



RAPPORT DE RECHERCHE

ANALYSE DES DOMMAGES
STRUCTURAUX DE BÂTIMENTS
RÉSIDENTIELS ASSOCIÉS AUX
PROBLÈMES DE REMBLAIS
PYRITEUX



SCHL— U 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 maison. 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 page d'accueil à l'adresse suivante : 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.

SOCIÉTÉ CANADIENNE D'HYPOTHÈQUES ET DE LOGEMENT
SCHL

ANALYSE DES DOMMAGES STRUCTURAUX DE BÂTIMENTS RÉSIDENTIELS
ASSOCIÉS AUX PROBLÈMES DE REMBLAIS PYRITEUX

GÉRARD BALLIVY, Ing., D.Sc.A.
ACHOUR BELLALOUÏ, Ph.D.
PATRICE RIVARD, Ing., Ph.D.

LABORATOIRE DE MÉCANIQUE DES ROCHES ET DE GÉOLOGIE APPLIQUÉE
Département de génie civil
Université de Sherbrooke
Sherbrooke, Québec, J1K 2R1

GR 04-12-01

Décembre 2004

Ce projet a été réalisé grâce à une contribution financière de la Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL). Les idées, conclusions et recommandations exprimées dans ce rapport sont ceux des auteurs et ne représentent pas le point de vue officiel de la SCHL.

PARTICIPANTS

- Université de Sherbrooke
Gérard Ballivy, Professeur titulaire
Achour Bellaloui, professionnel de recherche
Patrice Rivard, professeur adjoint
Caroline Pépin, étudiante à la maîtrise
Stéphane Savary, stagiaire en génie civil
- École Polytechnique
Marc G. Tanguay, Professeur titulaire
Alexandre Dion, étudiant à la maîtrise
Nicolas Tanguay, étudiant au baccalauréat
- Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL)
Jacqueline Meunier
- Association des consommateurs pour la qualité dans la construction (ACQC)
Charles Tanguay, Président
- Société d'habitation du Québec (SHQ)
Claude DesMeules, ing.
- Ville de Longueuil
- Ville de Boucherville
- Ville de St-Bruno-de-Montarville
- Quéformat
M. Dussault, ing., v.-p.
- Labo S.M. Inc.
Charles Simard, ing., v.-p.
- Technisol
- François Côté, géologue, M.Sc.A

SOMMAIRE

Ces dernières années, de nombreux cas de dommages structuraux et esthétiques causés à des bâtiments ont été associés aux soulèvements de dalles de béton. Des études effectuées sur ces infrastructures ont démontré que le gonflement de la fondation granulaire constituée de shales argileux pyriteux était la cause principale du problème.

L'objectif visé par cette étude est la réalisation d'un inventaire de différents cas de résidences unifamiliales affectées de problèmes possiblement liés au gonflement des remblais de fondation pyriteux situés sur la Rive-Sud de Montréal. Le mandat donné à cet égard à l'Université de Sherbrooke et à l'École Polytechnique de Montréal et organismes impliqués sous l'égide du Comité Technique Québécois (CTQ), par la Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL) est l'inspection d'au moins 200 cas répertoriés dans trois municipalités de la Rive-Sud de Montréal. Pratiquement, les cas répertoriés comprennent aussi ceux déjà analysés par les laboratoires accrédités; les dossiers fournis par l'Association des consommateurs pour la qualité dans la construction (ACQC) ont servi aussi à la compilation finale, ce qui constitue un nombre nettement supérieur. Finalement, près de 800 cas sont considérés et au moins 200 font l'objet d'un examen particulier sur place. Dans les cas où le gonflement est à son état initial ou en plein essor, une instrumentation appropriée est mise en place pour suivre l'évolution les différents mouvements. Cette avenue pourrait expliquer certains cas complexes où plusieurs mécanismes peuvent être impliqués, soit l'action sulfatique ou des mécanismes de retrait ainsi que des problèmes d'ordre géotechnique sans omettre le processus de gonflement.

Il ressort de cette étude que les garages sont principalement affectés par des problèmes de gonflement tandis que les sous-sols semblent touchés dans des ratios presque égaux par des problèmes de gonflement et de sulfatation/gonflement. Le gonflement accompagnant la sulfatation peut provenir soit du gonflement du remblai sous la dalle de béton ou du gonflement de la dalle de béton (délamination).

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 aucun soulèvement dans près de 58% des cas.

Toujours concernant les symptômes, les fissures les plus souvent rencontrées se présentent principalement sous forme d'étoile ou longitudinale dans les garages et seulement en étoile dans les sous-sols. La présence de poudre blanchâtre au niveau des fissures et des joints dalle-mur est rarement observée au garage comme au sous-sol. Toutefois, il est possible que cette poudre ait été enlevé par les propriétaires avant les visites par souci d'hygiène ou de propreté.

Au garage, plus de 85% des cas de fissuration dans les murs de fondation serait lié à la

présence de shales pyriteux gonflant dans le remblai. Au sous-sol, les fissures sont souvent absentes ou bien mineures et peuvent fréquemment être imputées à un autre phénomène qu'à celui des remblais.

En résumé, les symptômes les plus révélateurs sont les suivants pour chacun des endroits :

Garage: - Soulèvements de la dalle
- Fissures en étoile et longitudinales dans la dalle
- Fissures dans les murs de fondation

Sous-sol: - Soulèvements de la dalle
- Fissures en étoile dans la dalle

Les résidences soumises à une investigation plus poussée montrent que le processus de gonflement est imputé à la présence de remblais pyriteux. L'expansion générée ne semble pas présenter de signe de ralentissement et elle se poursuivra tant que les sulfures sont disponibles dans les granulats et que les conditions de température et d'humidité demeurent similaires dans le remblai. Pour ces résidences et pour limiter les dommages, il serait raisonnable de procéder au remplacement du remblai par un autre granulats certifié non gonflant selon la procédure CTQ M100.

L'analyse statistique et l'interprétation des données qui en découle compte tenu de ce rapport sont valables uniquement pour l'ensemble des maisons visitées dans les trois villes sélectionnées soit Longueuil, Boucherville et Saint-Bruno-de-Montarville. Toute extrapolation doit être prise avec beaucoup de précaution; cependant, les enseignements qui en découlent peuvent être une source d'information très utile.

Considérant que les nouvelles constructions de résidences unifamiliales devraient utiliser le granulats DB (Granulats sous dalle de béton), l'utilisation d'un coupe-vapeur et d'un ciment résistant aux sulfates est fortement recommandée, surtout dans le cas des granulats de type cornéenne (Saint-Bruno) afin d'éviter la sulfatation. L'épaisseur de la dalle en béton devrait être au minimum 10 cm avec une résistance à la compression d'au moins 20 MPa.

Les shales ou schistes pyriteux sont totalement exclus d'une éventuelle utilisation. Dans les cas existants, il faudrait prévoir leur substitution par d'autres granulats non gonflants. Dans le cas des remblais non compactés, donc avec une certaine porosité (indice du vide), il est envisageable d'avoir recours à des injections à base de produits scellants tels que les ciments résistants aux sulfates pour arrêter le gonflement. Cependant, cette procédure est recommandée pour les sous-sols où se trouve habituellement de la pierre nette avec une épaisseur de remblais plus faible que dans le cas des garages.

EXECUTIVE SUMMARY

In recent years, many cases of structural and aesthetic damage caused to buildings have been associated with the heaving of concrete slabs. Studies conducted on these infrastructures have shown that the swelling of the granular foundations composed of pyritic clay shales was the main cause of the problem.

This study is aimed at making an inventory of different cases of single-family residences affected by problems possibly related to the swelling of the pyritic foundation backfills on the South Shore of Montréal. The mandate given in this regard to the Université de Sherbrooke and the École Polytechnique de Montréal and organizations involved under the auspices of the Comité technique québécois (CTQ), by Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC), was to inspect at least 200 cases inventoried in three municipalities on the South Shore of Montréal. In practice, the inventoried cases also included those that had already been analyzed by the certified laboratories; the files provided by the Association des consommateurs pour la qualité dans la construction (ACQC) also served to make the final compilation, which represented a much greater number. In the end, nearly 800 cases were considered and at least 200 were subject to a particular examination on site. In cases where the swelling was at its initial stage or in full expansion, appropriate instrumentation was put in place to track the progress of the different movements. This course of action could explain certain complex cases where several mechanisms could be involved, including sulphate action or shrinkage mechanisms, as well as geotechnical problems, not to mention the swelling process.

It emerged from this study that the garages were mainly affected by swelling problems, while the basements seemed impacted in almost equal proportions by swelling and sulphation/swelling problems. The swelling accompanying the sulphation may have come from either the swelling of the backfill under the concrete slab or the swelling of the concrete slab (delamination).

A study of the main symptoms revealed that the heaving occurrences, in the 197 garages that were visited, measured between 1 mm and 30 mm in 70% of the cases, while the heaving occurrences, in the 224 basements that were visited, measured between 1 mm and 15 mm in 32% of the cases, with no heaving in 58% of the cases.

Again concerning the symptoms, the cracks most often encountered were mainly star-shaped or longitudinal in the garages and only star-shaped in the basements. The presence of whitish powder around the cracks and at the slab-wall joints was rarely observed either in the garages or the basements. However, this powder may have been removed by the owners before the visits for reasons of hygiene or cleanliness.

In the garages, more than 85% of the cases involving cracks in the foundation walls appeared to be linked to the presence of pyritic shales swelling in the backfills. In the

basements, there were often no cracks or minor cracks, which could frequently be attributed to a phenomenon other than the backfills.

In sum, the most revealing symptoms were as follows for each of the locations:

Garages:

- Heaving of the slab
- Star-shaped and longitudinal cracks in the slab
- Cracks in the foundation walls

Basements:

- Heaving of the slab
- Star-shaped cracks in the slab

The residences that were subject to more in-depth investigations revealed that the swelling process is attributable to the presence of pyritic backfills. The expansion that has been generated does not seem to be showing any signs of slowing down and will continue as long as sulphides are available in the aggregates and the temperature and humidity conditions remain similar in the backfills. For these residences, to limit the damage, it would be reasonable to replace the backfill with another aggregate certified as non-swelling in accordance with the CTQ M-100 procedure.

The statistical analysis and resulting data interpretation considering this report are valid only for the set of homes visited in the three selected municipalities, namely, Longueuil, Boucherville and Saint-Bruno-de-Montarville. Any extrapolation must be taken with a great deal of caution; however, the lessons learned may be a very useful source of information.

Given that new single-family residence constructions should use DB (concrete slab) aggregate, the use of a vapour barrier and sulphate-resistant cement is strongly recommended, especially in the case of hornfels aggregates (Saint-Bruno), in order to prevent sulphation. The thickness of the concrete slab should be at least 10 cm, with a resistance to compression of at least 20 MPa.

Pyritic shales or schists are totally excluded from any eventual use. In existing cases, their replacement with other non-swelling aggregates should be planned. For backfills that are not compacted, and which therefore have a certain porosity (voids index), the injection of sealants, such as sulphate-resistant cement, can be considered to stop the swelling. However, this procedure is recommended for basements that usually have clean stone with a less thick layer of backfill than in the case of garages.



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
CI-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 () _____

TABLE DES MATIÈRES

1. Objectifs	1
2. Problématique	2
3. Contexte géologique	5
4. Sulfures métalliques.....	8
5. Réactivité des granulats	10
5.1 Processus de gonflement	10
5.2 Processus de sulfatation	11
6. Investigation de cas résidentiels sur la rive sud de Montréal	13
6.1 Fiche d'identification des propriétés	14
6.2 Fiche : relevé des désordres au sous-sol.....	15
6.3 Fiche : relevé des désordres au garage	18
6.4. Fiche : croquis descriptif des désordres (sous-sol et garage).....	20
6.5. Méthodologie de classement des données	22
6.5.1 Bâtiments résidentiels visités	24
6.5.2 Paramètres des bâtiments étudiés	24
7. Détermination des types de problèmes	29
7.1 Endroits sulfatés	30
7.2 Paramètres indicateurs du gonflement.....	30
7.2.1 Soulèvements ponctuels	31
7.2.2 Fissures.....	32
7.2.3 Poudre blanchâtre	34
7.2.4 Fissures des fondations	35
8. Instrumentation des résidences et suivi du gonflement.....	39
8.1 Type d'instruments	39
8.1.1 Fissuromètre de type fissuro-thermo-logger	39
8.1.2 Fissuromètre de type Tale-Tell	39
8.2 Suivi du gonflement dans les résidences	45
8.3 Vérification de la présence bactérienne dans les remblais	48
9. Conclusions	50
10. Recommandations	52
11. Références bibliographiques	53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Identification de la propriété.....	14
Tableau 2	Relevé des désordres au sous-sol	15
Tableau 3	Relevé des désordres au garage.....	19
Tableau 4	Degré de certitude	23
Tableau 5	Types de problèmes	24
Tableau 6	Répartition des relevés visuels	24
Tableau 7	Type de bâtiments visités	26
Tableau 8	Classement des garages selon leur degré de certitude	27
Tableau 9	Classement des sous-sols selon leur degré de certitude	27
Tableau 10	Nombre de maisons ayant ou non des problèmes dans les deux endroits.....	28
Tableau 11	Distribution des types de problèmes dans les garages	29
Tableau 12	Distribution des type de problèmes dans les sous-sols.....	29
Tableau 13	Surface affectée par la sulfatation au garage	30
Tableau 14	Surface affectée par la sulfatation au sous-sol.....	30
Tableau 15	Types de fissures au garage.....	32
Tableau 16	Types de fissures au sous-sol	33
Tableau 17	Ouverture et colmatage des fissures au garage.....	34
Tableau 18	Ouverture et colmatage des fissures au sous-sol.....	34
Tableau 19	Quantité de poudre blanchâtre aux fissures et aux joints du garage	35
Tableau 20	Quantité de poudre blanchâtre aux fissures et aux joints du sous-sol	35
Tableau 21	Nombre de fissures dans les murs de fondation du garage	35
Tableau 22	Nombre de fissures dans les murs de fondation du sous-sol.....	35
Tableau 23	Identification du mur de fondation affecté par la fissuration au garage.....	36
Tableau 24	Déplacement des fissures des murs de fondation au garage	37
Tableau 25	Déplacement des fissures des murs de fondation au sous-sol	38
Tableau 26	Inventaire des fissuromètres.....	41
Tableau 27	Caractéristiques physico-chimiques des granulats.....	46
Tableau 28	Résultats des essais soniques.....	47
Tableau 29	Qualité du béton selon l'essai sonique	48

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Carte géologique de la Plate-forme du Saint-Laurent- Appalaches	6
Figure 2	Coupe à la hauteur Montréal-Cantons de l'Est.....	6
Figure 3	Shale argileux pyriteux.....	9
Figure 4	Mécanisme d'oxydation de la pyrite.....	10
Figure 5	Sulfatation du béton	11
Figure 6	Processus de gonflement et de sulfatation.....	12
Figure 7	Fissure en étoile.....	16
Figure 8	Ouverture d'une fissure.....	16
Figure 9	Poudre blanchâtre.....	17
Figure 10	Soulèvement de la dalle.....	17
Figure 11	Béton égalisé	18
Figure 12	Fissure colmatée.....	18
Figure 13	Croquis des désordres.....	21
Figure 14	Nombre de maisons pour chaque âge.....	25
Figure 15	Distribution des valeurs des maisons étudiées.....	25
Figure 16	Durée d'acquisition des bâtiments résidentiels par le dernier propriétaire	26
Figure 17	Soulèvement au garage.....	31
Figure 18	Soulèvement au sous-sol.....	31
Figure 19	Fissuro-Thermo-Logger	39
Figure 20	Tale-Tell standard	40
Figure 21	Tale-Tell de coin	40
Figure 22	Tale-Tell de surface	40
Figure 23	Tale-Tell de déplacement	40
Figure 24	Cartographie des fissures et positionnement des instruments pour La Prairie #1	42
Figure 25	Cartographie des fissures et positionnement des instruments pour Boucherville.....	43
Figure 26	Cartographie des fissures et positionnement des instruments pour La Prairie #2.....	44
Figure 27	Mesure du soulèvement de la dalle (La Prairie #1)	45
Figure 28	Mesure du déplacement de la fondation (Boucherville)	45
Figure 29	Mesure de l'ouverture d'une fissure (La Prairie #2).....	46
Figure 30	Carottes récupérées dans les résidences La Prairie 1, Boucherville et La Prairie 2.....	47
Figure 31	Évolution du pH et du potentiel d'oxydoréduction pour La Prairie 1	48
Figure 32	Évolution du pH et du potentiel d'oxydoréduction pour Boucherville.....	49
Figure 33	Évolution du pH et du potentiel d'oxydoréduction pour La Prairie 2.....	49

1. OBJECTIFS

L'objectif visé par cette étude est la réalisation d'un inventaire de différents cas de résidences unifamiliales affectées de problèmes possiblement liés au gonflement des remblais de fondation pyriteux situés sur la Rive-Sud de Montréal. Le mandat donné à cet égard à l'Université de Sherbrooke et à l'École Polytechnique de Montréal et organismes impliqués sous l'égide du Comité Technique Québécois (CTQ), par la Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL) est l'inspection d'au moins 200 cas répertoriés dans deux ou trois municipalités de la Rive-Sud de Montréal. Pratiquement, les cas répertoriés comprennent aussi ceux déjà analysés par les laboratoires accrédités; les dossiers fournis par l'Association des consommateurs pour la qualité dans la construction (ACQC) ont servi aussi à la compilation finale, ce qui constitue un nombre nettement supérieur. Finalement, près de 800 cas sont considérés et au moins 200 font l'objet d'un examen particulier sur place. Dans les configurations où le gonflement est à son état initial ou en plein essor, une instrumentation appropriée est mise en place pour suivre l'évolution les différents mouvements. Cette avenue pourrait expliquer certains cas complexes où plusieurs mécanismes peuvent être impliqués, soit l'action sulfatique ou des mécanismes de retrait ainsi que des problèmes d'ordre géotechnique sans omettre le processus de gonflement.

En somme, les travaux entrant dans le cadre de ce projet englobent différentes activités dont les grandes lignes s'apparentent à:

- **Investigation des résidences**: Cette activité a pour objectif l'inventaire, la compilation ainsi que la localisation des principaux cas et l'examen des mesures à prendre. La modalité des relevés des dommages est conforme à l'esprit de la procédure CTQ-M200. Des fissures actives font l'objet d'instrumentation soit par des repères visuels ou des extensomètres à lectures programmées. À cela s'ajoute la prise de photos à l'intérieur et à l'extérieur des habitations. Ce volet inclut aussi la compilation des données provenant des laboratoires privés ayant été impliqués dans des expertises antérieures.
- **Instrumentation et suivi**: Parmi les cas investis, certains retenus comme étant représentatifs de l'ensemble font l'objet d'investigations approfondies, à savoir des carottages suivis de prélèvement d'échantillons en vue d'analyses physico-chimique et pétrographique. Finalement, une instrumentation appropriée mise en place assurera le suivi des dommages au niveau des résidences sélectionnées.

2. PROBLÉMATIQUE

Ces dernières années, de nombreux cas de dommages structuraux et esthétiques de bâtiments (résidentiels, industriels et commerciaux) ont été associés aux soulèvements de dalles de béton. Les premiers cas recensés concernaient particulièrement des bâtiments de fortes dimensions (école, église, etc.) et les dommages étaient importants. Bien que plusieurs maisons unifamiliales de la région de Montréal aient subi des dommages variés (souvent mineurs) au cours des vingt dernières années (fissuration, déplacements des murs de fondation), ces dommages étaient souvent attribués à des processus autres que le gonflement des shales pyriteux, comme le gel des fondations ou des tassements différentiels pour en citer deux.

