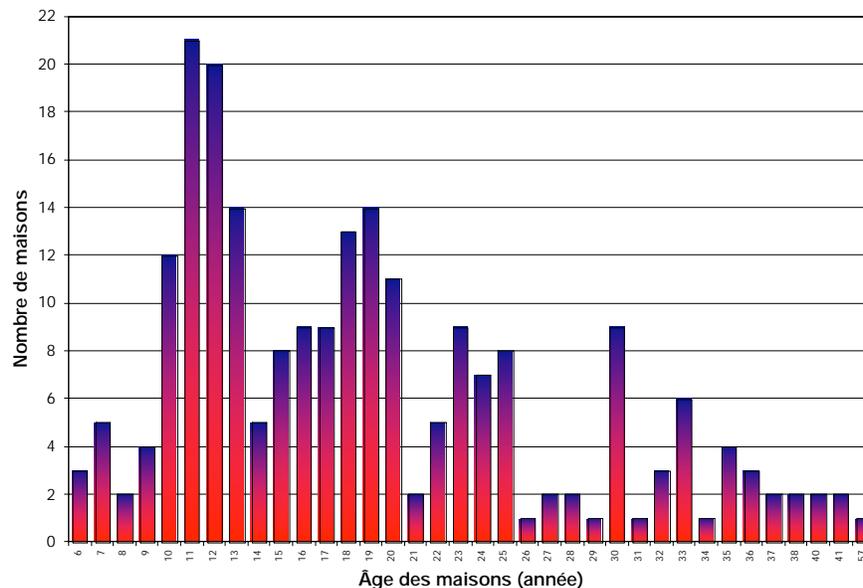
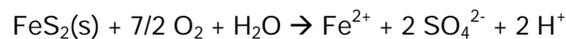


Figure 2 Nombre de maisons pour chaque âge (Pépin, 2000)

2.2 Processus d'oxydation de la pyrite

Le contact des sulfures métalliques avec l'humidité et l'oxygène peut entraîner leur oxydation, particulièrement la pyrite et une variété allotropique de celle-ci désignée forme framboïdale (Bérard, 1970; Côté, 1991; Tanguay, 1998). Cette particularité résulte de la présence dans la structure cristallographique de la pyrite (FeS_2) de paires soufre S_2^{2-} ; espèces plus labiles, donc, plus réactives que les sulfures S^{2-} . Une autre variété de sulfure de fer comparable à la pyrite avec des paires soufre, désignée marcassite, peut contribuer aussi de façon non négligeable au phénomène d'expansion. Cette espèce thermodynamiquement métastable, se prête plus facilement à l'oxydation que la pyrite.

La pyrrothite, un autre sulfure de fer de stœchiométrie proche de Fe_{1-x}S , manifeste une réactivité importante. Cette réactivité est attribuée à la présence de lacunes reconnues comme étant un facteur essentiel dans la réaction d'oxydation. Dans le cas des sulfures mixtes ou des solutions solides telle que la chalcopryrite (CuFeS_2), les importantes réactivités engendrées par ces systèmes sont dues à une synergie développée par un effet promoteur assuré généralement par de faibles teneurs en métaux de transition (mobilité électronique). Cependant, ce type de sulfure n'a jamais été rencontré dans le contexte des remblais de fondation. En présence d'oxygène et d'humidité, l'oxydation de la pyrite peut être représentée par l'équation stœchiométrique globale suivante:



L'interaction chimique des ions Ca^{2+} issus de la calcite et/ou de la dolomite contenues principalement dans les granulats avec les groupements sulfates provenant des réactions d'oxydation entraîne l'apparition du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et/ou de l'epsomite ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) comme produits de neutralisation. L'expansion générée par la formation du gypse au sein du remblai est expliquée théoriquement par la différence de la masse volumique entre la pyrite (5,02 g/cm³), pyrite framboïdale (4,12 g/cm³) et le gypse (2,36 g/cm³), les variations de volume étant inversement proportionnelles aux variations de masse volumique. Récemment, ce type de gonflement a été rencontré également dans le cas des marnes contenant de la pyrite traitées à la chaux sur lesquelles un tronçon d'une autoroute a été construit (Barylá, 2000).

La pyrite, pour être apte à l'oxydation, doit présenter une surface de contact avec l'humidité et l'oxygène. Cette présence se manifeste en surface ou dans les fissures des granulats; par contre, les sulfures localisés à l'intérieur des solides sont très peu affectés par les réactions d'oxydation.

La réaction d'oxydation de la pyrite est régie principalement par certains facteurs spécifiques qui s'appliquent tous dans le cas des remblais de fondations (Ballivy et coll., 1997; Bérubé, 1997):

- pH de l'eau interstitielle;
- température;
- teneur en oxygène;
- degré de saturation en eau;
- degré d'exposition et surface spécifique des sulfures;
- nature et population bactérienne (présentes naturellement).

Une variation à ces niveaux est synonyme d'une variation, entre autres, des conditions hygrométriques et du gradient thermique d'un remblai mis en contact avec la nappe et supportant une dalle chauffée, ce qui peut provoquer un changement réactionnel dans le processus d'oxydation.

Dans les sulfures, le soufre constitue le pôle d'attraction d'une série de transformations chimiques et biologiques. Ce processus, désigné cycle du soufre, fait intervenir diverses réactions d'oxydation et de réduction. Les étapes réactionnelles mises en jeu dans ces processus peuvent être modifiées par la présence de micro-organismes susceptibles d'oxyder les valences instables du soufre en un degré d'oxydation plus stable. Les bactéries type *Thiobacillus* sont responsables de l'oxydation du soufre élémentaire et des composés à valence réduite tels que FeS_2 , ZnS , PbS , NiS , CuS , CoS ou des composés mixtes comme Cu_5AsS_4 , FeAsS , CoAsS . La mise en solution des métaux en milieu acide est due à la capacité métabolique de la *Thiobacillus Ferrooxidans* de prendre son énergie de l'oxydation du fer ferreux en fer ferrique ainsi que de l'oxydation du soufre élémentaire et des sulfures. Par contre, la bactérie *Thioparus* possède la propriété d'oxyder le soufre élémentaire à pH neutre ou acide. La prolifération de ces micro-organismes est favorisée par un milieu propice défini par: le maintien d'un pH acide, de la disponibilité d'oxygène et d'eau ainsi que des températures oscillant entre 20 et 35°C, facteurs pour lesquels l'activité catalytique bactérienne est maximale. En milieu alcalin, l'activité bactérienne ne semble pas présenter, à première vue, une influence sur les réactions d'oxydation, du fait que les granulats sont constitués majoritairement de calcite (CaCO_3) et de dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Néanmoins, dans un cas de soulèvement de dalle causé par le roc dans un édifice à Ottawa (Quigley et Vogan, 1970), une population bactérienne non négligeable a été mise en évidence. En outre, le présent travail démontre clairement la présence de ce type de micro-organismes dans trois lots de concassés prélevés dans trois différents remblais de résidences localisées dans la région de Montréal. Cependant, le rôle des bactéries dans le contexte des remblais de fondation reste un sujet à controverse concernant l'influence exacte dans l'amplification de la réactivité.

Le degré de saturation en eau est un des facteurs principaux contrôlant la diffusion de l'oxygène puisqu'une réduction maximale du coefficient de diffusion de l'oxygène est obtenue à des degrés de saturation élevés (Nielson, 1984). À titre indicatif, le coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'air est de

$1,78 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ contre $2,2 \cdot 10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en phase aqueuse. Donc, un niveau élevé de la nappe réduirait considérablement la présence de l'oxygène d'où une atténuation importante d'oxydation seulement cette réduction peut être accompagnée par un affaiblissement des propriétés mécaniques des granulats.

Afin d'annihiler les risques liés à cette nouvelle problématique, un comité technique constitué d'universitaires et de professionnels dans le domaine a été créé après le 1^{er} colloque organisé sur le thème en 1997 à Laval (Montréal). En conséquence, le Comité Technique Québécois (CTQ) sur les problèmes liés à la pyrite a été créé en 1999 et est le résultat de l'ajout d'autres professionnels et intervenants du milieu de l'habitation. Ce comité a été mandaté afin de répondre aux différentes attentes concernant ce sujet. En ce sens, une procédure de caractérisation des granulats désignée « CTQ-M100 Protocole de caractérisation du potentiel de gonflement des matériaux granulaires – matériaux DB – et procédures d'application – Marché résidentiel » a été élaborée par le Comité et en parallèle, le potentiel de gonflement des matériaux peut être évalué à l'aide d'un dispositif expérimental en laboratoire afin de s'affranchir de toute appréhension mettant en cause les granulats destinés pour les remblais sous dalles de béton des résidences (LMRGA, 2000).

