



GLISSEMENTS DE TERRAIN

Exploration et exploitation des gaz de schiste

Gaz de schiste



Glissement de terrain

Exploration et exploitation des gaz de schiste



Rédaction :

Pierre Dorval, ing., MTQ
Janelle Potvin, ing., MTQ
Daniel Soucy, ing., M. Sc., MTQ
Catherine Thibault, ing., M. Sc., MTQ

Comité d'expert :

Chantal Bilodeau, B. Sc., MSP
Pierre Dorval, ing., MTQ
Eric Guillemette, urb., M. ATDR, MAMROT
Pascal Locat, ing., M. Sc., MTQ
Janelle Potvin, ing., MTQ
Daniel Soucy, ing., M. Sc., MTQ
Catherine Thibault, ing., M. Sc., MTQ

Experts externes

Martin Grenon, ing., Ph. D., Université Laval
Charles Lamontagne, ing., M. Sc., MDDEFP
René Lefebvre, ing., Ph. D., INRS
Serge Leroueil, ing., Ph. D., Université Laval

Réalisation des figures :

Alexandre Lavoie, analyste en géomatique, B. Sc., MTQ
Denis Hudon, tech., MTQ

Révision linguistique :

Direction des communications, MTQ

Graphisme et édition :

Marie-Christine Chambers, tech., microédition, MTQ
Mélissa Raymond, tech., MTQ

* Le présent document a été réalisé dans le cadre de l'évaluation environnementale stratégique (ÉES) sur le gaz de schiste. Les auteurs sont responsables du choix et de la présentation des faits. Les opinions exprimées dans ce document sont celles de l'auteur et n'engagent aucunement le Comité de l'évaluation environnementale stratégique sur le gaz de schiste.



AVANT-PROPOS

Le ministère de la Sécurité publique (MSP) a créé, à l'automne 2010, à la demande de la ministre des Ressources naturelles et de la Faune, un comité technique de sécurité publique pour étudier divers aspects des activités de l'industrie du gaz de schiste au Québec. Ce comité a formé quatre groupes d'experts pour examiner différentes problématiques. Le groupe d'experts en glissements de terrain est composé de représentants du MSP, du ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAMROT) ainsi que du ministère des Transports du Québec (MTQ). Dans le cadre de ce mandat, un rapport préliminaire a été remis au MSP, mais le comité technique de sécurité publique a été dissous depuis.

En juillet 2012, le Bureau de la coordination sur les évaluations stratégiques du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), appelé ainsi à ce moment, a demandé au groupe d'experts en glissements de terrain d'apporter un complément d'information au rapport préliminaire afin de répondre à la demande d'acquisition de connaissance suivante :

- R1-1 : Détermination des risques naturels potentiels dans la région désignée pour l'exploitation du gaz de schiste et des répercussions appréhendées de ces événements sur les installations d'un projet type et sur la sécurité de la population.
- R1-2 : Analyse du risque que des phénomènes naturels soient provoqués par les activités de l'industrie du gaz de schiste et des conséquences appréhendées sur la sécurité et sur les biens de la population.

Cette demande s'inscrit dans le plan de réalisation de l'évaluation environnementale stratégique sur le gaz de schiste préparé par le Comité de l'évaluation environnementale stratégique (ÉES) en avril 2012.

Le présent document complète donc le rapport préliminaire remis au MSP. Il dresse l'état des connaissances à partir des documents déposés lors des travaux de la commission d'enquête du Bureau d'audiences publiques sur l'environnement concernant le développement durable de l'industrie des gaz de schiste au Québec. Par ailleurs, le groupe d'experts en glissements de terrain a fait appel aux compétences scientifique et technique d'experts externes provenant majoritairement du milieu universitaire. Cette consultation a permis d'appuyer et de préciser les constats et les recommandations présentés dans le rapport.



RÉSUMÉ

Le ministère de la Sécurité publique (MSP) a créé, à l'automne 2010, un comité technique de sécurité publique pour étudier divers aspects des activités de l'industrie du gaz de schiste au Québec. Ce comité a formé quatre groupes d'experts pour examiner différentes problématiques, dont un portant sur les glissements de terrain. Ce groupe est composé de représentants du MSP, du ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire ainsi que du Service de la géotechnique et de la géologie du ministère des Transports du Québec. Dans le cadre de ce mandat, un rapport préliminaire a été remis au MSP, mais le comité technique de sécurité publique a été dissous depuis.

En juillet 2012, le Bureau de la coordination sur les évaluations stratégiques du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs a demandé au groupe d'experts en glissements de terrain d'apporter un complément d'information au rapport préliminaire afin de répondre à la demande d'acquisition de connaissances sur les volets suivants :

- R1-1 : Détermination des risques naturels potentiels dans la région désignée pour l'exploitation du gaz de schiste et des répercussions appréhendées de ces événements sur les installations d'un projet type et sur la sécurité de la population.
- R1-2 : Analyse du risque que des phénomènes naturels soient provoqués par les activités de l'industrie du gaz de schiste et des conséquences appréhendées sur la sécurité et sur les biens de la population.

En raison de l'immensité de son territoire et des divers environnements géologiques qui le composent, le Québec est exposé à différents types de glissements de terrain. Chaque année, des centaines de glissements de terrain, généralement de faible superficie, se produisent au Québec, dont environ 80 % dans les dépôts argileux. De plus, les argiles des mers post-glaciaires du Québec sont notamment propices au développement de glissements fortement rétrogressifs, dont le recul peut atteindre plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de mètres. Les glissements de ce type constituent un risque majeur en raison de leur amplitude et de leur caractère dévastateur. La superposition de l'inventaire des puits existants et de l'inventaire des glissements fortement rétrogressifs montre que le territoire visé par l'industrie se trouve dans des secteurs propices aux dangers de glissements for-

tement rétrogressifs. La présence de cet aléa devrait être prise en compte dans la localisation des puits.

Par ailleurs, au Québec, selon l'inventaire des études effectuées par le gouvernement (Fortin et al., 2008), environ 40 % des glissements de terrain sont liés à des interventions humaines qui fragilisent des zones déjà vulnérables à ce phénomène. Il est reconnu que les glissements de terrain peuvent être déclenchés par des vibrations, dont celles qui sont dues aux séismes, par l'érosion au pied d'un talus, par l'augmentation des pressions d'eau interstitielle, par les surcharges au sommet du talus, par les déblais ou les excavations à la base du talus ainsi que par les concentrations d'eau vers la pente. L'analyse des documents déposés au Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE) révèle que certaines activités liées aux gaz de schiste pourraient agir comme des facteurs aggravants ou déclencheurs de glissements de terrain.

Voici les principaux constats et avis du groupe d'experts :

- Actuellement, le Règlement sur le pétrole, le gaz naturel et les réservoirs souterrains mentionne que le titulaire d'un permis de forage ne peut forer à moins de 100 mètres de la ligne des hautes eaux. Le glissement de terrain de Saint-Jude démontre que cette distance aurait été insuffisante pour empêcher la plateforme de forage d'être emportée ou endommagée par le glissement.
- Le groupe d'experts est d'avis que, lorsque des cartes gouvernementales sont disponibles, les puits verticaux devraient être localisés à l'extérieur des zones potentiellement exposées aux glissements de terrain afin d'assurer la sécurité du public et des travailleurs de l'industrie gazière.
- Compte tenu du manque d'information, le groupe d'experts est d'avis que doivent être menées des études portant sur différents aspects liés à la fracturation hydraulique, soit : la sismicité induite; la connectivité hydraulique entre la zone exploitée en profondeur et les couches plus perméables du contexte québécois; la transmission des pressions jusqu'au massif argileux.
- Compte tenu du manque d'information, une étude portant sur les effets de l'exploitation du gaz de schiste sur la sismicité induite doit être réalisée.
- Considérant l'éventualité d'une fuite survenant entre le puits et la formation géologique, et compte tenu du manque d'information concernant les effets potentiels de la migration des gaz sur l'augmentation des pressions d'eau interstitielle, une étude scientifique examinant cet aspect devrait être entreprise. Cette étude, qui pourrait être réalisée par des hydrogéologues en collaboration avec des géotechniciens, devrait porter entre autres sur la propagation du gaz dans le dépôt glaciaire ou dans le roc altéré afin d'évaluer la distance de propagation potentielle dans ces couches en cas de fuite entre le puits et la formation géologique.
- En attendant cette étude, des mesures devraient être prises afin d'éviter une augmentation des pressions d'eau interstitielle dans les couches perméables sous-jacentes aux couches argileuses, pour tous les puits et lors de leur fermeture. Les mesures qui pourraient être envisagées sont entre

autres d'implanter les puits verticaux à des distances suffisantes des talus et d'installer des piézomètres afin de détecter toute variation anormale des pressions d'eau interstitielle, le cas échéant.

- Lors de la fermeture d'un puits situé à l'intérieur des zones potentiellement exposées aux glissements de terrain ou à l'intérieur des distances prescrites dans le rapport, des mesures devraient être mises en place afin d'assurer à long terme l'absence de pressions dans les couches perméables sous-jacentes aux couches argileuses et d'ainsi s'assurer que les activités de l'industrie ne seront pas néfastes pour la stabilité des talus à long terme.

Finalement, le comité d'experts est d'avis que certaines activités connexes sur le site, telles que la surcharge au sommet du talus, les déblais à la base d'un talus et les concentrations d'eau, doivent être effectuées à l'extérieur d'une bande de protection déterminée afin qu'elles ne déstabilisent pas le talus.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 / GÉOLOGIE DES BASSES TERRES DU SAINT-LAURENT	5
CHAPITRE 2 / GLISSEMENTS DE TERRAIN AU QUÉBEC	7
2.1 Glissements faiblement ou non rétrogressifs	8
Glissements superficiels	8
Glissements rotationnels	9
Coulées de boue	10
2.2 Glissements fortement rétrogressifs.....	12
Coulées argileuses	14
Étalements latéraux.....	15
Inventaire des glissements fortement rétrogressifs	16
Constat	17
CHAPITRE 3 / CARTOGRAPHIE DES ZONES POTENTIELLEMENT EXPOSÉES AUX GLISSEMENTS DE TERRAIN	19
3.1 Cartes gouvernementales.....	19
Cartes produites par le MRN	19
Cartes produites par le MTQ	22
Constat.....	27
Avis du groupe d'experts	28
CHAPITRE 4 / ÉLÉMENTS AGGRAVANTS ET DÉCLENCHEURS POTENTIELS LIÉS À L'EXPLORATION ET À L'EXPLOITATION DU GAZ DE SCHISTE	29
4.1 Vibrations et sismicité	29
Levés sismiques effectués par camions vibreurs	29
Constat	30
Levés sismiques effectués à l'aide d'explosifs	31
Constat	31
Perforation du tubage du forage à l'aide d'explosifs	31
Constat	32
Fracturation hydraulique	32

Constat	33
Avis du groupe d'experts	33
Exploitation	33
Constat	33
Avis du groupe d'experts	33
Trafic lourd	33
Constat	34
Avis du groupe d'experts	34
4.2 Pression d'eau interstitielle.....	35
4.2.1 Migration des gaz	36
Fuite entre les puits et la formation géologique.....	36
Constat	36
Avis du groupe d'experts	37
Avis du groupe d'experts	38
Fracturation hydraulique	38
Constat	40
Avis du groupe d'experts	40
4.2.2 Battage des tubages	40
Constat	40
4.2.3 Transmission des pressions lors de la fracturation.....	41
Constat.....	41
Avis du groupe d'experts	41
4.3 Activités connexes sur le site	41
4.3.1 Surcharge au sommet d'un talus.....	41
Avis du groupe d'experts	42
4.3.2 Déblai ou excavation à la base du talus.....	42
Avis du groupe d'experts	43
4.3.3 Concentration d'eau vers la pente.....	43
Avis du groupe d'experts	44
CONCLUSION	45
BIBLIOGRAPHIE	47
ANNEXE 1 Définition d'un talus composé de sols à prédominance argileuse	
ANNEXE 2 Liste des municipalités et des MRC cartographiées au Québec par le MRN entre 1976 et 1986	
ANNEXE 3 Liste des municipalités et des MRC cartographiées au Québec par le MTQ depuis 2003	



LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Types de zones sur les cartes produites par le MRN	21
Tableau 2	Distances à respecter au sommet et à la base du talus pour les zones de classe 1 sur les cartes du MRN	21
Tableau 3	Types de zones sur les cartes de contraintes relatives aux glissements de terrain produites par le MTQ	25
Tableau 4	Distances à respecter au sommet et à la base du talus pour la localisation des nouveaux puits verticaux lorsqu'il n'y a aucune cartographie gouvernementale.....	37
Tableau 5	Distances à respecter au sommet du talus pour les remblais	42
Tableau 6	Distances à respecter à la base du talus pour les déblais	43
Tableau 7	Distances à respecter au sommet du talus pour les concentrations d'eau	44

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Limites des mers postglaciaires dans le sud du Québec obtenues à partir des cartes de dépôts meubles gouvernementales.....	6
Figure 2	Glissement superficiel (survenu à Grondines en 2006)	9
Figure 3	Glissement rotationnel (survenu à Shawinigan en 2008)	10
Figure 4	Coulée de boue (survenue à Saguenay, secteur La Baie, en 1996)	11
Figure 5	Exemples de glissements fortement rétrogressif (survenus dans les basses terres du Saint-Laurent)	13
Figure 6	Argile sensible au remaniement (A : argile intacte, B : argile remaniée)	14
Figure 7	Coulée argileuse (survenue à Notre-Dame-de-la-Salette en 2010)	15
Figure 8	Étalement latéral (survenu Saint-Liguori en 1989)	16
Figure 9	Inventaire des glissements fortement rétrogressifs par rapport à la localisation des puits de gaz existants	17
Figure 10	Extrait d'une carte des zones potentiellement exposées aux glissements de terrain produite par le MRN dans le secteur de Yamaska	20
Figure 11	Zonage du MRN superposé à un modèle numérique de terrain obtenu à partir de données lidar	22
Figure 12	Extrait d'une carte de zones de contraintes relatives aux glissements de terrain produite par le MTQ	23
Figure 13	Bloc-diagramme illustrant un talus et ses bandes de protection	24

- Figure 14** Étendue du territoire québécois cartographié par le MTQ et le MRN dans la zone ayant un potentiel d'exploitation des gaz de schiste, en date de juin 2011 26
- Figure 15** Coupe du glissement survenu à Saint-Jude en 2010 montrant qu'un puits aurait été emporté dans le glissement s'il avait été positionné à 100 mètres des hautes eaux comme il est spécifié dans le Loi sur les mines 27
- Figure 16** Gradients généralement observés dans les talus des cours d'eau des basses terres du Saint-Laurent 35



INTRODUCTION

La demande du Bureau de la coordination sur les évaluations stratégiques du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs adressée au groupe d'experts en glissements de terrain était de répondre à deux projets d'acquisition de connaissances : premièrement, la détermination des risques naturels potentiels dans la région désignée pour l'exploitation du gaz de schiste et des répercussions appréhendées de ces événements sur les installations d'un projet type et sur la sécurité de la population (R1-1); deuxièmement, l'analyse du risque que des phénomènes naturels soient provoqués par les activités de l'industrie du gaz de schiste et des conséquences appréhendées sur la sécurité et sur les biens de la population (R1-2). Ces projets sont inscrits dans le plan de réalisation de l'évaluation environnementale stratégique sur le gaz de schiste préparé par le Comité de l'évaluation environnementale stratégique (ÉES) en avril 2012.

Pour le présent rapport, le groupe d'experts a analysé les documents pertinents déposés au Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE) à l'occasion de la Commission d'enquête sur le développement durable de l'industrie des gaz de schiste au Québec. Des experts externes ont aussi été consultés afin d'appuyer et de préciser les constats et les recommandations présentés dans ce rapport.

La zone ciblée pour l'exploration et l'exploitation des gaz de schiste est divisée en trois corridors distincts où la profondeur du shale d'Utica varie (BAPE, 2011). Elle se trouve principalement dans les basses terres du Saint-Laurent, entre Montréal et Québec. La présente étude couvre seulement le deuxième corridor d'exploration, situé entre la faille de Yamaska et la ligne de Logan. La vallée du Saint-Laurent est le seul endroit en Amérique du Nord où des dépôts d'argile sensible, qui sont propices au développement de glissements fortement rétrogressifs, recouvrent en surface les zones de schiste gazéifère telles qu'elles sont relevées dans un document de l'Office national de l'énergie en 2009.

Le rapport contient quatre sections. Le premier chapitre présente brièvement la géologie des basses terres du Saint-Laurent. Le deuxième chapitre explique les principaux types de glissements de terrain qui se produisent dans les sols argileux au Québec.

Quant au troisième chapitre, il présente la cartographie des zones potentiellement exposées aux glissements de terrain, réalisée par le gouvernement du Québec. Il s'agit de cartes de zones de contraintes relatives aux glissements de terrain dans les dépôts meubles. Ces cartes ont pour objectif principal de soutenir les autorités régionales et locales qui sont responsables d'assurer la sécurité des personnes et des biens sur leur territoire. Elles sont accompagnées d'un guide

(Gouvernement du Québec, 2004) permettant aux autorités de mieux contrôler l'utilisation du sol.

Finalement, le quatrième chapitre résume les éléments aggravants et déclencheurs potentiels des glissements de terrain. Il porte sur les répercussions des vibrations générées par les travaux d'exploration et d'exploitation des puits ainsi que sur la sismicité induite lors de la fracturation et de l'exploitation du gaz. Il traite aussi de l'effet de l'augmentation des pressions d'eau interstitielle dans les sols argileux due à des fuites entre les puits et la formation géologique, au battage des tubages et à la fracturation hydraulique. Par la suite, ce chapitre porte sur les activités présentes sur le site pouvant constituer des éléments aggravants et déclencheurs : surcharge au sommet d'un talus, déblai ou excavation à la base d'un talus et concentration d'eau vers la pente. Le groupe d'experts y formule des recommandations pour chacun de ces éléments quant à l'utilisation du territoire par l'industrie gazière.

Précision sur l'emploi du terme « gaz de schiste »

Le terme « schiste » désigne une roche, d'origine sédimentaire ou métamorphique, ayant la particularité de se désagréger en feuillets. Selon le Bureau de la traduction du Canada, les géologues canadiens préfèrent utiliser le terme « shale » pour désigner la roche sédimentaire argileuse présentant une schistosité afin d'éviter toute confusion avec le « schiste métamorphique ». Par contre, le terme « shale » est considéré comme un anglicisme par le Bureau de la traduction du Canada et par l'Office québécois de la langue française. L'utilisation du terme « gaz de schiste » a été normalisée par l'Office en février 2011. L'emploi du terme « schiste » est donc maintenant obligatoire, conformément à ce que prescrit l'article 118 de la Charte de la langue française. Par conséquent, le terme « gaz de schiste » est utilisé dans ce rapport.



CHAPITRE 1

Géologie des basses-terres du Saint-Laurent

La plate-forme du Saint-Laurent, sus-jacente au socle cristallin du Bouclier canadien, est composée d'un ensemble de roches sédimentaires. À la base de cet ensemble se trouvent des unités de roches carbonatées sur lesquelles reposent les shales d'Utica et de Lorraine (Globensky, 1987). Comme il est mentionné dans le rapport du BAPE, trois grands corridors d'exploration ont été déterminés dans le sud du Québec. Ils sont délimités par la faille de Yamaska et la ligne de Logan en fonction de la profondeur du shale d'Utica, qui augmente généralement du nord-ouest vers le sud-est. Le document PR3 déposé au BAPE par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF), devenu depuis le ministère des Ressources naturelles (MRN), indique que l'épaisseur du shale d'Utica varie généralement entre 100 et 250 mètres, et qu'elle peut atteindre jusqu'à 750 mètres dans la vallée du Richelieu. Dans le premier corridor, les roches de cette formation affleurent en surface au nord du fleuve Saint-Laurent et s'approfondissent graduellement jusqu'à la faille de Yamaska. Le deuxième corridor est limité par la faille de Yamaska et celle de Logan. Entre ces failles, les roches s'approfondissent graduellement vers le sud-est pour atteindre environ 2500 mètres de profondeur le long de la ligne de Logan, qui est la limite nord du troisième corridor.