Néanmoins, des études récentes effectuées sur ces infrastructures ont démontré que le gonflement de la fondation granulaire constituée de shales argileux pyriteux était la cause principale du problème. Dans les milieux scientifiques, le problème de gonflement des roches contenant de la pyrite est connu depuis longtemps. Les phénomènes d'expansion de shale pyriteux ont été rapportés aux États-Unis (1935), en Angleterre (1968), en Suède (1970), au Canada (1970) et en Afrique du Sud (1984).

Aux États-Unis d'Amérique, la première mention du phénomène d'expansion des matériaux pyriteux causé par l'oxydation de la pyrite a été signalée en 1935 par STOUT. Les cas rapportés dans la revue *Engineering News Record* (1960) affirment que le gonflement serait attribué à la cristallisation du gypse et de la mélanterite, deux produits secondaires de l'oxydation de la pyrite, de la marcassite ou de la pyrrhotite contenus dans les shales. Selon ces données, les déformations structurales continuent de se manifester 25 à 40 ans après la construction, engendrant des millions de dollars de dommages dans une région de Pittsburgh. En 1977, d'autres études ont démontré que ce type de déformation a été identifié dans des souterrains aménagés. En mettant à profit des simulations en laboratoire, LUTENEGER et al. (1978) ont estimé la force équivalente à la formation et à la cristallisation du gypse à 28,1 kPa; pression jugée nettement insuffisante pour la déformation des structures en béton.

Selon MOURM et ROSENQVIST (1959), des problèmes de sulfatation du béton et de soulèvement de fondations ont touché, durant au moins 40 ans, plusieurs bâtiments érigés sur un shale dans la région d'Oslo. D'autres études faites sur un shale de la région d'Ostersund [JANGDAL, 1971] ont confirmé cette problématique et une mise en garde a été émise sur les risques encourus par la construction de structures sur des roches contenant de la pyrite.

En Afrique du Sud, CALDWELL et al. (1984) ont attribué les déformations structurales observées dans un complexe commercial au remblai granulaire constitué de shale. Les désordres seraient dus à la cristallisation de minéraux secondaires et à l'adsorption d'eau par le matériau.

En 1970 dans la région d'Ottawa, un problème de gonflement dû au roc contenant des shales pyriteux a été rapporté par QUIGLEY et VOGAN où l'oxydation aurait été favorisée par la présence de bactéries autotrophes. En complément, BÉRARD (1970) et MORGENSTERN (1970) ont évoqué la complexité du problème en associant le mouvement capillaire d'eau et d'oxygène au gradient thermique et clarifient l'action des bactéries en précisant que des minéraux instables tels que la pyrite et la pyrrhotite ne

nécessitent pas obligatoirement l'action de bactéries pour l'oxydation. Par la suite, PENNER et al. (1973 et 1975), QUIGLEY et al. (1973), BÉRARD et al. (1975) et GILLOTT et al. (1974) confirmaient le problème de gonflement dû aux shales pyriteux. QUIGLEY et al. (1973) font ressortir de leurs observations, l'action catalytique importante des bactéries, la nature des minéraux secondaires et leur contribution dans le gonflement des shales.

BÉRARD et al. (1975) ont mis en évidence des problèmes causés à des structures en béton lorsque des traces de shale contenant 4,5 % de pyrrhotite sont présentes dans les granulats composant le béton. En 1970 et 1975, PENNER et al. résumaient la minéralogie des roches réactives, tous les minéraux secondaires présents, les réactions chimiques mises en jeu, l'importance des facteurs biologiques et les déformations structurales généralement observées. En ce sens, des recommandations ont été émises par des mesures préventives à prendre en considération pour la mise en place de dalles de planchers de sous-sols sur un rocher potentiellement expansif.

En 1975, GRATTAN-BELLEW et EDEN, par le soulèvement d'un plancher de sous-sol d'une église à Ottawa, constatent que le béton à la base du plancher manifestait des signes de sulfatation, conséquence de l'oxydation de la pyrite, contenue dans le schiste argileux sous-jacent. Ils recommandent la protection du béton contre l'attaque des sulfates lorsqu'il se trouve en contact avec les schistes argileux susceptibles de gonfler.

En 1978, NIXON, en décrivant les causes du soulèvement de certains planchers de maison en Grande-Bretagne, a mis en évidence l'accroissement de volume des schistes utilisés comme remblai, associé à l'oxydation des pyrites et à la cristallisation du gypse. En 1982, GRATTAN-BELLEW et McROSTIE, suggèrent une méthodologie à caractère préventive de construction contre le soulèvement de structures construites sur du shale. BÉRUBÉ et al. (1986) rapportent pour la première fois un cas de soulèvement dans un Collège de Sainte-Foy au Québec.

Les premières mentions officielles de la problématique des pierres concassées affectant plusieurs édifices de la région de Montréal ne datent que de 1990 et 1991, en particulier avec les travaux de CÔTÉ [1990]. Par des essais menés en laboratoire sur l'expansion de shales pyriteux, l'auteur a pu mettre en évidence le gonflement dû à la formation et à la cristallisation de gypse où il a pu mesurer les pressions de gonflement générées par sa cristallisation. Après 810 jours d'essai, l'expansion mesurée serait de 0,84% alors que les contraintes développées par l'adsorption d'eau combinée à la cristallisation du gypse ont atteint un maximum de 2,56 MPa.

Le colloque organisé en 1997 à Laval (Québec), par l'Association of Engineering Geologists (AEG) en collaboration avec le Regroupement Professionnel des Producteurs de Granulats (RPPG), fut le premier colloque traitant le sujet. De plus, ce colloque a entraîné la création d'un comité technique québécois (CTQ) composé d'universitaires, de producteurs et de professionnels de laboratoires dont les travaux viseront à établir des directives et des normes à respecter. Considérant l'importance du problème, le comité technique a pour mandat principal de trouver des réponses aux aléas que suscitait la multiplication des cas de gonflement des remblais de fondation.

En résultat, une méthodologie de caractérisation du potentiel de gonflement des matériaux granulaires connue sous la désignation de CTQ-M100 a été mise au point par

le comité technique en avril 1999. La méthode CTQ-M100 a été adoptée pour s'assurer que la pierre qui sera désormais commercialisée par les carrières comme remblai de fondation soit provisoirement certifiée non gonflante pour Dalle de Béton. De plus, considérant les nombreuses expertises réalisées sur les bâtiments existants, le comité technique a recommandé le 20 juillet 1999 un protocole d'expertise (Protocole CTQ-M200) établissant les différentes étapes pertinentes à entreprendre et à réaliser sur les résidences concernées par des problèmes de gonflement. Le présent travail porte principalement sur cette dernière procédure afin de mener à bien les investigations envisagées.

3. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Les caractéristiques des granulats tels la minéralogie, la porosité et les paramètres mécaniques constituent l’empreinte caractéristique du massif rocheux d’où ils proviennent. La nature du massif est régie par l’environnement géodynamique dans lequel ce dernier s’est formé ainsi que par les divers processus auxquels il fut soumis. En somme, la nature des roches a une influence sur la qualité et le comportement des granulats.

Les régions de Montréal, du Québec et de leurs environs se situent dans les secteurs à risques comportant des formations de shale gris foncé à noir, de pélites argileuses gris-foncé à noire, de calcaires argileux et de dolomies argileuses. Ces formations contiennent généralement de la pyrite en quantité probablement suffisante pour constituer un risque. Elles abondent dans les basses terres du Saint-Laurent (Ottawa, Montréal, Québec). Les formations de shale gris-foncé à noir de Nicolet (Groupe de Lorraine) et d’Utica s’étendent de Québec à Montréal en passant par Trois-Rivières. Les centres urbains à forte densité de population au Québec sont concentrés le long de cet axe. De nombreuses formations constituées en tout ou en partie de shales gris-foncé à noir existent dans l’ensemble des Appalaches, soit en Gaspésie, dans le Bas-Saint-Laurent et en Estrie-Beauce.

Certains shales ont toutefois subi une certaine oxydation au cours de leur histoire géologique et ont vu leur pyrite complètement transformée en oxydes de fer. Ces shales sont souvent de couleur rouge ou brun rougeâtre et ne constituent aucun risque. Au contraire, les shales gris foncé et noirs contiennent presque toujours de la pyrite et sont donc susceptibles de générer des problèmes de gonflement.

La région de Montréal fait partie d’une plaine formée principalement de roches sédimentaires peu déformées datant de l’ère cambro-ordovicienne. Cette formation géologique appelée « Basses-Terres du Saint-Laurent » s’étend d’Ottawa à Québec. Elle forme une aire horizontale de basse élévation occupant les deux rives du Fleuve Saint-Laurent et cernée par le socle du Grenville au nord-ouest, par la chaîne des Appalaches au sud-est et par le massif des Adirondacks au sud.

La carte et la coupe géologiques suivantes présentent la plate-forme du Saint-Laurent - Appalaches et une coupe au niveau de Montréal - Cantons de l’Est.

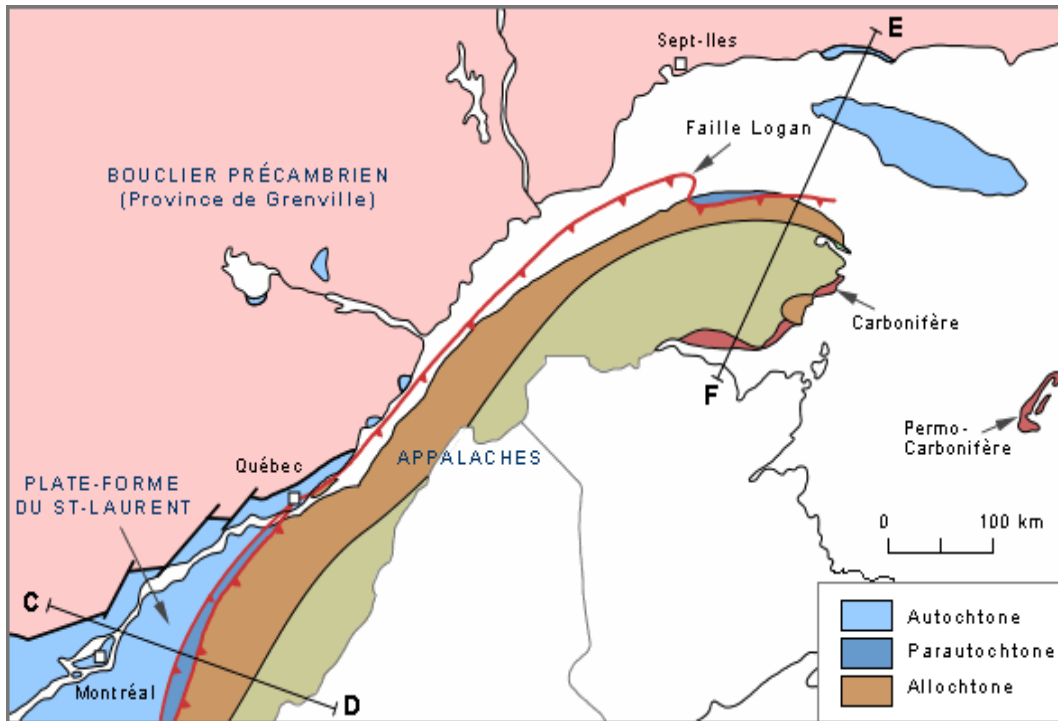


Figure 1. Carte géologique de la Plate-forme du Saint-Laurent - Appalaches

À la hauteur d'une coupe Montréal - Cantons de l'Est, les roches de la Plate-forme sont d'âge Cambrien et Ordovicien (coupe C-D).

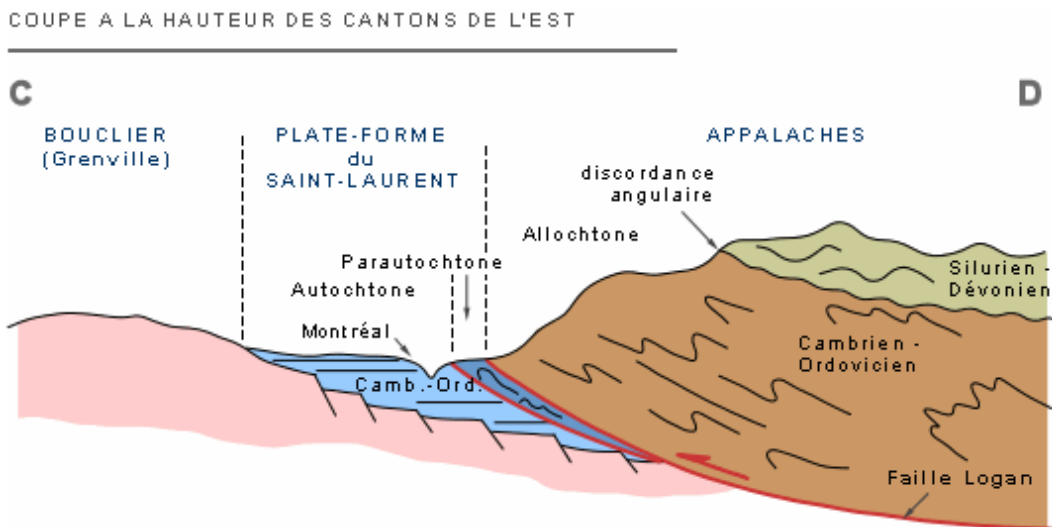


Figure 2. Coupe à la hauteur Montréal - Cantons de l'Est

Sur l'île de Montréal, le socle rocheux est composé surtout de roches sédimentaires plus récentes. Durant une période d'affaissement de la croûte terrestre au début de l'ère paléozoïque, des sédiments sableux, argileux et limoneux ont été déposés sur cette surface irrégulière jusqu'à ce qu'elle soit entièrement recouverte. Ces sédiments se transformèrent en grès, schiste, calcaire et dolomie qui recouvrent maintenant presque toute l'île de Montréal et ses environs, ainsi qu'une partie des Basses-Terres du Saint-Laurent. Les roches précambriennes localisées dans la région de Québec se composent surtout de granites, de gneiss métasédimentaires de type Grenville, de calcaires cristallins et de roches du Paléozoïque inférieur composées majoritairement de calcaires.

La pyrite est un minéral essentiellement rencontré dans les sédiments fins tels que les argiles ou les vases. Au cours de l'érosion, les minéraux accessoires des roches auxquelles appartiennent la pyrite se sont accumulés suivant divers processus dans les roches sédimentaires. La formation des pyrites dans les terrains sédimentaires nécessite une atmosphère réductrice, un milieu anaérobie et un apport de matières organiques pour favoriser le développement des bactéries.

4. SULFURES MÉTALLIQUES

La pyrite (FeS_2) se rencontre essentiellement sous forme de cubes, d'octaèdres ou de dodécaèdres. Dans les granulats, les pyrites sont présentes essentiellement sous deux formes morphologiques. L'une est massive, particulièrement compacte et ne possède aucune surface interne. Les particules de pyrite sont bien cristallisées, généralement sous forme de cubes individuels dont la taille peut varier de quelques micromètres à un millimètre. L'autre en framboïdes ou polyframboïdes est constituée de cubes microniques ou encore composée d'individus sensiblement sphériques, microniques, parfois mal cristallisés et agglomérés en sphéroïdes. Le diamètre des framboïdes peut atteindre couramment $50\ \mu\text{m}$, et les grains qui les constituent, $5\ \mu\text{m}$.

La marcassite (FeS_2) est un minéral très commun dans certains terrains sédimentaires (calcaires, marnes, argiles). Elle peut se rencontrer soit sous forme massive, soit sous forme fibreuse. Les caractéristiques chimiques sont identiques à la pyrite de structure cubique, mais l'altération est différente et plus rapide à cause de sa structure cristallographique orthorhombique thermodynamiquement métastable.

La pyrrhotite (Fe_{1-x}S) présente généralement sous forme massive, s'altère également par oxydation en limonite, sidose et en divers sulfates.

La pyrite (FeS_2), plus fréquente dans les roches, est la forme stable du sulfure de fer à l'état naturel. Elle ne serait obtenue qu'à pH neutre et en présence d'hydrogène sulfuré et de soufre [Divet, 1996]. On la rencontre dans des roches de toute nature et de tout âge géologique, mais surtout dans les roches métamorphiques (schiste) et sédimentaires (shale) [Penner et al. 1975]. Elle représente plus de 95% des sulfures présents dans les roches sédimentaires. La pyrite peut apparaître généralement sous deux formes distinctes: constituée d'agglomérats de fines particules formant des framboïdes microcristallins disséminés dans la roche ou bien de cristaux de formes cubiques.

Compte tenu des conditions nécessaires à la formation de la pyrite sédimentaire, ce minéral se rencontre essentiellement dans les sédiments fins telles que les argiles ou les vases. De plus, la présence indispensable de sulfates localise la réaction principalement au sein des estuaires [Divet, 1996], soit dans un environnement marin stagnant. Au Québec, la pyrite est associée aux shales noirs argileux pyriteux ou schiste argileux (Fig. 3). À cause de sa finesse, la mise en évidence de la pyrite nécessite un examen microscopique. En général, le diamètre moyen des grains départage les claystones, les mudstones, jusqu'aux siltstones. En outre, les pourcentages variables en silt et argiles, constituants principaux de cette roche, permettent deux classifications majeures: silty mudshale (boue > 50%) ou muddy siltshale (silt > 50%). Ces roches argileuses contiennent toujours des proportions variables de matières organiques.

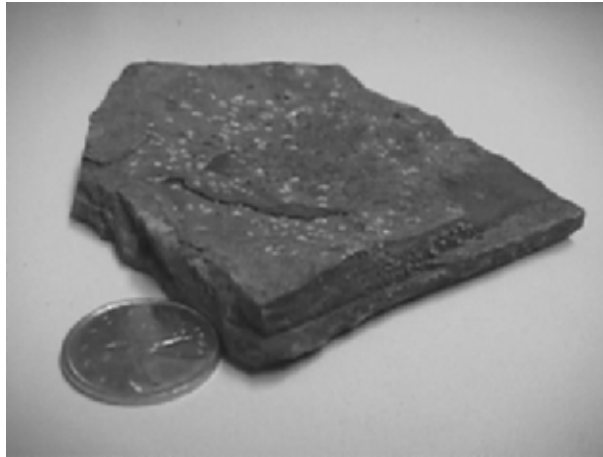


Figure 3. Shale argileux pyriteux

De façon générale, les shales argileux se retrouvent, au Québec, principalement dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, c'est-à-dire sur les deux rives du Saint-Laurent allant d'Ottawa à Québec, et présentent une puissance variant de 1500 à 3000 mètres d'épaisseur. La partie supérieure des Basses-Terres du Saint-Laurent impliquant les groupes de Trenton, d'Utica et de Lorraine (dans la région de Montréal) se caractérise par l'abondance de shales. Les shales argileux se retrouvent dans les Appalaches c'est-à-dire de l'Estrie jusqu'en Gaspésie.

5. RÉACTIVITÉ DES GRANULATS

5.1 Processus de gonflement

Les réactions conduisant à des soulèvements de dalle s'effectuent selon les étapes suivantes [Bérard 1997, Bérubé 1997, Côté 1990]:

- Oxydation de la pyrite (FeS_2);
- Neutralisation par les carbonates;
- Formation et cristallisation du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Le mécanisme d'oxydation des sulfures illustrés par la pyrite est représenté à la figure 4.

