



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

**COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA
DOSSIER PUBLIC 8130**

**Caractéristiques des tremblements de terre de la Vallée du
Saint-Laurent entre Montréal et Québec
et examen de liens possibles avec les travaux de fracturation
hydraulique pour les gaz de shale effectués
entre 2006 et 2010**

M. Lamontagne

2017



Canada



COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA DOSSIER PUBLIC 8130

Caractéristiques des tremblements de terre de la Vallée du Saint-Laurent entre Montréal et Québec et examen de liens possibles avec les travaux de fracturation hydraulique pour les gaz de shale effectués entre 2006 et 2010

M. Lamontagne

2017

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre de Ressources naturelles Canada, 2017

Le contenu de cette publication ou de ce produit peut être reproduit en tout ou en partie, et par quelque moyen que ce soit, sous réserve que la reproduction soit effectuée uniquement à des fins personnelles ou publiques mais non commerciales, sans frais ni autre permission, à moins d'avis contraire.

On demande seulement :

- de faire preuve de diligence raisonnable en assurant l'exactitude du matériel reproduit;
- d'indiquer le titre complet du matériel reproduit et le nom de l'organisation qui en est l'auteur;
- d'indiquer que la reproduction est une copie d'un document officiel publié par Ressources naturelles Canada (RNCAN) et que la reproduction n'a pas été faite en association avec RNCAN ni avec l'appui de celui-ci.

La reproduction et la distribution à des fins commerciales sont interdites, sauf avec la permission écrite de RNCAN.

Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec RNCAN à

rncan.copyrightdroitdauteur.rncan@canada.ca.

doi:10.4095/299646

On peut télécharger cette publication gratuitement à partir de GEOSCAN (<http://geoscan.rncan.gc.ca/>).

Notation bibliographique conseillée

Lamontagne, M., 2017. Caractéristiques des tremblements de terre de la Vallée du Saint-Laurent entre Montréal et Québec et examen de liens possibles avec les travaux de fracturation hydraulique pour les gaz de shale effectués entre 2006 et 2010; Commission géologique du Canada, Dossier public 8130, 45 p.
doi:10.4095/299646

Les publications de cette série ne sont pas révisées; elles sont publiées telles que soumises par l'auteur.

Caractéristiques des tremblements de terre de la Vallée du Saint-Laurent entre Montréal et Québec et examen des liens possibles avec les travaux de fracturation hydraulique pour les gaz de shale effectués entre 2006 et 2010

Maurice Lamontagne, ing.

Commission géologique du Canada

601 rue Booth, Local 112, Ottawa, ON, K1A 0Y3

Résumé

Entre novembre 2006 et juillet 2010, des travaux de fracturation hydraulique pour évaluer le potentiel de production économique de gaz naturel du Shale d'Utica ont été faits dans 18 puits dans la vallée du Saint-Laurent (VSL) entre Québec et Montréal. À la lumière des séismes induits par la fracturation hydraulique ailleurs dans le monde et en particulier dans l'Ouest canadien, on examine si ces travaux ont pu mener au déclenchement de séismes induits détectables dans la VSL.

L'analyse disposait des données de la plupart des puits pétroliers et gaziers qui ont été sujet à de la fracturation hydraulique. De plus, on disposait des épacentres et temps d'origine des tremblements de terre détectés par les stations sismographiques régionales du Réseau Sismographique National Canadien. Historiquement, la VSL est sujette à une activité sismique sporadique (de 5 à 34 séismes par année entre 1980 et 2015) entrecoupée de quelques séismes ressentis par la population (rarement plus d'un par année). Le plus grand séisme enregistré pendant la période 2005-2012 a été le tremblement de terre de Laurier-Station (magnitudes : m_N 4.1; M_w 3.5) en juillet 2010.

Une analyse des séismes naturels (tectoniques) de la VSL a révélé que la grande majorité (95%) se produisent entre 5 et 25 km de profondeur. Contrairement à la sismicité tectonique naturelle, l'activité sismique provoquée par la fracturation hydraulique devrait être à faible profondeur (5 km ou moins). De plus, on s'attend à une certaine proximité spatiale des lieux d'injection.