La plate-forme des basses terres du Saint-Laurent est recouverte par des dépôts d'origines glaciaire et post-glaciaire. Au Québec, il y a cinq mers post-glaciaires : les mers de Champlain, de Laflamme, de Goldthwait, de Tyrell et d'Iberville (Landry et al., 2012). La figure 1 présente les limites des mers post-glaciaires dans le sud du Québec.

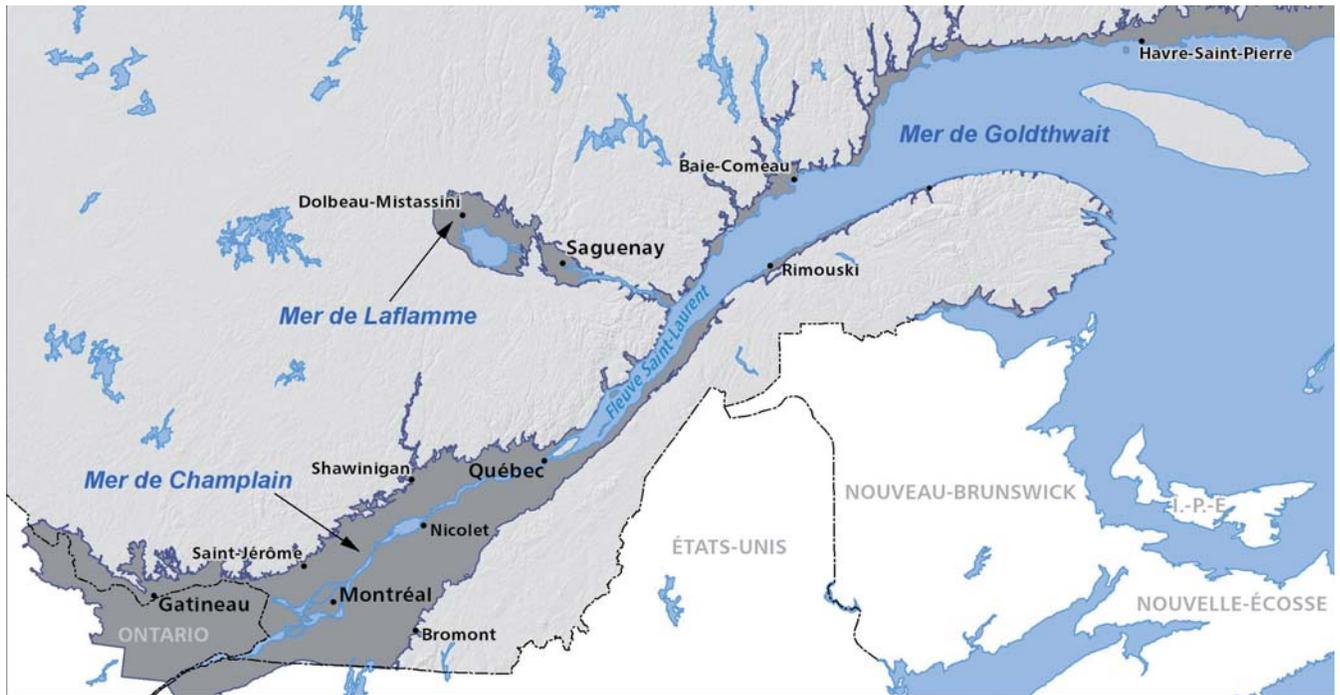


Figure 1 Limites des mers post-glaciaires dans le sud du Québec obtenues à partir des cartes de dépôts meubles gouvernementales



CHAPITRE 2

Glissements de terrain au Québec

En raison de l'immensité de son territoire et des divers environnements géologiques qui le composent, le Québec est exposé à différents types de glissements de terrain. Bien que tous les types de matériaux puissent être touchés, qu'ils soient meubles (gravier, sable, argile, etc.) ou consolidés (roc), les glissements de terrain se produisent le plus souvent dans les dépôts meubles, et 80 % de ceux-ci surviennent dans les dépôts argileux (Fortin et al., 2008). Chaque année, des centaines de glissements de terrain, généralement de faible superficie, se produisent au Québec. De plus, les argiles des mers post-glaciaires du Québec sont notamment réputées pour être propices au développement de glissements fortement rétrogressifs.

Les glissements de terrain représentent une menace sous deux aspects. Premièrement, le déplacement de la masse de sol provoque le bris ou la destruction des éléments situés sur la portion de terrain en mouvement. Deuxièmement, l'étalement de la masse qui résulte de ce mouvement, qu'on appelle débris, peut heurter les éléments situés à la base du talus et causer des dommages majeurs. De plus, l'énergie mobilisée lors d'un glissement de cette envergure peut être assez importante pour sectionner des pieux de fondation ou des infrastructures souterraines tels des aqueducs.

Les glissements de terrain constituent un phénomène naturel. Ils résultent de la combinaison de facteurs prédisposants, aggravants ou déclencheurs, parmi lesquels la présence d'érosion, l'inclinaison de la pente, la hauteur du talus, les propriétés géologiques et géotechniques des sols et les conditions d'eau souterraine. Les glissements surviennent majoritairement au printemps et à l'automne, lorsque la pression d'eau dans les sols est critique pour la stabilité des talus. Leur distribution dans le temps est irrégulière, et leur fréquence peut être augmentée par des conditions météorologiques extrêmes.

En contrepartie, une proportion importante des glissements de terrain est liée à des interventions humaines qui fragilisent des zones déjà susceptibles à ce phénomène naturel. Le décompte des dossiers du ministère des Transports du Québec (MTQ) démontre d'ailleurs que plus de 40 % des glissements survenus au cours des dernières décennies ont été déclenchés ou aggravés par des interventions humaines néfastes pour la stabilité des talus (Fortin et al., 2008).

Dans le cas des activités liées aux gaz de schiste, la principale préoccupation concerne les glissements de terrain qui pourraient survenir dans les sols d'origine marine reposant sur le socle rocheux propice à l'exploitation de cette ressource.

Les types de glissements rencontrés dans les sols argileux peuvent être regroupés en deux familles selon leurs dimensions :

Glissements faiblement ou non rétrogressifs : ils affectent le talus et peuvent emporter une bande de terrain (de quelques mètres à plus d'une dizaine de mètres) située au sommet du talus. Les débris s'étalent généralement à la base du talus sur des distances variables. Leur largeeur peut atteindre quelques dizaines de mètres.

Glissements fortement rétrogressifs : ils affectent non seulement le talus, mais aussi d'immenses bandes de terrain (de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres) à l'arrière de son sommet. Les débris représentent une masse importante et s'étalent parfois sur des distances considérables pouvant aller jusqu'à plus d'un kilomètre.

2.1 Glissements faiblement ou non rétrogressifs

Glissements superficiels

Les glissements superficiels sont caractérisés par une surface de rupture dont la profondeur est généralement inférieure à 1,5 mètre. Ils n'affectent que la couche de sol superficielle altérée, appelée « croûte », et se limitent parfois au décollement de la couverture végétale. Cette portion superficielle des sols est plus perméable et présente des caractéristiques mécaniques différentes de celles des matériaux intacts situés plus en profondeur. Un tel changement dans les propriétés détermine la majeure partie de la position de la surface de rupture, qui prend alors une forme plus ou moins plane et parallèle à la pente.

De façon naturelle, ce type de glissements est causé par la saturation des sols lors de fortes pluies ou de la fonte des neiges. La partie superficielle des sols est très sensible aux fluctuations rapides des conditions d'eau souterraine à cause de sa plus grande perméabilité. La quantité d'eau qui s'infiltre dans le sol influe rapidement sur le comportement mécanique de cette croûte, dans laquelle peut se développer un écoulement. Les glissements superficiels peuvent se produire de façon naturelle dans des talus présentant des conditions géomorphologiques variées, avec ou sans érosion à la base.

Ce type de glissements se produit presque exclusivement dans le talus sans en toucher le sommet. Par contre, les débris peuvent s'étaler à la base du talus sur des distances parfois importantes (figure 2). Un inventaire des glissements de ce type qui sont survenus durant les pluies de juillet 1996 (Perret et Bégin, 1997) a montré que la distance d'étalement pouvait atteindre une longueur horizontale égale à deux fois la hauteur du talus où s'est amorcée la rupture, jusqu'à un maximum de 60 mètres.

Malgré leur volume parfois restreint, les débris peuvent causer la mort et fortement endommager les biens. Ce type de glissements est très fréquent et il s'en produit plusieurs centaines chaque année sur le territoire du Québec.



Figure 2 Glissement superficiel (survenu à Grondines en 2006)

Glissements rotationnels

Les glissements rotationnels sont caractérisés par une surface de rupture circulaire profonde qui peut se propager à quelques mètres de profondeur sous la croûte, dans l'argile intacte et relativement homogène.

De façon naturelle, ce type de glissements se produit la plupart du temps dans un talus en bordure d'un cours d'eau où l'érosion est active. L'érosion a pour effet d'enlever du matériel à la base du talus, ce qui modifie les conditions d'équilibre naturel de la pente et diminue sa stabilité. Ces conditions peuvent aussi être altérées par la présence d'une stratigraphie propice au développement de surpressions interstitielles à la base du talus. L'augmentation des pressions d'eau interstitielle est le principal facteur déclencheur de ce type de glissements.

Le glissement rotationnel emporte une bande de terrain située au sommet du talus, généralement inférieure à une fois la hauteur du talus. Lorsque le mouvement se produit, les personnes se trouvant au sommet du talus peuvent être blessées et les biens, endommagés ou détruits lorsqu'ils sont situés dans la bande de terrain emportée (figure 3).



Figure 3 Glissement rotationnel (survenu à Shawinigan en 2008)

Par ailleurs, il peut arriver que les éléments se trouvant à la base du talus soient touchés par les débris ou par leurs effets indirects (vague déferlant sur la rive opposée, inondation en amont du glissement en raison de l'obstruction du cours d'eau par les débris).

Les glissements rotationnels sont très fréquents. En effet, il en survient plus d'une centaine par année au Québec. La combinaison de l'action érosive des cours d'eau et des conditions d'eau souterraine défavorables, observée pendant le printemps et l'automne, fait que ces deux périodes de l'année sont beaucoup plus propices au déclenchement naturel de ce genre de glissements.

Coulées de boue

Les coulées de boue sont caractérisées par un volume de débris important qui s'écoule sous forme de boue. Elles ont pour origine un glissement superficiel ou rotationnel qui se produit généralement dans la partie supérieure du talus. De façon naturelle, elles surviennent lorsque le glissement a lieu dans un talus d'argile, boisé ou non, ayant une longue pente de forme concave et un sommet abrupt.

En dévalant la pente, les débris entraînent sur leur passage les sols et d'autres éléments, ce qui fait augmenter leur volume pendant la descente. Ils peuvent prendre des dimensions très variables selon de nombreux facteurs, tels que les dimensions du glissement initial, la consistance des débris, la géométrie de la pente, la position du point d'amorce du glissement ainsi que l'état du sol superficiel et du terrain sur le versant.

Ce type de glissements de terrain est causé par une importante infiltration d'eau, par exemple lors de fortes pluies. Comme dans un glissement superficiel, les débris peuvent s'étaler sur une distance horizontale égale à deux fois la hauteur du talus, jusqu'à un maximum de 60 mètres.

Les coulées de boue sont rares au Québec, car elles ne se produisent qu'en présence de conditions topographiques et météorologiques particulières. En raison de cette rareté, ce type de glissements est plutôt méconnu dans la communauté scientifique québécoise. Cependant, les coulées de boue sont, d'une façon générale, le type de glissements le plus fréquemment provoqué par des pluies diluviennes dans le monde. Elles ont entraîné les deux seuls décès, causés par un phénomène naturel, lors du sinistre de juillet 1996 (figure 4) (cas du glissement de la rue Henry-McNicoll à La Baie, décrit dans Bouchard et al., 2008).



Figure 4 – Coulée de boue (survenue à Saguenay, secteur La Baie, en 1996)

2.2 Glissements fortement rétrogressifs

Les glissements fortement rétrogressifs se produisent généralement où il y a de l'argile sensible au remaniement. Ils se divisent en deux types en raison de leur mode de rupture qui diffère, soit les coulées argileuses et les étalements latéraux (Demers et al., 2013). Au cours des 35 dernières années, 35 glissements fortement rétrogressifs ont eu lieu au Québec, ce qui représente une moyenne de un par année. Les glissements de ce type constituent un risque majeur en raison de leur amplitude et de leur caractère dévastateur. Les glissements fortement rétrogressifs sont définis comme des glissements dont le recul est supérieur à deux fois la hauteur du talus ou à plus de 40 mètres. Toutefois, ils peuvent atteindre plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de mètres de recul (figure 5). Cette caractéristique est attribuable à la présence d'argile sensible ayant une résistance au cisaillement remaniée (S_{ur}) inférieure à 1 kilopascal ou un indice de liquidité (IL) supérieur à 1,2 (Lebuis et al., 1983). Il s'agit d'argile d'origine marine ayant la caractéristique particulière de passer d'une consistance relativement ferme, lorsqu'elle est à l'état intact, à une masse quasi liquide à l'état remanié (figure 6), sans apport d'eau de l'extérieur. Cette caractéristique est notamment due au lessivage par l'écoulement des eaux souterraines, des sels de l'eau interstitielle qui sont présents dans les sédiments argileux d'origine marine lors de leur déposition. Le remaniement de l'argile sensible se produit généralement à la suite d'un glissement de terrain alors que le sol se disloque et se déstructure dans sa chute vers le bas de la pente. Ce type d'argile très sensible se trouve, outre au Québec, dans certains fjords de l'ouest du Canada et de l'Alaska ainsi qu'en Scandinavie.

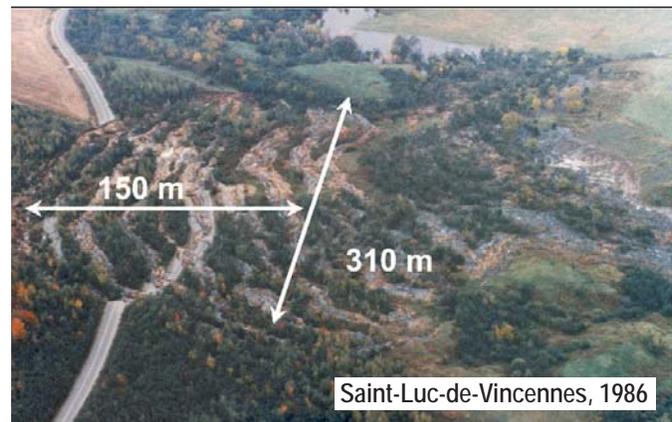
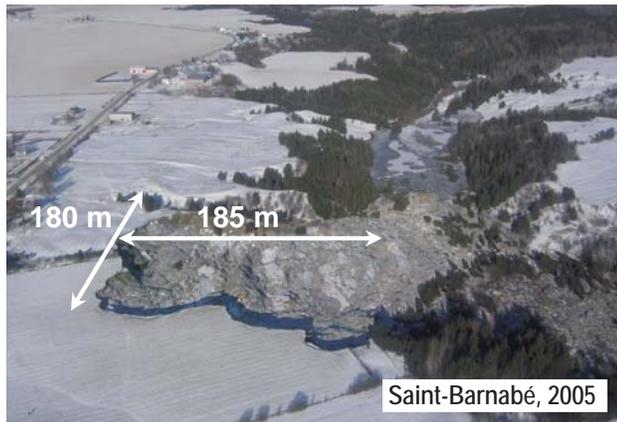


Figure 5 Exemples de glissements fortement rétrogressifs (survenus dans les basses terres du Saint-Laurent)

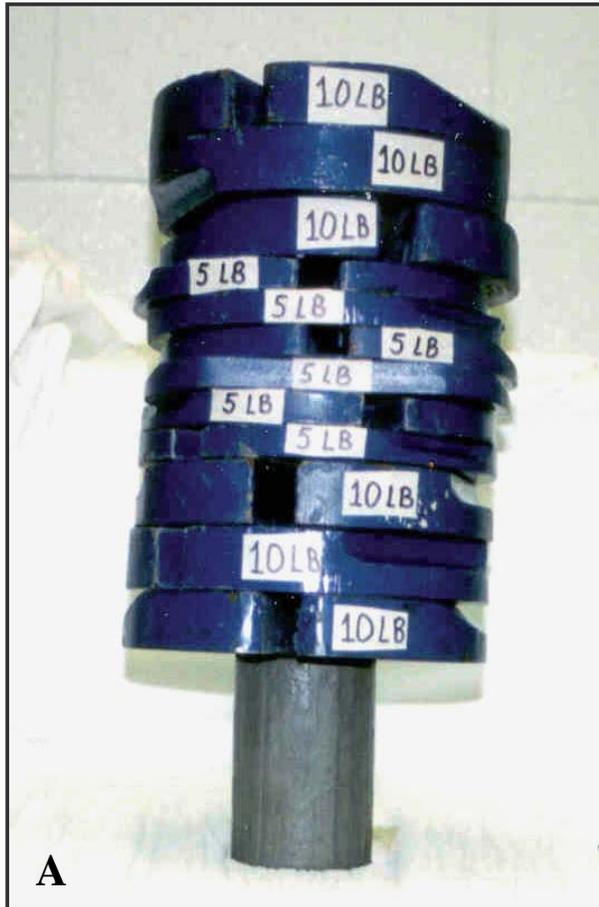


Figure 6 Argile sensible au remaniement (A : argile intacte, B : argile remaniée)

Coulées argileuses

Les coulées argileuses se produisent généralement dans l'argile fortement sensible au remaniement. De façon naturelle, la coulée argileuse est habituellement amorcée, en bordure des cours d'eau, par un glissement rotationnel profond atteignant l'argile intacte. Celui-ci doit laisser un escarpement instable, des débris doivent se remanier substantiellement et généralement la topographie doit être favorable à l'évacuation des débris. Ce premier glissement demeure stable à court terme en raison des pressions d'eau interstitielle négatives créées par la décompression des sols à la suite du premier mouvement. Dans les heures ou les jours qui suivent (après la dissipation partielle ou totale des pressions d'eau interstitielle négatives), il est suivi d'une succession généralement très rapide de ruptures en condition non drainée, ce qui affecte le sommet du talus sur une distance très variable. Les coulées argileuses sont habituellement de grande ampleur puisque la distance de rétrogression, c'est-à-dire le mouvement de recul par ruptures successives, peut affecter des bandes de terrain de plusieurs dizaines, voire de plusieurs centaines de mètres au sommet du talus (figure 7).

En conséquence, les débris, parfois quasi liquides, peuvent s'étaler sur plusieurs centaines de mètres à partir de leur point d'origine. Les constructions situées sur un terrain affecté par une coulée argileuse sont en général complètement détruites. Ce type de glissements est le plus meurtrier au Québec. Il a causé la mort de 31 personnes lors du glissement de Saint-Jean-Vianney en 1971 et de 33 personnes en 1908 à Notre-Dame-de-la-Salette.



