

Changements climatiques et mouvements de terrain

Mémoire présenté dans le cadre des
TRAVAUX D'ÉLABORATION DU PLAN D'ÉLECTRIFICATION ET DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES
(2019.10.11)

par

Jacques Locat, ing. Ph.D., et Serge Leroueil, Ph.D.,
Professeurs émérites,
Laboratoire d'études sur les risques naturels (LERN)
Faculté de sciences et génie,
Université Laval, Québec

Région : Québec et ailleurs dans le Monde.

Expertise : Jacques Locat est coordonnateur du LERN (www.LERN.fsg.ulaval.ca). Depuis 2015, le LERN s'est particulièrement engagé avec le MSP et le MTQ dans un effort de compréhension des impacts des changements climatiques sur les mouvements de terrain et leurs conséquences. Ces efforts visent autant la compréhension des phénomènes qu'à la mise en place de méthodes d'adaptation. Avec un budget global de 2.18 M\$, entre 2015 et 2020, provenant du Programme d'actions sur les changements climatiques (PACC 2015-2020), les projets en cours portent sur : (1) la mise en place d'un observatoire climatique sur le rôle de l'eau sur les talus argileux du Québec, (2) l'étude des grands glissements dont les étalements et les coulées, et (3) le développement de méthodes géophysiques, dont la résistivité électrique, pour la cartographie des zones propices aux grands glissements de terrain dans les argiles sensibles.

L'expertise nationale et internationale de Jacques Locat dans le domaine des mouvements de terrain a été reconnue par l'octroi des médailles K.Y. Lo (2005) de l'Institut canadien des ingénieurs (ICI), Schuster (spécifiquement sur les mouvements de terrain, 2013) de la Société canadienne de géotechnique (SCG) et l'*Association of Environmental and Engineering Geologists* (USA), Legget (2015) de la SCG, du 150^e du Sénat du Canada (2018), et Smith (2019) de l'ICI. Depuis 2017, il est professeur émérite au Département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval.

L'expertise nationale et internationale de Serge Leroueil sur les mouvements de terrain est connue internationalement (Rankine lecture, 1999). Il est membre de l'Académie des sciences de la Société Royale du Canada depuis 2004. L'excellence de ses travaux a été reconnue par l'octroi des médailles K.Y. Lo (ICI, 2001), Legget (SCG, 2013), du 150^e du Sénat du Canada (2017). Depuis 2019, il est professeur émérite au Département de génie civil et de génie des eaux de l'Université Laval.

Thématique abordée : Aménagement du territoire et adaptation aux changements climatiques

Introduction

Le gouvernement du Québec s’apprête à dévoiler, dès le début de 2020, un Plan d’électrification et de changements climatiques (PECC) visant à réduire nos émissions de gaz à effet de serre (GES) et à adapter notre territoire pour faire face aux impacts des changements climatiques, et ce tout en continuant de développer l’économie. Dans le cadre de sa démarche, le gouvernement a lancé un appel à des mémoires afin de recueillir des commentaires et des suggestions.

L’appel du gouvernement porte sur cinq thèmes et celui abordé dans ce mémoire concerne principalement celui relié à l’aménagement du territoire et l’adaptation aux changements climatiques qui s’énonce comme suit à la section 2.3 (Gouvernement du Québec, 2019, p. 13):

Selon l’état des connaissances actuelles, on estime que certaines problématiques doivent être priorisées. En effet, les inondations, l’érosion côtière, la fonte du pergélisol, les problématiques de santé (liées par exemple à la chaleur), la pérennité des infrastructures et les risques économiques sont considérés comme des problématiques prioritaires en raison de leurs impacts sur la santé et la sécurité de la population.

D’autres problématiques devraient-elles être priorisées dans le PECC? Si oui, lesquelles et pourquoi?

Ce mémoire vient identifier une autre problématique qui devrait être priorisée : **les mouvements de terrain**. Ce qui suit va en préciser la nature et ce pourquoi elle se doit d’être ajoutée aux problématiques prioritaires énoncées dans le document de consultation.

Mouvements de terrain

Les mouvements de terrain impliquent le déplacement gravitaire plus ou moins rapide d’une masse de sol, de roches, ou de neige, et dont le volume peut atteindre plusieurs millions de mètres cubes. De tels événements peuvent se produire rapidement (moins d’une heure) et s’étendre plusieurs centaines de mètres dans les terres ce qui fait qu’au Québec, ils sont la principale cause de décès liés aux désastres naturels. Une étude récente de Blais-Stevens (2019) indique que, depuis 1771, 246 personnes seraient décédées aux Québec lors de mouvements de terrain (excluant les avalanches de neige). Les mouvements de terrain prennent diverses formes : les glissements simples ou fortement rétrogressifs (coulées et étalements), les chutes de pierre, et, par extension, les chutes de glace et les avalanches de neiges. Certains exemples sont présentés à la figure 1.