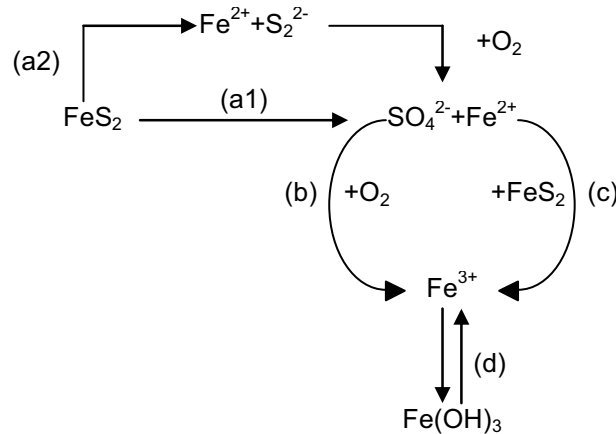


Figure 4. Mécanisme d'oxydation de la pyrite

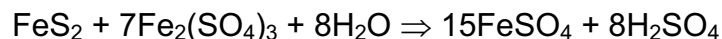
La réaction d'oxydation de la pyrite est régie principalement par plusieurs facteurs parmi lesquels figurent:

- 1) la quantité d'oxygène atmosphérique et dissoute;
- 2) la surface de contact des grains de pyrite;
- 3) le degré d'humidité;
- 4) la température ;
- 5) les populations bactériennes ;
- 6) la présence de minéraux argileux.

Les bactéries Thiobacillus Ferrooxidans, en agissant comme catalyseur, oxydent les sulfates ferreux produits au cours de la réaction (1) en sulfates ferriques. Les conditions optimales d'oxydation bactérienne se situent autour d'un pH de 3,5 et à une température de 35°C. Notons que la température des remblais est généralement assez élevée pour que les bactéries puissent agir.



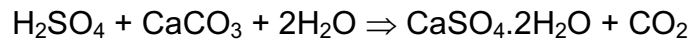
Les ions ferriques formés en oxydant la pyrite perpétuent le processus.



La vitesse de réaction serait neuf fois plus élevée en présence de Thiobacillus Ferrooxidans [Divet 1996]. Par contre, selon Singer et Stumm (1970), la présence de ces bactéries permet d'augmenter d'un facteur d'environ un million la vitesse de la réaction. La jarosite, de couleur orangée, est un bon indicateur de la présence de

bactéries puisque sa production nécessite la présence des sulfates ferriques créés lors de la réaction biochimique. Selon Quigley et al., (1970), c'est l'existence dans les systèmes de bactéries autotrophes de types *Thiobacillus Ferrooxidans* et *Thioparus* qui causent l'oxydation des sulfures de fer disséminé dans les schistes argileux.

La formation du gypse implique l'attaque de la calcite présente dans la pierre concassée par l'acide sulfurique produit lors de l'oxydation de la pyrite.



Le gypse ainsi formé provoque une augmentation de volume de l'ordre de 100% par rapport aux minéraux originaux, c'est-à-dire la calcite et la pyrite [Quigley 1970, Ballivy et al., 1997]. La formation du gypse est favorisée seulement au-dessus de la nappe phréatique, dans la zone partiellement saturée (appelée zone vadose) où les conditions géochimiques sont réunies. La bactérie *Thiobacillus Ferrooxidans* est présente seulement dans la zone vadose où la disponibilité de l'oxygène est importante.

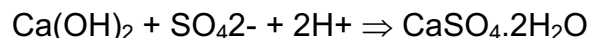
5.2 Processus de sulfatation

L'action sulfatique du béton est générée par les sulfates produits par la transformation des sulfures de fer présents dans le matériau de fondation. Les sulfates issus de l'altération du granulats peuvent migrer vers le béton par capillarité en entraînant ainsi la détérioration de la dalle (Fig. 5).

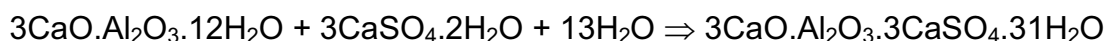


Figure 5. Sulfatation du béton

La détérioration se traduit principalement par une interaction avec la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) de la pâte de ciment pour entraîner la formation du gypse secondaire par opposition au gypse primaire ajouté au ciment comme régulateur de prise.



Le gypse néoformé réagit avec les aluminates tricalciques hydratés présents dans le ciment pour donner de l'ettringite secondaire. Le volume molaire final peut être de trois à huit fois plus élevé que celui du solide initial [Divet 1996].



C'est donc l'apparition de gypse et d'ettringite secondaires à caractère gonflant qui induisent l'augmentation de volume et la fissuration du béton. En général, les granulats possédant une certaine réactivité intrinsèque peuvent être classés en trois catégories:

- Granulats gonflants
- Granulats gonflants avec une action sulfatique
- Granulats non gonflants avec une action sulfatique

Le schéma reporté à la figure 6 résume de façon succincte certaines phases pouvant se former dans un système incluant un remblai de fondation en contact avec une dalle en béton.

En résumé, les variations de volume dues à l'altération de la pyrite génèrent des désordres souvent limités aux dalles des planchers posées directement sur la pierre. Ces soulèvements différentiels ont un impact sur les cloisons, les accessoires et les portes [Penner et al. 1975]. Lorsque des distorsions de la structure sont visibles et que les mouvements se perpétuent, c'est l'intégrité structurale du bâtiment qui peut être remise en question.

C'est dans un cadre régi par l'ensemble des données bibliographiques présentées de façon succincte que cette étude a été entreprise pour tenter de répertorier l'ampleur des dommages, l'origine, l'évolution et les paramètres indicateurs des problèmes de gonflement liés à la pyrite, et concernant des milliers de résidences sur la rive sud de Montréal.

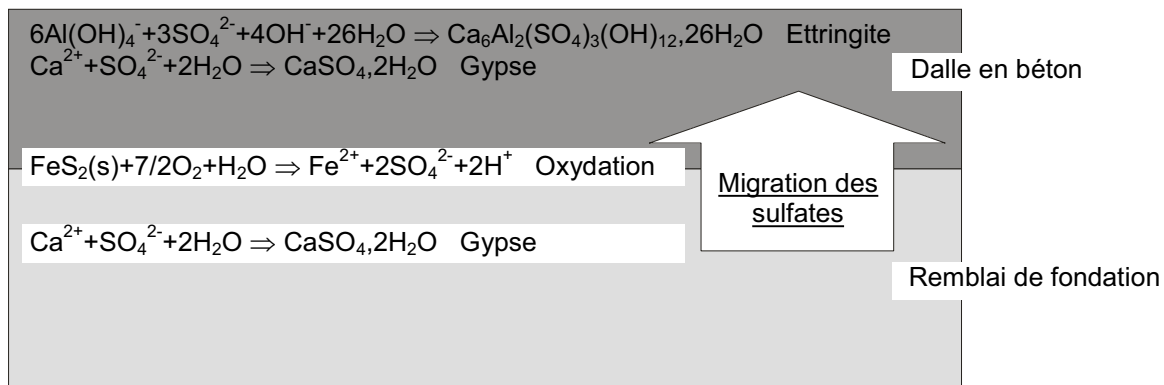


Figure 6. Processus de gonflement et de sulfatation

6 INVESTIGATION DE CAS RÉSIDENTIELS SUR LA RIVE-SUD DE MONTRÉAL

Depuis le début des années 70, les dommages structuraux des bâtiments causés par la présence de remblais pyriteux sous les dalles de béton sont connus d'un nombre limité de scientifiques mais demeurent inconnus de la grande majorité des praticiens. L'AEG (*Association of Engineering Geologists*), section de Montréal, a fait état des connaissances sur les shales pyriteux et les problèmes de gonflement au cours de trois colloques tenus dans la région de Montréal (mai 1997, décembre 1998 et mai 1999). Suite au premier colloque, le Comité Technique Québécois d'étude des problèmes de gonflement associé à la pyrite (CTQ) est créé, regroupant des spécialistes et des intervenants des milieux concernés par le problème. Le CTQ a plusieurs mandats dont celui de réaliser une campagne d'investigation de cas résidentiels sur la Rive-Sud de Montréal. Cette étude est rendue possible grâce à la subvention de la Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL) en étroite collaboration avec la Société d'habitation du Québec (SHQ) et l'Association des consommateurs pour la qualité dans la construction (ACQC).

L'Université de Sherbrooke et l'École Polytechnique de Montréal ont été mandatées par la SCHL pour réaliser une investigation sur environ 200 résidences sujettes aux problèmes de gonflement dus aux remblais pyriteux. Les bâtiments résidentiels sélectionnés se situent sur la Rive-Sud de Montréal dans trois municipalités soit Boucherville, Longueuil et Saint-Bruno-de-Montarville. La présence d'un nombre non négligeable de maisons affectées par les problèmes associés aux remblais pyriteux parmi une quinzaine de villes a guidé le choix à retenir ces municipalités.

L'investigation de cas résidentiels a pour objectifs d'inventorier un certain nombre de maisons touchées par des problèmes de remblais pyriteux dans les villes ciblées et d'identifier la nature des dommages et les correctifs éventuels à apporter. Ce qui permettra, en conséquence, de dresser l'étendue du problème sur la Rive-Sud de Montréal et d'évaluer l'ampleur des dommages. Toutefois, il s'avère difficile d'extrapoler les données recueillies en dehors des municipalités visées ainsi que le degré des dommages qui leur sont associés. L'étude permettra aussi de connaître les symptômes caractéristiques à la présence de remblai pyriteux, de cataloguer les différents cas observés et de répertorier les divers types de dommages possibles. Les enseignements acquis peuvent être, par contre, utiles à des cas similaires.

Pratiquement, l'approche des propriétaires de bâtiments résidentiels a été possible par l'entremise de l'Association des consommateurs pour la qualité dans la construction (ACQC). En ce sens, depuis l'automne 1998, l'ACQC a fait circuler un formulaire sur la pyrite auprès de ses membres et à des propriétaires de maisons dans plusieurs municipalités du Québec, notamment sur la Rive-Sud de Montréal. Les personnes contactées constituent donc l'ensemble des propriétaires résidant dans les villes sélectionnées ayant retourné le formulaire sur la pyrite dûment rempli à l'ACQC.

Chaque relevé visuel consiste à faire des observations sur les lieux et à remplir un formulaire s'identifiant à la version modifiée du protocole CTQ-M200 version 1.1. Le formulaire comprend quatre sections illustrées par l'identification de la propriété, le relevé et le croquis des désordres au sous-sol et au garage. Advenant une analyse antérieure du remblai par un laboratoire privé, le nom du laboratoire, le numéro du

dossier ainsi que les données pertinentes sont rapportées au dossier.

Trois laboratoires ont aussi été consultés pour la prise de données des expertises effectuées sur des échantillons de remblais potentiellement pyriteux. Les laboratoires participants sont Quéformat, Labo S.M. Inc. Longueuil ainsi que Technisol. Certains propriétaires ayant fait appel aux services de Quéformat ont été contactés pour procéder à une visite de leur propriété et éventuellement réaliser un relevé visuel si l'intérêt le démontre. Pour tous les autres dossiers, seules les données ont été traitées pour des fins statistiques. Tous les renseignements accumulés sont compilés dans un fichier pour permettre un meilleur traitement des données et d'analyse en mettant à profit les logiciels ACCESS et EXCEL. Il est à noter que ces informations ne sont pas disponibles et qu'elles ont été cumulées que pour des fins de recherche.

224 maisons retenues ont été visitées entre le 17 mai 1999 et le 1er septembre 1999. Les relevés visuels ont été réalisés dans les sous-sols et dans les garages pour chaque résidence auscultée. Les relevés visuels mis à contribution impliquent principalement quatre axes soit l'identification de la propriété, le relevé des désordres au sous-sol, le relevé des désordres au garage et le croquis des désordres (sous-sol et garage).

6.1 Fiche d'identification des propriétés

Le formulaire suivant rassemble l'ensemble des informations recueillies lors des visites.

Tableau 1. Identification de la propriété (adaptation du protocole CTQ-M200)

Adresse civique	:	_____

Type de bâtiment	:	_____
Année de construction	:	_____
Année d'acquisition	:	_____
Propriétaire actuel	:	_____
Évaluation municipale	:	_____
Terrain	:	_____
Bâtiments	:	_____
Année de l'évaluation	:	_____
Agent et/ou courtier	:	_____
Contracteur	:	_____
Autres informations	:	_____

L'adresse civique concerne la maison visitée et non celle du propriétaire dans le cas d'une location de la bâtisse résidentielle. L'année de construction est celle à laquelle la maison a été bâtie. Si le garage a été construit après la maison, l'année de construction du garage est aussi indiquée. L'année d'acquisition indique la date à laquelle le dernier propriétaire a acheté la maison. L'historique de la maison et les informations portant sur l'utilisation du garage et du sous-sol et concernent le dernier propriétaire seulement. L'évaluation du terrain et des bâtiments sont celles que l'on retrouve sur le dernier compte de taxes de la ville. L'année d'évaluation est la dernière année à laquelle la

municipalité a fait l'évaluation. Un facteur comparatif de 1 caractérise les trois villes étudiées. L'agent et/ou le courtier à l'origine de la dernière transaction immobilière est aussi mentionné ainsi que le contracteur responsable de la construction de la maison.

6.2 Fiche: Relevé des désordres au sous-sol

Le relevé relatif aux désordres au sous-sol implique les dommages visuels affectant la dalle de béton et les autres composantes de la pièce comme les portes et les cloisons. Cette section du relevé comprend également des informations sur l'extérieur de la maison comme les gouttières et les murs de fondation du sous-sol et le type de terrain. Le tableau 2 présente la partie du formulaire servant à cet égard.

Tableau 2. Relevé des désordres au sous-sol (adaptation du protocole CTQ-M200, 1^{ère} version)

Dimensions nominales (m) :	
% de surfaces de béton :	Revêtement :
<u>Nombre de fissures dans la dalle du sous-sol</u>	<u>Mur de fondation (section sous-sol)</u>
<input type="checkbox"/> plusieurs fissures longitudinales	<input type="checkbox"/> présence de fissures aux coins: _____
<input type="checkbox"/> une ou deux fissures longitudinales	<input type="checkbox"/> présence de fissures entre les coins: _____
<input type="checkbox"/> plusieurs fissures en étoile	<input type="checkbox"/> déplacement du mur vers l'extérieur: _____
<input type="checkbox"/> une ou deux fissures en étoile	<input type="checkbox"/> aucun déplacement perceptible
<input type="checkbox"/> microfissures	<input type="checkbox"/> aucune fissure
<input type="checkbox"/> aucune fissure	
<u>Ouverture moyenne des fissures</u>	<u>Cloisons du sous-sol</u>
<input type="checkbox"/> fine: moins de 1 mm	<input type="checkbox"/> fissurées
<input type="checkbox"/> moyenne: entre 1 et 2 mm	<input type="checkbox"/> flambage
<input type="checkbox"/> importante: entre 2 et 5 mm	<input type="checkbox"/> aucun dommage
<input type="checkbox"/> très importante: plus de 5 mm	<input type="checkbox"/> pas de cloison
<input type="checkbox"/> fissures colmatées	
<u>Présence de poudre blanchâtre</u>	<u>Portes au sou-sol</u>
<input type="checkbox"/> associée aux fissures Quantité: ❶ ❷ ❸	<input type="checkbox"/> ferment mal
<input type="checkbox"/> joint dalle-mur Quantité: ❶ ❷ ❸	<input type="checkbox"/> aucun dommage
<input type="checkbox"/> autres endroits: _____	<input type="checkbox"/> pas de porte
<u>Amplitudes des soulèvements perceptibles</u>	<u>Dommages à l'étage</u>
_____ mm/m	<input type="checkbox"/> soulèvement du plancher à l'étage: _____
<input type="checkbox"/> aucun soulèvement perceptible	<input type="checkbox"/> cloisons avec dommage: _____
	<input type="checkbox"/> aucun dommage à l'étage
	<input type="checkbox"/> autre dommage: _____
<u>Terrain</u>	<u>Gouttière extérieure</u>
<input type="checkbox"/> plat	<input type="checkbox"/> absente
<input type="checkbox"/> incliné vers la rue <input type="checkbox"/> incliné vers l'arrière	<input type="checkbox"/> s'égoutte près de la fondation
<input type="checkbox"/> surélevé <input type="checkbox"/> surbaissé	<input type="checkbox"/> s'égoutte loin de la fondation
<input type="checkbox"/> autre: _____	<input type="checkbox"/> autre: _____
Remarques : (lézardes briques, arbres,...) :	

Pour la quantité, les codes correspondent aux qualificatifs suivants : ❶ rare ❷ intermédiaire ❸ abondante

1^{re} étape: Les dimensions incluent la totalité des surfaces de toutes les pièces du sous-sol étudié incluant le pourcentage de béton à découvert et le type de revêtement utilisé.

La classification des fissures est réalisée selon leur type: longitudinale, en étoile ou microfissure. Les fissures longitudinales apparaissent dans le sens de la longueur. Les fissures en étoile comprennent un minimum de trois branches caractérisées par une extrémité commune (Fig. 7). Les microfissures sont à peine perceptibles et les lèvres de la fissure sont encore en contact.

Des fissures en forme de quart de cercle peuvent exister dans un coin de la dalle de béton. Les tassements différentiels à l'origine de ces fissures sont le résultat d'un mauvais compactage des matériaux de remplissage autour de la maison ou d'un assèchement accru du sol. Il est aussi plausible d'observer un réseau de fissures sans gonflement pouvant être attribué au retrait du béton lors du séchage.

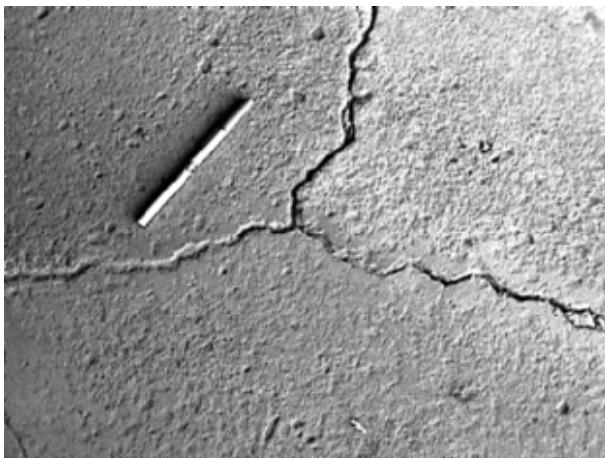


Figure 7. Fissure en étoile



Figure 8. Ouverture d'une fissure

2^e étape: L'ouverture moyenne des fissures (Fig. 8) est classée dans l'une des quatre catégories: fine (<1 mm), moyenne (1–2 mm), importante (2–5 mm) et très importante (>5 mm). Dans le cas de fissures colmatées, il est impossible de savoir l'ouverture des fissures à moins qu'elles ne soient réactivées. Deux sortes de matériaux de colmatage sont généralement utilisés : le ciment rigide mais apte à la fissuration dès qu'un mouvement des lèvres de la fissure se manifeste ; la silicone, matériau flexible pouvant épouser de faibles mouvements de la fissure.

3^e étape: Deux endroits distincts sont observés pour évaluer la présence de poudre blanchâtre: le long des fissures et le joint dalle de béton et mur de fondation (Fig. 9). Pour chaque endroit et devant l'incapacité de faire une quantification, une appréciation sommaire de la présence de poudre blanchâtre est donnée par l'utilisation des cotes aucune, rare, intermédiaire et abondante.

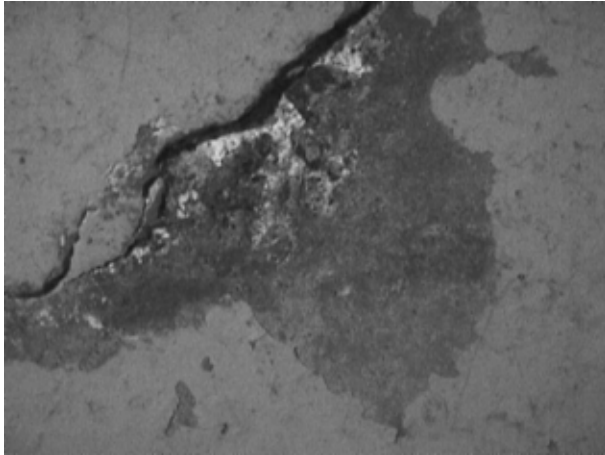


Figure 9. Poudre blanchâtre



Figure 10. Soulèvement de la dalle

4^e étape: L'amplitude mesurée à l'aide d'un niveau de deux mètres est ramenée en mm/m linéaire en divisant par deux où le soulèvement maximal est retenu (Fig. 10). Dans le cas des soulèvements du plancher à travers le revêtement, seul l'emplacement est reporté sur le croquis des désordres. Parfois, la dalle de béton a été démolie à l'endroit du soulèvement pour être réparée (Fig. 11). Dans cette perspective, un soulèvement moindre pourrait être enregistré. De plus, il arrive souvent que le béton du sous-sol mal égalisé lors de la construction peut engendrer une incertitude dans la mesure.