Figure 7 Coulée argileuse (survenue à Notre-Dame-de-la-Salette en 2010)

Étalements latéraux

Les étalements latéraux peuvent se produire indifféremment dans des argiles dont la sensibilité au remaniement est variable, la plupart du temps en bordure des cours d'eau. De façon générale, ils sont caractérisés par une dislocation en prismes triangulaires qui se propagent le long d'une surface de rupture essentiellement plane. Les prismes triangulaires pointant vers le haut sont appelés « pinacles » ou « horsts » et ceux qui pointent vers le bas, sur lesquels le terrain original demeure plus ou moins intact, sont appelés « grabens ». Les sols situés près de la surface de rupture se remanient lors du déplacement, tandis que ceux qui se trouvent au-dessus se disloquent par tranches. Dans certains cas, l'argile remaniée peut être extrudée entre les horsts et les grabens.

Les étalements latéraux sont généralement de grande envergure puisqu'ils peuvent toucher des bandes de terrain de plusieurs dizaines, voire d'une centaine de mètres au sommet du talus (figure 8). Ils se distinguent de la coulée argileuse par leurs débris peu remaniés, qui demeurent souvent en majeure partie dans la cicatrice et qui ne s'étalent pas sur de très grandes distances comparativement aux coulées argileuses. Cependant, les débris peu remaniés peuvent empêcher l'écoulement du cours d'eau et entraîner l'inondation des rives en amont du glissement. Ils ont causé la mort de 1 personne en 1978 à Rigaud et de 4 personnes en 2010 à Saint-Jude.



Figure 8 Étalement latéral (survenu à Saint-Liguori en 1989)

Inventaire des glissements fortement rétrogressifs

La carte de la figure 9 présente un inventaire non exhaustif des cicatrices de glissements de terrain fortement rétrogressifs qui sont survenus à l'intérieur des limites de l'invasion marine dans les basses terres du Saint-Laurent compilés par le MTQ. Cette figure indique également la position de la ligne de Logan et de la faille de Yamaska, qui délimitent le corridor 2. Il s'agit du principal corridor où l'industrie gazière a déterminé qu'il existe un potentiel d'exploitation des gaz de schiste. Les puits existants y sont aussi localisés.

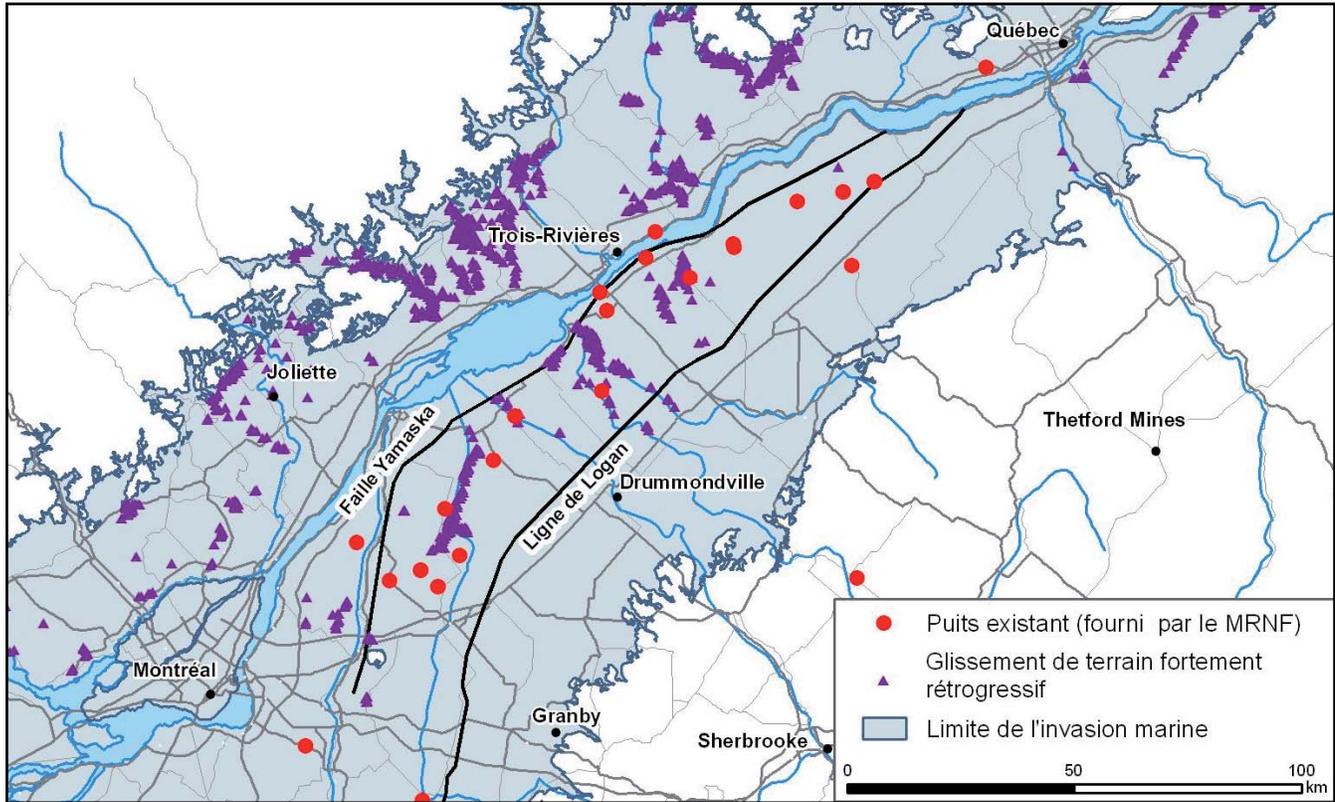


Figure 9 Inventaire des glissements fortement rétrogressifs par rapport à la localisation des puits de gaz existants

Constat

La superposition de l'inventaire des glissements fortement rétrogressifs du MTQ montre que le territoire visé par l'industrie se trouve dans des secteurs potentiellement exposés à ce type de danger.



CHAPITRE 3

Cartographie des zones potentiellement exposées aux glissements de terrain

Les glissements de terrain sont un aléa naturel majeur au Québec. Pour cette raison, le gouvernement du Québec réalise la cartographie des zones potentiellement exposées dans les dépôts meubles, et plus particulièrement dans les dépôts argileux (Demers et al., 2008). Cette cartographie est actuellement sous la responsabilité du Service de la géotechnique et de la géologie du MTQ. Il existe deux types de cartes gouvernementales : les cartes produites par le MRN dans les années 1980 et les cartes réalisées par le MTQ depuis 2003. Conformément aux orientations et aux attentes gouvernementales en aménagement du territoire relatives à la prise en compte des glissements de terrain, ces cartes et le cadre normatif afférent doivent être intégrés dans les documents d'urbanisme des autorités régionales et locales. De plus, le gouvernement, l'un de ses ministres ou un mandataire de l'État ne peut faire une intervention sans que celle-ci soit réputée conforme aux objectifs du schéma ou aux dispositions réglementaires (Loi sur l'aménagement et l'urbanisme, chapitre VI, article 150).

3.1 Cartes gouvernementales

Cartes produites par le MRN

De 1976 à 1986, le MRN (alors appelé « ministère des Richesses naturelles » puis « ministère de l'Énergie et des Ressources ») a produit des cartes des zones qui sont sujettes aux glissements de terrain à l'échelle de 1/20 000. Ces cartes couvrent le territoire de 22 municipalités régionales de comté (MRC). Un extrait de la carte réalisée pour le secteur de Yamaska et de Saint-Hyacinthe est présenté à la figure 10. Six rapports ont été publiés, accompagnés de cartes des zones exposées aux mouvements de terrain, soit le long de la rivière de l'Achigan (MB86-18), dans le secteur de Chute-aux-Outardes (DV83-01), dans le secteur de Gatineau-Aylmer-Hull (MB86-43), dans le secteur de Maskinongé (MB86-16), dans la région de Charlevoix (DPV-812) et le long de la rivière Yamaska entre Yamaska et Saint-Hyacinthe (DV83-04). Ces rapports sont publiés dans le portail du MRN appelé « SIGEOM »¹. D'autres cartes ont été réalisées, mais elles ont été livrées directement aux MRC sans être publiées. Dans ces cas, les MRC concernées peuvent fournir les résultats de la cartographie qu'elles ont intégrés à leur schéma d'aménagement.

1. L'adresse Internet est la suivante : sigeom.mrnf.gouv.qc.ca

La cartographie a été effectuée, à cette époque, surtout dans les zones les plus propices aux glissements de terrain fortement rétrogressifs. Les légendes de ces cartes ne sont pas uniformes, elles peuvent varier d'une région à l'autre. Le tableau 1 présente les différents types de zones, leur description et le type de glissements de terrain appréhendés.

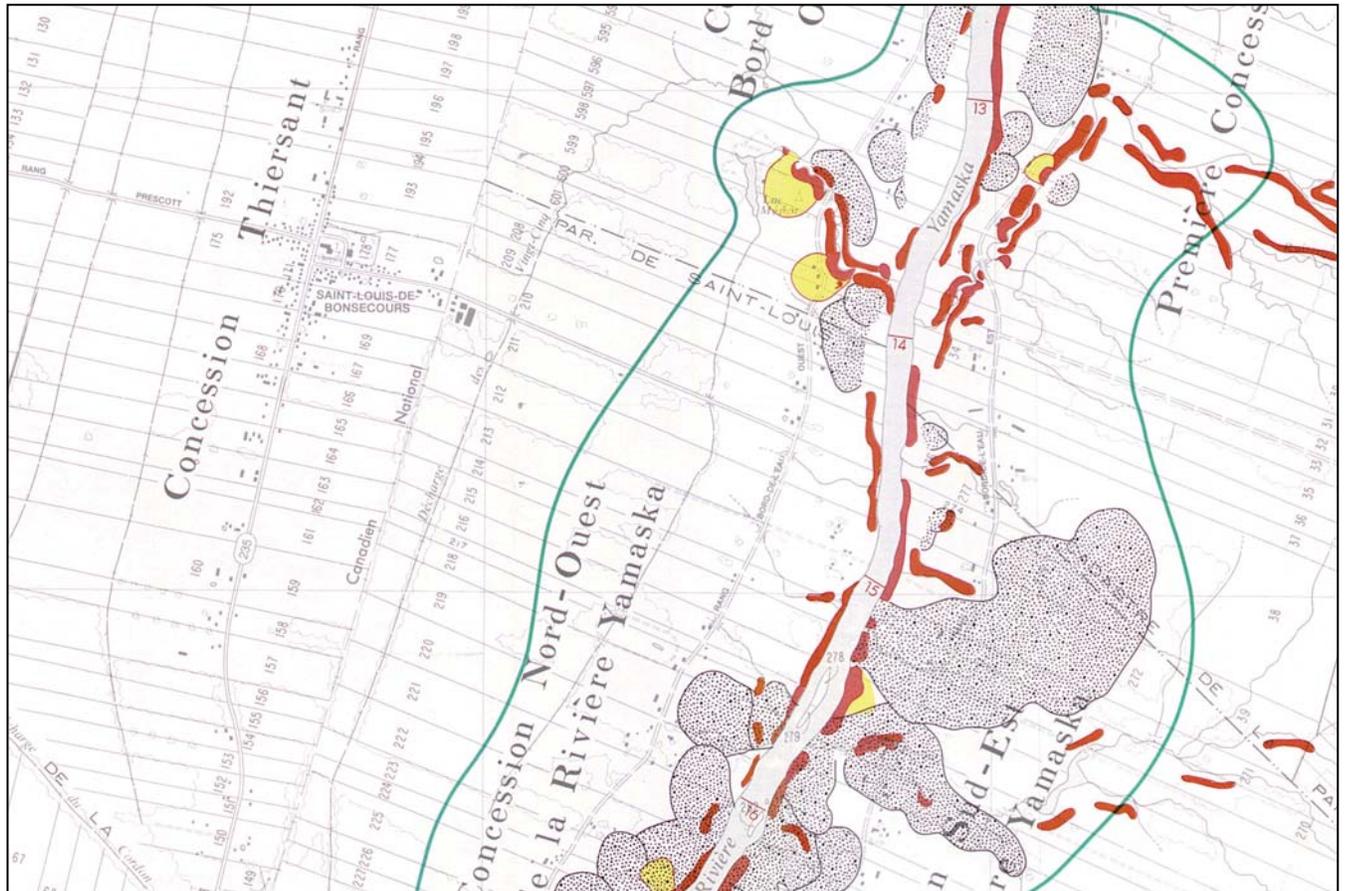


Figure 10 Extrait d'une carte des zones potentiellement exposées aux glissements de terrain produite par le MRN dans le secteur de Yamaska (Source : Rissman et al. ,1985 ; carte n° 3).

Tableau 1 Types de zones sur les cartes produites par le MRN

Types de zones	Description de la zone	Type de glissement appréhendé
Classe 1 : 1 - 2 - A - a - b - ZRE - ZRM - Zone rouge - Zone orange	Talus et bande de terrain à la base et au sommet	Glissement faiblement ou non rétrogressif
Classe 2 : 3 - B - c - ZRF - Zone jaune	Bande de terrain située au sommet des talus	Glissement fortement rétrogressif
Classe 3 : 4 - C - d - ZRH - Zone hypothétique	Bande de terrain située au sommet des talus	Glissement fortement rétrogressif déclenché lors de conditions exceptionnellement défavorables

Ces cartes ont généralement été élaborées à partir de données de base consignées sur des photographies aériennes à l'échelle de 1/15 000. L'information a ensuite été reportée sur des fonds cartographiques à l'échelle de 1/20 000 avec des courbes de niveau à tous les 10 mètres. Les données recueillies sur le terrain ont été reportées manuellement sur les photographies. Puisque ce mode de retranscription pouvait engendrer des erreurs de localisation de l'ordre de quelques dizaines de mètres, tous les types de zones de classe 1 (en rouge et en orange sur la figure 11) doivent être considérés à titre indicatif seulement. L'implantation de ces zones sur le terrain directement par arpentage n'est pas souhaitable, car elles sont imprécises, comme le démontre la figure 11. Elles doivent être déterminées par arpentage à l'aide de la définition du talus présentée à l'annexe 1, et des bandes de terrain à la base et au sommet du talus doivent être ajoutées. Les dimensions de ces bandes sont indiquées au tableau 2. Les distances à respecter au sommet et à la base du talus dépendent de la hauteur du talus (H).

Tableau 2 Distances à respecter au sommet et à la base du talus pour les zones de classe 1 sur les cartes du MRN

Types de zones	Distance au sommet du talus	Distance à la base du talus	
		H < 40 mètres	H ≥ 40 mètres
Classe 1	2 H max. 40 mètres	2 H max. 40 mètres	1 H max. 60 mètres

Pour ce qui est des zones de classe 2 (en jaune sur la figure 11), étant donné qu'elles sont de plus grandes dimensions, l'imprécision des données est moins marquée. Ces zones peuvent donc être implantées directement par arpentage.

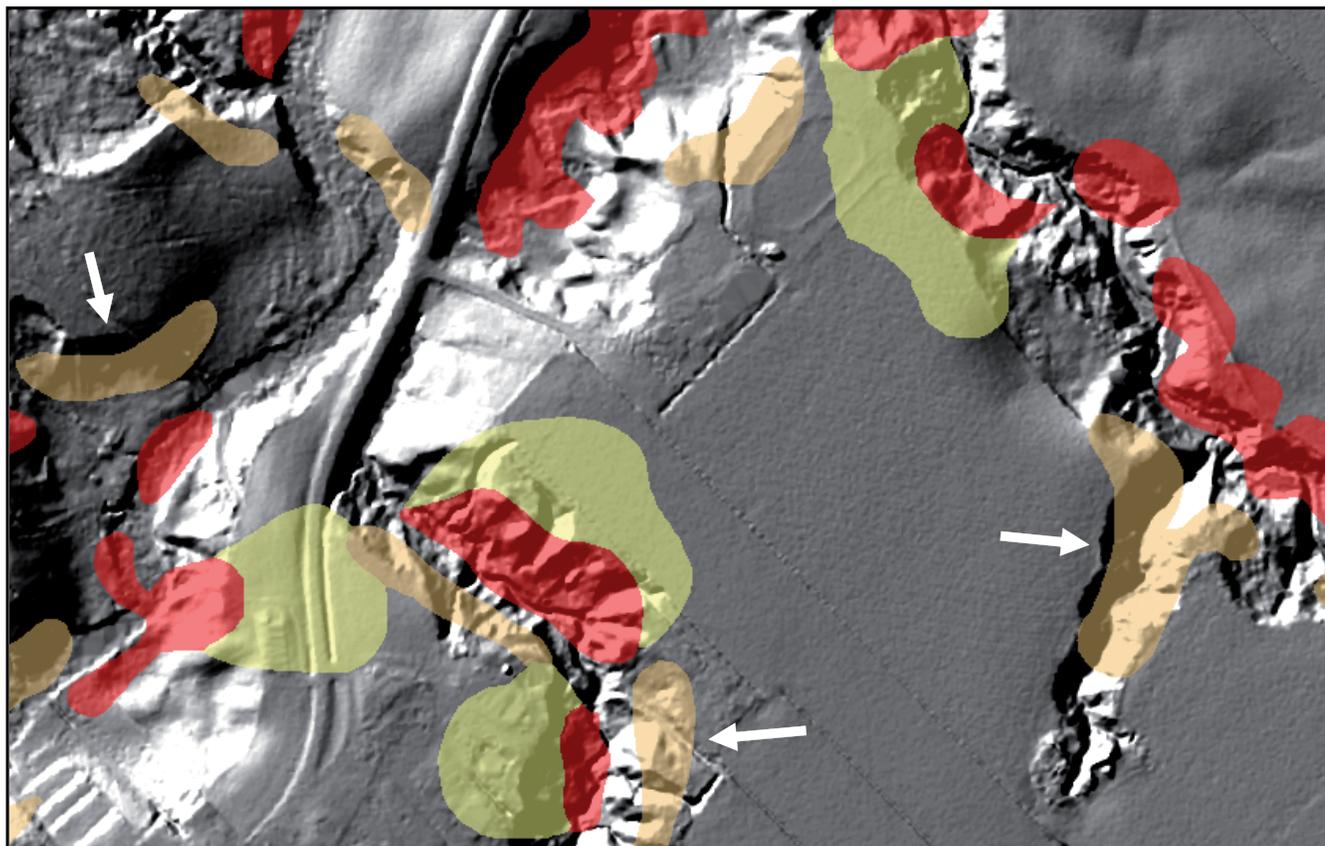


Figure 11 Zonage du MRN superposé à un modèle numérique de terrain obtenu à partir de données lidar (Les flèches montrent l'imprécision du zonage.)

Cartes produites par le MTQ

En 2003, les activités de cartographie des zones potentiellement exposées aux glissements de terrain ont été relancées et accompagnées d'une révision des normes gouvernementales. Une nouvelle génération de cartes gouvernementales, produites à l'échelle de 1/5 000 par le MTQ, est donc disponible pour certaines régions du Québec. Par ailleurs, un nouveau cadre normatif gouvernemental est pris en considération dans les schémas d'aménagement des MRC. Il a pour objectif de contrôler l'utilisation du sol afin d'assurer la sécurité des personnes et des biens. L'application de ce cadre réduira les risques en évitant que de nouveaux bâtiments ou de nouvelles infrastructures soient touchés par un glissement de terrain ou que des interventions inappropriées puissent agir comme facteurs aggravants ou déclencheurs. Dans certains cas, la norme ne garantit pas la pérennité de l'intervention; elle assure seulement la non-altération de la stabilité du talus.