3. Détermination du potentiel expansif des granulats

3.1 Dispositif expérimental pour la détermination du potentiel expansif des granulats

La caractérisation expansive des granulats A et La Prairie a été réalisée à l'aide d'un ensemble expérimental faisant appel à un moule type CBR (*California Bearing Ratio*). Tous les détails de cette procédure se trouvent dans Bellaloui *et al.*, 2002. L'échantillon est compacté à l'énergie Proctor modifiée (norme BNO 2501-255). Le moule CBR est placé dans une cuvette contenant de l'eau dans laquelle est introduite une culture bactérienne (*Thiobacillus Ferrooxidans* et *Thioparus*). Une plaque perforée est installée sur l'échantillon afin d'assurer l'évaporation de l'eau. Dans le but de simuler une dalle, une charge équivalente à une contrainte de 2,5 kPa est installée sur l'ensemble. Le suivi de l'expansion est assuré à l'aide d'un extensomètre relié à un système d'acquisition (Figure 3). Cet ensemble expérimental est installé dans une chambre maintenue à 38°C en présence de 100% d'humidité relative afin d'accroître le processus de gonflement. Pour l'essai à 21°C, l'ensemble est placé à température ambiante et 40% d'humidité avec une alimentation en eau permettant de maintenir le niveau d'eau dans la cuvette juste à la base du moule CBR afin d'éviter un haut degré de saturation dans l'échantillon éliminant la création de barrière à oxygène. Dans le cas des essais en présence d'humidité élevée, le dispositif d'alimentation en eau est exclu et le niveau du liquide dans la cuvette est assuré uniquement par la condensation de la vapeur d'eau. L'expérience a montré que le volume accumulé dans la cuvette en chambre humide ne dépasse guère la base du moule. Il est à signaler qu'un volume d'environ 120 ml de culture bactérienne est initialement ajouté dans la cuvette. Cette culture est renouvelée après environ trois mois, assurant le maintien d'une activité catalytique durant les essais.



Figure 3 Mise en place des granulats et dispositif expérimental pour l'évaluation du potentiel expansif

3.2 Caractérisation des granulats

Avant d'évaluer la détermination du potentiel expansif, toute une panoplie de techniques de caractérisation a été mise en œuvre pour déterminer les propriétés de deux shales retenus pour l'expérimentation, parmi lesquelles figurent la diffraction par les rayons X (DRX), les analyses chimiques, l'essai Micro-Deval et l'adsorption d'eau. À titre indicatif et afin d'uniformiser ce rapport avec d'autres rapports ou articles déjà émis, le shale La Prairie est désigné parfois par la lettre «D».

3.2.1 Analyse minéralogique

Un système polyphasique est identifié par diffraction des rayons X pour l'ensemble des granulats considérés et les phases minéralogiques mises en évidence par cette technique sont rassemblées au tableau 2.

Tableau 2 Phases minéralogiques identifiées par diffraction X

Échantillons	Phases identifiées					
	Silice	Calcite	Muscovite	Chlorite	Dolomite	Pyrite
Shale A	+	+	+	+	+	+
Shale La Prairie	+	+	+	+	+	+

Les deux shales se caractérisent par la présence de systèmes polyphasiques où il a été identifié de la silice, de la calcite, de la dolomite et des silico-aluminates tels que la muscovite et la clinocllore. L'identification sans aucune ambiguïté des phases mineures telle que la pyrite a été rendue plus aisée par l'apport d'un extracteur utilisant des produits chimiques appropriés (tensioactifs) pour la séparation de ces phases minéralogiques par flottation.

3.2.2 Potentiel net de neutralisation des granulats

Ce paramètre permet l'accès aux propriétés intrinsèques des granulats à savoir l'évaluation de leur potentiel de génération acide (PGA) et leur potentiel de neutralisation (PN) en se basant respectivement sur leurs teneurs résiduelles en soufre et en carbone inorganique. Cette approche constitue une méthode préliminaire et pratique pour prédire le potentiel net de neutralisation (PNN): facteur indicateur de toute possibilité de gonflement et/ou de sulfatation. Une valeur élevée de PNN indique que l'acide généré sera très probablement neutralisé par les carbonates du granulat. Ceci signifie que la production de sulfates (ex. gypse) sera grandement favorisée. Par contre, un PNN négatif indique que l'acide généré par l'oxydation de la pyrite ne sera pas neutralisé et que des problèmes de sulfatation de la dalle de béton sont à entrevoir si l'acide arrive à migrer jusqu'à cette dernière.

Tableau 3 Caractéristiques chimiques des granulats

Échantillons	Soufre (%)	PGA kgCaCO ₃ /t	Carbone (%)	PN kgCaCO ₃ /t	PNN kgCaCO ₃ /t
Shale A	0,58	18,13	2,52	20,99	2,86
La Prairie	1,14	35,63	3,18	26,50	-9,13

PGA: Potentiel de génération acide = 31,25 X Soufre total (%)

PN: Potentiel de neutralisation = 8,33 X Carbone total (%)

PNN: Potentiel net de neutralisation = Potentiel de neutralisation – Potentiel de génération acide

3.2.3 Potentiel générateur de sulfates

Afin d'atteindre ce paramètre, la mise en œuvre d'un extracteur type Soxhlet s'est avérée un outil indispensable pour l'évaluation du potentiel de génération sulfatique, puisque les sulfates sont tenus pour responsables des dommages causés par leur formation. La procédure expérimentale mise à profit consiste à introduire 50 g d'échantillon passant le tamis 5 mm dans une cartouche adaptée au Soxhlet et un volume de 200 ml d'eau déionisée est utilisé pour l'extraction. La procédure adoptée consiste à opérer par ébullition en quatre cycles d'extraction où chaque cycle correspond à un nombre précis de retour dans le ballon de l'eau condensée dans le réfrigérant et ce, après contact intime avec le solide. Les résultats obtenus sont reportés au tableau 4. Dès le premier cycle, l'échantillon La Prairie manifeste un pH inférieur à la neutralité puisque la teneur en carbonates est relativement faible. Cette valeur est en parfait accord avec les résultats obtenus sur le potentiel net de neutralisation où il est apparu un potentiel négatif, donc générateur acide pouvant entraîner une sulfatation de la dalle en béton par interaction chimique avec les aluminates et la chaux contenus dans le ciment. En somme, les shales A et La Prairie manifestent des pH avec un comportement relativement similaire. Par contre le pouvoir de génération sulfatique accuse une évolution tout à fait différente. Un facteur d'environ 3 sépare les deux granulats suggérant qu'une quantité non négligeable de sulfates soit combinée avec les ions calcium pour former du gypse. En outre, il faut insister sur le fait que la réaction dépend étroitement de la granulométrie des solides, donc de l'importance de la surface spécifique étant donné que la réaction est qualifiée de contact hétérogène mettant en jeu un solide (sulfures) et des gaz (oxygène et humidité).

Tableau 4 Évolution du pH et du potentiel de génération de sulfates

Paramètres	pH				Sulfates (mg/l)			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Shale A	7,03	7,98	8,68	9,00	100	170	190	210
Shale La Prairie	6,74	8,08	8,67	8,85	17	36	33	25

3.2.4 Détermination de l'adsorption et de l'attrition des granulats

L'absorption des granulats indique leur capacité à absorber l'eau. Dans un contexte de gonflement sulfatique, une grande absorption indique que les granulats présentent plus de risque d'oxydation dû à la quantité élevée d'oxygène et d'humidité au contact des grains de pyrite. Hormis les fractions supérieures à 5 mm pour le shale A, les résultats obtenus sur l'adsorption montrent que les valeurs sont supérieures à celles admises par le comité technique sur les problèmes liés à la pyrite (3%). En parallèle, les deux échantillons ne répondent pas de façon satisfaisante au critère de sélection concernant l'essai Micro-Deval surtout pour les fractions supérieures à 5 mm. L'essai Micro-Deval permet de mesurer la résistance à l'attrition des granulats. Des valeurs très élevées signifient que la pierre possède une faible résistance mécanique et est susceptible d'éclater sous les pressions de cristallisation des sulfates gonflants. Des coefficients de 90 et de 97% ont été obtenus pour les shales A et La Prairie, dépassant largement le critère admissible établi par le comité en l'occurrence 26%. Les résultats obtenus pour le shale A sont tout à fait conformes aux résultats obtenus par les autres laboratoires accrédités par le comité technique, validant ainsi nos mesures.

Tableau 5 Caractéristiques physico-mécaniques des granulats

Propriétés	Micro-Deval (%)		Adsorption (%)	
	0-5 mm	5-20 mm	0-5 mm	5-20 mm
Shale A	11	90	4,9	2,8
Shale La Prairie	14	97	4,9	3,7

MD: Micro-Deval pour le passant et le retenu 5mm, BNQ 2560-070-89

Ads: Adsorption d'eau pour le passant et le retenu 5mm, BNQ, 2560-067-83

3.3 Influence de la température sur l'expansion des granulats

Afin de vérifier l'effet de la température sur la réactivité des granulats, des moules CBR tels que décrits précédemment ont été mis à contribution à température ambiante (21°C) couplée à une humidité réduite (40%) et à haute température (38°C) en présence d'une humidité maximale (100%) en utilisant le shale dénommé La Prairie (D). Ce choix est justifié par le fait que des essais préliminaires pour la mise au point du dispositif expérimental ont permis de vérifier sa très grande réactivité expansive. À l'analyse de l'évolution expansive reportée à la figure 4, on constate un gonflement progressif et régulier pour les deux shales considérés. La vitesse de gonflement est plus accrue pour l'échantillon soumis à 38°C que celui à 21°C. Jusqu'à 100 jours de réaction, la courbe est sensiblement linéaire rappelant le caractère isotrope de la pyrite où sur le plan cristallographique tous les plans h00 sont supposés participer de la même manière à la réactivité. Au-delà de cette période, le taux d'expansion ralentit progressivement. Ce phénomène peut être expliqué par une diminution des sulfures accessibles en surface mais aussi par la formation d'un dépôt de gypse masquant ainsi les sites actifs. Après 300 jours d'essais, une certaine stabilisation

apparaît avec une réactivité environ 2 fois plus élevée pour l'échantillon maintenu à 38°C par rapport à celui à 21°C. Cette observation rallie parfaitement la loi d'Arrhenius stipulant que dans un régime cinétique, l'augmentation de la température à chaque 10°C entraîne une augmentation de la vitesse de la réaction de 2 à 3 fois. Cependant, l'augmentation de la température a aussi un effet sur l'accroissement de l'activité bactérienne. En parallèle à cet essai, l'effet des populations bactériennes a été abordé sur les mêmes granulats où un facteur d'environ 1600 fois a été obtenu pour la réactivité après six mois d'expérimentation. Donc, la présence des micro-organismes s'avère indispensable pour la multiplication de la vitesse de la réaction. Pour cette raison, la suite des essais de gonflement a été entreprise et réalisée à 38°C et 100% d'humidité en présence d'une culture bactérienne afin de réduire expérimentalement la durée de l'essai.