5^e étape: Les murs de fondation entourant le sous-sol sont inspectés de l'intérieur et de l'extérieur de la maison. Toutes les fissures apparentes sont relevées en tenant compte de la distinction entre les fissures situées aux coins des murs de fondation et celles localisées entre les coins, soit le long des murs de fondation. Les fissures observées sont classées, mineure ou majeure selon l'ouverture. Les fissures aux coins des fenêtres ou dans le crépi sont aussi notées et sont classées comme mineures. Les fissures aux coins des murs de fondation sont verticales le long de l'arête ou bien en forme de cône inversé. Toutefois, certaines fissures peuvent avoir été colmatées par leur propriétaire (Fig. 12). Le déplacement d'une lèvres de la fissure par rapport à l'autre est aussi enregistré avec un classement faible, moyen, important, très important ou nul.



Figure 11. Béton égalisé



Figure 12. Fissure colmatée

6^e étape: L'état des cloisons du sous-sol relevé est associé à l'une des mentions : fissuré, flambé ou aucun dommage. Un soulèvement de la dalle de béton pourrait empêcher le bon usage des portes et vérifier si une éventuelle répercussion a eu lieu sur le plancher à l'étage.

7^e étape: La configuration du système de gouttières entourant le sous-sol ainsi que l'endroit de leur impact par rapport à la fondation (près ou loin). On note aussi la dénivellation du terrain à l'avant et à l'arrière de la maison. La qualité du drainage du remblai des fondations ainsi que du terrain pourrait avoir une influence sur la vitesse de réaction de la pyrite.

8^e étape: Les briques lézardées ou la sulfatation anormale de la dalle de béton ou du mur de fondation sont également mentionnées. La sulfatation des dalles de béton provient probablement de la génération de sulfates par le remblai sous la dalle tandis que la sulfatation des murs de fondation pourrait être causée soit par l'apport de sulfates du remblai ou soit par une source extérieure, comme la nappe phréatique.

6.3 Fiche: Relevé des désordres au garage

La troisième partie du relevé visuel illustré par le tableau 3 concerne les désordres au garage. Le formulaire englobe l'ensemble des observations décrivant les désordres au sous-sol pour lequel sont ajoutées des informations concernant l'utilisation et l'entretien quotidien du garage.

1^{re} étape: Les dimensions intérieures du garage simple ou double incluent aussi l'escalier menant au sous-sol. Par convention, un garage double comporte deux portes de garage ainsi qu'un pilier central. L'état du pilier central, fissuré ou non est aussi indiqué. Le pourcentage de béton visible et le type de revêtement du béton sont inscrits au rapport.

Tableau 3. Relevé des désordres au garage (adaptation du protocole CTQ-M200)

Dimensions nominales (m) :	
% de surfaces de béton :	Revêtement :
<u>Nombre de fissures dans la dalle du garage</u> <input type="checkbox"/> plusieurs fissures longitudinales <input type="checkbox"/> une ou deux fissures longitudinales <input type="checkbox"/> plusieurs fissures en étoile <input type="checkbox"/> une ou deux fissures en étoile <input type="checkbox"/> microfissures <input type="checkbox"/> aucune fissure <u>Ouverture moyenne des fissures</u> <input type="checkbox"/> fine: moins de 1 mm <input type="checkbox"/> moyenne: entre 1 et 2 mm <input type="checkbox"/> importante: entre 2 et 5 mm <input type="checkbox"/> très importante: plus de 5 mm <input type="checkbox"/> fissures colmatées <u>Présence de poudre blanchâtre</u> <input type="checkbox"/> associée aux fissures Quantité: ❶ ❷ ❸ <input type="checkbox"/> joint dalle-mur Quantité: ❶ ❷ ❸ <input type="checkbox"/> autres endroits: _____ <u>Amplitudes des soulèvements perceptibles</u> _____ mm/m <input type="checkbox"/> aucun soulèvement perceptible <u>Porte de garage</u> <input type="checkbox"/> se ferme bien <input type="checkbox"/> se ferme mal <input type="checkbox"/> ne se ferme plus <u>Type de garage</u> <input type="checkbox"/> simple <input type="checkbox"/> double	<u>Mur de fondation (section garage)</u> <input type="checkbox"/> présence de fissures aux coins: _____ <input type="checkbox"/> présence de fissures entre les coins: _____ <input type="checkbox"/> déplacement du mur vers l'extérieur: _____ <input type="checkbox"/> aucun déplacement perceptible <input type="checkbox"/> aucune fissure <u>Pièces attenantes au garage</u> <input type="checkbox"/> oui: _____ <input type="checkbox"/> dommages: _____ <input type="checkbox"/> aucun dommage <input type="checkbox"/> pas de pièce attenante <u>Lavage de voitures dans le garage</u> <input type="checkbox"/> fréquent <input type="checkbox"/> rare <input type="checkbox"/> jamais <u>Température moyenne en hiver du garage</u> _____ °C <u>Gouttière extérieure</u> <input type="checkbox"/> absente <input type="checkbox"/> s'égoutte près de la fondation de garage <input type="checkbox"/> s'égoutte loin de la fondation de garage <u>État du pilier central du garage double</u> <input type="checkbox"/> fissuré <input type="checkbox"/> non fissuré
Remarques : (lézardes briques, arbres,...) :	

Pour la quantité, les codes correspondent aux qualificatifs suivants : ❶ rare ❷ intermédiaire ❸ abondante

2^e étape: L'état de fissuration du béton est examiné de la même manière qu'au sous-sol. Les fissures longitudinales peuvent suivre la longueur du mur extérieur, être transversales ou bien parallèles à la dalle d'entrée du garage. Normalement, la dalle d'entrée située sous la porte de garage (si elle existe) mesure environ 30 cm de largeur. Dans le cas où elle est fracturée, le gel dans les fissures en période hivernale accentue les dommages à l'avant de la dalle d'entrée de béton du garage.

Les différentes causes de fissuration dans le garage sont imputées principalement au gonflement du remblai, au gel, aux tassements différentiels et aussi au retrait du béton.

3^e étape: L'amplitude des soulèvements mesurables est évaluée selon le même procédé qu'au sous-sol. Cependant, la dalle du béton du garage se différencie par un léger dénivelé vers le puisard. Cette particularité est prise en considération lors de la mesure mais n'est pas incluse dans l'amplitude du soulèvement relevé. Le niveau de l'eau dans le puisard est aussi mesuré par rapport à la surface de la dalle de béton.

4^e étape: Les murs de fondation entourant le garage sont inspectés de l'intérieur et de l'extérieur du garage. La même distinction est faite entre les fissures se trouvant aux coins des murs de fondation de celles se trouvant entre les coins. En plus, la position du mur de fondation fissuré est reportée selon qu'il est situé à l'avant, à l'arrière du garage, ou sur l'un des deux côtés. Les fissures observées sont aussi classées selon la cotation mineure ou majeure selon l'ouverture des lèvres de la fissure. Le déplacement d'une lèvre de la fissure par rapport à l'autre est répertorié. Les murs de fondation, surtout le mur du côté extérieur, peuvent subir un basculement par rapport à leur position initiale en raison du gonflement du remblai. En effet, les poussées latérales générées par le remblai pouvant être parfois très élevées.

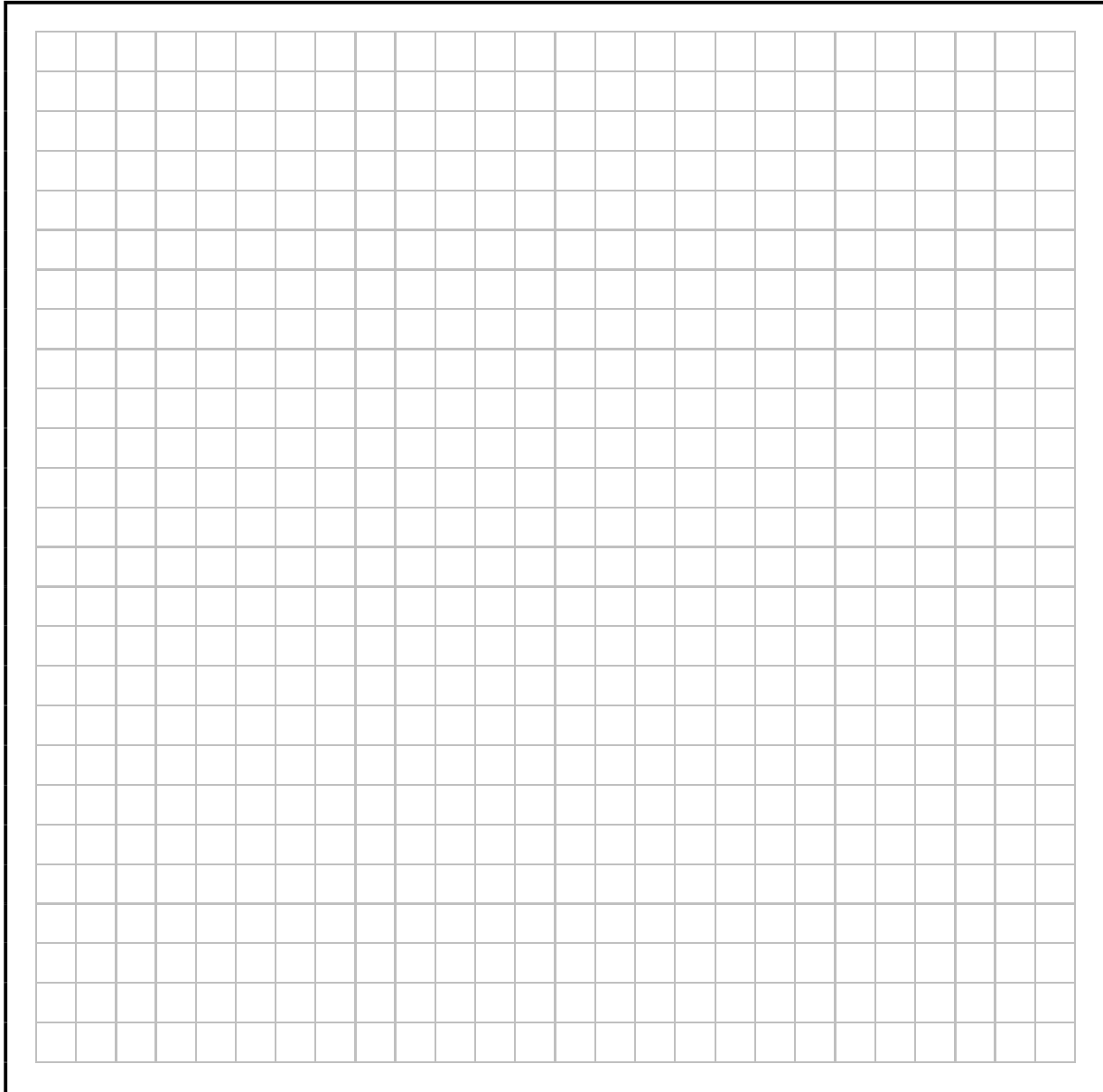
5^e étape: Vérification de la fermeture de la porte de garage puisqu'un gonflement de la dalle d'entrée ou un mouvement des murs de fondation pourrait empêcher son fonctionnement. Les pièces attenantes au garage ainsi que celles à l'étage supérieur sont auscultées afin de déceler toute trace de dommages. Certaines activités quotidiennes dans le garage sont aussi reportées (lavage, voiture, ...) ainsi que la température à laquelle celui-ci est maintenu durant l'hiver.

6^e étape: La configuration du système de gouttières entourant le garage est décrite ainsi que l'endroit d'évacuation des eaux par rapport à la fondation.

6.4 Fiche: Croquis descriptif des désordres (sous-sol et garage)

La quatrième partie du relevé visuel est le croquis des désordres au sous-sol et au garage. La figure 13 présente la vue en plan utilisée ainsi que la légende associée. La forme générale de la maison est tout d'abord dessinée. Les fondations du sous-sol et du garage sont délimitées par des lignes doubles. Les parties de béton non visibles sont hachurées dans chacune des pièces. Ensuite, le réseau de fissurations visibles est reproduit le plus fidèlement possible à l'aide de lignes en tirets. Les points de soulèvement sont alors ajoutés à l'aide d'un signe (+). Un (x) encerclé indique l'existence de sondages déjà réalisés. Les fissures dans les fondations sont représentées par des éclairs. Les déplacements observés dans les murs de fondation sont représentés par une flèche dans le sens du mouvement. L'emplacement du puisard est signalé à l'aide d'un rectangle. Finalement, les cloisons sont notées en faisant la distinction en ce concerne la portance.

Vue en plan



LÉGENDE

=	mur de fondation	(secteur non visible (tapis, faux plancher, etc)
—	cloison non portante	∋	sondage
-••	cloison portante	→	mouvement latéral probable perceptible
- - -	fissure	+	mouvement vertical probable perceptible

Figure 13. Croquis des désordres (CTQ M200)

6.5 Méthodologie de classement des données

Les relevés visuels, effectués dans les sous-sols et dans les garages des maisons sélectionnées, servent à recueillir les données nécessaires pour déterminer si les dommages observés dans une pièce ou dans l'autre pourraient provenir du gonflement du remblai sous la dalle de béton. La détermination visuelle exacte de la cause du problème peut être rendue difficile soit par un manque d'information, pouvant être attribuable, entre autres, à un revêtement de plancher ou soit à des dommages négligeables.

Par conséquent, pour chaque relevé visuel exécuté dans une pièce d'une maison, une appréciation des observations est donnée. Cette appréciation, basée sur les données recueillies, permet de corréliser les dommages observés au gonflement engendré par le remblai pyriteux sous la dalle de béton. Autrement dit, le degré de certitude repose sur cette appréciation afin d'établir si le remblai est réellement mis en cause vis-à-vis des dommages observés. Dans l'affirmative, quatre degrés de certitude sont attribués soit : très probable, probable, peut-être, peu probable. Devant une option négative, le degré de certitude «non» est décerné. La liste des critères (ou symptômes) ayant servi à établir ces degrés de certitude se retrouvent au tableau 4.

Les critères régissant le degré de certitude sont les symptômes les plus révélateurs d'un remblai pyriteux gonflant parmi lesquels figure le soulèvement de la dalle de béton sus-jacente. Un soulèvement entre 0 et 5 mm par mètre linéaire de dalle peut conduire à des données erronées, puisqu'au garage, la dalle possède généralement un léger dénivelé vers le puisard et qu'au sous-sol, un nivellement imparfait caractérise la dalle. En conséquence, le soulèvement de la dalle de béton devient significatif lorsque l'amplitude atteint au minimum 5 mm/m.

Le second symptôme d'un remblai pyriteux gonflant est la forme des fissures. Le soulèvement doit se produire au niveau d'une fissure en étoile. Sinon, il pourrait être le résultat d'un autre phénomène comme le tassement différentiel. Dans ce cas, la dalle s'abaisse à l'endroit du tassement et se soulève à l'autre extrémité par basculement (bras de levier). L'ouverture des fissures constitue une indication de la force des poussées exercées sur la dalle par le remblai.

Tableau 4. Degré de certitude

Critères	Degré de certitude				
	Très probable	Probable	Peut-être	Peu probable	Non
DALLE DE BÉTON (sous-sol et garage)					
Soulèvement	>5 mm/m	>5 mm/m	0 < mm/m < 5	0<mm/m<5	0 mm
Fissures en étoile	Plus de 5	3 à 5	1 ou 2	1 ou 2	N/A
- Ouverture des fissures	Importante (entre 2 et 5 mm) à très importante (plus de 5 mm)	Importante (entre 2 et 5 mm) à très importante (plus de 5 mm)	Faible (moins de 1 mm) à moyenne (entre 1 et 2 mm)	Faible (moins de 1 mm)	N/A
Poudre blanchâtre	Présente	Possible	Possible	Non	Non
Patron de fissure	Réseaux ramifiés		Fissures ponctuelles	Fissures ponctuelles	N/A
GARAGE SEULEMENT					
Mur de fondation fissuré	Oui	Possible	Non	Non	Non
- Ouverture des fissures	Importante (entre 2 et 5 mm) à très importante (plus de 5 mm)	Fine (moins de 1 mm) à moyenne (entre 1 et 2 mm)	N/A	N/A	N/A
- Déplacement relatif	Translation et rotation	Translation	N/A	N/A	N/A

Comme les poussées exercées sur la dalle sont produites par la cristallisation de minéraux secondaires, la présence de poudre blanchâtre constitue un symptôme à prendre en considération. En effet, les minéraux néoformés peuvent remonter à la surface de la dalle par les fissures ou le joint dalle-mur et se manifester sous forme de poudre blanchâtre. Le patron des fissures peut aussi être révélateur. En présence d'une multitude de fissures en étoile concentrée dans une zone de la dalle, les fissures s'agglomèrent pour amener la formation d'un réseau fissuré polygonal ou ramifié.

L'état des murs de fondation entourant le garage peut être exploité comme un paramètre indicateur. En effet, le remblai du garage est souvent beaucoup plus épais que celui du sous-sol et dans la plupart des cas, sa limite supérieure est localisée à la surface du sol. Les poussées latérales du remblai exercées sur les murs de fondation provoquent une fissuration verticale. Dans les cas où la réaction est plus avancée, les murs de fondation subissent un déplacement de translation et parfois même de rotation ou de basculement.

Le degré de certitude «très probable» fait mention de symptômes flagrants permettant d'attribuer les dommages causés à un remblai pyriteux à caractère gonflant. Le degré de certitude «probable» indique que le remblai est fort probablement pyriteux gonflant mais, un ou deux critères devraient être vérifiés. Le degré de certitude «peut-être» correspond à un remblai pyriteux gonflant avec absence de certains critères. Le degré de certitude «peu probable» correspond à des symptômes très faibles synonymes soit de symptômes trompeurs ou d'un remblai pyriteux en début de réaction. Le degré de certitude «non» traduit tout simplement l'absence de phénomènes associés au gonflement.

Compte tenu des niveaux de certitude, les dommages observés ont été répartis selon trois catégories de problèmes:

- (a) problème de sulfatation;
- (b) problème de gonflement;
- (c) problème de sulfatation et de gonflement.

Le tableau 5 résume les critères de sélection des types de dommages.

Tableau 5. Types de problèmes

Critères	Types de problèmes		
	Sulfatation	Gonflement	Sulfatation / gonflement
Présence de sulfatation	Associé à la dalle de béton ou au mur de fondation	Non	Associé à la dalle de béton ou au mur de fondation
Amplitude des soulèvements	0 à 5 mm/m	>5 mm/m	>5 mm/m

La sulfatation peut être associée soit à la dalle de béton ou soit au mur de fondation. Pour être significatif, le gonflement doit être supérieur à 5 mm car la présence d'un puisard au garage ou bien le mauvais nivellement du béton au sous-sol peuvent être des indicateurs induisant des données erronées.

6.5.1 Bâtiments résidentiels visités

La répartition des cas visités à l'intérieur des villes étudiées, soit Boucherville, Longueuil et St-Bruno est reportée au tableau 6.

Un total de 224 maisons a été visité dans l'ensemble des trois municipalités retenues constituant ainsi 224 relevés visuels au sous-sol et 197 relevés visuels au garage. La municipalité de St-Bruno avec un total de 97 maisons a reçu le plus de visites puisque 93% des maisons auscultées possèdent un garage.