Certains glissements peuvent avoir des conséquences catastrophiques comme celui de Notre-Dame-de-la-Salette (printemps 1908, 33 décès), St-Jean-Vianney (printemps 1971, 31 décès), St-Jude (printemps 2010, 4 décès) ou encore l’éboulis rocheux du Cap Diamant de 1889 (automne, 43 décès). Le cas du déluge du Saguenay de juillet 1996 est un cas illustrant les impacts d’événements extrêmes : il a provoqué plus de 1000 glissements de terrain de divers types et causé la mort de 6 personnes dont 2 à Saguenay dans une coulée de boue. Lors du déluge du Saguenay, plusieurs glissements de terrain superficiels sont même survenus sur des talus de

terrasses marines abandonnées (sans érosion active) où la seule infiltration de l'eau a agi comme déclencheur (Potvin *et al.* 2014). La figure 2 présente la distribution des glissements de terrain (excluant ceux de 1996) dans le Québec méridional où environ 80% des glissements sont dans des terrains argileux.

Il est important de souligner ici que de fortes précipitations, amplifiées au printemps par la fonte nivale, provoquent non seulement des inondations, mais aussi des mouvements de terrain. Ces deux phénomènes (inondation et mouvement de terrain) sont souvent synchrones mais la plupart du temps ils sont indépendants et ne se produisent pas dans les mêmes contextes. Ils font aussi appel à des connaissances scientifiques complémentaires qui ne sont pas traitées par les mêmes spécialistes. Les inondations sont surtout étudiées à l'aide de la mécanique des fluides alors que les mouvements de terrain font surtout appel à la mécanique des sols et des roches ainsi qu'à l'hydrogéologie. Les coulées de boues ou de neige ainsi que les avalanches font aussi appel à la mécanique des fluides, mais dans un contexte d'analyse très différent (voir la figure 1). Si prédire l'écoulement de l'eau sur un bassin versant (*e.g.* infiltration et ruissellement) en fonction des précipitations est exigeant, prédire un tel effet sur le comportement des sols et des roches est encore plus complexe et implique d'avantage d'incertitudes et donc d'efforts.

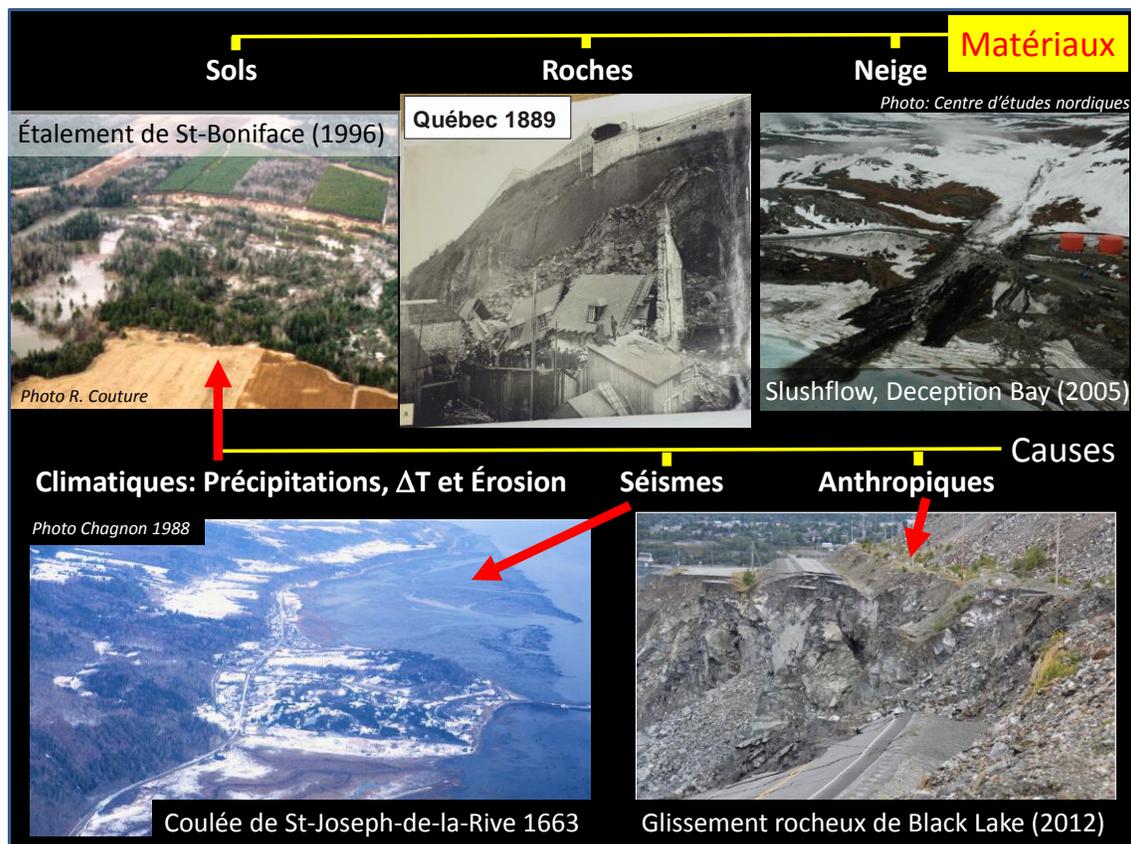


Figure 1. Exemples de mouvements de terrain observés au Québec mettant en relief le rôle du climat sur les précipitations (St-Boniface en 1996 et Québec en 1889), les changements de température (Deception Bay en 2005) ainsi que celui des séismes (*e.g.* St-Joseph-de-la-Rive en 1663), et de l'activité humaine (Black Lake en 2012).