On a comparé les positions des épicentres des séismes survenus après la fracturation hydraulique avec la position des puits où de tels travaux avaient été faits. Seuls trois séismes ayant une source à moins de 5 km de profondeur étaient dans un rayon de 15 km autour d'un puits. Lorsqu'on examine la période de temps entre la fracturation hydraulique et ces trois séismes, on obtient des intervalles de temps variant entre 298 et 1348 jours, ce qui rend très peu probable un lien de cause à effet entre les deux. De plus, les faibles volumes d'eau injectée, rend peu probable un lien de cause à effet entre les deux.

Introduction

Quoique la fracturation hydraulique des shales soit au cœur de la production d'hydrocarbures en Amérique du Nord depuis le milieu des années 2000, peu de séismes dans le monde ont pu être directement reliés à cette méthode de production. Une exception notable est l'Ouest du Canada, comme nous verrons plus loin. De façon générale, la fracturation hydraulique des shales ne cause que de faibles séismes détectables que par des systèmes très sensibles, généralement eux-mêmes localisés dans les trous de forage. Ces séismes représentent soit l'éclatement de la roche en place (l'effet recherché afin d'augmenter la perméabilité et permettre l'extraction des gaz et liquides) soit le glissement brusque du roc le long d'un plan de faiblesse. Si les fluides injectés par fracturation hydraulique se rendent à une d'une faille préexistante, une réactivation de celle-ci est possible, suivant la modification de facteurs de stabilité (Larochelle et al., 2016). Ces facteurs sont connus d'un point de vue théorique, mais ne peuvent être mesurés directement dans la réalité. On ne peut donc pas prévoir d'avance si l'accroissement de la pression interstitielle modifiera suffisamment les conditions de stabilité pour réactiver une faille spécifique et ainsi déclencher un séisme.

Si la rupture atteint une certaine ampleur et réactive une assez grande portion de la surface de la faille, il est alors possible que le séisme soit d'une magnitude assez élevée (c'est-à-dire assez grande sur l'Échelle de Richter) pour être détecté par des sismographes. Plus grand le déplacement et la surface de faille qui est réactivée, plus grande sera la magnitude sur l'échelle de Richter, et plus fortes seront les vibrations. Lorsque la magnitude est suffisamment grande, les ondes sismiques pourront être enregistrées à une certaine distance ou même être ressenties par des gens à la surface pour un séisme de magnitude d'environ 2 ou plus. À partir d'une magnitude¹ **M** autour de 4,5, des dommages légers pourraient commencer à être constatés.

¹ Dans ce rapport, on utilisera le type de magnitude qui décrit le mieux le séisme donné.

Généralement, pour les séismes de l'Est du Canada, la magnitude de Nuttli (m_N , semblable à m_{bLg}) est utilisée. Pour les événements plus forts, la magnitude du moment sismique (M_w ou **M**) est fréquemment utilisée car plus représentative des caractéristiques physiques des sources des

Jusqu'ici la majorité des cas de séismes induits de magnitude supérieure à 3 aux USA ont pu être reliés à la réinjection de grands volumes d'eaux usées (produites par la fracturation hydraulique ou autre processus industriel) dans des aquifères poreux à grande profondeur. C'est ce qui est constaté en Oklahoma, au Texas, en Arkansas et même en Ohio (Ellsworth, 2013).

Les régions du nord-est de la Colombie-Britannique et du nord-ouest de l'Alberta font exception. Là-bas, c'est en grande partie la fracturation hydraulique pour la production d'hydrocarbures qui a été reliée à plusieurs séismes de magnitude faible à modérée. Pour le nord-est de la Colombie-Britannique, le volume d'injection de fluide est l'élément critique pour cette activité sismique (Farahbod et al., 2015). Trois séismes de magnitude 3,5-3,6 se sont produits dans le nord-est de la Colombie-Britannique en 2010 et 2011 de même que quelques séismes entre 4,4 et 4,6 dans le nord-ouest de l'Alberta en 2015. Ces deux régions étaient peu actives pour les séismes avant le début des opérations de fracturation hydraulique (BCOG, 2012; 2015a). Toutefois, seule une faible proportion des stages de fracturation hydraulique est clairement associé à de la sismicité induite. Par exemple, dans la région du gisement de Montney dans l'est de la Colombie-Britannique, seuls 2.6% des stages de fracturation ont été associé à de la sismicité induite (BCOGC, 2015).