Tableau 6. Répartition des relevés visuels

Ville	Nombre de cas visités		
	Au sous-sol	Au garage	% de garage
Boucherville	86	72	84%
Longueuil	41	35	85%
St-Bruno	97	90	93%
Total	224	197	88%

6.5.2 Paramètres des bâtiments étudiés

Certains paramètres tels que l'âge, la valeur et le type de bâtiment ont été répertoriés ainsi que la durée d'acquisition de la bâtisse par le dernier propriétaire. L'âge des maisons visitées reporté à la figure 14 se situe entre 6 ans et 57 ans. À titre indicatif, aucune résidence construite au cours des cinq dernières années n'est impliquée dans cette estimation statistique. Une tendance multimodale apparaît et traduit l'évolution du degré de construction résidentielle au cours des dernières décennies.

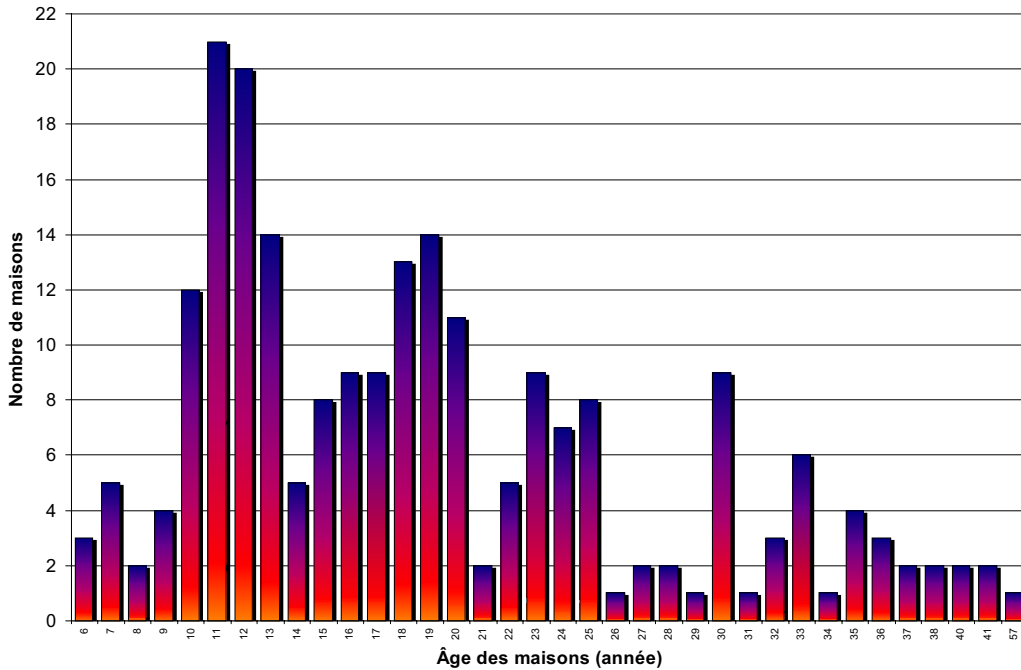


Figure 14. Nombre de maisons pour chaque âge

La figure 15 montre la distribution de tendance log-normale de la valeur inscrite au rôle municipal des maisons visitées. Le classement par tranches de 10 000\$ en partant à 50 000\$ jusqu'à 240 000\$ manifeste un maximum situé autour de 90 000-99 999\$.

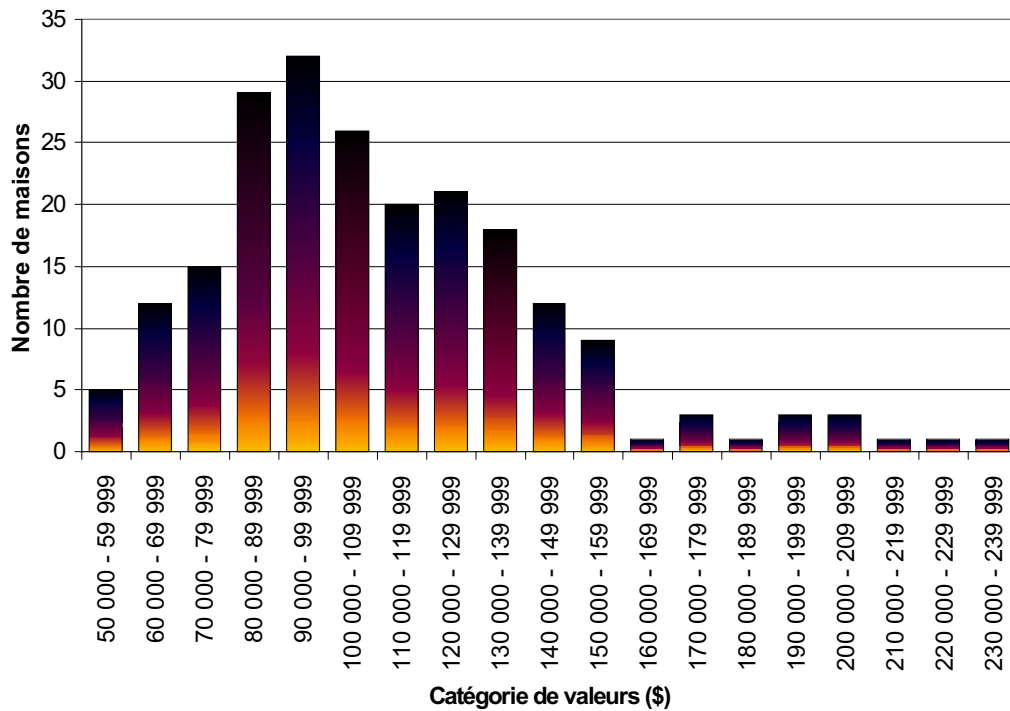


Figure 15. Distribution des valeurs inscrites au rôle municipal des maisons étudiées

À titre indicatif, les bâtiments résidentiels visités ont été classés en sept catégories dont la répartition est présentée au tableau 7.

Les deux principaux types de bâtiments rencontrés lors de l'investigation sont des cottages ainsi que des maisons unifamiliales suivis par des maisons désignée ici de type A, soit des maisons ayant un sous-sol seulement sous la moitié de la superficie totale du rez-de-chaussée. Par contre, l'autre partie de la superficie constituée d'une seule dalle de béton repose directement sur le sol. La dalle de béton sert de plancher à plusieurs pièces: le garage, une pièce en arrière, une salle de bain et une entrée.

La durée d'acquisition du bâtiment résidentiel par son dernier propriétaire a, comme référence finale, l'année 1999 durant laquelle a été réalisée l'investigation. Les résultats sont présentés à la figure 16 et la durée d'acquisition « 0 » signifie que le dernier propriétaire a fait l'acquisition de sa bâtisse au cours de la dernière année.

Tableau 7. Type de bâtiments visités

Type	Nombre
Cottage	112
Unifamilial	91
Type A	13
Duplex	3
Bloc appartement	1
Cottage semi-détaché	1
Triplex	1
Total	222

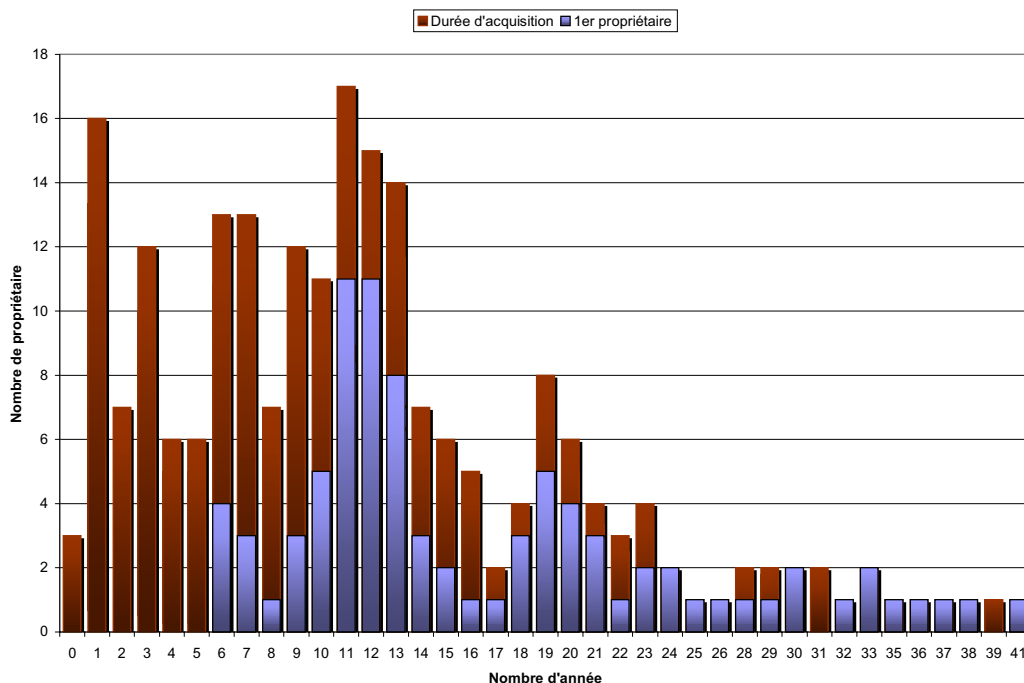


Figure 16. Durée d'acquisition des bâtiments résidentiels par le dernier propriétaire

Les deux pics observés à 11 ans et à 19 ans s'expliquent par le nombre important de maisons construites durant ces deux périodes dont les 2/3 des propriétaires possèdent encore leur maison. Le propriétaire avec la plus grande durée d'acquisition détient sa maison depuis plus de 41 ans et en est le premier propriétaire.

Tous les relevés visuels des sous-sols et des garages ont été classés selon leur potentiel de réactivité causé par la présence de pyrite et selon le type de problème diagnostiqué. Les relevés visuels ont été classés selon les cinq degrés de certitude prédéfinis. Les résultats sont classés par ville pour les deux endroits, soit le garage et le sous-sol et sont présentés aux tableaux 8 et 9.

Tableau 8. Classement des garages selon leur degré de certitude

Ville	Degré de certitude					Total
	Très probable	Probable	Peut-être	Peu probable	Non	
Boucherville	38	14	7	4	9	72
Longueuil	20	6	3	1	5	35
St-Bruno	59	17	3	4	7	90
Total	117	37	13	9	21	197
%	59%	19%	7%	5%	11%	100%

Tableau 9. Classement des sous-sols selon leur degré de certitude

Ville	Degré de certitude					Total
	Très probable	Probable	Peut-être	Peu probable	Non	
Boucherville	23	10	9	4	40	86
Longueuil	9	2	3	2	25	41
St-Bruno	17	12	3	5	60	97
Total	49	24	15	11	125	224
%	22%	11%	7%	5%	56%	100%

Il apparaît 2 fois plus de cas de garages affectés par les problèmes de remblai pyriteux que dans les sous-sols. La combinaison des degrés de certitude «très probable» et «probable» amènent le recensement de 154 cas problématiques de garages contre 73 cas de sous-sol.

Certaines résidences se caractérisent par deux endroits affectés par des problèmes de remblais pyriteux. Si, pour l'interprétation des données, seuls les endroits qualifiés avec un degré de certitude «très probable» ou «probable» sont intégrés, le tableau 10 met en relief le nombre de maisons, par villes où les dommages sont causés par un remblai pyriteux dans les deux endroits. Le même tableau englobe aussi le nombre de maisons n'ayant aucun signe perceptible de désordres reliés à un remblai pyriteux.

Tableau 10. Nombre de maisons ayant ou non des problèmes dans les deux endroits

Ville	Critère de classement		
	Très probable ou probable	Peu probable ou peut-être	Non
Boucherville	14	1	1
Longueuil	5	1	6
St-Bruno	19	1	2
Total	38	3	9

Ainsi, une maison sur cinq possédant un garage endommagé manifeste aussi des dommages associés au remblai pyriteux dans son sous-sol. 9 cas sur 224 ne présentent aucun signe de dommages associés à la pyrite.

7. DÉTERMINATION DES TYPES DE PROBLÈMES

Les relevés reflétant un certain potentiel de réactivité sont classés selon le type de problème visualisé et les dommages associés au remblai pyriteux sont aussi mentionnés. Les tableaux suivants rassemblent la compilation des résultats relatifs aux pièces du garage et du sous-sol.

Tableau 11. Distribution des types de problèmes dans les garages

Degré de certitude : très probable et probable								
Ville	Type de problème				Phénomène associé			
	Sulfatation	Gonflement	Sulfatation/ Gonflement	Total	Gel-dégel	Tassement/ affaissement	Autre	Total
Boucherville	0	45	7	52	3	3	0	6
Longueuil	0	25	1	26	2	2	0	4
St-Bruno	1	67	8	76	4	7	1	12
Total	1	137	16	154	9	12	1	22
%	1	89	10	100	6	8	1	14

Degré de certitude : peut-être et peu probable									
Ville	Type de problème					Phénomène associé			
	Sulfatation	Gonflement	Sulfatation/ Gonflement	N/A	Total	Gel- dégel	Tassement/ affaissement	Autre	Total
Boucherville	1	7	0	3	11	3	1	0	4
Longueuil	0	2	0	2	4	0	1	1	2
St-Bruno	1	4	0	2	7	1	2	2	5
Total	2	13	0	7	22	4	4	3	11
%	9	59	0	32	100	18	18	14	50

Tableau 12. Distribution des types de problèmes dans les sous-sols

Degré de certitude : très probable et probable								
Ville	Type de problème				Phénomène associé			
	Sulfatation	Gonflement	Sulfatation/ Gonflement	Total	Gel-dégel	Tassement/ affaissement	Autre	Total
Boucherville	1	23	9	33	0	1	0	1
Longueuil	0	6	5	11	0	0	0	0
St-Bruno	0	10	19	29	0	3	0	3
Total	1	39	33	73	0	4	0	4
%	1	53	45	100	0	5	0	5

Degré de certitude : peut-être et peu probable									
Ville	Type de problème					Phénomène associé			
	Sulfatation	Gonflement	Sulfatation/ Gonflement	N/A	Total	Gel- dégel	Tassement/ affaissement	Autre	Total
Boucherville	3	9	0	1	13	0	1	0	1
Longueuil	0	3	0	2	5	0	1	0	1
St-Bruno	0	6	1	1	8	0	0	0	0
Total	3	18	1	4	26	0	2	0	2
%	12	69	4	15	100	0	8	0	8

En résumé, les garages sont surtout affectés de problème de gonflement du remblai comparativement aux sous-sols qui sont touchés de façon équivalente par des problèmes de gonflement et de sulfatation/gonflement. De plus, c'est au garage que l'on retrouve le plus de phénomènes associés (gel-dégel, etc.), avec 14% des cas contre 5% au sous-sol. Selon les données recueillies, c'est à St-Bruno que les problèmes de sulfatation de la dalle de béton et/ou des murs de fondation sont majoritaires.

7.1 Endroits sulfatés

Les garages affectés par les problèmes de sulfatation peuvent avoir deux types de surface endommagée: la dalle de béton ou bien le mur de fondation ou les deux surfaces en même temps. En outre des soulèvements moyens, les tableaux 13 et 14 identifient le type de surface touchée par le problème de sulfatation observé dans le garage et dans le sous-sol.

Tableau 13. Surface affectée par la sulfatation au garage

Type de problème	Certitude: très probable et probable			Certitude: peut-être et peu probable		
	Surface affectée			Surface affectée		
	Mur	Dalle	Mur & Dalle	Mur	Dalle	Mur & Dalle
Sulfatation & Gonflement	2	14	0	0	0	0
Soulèvement moyen (mm/m)	22	21	-	-	-	-
Sulfatation	0	1	0	0	2	0
Soulèvement moyen (mm/m)	-	2	-	-	0	-

Tableau 14. Surface affectée par la sulfatation au sous-sol

Type de problème	Certitude: très probable et probable			Certitude: peut-être et peu probable		
	Surface affectée			Surface affectée		
	Mur	Dalle	Mur & Dalle	Mur	Dalle	Mur & Dalle
Sulfatation & Gonflement	2	29	2	1	0	0
Soulèvement moyen (mm/m)	15	12	26	1	-	-
Sulfatation	0	1	0	1	2	0
Soulèvement moyen (mm/m)	-	0	-	0	8	-

Au garage comme au sous-sol, les dalles de béton sont plus concernées par la sulfatation que les murs de fondation et les zones sulfatées sont en majorité associées à des problèmes de gonflement. Les gonflements se manifestent par des soulèvements variant en moyenne entre 12 et 26 mm.

7.2 Paramètres indicateurs de gonflement

Globalement, les dommages causés par le gonflement de remblais pyriteux peuvent être des paramètres indicateurs du degré d'avancement de la réaction. Dans cette optique, les signes les plus révélateurs, par ordre croissant en importance sont les soulèvements ponctuels de la dalle, les fissures en étoile, la présence de poudre blanchâtre ainsi que les fissures dans les murs de fondations.

7.2.1 Soulèvements ponctuels

Les mesures des soulèvements prises au garage et au sous-sol lors des relevés visuels sont présentées sous forme d'histogrammes aux figures 17 et 18. Les soulèvements sont catalogués par incréments de 5 mm en fonction du nombre de pièces affectées. Les soulèvements nuls correspondent aux endroits non affectés par un problème de remblai pyriteux.

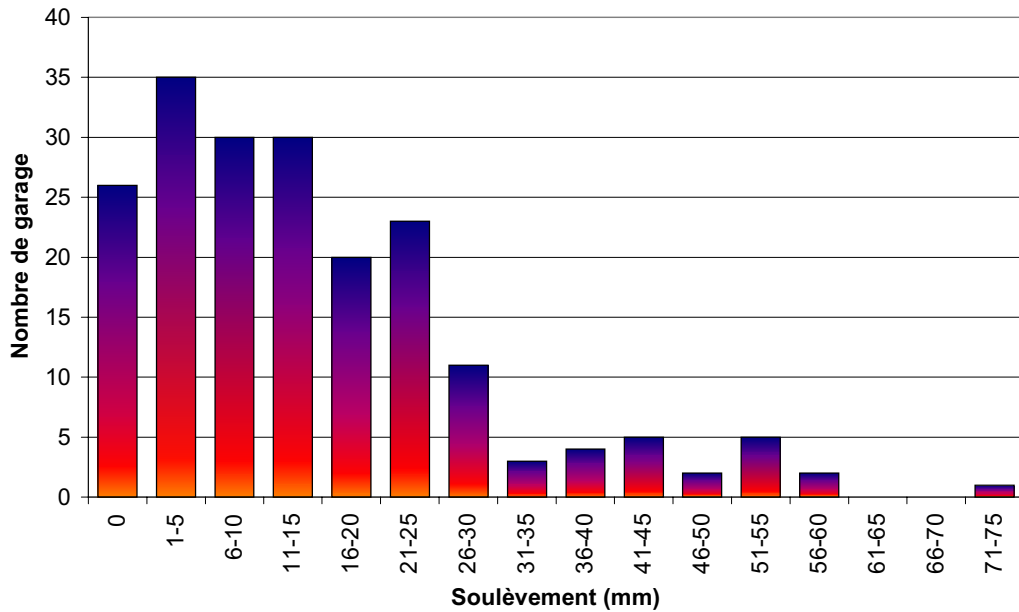


Figure 17 Soulèvement au garage

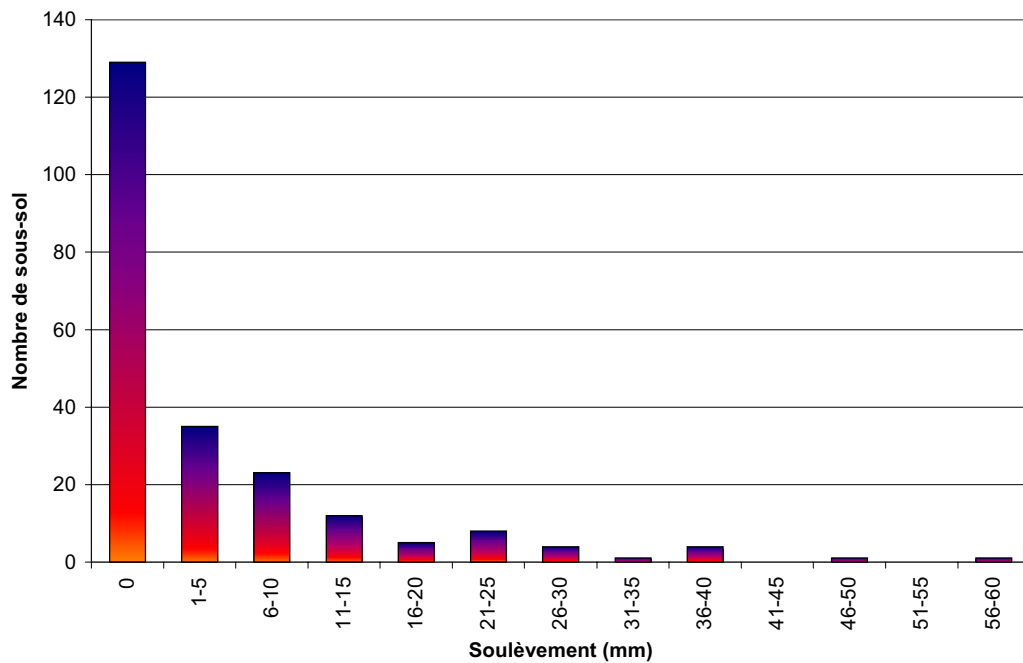


Figure 18 Soulèvement au sous-sol

Le point essentiel qui émerge de ces diagnostics montre que la majorité des soulèvements au garage se situent entre 1 et 30 mm avec un soulèvement maximal de 75 mm. Au sous-sol, une expansion de 1 à 15 mm implique la majorité des résidences avec un gonflement maximal estimé à 58 mm. Ainsi, l'amplitude moyenne des soulèvements au garage est deux fois plus importante qu'au sous-sol.