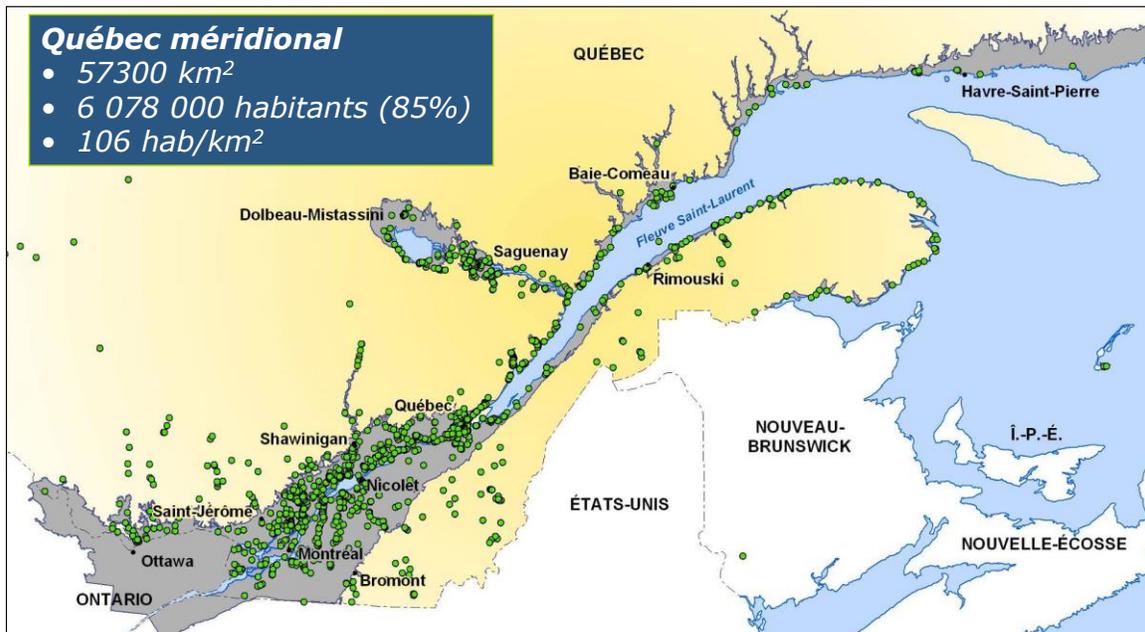


Figure 2. Compilation des mouvements de terrain (en points verts, excluant ceux de 1996) au Québec méridional. La zone en gris correspond aux dépôts d'argiles marines émergés (source : MTQ).

Climat et mouvements de terrain

Dans la plupart des cas de glissements de terrain, l'eau est un facteur déclencheur, mais aussi l'activité humaine, et moins fréquemment les séismes. Sauf exception, la plupart des glissements de terrain causés par l'eau se produisent au printemps (pluie et fonte du couvert nival et érosion) et à l'automne (pluies et érosion). Ainsi, pour les mouvements de terrain, l'eau joue un rôle déterminant à deux niveaux : (1) les précipitations augmentent les pressions interstitielles dans les sols et en réduisent la résistance; et (2) l'érosion (fluviale ou côtière) vient éroder et déstabiliser le pied du talus. Les précipitations et leurs conséquences sont donc directement reliées aux conditions climatiques (précipitations en particulier) et géologiques/géomorphologiques d'une région donnée. La réaction d'un talus aux précipitations et à l'érosion n'est pas simple et va dépendre de la nature du talus (sol ou roche), de sa forme (*e.g.* angle du talus et hauteur), de son évolution au cours des mois ou années précédant le mouvement de terrain et parfois de l'historique des précipitations dans les jours qui précèdent. Pour illustrer ce propos, deux exemples d'impact de précipitations de plus de 150 mm en lien avec des mouvements de terrain sont présentés à la figure 3. Le premier présente la variation des précipitations journalières qui ont causé l'éboulement soudain du 19 septembre 1889 localisé au Cap Diamant et le deuxième celui de juillet 1996 à Bagotville qui, en plus des inondations et de l'érosion des berges, a provoqué plus de 1000 glissements de terrain sur un vaste territoire (Perret et Bégin 1997). L'événement climatique extrême du déluge du Saguenay est bien documenté

(Nicolet 1997), mais celui de septembre 1889 pourrait s'être produit à la suite de la progression de l'ouragan San Martin¹ qui a balayé la côte est américaine du 5 au 12 septembre 1889.

Pour ce qui est de l'érosion des berges, son rôle est déterminant sur l'initiation de mouvements de terrain, mais il est encore difficile de prédire quand et où exactement l'érosion déclenchera un mouvement de terrain. Par contre, une étude de Locat *et al.* (1984) sur le bassin de la rivière Chacoura a démontré qu'une cicatrice d'érosion sur cinq était le lieu d'un mouvement de terrain sur une période de 30 ans. De plus, la forme d'un cours d'eau évolue en fonction de l'érosion, laquelle peut causer des mouvements de terrain qui, en retour, peuvent en modifier drastiquement son parcours (Lévy *et al.* 2012). De telles observations ont aussi été faites pour des bassins versants comme celui de la rivière du Lièvre (Saint-Laurent et Schneider 2004), la rivière des Envies (Brien 2006) et la rivière Ouelle (Hamel *et al.* 2013). En Jamésie, l'évolution des berges serait le plus fréquemment associés aux glissements de terrain et d'éboulements (Saint-Laurent et Guimont 1999).

Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (1992, p. 112) le climat se définit comme «la synthèse des conditions météorologiques dans une région donnée, caractérisée par des statistiques à long terme (valeurs moyennes, variances, probabilités de valeurs extrêmes, etc.) des éléments météorologiques dans cette région». Il y a donc lieu de connaître le rôle du climat actuel sur les mouvements de terrain. Une telle démarche a été entreprise dans le cadre du PACC (2015-2020) par la mise en place d'un observatoire permanent sur le rôle du climat sur les talus argileux au Québec (Cloutier *et al.* 2017b) et la réalisation de plusieurs projets connexes (voir : www.lern.fsg.ulaval.ca). Le LERN n'est pas le seul à réaliser de tels travaux car d'autres équipes de recherche s'intéressent aussi à l'étude des mouvements de terrain dans un contexte de compréhension du rôle du climat. À titre d'exemple citons les travaux de Gauthier *et al.* (2012) sur les chutes de glace en Gaspésie et ceux de Germain *et al.* (2008) sur les avalanches de neige en Gaspésie. Même pour les problématiques reliées à l'érosion côtière, les mouvements de terrain sont reconnus comme étant une préoccupation majeure (Drejza *et al.* 2015, Bernatchez *et al.* 2015).

Un bilan des travaux liés au climat et aux mouvements de terrain au Québec a été réalisé lors du 1^{er} Atelier du LERN² sur les mouvements de terrain et les changements climatiques tenu à Québec en février 2017 (Cloutier *et al.* 2017a). Cet atelier a permis d'illustrer la diversité des intervenants scientifiques actifs dans ce milieu mais aussi l'intérêt des organismes publics et privés pour ces enjeux.

Le constat est clair : les mouvements de terrain ont, pour la plupart, un lien direct avec le climat incluant les précipitations ainsi qu'avec l'érosion fluviale et côtière.

¹ https://en.wikipedia.org/wiki/1889_Atlantic_hurricane_season#Hurricane_Four

² <https://www.lern.fsg.ulaval.ca/accueil/changements-climatiques/>

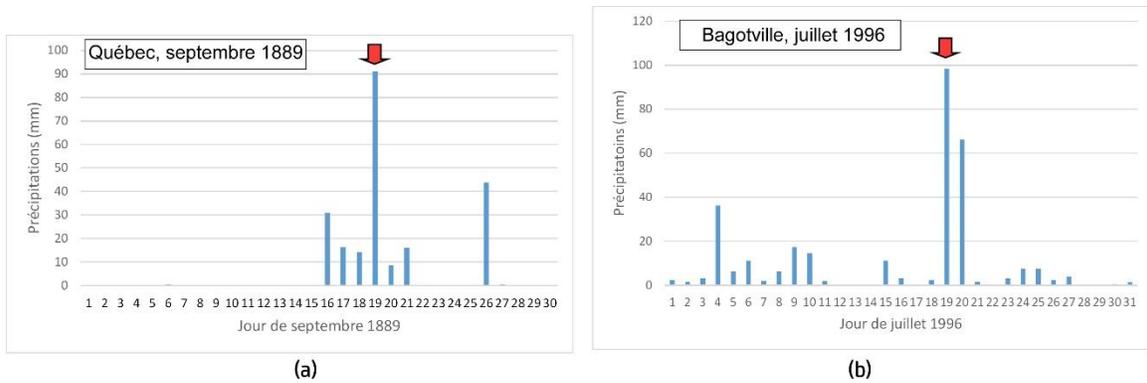


Figure 3. Précipitations journalières des mois de septembre 1889 reliés à l'éboulis du 19 septembre 1889 à Québec et de juillet 1996 reliée au déluge du Saguenay de 1996. Les flèches rouges indiquent le jour déterminant pour ces catastrophes.

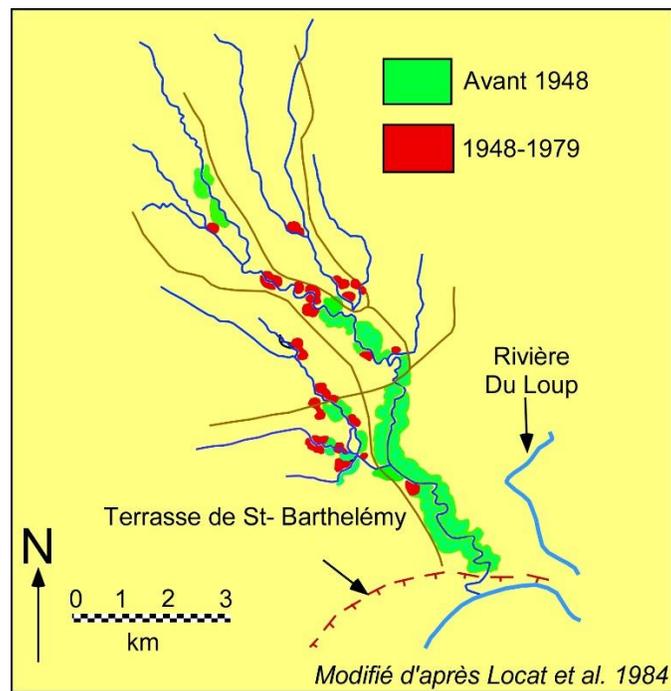


Figure 4. Illustration des glissements générés le long de la rivière Chacoura entre 1948 et 1979. On note que les glissements se sont surtout produits dans la partie amont de la rivière où l'érosion aurait aussi été amplifiée par l'intensification du drainage agricole.