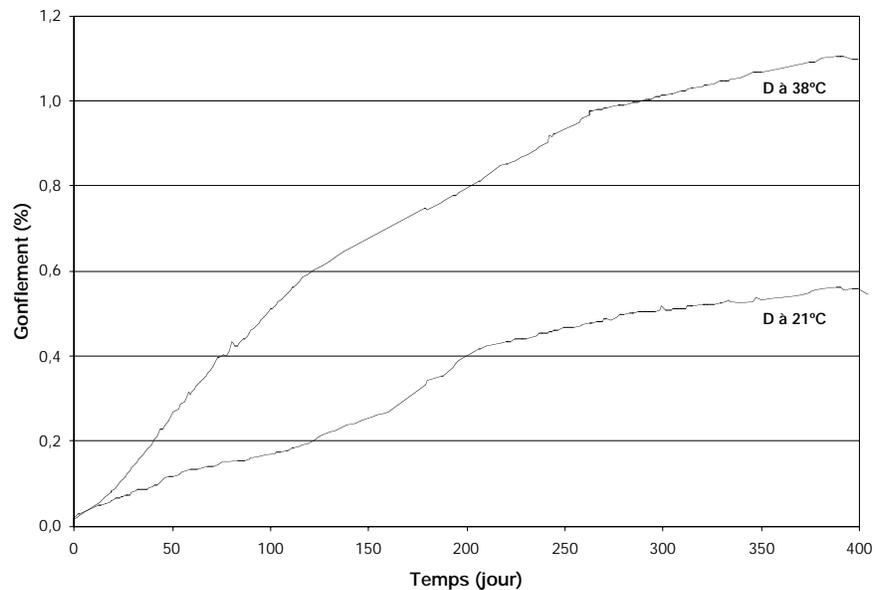


Figure 4 Évolution expansive du concassé La Prairie (D)

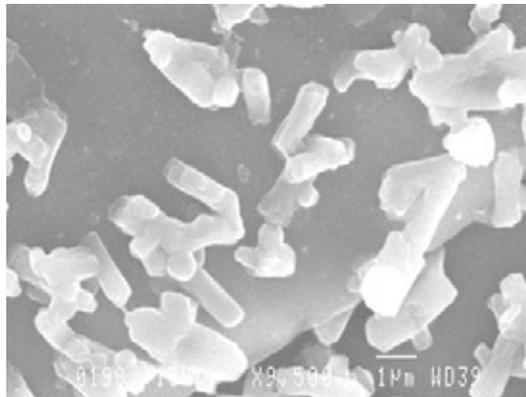


Figure 5 Population bactérienne type Thiobacillus Ferrooxidans

3.4 Détermination de l'expansion de différents granulats

L'évolution expansive reportée dans la figure 6 montre un gonflement régulier et très prononcé surtout pour le shale La Prairie et à un degré moindre pour A. En effet, le shale A accuse un amorçage du gonflement moins important que La Prairie. Cette différence dans la réactivité est attribuée à la teneur importante en soufre dans l'échantillon La Prairie (%S=1,14%); valeur plus élevée que dans le cas de A (%S=0,58). En plus, l'échantillon La Prairie se distingue par des résultats moins performants en attrition et en adsorption d'eau comme l'attestent les résultats reportés dans les tableaux 4 et 5. En effet, ces deux shales se caractérisent par des propriétés mécaniques plus faibles que le granulat C (composé principalement de cornéennes, une roche dure) surtout après compactage où une réduction granulométrique d'environ 50% est observée pour les shales A et La Prairie (essais réalisés séparément de l'essai de gonflement).

Les micrographes reportés à la figure 7 montrent l'aspect du gypse néoformé, sous forme de plaquettes.

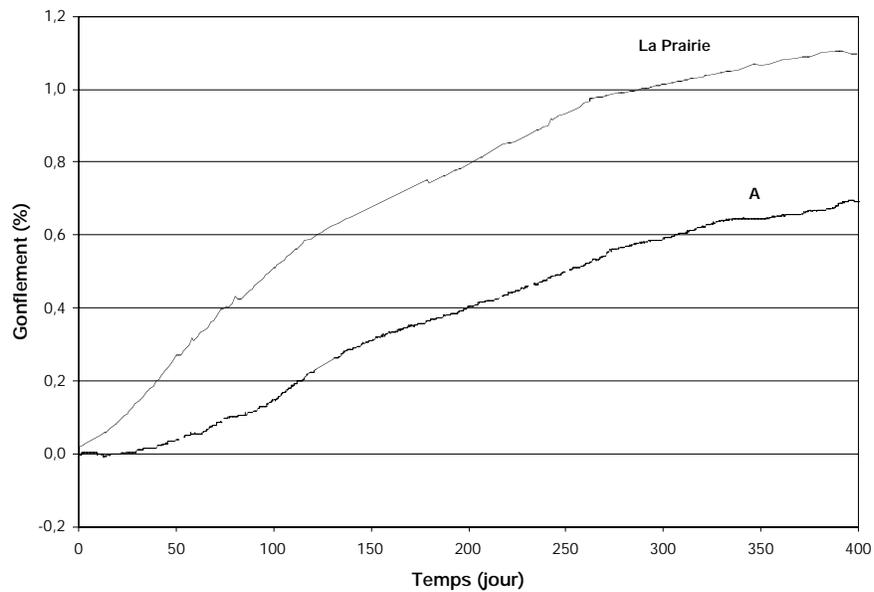


Figure 6 Évolution expansive des granulats A et La Prairie à 38°C et 100% d'humidité

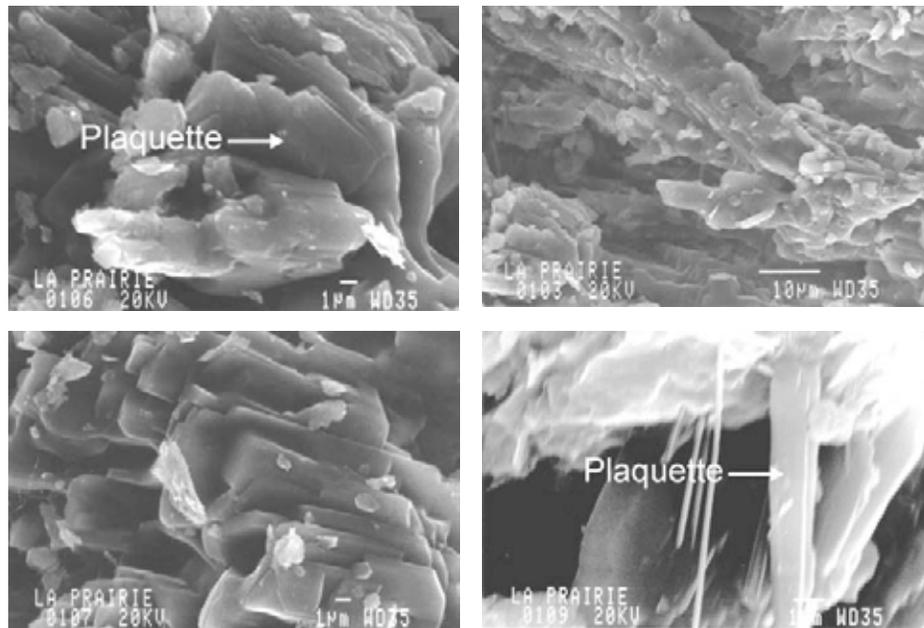


Figure 7 Cristallites de gypse néoformé

Le comportement expansif de ces granulats peut être corroboré par les propriétés mécaniques développées vis-à-vis de leur résistance à l'attrition (essai Micro-Deval) où il a été constaté de faibles résistances pour les deux shales A et La Prairie. À cela, s'ajoute leur pouvoir d'adsorption d'eau où il apparaît des valeurs supérieures aux critères de sélection de la procédure CTQ M100. En général, les granulats possédant une certaine réactivité intrinsèque peuvent être classés en trois catégories:

- Granulats gonflants (calcaire argileux du comité technique);
- Granulats gonflants avec une action sulfatique (Échantillons A et La Prairie);
- Granulats non gonflants avec une action sulfatique (Échantillon C, cornéenne du comité technique).