La cartographie des zones potentiellement exposées aux glissements de terrain se compose de trois cartes thématiques. La première est appelée « carte de documentation » et contient la plupart des données de base qui ont servi à réaliser le zonage. La deuxième, nommée « carte de zones de susceptibilité aux glissements de terrain », est principalement destinée aux spécialistes en géotechnique. Le degré de susceptibilité est évalué en fonction de caractéristiques telles que la géométrie du talus, la présence d'érosion, les propriétés géotechniques et le dan-

ger appréhendé. La dernière carte, appelée « carte de contraintes », délimite des zones où s'appliquent diverses contraintes liées à l'aménagement du territoire (figure 12). Elle s'adresse surtout aux gestionnaires du territoire et aux personnes responsables de la délivrance des permis.

Les hypsométries (courbes de niveau) de référence utilisées pour faire la cartographie ont été obtenues, pour les cartes moins récentes (avant 2006), par la restitution de photographies aériennes à l'échelle de 1/15 000 dont la précision est de plus ou moins 5 mètres. Pour les cartes les plus récentes, une hypsométrie obtenue à l'aide d'un relevé lidar aéroporté ayant une précision de 0,20 mètre est utilisée. Par conséquent, les zones peuvent être implantées par arpentage directement sur le terrain.

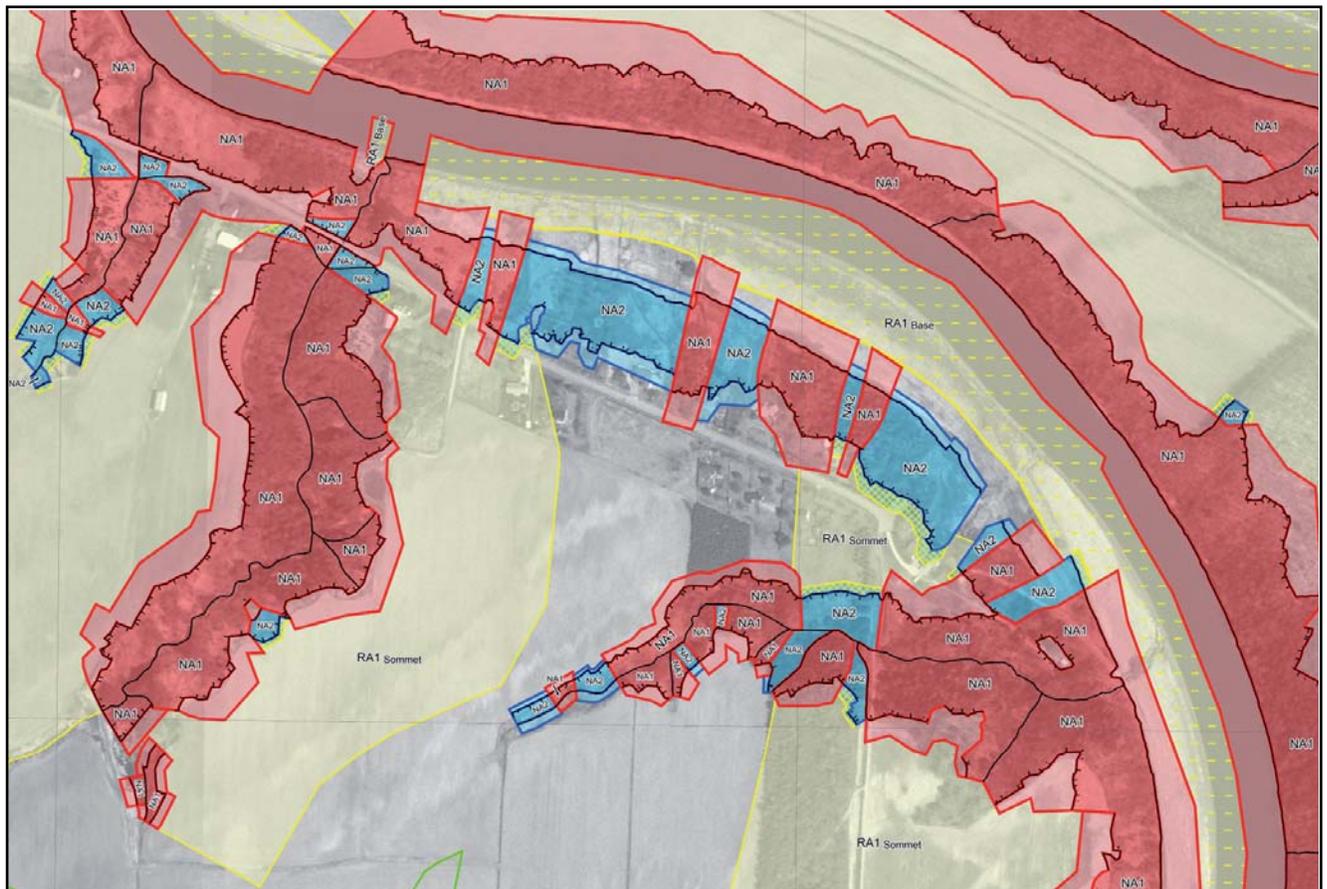


Figure 12 Extrait d'une carte de zones de contraintes relatives aux glissements de terrain produite par le MTO (C31102-050-0707, version 1.2 [juin 2010])

Les zones de contraintes comprennent le talus et des parties de terrain à son sommet et à sa base, appelées « bandes de protection », où différentes interventions doivent être régies (figure 13). Ces bandes ont des largeurs variables en fonction de la nature du sol, de la hauteur du talus et du type de glissements appréhendés. Leurs dimensions ont été déterminées à partir de l'analyse de plusieurs centaines de cas de glissements de terrain inventoriés par le MTQ (Fortin et al., 2008). Sur la carte de contraintes, des zones de plusieurs types apparaissent. Elles sont classées selon la composition du sol, l'inclinaison des talus, la présence d'érosion et le type de glissements appréhendés (tableau 3).

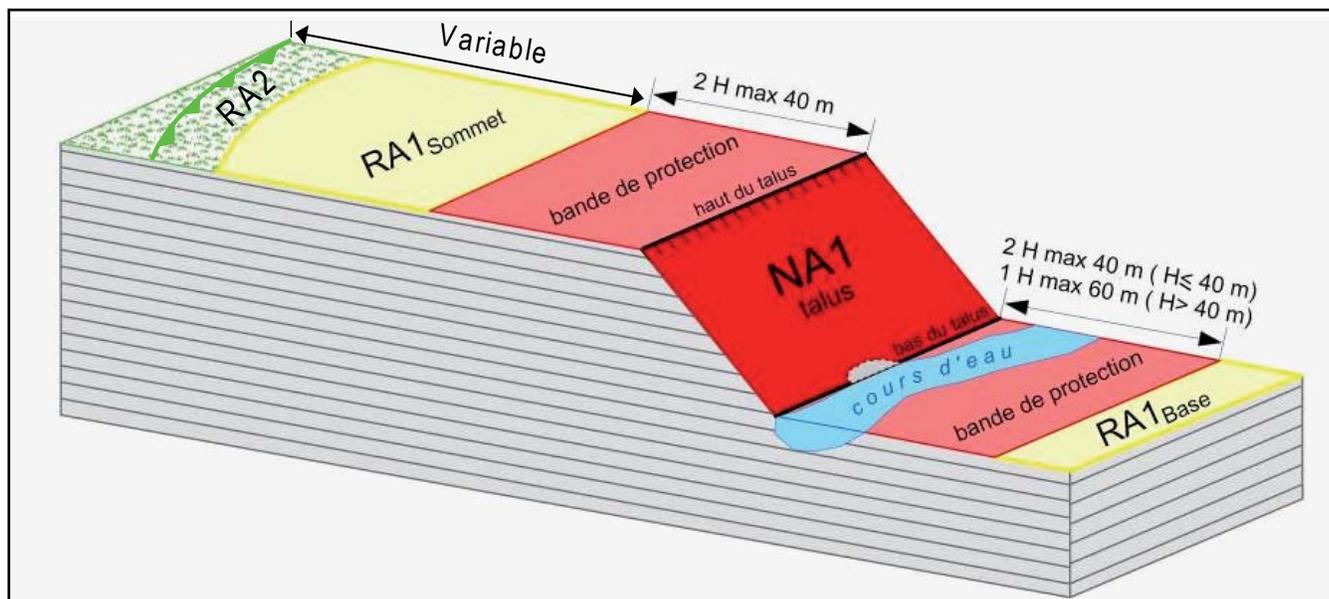


Figure 13 Bloc-diagramme illustrant un talus et ses bandes de protection

Tableau 3 Types de zones sur les cartes de contraintes relatives aux glissements de terrain produites par le MTQ

Zones de contraintes relatives aux glissements de terrain faiblement ou non rétrogressifs	
NA1	Zone composée de sols à prédominance argileuse, avec ou sans érosion, susceptible d'être affectée par des glissements d'origine naturelle ou anthropique
NA2	Zone composée de sols à prédominance argileuse, sans érosion importante, sensible aux interventions d'origine anthropique
NS1	Zone composée de sols à prédominance sableuse, avec érosion, susceptible d'être affectée par des glissements d'origine naturelle ou anthropique
NS2	Zone composée de sols à prédominance sableuse, sans érosion, susceptible d'être affectée par des glissements d'origine naturelle ou anthropique
NH	Zone composée de sols hétérogènes ou de roc altéré, avec ou sans érosion, susceptible d'être affectée par des glissements d'origine naturelle ou anthropique
NHd	Zone située à l'embouchure d'un ravin, susceptible d'être affectée par l'étalement de débris hétérogènes lors de crues importantes
NR	Zone composée de roc ou de fragments de roc, susceptible d'être affectée par des chutes de bloc d'origine naturelle ou d'être déstabilisée par des interventions d'origine anthropique
NC	Zone contenant des couches de sols à prédominance argileuse dont une partie a déjà été mobilisée par un ancien glissement de terrain susceptible d'être réactivé par des phénomènes naturels ou par des interventions d'origine anthropique

Zones de contraintes relatives aux glissements de terrain fortement rétrogressifs	
RA1 _{Sommet}	Zone composée de sols à prédominance argileuse, située au sommet du talus, pouvant être emportée par un glissement de grande étendue
RA1 _{Base}	Zone située à la base des talus pouvant être affectée par l'étalement de débris provenant des zones RA1 _{Sommet}
RA1—NA2	Zone composée de sols à prédominance argileuse, sans érosion importante, sensible aux interventions d'origine anthropique, pouvant être affectée par un glissement de terrain de grande étendue
RA2	Zone composée de sols à prédominance argileuse, pouvant hypothétiquement être affectée par des glissements de terrain de grande étendue

Plusieurs municipalités du Québec ont déjà été cartographiées, soit depuis 2003 par le MTQ, soit par le MRN entre 1976 et 1986. L'annexe 2 présente la liste des municipalités que le MRN a cartographiées; il est à noter que la cartographie ne couvre pas nécessairement l'ensemble du territoire municipal. L'annexe 3 renferme la liste des municipalités pour lesquelles le MTQ a produit des cartes de contraintes; dans ce cas, la cartographie couvre, en général, la totalité de la municipalité. La figure 14 montre l'étendue du territoire québécois qui a été cartographié dans la zone ayant un potentiel d'exploitation des gaz de schiste. Le travail se poursuivra au cours des prochaines années afin de cartographier les secteurs qui ne l'ont pas été et qui sont potentiellement exposés aux glissements de terrain. La priorisation des régions à cartographier est effectuée par un comité interministériel composé des ministères suivants : MSP, MTQ, MRN, MAMROT et ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP). Les secteurs sont évalués en fonction, notamment, de la probabilité que des glissements de terrain surviennent, de la population exposée et de la pression de développement. Il est à noter que les secteurs les plus vulnérables à l'apparition de glissements fortement rétrogressifs sont déjà couverts par la cartographie gouvernementale.

Comme l'illustre la figure 14, huit puits de gaz de schiste existants se situent dans un secteur déjà couvert par la cartographie, mais aucun d'entre eux ne se trouve à l'intérieur d'une zone potentiellement exposée aux glissements de terrain.

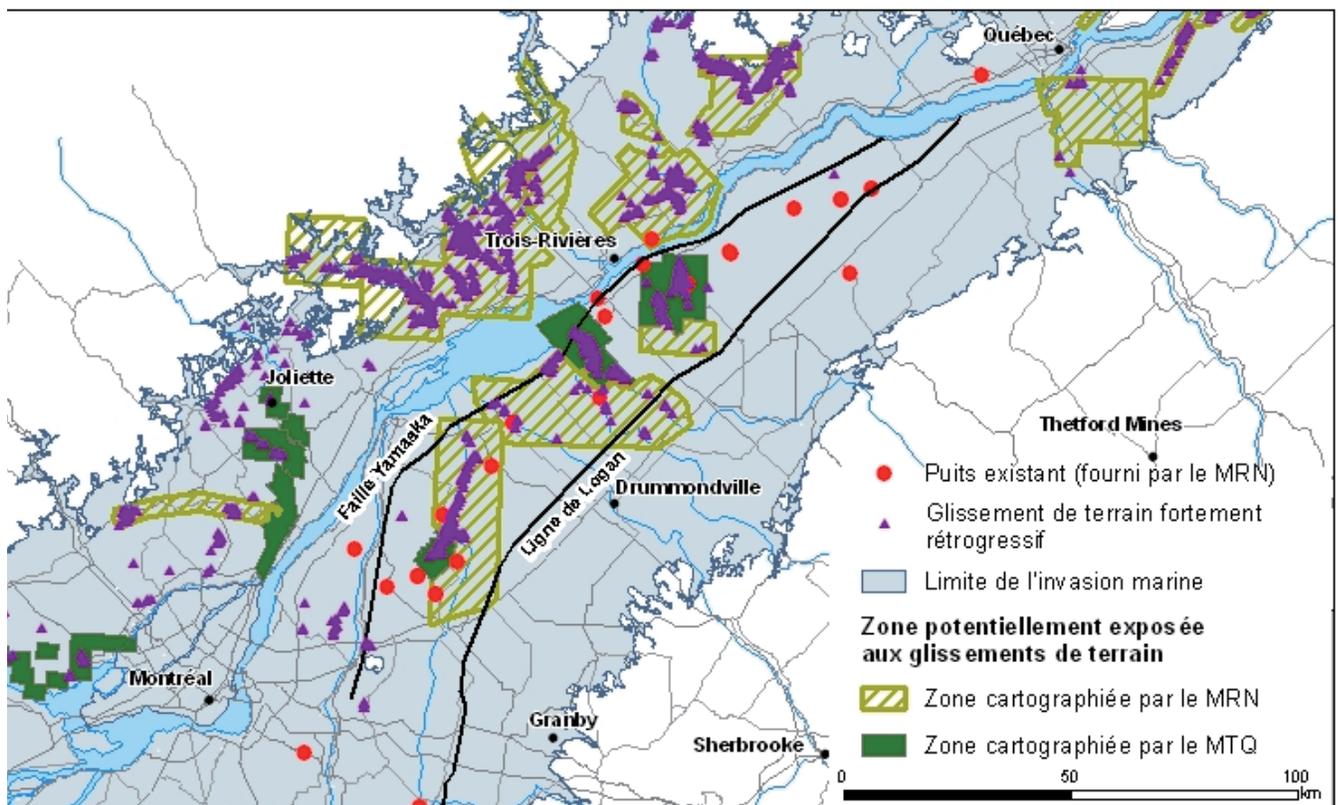


Figure 14 Étendue du territoire québécois cartographié par le MTQ et le MRN dans la zone ayant un potentiel d'exploitation des gaz de schiste, en date de juin 2013

Actuellement, le Règlement sur le pétrole, le gaz naturel et les réservoirs souterrains (c. M-13.1, r.1), au chapitre III, section I, article 22, 3e alinéa, stipule que le titulaire d'un permis de forage ne peut forer un puits à moins de 100 mètres de la ligne des hautes eaux d'un cours d'eau. Cependant, comme c'est représenté sur la coupe de la figure 15, cette distance aurait été insuffisante pour empêcher les travailleurs et la plateforme de forage d'être emportés ou endommagés par le glissement fortement rétrogressif survenu à Saint-Jude au printemps 2010 (Locat et al., 2011). Un inventaire des glissements fortement rétrogressifs au Québec réalisé par le MTQ montre que les distances de recul de ce type de glissements peuvent atteindre jusqu'à 1,4 kilomètre, ce qui fut le cas lors du glissement survenu à Saint-Alban en 1894.

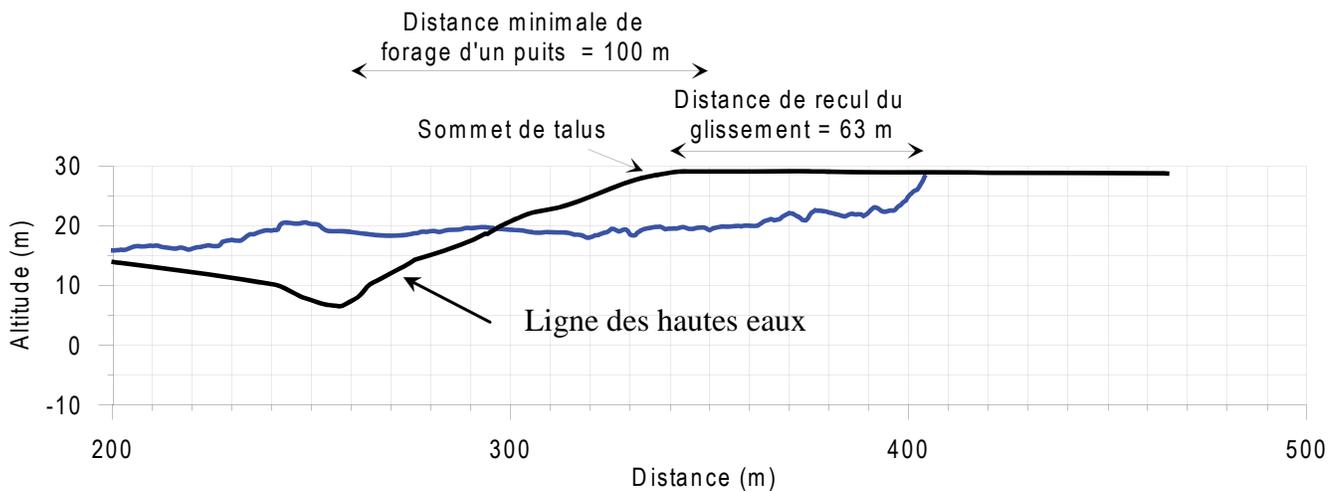


Figure 15 Coupe du glissement survenu à Saint-Jude en 2010

Constat

Le glissement fortement rétrogressif de Saint-Jude survenu au printemps 2010 démontre que la distance prescrite par le Règlement sur le pétrole, le gaz naturel et les réservoirs souterrains aurait été insuffisante pour empêcher les travailleurs et la plateforme de forage d'être emportés ou endommagés par le glissement de terrain.

Afin d'assurer la sécurité du public et des travailleurs de l'industrie gazière, les puits verticaux devraient être localisés à l'extérieur des zones potentiellement exposées aux glissements de terrain lorsque des cartes gouvernementales sont disponibles. Ils devraient aussi être situés à l'extérieur des zones hypothétiques qui sont indiquées sur les cartes du MRN et des zones RA2 qui figurent sur les cartes du MTQ.