Changements climatiques et mouvements de terrain : le pourquoi

Puisque le climat joue un rôle important sur la stabilité des talus et donc sur les glissements de terrain, des changements dans les tendances climatiques auront aussi une incidence qu'il faudra évaluer et adapter d'autant à nos pratiques et nos modes de gestion du risque.

Dans son communiqué de presse annonçant la publication de son rapport de 2019 sur *Changements climatiques et terres émergées*, le GIEC (Groupe international d'étude sur le climat) souligne que :

«Si les précipitations se font plus intenses à l'avenir, le risque d'érosion des sols sur les terres cultivées augmentera. Une gestion durable des terres nous permettra de protéger les populations des effets néfastes de cette érosion et des glissements de terrain, mais les mesures que nous prendrons resteront de portée limitée et, dans certains cas, la dégradation pourrait s'avérer irréversible» (GIEC 2019, p. 2)³.

En 2016, Gariano et Guzetti ont publié un article de synthèse portant sur les impacts des changements climatiques sur les mouvements de terrain et concluent que :

«That climate changes affect the stability of natural and engineered slopes and have consequences on landslides, is also undisputable» (p. 1).

Dans la cadre d'un effort international (Ho *et al.* 2017), une équipe canadienne (Cloutier *et al.* 2017c) provenant du milieu des mouvements de terrain a réalisé une première ébauche de ce que pourrait être l'impact des changements climatiques sur les mouvements de terrain au Canada, incluant les régions nordiques (pergélisol). Les conclusions principales de cette étude se résument ainsi :

1. Considérant l'étendue et la diversité des glissements de terrain au Canada (et cette diversité est semblable au Québec), il y a peu de cas documentés qui permettent de déterminer le rôle du climat et il y a donc un besoin d'avoir une série d'observatoires qui aideront à mieux comprendre le lien entre le climat actuel et les glissements de terrain;
2. Les modèles climatiques doivent être ajustés aux échelles des glissements de terrain, i.e. à des cellules de prédiction climatique de l'ordre de 1 km². Cet ajustement est plus important pour les précipitations que pour la température.
3. Dans les régions habitées, les facteurs humains peuvent parfois être tout aussi importants que les facteurs climatiques. Au Québec, environ 40% des glissements qui sont signalés sont en lien avec l'activité humaine. Ceci devrait amener à adapter des technologies et des pratiques afin de réduire la fréquence des mouvements de terrain;
4. Dans les régions du Canada, dont le Québec, où une cartographie prévisionnelle existe, il faudra déterminer si ces approches devront être ajustées aux changements climatiques.

Ces études soulignent que l'eau est un élément moteur dans les processus tels que les inondations et l'érosion, mais aussi par son infiltration dans les sols et les roches ou encore lorsqu'elle provient

³ https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/2019-PRESS-IPCC-50th-IPCC-Session_fr.pdf

de la fonte du pergélisol. Ainsi, tout changement dans le régime des précipitations et de la température aura un impact direct sur les mouvements de terrain.

En 2010, Desjarlais *et al.* indiquent que:

«Bien que les connaissances sur les liens entre le climat et la géologie du Sud du Québec soient limitées, il est à craindre qu'une augmentation des précipitations intenses attribuable aux changements climatiques ne se traduise par une augmentation encore plus importante du nombre de glissements de terrain et de ruptures du réseau routier.» (p. 59).

Ce rapport résume bien le lien entre le climat et les glissements de terrain. Cet énoncé est en ligne avec celui fourni par le Gouvernement du Québec en 2016 qui soulignait aussi que les aléas auxquels il était le plus souvent confronté étaient les inondations et les mouvements de terrain et que ce sont ceux qui causent le plus de dommages au milieu bâti.

L'impact des précipitations sur l'érosion (et indirectement sur les mouvements de terrain) est aussi souligné dans plusieurs études récentes au Québec et cela le long de bassin versants traversant des régions fortement exposées aux mouvements de terrain. Citons les études sur la rivière du Lièvre en Outaouais (Saint-Laurent et Schneider 2004), la région de Gatineau (Poulin *et al.* 2011) et des rivières du centre du Québec (Boyer *et al.* 2011). Goransson *et al.* (2016) indiquent que pour la Suède, un pays aux conditions géologiques semblables à celles du Québec, il faut développer des outils permettant d'évaluer le rôle des changements climatiques sur les glissements résultant de l'érosion. Dans un rapport récent du Comité de bassin versant de la rivière du Lièvre (COBALI 2019) portant sur les impacts des changements climatiques, on y souligne que :

*«Puisque de tels événements sont liés à une série d'aléas climatiques exceptionnels, tels des précipitations ou des crues importantes, et que les changements climatiques devraient amener davantage d'épisodes météorologiques de ce genre, il est à propos de se questionner sur la façon dont les aléas pourraient se manifester dans le futur, car on peut s'attendre qu'ils **provoquent davantage d'inondations et de glissements de terrain**⁴ dans la ZGIE⁵ du COBALI. »(p. 25).*

À noter que cette région a été fréquemment touchée par des glissements de terrain importants, surtout dans la région du village de Notre-Dame-de-la-Salette (Lapointe 2006).