Cette classification est basée sur la différence du potentiel de génération acide (teneur en soufre total) et sur le potentiel de neutralisation (teneur en carbonates) tout en tenant compte des propriétés physico-mécaniques des granulats. Un potentiel de neutralisation dépassant largement le potentiel de génération acide induit, après oxydation des sulfures, à la formation du gypse au sein du remblai. Dans ce cas, le gonflement dans le remblai est le processus le plus favorable. Les deux processus de gonflement et de sulfatation sont susceptibles de se produire simultanément dans le cas où les carbonates disponibles seraient présents avec des teneurs relativement équivalentes aux sulfures c'est le cas notamment des shales. Par contre, les cornéennes illustrent de façon significative le cas où la sulfatation est le processus le plus favorable. Cette particularité résulte d'une très grande différence entre le potentiel générateur acide élevé et le potentiel de neutralisation faible.

4 Essais de gonflement dans des cubes

Afin de procéder à une validation des essais expansifs menés à l'aide du moule CBR où les volumes considérés sont restreints, des cubes en béton d'un volume équivalent à 0,125 m³ sont utilisés.

4.1 Mise en place des granulats et instrumentation

Les dimensions des cubes ainsi que l'instrumentation appropriée mise en œuvre sont reportées dans la figure 8.

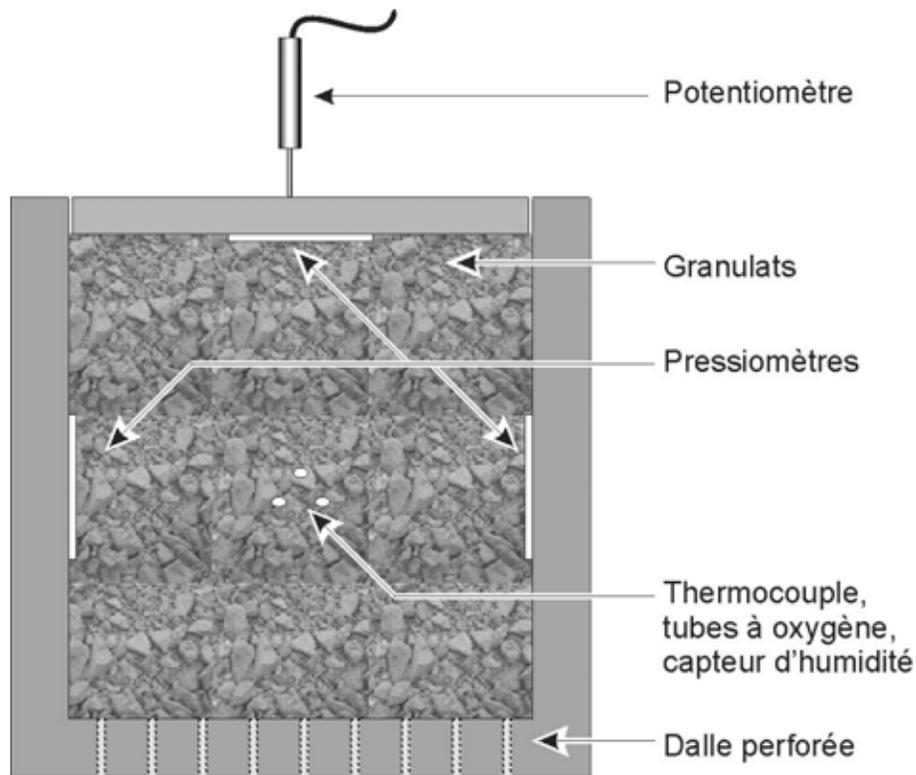


Figure 8 Dispositif expérimental utilisé pour l'évaluation du potentiel expansif des granulats

Une géomembrane en polyéthylène a été placée sur l'ensemble des parois du cube afin d'éviter la sulfatation du béton. La base du moule a été percée d'une dizaine de trous dans le but de permettre la diffusion de l'eau par capillarité vers la partie inférieure du remblai. Le chauffage de l'enceinte réactionnelle entraînera son évaporation vers la partie supérieure du cube assurant ainsi la présence de l'humidité. Le shale La Prairie a été testé avec une plage granulométrique de 0-20 mm avec une compaction maximale ce qui permettra, entre autres, la validation de l'essai expansif mené à l'aide du moule CBR et vérifier l'injectabilité dans des conditions les plus défavorables. Le deuxième cube a été rempli de manière lâche avec le shale A avec une plage granulométrique comprise entre 5 et 20 mm.



Installation d'une géomembrane TDR



Installation des tubes à oxygène



Installation des thermocouples et du capteur d'humidité



Installation des capteurs de pression latéraux



Installation du capteur de pression horizontal



Vue du dispositif expérimental avec LVDT en chambre humide

Figure 9 Dispositif expérimental et instrumentation des cubes

L'instrumentation utilisée dans le cadre de ces essais a fait appel à trois capteurs de pression à cordes vibrantes modèle PWS et à fibres optiques modèle FO-TPC. Deux ont été installés contre les parois du cube en béton afin de suivre en continu les poussés développées par la formation et la cristallisation du gypse au sein du remblai. Le troisième a été mis en place en position horizontale entre le concassé et la dalle et ce pour mesurer la pression verticale générée par le gypse néoformé. Un ensemble incluant des tubes à oxygène, des thermocouples et un capteur d'humidité ont été placés au milieu du remblai pour suivre en continu ces paramètres indispensables à la compréhension du processus de gonflement. Un volume de 500 ml de culture bactérienne a été rajouté dans les concassés en guise de catalyseur (Figure 10). La base des cubes est immergée dans l'eau jusqu'au niveau de l'épaisseur de la base permettant ainsi, la diffusion de l'humidité par capillarité vers l'échantillon et aussi éviter un haut degré de saturation donc la formation d'une barrière à oxygène. Hormis les mesures d'oxygène, tous les instruments de mesure sont reliés à un système d'acquisition assurant, par conséquent, un suivi en continu de l'expérimentation. Les deux cubes sont installés dans une enceinte maintenue à environ 38-40°C en présence d'environ 100% d'humidité.

Le volet retenu actuellement a trait à l'injection de produits cimentaires spécifiquement du ciment ternaire dans les moules CBR contenant des concassés dont le gonflement est en plein essor. Cependant, cette phase est précédée par des essais préliminaires afin de vérifier l'injectabilité du milieu en tenant compte de la répartition granulométrique des granulats ainsi que du degré de compaction.



Figure 10 Ajout de la culture bactérienne et vue générale de l'enceinte expérimentale

4.2 Culture bactérienne

La culture bactérienne a été réalisée à partir de 2,25 g de résidus miniers où les populations bactériennes sont fréquemment rencontrées. Cette quantité de résidu est ajoutée à 150 ml d'eau déionisée dans lesquels sont rajoutés 10 g/l de soufre élémentaire en guise de substrat, 3,0 g/l de phosphate de potassium (KH_2PO_4) et 0,4 g/l de sulfate d'ammonium ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) comme nutriment. Ensuite, les erlenmeyers contenant cette culture sont incubés à température ambiante (21°C) sur un agitateur giratoire. Le pH initial est ajusté à $7,0 \pm 0,1$ avec NaOH (0,1N). La baisse du pH jusqu'à une valeur de 3 suite à l'oxydation du soufre élémentaire est utilisée comme indicateur de la croissance bactérienne.

4.3 Évolution des différents paramètres dans les cubes

L'ensemble des paramètres faisant l'objet d'un suivi étalé sur environ 15 mois (octobre 2000 jusqu'en février 2002) dans les cubes en béton contenant les granulats est reporté aux figures 11, 12, 13 et 14. Il apparaît que les températures relevées au sein des granulats varient globalement entre 33 et 35°C pour lesquelles, l'humidité relative suit une tendance autour de 75%. L'humidité élevée observée au début des essais est attribuée principalement à l'eau utilisée durant le compactage pour la mise en place des concassés. Celle-ci tend à diminuer malgré une alimentation continue en eau à la base des moules et la présence de vapeur d'eau assurée par un humidificateur installé à l'extérieur et connecté à l'enceinte. La teneur en oxygène gazeux au centre des concassés mesurée à l'aide d'un appareil Servomax est en moyenne de 19,9% et de 20,5% pour l'échantillon La Prairie et le shale A respectivement. La différence entre les deux échantillons est attribuée à la différence de compaction puisque l'échantillon A mis en place de manière lâche concerne une plage granulométrique comprise entre 5 et 20 mm. Par contre, l'échantillon La Prairie de granulométrie 0-20 mm, donc avec plus de fines, a été compacté au maximum.

Théoriquement, le vide intergranulaire est plus important pour le shale A que dans le cas du shale La Prairie. Dans le cas des granulats A, le gonflement généré par la formation du gypse comblera tout d'abord le vide intergranulaire avant que les contraintes développées ne soient perçues en terme de déplacement vertical.