Par la suite, si une entreprise gazière voulait localiser un puits vertical dans une zone potentiellement exposée aux glissements de terrain, elle devrait faire réaliser une étude par une firme spécialisée en géotechnique. Cette dernière devrait évaluer la stabilité actuelle du site afin de confirmer que le puits vertical ne serait pas menacé par un glissement de terrain. Elle devrait aussi confirmer que l'intervention envisagée n'agirait pas comme un facteur déclencheur en déstabilisant le site et les terrains adjacents, et que l'utilisation subséquente de ce site ne constituerait pas un facteur aggravant en diminuant indûment les coefficients de sécurité qui y sont associés. Le cas échéant, l'expert devrait présenter des recommandations sur les précautions à prendre et sur les mesures de protection nécessaires pour maintenir en tout temps la stabilité du site et la sécurité de la zone à l'étude.

De plus, la cartographie gouvernementale constitue un outil pouvant être utilisé par les ministères ayant à délivrer des permis d'exploration ou d'exploitation, tels que le MDDEFP et le MRN.

Avis du groupe d'experts

Lorsque des cartes gouvernementales sont disponibles, les puits verticaux devraient être localisés à l'extérieur des zones potentiellement exposées aux glissements de terrain afin d'assurer la sécurité du public et des travailleurs de l'industrie gazière.

Les ministères ayant à délivrer des permis d'exploration ou d'exploitation, tels que le MDDEFP et le MRN, devraient tenir compte de la cartographie gouvernementale.

CHAPITRE 4

ÉLÉMENTS AGGRAVANTS ET DÉCLENCHEURS POTENTIELS LIÉS À L'EXPLORATION ET À L'EXPLOITATION DU GAZ DE SCHISTE

Au Québec, selon l'inventaire des études effectuées par le gouvernement (Fortin et al., 2008), environ 40 % des glissements de terrain sont liés à des interventions humaines qui fragilisent des zones déjà vulnérables à ce phénomène. Les modifications inappropriées de nature anthropique peuvent agir comme des facteurs déclencheurs de glissements de terrain ou, plus couramment, comme des facteurs aggravant l'instabilité des talus. Dans ce dernier cas, elles ont pour effet de diminuer le coefficient de sécurité du talus sans causer directement un glissement de terrain. Par contre, dans une telle situation, la rupture peut être provoquée par un facteur déclencheur qui n'aurait pas été suffisamment important sans ces modifications. Par conséquent, toutes les interventions pouvant compromettre les conditions d'équilibre d'un talus doivent être évitées.

Il est reconnu que les glissements de terrain peuvent être déclenchés par des vibrations, notamment celles qui sont dues aux séismes, par l'érosion au pied d'un talus, par l'augmentation des pressions d'eau interstitielle, par les surcharges au sommet du talus, par les déblais ou les excavations à la base du talus ainsi que par les concentrations d'eau vers la pente. L'analyse de la documentation déposée dans le contexte du mandat du BAPE révèle que certaines activités liées aux gaz de schiste pourraient agir comme des facteurs aggravants ou déclencheurs de glissements de terrain.

4.1 Vibrations et sismicité

À l'occasion des travaux de la commission d'enquête du BAPE, des questions ont été soulevées quant aux possibilités que les vibrations générées par les travaux d'exploration et d'exploitation des puits ainsi que les séismes et microséismes qui pourraient être induits par ces travaux puissent provoquer des glissements de terrain.

Levés sismiques effectués par camions vibreurs

Dans son mémoire, Géophysique GPR inc. (BAPE, DM165) mentionne que la collecte des données se fait au moyen de 3 à 5 camions qui vibrent de façon synchronisée par périodes de 8 à 16 secondes et qui se déplacent d'environ 2 à 4 mètres entre les points d'impact. Un technicien s'assure que l'intensité des vibrations transmises, en fait de vitesse particulière, est inférieure à 15 millimètres par seconde. Une inspection visuelle de l'extérieur des bâtiments situés à moins de 40 mètres de la ligne sismique est effectuée. La compagnie précise aussi que si des édifices sont situés à moins de

10 mètres des camions vibreurs, aucune vibration n'est produite dans cette partie de la ligne sismique.

Le groupe d'experts considère qu'une valeur maximale d'intensité de vibration, en fait de vitesse particulière, de 15 millimètres par seconde, comme il est mentionné dans le mémoire de Géophysique GPR inc. (DM165), est élevée. D'un autre côté, ce niveau d'intensité est comparable aux vibrations ressenties à proximité des bâtiments lorsque des rouleaux vibrants compactent les sols pour la construction de route. Comme la situation demeure ponctuelle et que les citoyens sont prévenus, la tolérance de ceux-ci envers ce type de vibrations augmente.

Quant aux possibilités que ces vibrations puissent endommager les résidences, selon les critères de dommages de l'US Bureau of Mines (USBM) ou de l'Office of Surface Mining (OSM), pour une gamme de fréquences entre 9 et 13 hertz représentative de ce type d'opération, la limite acceptable d'intensité des vibrations est d'environ 19 millimètres par seconde pour les revêtements en panneaux de gypse et de 12,7 millimètres par seconde pour les murs de plâtre (Hopler, 1998). Il est donc possible de conclure que les risques de dommages sont faibles ou nuls. Il faut préciser qu'il s'agit de dommages esthétiques et non structuraux.

Selon Oriard (1999), quelques cas de relevés avec des camions vibreurs auraient eu des effets sur les sols situés directement sous la source de vibration ou immédiatement à côté de celle-ci (quelques mètres). Il ne fait référence toutefois qu'au seul cas de glissement de terrain qui est survenu à la suite d'une liquéfaction du sol. Cet incident a été très médiatisé, et il revient d'ailleurs dans toutes les discussions et tous les commentaires lors des séances publiques du BAPE. Le glissement s'est produit directement sous les camions vibreurs (Hryciw et al., 1990). Il est à souligner que la route avait été construite sur des sols lâches et de la tourbe à l'extrémité d'un lac au Michigan, des conditions extrêmement défavorables pour la stabilité d'une route.

Selon Saccheri et Morris (2009), l'énergie totale relâchée par 5 camions équivaut à un séisme de magnitude 1,75 sur l'échelle de Richter. L'intensité des vibrations du sol à proximité des camions correspond à environ un dixième de celle qui est normalement nécessaire pour causer des dommages aux canalisations enfouies. L'effet diminue rapidement au fur et à mesure qu'on s'éloigne des camions.

De nombreuses campagnes de collecte de données ont été réalisées à l'aide de cette technologie en Amérique du Nord et même, depuis plusieurs années, dans les basses terres du Saint-Laurent. À la connaissance du comité d'experts, aucun glissement de terrain n'a été signalé.

Constat

L'effet le plus important des levés sismiques effectués par des camions vibreurs est lié au sentiment de gêne ou d'inconfort que les vibrations créent chez les citoyens, compte tenu de la longueur du temps d'acquisition des données (de 8 à 16 secondes) et des vibrations générées.

Les vibrations engendrées par cette opération sur la plaine argileuse ne représentent pas un facteur déclencheur de glissements de terrain.

Levés sismiques effectués à l'aide d'explosifs

Du côté des vibrations générées par les travaux à l'explosif, les études réalisées pour analyser le phénomène et pour déterminer des seuils de vibrations sécuritaires ont permis d'en arriver à certains constats. Charlie et al. (1987), dans une revue de la littérature, font référence à plusieurs auteurs. Entre autres, Puchkov, en 1962, a rapporté que la liquéfaction ne peut se produire à des vitesses de particules inférieures à 70 millimètres par seconde, peu importe le type de sol saturé. Long et al. (1981), quant à eux, ont conclu que des pressions d'eau interstitielle résiduelles induites par les sautages se produisent lorsque les vitesses particulières excèdent 50 millimètres par seconde. Banister et Ellett (1974) ont enregistré des augmentations de pressions d'eau interstitielle dans les silts argileux saturés qui sont sujets à des vitesses particulières excédant 110 millimètres par seconde. Charlie et al. (1987) et Veyera (1985), de leur côté, ont observé, lors d'essais sur des sables lâches saturés, que des pressions d'eau interstitielle résiduelles apparaissaient lorsque les vitesses particulières excédaient 75 millimètres par seconde et que, sous ce seuil, la liquéfaction ne peut se produire. Aussi, à la lumière de ces observations, ils suggèrent de limiter la vitesse de pointe des particules des vibrations à moins de 25 millimètres par seconde dans le cas du silt ou du sable lâche saturé, et à moins de 50 millimètres par seconde pour les autres types de sol. Ces critères devraient permettre de conserver les contraintes au-dessous du niveau qui entraînerait une augmentation des pressions d'eau interstitielle résiduelles.

Pour les levés sismiques à l'aide d'explosifs, Géophysique GPR inc. (BAPE DM165) mentionne des quantités maximales de 2 kilogrammes d'explosifs enfouis entre 5 et 10 mètres de profondeur. La nouvelle réglementation sur le pétrole, le gaz naturel et les réservoirs souterrains stipule que tout tir aux explosifs doit être effectué aux distances suivantes : 10 mètres d'une borne d'arpentage; 30 mètres d'un chemin de fer; 75 mètres d'un pipeline enfoui ou 100 mètres d'un pipeline de surface appartenant à un tiers; 100 mètres d'un cimetière; 120 mètres d'un puits de pétrole ou de gaz naturel appartenant à un tiers; 200 mètres d'un puits d'eau ou d'un aqueduc, d'un bâtiment, d'une ligne à haute tension et d'un ouvrage souterrain. À 200 mètres de distance, Géophysique GPR inc. estime que l'intensité des vibrations sera inférieure à 3,2 millimètres par seconde, compte tenu de l'atténuation des vibrations dans le sol avec la distance.

Constat

L'effet le plus important des vibrations engendrées lors de la collecte de données géophysiques à l'aide d'explosifs est lié au sentiment de gêne ou d'inconfort que celles-ci créent chez les citoyens, car le seuil de perception humain est d'environ 0,3 millimètre par seconde. Ces vibrations ne constituent pas une source de dommages pour les résidences ou les infrastructures publiques lorsqu'un contrôle adéquat est exercé.

Les vibrations générées lors de sondages géophysiques ne peuvent pas représenter un facteur déclencheur de glissements de terrain, compte tenu de la faible intensité des vibrations générées par les levés sismiques.

Perforation du tubage du forage à l'aide d'explosifs

Durant la phase de développement d'un puits, l'utilisation d'explosifs pour créer des ouvertures dans le tubage du forage et ainsi mettre en contact le shale d'Utica et le puits est une technique bien connue dans l'industrie gazière et pétrolière depuis de nombreuses années. Les premiers essais remontent en fait aux années 1930 (Arsenault,

2008). Les explosifs utilisés sont spécialement conçus pour cet usage. Ils sont constitués de quatre éléments principaux : une capsule pour contenir la charge explosive, un détonateur, la charge explosive principale et un contenant métallique. Les charges sont placées dans un contenant appelé « fusil à perforer » et installées dans la section prédéterminée du tubage du forage. Ces « fusils à perforer » peuvent être récupérables. Une charge de 138 grammes est utilisée par section perforée (BAPE DT-3).

Constat

Compte tenu de la faible quantité d'explosifs utilisée lors de la perforation du tubage et de la profondeur d'exécution des travaux, les effets de la détonation de ces charges sont négligeables en ce qui concerne les vibrations générées ou la sismicité induite. Ils ne représentent donc pas un élément déclencheur de glissements de terrain.

Fracturation hydraulique

Il est connu que l'injection d'eau ou d'autres fluides réalisée pour la fracturation lors d'extraction de pétrole ou de gaz ainsi que lors d'activités liées à la géothermie profonde peuvent engendrer des microséismes. Les documents transmis à l'occasion des travaux de la commission d'enquête du BAPE mentionnent que l'extension de la fracturation hydraulique est évaluée en fonction des microséismes enregistrés. La magnitude de ces microséismes atteint de 10-1,6 à 10-3,6. C'est ce qu'affirme également l'Association pétrolière et gazière du Québec (APGQ), qui mentionne (BAPE DB-23) que « les "fracs" hydrauliques sont environ 100 000 fois plus petits que le plus faible séisme perceptible par l'homme ».

En 2006, dans le contexte du projet de centrale géothermique Deep Heat Mining à Bâle en Suisse, un séisme de magnitude 3,4 sur l'échelle de Richter est survenu lors des opérations. Après cet incident, les travaux ont été suspendus avant d'être abandonnés en décembre 2009 à la suite des conclusions d'un expert selon lesquelles le projet géothermique aurait pu provoquer, sur une période de trente ans, 200 tremblements de terre d'une magnitude pouvant atteindre jusqu'à 4,5 sur l'échelle de Richter (Swissinfo.ch, 2006 et 2009).

Le contexte suisse est un peu différent de celui du Québec, la zone sismique étant plus active dans la région de Bâle que la zone ciblée pour l'exploration et l'exploitation des gaz de schiste. De plus, la fracturation hydraulique réalisée en géothermie se situe à environ 5 kilomètres de profondeur par rapport à 2 kilomètres pour les gaz de schiste.

Par ailleurs, un séisme de magnitude de 2,3 a été enregistré en avril 2011 à Blackpool en Angleterre à la suite de travaux de fracturation hydraulique . (Site du British Geological Survey)

Selon le rapport de la commission d'enquête du BAPE (2011) et Kramer (1996), seuls des séismes d'une magnitude de plus de 4,5 peuvent générer des glissements de terrain.

Constat

Les microséismes générés par la fracturation hydraulique ne peuvent pas provoquer de glissements de terrain dans le contexte québécois.

Cependant, il est possible que la sismicité induite par la fracturation hydraulique ait un effet sur l'intensité et sur la fréquence des tremblements de terre et qu'elle puisse déclencher éventuellement des glissements de terrain.

Avis du groupe d'experts

Comme il a été mentionné lors de la commission d'enquête du BAPE, une étude sur la sismicité induite par la fracturation hydraulique devrait être menée. Cette étude devrait caractériser les contraintes in situ et indiquer les failles traversant les massifs rocheux présents.

Exploitation

Dans la littérature (Guha, 2000) sont rapportés quelques cas où l'exploitation pétrolière et gazière a généré de la sismicité induite (magnitude supérieure à 3,0). Par exemple, Grasso (1992) a examiné la sismicité dans les champs de gaz et de pétrole de la Hollande, des Pyrénées de l'ouest, de Gassi (Ouzbékistan) et de la mer du Nord. Il a décelé de multiples indices de sismicité induite près des champs pétroliers et gaziers de ces territoires. Pour ce qui est de la sismicité induite par l'exploitation des gaz de schiste, le groupe d'experts n'a répertorié aucune donnée scientifique.

Constat

Compte tenu du manque d'information, il est impossible de confirmer que la sismicité induite par l'exploitation des gaz de schiste n'a aucun effet sur la fréquence des tremblements de terre et ne déclenche pas de glissements de terrain.

Avis du groupe d'experts

Une étude portant sur les effets de l'exploitation du gaz de schiste sur la sismicité induite devrait être réalisée. Elle devrait statuer sur la sismicité induite et estimer la magnitude des séismes provoqués, le cas échéant.

Trafic lourd

Dans les différents documents déposés lors des travaux de la commission d'enquête du BAPE, il est mentionné que, durant la phase de fracturation hydraulique, il y aurait quotidiennement une intense circulation de véhicules lourds (environ 40 passages de camions entre 7 h et 22 h). Les activités liées à l'exploration et à l'exploitation des gaz de schiste augmenteraient donc de façon considérable le trafic lourd sur le réseau routier. Le rapport du BAPE mentionne qu'une étude réalisée au Texas a démontré que l'effet du camionnage était le problème le plus important généré par ces activités.

Le MTQ qualifie les vibrations générées par la circulation routière de fortement perceptibles lorsqu'elles atteignent une intensité de 1,5 millimètre par seconde, d'incommodantes lorsqu'elles se situent entre 1,5 et 2,0 millimètres par seconde et d'irritantes lorsqu'elles dépassent 2,0 millimètres par seconde (rapport interne, SGG, MTQ). Ces valeurs correspondent plus précisément aux vibrations perçues par l'humain, et aucun critère de dommage n'y est associé. Par ailleurs, l'intensité des vibrations induites par la circulation routière atteint rarement des degrés qui pourraient être fortement dommageables, car le seuil de tolérance des gens (2 millimètres par seconde) est dépassé bien avant que soit atteinte la valeur à partir de laquelle des dommages sont possibles (encore une fois, il est question de dommages esthétiques). Il demeure que lorsque l'intensité des vibrations qui se propagent jusqu'aux résidences atteint et dépasse 0,5 millimètre par seconde sur les routes construites sur des dépôts d'argile, une augmentation des plaintes est observée.

Quant aux risques que les vibrations induites par le trafic routier provoquent des glissements de terrain, aucun cas n'est rapporté dans la littérature et, selon l'expérience du MTQ, aucun phénomène de ce type n'a été constaté parmi les centaines de cas qui ont été traités.

Constat

L'augmentation du trafic lourd associée aux travaux de la phase de fracturation hydraulique contribuerait à accélérer l'endommagement des routes, notamment les routes secondaires, qui ne sont pas nécessairement conçues pour résister à ce type de trafic. Les dommages surviendraient plus rapidement et l'apparition d'irrégularités ou la dégradation de ces routes seraient constatées. Cette situation se traduirait par une augmentation de l'intensité des vibrations qui seraient générées et qui se propageraient jusqu'aux résidences, ce qui aurait pour effet d'accroître le sentiment de gêne et d'inconfort des citoyens. Cependant, de telles vibrations ne sont que rarement responsables de dommages causés aux résidences.

La faible intensité des vibrations engendrées par le trafic routier fait en sorte que les contraintes générées dans le sol sont insuffisantes pour en modifier les caractéristiques et, par le fait même, pour entraîner une augmentation des pressions d'eau interstitielle pouvant mener à un glissement de terrain.

Avis du groupe d'experts

Des mesures devraient être envisagées pour améliorer la structure des routes et l'entretien des chaussées afin de compenser la détérioration prématurée du réseau due au trafic lourd. Ces mesures permettraient de limiter le sentiment de gêne et d'inconfort des résidents qui serait créé par le passage des véhicules lourds. Idéalement, les mesures devraient permettre de maintenir l'intensité des vibrations transmises aux résidences au même niveau que les vibrations ressenties avant l'augmentation du trafic lourd.

Dans le cas où les sols sont argileux, l'intensité maximale admissible devrait être inférieure à 1 millimètre par seconde le jour et de moins de 0,3 millimètre par seconde la nuit, ce qui correspond à la limite supérieure du seuil de perception. Si les sols sont pulvérulents (sable et gravier), l'intensité maximale des vibrations devrait idéalement demeurer inférieure au seuil de perception.

4.2 Pression d'eau interstitielle

Les dépôts d'argile marine post-glaciaire au Québec sont généralement confinés entre deux couches dont la perméabilité est plus élevée que l'argile, soit à la base, des dépôts glaciaires ou le roc altéré et au sommet, une couche de surface constituée de sols granulaires généralement sableux ou d'argile, raide et fissurée, communément appelée croûte argileuse. Les dépôts glaciaires ou le roc altéré sous-jacents à l'argile possèdent une valeur de perméabilité généralement au moins cent fois plus élevée que l'argile.