Pour ce qui est des zones côtières, l'étude de Bernatchez *et al.* (2015) soulignent que :

«Dans une étude plus globale sur la vulnérabilité des communautés côtières liée aux aléas côtiers dans un contexte de changements climatiques, il faudra cependant tenir compte des impacts liés aux autres aléas (submersion et

⁴ En caractère gras dans le document.

⁵ ZGIE: Zone de gestion intégrée de l'eau.

glissement de terrain) et aussi évaluer l'ensemble des coûts indirects et non matériels des impacts sociaux, environnementaux et économiques» (p.39).

Avec le réchauffement climatique et la fonte du pergélisol, l'impact des changements climatiques sur les mouvements de terrain est déjà bien ressenti dans l'arctique canadien avec, par exemple, plus de 4000 glissements en 30 ans le long des côtes de l'île de Banks (Lewkowicz and May 2019). Au Québec aussi la fonte du pergélisol entraîne des mouvements de terrain (Brooks *et al.* 2019).

En 2010, peu de temps après le glissement de terrain de Saint-Jude qui a fait 4 morts, l'Institut national de santé a publié une note dont l'introduction souligne le lien entre changements climatiques et mouvements de terrain :

«Il est estimé que les changements climatiques observés au cours du XX^e siècle s'accroîtront selon la saison et le milieu géographique. Le Québec n'y fera pas exception. En outre, on s'attend à une saison propice aux orages plus longs, avec davantage de pluies intenses, et à une augmentation de neige au sol dans le Nord. Ces changements dans la répartition des précipitations pourraient nuire à l'environnement naturel en accentuant l'intensité ou la fréquence de certains phénomènes. Parmi ces derniers, on compte les glissements de terrain dont les impacts ont déjà dû être gérés par plusieurs municipalités québécoises, notamment au Saguenay-Lac-Saint-Jean, où plus de 1 000 glissements de terrain ont eu lieu en moins de 36 heures lors des pluies diluviennes de 1996. Afin d'assurer la sécurité publique, diverses mesures d'adaptation doivent être mises en place par les collectivités et les propriétaires, mais aussi par les individus quand le glissement de terrain se produit»⁶.

En 2011, dans son préambule introduisant les *Journées annuelles de santé publique* portant sur l'adaptation aux changements climatiques, le document indique que :

«Inondations, canicules et glissements de terrain sont des aléas hydrométéorologiques et géologiques de plus en plus fréquents et sévères auxquels le monde municipal québécois doit s'adapter de façon urgente, globale et intégrée.»⁷

Du côté des architectes, Poitras (2018) souligne que :

«Basé sur les plus récents scénarios d'évolution climatique d'Ouranos, un consortium québécois sur la climatologie régionale, ce rapport est une mine d'or pour les architectes, qui, à défaut de pouvoir prévoir l'imprévisible, peuvent du moins tenter d'anticiper certains effets connus. Parmi ceux-ci figurent l'augmentation du contenu en eau de la neige, les cycles de gel-dégel,

⁶ <http://www.monclimatmasante.qc.ca/glissements-de-terrain.aspx>

⁷ <https://www.inspq.qc.ca/jasp/s-adapter-aux-changements-climatiques-apprendre-pour-agir-et-vice-versa>

les îlots de chaleur urbains, les inondations, les sécheresses et canicules et les glissements de terrain»⁸.

En 2015, un rapport préparé pour Ouranos (Larrivée *et al.* 2015) présentait une évaluation des impacts des changements climatiques et leurs coûts. Ce rapport conclut que les changements climatiques devraient aussi influencer la fréquence des glissements de terrain, mais ce rapport n'en indique pas les conséquences économiques et se concentre principalement aux coûts des inondations en lien avec le milieu bâti.

Pour ce qui est de la prévention en lien avec les glissements de terrain dans les argiles sensibles, depuis 2013, le Gouvernement du Québec dépense annuellement environ 5M\$⁹ en appréciation et traitement des risques associés. Ces dépenses en prévention visent non seulement à réduire les coûts sur les infrastructures, mais aussi les pertes en vies humaines. Il est difficile de prévoir les économies socio-économiques de telles activités, mais le glissement de St-Jean Vianney de 1971 aurait coûté à lui seul environ 105M\$ en dollars de 2019 (17M\$ en 1971, Desmeules 1971).

À titre d'exemple, une étude récente de Porter *et al.* (2019) conclut que pour les provinces de l'Alberta, de la Saskatchewan et du Manitoba les coûts annuels liées aux mouvements de terrain varieraient entre 281 M\$ et 450 M\$. L'étude de Porter *et al.* (2019) considère deux grandes catégories : (1) coûts directs et indirects associés aux dommages ou à la rupture d'infrastructures (incluant leur réparation, les impacts environnementaux et la perte de productivité) et (2) les coûts de prévention (études et travaux de mitigation).

Tel qu'illustré plus haut, le lien physique (temporel et spatial) entre mouvements de terrain et changements climatiques est clair, mais il doit aussi être considéré pour ses impacts socio-économiques incluant la protection de la vie humaine.

Suite à cette analyse un deuxième constat s'impose : les changements climatiques auront un impact majeur sur les mouvements de terrain et cet impact reste à être compris et considéré dans nos méthodes de gestion du territoire.