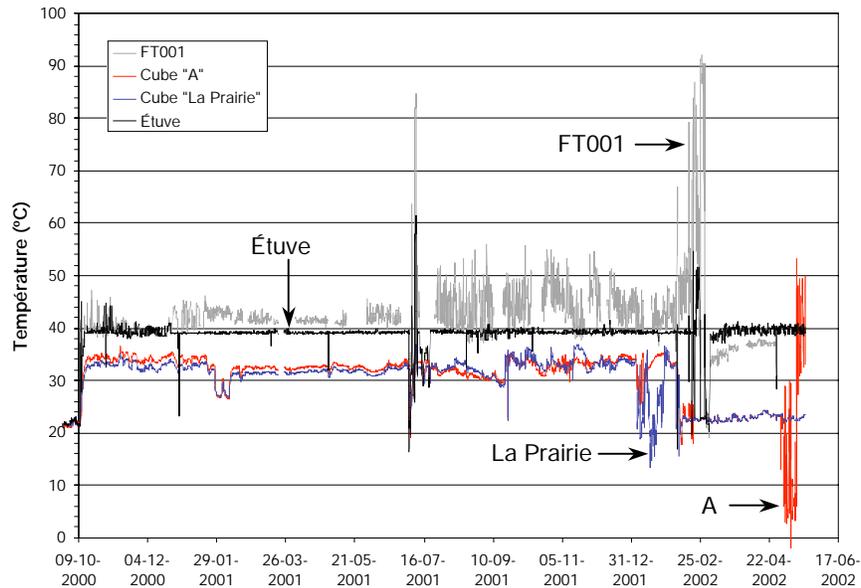


Figure 11 Évolution de la température dans les cubes et dans l'enceinte réactionnelle

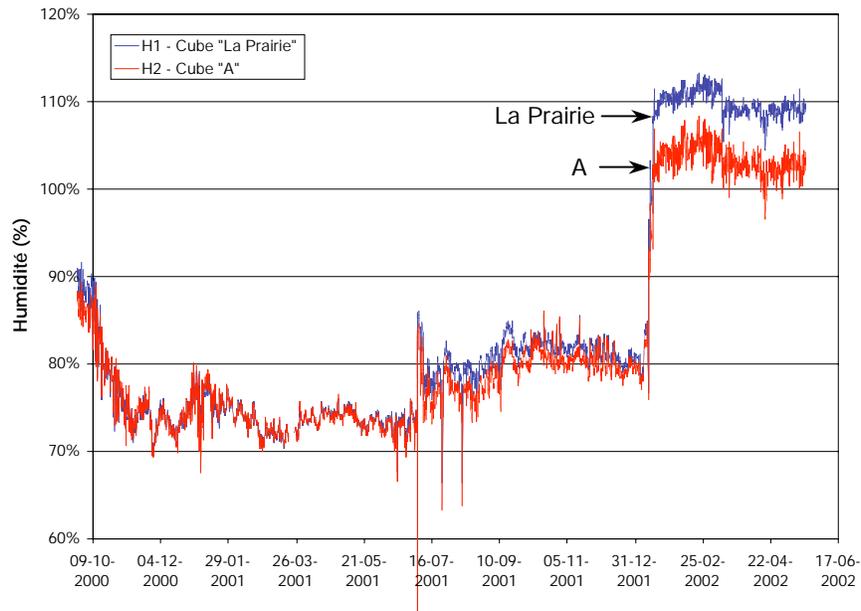


Figure 12 Évolution de l'humidité dans les cubes

Après 6 mois d'expérimentation, aucun signe significatif de gonflement n'est apparent pour les deux shales comme l'atteste la figure 13. Une expansion très rapide au début de l'essai observée pour le shale La Prairie pourrait correspondre à une phase de saturation en eau des granulats. Par contre et durant cette période, un tassement net est visualisé dans le cas de l'échantillon A; comportement résultant de la non compaction initiale des granulats. Cependant, l'analyse de l'évolution de la pression pouvant être développée par la formation du gypse pour le shale La Prairie accuse un certain accroissement au niveau du capteur de pression installé sur le dessus du remblai et contre la dalle. Un gain d'environ 20 KPa est enregistré à partir du quatrième mois caractérisant la poussée générée par le gypse néoformé. Toutefois, cette pression s'est avérée insuffisante pour entraîner un soulèvement de la dalle pour que le déplacement soit perceptible au niveau de l'extensomètre type LVDT. Le transfert du mouvement vertical au potentiomètre devient effectif lorsque la pression développée surmontera une valeur équivalente à la charge de la dalle reposant sur le remblai. Cette constatation semble prendre effectivement un effet à partir du sixième mois d'essai où il se manifeste une certaine expansion pour le shale La Prairie (D). L'évolution apparaît comme étant progressive et régulière pour atteindre un gonflement d'environ 1 mm pour lequel la poussée enregistrée par le capteur de pression horizontal avoisine toujours 20 KPa (Figures 13 et 14b). Cependant, la contrainte enregistrée latéralement est relativement plus importante avec une valeur d'environ 50 KPa (Figure 14a).

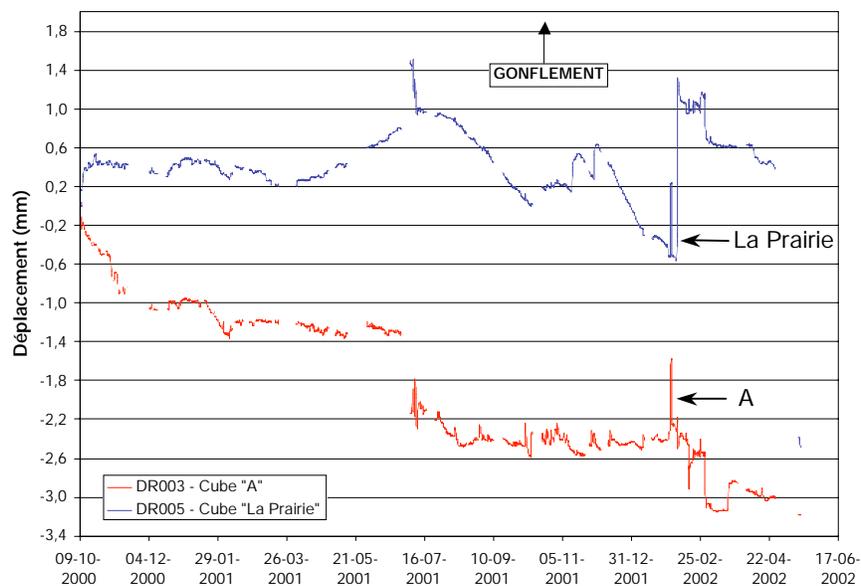


Figure 13 Évolution du soulèvement des dalles pour les deux shales

En juin 2001, soit après huit mois d'expérimentation, un lavage intense avec de l'eau de robinet (inondation complète des deux cubes et évacuation de l'eau) a permis la réduction du gonflement pour le schiste La Prairie. Cette réduction se manifeste de façon progressive qui correspond à un tassement du remblai pour atteindre le niveau initial. Ce tassement peut être attribué à une solubilisation du gypse

néoformé mais peut être aussi dû à la friabilité des granulats. La pression horizontale reste sensiblement la même; par contre, la pression latérale montre un certain accroissement pour atteindre une contrainte oscillant autour de 30 KPa. En ce qui concerne le shale A, on assiste à un tassement plus prononcé évalué à environ 2,4 mm (Figure 13).

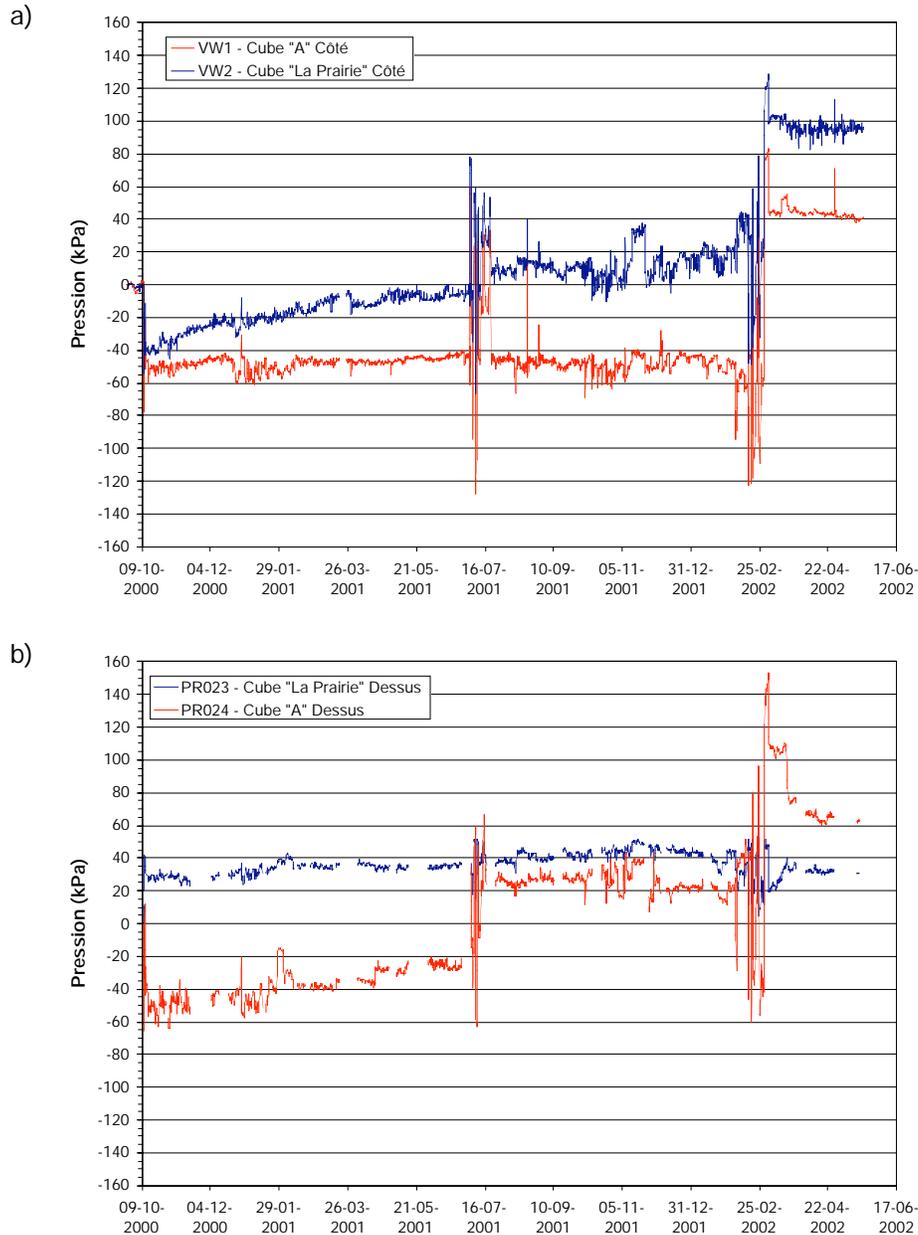


Figure 14 Évolution: a) de la pression sur les parois du cube; b) de la pression développée sur la dalle