Dans l'Est du Canada, au Nouveau-Brunswick (NB) et au Québec (QC), la fracturation hydraulique n'a été faite qu'à titre exploratoire ou pour améliorer la productivité de puits déjà existants au NB. Au NB, on n'a pas pu détecter de microséismes suivant une campagne de fracturation hydraulique de faible intensité en 2014 même si les sismographes en surface étaient à quelques kilomètres ou moins des puits stimulés (Lamontagne et Lavoie, 2015). Quoique cette région ait connu et connaît des séismes naturels, aucun séisme induit n'a pu être reconnu dans la suite d'événements détectés par le réseau sismographique local (Lamontagne et al., 2015).

séismes. Pour les séismes d'avant 1925 environ, la magnitude est estimée d'après les descriptions des effets du séisme donné.

Le présent rapport examine la situation des séismes dans la Vallée du Saint-Laurent entre Québec et Montréal. Nous définissons cette région comme étant celle entre les latitudes 45°N et 47°N et les longitudes 70°W à 75°W, soit une région plus vaste que celle des basses-terres du Saint-Laurent proprement dites. On décrira d'abord le contexte sismotectonique de cette région. On examinera ensuite certaines caractéristiques de ces séismes, en particulier la profondeur des foyers (hypocentres). Par la suite, on décrira les travaux de fracturation hydraulique qui ont été faits entre 2005 et 2010. On examinera ensuite si certains des séismes auraient pu être causés par cette fracturation. On conclura avec une discussion et quelques recommandations pour la surveillance sismographique future.

Contexte sismotectonique de la VSL

Quoique des tremblements de terre peuvent survenir sur presque tout le territoire du Québec, la grande majorité d'entre eux se produisent dans les trois zones suivantes : Charlevoix; l'Ouest du Québec et le Bas-Saint-Laurent (pour un survol, voir : Lamontagne et Marceau, 2013). On doit noter qu'une partie de la VSL près de Montréal fait partie de la zone de l'Ouest du Québec. De façon générale, la majeure partie de la VSL est une région de faible sismicité si on la compare à ces trois zones sismiques. Toutefois, cette région n'est pas aséismique car quelques séismes significatifs sont connus (Figure 1a). Le plus grand séisme de la VSL a été le séisme de 1732 près de Montréal évalué à magnitude (m_{bLg}) 5,8 et qui avait causé des dommages à de nombreux bâtiments de la ville de Montréal (Leblanc, 1980). Un autre séisme notable est celui de 1842 de magnitude estimée à 5,0 qui avait causé des dommages à des cheminées de Trois-Rivières (Gouin, 2001; Lamontagne et al., 2006). En plus des séismes historiques, plusieurs événements de magnitude 4,0 et plus ont été ressentis et enregistrés (Tableau 1). La Figure 1b montre les séismes localisés entre 1940 et 2016. La sismicité et la présence de failles du paléorift du Saint-Laurent font de cette région une zone d'aléa modéré suivant la carte de zonage sismique du Canada (Figure 1c). Les contraintes géologiques locales sont décrites dans Konstantinovskaya et al., (2012).

Depuis le milieu des années 1920, le gouvernement canadien a progressivement installé des sismographes capables de détecter les séismes locaux et non pas seulement les grands séismes

internationaux. Depuis le début des années 1980, la densification du réseau sismographique a permis de détecter de plus en plus de petits séismes souvent non-ressentis par la population (magnitude m_N 2,5 ou moins).