7.2.2 Fissures

Un autre symptôme susceptible d'être révélateur de la présence de remblai pyriteux sous la dalle de béton est la présence de fissures au niveau des soulèvements caractérisées par leurs formes et par l'ouverture des lèvres.

La classification des fissures a été établie selon la forme longitudinale ou en étoile à laquelle s'associent une distinction pour les microfissures et les fissures de retrait. Les tableaux 15 et 16 résument les résultats acquis pour le garage et le sous-sol.

Tableau 15. Types de fissures au garage

Degré de certitude : très probable et probable								
Type de fissure(s)	Fissure(s) observée(s)							
Plusieurs fissures longitudinales		X					X	X
1 ou 2 fissures longitudinales			X	X	X			
Plusieurs fissures en étoile	X	X						
1 ou 2 fissures en étoile			X			X		X
Total	84	26	11	9	9	8	4	3

Degré de certitude : peut-être et peu probable								
Type de fissure(s)	Fissure(s) observée(s)							
Plusieurs fissures longitudinales					X			
1 ou 2 fissures longitudinales	X		X	X				
Plusieurs fissures en étoile		X			X			
1 ou 2 fissures en étoile			X			X		
Microfissures				X			X	
Total	7	6	3	2	1	1	1	1

Tableau 16. Types de fissures au sous-sol

Degré de certitude : très probable et probable												
Type de fissure(s)	Fissure(s) observée(s)											
Plusieurs fissures longitudinales			X			X						
1 ou 2 fissures longitudinales				X	X		X	X				
Plusieurs fissures en étoile	X		X				X		X			
1 ou 2 fissures en étoile		X		X								
Microfissures									X	X		
Fissures de retrait								X				
Aucune fissure											X	
Total	36	8	7	6	6	2	1	1	1	1	2	2

Degré de certitude : peut-être et peu probable							
Type de fissure(s)	Fissure(s) observée(s)						
1 ou 2 fissures longitudinales	X						
Plusieurs fissures en étoile		X					
1 ou 2 fissures en étoile			X				
Microfissures				X	X		
Fissures de retrait				X			
Aucune fissure						X	
Total	4	4	4	1	5	3	5

Les fissures en forme d'étoile prédominent dans les deux endroits. On retrouve aussi, à côté des fissures en étoile, un grand nombre de fissures longitudinales. Au sous-sol, les surfaces visibles limitées avec moins de 30% de la surface dans 50% des cas, rendent l'interprétation difficilement exploitable. Au lieu de visualiser une fissure en étoile, seulement une de ses branches est observée ce qui amène à la classer dans les fissures longitudinales. Par contre, il est possible de ressentir des soulèvements à travers le revêtement du sol et constater d'autres symptômes pouvant amener à conclure à la présence possible d'un remblai pyriteux.

Les ouvertures des fissures mesurées en mm perpendiculairement aux lèvres ont été classées en quatre catégories principales à savoir, fine, moyenne, importante et très importante. Les tableaux 17 et 18 rassemblent les résultats relatifs aux fissures au garage et au sous-sol respectivement.

Tableau 17. Ouverture et colmatage des fissures au garage

Degré de certitude : très probable et probable				
Ouverture des fissures	Nombre	Pourcentage	Colmatée	Refissurée
Fine: moins de 1 mm	5	3%	2	2
Moyenne: entre 1 et 2 mm	18	12%	5	2
Importante: entre 2 et 5 mm	52	34%	12	5
Très importante: plus de 5 mm	71	46%	17	9
Non mentionnée	8	5%	6	1
Total	154	100%	42	19

Degré de certitude : peut-être et peu probable				
Ouverture des fissures	Nombre	Pourcentage	Colmatée	Refissurée
Fine: moins de 1 mm	2	9%	0	0
Moyenne: entre 1 et 2 mm	10	45%	0	0
Importante: entre 2 et 5 mm	7	32%	1	0
Très importante: plus de 5 mm	3	14%	0	0
Non mentionnée	0	0%	0	0
Total	22	100%	1	0

Tableau 18. Ouverture et colmatage des fissures au sous-sol

Degré de certitude : très probable et probable				
Ouverture des fissures	Nombre	Pourcentage	Colmatée	Refissurée
Fine: moins de 1 mm	6	8%	1	0
Moyenne: entre 1 et 2 mm	16	22%	1	1
Importante: entre 2 et 5 mm	24	33%	2	0
Très importante: plus de 5 mm	18	25%	1	1
Non mentionnée	9	12%	3	0
Total	73	100%	8	2

Degré de certitude : peut-être et peu probable				
Ouverture des fissures	Nombre	Pourcentage	Colmatée	Refissurée
Fine: moins de 1 mm	6	23%	0	0
Moyenne: entre 1 et 2 mm	8	31%	1	0
Importante: entre 2 et 5 mm	2	8%	0	0
Très importante: plus de 5 mm	1	4%	0	0
Non mentionnée	9	35%	0	0
Total	26	100%	1	0

L'ouverture des fissures et le nombre de fissures colmatées sont beaucoup plus importants au garage qu'au sous-sol et environ la moitié des fissures colmatées au garage ont manifesté des signes de nouvelles fissurations.

7.2.3 Poudre blanchâtre

La poudre blanchâtre observée au niveau des fissures et des joints dalle-mur est un autre indice de la présence d'un remblai pyriteux. Les tableaux 19 et 20 comparent la poudre blanchâtre des fissures et des joints du garage et du sous-sol des maisons visitées selon l'estimation réalisée lors des relevés visuels.

Tableau 19. Quantité de poudre blanchâtre aux fissures et aux joints du garage

Dans les fissures	Certitude : très probable et probable				Certitude : peut-être et peu probable			
	Aux joints dalle-mur				Aux joints dalle-mur			
	Aucune	Rare	Intermédiaire	Abondante	Aucune	Rare	Intermédiaire	Abondante
Aucune	50	8	6	4	8	1	2	1
Rare	26	21	5	1	3	4	1	0
Intermédiaire	12	0	7	4	1	0	1	0
Abondante	4	0	2	4	0	0	0	0

Tableau 20. Quantité de poudre blanchâtre aux fissures et aux joints du sous-sol

Dans les fissures	Certitude : très probable et probable				Certitude : peut-être et peu probable			
	Aux joints dalle-mur				Aux joints dalle-mur			
	Aucune	Rare	Intermédiaire	Abondante	Aucune	Rare	Intermédiaire	Abondante
Aucune	26	4	1	2	21	1	0	1
Rare	11	3	2	0	1	0	1	0
Intermédiaire	8	0	0	2	0	0	0	1
Abondante	8	1	3	2	0	0	0	0

Présente en quantité appréciable, la poudre blanchâtre peut être un indice. Malheureusement, la majorité des cas ne manifeste aucune trace quelle que soit la nature des sites d'accueil à savoir les fissures ou les joints.

7.2.4 Fissures des fondations

Ce paramètre a été abordé en distinguant les murs de fondation entourant le garage et les murs de fondation cernant le sous-sol. L'ouverture des lèvres de la fissure a été l'indice utilisé pour départager « degré mineur ou majeur » pour les fissures aux coins et entre les coins des fondations. Les résultats caractérisant les murs de fondation du garage et les murs de fondation du sous-sol sont rapportés aux tableaux 21 et 22 respectivement.

Tableau 21. Nombre de fissures dans les murs de fondation du garage

Fissures aux coins	Certitude : très probable et probable			Certitude : peut-être et peu probable		
	Fissures entre les coins			Fissures entre les coins		
	Aucune	Mineure	Majeure	Aucune	Mineure	Majeure
Aucune	22	20	19	7	4	2
Mineure	13	13	11	4	2	0
Majeure	26	20	10	1	1	1

Tableau 22. Nombre de fissures dans les murs de fondation du sous-sol

Fissures aux coins	Certitude : très probable et probable			Certitude : peut-être et peu probable		
	Fissures entre les coins			Fissures entre les coins		
	Aucune	Mineure	Majeure	Aucune	Mineure	Majeure
Aucune	28	21	6	12	7	1
Mineure	4	8	0	2	2	1
Majeure	3	3	0	0	1	0

Les murs de fondation du garage manifestent le plus de fissures lesquelles sont classées majoritairement comme majeures, contrairement aux murs de fondation du sous-sol. Dans l'ensemble, les fissures sont localisées souvent entre les coins plutôt qu'aux coins, surtout en ce qui concerne les murs de fondation du sous-sol.

Lors des relevés visuels, le niveau de déplacement des fissures dans les murs de fondation a aussi été noté. Au garage seulement, la position du mur de fondation fissuré (mur de côté, de l'avant ou de l'arrière) a été également relevée. Le tableau 23 illustre l'amplitude des déplacements des lèvres des fissures des murs de fondation du garage en fonction de leur emplacement.

Tableau 23. Identification du mur de fondation affecté par la fissuration au garage

Degré de certitude : très probable et probable									
Déplacement	Mur affecté								Total
	Avant	Côté	Arrière	N/A	Av.+Côté	Av.+Arr.	Côté+Arr.	Les 3	
Aucun dépl. perceptible	0	0	0	29	0	0	0	0	29
Faible: moins de 1 mm	0	7	0	2	0	1	0	0	10
Moyen: entre 1 et 2 mm	0	19	1	1	2	0	6	0	29
Important: entre 2 et 5 mm	3	20	1	3	3	1	5	1	37
Très important: plus de 5 mm	3	8	1	2	5	1	2	1	23
N/A	-	-	-	4	-	-	-	-	4
Total	6	54	3	41	10	3	13	2	132

Degré de certitude : peut-être et peu probable									
Déplacement	Mur affecté								Total
	Avant	Côté	Arrière	N/A	Av.+Côté	Av.+Arr.	Côté+Arr.	Les 3	
Aucun dépl. perceptible	0	0	0	7	0	0	0	0	7
Faible: moins de 1 mm	0	2	0	0	0	0	0	0	2
Moyen: entre 1 et 2 mm	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Important: entre 2 et 5 mm	0	3	0	0	0	0	0	0	3
Très important: plus de 5 mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N/A	-	-	-	2	-	-	-	-	2
Total	0	6	0	9	0	0	0	0	15

Les fissures se situent majoritairement sur le mur de fondation du côté du garage. L'ensemble des fissures est assez bien réparti dans les cinq niveaux de déplacement. Toutefois, le plus grand nombre de déplacements se situe dans un niveau important. Il est aussi possible de comparer l'importance des fissures aux coins et entre les coins avec le niveau de déplacement mesuré. Les tableaux 24 et 25 présentent les données recueillies pour le garage et pour le sous-sol.

Tableau 24. Déplacement des fissures des murs de fondation au garage

Degré de certitude : très probable et probable								
Fissures aux coins	Fissures entre les coins	Déplacement						Total
		aucun	faible	moyen	important	Très important	N/A	
Aucune	Mineure(s)	10	4	2	2	2	0	20
	Mineure(s)	3	0	4	9	2	1	19
Mineure(s)	Aucune	6	1	3	1	0	1	12
	Mineure(s)	4	1	5	1	2	0	13
	Majeure(s)	1	0	5	2	2	1	11
	N/A	1	0	0	0	0	0	1
Majeure(s)	Aucune	3	0	3	10	7	1	24
	Mineure(s)	1	4	3	7	5	0	20
	Majeure(s)	0	0	3	5	2	0	10
	N/A	0	0	1	0	1	0	2
Total		29	10	29	37	23	4	132

Degré de certitude : peut-être et peu probable								
Fissures aux coins	Fissures entre les coins	Déplacement						Total
		aucun	faible	moyen	important	Très important	N/A	
Aucune	Mineure(s)	1	2	0	0	0	1	4
	Mineure(s)	1	0	0	1	0	0	2
Mineure(s)	Aucune	3	0	1	0	0	0	4
	Mineure(s)	1	0	0	0	0	1	2
	Majeure(s)	0	0	0	0	0	0	0
Majeure(s)	Aucune	0	0	0	1	0	0	1
	Mineure(s)	1	0	0	0	0	0	1
	Majeure(s)	0	0	0	1	0	0	1
Total		7	2	1	3	0	2	15

Tableau 25. Déplacement des fissures des murs de fondation au sous-sol

Degré de certitude : très probable et probable								
Fissures aux coins	Fissures entre les coins	Déplacement						Total
		aucun	faible	moyen	important	Très important	N/A	
Aucune	Mineure(s)	21	0	0	0	0	0	21
	Mineure(s)	4	1	0	0	0	1	6
Mineure(s)	Aucune	4	0	0	0	0	0	4
	Mineure(s)	8	0	0	0	0	0	8
	Majeure(s)	0	0	0	0	0	0	0
Majeure(s)	Aucune	2	1	0	0	0	0	3
	Mineure(s)	2	0	1	0	0	0	3
	Majeure(s)	0	0	0	0	0	0	0
Total		41	2	1	0	0	1	45

Degré de certitude : peut-être et peu probable								
Fissures aux coins	Fissures entre les coins	Déplacement						Total
		aucun	faible	moyen	important	Très important	N/A	
Aucune	Mineure(s)	6	0	0	0	0	1	7
	Mineure(s)	1	0	0	0	0	0	1
Mineure(s)	Aucune	2	0	0	0	0	0	2
	Mineure(s)	2	0	0	0	0	0	2
	Majeure(s)	1	0	0	0	0	0	1
Majeure(s)	Aucune	0	0	0	0	0	0	0
	Mineure(s)	1	0	0	0	0	0	1
	Majeure(s)	0	0	0	0	0	0	0
Total		13	0	0	0	0	1	14

Le nombre important de données recueillies suggère que le premier tableau englobant les déplacements au garage est susceptible d'amener une approche plus cohérente. Cependant, il ressort de l'analyse que plusieurs fissures mineures sont associées à des déplacements importants tandis que plusieurs fissures majeures se caractérisent par des déplacements très restreints ou nuls. Par conséquent, il est difficile d'établir une corrélation entre l'ouverture et le déplacement d'une fissure.

Le deuxième tableau du garage (tableau 24) comporte moins de données (15 contre 132) et ne révèle aucune fissure à déplacement très important.

Les deux tableaux du sous-sol renferment un total de cinquante-neuf données de déplacements parmi lesquelles cinquante-quatre ne présentent aucun déplacement significatif des fissures relevées.

8. INSTRUMENTATION DES RÉSIDENCES ET SUIVI DU GONFLEMENT

De l'ensemble des maisons visitées au mois de mars 1999 et au cours de l'été 1999, cinq bâtiments résidentiels ont été instrumentés le 5 août 1999 pour suivre l'évolution expansive due au remblai. Ce choix est justifié par le fait que ces résidences présentaient des problèmes de fissuration et de soulèvement dans le garage. Les dommages observés sont imputés sans aucune ambiguïté au remblai de fondation. Des analyses plus poussées des résultats d'instrumentation peuvent être consultées dans l'article de Ballivy et al. (2002).

8.1 Type d'instruments

Deux types de fissuromètres ont été retenus pour le projet d'instrumentation soit le Fissuro-thermo-logger et le fissuromètre mécanique visuel Tale-Tell. De plus, dans chacune des maisons, un hygromètre et un thermomètre ont été installés près des fissuromètres.

8.1.1 Fissuromètre de type Fissuro-Thermo-Logger

Le Fissuro-thermo-logger est un capteur enregistreur autonome destiné à la surveillance simultanée des variations d'ouverture d'une fissure ou du déplacement relatif entre deux parties d'ouvrage et de la température ambiante.



Figure 19. Fissuromètre Thermo-Logger

Le fissuromètre muni d'une sonde de température est alimenté à l'aide d'une pile au lithium. Le boîtier comprend un capteur de déplacements de type résistif, un circuit électronique de conditionnement et une EEPROM de stockage des données pilotée par un microcontrôleur. L'acquisition des données se fait automatiquement à toutes les deux heures.

8.1.2 Fissuromètre de type Tale-Tell

Le fissuromètre Tale-Tell est constitué de deux plaques superposées dont celle du bas est graduée au millimètre près tandis que la plaque transparente du dessus est munie d'un curseur. Les fissuromètres installés perpendiculairement à la fissure mesurent tout mouvement produit. Quatre sortes de Tale-Tell ont été mis en oeuvre.

- 1) Le Tale-Tell standard en polyacrylique enregistre les mouvements relatifs horizontaux et verticaux de part et d'autre d'une fissure (Fig. 20).
- 2) Le Tale-Tell de coin en Polychlorure de vinyle rigide enregistre les mouvements relatifs horizontaux et verticaux de part et d'autre d'une fissure de coin (Fig. 21).
- 3) Le Tale-Tell de surface en PVC rigide enregistre les mouvements relatifs du plancher par rapport à une structure verticale (Fig. 22).
- 4) Le Tale-Tell de déplacement en PVC rigide enregistre les mouvements relatifs de part et d'autre d'une fissure lorsqu'une surface bouge en dehors du plan de l'autre. Les mesures sont prises perpendiculairement à la surface (Fig. 23).