5 ESSAIS D'INJECTION DE COULIS DE CIMENT

5.1 Injection dans des moules

Comme agent liant, le choix a été orienté vers le ciment ternaire de ciment Lafarge. Ce ciment est composé d'un mélange de ciment Portland ordinaire, de laitier de haut-fourneau et de fumée de silice. Ces caractéristiques rendent ce ciment plus résistant aux sulfates, du fait qu'il contienne du laitier et que la fumée de silice le rende pratiquement imperméable. La première série d'injection a concerné des essais préliminaires effectués sur le shale A disponible en quantité suffisante. Le but visé est de vérifier la faisabilité technique par l'utilisation d'un moule CBR en adoptant un rapport eau/ciment (E/C) =0,8. Les fractions granulométriques utilisées ont été de 0-20 mm et de 5-20 mm. Le premier cas traduit un granulats destiné aux garages et le second sert de simulation pour les sous-sols. Avant utilisation, le coulis de ciment a été soumis à une caractérisation à l'aide du cône Marsh pour la détermination des vitesses d'écoulement, le *mini slump* pour l'étalement ainsi que le ressuage statique pour évaluer la ségrégation. Afin d'améliorer la stabilité des coulis, l'ajout d'un superplastifiant s'est avérée indispensable.

5.2 Méthodologie pour l'injection dans les moules CBR

La formulation des coulis d'injection a pour objectif le développement de mélanges présentant des caractéristiques rhéologiques, de stabilité et d'injectabilité adaptées au milieu à traiter. Dans cette optique, la méthodologie suivie comporte trois étapes jugées importantes afin de dresser une procédure finale susceptible de mener à bien l'injection:

- 1) Formulation du mélange incluant des composants en compatibilité avec les conditions environnementales imposées par la nature du remblai à traiter;
- 2) Étude rhéologique et injection du mélange dans des granulats installés dans des moules CBR simulant les remblais;
- 3) Optimisation de la formulation en fonction des résultats préliminaires obtenus et procédure d'injection.

Compte tenu des conditions environnementales rencontrées dans les remblais et notamment la présence de sulfates, le ciment choisi pour la réalisation des coulis d'injection doit être résistant aux sulfates afin d'éviter la formation, entre autres, d'ettringite susceptible d'induire un gonflement supplémentaire des remblais. De plus, la fluidité des mélanges injectés doit être assurée par l'incorporation d'un fluidifiant. En effet, la fluidité pourrait être améliorée par une augmentation de la quantité d'eau dans le mélange sans, toutefois amoindrir la stabilité du coulis. Pour ce faire, l'ajout d'un superplastifiant est donc plus approprié. Dans le cas où la stabilité des coulis en terme de tendance à la sédimentation n'est pas atteinte, l'utilisation d'un agent colloïdal est pratiquement envisageable.

En ce sens, le superplastifiant Eucon 37, de la compagnie Adjuvants Euclid Canada, composé d'un sel de sodium d'acide naphthalène sulfonique polymérisé pourrait répondre à ces exigences. Il est couramment utilisé pour disperser en défloculant les grains de ciment lors de la fabrication de bétons présentant un affaissement élevé. Il a déjà été utilisé avec succès dans la formulation de coulis d'injection pour la réparation de mortiers dégradés. Le superplastifiant Eucon 37 se caractérise par une densité de 1,21 et un dosage de 40,5% en éléments solides de la masse totale liquide. Le dosage en superplastifiant utilisé dans les mélanges est exprimé en pourcentage d'extrait sec, relativement à la masse de ciment.

L'agent anti-ressuage liquide Euco-Nivo L, de la compagnie Adjuvants Euclid Canada, contient un agent colloïdal permettant de fabriquer des bétons auto-nivelants très fluides. Il a donc un effet stabilisateur et fluidifiant à la fois et s'avère compatible avec le superplastifiant Eucon 37. L'agent Euco-Nivo L possède une densité de 1,21 et un dosage en éléments solides représentant 42,5% de la masse totale liquide. À titre indicatif, le dosage en agent anti-ressuage utilisé dans les mélanges est exprimé en pourcentage d'extrait sec de la masse de ciment.

Afin d'obtenir un coulis relativement fluide, la formulation initiale du coulis, basée sur l'expérience acquise par le groupe d'injection du Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée consiste en un rapport massique eau/liant (E/L) de 0,8 associé à un dosage en superplastifiant (SP) de 1,0%.

5.3 Caractérisation et injectabilité du mélange initial

5.3.1 Rhéologie du mélange

La fluidité des coulis de ciment est évaluée par deux essais principaux permettant de mesurer la vitesse d'écoulement du mélange (essai d'écoulement au cône Marsh) et son étalement (essai d'étalement au mini-cône). Les dispositifs expérimentaux mis à profit sont illustrés par la figure 15.

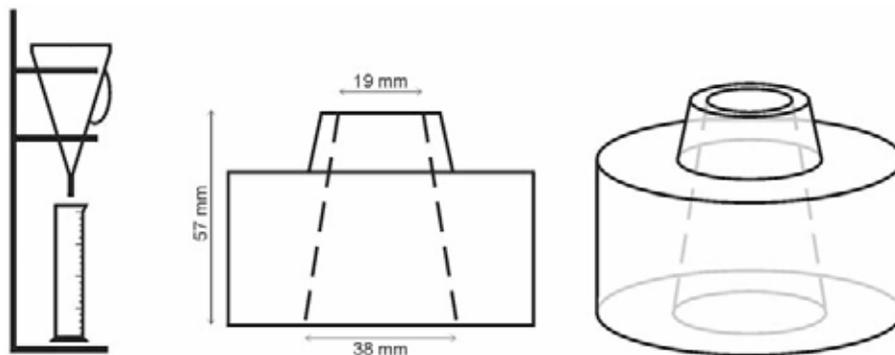


Figure 15 Cône Marsh pour l'écoulement et le *mini-slump* pour l'étalement

La stabilité des coulis est pratiquement déterminée par deux essais. La stabilité à l'état statique permet d'évaluer la tendance à la ségrégation, à la sédimentation des grains de ciment. Le deuxième essai connu sous la dénomination de ressuage amène des informations sur la stabilité des coulis sous pression d'un gaz c'est-à-dire leur résistance à la filtration. Dans la présente étude, seul l'essai de ressuage statique a été utilisé sur les mélanges.

Les résultats reportés au tableau 6 indiquent une très importante fluidité pour le mélange formulé TER-1 contenant eau, ciment ternaire et superplastifiant. Sa stabilité est toutefois remise en question car habituellement, un ressuage maximal de 5% est toléré pour les coulis d'injection. Malgré sa fluidité, ce mélange a tout de même été injecté dans les moules CBR contenant les granulats potentiellement gonflants.

Tableau 6 Caractéristiques du coulis de ciment initial injecté dans les moules CBR

Paramètres	E/C	SP	Agent anti-ressuage	Écoulement 700 ml	Étalement	Ressuage statique*
TER-1	0,8	1,0%	0,0%	22 s	160 mm	12%

SP: Superplastifiant

*: Essais à 2 h

5.3.2 Injection des granulats par le coulis TER-1

Trois procédures de mise en place des granulats ont été considérées pour évaluer l'injectabilité du coulis de ciment. Les caractéristiques des trois moules préparés et impliquant les granulats figurent dans le tableau 7.

Tableau 7 Caractéristiques des échantillons injectés par le coulis TER-1

	Moule A-1	Moule B-1	Moule C-1
Granulats (mm)	0-20	0-20	5-20
Densité en place (g/cm)	2,44	1,87	1,59
Volume de granulats (cm ₃)	2085,23	2058,7	2200,10

Suite à la mise en place des granulats dans les moules, un mortier a été coulé en surface afin de simuler la présence d'une dalle. Un trou d'environ 10 mm de diamètre est alors foré sur la partie supérieure permettant l'installation d'un obturateur mécanique par lequel sera injecté le coulis. Un second trou est foré à proximité pour assurer l'évacuation de l'air par la partie supérieure durant l'injection comme l'illustre la figure 16. À titre indicatif, la pression d'injection utilisée est de 75 kPa.