Entre 1980 et 2015, le réseau de postes sismographiques permanents a parfois été amélioré par l'ajout de postes temporaires (Figures 2 et 3). Au milieu des années 80, par exemple, Hydro-Québec a installé trois sismographes portatifs autour de la centrale nucléaire de Gentilly afin de mieux étudier quelques séismes locaux détectés par la station sismographique Gentilly (GNT). Ce réseau local a été en fonction pendant trois ans environ, mais aucun tremblement de terre n'a été détecté dans de cette région (correspondance interne de la CGC). Entre 2005 et 2016, la CGC a installé quelques sismographes temporaires dans la VSL pour obtenir une meilleure définition de la croûte terrestre entre Québec et Montréal. Finalement, entre mi-2013 et mi-2015, plusieurs postes du réseau USARRAY ont été installés dans le même secteur. Le USARRAY a déployé des sismographes sur le territoire nord-américain au sud du 47^e parallèle et a inclus le sud du Québec pendant cette période de deux ans (voir détails à : USARRAY, 2016).

Basé sur ce qui a été enregistré au fil des ans, on peut qualifier l'activité sismique de la VSL de sporadique, avec quelques événements plus forts enregistrés ou ressentis de temps à autres. Entre 1980 et 2015, par exemple, entre 5 et 34 séismes ont été enregistrés annuellement. Au cours de cette période, deux séismes ont été de plus forte magnitude : celui de magnitude m_{bLg} 5,1 à Cap-Rouge en 1997 (Nadeau et al., 1998) et celui de magnitude m_N 4,1 à Laurier-Station en 2010 (Lamontagne et al., 2012). L'accroissement du nombre de séismes enregistrés depuis 1995 environ est une conséquence de l'amélioration du réseau sismographique, en particulier sa capacité de détecter de plus petits séismes (Figures 4 et 5). La période 2005-2010 au cours de laquelle des travaux de fracturation hydraulique ont été faits n'apparaît comme plus active que les autres (Figure 5). La région VSL n'est donc pas différente des autres régions situées à la marge du Bouclier canadien. Plus à l'est, dans les Appalaches, un moins grand nombre de séismes sont enregistrés que le long de la vallée du Saint-Laurent.

Seuils de détection des séismes, précision de leurs positions et leur distribution en profondeur

Pour la période 2005-2012, les données sismologiques utilisées sont essentiellement celles enregistrées par les postes permanents du Réseau sismographique national canadien. Les données des stations temporaires ont été ajoutées lorsque disponibles (parfois les sismographes étaient en panne entre deux visites d'entretien). Dans la région d'intérêt, on estime que le réseau permanent permet de positionner l'épicentre de tout séisme de magnitude m_N 2,0 et plus (Figure 4). Toutefois, des séismes plus faibles peuvent être captés dans des conditions particulières, par exemple, lorsque des appareils supplémentaires sont installés lors de levés temporaires pour des études de la croûte terrestre ou de répliques sismiques par exemples, ou pendant la nuit, lorsque le bruit de fond d'origine humaine est plus faible.

Pour la VSL, un test de la précision de la localisation des épicentres a été fait en comparant les positions de dynamitages dans des carrières près de Trois-Rivières avec les positions calculées avec les données sismologiques. Les sources des dynamitages ont été localisées en fixant le foyer à la surface avec le modèle crustal standard à vitesses crustales uniformes utilisé par la CGC : $V_p = 6.2$ km/s; $V_s = 3.57$ km/s. Nous n'avons pas réexaminé les traces sismiques pour raffiner les temps d'arrivées des ondes sismiques et d'ainsi possiblement obtenir une meilleure position des épicentres: nous avons utilisé les positions telles qu'archivées dans la base de données de la CGC. Lorsqu'on compare ces positions avec la source connue des dynamitages, les erreurs de positions sont de l'ordre de ± 7 km. Par extension, on peut présumer que cette incertitude est semblable à celle des épicentres de séismes tectoniques. L'incertitude provient essentiellement du modèle de vitesses sismiques qui ne tient pas compte des variations locales et en profondeur de celles-ci. Un modèle plus fin des vitesses sismiques serait très difficile à définir à cause de la complexité de la croûte supérieure à travers la région. En effet, la région est le point de rencontre de trois provinces géologiques (Grenville, Basses-Terres du Saint-Laurent et Appalaches) avec des contrastes de vitesses sismiques.