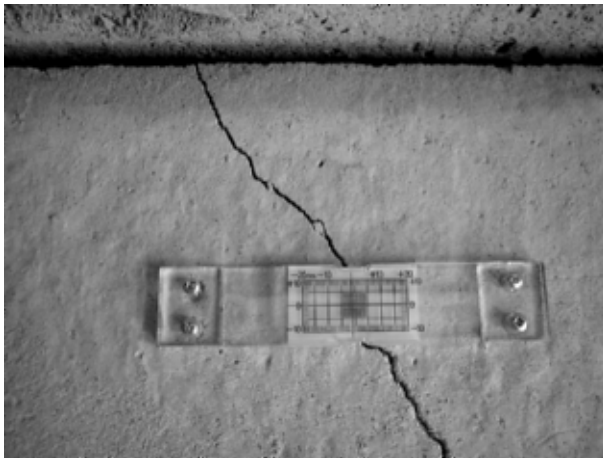


Figure 20. Tale-Tell standard



Figure 21. Tale-Tell de coin



Figure 22. Tale-Tell de surface

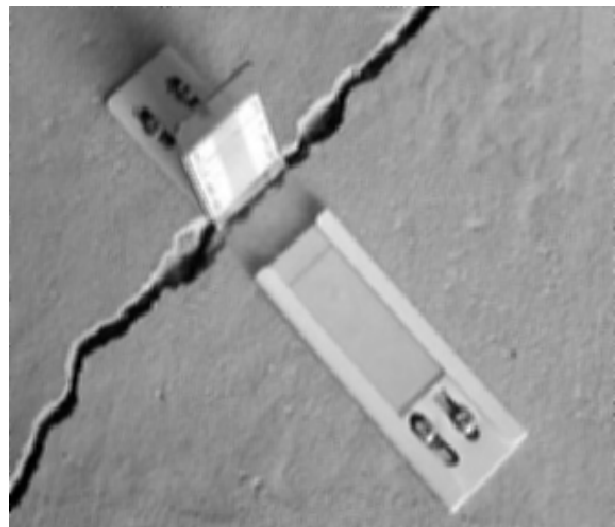


Figure 23. Tale-Tell de déplacement

Les fissuromètres installés dans chacune des maisons ont été choisis afin de répondre aux attentes basées sur les dommages rencontrés. Le tableau 26 indique la répartition et le nombre des instruments dans chaque résidence sélectionnée.

Pour de plus amples renseignements, des données très détaillées sont rapportées dans le mémoire de maîtrise de Caroline Pépin (2000). Néanmoins, pour les besoins de ce rapport, seulement trois cas sur cinq, soit La Prairie 1 et 2 ainsi que Boucherville sont reportés. Plus de détails sur les 5 cas se trouve dans l'article de Ballivy et al. (2002). Les figures suivantes présentent une vue d'ensemble des cas retenus dans lesquels sont cartographiées les fissures, le type d'instrumentation et leur emplacement. En ce qui concerne le suivi du gonflement, l'évolution donnée se rapporte seulement au thermo-Logger.

Tableau 26. Inventaire des fissuromètres

Localisation des résidences	Fissuromètre Tale-Tell				Fissuro-thermo-logger	Total #2
	standard	de coin	de surface	de déplacement		
St-Bruno #1	1			1		2
St-Bruno #2	2					2
La Prairie #1	1				1	2
La Prairie #2				1	1	2
Boucherville	1	1	1		1	4
Total #1	5	1	1	2	3	12

Total #1 : Nombre d'instruments utilisés pour chaque type de fissuromètre.

Total #2 : Nombre d'instruments installés chez chaque propriétaire.

vue en plan

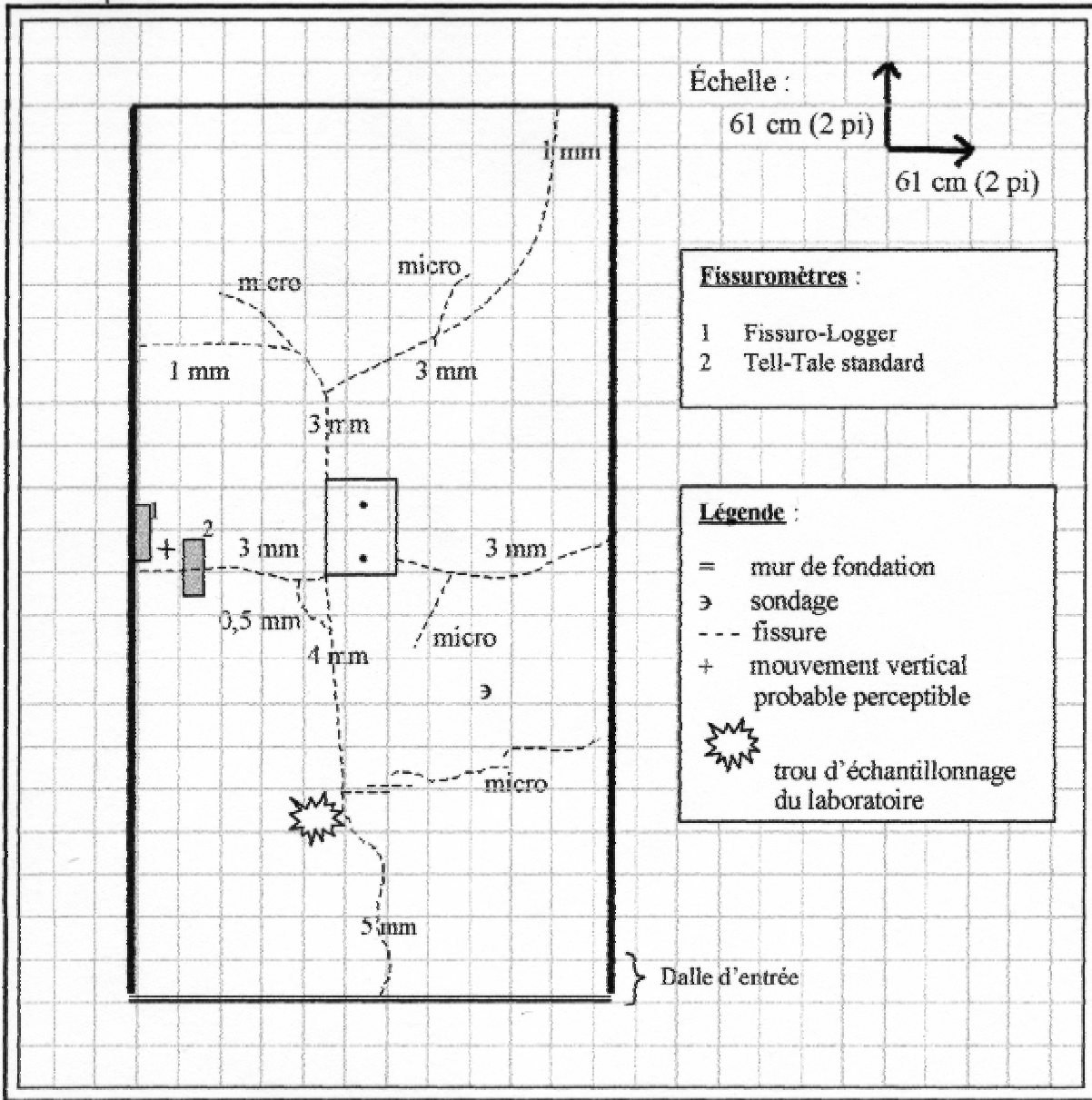


Figure 24. Cartographie des fissures et positionnement des instruments pour La Prairie #1

vue en plan

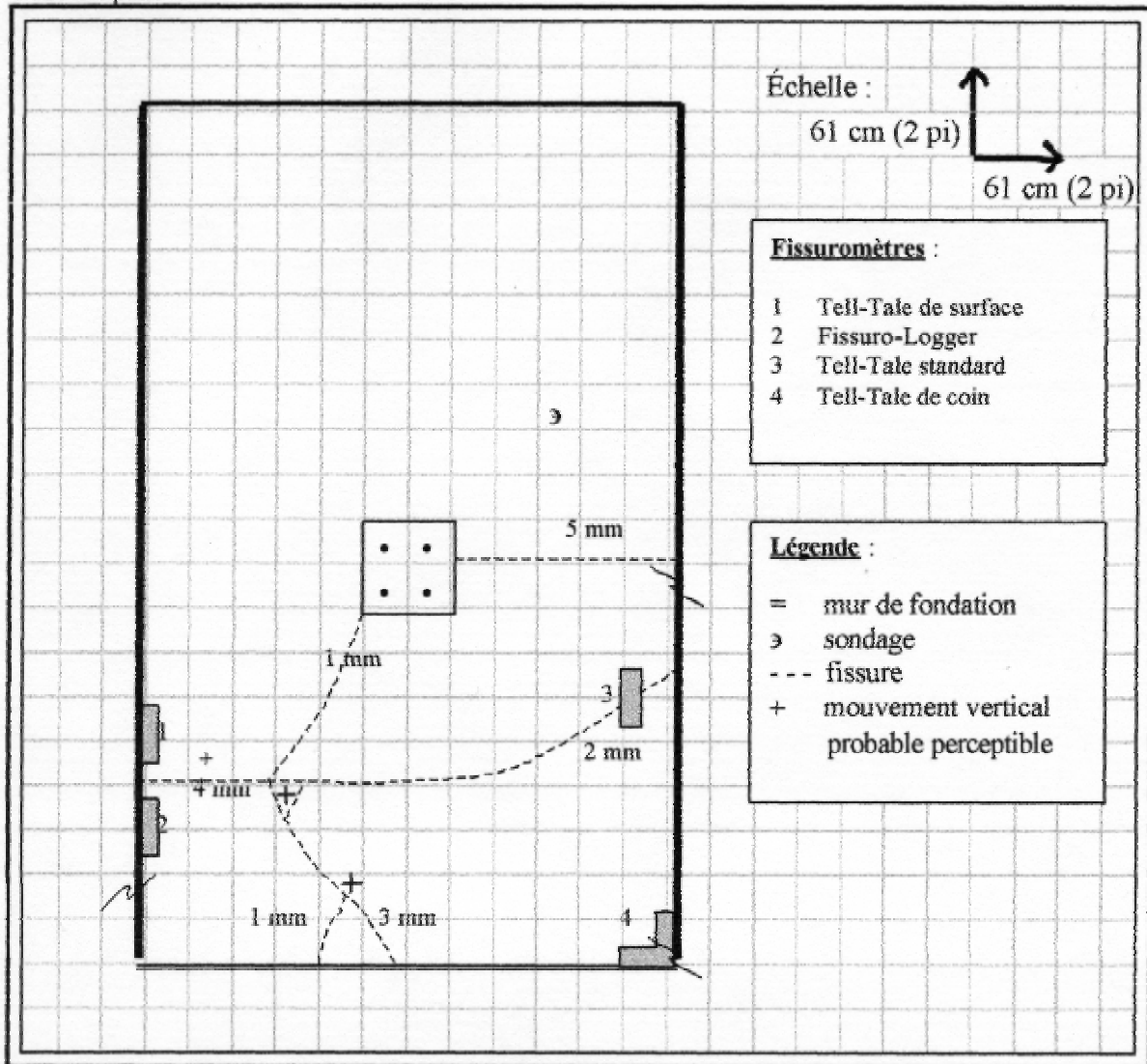


Figure 25. Cartographie des fissures et positionnement des instruments pour Boucherville

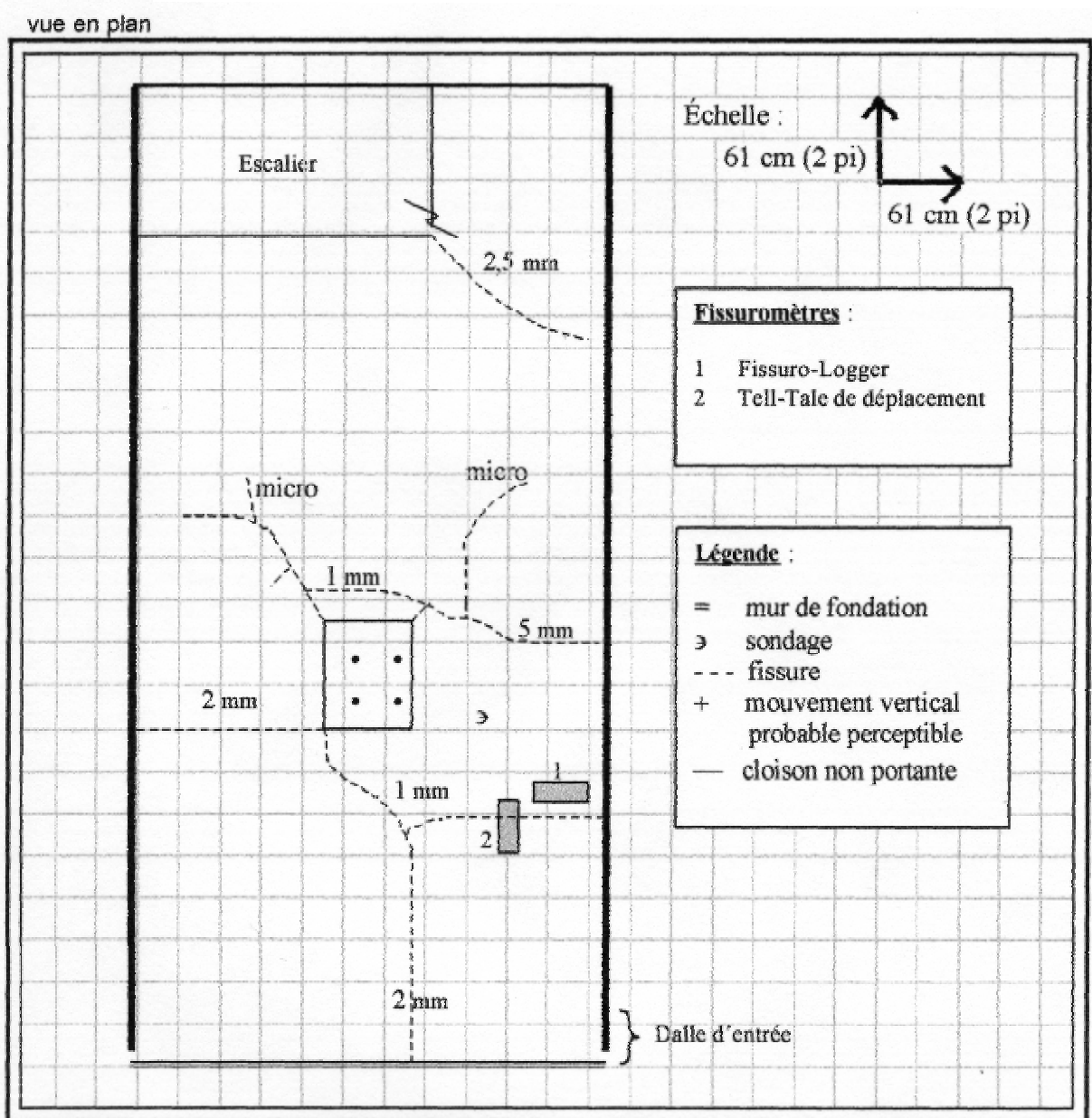


Figure 26. Cartographie des fissures et positionnement des instruments pour La Prairie #2

8.2 Suivi du gonflement dans les résidences

Le suivi réalisé durant une période d'environ huit mois a concerné le soulèvement d'une dalle, le déplacement de la fondation et la mesure de l'ouverture d'une fissure dans les trois résidences retenues à savoir La Prairie 1, Boucherville et La Prairie 2 et qui sont âgées de 5, 7 et 8 ans respectivement (Fig. 27, 28 et 29). Comme il a été déjà mentionné, pour plus d'information concernant l'ensemble des instruments installés, la consultation du mémoire de maîtrise de Caroline Pépin (2000) est recommandée.

Installé sur la partie latérale de la dalle tout en supposant que le mur de la fondation est stable, le fissuromètre révèle un tassement maximal d'environ 7 mm ce qui équivaut à environ 1 mm/mois. Cependant et selon le principe du bras de levier, ce tassement latéral reflète en réalité un gonflement au centre de la dalle.

Le déplacement enregistré au niveau de la fondation après huit mois de suivi atteint environ 1 mm avec une certaine fluctuation durant la période hivernale. La vitesse moyenne du déplacement relevée est d'environ $4,5 \cdot 10^{-3}$ mm/j.

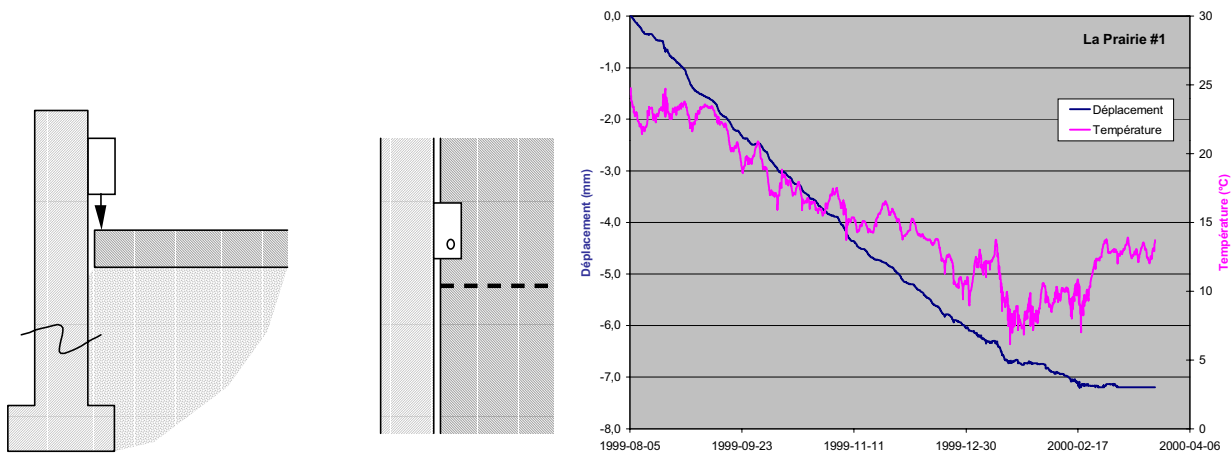


Figure 27. Mesure du soulèvement de la dalle (La Prairie 1)

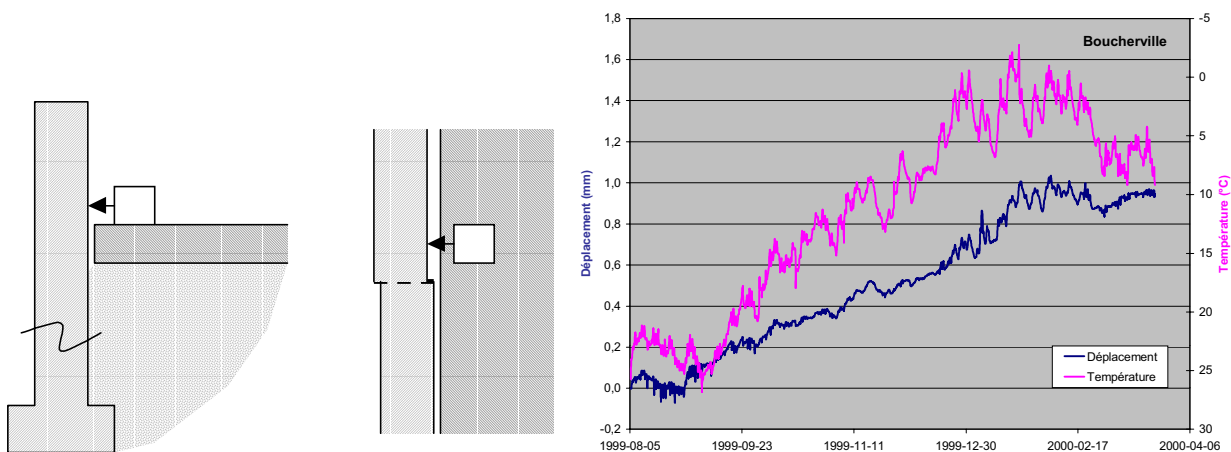


Figure 28. Mesure du déplacement de la fondation (Boucherville)

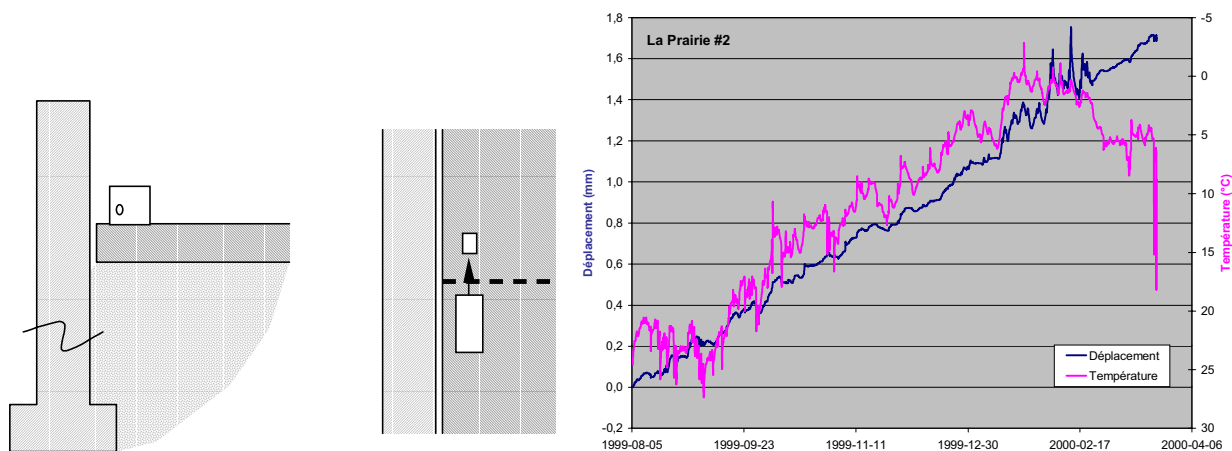


Figure 29. Mesure de l'ouverture d'une fissure (La Prairie 2)

L'évolution de l'ouverture de la fissure suit une tendance progressive et régulière pour atteindre une valeur maximale de l'ordre de 1,7 mm, ce qui correspond à une vitesse moyenne de $6,4 \cdot 10^{-3}$ mm/j. Cependant, l'expansion semble se poursuivre de façon continue sans montrer de signe d'interruption.