Figure 16 Dispositif d'injection et moule CBR après injection

L'injection du coulis TER-1 a été facilement réalisable dans les milieux les moins compacts c'est-à-dire dans les moules B-1 et C-1. La pénétrabilité du coulis s'est avérée très acceptable puisque le remplissage des vides présents dans les échantillons semble très satisfaisant comme en témoignent les coupes réalisées sur les cylindres après durcissement de la pâte reportées aux figures 17 et 18.



Figure 17 Échantillon B1 (0-20 mm) après injection avec le coulis TER-1



Figure 18 Échantillon C1 (5-20 mm) après injection avec le coulis TER-1

Par contre, aucune injection par le coulis TER-1 des granulats 0-20 mm (moule A-1) mis en place de façon très compacte n'a été possible. Le degré de compaction élevé du milieu et sa très faible porosité due à une forte teneur en particules fines a empêché toute infiltration du coulis (Figure 19).



Figure 19 Injection du granulat A-1 par le coulis TER-1

5.3.3 Optimisation de la formulation

Compte tenu de sa faible stabilité, le coulis de ciment TER-1 a nécessité l'incorporation de l'agent anti-ressuage. Deux formulations ont été testées impliquant respectivement 0,10 et 0,15% de cet agent. Les performances acquises par ces essais sont illustrées au tableau 8.

Tableau 8 Caractéristiques des coulis optimisés avec agent anti-ressuage

Paramètres	E/C	SP	Agent anti-ressuage	Écoulement 700 ml	Étalement	Ressuage statique*
TER-2	0,8	1,0%	0,10%	22 s	180 mm	12%
TER-3	0,8	1,0%	0,15%	26 s	180 mm	4%

SP: Superplastifiant
*: Essais à 2 h

La fluidité des mélanges ainsi optimisée conserve des propriétés convenables, même si l'ajout d'agent anti-ressuage a tendance à augmenter sensiblement la viscosité. La stabilité du mélange est atteinte pour le coulis TER-3, pour un dosage en agent anti-ressuage de 0,15%. Ce dernier mélange, TER-3, a donc été choisi pour répéter l'injection des moules CBR B-2 et C-2 dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 9. Les densités in situ sont similaires à celles obtenues pour les moules B-1 et C-1. L'injectabilité du coulis TER-3 pourra donc être comparée sans difficulté à celle du coulis TER-1.

Tableau 9 Caractéristiques des échantillons injectés par le coulis TER-3

Moule	Moule B-2	Moule C-2
Granulats (mm)	0-20	5-20
Densité en place (g/cm ³)	1,78	1,59
Volume de granulats (cm ³)	2085,2	2120,6

L'injection des deux échantillons par le coulis TER-3 a été réalisée de façon très satisfaisante (Figure 20). En effet, l'injectabilité du coulis TER-3 s'est avérée comparable aux performances du coulis TER-1 avec cependant, une stabilité accrue par l'incorporation d'agent anti-ressuage.

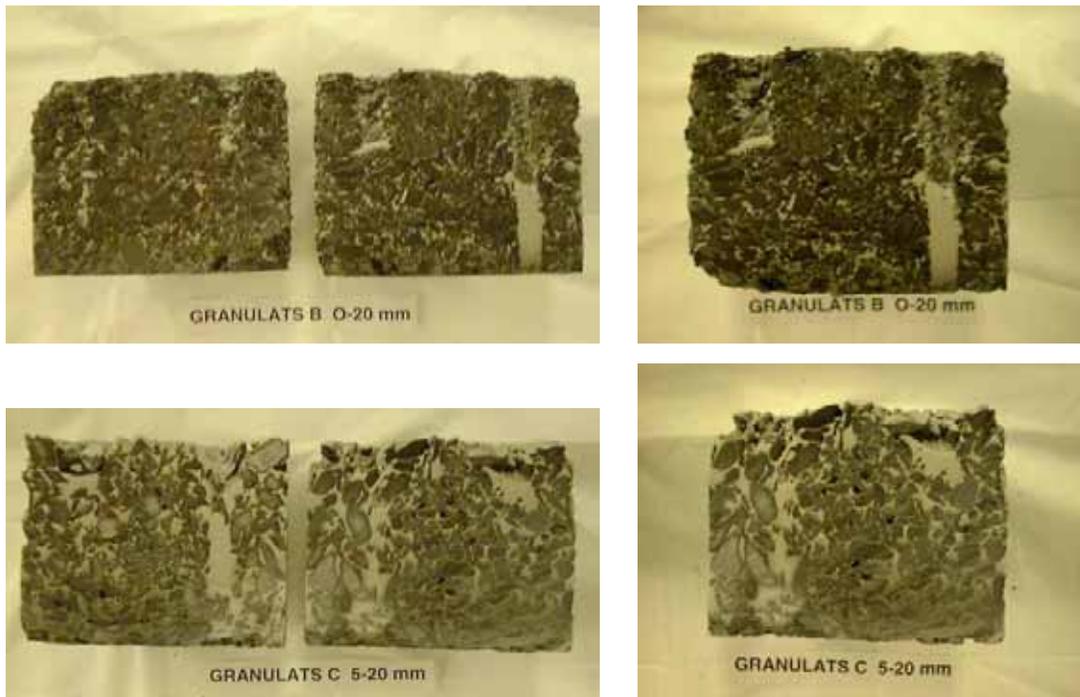


Figure 20 Injection des granulats B-2 et C-2 par le coulis TER-3

L'utilisation d'un coulis de ciment ternaire résistant aux sulfates pour l'injection de remblais composés de granulats réactifs a été évaluée en laboratoire. L'injection de deux types de coulis, respectivement avec et sans agent anti-ressuage, a été réalisée dans des moules CBR simulant trois cas de figures soit:

- Granulats 0-20 mm, masse volumique en place 2,4 g/cm³;
- Granulats 0-20 mm, masse volumique en place 1,9 g/cm³;
- Granulats 5-20 mm, masse volumique en place 1,6 g/cm³.

La mise en place avec un degré élevé de compaction du granulat 0-20 mm ne permet aucune pénétration quelque soit le type de coulis de ciment appliqué. Cette particularité résulte d'un encombrement géométrique dans le vide interstitiel imputé principalement à la présence de fines dans les granulats. Cependant, l'adoption de degrés de compaction inférieurs à 2 g/cm³ a permis une injection plus aisée des

coulis indépendamment de la distribution granulométrique des granulats. En outre, la présence de l'agent anti-ressuage amène une stabilité acceptable au mélange en assurant un remplissage optimal de l'espace intergranulaire après durcissement du coulis. En somme, l'adoption de ces paramètres permet un enrobage des sulfures contenus dans les granulats ce qui laisse de bons augures pour une éventuelle application pour arrêter l'oxydation, par conséquent, le gonflement des remblais de fondation.

Des essais d'injection ont été aussi réalisés sur les concassés récupérés au niveau des remblais des trois résidences de la rive sud de Montréal. Ceux-ci après avoir été soumis à un compactage au maximum Proctor ont été installés dans la chambre humide à 38°C durant 8 mois en présence d'une culture bactérienne. Les résultats relatifs à ces essais expansifs sont reportés dans la Maîtrise de Mme Caroline Pépin (2000). Après cette période expérimentale, les moules ont fait l'objet d'une injection à base de coulis de ciment ternaire selon la procédure déjà décrite. Du fait du haut degré de compaction et selon les enseignements acquis par les différentes investigations, l'injection s'est avérée impossible quelque soit les granulats considérés.

6 Conclusion

En présence de conditions favorables, les sulfures contenus dans les concassés peuvent s'oxyder et engendrer après neutralisation l'apparition de sulfates responsables des expansions volumiques au sein des remblais de fondation. L'ensemble des résultats acquis a conduit à une différenciation de la réactivité de chacun des granulats considérés par des approches chimique, physico-mécanique et expansive à l'aide du moule CBR. En effet, l'association des diverses techniques de caractérisation conjuguée à l'essai de gonflement a permis une classification des granulats intrinsèquement réactifs dont les résultats sont partiellement reportés dans le présent rapport. Certains granulats présentent un potentiel expansif et sulfatique très importants; les shales présentés sous la notation de A et La Prairie sont automatiquement rejetés et ne peuvent être admis comme granulats de remblais sous dalle. Cependant, leur utilisation comme matériau de base dans des études fondamentales ainsi que pour des essais exploratoires tels que l'injection est une approche tout à fait acceptable. En effet, l'injection est un moyen susceptible d'annihiler les effets expansifs générés par les remblais sous dalle. Les essais effectués sur des volumes restreints utilisant le moule CBR et impliquant un shale réactif ont amené à établir la procédure expérimentale à mettre en œuvre pour arrêter le gonflement. L'arrêt du processus expansif est dû à l'enrobage des granulats qui empêche l'oxygène d'atteindre les sulfures tenus responsables du gonflement. Cependant, il serait judicieux de vérifier, après injection, si des réactions d'hydrolyse des sulfures par le milieu fortement alcalin provoquent la formation de la goethite (FeOOH). En effet, si les conditions *in situ* sont favorables, la formation d'un tel hydroxyde peut entraîner une certaine augmentation du volume. Aucun produit d'hydrolyse n'a été observé jusqu'à maintenant. Nous recommandons toutefois la poursuite des essais afin de valider ou non cette hypothèse. Cependant, la réussite de l'injection dépend étroitement de la perméabilité du remblai qui, à son tour, dépend de la répartition granulométrique et du degré de compaction. En ce sens, seules les pierres nettes ont montré un meilleur comportement vis-à-vis de l'injectabilité en utilisant un ciment dont les propriétés rhéologiques ont été modifiées par des ajouts (superplastifiant et agent anti-ressuage). Comme la hauteur du moule CBR est relativement comparable à celle d'un remblai de sous-sol, cette méthode d'injection pourrait être appliquée dans le cas des sous-sols affectés par les problèmes de gonflement. Cependant, l'injection peut s'avérer difficilement réalisable dans un remblai de garage où l'épaisseur est d'environ 1 m. Dans tous les cas, les pressions d'injection devraient être liées au poids du remblai et de la dalle de béton au-dessus et la procédure devrait suivre les règles de l'art. Les auteurs préconisent une approche empirique pour chacun des cas, avec un espacement préliminaire de forages d'environ 1,5 m centre à centre. Les essais *in situ* permettront alors de valider les paramètres d'injection (pression, fluidité, etc.). Cette approche peut toutefois s'avérer relativement onéreuse, selon les conditions en place (volume de remblai à injecter, facilité d'intervention, etc.).