Il n'est généralement pas possible de calculer la profondeur des foyers des séismes (hypocentres) car la densité de stations sismographiques dans la VSL n'est pas suffisante pour donner des

résultats fiables. Sur la base de décennies de localisations de séismes, on estime qu'un minimum de trois stations dans un rayon de 100 km qui entourent l'épicentre est nécessaire au calcul fiable d'hypocentres (Lamontagne, 2016). Brièvement, la localisation du foyer d'un séisme se fait par un logiciel qui trouvera les valeurs optimales de position (latitude, longitude, profondeur) et de temps d'origine du séisme. Ces paramètres optimaux seront ceux qui produisent la plus petite différence entre les temps d'arrivées des ondes P et S mesurées sur les traces sismiques et celles calculées d'après le temps d'origine, la position du foyer et le modèle de vitesse. On a recalculé quelque 53 localisations qui existaient dans la base de données de tremblements de terre canadiens pour la période de janvier 1980 à décembre 2015 et calculé les hypocentres des séismes enregistrés par trois stations situées à moins de 100 km de l'épicentre (Lamontagne, 2016). Une grande partie de ces séismes ont été analysés en utilisant les données publiques des stations du USARRAY entre les étés de 2013 et de 2015. La Figure 6 montre la distribution en profondeur de ces séismes.

Pour les séismes de magnitude (m_N) 2,8 et plus, il est possible d'utiliser des phases crustales intermédiaires pour estimer la profondeur des foyers. Ma et Lamontagne (2017) ont calculé les profondeurs des foyers des quelque 62 séismes de magnitude (m_N) 2,8 et plus enregistrés entre 1980 et 2014 (Figure 7; Tableau 2). Cela s'ajoute à ceux déjà connus et publiés précédemment dans Ma (2010); Ma and Atkinson (2006) et Ma and Eaton (2010) et Peci (non-publiés mais disponible dans la base de données canadienne). La Figure 7 montre la distribution en profondeur de ces séismes de magnitude (m_N) 2,8 et plus. On constate que la zone la plus active est celle entre 10 et 15 km de profondeur où se produisent presque 50% des séismes. On note aussi, que les deux séismes les plus forts de cette période se sont produits entre 20 et 25 km de profondeur, donc dans la partie active la plus profonde. La Figure 8 montre les épicentres des séismes de magnitude (m_N) 2,8 et plus pour lesquels on a calculé la profondeur du foyer.

Finalement, on sait que des séismes superficiels (entre 0 et 5 km de profondeur) peuvent montrer une phase sismique particulière (l'onde de surface de Rayleigh; R_g). On a donc systématiquement vérifié la présence de la phase R_g pour les séismes du Table 2. En utilisant cette caractéristique, on a découvert que moins de 2% des séismes (3 sur 64) de la période 1980-2015 avaient une profondeur inférieure à 5 km (Lamontagne, 2016). Pour la période 2005-2012,

on a trouvé que seuls trois séismes avaient effectivement une onde Rg caractéristique et avaient donc un foyer à moins de 5 km de profondeur. Finalement, on a trouvé 12 séismes sur les quelques 607 de la période 1980-2015 qui avaient une mention d'une phase Rg dans la base de données (Tableau 3). Cela indique donc qu'environ 2% des séismes ont une profondeur hypocentrale de 5 km ou moins (Lamontagne, 2016).

Pour fins de comparaison, dans la zone sismique de Charlevoix (ZSC), les hypocentres sont calculés de façon routinière. Là-bas, les séismes « tectoniques » surviennent dans la croûte terrestre supérieure à des profondeurs variant entre 5 et 25 km, avec deux tiers des séismes entre 7 et 15 km, donc assez semblable à ce que l'on trouve dans la VSL. Moins de 5% des séismes de la ZSC se produisent à moins de 5 km de profondeur. Dans certaines parties de la ZSC, cette proportion peut être plus élevée (jusqu'à 10%), en particulier le long de la rive nord du Saint-Laurent, là où se trouvent des failles associées à l'impact météoritique (Lamontagne et Ranalli, 1997). Une distribution semblable existe dans la Zone de l'Ouest du Québec (Ma et Atkinson, 2006).