Typiquement, les talus bordant les cours d'eau de la vallée du Saint-Laurent présentent une variation des pressions d'eau interstitielle, que ce soit à la base ou au sommet. Les gradients sont généralement descendants au sommet du talus, hydrostatiques au milieu du talus et ascendants à la base du talus (figure 16). L'importance des surpressions à la base des talus varie en fonction de la position de la couche de sol plus perméable sous-jacente à l'argile. Locat et al. (2011), Lefebvre (1986) ainsi que Lafleur et Lefebvre (1980) ont étudié l'influence de la position d'une unité plus perméable sous-jacente sur la stabilité d'un dépôt d'argile. En résumé, tant que la couche plus perméable est confinée par une couche moins perméable sous le pied du talus, la valeur du gradient hydraulique ascendant dans la couche moins perméable augmente à mesure que la couche plus perméable est près de la base du talus, ce qui a un effet négatif sur la stabilité de ce dernier. Lorsque le pied du talus se trouve dans une couche plus perméable, le drainage dans la couche moins perméable s'effectue vers le bas dans le talus, ce qui favorise, de façon relative, sa stabilité.

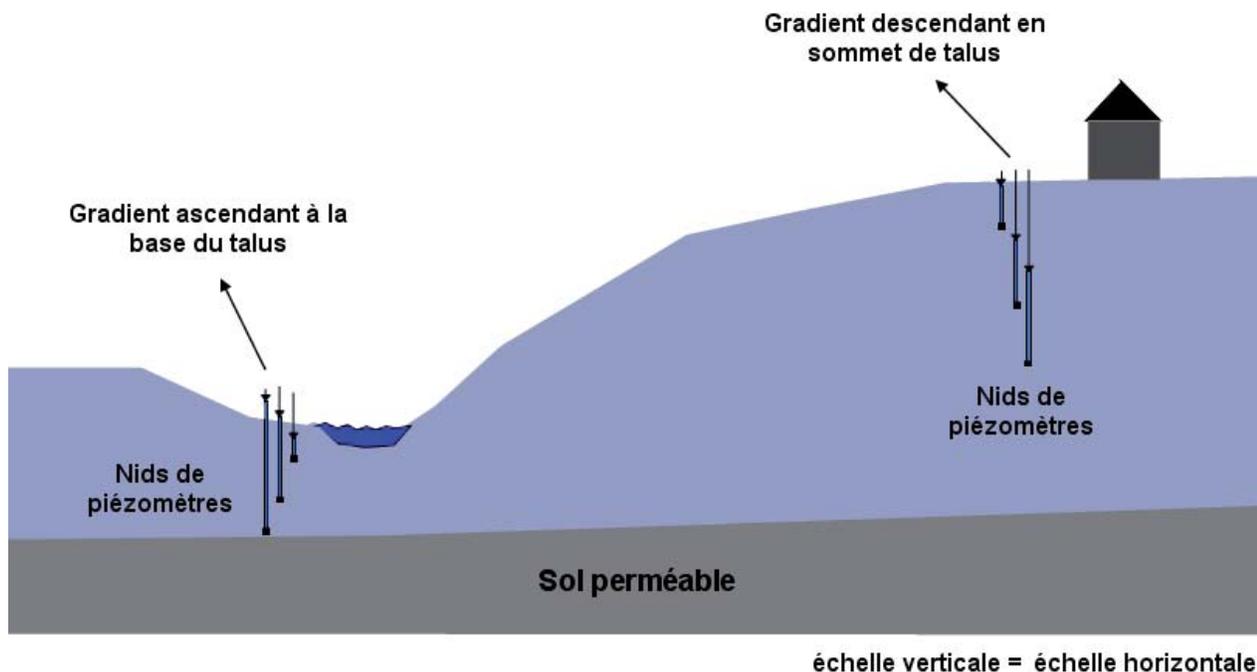


Figure 16 : Gradients généralement observés dans les talus des cours d'eau des basses terres du Saint-Laurent

L'augmentation des pressions d'eau, particulièrement à la base d'un talus, entraîne une diminution des contraintes effectives dans le sol. La résistance au cisaillement des sols étant fonction de la contrainte effective, cette diminution occasionne une baisse du coefficient de sécurité. Puisque les talus bordant les cours d'eau de la vallée du Saint-Laurent ont naturellement un état d'équilibre précaire, une modification du régime d'écoulement des eaux souterraines dans les couches de sol plus perméables pourrait déclencher un glissement si elle était située à une position critique par rapport au pied de talus. En effet, si de telles pressions ne changent pas de manière importante la possibilité de glissements superficiels, elles augmentent la probabilité d'occurrence des glissements profonds.

Il importe donc d'évaluer si les activités liées à l'exploration et à l'exploitation des gaz de schiste pourraient entraîner une augmentation suffisamment grande des gradients hydrauliques pour diminuer la stabilité des talus. Les activités considérées comme pouvant causer une augmentation des pressions d'eau interstitielle pourraient être liées à la migration des gaz, au battage du tubage ou à la transmission des pressions lors de la fracturation.

4.2.1 Migration des gaz

Fuite entre le puits et la formation géologique

Selon les documents consultés, dans le cas où un problème d'intégrité du puits surviendrait, il pourrait y avoir une fuite et une migration de gaz entre le tubage et la formation géologique ou le massif de sol. Une telle migration de gaz dans un horizon plus perméable (roche fracturée ou till) se trouvant sous le dépôt argileux pourrait entraîner une augmentation des pressions d'eau interstitielle dans cet horizon.

Il est reconnu que dans les basses terres du Saint-Laurent, l'horizon perméable se trouvant généralement à la base de l'argile présente les conditions propices à l'accumulation de gaz. Selon Clark (1985), la présence de gaz a été notée à maintes reprises dans des puits creusés pour l'approvisionnement en eau. De plus, l'expérience du MTQ montre que, lors de la réalisation de sondages, des relâchements de gaz peuvent se produire lorsque le substratum ferme sous l'argile est atteint (Lamontagne et al., 2007). Bien que cet article mentionne qu'il est maintenant reconnu que des glissements sous-marins peuvent être déclenchés par des émanations de méthane, aucun cas répertorié de glissement de terrain ne paraît avoir été déclenché par la présence naturelle de gaz dans les sols. Par contre, dans des conditions naturelles, la pression de gaz présente dans le roc altéré sous les dépôts meubles est en équilibre avec le massif de sol sus-jacent. Une modification de cet équilibre par l'apport supplémentaire de pression lié aux activités de l'industrie gazière pourrait diminuer la stabilité des talus. Dittrich et al. (2010) présente des indications relatives à l'accumulation de gaz sous des dépôts argileux ainsi qu'à leur influence sur la stabilité de talus.

Constat

En cas de fuite entre le puits et la formation géologique, l'apport supplémentaire de gaz sous pression causé par la migration de gaz dans des couches drainantes sous les massifs argileux pourrait avoir un effet sur la stabilité des talus argileux situés à proximité, mais il est impossible pour l'instant de tirer des conclusions quant à l'importance de cet effet.

Avis du groupe d'experts

Considérant l'éventualité d'une fuite survenant entre le puits et la formation géologique et compte tenu du manque d'information concernant les effets potentiels de la migration des gaz sur l'augmentation des pressions d'eau interstitielle, une étude scientifique examinant cet aspect devrait être entreprise. Cette étude, qui pourrait être réalisée par des hydrogéologues en collaboration avec des géotechniciens, devrait porter entre autres sur la propagation du gaz dans le dépôt glaciaire ou le roc altéré afin d'évaluer la distance de propagation potentielle dans ces couches en cas de fuite entre le puits et la formation géologique.

Compte tenu du manque d'information sur ce sujet et afin de s'assurer que les activités de l'industrie gazière n'altèrent pas la stabilité des talus, la recommandation formulée au point 3.1 devrait s'appliquer où il y a une cartographie gouvernementale. Dans le cas où le puits vertical est situé à l'intérieur des limites marines (figure 9) et dans un secteur non couvert par la cartographie gouvernementale, par mesure préventive, aucun nouveau puits vertical ne devrait être localisé dans un talus et à l'intérieur de bandes de terrain situées au sommet et à la base d'un talus, comme il est mentionné au tableau 4. Les distances à respecter au sommet et à la base du talus dépendent de la hauteur (H) de celui-ci. La hauteur du talus doit être déterminée selon la définition du talus présentée à l'annexe 1.

Tableau 4 Distances à respecter au sommet et à la base du talus pour la localisation des nouveaux puits verticaux lorsqu'il n'y a aucune cartographie gouvernementale

<i>Distance d'un talus</i>	
<i>H < 10 mètres</i>	<i>H ≥ 10 mètres</i>
2 H max. 40 mètres	2000 mètres

De plus, selon la suggestion des experts externes consultés, des mesures devraient être prises afin d'éviter des augmentations de pressions d'eau interstitielle dans le dépôt glaciaire ou le roc altéré, et ce, pour tous les puits verticaux (existants et nouveaux dans les zones cartographiées) situés à moins de 2000 mètres d'un talus d'une hauteur de 10 mètres et plus. Afin de s'assurer qu'aucune pression supplémentaire n'est exercée dans les couches plus perméables, des nids de piézomètres électriques pourraient être mis en place, ce qui permettrait de mesurer les pressions d'eau interstitielle dans la couche de sol perméable sous l'argile et de déterminer le gradient hydraulique. Ce type de piézomètre permet d'obtenir des valeurs de pression dans les couches cibles à des intervalles déterminées. Au minimum quatre nids de piézomètres devraient être installés à tous les 10 mètres à partir du puits situé le plus près du talus. Les lectures devraient être prises durant au moins six mois avant le début ou la reprise des activités d'exploration ou d'exploitation et couvrir la période printanière, puisque naturellement, les pressions les plus élevées sont enregistrées entre les mois de mars et de juin. Ces valeurs permettraient de déterminer le seuil critique, établi à 10 % de la valeur maximale mesurée durant cette période. De plus, un piézomètre de référence devrait être installé à environ 100 mètres du puits vertical afin de détecter toute variation anormale dans les piézomètres situés plus près du puits. Dans le cas où le seuil critique serait dépassé, une analyse détaillée devrait être effectuée afin d'établir un périmètre d'évacuation adéquat. Par ailleurs, lors de la fermeture d'un puits situé à l'intérieur des zones potentiellement exposées aux glissements de terrain ou à l'intérieur des distances prescrites au

tableau 4, des mesures devraient être mises en place afin d'assurer l'absence de pressions dans les couches perméables sous-jacentes aux couches argileuses et d'ainsi s'assurer que les activités de l'industrie ne seront pas néfastes pour la stabilité des talus à long terme.

Parmi les puits de gaz de schiste existants, treize se trouvent à l'intérieur des distances prescrites au tableau 4. Toutefois, les distances recommandées relativement à la position du puits vertical par rapport au talus, pour les secteurs cartographiés ou non, pourraient être revues à la suite des études portant sur les effets de la migration des gaz sur l'augmentation des pressions d'eau interstitielle.

Avis du groupe d'experts

Considérant l'éventualité d'une fuite survenant entre le puits et la formation géologique ainsi que la possibilité que cette fuite entraîne une augmentation des pressions d'eau interstitielle dans les couches perméables sous-jacentes aux couches argileuses, des mesures devraient être prises afin d'éviter une telle augmentation pour tous les puits et lors de leur fermeture. Les mesures envisagées seraient entre autres d'implanter les puits verticaux à une distance suffisante des talus et d'installer des piézomètres afin de détecter toute variation anormale des pressions d'eau interstitielle, le cas échéant.

Fracturation hydraulique

L'utilisation de la fracturation hydraulique pour l'exploitation du gaz des lits de charbon (BAPE, 2011) a connu un essor important. Cette technique a été adaptée au cours des dernières années pour permettre d'extraire le gaz de roches peu perméables, tel le shale d'Utica. Elle consiste à injecter sous pression du liquide, du sable et des additifs pour augmenter la perméabilité de la roche en créant des fractures et en les maintenant ouvertes.

Dans le corridor 2, les puits profonds (plus de 1000 mètres de profondeur) sont d'abord verticaux, puis progressivement inclinés jusqu'à l'horizontale sur des distances qui peuvent atteindre quelques kilomètres. L'industrie du gaz de schiste au Québec tend à privilégier des forages horizontaux qui ont plus de 1000 mètres d'extension, de sorte que la fracturation hydraulique puisse se faire en profondeur et loin de l'emplacement du puits en surface.

Si une connectivité hydraulique entre la partie supérieure du roc et le lieu de la fracturation hydraulique se développait, les activités de fracturation pourraient faire augmenter les pressions d'eau interstitielle dans les sols et agir ainsi comme un facteur déclencheur de glissements de terrain. Par contre, même si des milliers de puits de gaz de schiste ont été fracturés en Amérique du Nord au cours des dernières années, bien peu de cas de contamination d'aquifère ont été répertoriés. Une étude récente menée dans les États de New York et de la Pennsylvanie (Osborn et al., 2011) a cependant démontré la présence de méthane thermogénique (provenant des profondeurs) dans l'eau souterraine. Les concentrations du gaz étaient plus élevées dans les secteurs où l'exploitation des gaz de schiste est très présente que dans les régions où ces gaz sont peu ou pas exploités, et ce, pour des contextes géologiques similaires (shales d'Utica et de Marcellus). De tels résultats laissent présumer que les activités de fracturation hydraulique contribueraient à augmenter la connectivité hydraulique entre le roc profond et la partie superficielle du roc sur laquelle reposent les dépôts meubles. Le contexte géologique québécois est toutefois différent de celui des États où l'étude a été réalisée. Dans ces États, les unités géologiques surmontant les shales d'Utica et de Marcellus présentent des ré-

seaux de fractures développés, alors qu'au Québec le shale d'Utica est généralement surmonté du shale de Lorraine, qui, lui, est très peu perméable, selon René Therrien, professeur à l'Université Laval (BAPE DT11).

Durant les séances publiques du BAPE, des experts ont avancé quelques données sur l'extension des fractures créées lors de la fracturation. Ces données peuvent être obtenues grâce à la microsismique. Des géophones enregistrent les vibrations générées par l'injection de fluides sous pression dans la roche, et les données sont ensuite interprétées. L'extension des fractures créées dans le shale d'Utica est d'environ une centaine de mètres, selon les données présentées au moment des audiences. Dans d'autres contextes géologiques, des fractures se sont déjà propagées verticalement jusqu'à 500 mètres. Toutefois, il n'existe aucune étude scientifique permettant de déterminer précisément les effets de la fracturation hydraulique telle que pratiquée par l'industrie du gaz de schiste. Pour pallier ce manque, l'Environmental Protection Agency des États-Unis a réalisé une étude scientifique indépendante visant à évaluer l'incidence de cette activité sur les sources d'eau potable (EPA, 2012). Un rapport d'étape a été publié en décembre 2012, et un projet de rapport final (pour commentaires) devrait être publié en 2014. Dans le contexte québécois (shale d'Utica), aucune donnée n'est actuellement disponible pour évaluer les effets de la fracturation hydraulique, puisque les renseignements recueillis demeurent la propriété exclusive des compagnies qui réalisent les travaux.

En plus de la méconnaissance des effets de la fracturation hydraulique, il y a pour le Québec une méconnaissance de la circulation des fluides entre les horizons profonds du roc (plus de 1000 mètres) et les horizons moins profonds (100 mètres jusqu'aux dépôts meubles). Les études hydrogéologiques passées et présentes s'intéressent à l'horizon qui est généralement exploité à des fins de consommation (moins de 100 mètres). Par conséquent, la dynamique hydrogéologique entre des profondeurs de 100 à 1000 mètres n'est pas très connue. Les études qui sont menées au Québec dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines et qui sont financées par le MDDEFP n'incluent pas, pour l'instant, l'étude des horizons profonds du roc.

Les discussions qui ont eu cours durant les travaux du BAPE ont porté principalement sur la portion de territoire qui retient l'intérêt de l'industrie gazière pour l'instant, soit celle qui se trouve entre la ligne de Logan et la faille de Yamaska (figure 4). La majeure partie des forages effectués par l'industrie du gaz de schiste au Québec y est localisée jusqu'à maintenant. Dans cette zone, le shale d'Utica est surmonté du shale de Lorraine. La présence du shale de Lorraine, argileux, sur plusieurs centaines de mètres au-dessus du shale d'Utica offrirait une couverture de faible perméabilité selon Denis Lavoie, chercheur de la Commission géologique du Canada. À son avis, les failles associées à l'évolution du bassin des basses terres du Saint-Laurent seraient inactives depuis plus de 200 millions d'années. Si l'on considère cette description faite par le chercheur, il n'y aurait aucune possibilité de développer une connectivité hydraulique avec la surface pour les puits plus profonds. Par contre, certains experts (Oliver et al., 1970, et Tremblay et al., 2003) ont affirmé dans leurs travaux que plusieurs failles ont été réactivées lors de séismes historiques le long de la vallée du Saint-Laurent.

Peu d'études portent sur la propagation des réseaux de fractures induits engendrés lors de la fracturation. Selon un des experts externes consultés, la direction de la propagation des fractures est largement déterminée par l'état des contraintes in situ. La présence locale de failles contrôle également cette propagation de manière importante. Les propriétés mécaniques des unités géologiques ont également une incidence. Finalement, le réseau de discontinuités naturelles caractérisant les unités géologiques influence fortement la ra-

mification des fractures induites. Ces aspects sont encore largement méconnus pour le contexte québécois.

Constat

Le manque d'information sur les effets de la fracturation hydraulique ainsi que le peu de connaissances sur la dynamique hydrogéologique dans les formations rocheuses profondes du Québec et sur la géologie structurale à grande échelle font en sorte qu'il n'est pas possible d'évaluer adéquatement, dans l'état actuel des connaissances, la probabilité que la fracturation hydraulique puisse éventuellement entraîner une augmentation des pressions d'eau interstitielle et, par conséquent, des glissements de terrain.

Avis du groupe d'experts

Une étude scientifique devrait examiner la possibilité que la fracturation hydraulique développe des chemins préférentiels propices à la migration de gaz ainsi qu'une connectivité hydraulique entre la zone exploitée en profondeur et les couches de sols plus perméables pour le contexte québécois.

4.2.2 Battage des tubages

Lors du forage, des tubages d'acier sont installés dans les puits. Ils servent à empêcher l'éboulement des parois du puits et à isoler les horizons géologiques rencontrés. La technique de forage utilisée est généralement le forage rotatif (BAPE DB1). L'injection de boue, d'air ou de gaz sert à ramener les résidus de forage. Dans ce cas, il y a peu d'effet sur la stabilité des talus.

Cependant, si les tubages sont installés par battage dans un dépôt d'argile, les effets de cette technique peuvent être comparés à ceux qui sont produits lors du battage d'un pieu de fondation. Le battage d'un pieu dans des dépôts argileux a pour conséquence de remanier le sol au pourtour du pieu et d'en diminuer sensiblement la résistance. Par ailleurs, le déplacement du sol créé par l'enfoncement d'un pieu entraîne l'augmentation des pressions d'eau interstitielle autour du pieu (Tanguay et Demers, 1990). Selon la littérature, la dimension du champ d'influence de ces pressions atteint de 2 à 15 fois le diamètre du pieu.

Selon l'article de Carson (1979), un glissement de terrain fortement rétrogressif de type étalement latéral est survenu à Rigaud en 1978 et aurait été provoqué par le battage de pieux au sommet d'un talus. De plus, en Suède, plusieurs glissements de terrain dans des argiles sensibles ont été déclenchés par le battage de pieux. Par contre, selon un inventaire sommaire de glissements de terrain ayant fait l'objet d'un avis technique du MTQ, aucun cas de glissement de terrain provoqué par le forage de puits d'approvisionnement en eau n'aurait été répertorié.

Constat

L'utilisation de la méthode de battage pour enfoncer les tubages dans les dépôts meubles aurait un effet minime sur la stabilité des talus si les puits verticaux étaient situés au-delà d'une distance égale à deux fois la hauteur du talus.