En ce qui concerne les essais menés à l'aide des cubes en béton, il a été montré, après expansion, qu'un lavage à l'eau permettait une réduction considérable de l'expansion; celle-ci peut être expliquée principalement par une solubilisation du gypse néoformé (minéral gonflant). Cette approche pourrait être mise à contribution pour réduire le gonflement dans le cas des garages. Certains problèmes pourraient néanmoins survenir en pratiquant cette technique. Par exemple, dans le cas où la teneur en eau du remblai est faible, le fait d'y apporter une grande quantité d'eau pourrait provoquer le gonflement des granulats présentant un fort pourcentage de minéraux argileux. De plus, il est possible que de nouveaux sulfates gonflants soient progressivement formés si les agents réactifs (sulfures, carbonates) ne sont pas épuisés. Rappelons également que les pressions latérales enregistrées sur les cubes sont demeurées pratiquement inchangées après le lavage. Dans le cas de garages où les pressions de gonflement auraient déjà causé un déplacement des murs de fondation, un lavage ne s'avèrerait donc pas une solution efficace. Le remblai en place devrait alors être enlevé.

7 BIBLIOGRAPHIE

- Association des Consommateurs pour la Qualité dans la Construction (1999), "La pyrite et votre maison", Octobre, ISBN: 2-922677-00-1, 48 p.
- Ballivy, G et Bellaloui, A. (1997), "Divers mécanismes de gonflement des shales pyriteux et mise en garde pour la conception des fondations", Colloque AEG-RPPG, Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement, Laval (Québec), 1^{er} mai 1997, 11 p.
- Ballivy, G. et Bellaloui, A. (1999), "New swelling test to characterize the expansive potential of pyritic rockfill", *Geotechnical news*, Vol. 17, N 4, p. 53-55.
- Ballivy, G., Rivard, P., Pépin, C., Tanguay, M. G. et Dion, A. (2002), "Damages to residential buildings related to pyritic rockfills: Field results of an investigation on the south shore on Montreal, Quebec, Canada", *Revue canadienne de génie civil*, Vol. 29, p. 246-255.
- Baryla, J. M., Chenais, V., Gavois, L. et Havard, H. (2000), "Effet de sulfates et sulfures sur des marnes traitées à la chaux et au liant routier sur un chantier autoroutier", *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Bull. 224, France, p. 40-48.
- Bellaloui, A. et Ballivy, G. (1999), "Problèmes de gonflement de remblais de fondation associés à la pyrite", *Revue CHIMISTE*, Décembre, Vol. 14, p. 20-23.
- Bellaloui, A., Nkurunziza, G. et Ballivy, G. (2000), "Gonflement de remblais de fondation: simulation en laboratoire, 53^e Conférence de géotechnique, Montréal 14-16 octobre, Vol. 2, p. 1293-1301.
- Bellaloui, A., Nkurunziza, G., Ballivy, G. (2002), "Gonflement de remblais de fondation lié à la pyrite: Simulation en laboratoire", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 39, p. 141-148.
- Bérard, J. (1970), "Black Shale heaving at Ottawa, Canada: Discussion", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 7, p. 113-115.
- Bérard, J. (1997), "Des désordres sulfatiques", Colloque AEG-RPPG, Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement, Laval (Québec), 1^{er} mai 1997, 11 p.
- Bérubé, M.-A. (1997), "Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement: La situation actuelle au Québec", Colloque AEG-RPPG, Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement, Laval (Québec), 1^{er} mai 1997, 40 p.
- Bérubé, M.-A., Locat, J., Gélinas, P., Chagnon, J. Y., LeFrançois, P. (1986), "Black shale heaving at Sainte-Foy, Québec, Canada", *Canadian Journal of Earth Sciences*, Vol. 23, p. 1774-1781.
- Cormier, M. C. (2000), "Analyse statistique de rapports d'expertise CT-M200 relevant les dommages structuraux attribuables à la présence de pyrite dans les remblais sous dalle des bâtiments résidentiel", *Projet de fin d'études, Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal.*
- Côté, F. et Ménard, D. (1997), "Histoire de cas, expertise et réfection d'une structure", Colloque AEG-RPPG, Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement, Laval (Québec), 1^{er} mai 1997, 19 p.

- Côté, F., Bérard, J. et Roux, R. (1991), "Cas de réactivité et de gonflement de remblais granulaires riches en shale pyriteux", Collection Environnement et géologie, Vol. 12, APPG, p. 225-246.
- CTQ M-100 (2000), Comité Technique Québécois, Norme BNQ en cours d'élaboration.
- Divet, L. (1996), "Activité sulfatique dans les bétons consécutive à l'oxydation des pyrites contenues dans les granulats", Synthèse bibliographique, Bull. 201, Lab. Central des Ponts et Chaussées, France, p. 1-19.
- Grattan-Bellew, G. C. et McRostie, G. C. (1982), "Evaluation of heave prevention methods for floor founded on shale in the Ottawa Region", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 19, p. 108-111.
- LMRGA (Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée) (2000), "Procédure pour la détermination du potentiel expansif des granulats", Université de Sherbrooke, 16 p.
- Nicholson R. V., Ghillhman R. W., Cherry J. A. et Reardon E. J. (1988), "Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 26, p. 1-8.
- Nielson, K. K., Rogers, V. C. et Gee, G. W. (1984), "Diffusion of radon through soils: a pore distribution model", Soil Science Society of America Journal, Vol. 48. p. 482-487.
- Penner, E., Eden, W. J. et Gillot, J. E. (1973), "Floor heave due to biochemical weathering of shale", Proceedings, 8th International Conference on soil Mechanics and foundations Engineering, Moscow, Vol. 2, Part 2, Session 4, p. 151-158.
- Pépin, C. (2000), "Endommagements de résidences par le gonflement de remblais pyriteux et essai de mesure du potentiel de gonflement", Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, 164 p.
- Quigley, R. M. et Vogan, R. W. (1970), "Black shale heaving at Ottawa, Canada", Canadian Geotechnical Journal, Vol 7, p. 106-115.
- Tanguay, M. (1998), "Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement. Le point sur la situation au Québec", Colloque AEG, Montréal, 12 p.

ANNEXE

LEXIQUE

ACQC	Association des Consommateurs pour la Qualité dans la Construction
AEG	<i>Association of Engineering Geologists</i>
CBR	Acronyme désignant le terme <i>California Bearing Ratio</i> , du nom d'un essai normalisé consistant à évaluer la capacité des fondations de route
CTQ	Comité Technique Québécois: comité formé d'experts se penchant sur les problèmes reliés aux shales pyriteux
Cornéenne	Roche métamorphique très dure, non fissile, issue du métamorphisme de contact (cuisson de la roche préexistante)
Ciment ternaire	Liant hydraulique à base de ciment portland à composé de trois phases distinctes
Granulat	Roche naturelle ou concassée, de taille généralement inférieure au décimètre, servant comme remblai ou comme constituants du béton
LMRGA	Laboratoire de mécanique des roches et géologie appliquée de l'Université de Sherbrooke
Pyrite	Minéral jaune vif à l'éclat métallique, composé de sulfure de fer (FeS_2), largement répandu dans divers types de roches
Rhéologie	Étude de l'écoulement et de la déformation de la matière. Cette branche de la physique étudie le comportement de la matière en fonction de la viscosité, de l'élasticité et de la plasticité en tenant compte des déformations et des contraintes
Shale	Roche sédimentaire litée à grains très fins, en général argileuse
Shale A	Identification arbitraire d'un type de granulat composé de shales, tel que convenu par le Comité technique québécois.
Shale Laprairie	Identification d'un type de granulat composé de shales et provenant d'une carrière située à Laprairie
Sulfure	Classe minéralogique regroupant des composés métalliques à base de soufre, comme la pyrite (FeS_2), la molybdénite (MoS_2), la galène (PbS) ou la bornite (Cu_5FeS_4)
Superplastifiant	Substance ajoutée au béton afin de le rendre plus fluide
Syénite	Roche ignée magmatique, à grains grossiers, souvent blanchâtre avec comme minéral essentiel du feldspath alcalin, qu'accompagne un peu de biotite et de hornblende

Visitez notre page d'accueil à l'adresse suivante : www.schl.ca