Données de forage

Les renseignements détaillés pour 18 forages verticaux et horizontaux pour lesquels de la fracturation hydraulique fut effectuée dans le Shale d'Utica nous ont été fournis (Charles Lamontagne, comm. pers. 2012; Figure 9). Il est important de considérer que les puits verticaux ne sont généralement sujets que d'un ou deux stages de fracturation hydraulique alors que les puits horizontaux peuvent en avoir de 6 à plus de 10 localement. Le volume total d'injection est donc évidemment plus important pour un puits horizontal. Les données de forage fournissent la localisation des puits et, dans la plupart de cas, les dates des travaux de fracturation hydraulique, les profondeurs et les volumes d'injection et de retour (flow back) et pressions d'injections (Annexe). Pour quatre de ces puits, on ne connaît pas si de la fracturation hydraulique a bel et bien eu lieu.

Analyse

Entre janvier 2005 et septembre 2012, environ 150 séismes ont été détectés et localisés dans les limites de notre zone d'étude (Figure 10). Notre analyse a consisté à comparer les épicentres des séismes avec la position de 18 puits pour lesquels les dates de fracturation étaient connues (Figure 11). L'auteur a écrit un logiciel ('script') pour ce faire. Si un séisme se trouvait à l'intérieur d'un rayon de 15 km d'un puits, la date du séisme était comparée à celles où la fracturation hydraulique avait débuté dans ce puits. Un séisme produit avant le début de la fracturation était considéré comme naturel et n'était pas inclus dans les résultats. Même si le dernier test d'injection a été fait en 2010, nous avons étendu la période d'analyse jusqu'en septembre 2012.

Des 150 séismes qui sont survenus dans les limites de notre zone d'étude entre janvier 2005 et septembre 2012, seulement 18 se sont produits dans un rayon de 15 km d'un puits avec une date postérieure au début de la fracturation dans ce puits (Figures 10 et 11). Les magnitudes (m_N) de ces séismes variaient entre 1,6 et 4,1. Parmi ces 18 séismes, seuls trois étaient à moins de 5 km de la surface car ils ont produit une onde de surface de Rayleigh (« Rg »). Hormis ces trois séismes superficiels, on présume donc que tous les autres sont donc survenus plus profondément que 5 km, et sont donc naturels. Deux de ces 18 séismes sont d'ailleurs clairement identifiés comme tectoniques soient le séisme de magnitude m_N 4,1 de Laurier Station du 23 juillet 2010 (foyer à une profondeur de 23,5 km) et une de ses répliques de magnitude m_N 2,1 (Lamontagne et al., 2012).

Les trois séismes superficiels se sont produits à une distance assez grande des puits (entre 8,5 et 14 km). Toutefois, si on considère l'incertitude sur les épicentres (environ ± 7 km), la distance épicentre-puits pourrait être plus faible. Les dates de ces trois séismes avec celles du début de la fracturation hydraulique varient entre 298 et 1348 jours (Figure 12). Cet intervalle de temps est considérable. De plus, le faible volume d'eau injecté nous porte à croire qu'il est peu probable que les trois séismes ont pu être provoqués par d'aussi faibles perturbations de pression d'eau. Ces deux facteurs nous amènent à conclure qu'il est très improbable que les séismes aient pu être causés par la fracturation hydraulique dans les puits.

Discussion et conclusions

La VSL est une région à sismicité modérée où les séismes surviennent de façon intermittente avec une fréquence annuelle variant entre 5 et 34 séismes détectés. Entre 1980 et 2015 inclusivement, quelques séismes ont atteint une magnitude de 4,0 et plus, incluant un séisme de magnitude 5,1 (Cap-Rouge en 1997) et un autre de m_N 4,1 (Laurier-Station en 2010). Les séismes se produisent depuis près de la surface jusqu'à une profondeur d'environ 25 km. Les deux plus forts séismes de la période se sont produits à plus de 20 km de profondeur. Une minorité des séismes (moins de 5%) se produisent à moins de 5 km de profondeur. Il est à noter que la fracturation hydraulique des shales d'Utica se produit généralement à des profondeurs de 1 à 2 km.