4.2.3 Transmission des pressions lors de la fracturation

Lors de la fracturation hydraulique, une pression d'eau supérieure à deux fois la pression hydrostatique au fond du puits est utilisée. Elle peut atteindre des valeurs de 60 à 70 mégapascals, selon les témoignages recueillis par la commission d'enquête du BAPE. Cette pression est appliquée jusqu'à ce qu'elle dépasse la résistance de la roche et engendre ainsi la formation de fractures. Dans un milieu saturé et en conditions non drainées, cette pression est transmise aux horizons géologiques environnants. Cependant, les documents consultés par le groupe d'experts ne contiennent pas d'information précise sur le rayon d'influence de cette pression vers les horizons sus-jacents et, ultimement, jusqu'au massif argileux.

Le groupe d'experts s'interroge sur la possibilité que ce phénomène puisse ainsi créer une augmentation des pressions d'eau interstitielle et, par conséquent, favoriser le développement de glissements de terrain. Toutefois, selon l'un des experts externes consultés, il semble peu probable que les contraintes induites lors de la fracturation puissent modifier l'état des contraintes in situ du massif argileux.

Constat

Le manque d'information sur les effets de la fracturation hydraulique ainsi que le peu de connaissances sur les propriétés physiques des formations rocheuses profondes du Québec font en sorte qu'il n'est pas possible d'évaluer adéquatement, dans l'état actuel des connaissances, la probabilité que la fracturation entraîne une transmission des pressions jusqu'au massif argileux.

Avis du groupe d'experts

Une étude scientifique devrait examiner les effets potentiels de l'opération de fracturation hydraulique sur la transmission des pressions jusqu'au massif argileux pour le contexte québécois.

4.3 Activités connexes sur le site

Plusieurs activités présentes sur le site peuvent être néfastes pour la stabilité des pentes, notamment la surcharge au sommet d'un talus, les déblais à la base des talus et les concentrations d'eau.

4.3.1 Surcharge au sommet d'un talus

L'action de surcharger un talus au sommet par la construction d'un remblai, par l'installation d'un réservoir d'eau ou de produits chimiques, par l'entreposage permanent ou temporaire de matériaux divers, tels que la terre excavée lors de la préparation du site de forage, et par les bassins de rétention hors terre peut nuire à la stabilité du talus. Ce poids supplémentaire accroît les contraintes de cisaillement et modifie ainsi l'état d'équilibre du talus. Un glissement de terrain peut se produire pendant ou après l'intervention. Dans ce dernier cas, elle aura agi comme un facteur aggravant. De plus, un remblai augmente généralement l'inclinaison et la hauteur du talus, ce qui diminue le coefficient de sécurité. Lorsque le remblai est composé d'argile, l'eau peut s'y infiltrer, ce qui modifie les conditions d'eau souterraine et, par le fait même, la stabilité du talus.

Lorsqu'aucune cartographie n'existe, aucuns travaux de remblayage ne devraient être effectués dans un talus ni au sommet de celui-ci, et ce, sur une distance inférieure à deux fois la hauteur du talus. Si une cartographie des zones potentiellement exposées a été réalisée, l'entreprise devrait respecter les distances indiquées au tableau 5. Les distances à respecter au sommet du talus dépendent de la hauteur (H) de celui-ci.

Tableau 5 Distances à respecter au sommet du talus pour les remblais

<i>Types de zones*</i>	<i>Distance au sommet du talus</i>
NA1 - N1 - 1 - 2 - ZRE - ZRM - A - A1-a-b-Zone rouge-Zone orange	2 H
NA2 - A2 - RA1—NA2	1 H max. 40 mètres
NS1 - NS2 - NH - NC	5 mètres

* Correspond aux types de zones décrits aux tableaux 1 et 3.

Si une entreprise veut effectuer des travaux de remblayage à l'intérieur des distances présentées au tableau 5, elle devra faire réaliser une étude par une firme spécialisée en géotechnique. Celle-ci devra évaluer les effets de la surcharge sur la stabilité du site et confirmer que l'intervention envisagée n'agira pas comme un facteur déclencheur en déstabilisant le site et les terrains adjacents. Elle devra aussi confirmer que cette intervention et son utilisation subséquente ne constitueront pas des facteurs aggravants en diminuant indûment le coefficient de sécurité qui y est associé.

Avis du groupe d'experts

Afin de ne pas entraîner de surcharge au sommet du talus, aucuns travaux de remblayage ne devraient être effectués dans un talus ni au sommet de celui-ci, et ce, sur une distance inférieure à deux fois la hauteur du talus, mesuré à partir du sommet du talus. Si une cartographie des zones potentiellement exposées a été réalisée, les distances indiquées au tableau 5 devraient être respectées.

4.3.2 Déblai ou excavation à la base d'un talus

Le déblai ou l'excavation de matériau à la base du talus modifient les conditions d'équilibre en accentuant l'inclinaison ou la hauteur du talus, ce qui nuit à sa stabilité. Ces travaux ont pour effet d'accroître les contraintes de cisaillement et d'ainsi modifier l'état d'équilibre du talus. Des travaux de ce type peuvent être réalisés dans le contexte des activités liées aux gaz de schiste afin d'agrandir ou d'aplanir un terrain, de construire des chemins d'accès ou de creuser des fossés et des bassins de rétention. Ces actions pourraient provoquer un glissement de terrain lors du déblai ou de l'excavation, ou encore agir comme un facteur aggravant.

Lorsqu'aucune cartographie gouvernementale n'existe, aucuns travaux de déblayage et d'excavation ne devraient être effectués dans le talus ni à sa base, et ce, sur une distance égale à une demi-fois la hauteur du talus, pour un minimum de 5 mètres, et jusqu'à un maximum de 15 mètres de la base de celui-ci. Si une cartographie des zones potentiellement exposées a été réalisée, l'entreprise devrait respecter les distances in-

diquées au tableau 6. Les distances à respecter à la base du talus dépendent de la hauteur (H) de celui-ci.

Tableau 6 Distances à respecter à la base du talus pour les déblais

<i>Types de zones*</i>	<i>Distance à la base du talus</i>
NA1 - N1 - 1 - 2 - ZRE - ZRM - A - A1-a-b-Zone rouge-Zone orange	½ H min. 5 mètres max. 15 mètres
NA2 - A2 - RA1—NA2	½ H min. 5 mètres max. 10 mètres
NS1 - NS2 - NH - NC	5 mètres

* Correspond aux types de zones décrits à la section 3.

Si une entreprise veut effectuer de tels travaux à l'intérieur des distances présentées au tableau 6, elle devra faire réaliser une étude par une firme spécialisée en géotechnique. Celle-ci devra évaluer les effets du déblai ou de l'excavation sur la stabilité du site et confirmer que l'intervention envisagée n'agira pas comme un facteur déclencheur en déstabilisant le site et les terrains adjacents. Elle devra aussi confirmer que cette intervention et son utilisation subséquente ne constitueront pas des facteurs aggravants en diminuant indûment le coefficient de sécurité qui y est associé.

Avis du groupe d'experts

Aucuns travaux de déblai ou d'excavation ne devraient être effectués dans un talus ni à la base de celui-ci, et ce, sur une distance inférieure à une demi-fois la hauteur du talus, pour un minimum de 5 mètres, et jusqu'à un maximum de 15 mètres à partir de la base du talus. Si une cartographie des zones potentiellement exposées a été réalisée, les distances indiquées au tableau 6 devraient être respectées.

4.3.3 Concentration d'eau vers la pente

Le fait de concentrer et de diriger de l'eau au sommet du talus ou dans le talus occasionne du ravinement, de l'érosion verticale ou de l'infiltration dans le sol. L'industrie du gaz de schiste pourrait effectuer ce type de travaux par exemple pour le rejet des eaux de drainage et des eaux utilisées lors des opérations. Cela aurait pour conséquence d'accroître les contraintes de cisaillement dues à l'érosion ou de diminuer la résistance au cisaillement en raison de l'infiltration des eaux. Une telle concentration d'eau peut agir comme un facteur aggravant ou comme un facteur déclencheur en modifiant la géométrie du talus (augmentation de l'inclinaison) et les conditions d'eau souterraine.

Lorsqu'aucune cartographie gouvernementale n'existe, il faut éviter que des concentrations d'eau soient dirigées dans un talus et au sommet de celui-ci, et ce, sur une distance inférieure à deux fois la hauteur du talus. Pour acheminer l'eau vers les cours d'eau de surface, elle devrait être canalisée jusqu'au pied du talus. Si une cartographie des zones potentiellement exposées a été réalisée, l'entreprise devrait respecter les distances indiquées au tableau 7.

Tableau 7 Distances à respecter au sommet du talus pour les concentrations d'eau

<i>Types de zones*</i>	<i>Distance au sommet du talus</i>
NA1 - N1 - 1 - 2 - ZRE - ZRM - A - A1-a-b--Zone rouge-Zone orange	2 H
NA2 - A2 - RA1—NA2	1 H max. 40 mètres
NS1 - NS2 - NH - NC	5 mètres

* Correspond aux types de zones décrits à la section 3.

Si une entreprise veut effectuer ce genre de travaux à l'intérieur des distances présentées au tableau 7, elle devra faire réaliser une étude par une firme spécialisée en géotechnique. Celle-ci devra évaluer les effets de la surcharge sur la stabilité du site et confirmer que l'intervention envisagée n'agira pas comme un facteur déclencheur en déstabilisant le site et les terrains adjacents. Elle devra aussi confirmer que cette intervention et son utilisation subséquente ne constitueront pas des facteurs aggravants en diminuant indûment le coefficient de sécurité qui y est associé.

Avis du groupe d'experts

Aucune concentration d'eau ne devrait être dirigée vers le talus et au sommet de celui-ci, et ce, sur une distance inférieure à deux fois la hauteur du talus. Si une cartographie des zones potentiellement exposées a été réalisée, les distances indiquées au tableau 6 devraient être respectées.

CONCLUSION

La demande du Bureau de la coordination sur les évaluations stratégiques du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs adressée au groupe d'experts en glissements de terrain était de répondre à deux projets d'acquisition de connaissances : premièrement, la détermination des risques naturels potentiels dans la région désignée pour l'exploitation du gaz de schiste et des répercussions appréhendées de ces événements sur les installations d'un projet type et sur la sécurité de la population (R1-1); deuxièmement, l'analyse du risque que des phénomènes naturels soient provoqués par les activités de l'industrie du gaz de schiste et des conséquences appréhendées sur la sécurité et sur les biens de la population (R1-2). Ces projets sont inscrits dans le plan de réalisation de l'évaluation environnementale stratégique sur le gaz de schiste préparé par le Comité de l'évaluation environnementale stratégique (ÉES) en avril 2012.

Pour répondre à la demande, la documentation publiée par le BAPE dans le contexte de la Commission d'enquête sur le développement durable de l'industrie des gaz de schiste été analysée. Étant donné la quantité limitée d'information disponible et pertinente pour la présente étude, celle-ci n'a pas permis d'analyser de façon exhaustive les effets des technologies employées pour l'exploration et l'exploitation des gaz de schiste sur la stabilité des sols argileux. Par ailleurs, des experts externes ont été rencontrés et ont appuyé les constats et les recommandations du groupe d'experts en glissements de terrain concernant l'augmentation des pressions d'eau dans les sols argileux par la migration des gaz et par la fracturation hydraulique.

Cet exercice a permis de constater que, pour des raisons de sécurité publique, les puits verticaux ne devraient pas être localisés à l'intérieur des zones potentiellement exposées aux glissements de terrain qui sont délimitées par la cartographie gouvernementale. Par mesure de prévention, aux endroits où aucune cartographie gouvernementale n'a été effectuée, les puits verticaux devraient être situés à l'extérieur des bandes de protection définies dans le présent rapport afin de prévenir l'augmentation potentielle des pressions d'eau interstitielle dues à la migration des gaz en cas de problème d'intégrité du puits. Cette mesure pourrait être revue à la suite des résultats des études scientifiques portant sur cet aspect.

De plus, les bandes de protection, définies dans le présent rapport, devraient être respectées afin d'éviter toutes les interventions pouvant compromettre les conditions d'équilibre d'un talus, telles que la surcharge au sommet du talus, le déblai ou l'excavation à la base de celui-ci ainsi que la concentration d'eau vers la pente.

Finalement, l'analyse des données disponibles et la consultation auprès des experts externes ont permis de



CONCLUSION

cerner les éléments qui nécessitent d'être précisés afin d'évaluer les risques de glissements de terrain qui y sont associés. Ainsi, des études portant sur l'augmentation des pressions d'eau interstitielle potentiellement provoquée par la fracturation hydraulique et par la migration des gaz à la suite d'un problème d'intégrité d'un puits, sur les effets potentiels de l'opération de fracturation hydraulique sur la transmission des pressions jusqu'au massif argileux, de même que sur la sismicité induite par la fracturation hydraulique et par l'exploitation devraient être réalisées pour le contexte québécois.

BIBLIOGRAPHIE

ARSENAULT, R. L. (2008). *Oil and gas well perforating: The other explosives industry*, *The Journal of Explosives Engineering*, vol. 25, no 2.

BANISTER, J. R. et D. M. ELLETT (1974). *Pore Pressure Enhancement Observed on Rio Blanco*, Rapport SLA-74-0328, Albuquerque (Nouveau-Mexique), Sandia Laboratories.

BUREAU D'AUDIENCES PUBLIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT (BAPE) (2011). *Développement durable de l'industrie des gaz de schiste au Québec*, Rapport d'enquête et d'audience publique, no 273, 323 p.

BOUCHARD, R., V. MICHAUD et D. DEMERS (2008). *Le glissement de la rue McNicoll, 20 juillet 1996, Saguenay, Québec : causes et conséquences*, J. Locat, D. Perret, D. Turmel, D. Demers et S. Leroueil, Comptes rendus de la 4e Conférence canadienne sur les géorisques : des causes à la gestion, p. 503-510.

CARSON, M. A. (1979). *Le glissement de Rigaud (Québec) du 3 mai 1978 : une interprétation du mode de rupture d'après la morphologie de la cicatrice*, *Géographie physique et quaternaire*, vol. 33, no 1, p. 63-92.

CHARLIE, W. A., D. O. DOEHRING et W. A. LEWIS (1987). *Explosive Induced Damage Potential to Earth-fill Dams and Embankments*, Proceeding of the 13 th Conference. on Explosives and Blasting Technique, Society of Explosives Engineers, Annual Meeting, Feb. 1-6, Miami.

CLARK, T. H. (1985). *Rapport sommaire sur les basses-terres au sud du Saint-Laurent*, Rapport RP 204, ministère des Ressources naturelles du Québec, 21 p., 1 carte.

DEMERS, D., D. ROBITAILLE, J. POTVIN, C. BILODEAU et C. DUPUIS (2008). *La gestion des glissements de terrain dans les sols argileux du Québec*, J. Locat, D. Perret, D. Turmel, D. Demers et S. Leroueil, Comptes rendus de la 4e Conférence canadienne sur les géorisques : des causes à la gestion, p. 519- 526.

DEMERS, D., D. ROBITAILLE, P. LOCAT et J. POTVIN (2013) *Inventory of large landslides in sensitive clay in the province of Québec, Canada: preliminary analysis*. In: *Landslides in Sensitive Clays – From Geosciences to Risk Management*, Springer.

DITTRICH, J.P., ROWE, R.K., BECKER, D.E. and LO, K.Y. 2010. *Influence of exsolved gases on slope performance at the Sarnia approach cut of the St. Clair Tunnel*. Canadian Geotechnical J., vol. 47, no 9, p. 971-984.

EPA (2012) *Study of the Potential Impacts of Hydraulic Fracturing on Drinking Water Resources*, 262p. (Disponible en ligne www2.epa.gov/sites/production/files/documents/hf-report20121214.pdf)

FORTIN, A., D. OUELLET, S. PARADIS et D. DEMERS (2008). *Développement au ministère des Transports du Québec d'un portail informatique pour l'accès à des bases de données géotechniques*, J. Locat, D. Perret, D. Turmel, D. Demers, et S. Leroueil, Comptes rendus de la 4e Conférence canadienne sur les géorisques : des causes à la gestion, p. 169-174.

GLOBENSKY, Y. (1987). *Géologie des basses-terres du Saint-Laurent*, ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, MM 85-02, 63 p.

GOVERNEMENT DU QUÉBEC (2004). *Cartographie des zones exposées aux glissements de terrain dans les dépôts meubles : guide d'utilisation des cartes de zones de contraintes et d'application du cadre normatif*, gouvernement du Québec, 63 p. (Disponible en ligne à l'adresse http://www.securitepublique.gouv.qc.ca/fileadmin/Documents/securite_civile/publications/guide_cartes_zones/glissements_terrain_2.pdf).

GUHA, S. K. (2000). *Induces Earthquakes*, Klumer Academis Publishers, 319 p.

GRASSO, J. (1992). *Mechanics of seismic instabilities induced by the recovery of hydrocarbons*, Pure and Applied Geophysics, vol. 139, nos 3-4, p. 507-534.

HOPLER, R. B. (1998). *Blasters' Handbook*, 17e édition, International Society of Explosives Engineers.

HRYCIW, R. D., S. VITTON et T. G. THOMANN (1990). *Liquefaction and flow failure during seismic exploration*, Journal of Geotechnical Engineering, vol. 116, no 12, p. 1881-1899.

KRAMER, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall.

LAFLEUR, J. et G. LEFEBVRE (1980). *Groundwater regime associated with slope stability in Champlain clay deposits*, Revue canadienne de géotechnique, vol. 17, p. 44-53.

LAMONTAGNE, M., D. DEMERS et F. SAVOPOL (2007). *Description et analyse du glissement de terrain meurtrier du 25 octobre 1870 dans le rang des Lahaie, Sainte-Geneviève-de-Batiscan*, Journal canadien des sciences de la terre, vol. 44, no 7, p. 947-960.

LANDRY, B., J. BEAULIEU, M. GAUTHIER, M. LUCOTTE, M. MOINGT S. ORCHIETTI, D.L. PINTI et M. QUIRION (2012). *Notions de géologie*, 4e édition, Montréal Modulo, 630 p.

LEBUISS, J., J. M. ROBERT et P. RISSMANN (1983). *Regional mapping of landslide hazard in Québec*, Symposium on Slopes on Soft Clays, rapport no 17, Swedish Geotechnical Institute, p. 205-262.

LEFEBVRE, G. (1986). *Slope instability and valley formation in Canadian soft clay deposits*, Revue canadienne de géotechnique, vol. 23, no 3, p. 261-270.

LOCAT, P., T. FOURNIER, D. ROBITAILLE et A. LOCAT (2011). *Glissement de terrain du 10 mai 2010 : rapport sur les caractéristiques et les causes*, Ministère des Transports du Québec, Rapport MT11-01, 101 p.

LONG, H., R. RIES et P. MICHALOPOULOS (1981). *Potential for liquefaction due to construction blasting*, Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Geotechnical Engineering and Soil Dynamics, University of Missouri-Rolla, Saint-Louis (Missouri), p. 191-194.

OFFICE NATIONAL DE L'ÉNERGIE (2009). *Dossier énergie : l'ABC du gaz de schiste au Canada*.

OLIVER, J., T. JOHNSON et J. DORMAN (1970). *Postglacial faulting and seismicity in New York and Quebec*, Journal canadien des sciences de la terre, vol. 7, p. 579 à 590.

ORIARD, L. L. (1999). *The Effects of Vibrations and Environmental Forces: A Guide for the Investigation of Structures*, International Society of Explosives Engineers, 284 p.