Conclusion

Nous espérons avoir fait la démonstration qu'il existe un lien direct entre le climat, son évolution et les mouvements de terrain. Les connaissances actuelles nous indiquent clairement que l'on ne peut pas dissocier les mouvements de terrain des conséquences liées aux changements climatiques. Que ce soit l'érosion, la fonte du pergélisol ou l'érosion fluviale et côtière, dans tous les cas les mouvements de terrain, qui en résultent, constituent une conséquence grave pour l'environnement, les infrastructures et encore plus pour les personnes, car ils sont responsables de la plupart des décès causés par les catastrophes naturelles au Québec. De plus, il a été expliqué plus haut que les sciences et le savoir-faire associés à la compréhension des mouvements de terrain sont distincts des inondations, de l'érosion côtière et de la fonte du pergélisol.

⁸ https://www.oag.com/esquisses/innovation/dossier/adaptation_et_resilience_climatiques.html

⁹ Source: Ministère de la Sécurité publique du Québec.

Ainsi, afin de clairement indiquer que le *Plan d'électrification et de changements climatiques* va soutenir les efforts de compréhension et d'adaptation à l'impact des changements climatiques sur les mouvements de terrain, nous recommandons de modifier comme suit le paragraphe de la section 2.3 du document de consultation (Gouvernement du Québec 2019, p. 13):

*«Selon l'état des connaissances actuelles, on estime que certaines problématiques doivent être priorisées. En effet, les inondations, l'érosion côtière, la fonte du pergélisol, **les mouvements de terrain**, les problématiques de santé (liées par exemple à la chaleur), la pérennité des infrastructures et les risques économiques sont considérés comme des problématiques prioritaires en raison de leurs impacts sur la santé et la sécurité de la population.»*

Mémoire déposé à Québec, le 10 octobre 2019.

Bibliographie

Bernatchez, P., Dugas, S., Fraser, C., Da Silva, L. (2015). Évaluation économique des impacts potentiels de l'érosion des côtes du Québec maritime dans un contexte de changements climatiques. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis à Ouranos, 45 p. et annexes.

Blais-Stevens, A. (2019). Historical landslides in Canada resulting in fatalities (1771-2018). Comptes rendus de la 79^e Conférence canadienne de géotechnique, St. John, 8p.

Boucher, M., Grondin, G., et Paquet-Bouchard, B. (2012). "Landslide in the Permafrost Near a Ministère des Transports du Québec Infrastructure in Salluit and Stabilization Work." Cold Regions Engineering 2012: Sustainable Infrastructure Development in a Changing Cold Environment, B. Morse and G. Doré, eds., Québec City, Québec, Canada, 779–788.

Brien, M., 2006. Mesure de l'érosion des berges, du ravinement et de la migration des cours d'eau dans la portion agricole du bassin versant de la rivière des Envies (Québec). Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, 144 p.

Brooks, H., Doré, G., Locat, A., et Allard, M., 2019. Quantifying Hazard and Climate Change Fragility for the Airport Access Road in Salluit, Nunavik, Québec. Comptes rendus: Cold Region engineering. American Society of Civil Engineering, pp. 516-524.

Cloutier, C., Hébert, K., et Locat, J., 2017a. Retour sur le 1er atelier sur les effets potentiels des changements climatiques sur les mouvements gravitaires au Québec 31 janvier 2017 à l'Université Laval. Laboratoire d'études sur les risques naturels, Université Laval, 23p. https://www.lern.fsg.ulaval.ca/fileadmin/documents/20170525_Rapport_retour_atelierCC_sans_annexes.pdf.

Cloutier, C., Locat, P., Demers, D., Fortin, A., Locat, J., Leroueil, S., Locat, A., Lemieux, J.-M., et Bilodeau, C., 2017b. Development of a Long Term Monitoring Network of Sensitive Clay Slopes in Québec in the Context of Climate Change. In: V. Thakur, *et al.* éd., *Landslides in Sensitive Clays*, Springer, Advances in Natural and Technological Hazards, 46: 549-558.

Cloutier, C., Locat, J., Geertsema, M., Jakob, M., et Schnorbus, M., 2017c. Potential impacts of climate change on landslides occurrence in Canada. Dans *Slope safety preparedness for impact of climate change*. Ho *et al.* éd., Taylor and Francis, Londres, chapitre 3 : 71-104.

COBALI, 2019. Changements climatiques : vers une adaptation des acteurs de la zone de gestion intégrée de l'eau du COBALI. Rapport du Comité du bassin versant de la rivière du Lièvre. 155p. <https://www.cobali.org/wp-content/uploads/2019/05/Rapport-Adaptation-aux-CC-VF-compress%C3%A9.pdf>.

Desjarlais, C., Allard, M., Blondlot, A., Bourque, A., Chaumont, D., Gosselin, P., Houle, D., Larrivée, C., Lease, N., Roy, R., Savard, J.-P., Turcotte, R., et Villeneuve, C., 2010. Savoir s'adapter aux changements climatiques. Montréal, 137p. https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportDesjarlais2010_FR.pdf.

Desmeules, J., 1971. Les glissements de terrain au Québec en 1971. Bureau de la statistique du Québec. 11p.

Drejza, S., Friesinger, S., et Bernatchez, P., 2015. Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : Volume 3 Développement d'une approche et d'un indice pour quantifier la vulnérabilité des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques sur 9 sites témoins. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, UQAR, 308 p.