La période de fracturation hydraulique n'a pas mené à un accroissement du nombre de séismes détectés par le réseau national canadien. La période 2005-2012 n'a pas été plus active que d'autres périodes de durée semblable. Seuls trois séismes détectés par le Réseau canadien pendant la période janvier 2005 à septembre 2012 semblent avoir une source peu profonde (5 km ou moins). Ces trois séismes ont une distance au puits le plus proche variant entre 8,5 et 14,6 km (mais qui peut être moindre dans la réalité si on considère l'incertitude sur les localisations des séismes d'environ ± 7 km dans cette région). Pour ces trois séismes, un long intervalle de temps (plusieurs centaines de jours) sépare la fin de la fracturation hydraulique dans les puits situés à moins de 15 km de distance de la date du séisme considéré. De plus, les volumes de fluides résiduels sont minimales si on les compare à ceux de l'Ouest canadien là où de la sismicité induite a été parfois constatée.

Ces évidences suggèrent que ces trois séismes superficiels ne sont pas reliés à la fracturation hydraulique mais seraient plutôt de nature tectonique comme on en a enregistré au fil des ans. On s'attendrait, en effet, que l'accroissement somme toute modeste de la pression de fluides autour du puits se dissiperait rapidement avec la distance et le temps. D'autre part, on sait que la plupart des séismes tectoniques (95%) se produisent plus profondément (dans le socle précambrien) que les profondeurs atteintes par les puits (dans les roches sédimentaires superficielles).

Dans une éventuelle reprise de la fracturation hydraulique dans la VSL, porter un diagnostic quant à la nature de la sismicité devrait considérer les aspects suivants.

- 1) Quoique peu fréquents (5% des cas), les séismes à moins de 5 km de profondeur se produisent de façon naturelle dans la VSL.
- 2) Entre 1980 et 2016, les deux séismes de magnitude m_N 4,0 et plus se sont produits à plus de 20 km de profondeur.
- 3) Le réseau sismographique permanent de la CGC n'a présentement pas la densité nécessaire pour permettre la détermination routinière de la profondeur des foyers des séismes de magnitude m_N 2,8 ou moins. Pour les séismes plus forts, les phases crustales et l'analyse télé-sismique peuvent permettre de calculer la profondeur des foyers, mais avec une incertitude plus grande. Les séismes peu profonds ont une phase Rg caractéristique qui permet de reconnaître les hypocentres à 5 km ou moins de profondeur. Pour la surveillance de la sismicité induite pour fins diagnostiques de la nature des séismes, la densité de postes sismographiques devrait être augmentée par rapport à celle qui existe présentement dans la VSL. Idéalement, des postes devraient être installés à proximité des puits, avec du bruit de fond le plus faible possible.

Remerciements

Nous remercions M. Charles Lamontagne, du Ministère du développement durable de la faune et des parcs du Québec, pour ses données des puits de la vallée du Saint-Laurent. Sharare (Sherry) Ghafoori, étudiante au M.Sc. à Carleton a eu la gentillesse de partager quelques-uns de ses résultats préliminaires. Veronika Peci, contractuelle à la CGC, a analysé de façon routinière la majorité des séismes de la période considérée. Nous remercions Denis Lavoie de la CGC et M. Charles Lamontagne pour leurs lectures critiques d'ébauches de ce rapport.

Bibliographie

BCOGC (British Columbia Oil and Gas Commission, 2015. August Seismic Event Determination. Industry Bulletin 2015-32. (<https://www.bcogc.ca/node/12951/download>; Dernière visite le 18 décembre 2015).

Bent, A L; Peci, V; Halchuk, S; Hayek, S; 2014. Two moderate earthquakes near Montreal: 10 October and 6 November 2012 Seismological Research Letters vol. 85: 940-947, [doi:10.1785/0220140008](https://doi.org/10.1785/0220140008)

Ellsworth, W.L. (2013). Injection-induced earthquakes, *Science*, **341**, no. 6142. [doi:10.1126/science.1225942](https://doi.org/10.1126/science.1225942).

Farahbod, A.M., Kao, H., Walker, D.M. and J.F. Cassidy, 2015. Investigation of regional seismicity before and after hydraulic fracturing in the Horn River Basin, northeast British Columbia. *Can. J. Earth Sc.* doi: 10.1139/cjes-2014-0162

Gouin, P., 2001. Tremblements de terre «historiques» au Québec (de 1534 à mars 1925) identifiés et interprétés à partir des textes originaux contemporains («Historical» earthquakes felt in Québec (from 1534 to March 1925) as revealed by the local contemporary literature), Guérin, Montreal), 1491 p.