OSBORN, S. G., A. VENGOSH, N. R. WARNER et R. B. JACKSON (2011). *Methane contamination of drinking water accompanying gas well drilling and hydraulic fracturing*, Proceedings of the National Academy of Sciences, États-Unis, vol. 108, p. 8172-6.

PERRET, D. et C. BÉGIN (1997). *Inventaire des glissements de terrain associés aux fortes pluies de la mi-juillet 1996 : région du Saguenay-Lac-Saint-Jean*, Rapport remis au Bureau de la reconstruction et de la relance du Saguenay-Lac-Saint-Jean, Institut national de la recherche scientifique, INRS-Géoressources.

PUCHKOV, S. V. (1962). *Correlation between the velocity of seismic oscillations of particles and the liquefaction phenomenon of water-saturated sand*, Problems of Engineering Seismology, no 6, étude no 21.

RISSMANN P., J. D. ALLARD et J. LEBUIS (1985). *Zones exposées aux mouvements de terrain le long de la rivière Yamaska, entre Yamaska et Saint-Hyacinthe*, Rapport DV 83-04, ministère des Ressources naturelles du Québec, 68 p., 3 cartes.

SACCHERI, V. et D. MORRIS (2009). *Real life considerations in vibration damage criteria and measurement*, Proceedings of the International Society of Explosives Engineers.

TANGUAY, L. et D. DEMERS (1990). *Distribution et évolution des surpressions interstitielles causées par l'enfoncement d'un groupe de pieux dans l'argile*, Compte rendu de la Conférence canadienne de géotechnique, Québec, p. 653-661.

TREMBLAY, A., B. LONG et M. MASSÉ (2003). *Supracrustal faults of the St. Lawrence rift system, Québec: kinematics and geometry as revealed by field mapping and marine seismic reflection data*, Tectonophysics, vol. 369, nos 3-4, p. 231-252.

VEYERA, G. E. (1985). *Transient porewater pressure response and liquefaction in a saturated sand*, Thèse de doctorat, Department of Civil Engineering, Colorado State University.

Articles de journaux

Swissinfo.ch, « Un projet géothermique provoque un séisme à Bâle », 9 décembre 2006.

Swissinfo.ch, « Earth-shaking energy project cleared in court », 21 décembre 2009.

Documentation déposée au BAPE ayant été consultée

- PR3 MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE.
Le développement du gaz de schiste au Québec : document technique, 15 septembre 2010, 26 p.
- PR3.1 MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE.
Erratum relatif à la section 4.3 du document technique PR3, 28 septembre 2010, 2 p.
- PR3.2 MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE.
Erratum relatif à la page 6, figure 2 du document technique PR3,
20 octobre 2010, 1 p. et figure.
- PR3.3 MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE.
Erratum relatif aux pages 2, 4 et 6, figure 2 du document technique PR3,
20 octobre 2010, 1 p. et figure.
- DB1 MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS.
Les enjeux environnementaux de l'exploration et de l'exploitation gazières dans les basses-terres du Saint-Laurent, Document de travail, octobre 2010, 46 p. et annexe.
- DB3 COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA, CGC-QUÉBEC.
Présentation relative au shale d'Utica : contexte géologique, octobre 2010, 25 p.
- DB4 MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE.
Présentation relative aux orientations du gouvernement concernant le gaz de schiste, octobre 2010, 18 p.
- DB5 MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE.
Processus d'exploration pétrolière et gazière au Québec : cadre législatif et réglementaire,
5 octobre 2010, 13 p.

- DB23 ASSOCIATION PÉTROLIÈRE ET GAZIÈRE DU QUÉBEC.
Schéma sur la fracturation hydraulique et le séisme, 6 octobre 2010, 2 p.
- DB24 MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE.
Rapport d'activités géophysiques 2010, 4 octobre 2010, 2 p.
- DB26 MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE.
Variations géochimiques, minéralogiques et stratigraphiques des shales de l'Utica et du Lorraine : implications pour l'exploration gazière dans les basses-terres du Saint-Laurent, 20 octobre 2009, 51 p.
- DB33 MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE.
Règlement sur le pétrole, le gaz naturel et les réservoirs souterrains, L.R.Q., c. M-13-1, a. 306, 310 et 313, D. 1539-88, D. 1381-2009, a. 1, 15 p.
- DB36 MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE.
Tableau comparatif des règlements de l'Alberta, de la Colombie-Britannique et du Québec, 6 octobre 2010, 62 p.
- DB41 LACOURSIÈRE, Jean-Paul.
Gestion de la sécurité et de l'environnement lors de l'exploration et de l'exploitation des gaz de schiste, 12 octobre 2010, 22 p.
- DB53 MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS.
Carte illustrant les limites des projets de connaissance des eaux souterraines financés dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec, ainsi que les projets, depuis 1999, complétés à ce jour, 12 octobre 2010, 1 p. et carte.
- DB54 ASSOCIATION PÉTROLIÈRE ET GAZIÈRE DU QUÉBEC.
Exemples de processus conjoints regroupant le public, les gouvernements et l'industrie pour aborder les impacts du développement des ressources, 13 octobre 2010, 3 p.
- DB57 MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE.
Programme de levé sismique dans le Bas-Saint-Laurent, région de Rimouski, 4 p.
- DB59 MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE.
Tableau des permis et autorisations liés aux puits forés et fracturés pour le gaz de shale, 2 p.
- DB60 INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE.
Présentation de monsieur Michel Malo relativement aux caractéristiques physiques des roches dans un système pétrolier, 13 octobre 2010, 33 p.

- DB61 ALL CONSULTING.
Présentation de monsieur Brian Bohm relativement au forage et à la fracturation hydraulique, 13 octobre 2010, 21 p.
- DB70 MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE.
Responsabilité en cas de dommages causés à une propriété par des mouvement de sol qui découleraient de travaux d'exploration et nature de la protection disponible chez les assureurs, 1 p.
- DB71 MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE.
Outils système dont dispose le ministère des Ressources naturelles et de la Faune pour faire la délivrance et le suivi des titres et des permis, 1 p.
- DB79 UNIVERSITÉ LAVAL.
Présentation de M. René Therrien sur l'hydrogéologie (eaux souterraines), 24 p.
- DB86 MINISTÈRE DE LA SÉCURITÉ PUBLIQUE.
Informations relatives à des questions exprimées les 6 et 12 octobre derniers relativement aux impacts de la fracturation hydraulique sur la stabilité des sols en surface, 4 novembre 2010, 1 p.
- DB88 ASSOCIATION PÉTROLIÈRE ET GAZIÈRE DU QUÉBEC.
Rectifications au sujet d'affirmations erronées contenues dans les présentations des mémoires DM144 et DM98, 30 novembre 2010, 3 p.
- DC12 OFFICE NATIONAL DE L'ÉNERGIE.
L'abc du gaz de schiste au Canada, novembre 2009, 11 p.
- DC14 *Questions des participants envoyées à la Commission à la suite de la première partie d'audiences publiques*, du 1er octobre au 25 octobre 2010.
- DD2 BOURQUE, Pierre-André.
Avis relatif aux ressources en hydrocarbures au Québec, novembre 2004, 17 p.
- DD8 CONSEIL DES ACADÉMIES CANADIENNES.
La gestion durable des eaux souterraines au Canada : points saillants du rapport, mai 2009, 16 p.
- DM66 QUÉBEC SOLIDAIRE.
Mémoire présenté au Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, novembre 2010, 15 p.
- DM123 ORDRE DES GÉOLOGUES DU QUÉBEC.
Audiences sur le développement durable de l'industrie des gaz de schiste au Québec, 11 novembre 2010, 6 p.
- DM165 GPR.
Mémoire au BAPE, 11 novembre 2010, 4 p. et annexe.

DM187 ORDRE DES INGÉNIEURS DU QUÉBEC.

Pour une évaluation environnementale stratégique de la filière des gaz de shale, novembre 2010, 22 p.

DM192 PARTI QUÉBÉCOIS.

Exploration et exploitation des gaz de schiste, 23 novembre 2010, 21 p.

DQ2 BUREAU D'AUDIENCES PUBLIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT.

Question posée à Hydro-Québec relative au forage horizontal, 15 octobre 2010, 1 p.

DQ2.1 HYDRO-QUÉBEC.

Réponse à la question du document DQ2, 3 novembre 2010, 2 p.

DQ4 BUREAU D'AUDIENCES PUBLIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT.

Questions de participants posées à l'Association pétrolière et gazière du Québec, 20 octobre 2010, 4 p.

DQ4.1 ASSOCIATION PÉTROLIÈRE ET GAZIÈRE DU QUÉBEC.

Réponses aux questions 1, 2a, c, d, e, f, g, 3a, 4, 5 b, c partiellement, 6a, b, c, d, e, f, 7a partiellement, b partiellement, 3 novembre 2010, 9 p.

DQ4.2 ASSOCIATION PÉTROLIÈRE ET GAZIÈRE DU QUÉBEC.

Réponses complètes au document DQ4, 5 novembre 2010, 12 p.

DQ10 BUREAU D'AUDIENCES PUBLIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT.

Diverses questions de participants posées au ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 21 octobre 2010, 4 p.

DQ10.1 MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS.

Réponses aux questions du document DQ10, 27 octobre 2010, 9 p.

DQ11 BUREAU D'AUDIENCES PUBLIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT.

Diverses questions de participants posées au ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 21 octobre 2010, 3 p.

DQ11.1 MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE.

Réponses aux questions du document DQ11, questions 1, 2, 3a et b, 4, 5, 6a, 8, 9a, 9c et 9d, novembre 2010, 2 p.

DQ28 BUREAU D'AUDIENCES PUBLIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT.

Questions et demandes de la Commission auprès du ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 12 novembre 2010, 2 p.

DQ28.1 *Réponse aux questions*, 35 p.

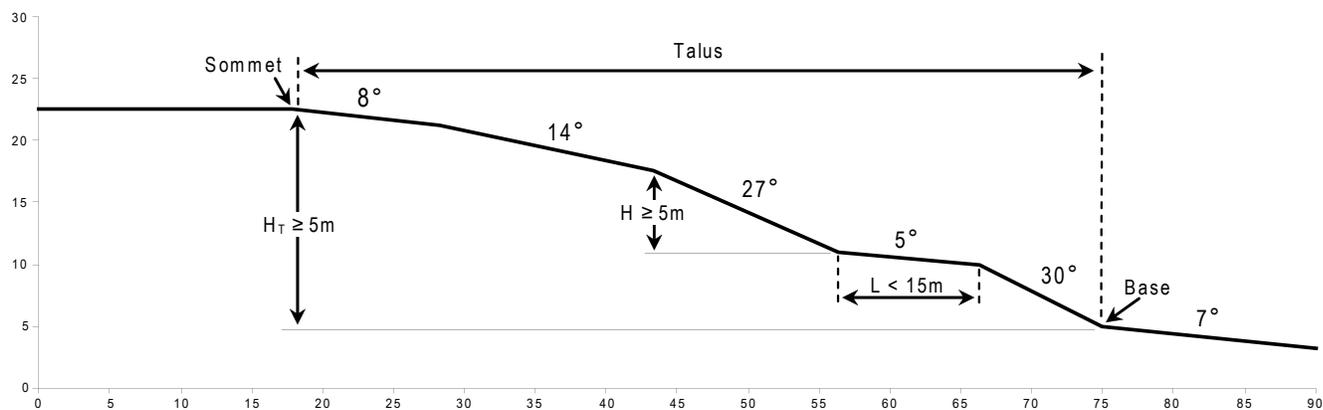
- DQ31 BUREAU D'AUDIENCES PUBLIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT.
Question posée à la Commission géologique du Canada relativement aux séismes, 9 décembre 2010, 1 p.
- DQ31.1 COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA.
Réponse à la question du document DQ31, 9 décembre 2010, 3 p.
- DT1 BUREAU D'AUDIENCES PUBLIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT.
Commission d'enquête sur le développement durable de l'industrie des gaz de schiste au Québec, 4 octobre 2010, 140 p.
- DT2 BUREAU D'AUDIENCES PUBLIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT.
Commission d'enquête sur le développement durable de l'industrie des gaz de schiste au Québec, 5 octobre, 105 p.
- DT3 BUREAU D'AUDIENCES PUBLIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT.
Commission d'enquête sur le développement durable de l'industrie des gaz de schiste au Québec, 5 octobre 2010, 118 p.
- DT4 BUREAU D'AUDIENCES PUBLIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT.
Commission d'enquête sur le développement durable de l'industrie des gaz de schiste au Québec, 6 octobre 2010, 119 p.
- DT5 BUREAU D'AUDIENCES PUBLIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT.
Commission d'enquête sur le développement durable de l'industrie des gaz de schiste au Québec, 6 octobre 2010, 118 p.
- DT8 BUREAU D'AUDIENCES PUBLIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT.
Commission d'enquête sur le développement durable de l'industrie des gaz de schiste au Québec, 12 octobre 2010, 97 p.
- DT10 BUREAU D'AUDIENCES PUBLIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT.
Commission d'enquête sur le développement durable de l'industrie des gaz de schiste au Québec, 13 octobre 2010, 96 p.
- DT11 BUREAU D'AUDIENCES PUBLIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT.
Commission d'enquête sur le développement durable de l'industrie des gaz de schiste au Québec, 13 octobre 2010, 76 p.

A topographic map showing terrain contours and features, used as a background for the document. The map is in grayscale and shows various landforms and elevation changes.

ANNEXE1

Définition d'un talus composé de sols à prédominance argileuse

Les talus indiqués sur la carte ont une hauteur minimale de 5 mètres. Selon le type de sol qui les compose, leur délimitation sera différente. Les talus composés de sol à prédominance argileuse contiennent des segments de pente d'au moins 5 mètres de hauteur dont l'inclinaison moyenne est de 14 degrés (25 %). Le sommet et la base du talus sont déterminés par un segment de pente dont l'inclinaison est inférieure à 8 degrés (14 %) sur une distance horizontale supérieure à 15 mètres



The background of the page is a light gray topographic map showing terrain contours and some infrastructure. A white arrow-shaped graphic is located in the top right corner.

ANNEXE 2

**Liste des municipalités et des MRC cartographiées
au Québec par le MRN entre 1976 et 1986**

Municipalité	MRC
Saint-Sylvère	Bécancour
Saint-Charles-de-Bellechasse	Bellechasse
Saint-Henri	
Saint-Michel-de-Bellechasse	
Saint-Vallier	
Baie-Sainte-Catherine	Charlevoix-Est
Clermont	
La Malbaie	
Mandeville	
Saint-Didace	D'Autray
Saint-Gabriel-de-Brandon	
Drummondville	
Notre-Dame-du-Bon-Conseil	Drummond
Saint-Bonaventure	
Sainte-Brigitte-des-Saults	
Saint-Pie-de-Guire	
Odanak	Hors MRC
Lévis	Villes MRC
Québec	
Gatineau	
Shawinigan	
Beaupré	La Côte-de-Beaupré
Boischatel	
Château-Richer	
L'Ange-Gardien	
Sainte-Anne-de-Beaupré	
Saint-Joachim	La Nouvelle-Beauce
Saint-Lambert-de-Lauzon	
Sainte-Sophie	La Rivière-du-Nord
Aumond	La Vallée-de-la-Gatineau
Bois-Franc	
Bouchette	
Déléage	
Denholm	
Egan-Sud	
Gracefield	
Grand-Remous	
Kazabazua	
Kitigan Zibi	
Lac-Sainte-Marie	

Municipalité	MRC
Low	La-Vallée-de-la-Gatineau
Maniwaki	
Sainte-Thérèse-de-la-Gatineau	
L'Épiphanie	L'Assomption
Batiscan	Le Chenaux
Champlain	
Notre-Dame-du-Mont-Carmel	
Sainte-Anne-de-la-Pérade	
Sainte-Geneviève-de-Bastican	
Saint-Luc-de-Vincennes	
Saint-Maurice	
Saint-Narcisse	
Saint-Prosper	
Saint-Stanislas	
Cantley	Les Collines-de-l'Outaouais
Chelsea	
L'Ange-Gardien	
Notre-Dame-de-la-Salette	
Pontiac	
Val-des-Monts	
Saint-Barnabé-Sud	Les Maskoutains
Saint-Hugues	
Saint-Hyacinthe	
Saint-Jude	
Saint-Louis	
Saint-Marcel-de-Richelieu	
Saint-Simon	
Charette	
Louiseville	Maskinongé
Maskinongé	
Saint-Barnabé	
Saint-Boniface	
Sainte-Angèle-de-Prémont	
Saint-Édouard-de-Maskinongé	
Saint-Élie-de-Caxton	
Saint-Étienne-des-Grès	
Sainte-Ursule	
Saint-Justin	
Saint-Léon-le-Grand	
Saint-Paulin	

Municipalité	MRC	
Saint-Mathieu-du-Parc	Maskinongé	
Saint-Sévère		
Yamachiche		
Saint-Damien	Matawinie	
Saint-Séverin	Mékinac	
Saint-Tite		
Saint-Lin-Laurentide	Montcalm	
Saint-Roch-de-l'Achigan		
Sanit-Roch-Ouest		
Montmagny	Montmagny	
Saint-François-de-la-Rivière-du-Sud		
Saint-Pierre-de-la-Rivière-du-Sud		
Aston-Jonction	Nicolet-Yamaska	
Baie-du-Febvre		
La Visitation-de-Yamaska		
Pierreville		
Saint-Célestin		
Sainte-Eulalie		
Saint-Elphège		
Sainte-Perpétue		
Saint-François-du-Lac		
Saint-Léonard-d'Aston		
Saint-Wenceslas		
Saint-Zéphirin-de-Courval		
Lochaber-Partie-Ouest		Papineau
Massueville		Pierre-De-Saurel
Saint-Aimé		
Saint-David		
Yamaska		
Bristol	Pontiac	
Bryson		
Campbell's Bay		
Clarendon		
Litchfield		
Shawville		
Saint-Alban	Portneuf	
Saint-Casimir		
Sainte-Christine-d'Auvergne		
Saint-Gilbert		
Saint-Thuribe et Saint-Ubalde		

The background of the page is a light gray topographic map showing terrain contours and some infrastructure. A white arrow-shaped graphic points upwards from the top right corner.

ANNEXE3

Liste des municipalités et des MRC cartographiées
au Québec par le MTQ depuis 2003

Municipalité	MRC
Bécancour	Bécancour
Petite-Rivière-Saint-François	Charlevoix
Baie-Saint-Paul	
L'Isle-aux-Coudres	
Les Éboulements	
Saint-Urbain	
Wôlinak	Hors MRC
Timiskaming	
Essipit	
Gatineau	Villes MRC
Saguenay	
Joliette	Joliette
Notre-Dame-des-Prairies	
Saint-Charles-Borromée	
Notre-Dame-de-Lourdes	
Sanit-Paul	
Crabtree	La Haute-Côte-Nord
Tadoussac	
Les Bergeronnes	
Les Escoumins	
Longue-Rive	
Portneuf-sur-Mer	
Forestville	
Colombier	Lac-Saint-Jean-Est
Desbiens	
Métabetchouan - Lac-à-la-Croix	
Hébertville	L'Assomption
Saint-Gédéon	
Charlemagne	
Repentigny	
L'Assomption	Le Fjord-du-Saguenay
L'Anse-Saint-Jean	
Chelsea	Les Collines-de-l'Outaouais
Sainte-Monique	Nicolet-Yamaska
Nicolet	
Notre-Dame-du-Nord	Témiscamingue