Des carottages réalisés au sein du remblai des trois résidences ont permis de récupérer des lots de granulats ainsi que des carottes de béton en vue d'analyses physico-chimique et mécanique. Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau 27.

Hormis les granulats échantillonnés dans la résidence 3, les granulats récupérés au niveau des résidences 1 et 2 sont constitués pratiquement de shales tenus pour responsables des dommages causés dans les garages. Toutefois et malgré une teneur de 38,2% en shale, l'auscultation de la résidence 3 a révélé l'existence de dommages dont l'ampleur dépasse ceux observés dans les autres résidences. Cette particularité semble être liée à la nature du remblai où l'association du shale avec la syénite (roche silicatée) serait à l'origine d'une certaine synergie entraînant ainsi, une multiplication accrue de la réactivité. Les teneurs résiduelles en soufre laissent penser que le processus de gonflement peut se poursuivre tant que les carbonates, sources de neutralisation, sont disponibles et en quantités suffisantes. Cependant, les silicates et les silico-aluminates sont aussi des sources consommatrices d'acidité et peuvent contribuer en partie à l'expansion.

Tableau 27. Caractéristiques physico-chimiques des granulats

Échantillon	Analyse pétrographique	Granulométrie	Soufre total (%)	SO42- (mg/kg)	Carbone total (%)
Résidence 1	Shale 99,9%	0-14 mm	2,52	7770	0,90
Résidence 2	Shale 95,6%, roche, 3,1%, calcaire	0-28 mm	2,55	5420	0,98
Résidence 3	Shale 38,2%, Syénite 52,7%	0-28 mm	1,76	5300	1,07

Les carottes récupérées (Fig. 30) ont été soumises à une auscultation sonique à l'aide d'un oscilloscope dynamique et les résultats obtenus sont reportés dans le tableau 28. En se fiant aux références reportées dans le tableau 29, les trois bétons seraient d'une qualité moyenne selon la classification puisque les vitesses obtenues sont incluses entre 3000 et 3500 m/s, ce qui correspondrait à des résistances à la compression inférieures à 20 MPa:



La Prairie 1



Boucherville



La Prairie 2



Figure 30. Carottes récupérées dans les résidences La Prairie 1, Boucherville et La Prairie 2

Tableau 28. Résultats des essais soniques

Échantillon	Vitesse longitudinale (m/s)
La Prairie 148	3126
La Prairie 149	3207
Boucherville 150	3176

Tableau 29. Qualité du béton selon l'essai sonique

Vitesse longitudinale (m/s)	Classification du béton
$V_L > 4500$	Excellent
$3500 < V_L < 4500$	Bon
$3000 < V_L < 3500$	Moyen
$2000 < V_L < 3000$	Pauvre
$V_L < 2000$	Très pauvre

8.3 Vérification de la présence bactérienne dans les remblais

La vérification de la présence bactérienne a été réalisée selon un protocole opératoire utilisant les échantillons récupérés dans les trois remblais. Sans être trop explicite, il apparaît à l'analyse de l'évolution reportée dans les figures suivantes une diminution du pH et un accroissement du potentiel d'oxydo-réduction avec le temps (Fig. 31, 32, 33). Il est à signaler que les courbes du pH correspondent à ceux d'un milieu de culture pour la Thiobacillus Thioparus et le potentiel d'oxydoréduction est caractéristique des Ferrooxidans. Le premier paramètre accuse une réduction pour atteindre des valeurs acides inférieures à 2. Cependant, le potentiel d'oxydo-réduction révèle un accroissement avec le temps, comportement indicateur de l'oxydation du Fe^{2+} en Fe^{3+} pour aboutir à des valeurs dépassant 400 mV. Ce comportement indique la présence de micro-organismes tels que les Thiobacillus Ferrooxidans et la Thioparus responsables de l'acte catalytique dans la réaction d'oxydation des sulfures. Ces types de bactéries, inoffensives, sont naturellement présentées en milieu acide.

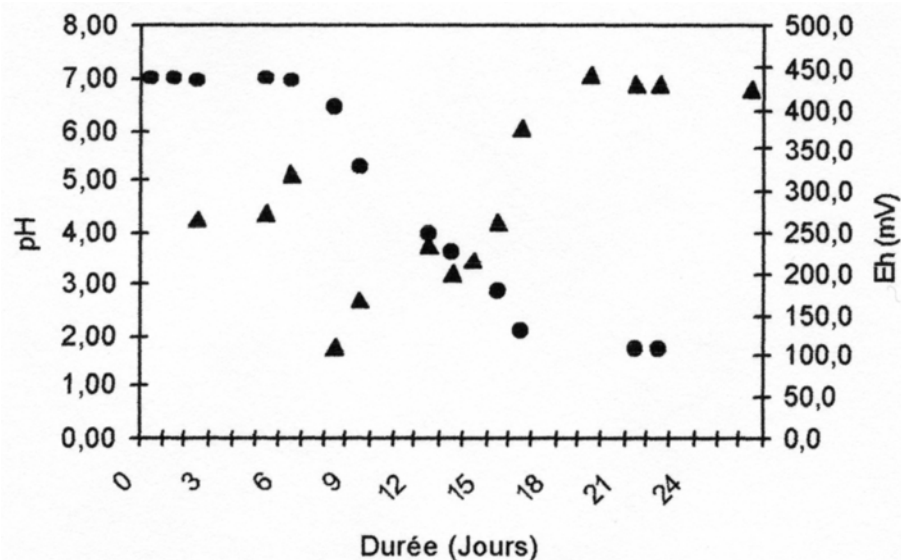


Figure 31. Évolution du pH et du potentiel d'oxydo-réduction pour La Prairie 1

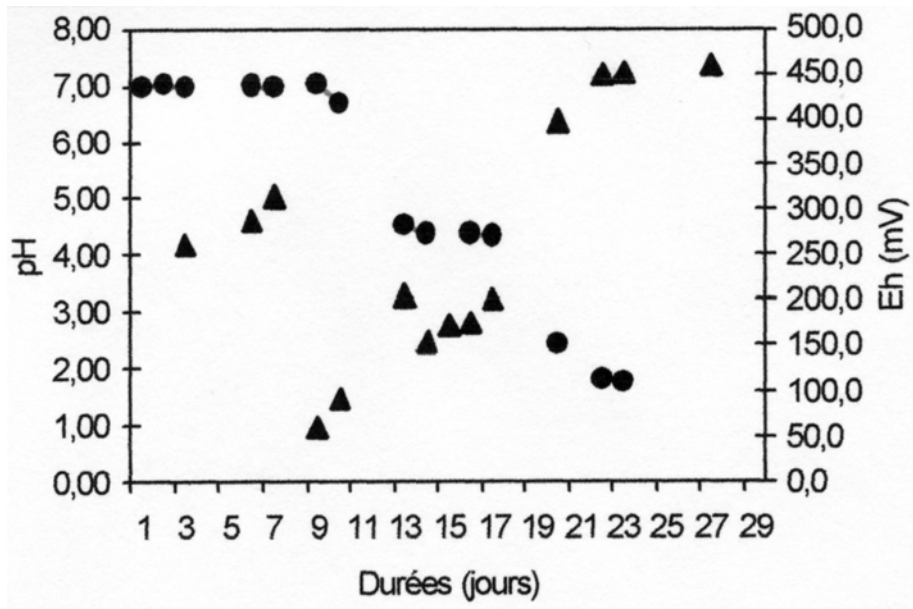


Figure 32. Évolution du pH et du potentiel d'oxydo-réduction pour Boucherville

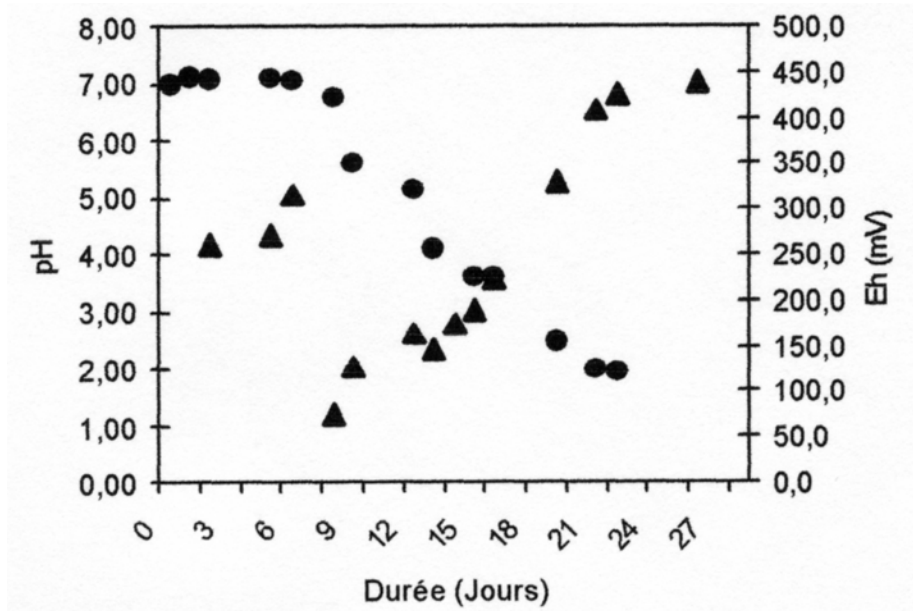


Figure 33. Évolution du pH et du potentiel d'oxydo-réduction pour La Prairie 2

9. CONCLUSIONS

Une auscultation de 224 résidences a été réalisée sur la Rive-Sud de Montréal principalement dans les municipalités de Longueuil, Boucherville et Saint-Bruno-de-Montarville. Celle-ci comprend 224 relevés visuels au sous-sol et 197 relevés visuels au garage. L'âge des maisons, essentiellement des cottages et des maisons unifamiliales, se situe entre 6 et 57 ans pour une valeur oscillant entre 50 000 \$ et 235 000 \$ dont la majorité se situe entre 80 000\$ et 100 000\$.

Selon le degré de certitude, le classement des données a permis une distribution des cas de garages et des sous-sols conformément à la répartition suivante:

Endroits	Degré de certitude		
	Très probable et probable	Peut-être et peu probable	Non
Garage	154	22	21
Sous-sol	73	26	125

En considérant les degrés de certitude très probable et probable, les types de problèmes suivants ont été répertoriés dans les garages et les sous-sols:

Endroits	Degré de certitude		
	Très probable et probable	Peut-être et peu probable	Non
Garage	1%	89%	10%
Sous-sol	1%	53%	45%

Les garages sont principalement affectés par des problèmes de gonflement tandis que les sous-sols sont touchés dans des ratios presque égaux par des problèmes de gonflement et de sulfatation/gonflement. Le gonflement accompagnant la sulfatation peut provenir soit du gonflement du remblai sous la dalle de béton ou du gonflement de la dalle de béton (délamination).

L'étude des principaux symptômes a premièrement 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 aucun soulèvement dans près de 58% des cas.

Les fissures les plus souvent rencontrées sont en étoile et longitudinales dans les garages et seulement en étoile dans les sous-sols. Devant des degrés de certitude très probable et probable, l'ouverture des fissures au garage oscille d'importante (2-5 mm) à très importante (>5 mm) dans 80% des cas contre 58% des cas au sous-sol.

La présence de poudre blanchâtre au niveau des fissures et des joints dalle-mur est rarement observée au garage comme au sous-sol. Toutefois, il est possible que cette poudre ait été enlevé par les propriétaires avant les visites par souci d'hygiène ou de propreté.

Au garage, on retrouve dans plus de 85% des cas de fissuration dans les murs de fondation avec un degré de certitude très probable et probable, des fissures mineures

et/ou majeures. Au sous-sol, les fissures sont souvent absentes ou bien mineures et peuvent fréquemment être imputées à un autre phénomène qu'à celui des remblais.

Ainsi, les symptômes les plus révélateurs sont les suivants pour chacun des endroits :

Garage: - Soulèvements de la dalle
- Fissures en étoile et longitudinales dans la dalle
- Fissures dans les murs de fondation

Sous-sol: - Soulèvements de la dalle
- Fissures en étoile dans la dalle

Les maisons de type A se distinguent particulièrement par rapport aux autres types de maisons par les dommages dus aux remblais de fondation. Cette particularité est reliée au fait qu'elles ont un sous-sol seulement sous la moitié de la superficie totale du rez-de-chaussée. Par contre, l'autre partie de la superficie constituée d'une seule dalle de béton repose directement sur le sol. La dalle de béton sert de plancher à plusieurs pièces: le garage, une pièce en arrière, une salle de bain et une entrée.

Les résidences soumises à une investigation plus poussée montrent que le processus de gonflement est imputé à la présence de remblais pyriteux. L'expansion générée ne semble pas présenter de signe de ralentissement et elle se poursuivra tant que les sulfures sont disponibles dans les granulats et que les conditions de température et d'humidité demeurent similaires dans le remblai. Pour ces résidences et pour limiter les dommages, il serait raisonnable de procéder au remplacement du remblai par un autre granulats certifié non gonflant selon la procédure CTQ M100.

10. RECOMMANDATIONS

L'analyse statistique et l'interprétation des données qui en découle compte tenu de ce rapport sont valables uniquement pour l'ensemble des maisons visitées dans les trois villes sélectionnées soit Longueuil, Boucherville et Saint-Bruno-de-Montarville. Toute extrapolation doit être prise avec beaucoup de précaution; cependant, les enseignements qui en découlent peuvent être une source d'information très utile.

Considérant que les nouvelles constructions de résidences unifamiliales devraient utiliser le granulat DB (Granulat sous dalle de béton), l'utilisation d'un coupe-vapeur et d'un ciment résistant aux sulfates est fortement recommandée, surtout dans le cas des granulats de type cornéenne (Saint-Bruno) afin d'éviter la sulfatation. L'épaisseur de la dalle en béton devrait être au minimum 10 cm avec une résistance à la compression d'au moins 20 MPa.

Les shales ou schistes pyriteux sont totalement exclus d'une éventuelle utilisation. Dans les cas existants, il faudrait prévoir leur substitution par d'autres granulats non gonflants. Dans le cas des remblais non compactés, donc avec une certaine porosité (indice du vide), il est envisageable d'avoir recours à des injections à base de produits scellants tels que les ciments résistants aux sulfates pour arrêter le gonflement. Cependant, cette procédure est recommandée pour les sous-sols où se trouve habituellement de la pierre nette avec une épaisseur de remblais plus faible que dans le cas des garages. Le lecteur avide d'en connaître plus sur le sujet peut consulter un rapport produit par l'Université de Sherbrooke à l'intention de la SCHL et intitulé « Neutralisation du potentiel de gonflement des remblais de fondation par des injections de coulis spéciaux ».

11. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BALLIVY, G., BELLALOU, A. (1997) Mise en évidence de divers mécanismes de gonflement et mise en garde pour la conception des fondations, Colloque AEG-RPPG, Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement, Laval, Québec, 11 p.
- BALLIVY, G., RIVARD, P., PÉPIN, C., TANGUAY, M.G., DION, A. (2002) Damages to residential buildings related to pyritic rockfills: field results of an investigation on the south-shore of Montréal, Québec, Canada, *Revue canadienne de génie civil*, Vol. 29, no 2, p.246-255.
- BÉRARD, J. (1970) Black Shale Heaving at Ottawa, Canada : Discussion, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 7, p.113-114.
- BÉRARD, J., ROUX, R., DURAND, M. (1975) Performance of Concrete Containing a Variety of Black Shale, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 2, p.58-65.
- BÉRARD, J. (1997) Des désordres sulfatiques, Colloque AEG-RPPG, Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement, Laval, Québec, 11 p.
- BÉRUBÉ, M.A., LOCAT, J., GÉLINAS, P., CHAGNON, J.Y. (1986) Black Shale Heaving at Sainte-Foy, Quebec, Canada, *Canadian Journal of Earth Sciences*, Vol. 23, p.1774-1781.
- 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, 40 p.
- COMITÉ TECHNIQUE QUÉBÉCOIS D'ÉTUDE DES PROBLÈMES DE GONFLEMENT ASSOCIÉS À LA PYRITE (mai 1999) Protocole d'expertise sur bâtiments existants, document CTQ-M200, version 1.0, 32 p.
- CÔTÉ, F. (1990) Expansion de shales pyriteux Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, Département de génie minéral, École Polytechnique de Montréal, 177p.
- DIVET L. (1996) Activité sulfatique dans les bétons consécutive à l'oxydation des pyrites contenues dans les granulats, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, p. 45-63;
- GILLOTT, J.E., PENNER, E., EDEN, W.J. (1977) Microstructure of billings shale and biochemical alteration products, Ottawa, Canada, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 11, no 4, p.482-489.
- GRATTAN-BELLEW, P.E., McROSTIE, G.C. (1982) Evaluation of Heave Prevention Methods for Floors founded on Shale in the Ottawa Region, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 19, p.108-111.
- MORGENSTERN, N.R. (1970) Black Shale Heaving at Ottawa : Discussion, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.7, p.114-115.
- MOURM, J., ROSENQVIST, I.T. (1959) Sulfate Attack on Concrete in the Oslo Region, *Journal of the American Concrete Institute*, Proceedings, September, Vol 56, p. 257-264.

-
- PENNER, E., EDEN, W.J., 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.
- PENNER, E., EDEN W.J., GRATTAN-BELLEW P.E. (1975) Expansion des argiles litées pyriteuses, Digeste de la construction au Canada, CBD-152-F.
- 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., VOGAN, R.W. (1970) Black Shale Heaving at Ottawa, Canada, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 7, p.106-112.
- QUIGLEY, R.M., ZAJIC, J.E., McKYES, E., YOUNG, R.N. (1973) Oxydation and Heave of Black Shale, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineering, Vol 99, No. SM5, p. 417-420.
- QUIGLEY, R.M., ZAJIC, J.E., McKYES, E., YOUNG, R.N. (1973) Biochemical Alteration and Heave of Black Shale – Detailed Observations and Interpolations, Canadian Journal of Earth Science, Vol.10, p.1005-1015.
- STOUT, W. (1932) Clarion Clay of Vinton County, Ohio, Journal of the American Ceramic Society, Vol.15, p. 397-406.

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