Gariano, S. L., et Guzetti, F., 2016. Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*. 162: 227-252.

Gauthier, F., Héту, B., et Bergeron, N., 2012. Analyses statistiques des conditions climatiques propices aux chutes de blocs de glace dans les corridors routiers du nord de la Gaspésie, Québec, Canada. *Revue canadienne de géotechnique*, 49 : 1408-1426.

Germain, D., Fillion, L., et Héту, B., 2009. Snow avalanche regime and climatic conditions in the Chic-Choc Range, eastern Canada. *Climatic changes*, 92: 141-167.

Goransson, G., Hedfors, J., Ndayikengurukiye, G., et Oden, K., 2017. Climate change induced river erosion as a trigger for landslide. Comptes rendus du 17th Nordic Geotechnical Meeting Channelles in Nordic Geotechnic, Reykjavik, pp.: 1183-1192.

Gouvernement du Québec, 2016. Pour une meilleure gestion des risques des zones potentiellement exposées aux mouvements de terrain. Ministère des affaires municipales et de l'Occupation du territoire, 12 p. https://www.mamh.gouv.qc.ca/fileadmin/publications/amenagement_territoire/orientations_gouvernementales/orientations_glissements_terrains.pdf.

Gouvernement du Québec, 2019. Travaux d'élaboration du Plan d'électrification et de changements climatiques – document de consultation, 20p. https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/environnement/publications-adm/Consultation-PECC/PECC_Document_consultation.pdf?1566501192

Hamel, V.B., Buffin-Bélangier, T., et Héту, B., 2013. Contribution à l'étude de l'érosion des berges : analyse à haute résolution spatio-temporelle des mouvements subaériens sur une berge de la rivière Ouelle, Québec, Canada. *Géomorphologie*, 2 : 119-132.

Ho, K., Lacasse, S., et Picarelli, L., 2017. Slope safety preparedness for impact of climate change. Taylor and Francis, Londres, 590p. <https://doi.org/10.1201/9781315387789>

Lapointe, P.-L. 2006. « Douze ans de malheur ». Chapitre tiré de *Mon village, mes ancêtres*. Notre-Dame-de-la-Salette 1883-2008. Municipalité de Notre-Dame-de-la-Salette. 382 p.

Larrivée, C., Sinclair-Désagné, N., Da Silva, L., Revéret, J.-P., et Desjarlais, C., (2015) Évaluation des impacts des changements climatiques et de leurs coûts pour le Québec et l'État québécois, Rapport d'étude, Ouranos, 58 pages.

Lévy, S., Jaboyedoff, M., Locat, J., et Demers, D., 2012. Erosion and channel change as factors of landslides and valleyu formaiton in champlain Sea clays : the Chacoura River, Québec, Canada. *Geomorphology*, 145-146: 12-18.

Lewkowicz, A.C. et May, R.G., 2019. Extremes of summer climate trigger thousands of thermokarst landslides in a High Arctic environment. *Nature communications*, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09314-7>, 11p.

Locat, J., Demers, D., Leblais, J., et Rissmann, P., 1984. Prédiction des glissements de terrain : application aux argiles sensibles, rivière Chacoura, Québec, Canada. Comptes rendus du *IV International Symposium on Landslides*, vol. II, pp. : 549-555.

Nicolet, R., Roy, L., Arès, R., Dufour, J., et Morin, G., 1997. Rapport de la Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages (Rapport Nicolet), Québec, Gouvernement du Québec, janvier 1997, 350 p.

Organisation Météorologique Mondiale, 1992. Vocabulaire météorologique international. 2^e édition, rapport No. 182, 802 p.

Perret, D., et Bégin, C., 1997. Inventaire des glissements de terrain associés aux fortes pluies de la mi-juillet 1996 – Région du Saguenay-Lac Saint-Jean. Institut national de la recherche scientifique (INRS-Géoresources). Rapport remis au Bureau de la reconstruction et de la relance du Saguenay-Lac-Saint-Jean.

Poitras, A., 2018. Adaptation et résilience climatique – prévoir l'imprévisible. *Esquisse*, 29 (2); https://www.oaq.com/esquisses/innovation/dossier/adaptation_et_resilience_climatiques.html

Porter, M., Van Hove, J., Barlow, P., Froese, C., Bunce, C., Skirrow, R., Lewycky, D., et Bobrowsky, P., 2019. The estimated economic impacts of prairie landslides in western Canada. Comptes rendus de la 72^e Conférence canadienne de géotechnique, St. Johns, 8p.

Potvin, J., Mompin, R., Thibault, C., Demers, D., Bilodeau, C., et Desbiens, L., 2014. Saguenay risk management. V. Thakur *et al.* (eds.), *Landslides in Sensitive Clays*, dans *Advances in Natural and Technological Hazards Research* 46: 417-427.

Saint-Laurent, D., et Guimont, P., 1999. Dynamique fluviale et évolution des berges du cours d'eau inférieur des rivière Nottaway, Broadback et Rupert, en Jamésie (Québec). *Géographie physique et Quaternaire*, 53 : 389-399.

Saint-Laurent, D., et Schneider, M., 2004. Application d'un système d'information géographique à l'analyse cartographique des berges sensibles à l'érosion (rivière du Lièvre, Québec, Canada). *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 44 : 71-86.