Konstantinovskaya, E., Malo, M., D.A. Castillo. 2012. Present-day stress analysis of the St. Lawrence Lowlands sedimentary basin (Canada) and implications for caprock integrity during CO2 injection operations. *Tectonophysics*, **518–521**, 119–137.

Lamontagne, M., 2016. Focal Depth of Earthquakes of the St. Lawrence Valley based on Crustal Phases recorded within 100 km epicentral distance; Geological Survey of Canada, Open File 8032, 26 p. [doi:10.4095/299138](https://doi.org/10.4095/299138)

Lamontagne, M. and Ranalli, G. 1997. Faults and Spatial Clustering of earthquakes near La Malbaie, Charlevoix Seismic Zone, Canada. *Seismological Research Letters*, 68: 337-352.

Lamontagne, M., et Marceau, P. 2013. Le Québec compte trois zones sismiques importantes. InterAction, Vol. 4, no. 1, p. 12

(http://www.securitepublique.gouv.qc.ca/fileadmin/Documents/securite_civile/inter_action/2013/inter_action_vol_4_no_1_printemps_2103.pdf; accédé la dernière fois le 3 février 2017).

Lamontagne, M. et Lavoie, D. 2015. Report on the monitoring of micro-earthquakes during the hydraulic fracturing conducted in New Brunswick in August and September 2014. Commission géologique du Canada, Dossier public 7815, 40 pages. Disponible en ligne :

<http://geoscan.nrcan.gc.ca/starweb/geoscan/servlet.starweb?path=geoscan/download.web&search1=R=296859>

Lamontagne, M., Keating, P., Bent, A., Peci, V. et Drysdale, J. 2012. The 23 July 2010 m_N 4.1 Laurier - Station, Quebec, Earthquake: A Midcrustal Tectonic Earthquake Occurrence Unrelated to Nearby Underground Natural Gas Storage. Seismological Research Letters, **83**: 921-932.

Lamontagne, M., Lavoie, D., Ma, S., Burke, K.B.S., et I. Bastow. 2015. Monitoring the earthquake activity in an area with shale gas potential in southeastern New Brunswick. Seismological Research Letters, 86: 1068-1077.

Lamontagne, M; Halchuk, S; Cassidy, J F; Rogers, G C. 2007. Significant Canadian earthquakes 1600-2006; Geological Survey of Canada, Open File 5539; 32 pages; 1 CD-ROM, doi:10.4095/224164.

Disponible en ligne:

<http://geoscan.nrcan.gc.ca/starweb/geoscan/servlet.starweb?path=geoscan/download.web&search1=R=224164>

Larochelle, S., Liu, Y. and Kao, H., 2016. Poroelastic Modeling of Hydraulic Fracturing Induced Earthquake Stress Field. Geological Survey of Canada, Open File 8028, 26p.

Leblanc, G. 1981. A closer look at the September 1732, Montreal earthquake. Canadian Journal of Earth Sciences, 18: 539-550.

Ma, S. 2010. Focal Depth Determination for Moderate and Small Earthquakes by Modeling Regional Depth Phases sPg, sPmP, and sPn, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **100**, 1073-1088.

Ma, S., and Lamontagne, M. 2017. Earthquakes of the St. Lawrence Valley between Montreal and Quebec City: Focal depth determination from Regional Depth Phases for the magnitude 2.8 and larger earthquakes for the time period 1980-2014. Geological Survey of Canada Open File (en révision interne).

Ma, S. and G. M. Atkinson, 2006. Focal depth distribution for earthquakes with $m_N \geq 2.8$ in western Quebec, southern Ontario and northern New York, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96**, 609-623.

Ma, S. and D. Eaton, 2009. Anatomy of a small earthquake swarm in southern Ontario, Canada, *Seismological Research Letters*, 80, 214-223.

Nadeau, L., Lamontagne, M, Wetmiller, R.J., Brouillette, P., Bent, A., Keating, P. 1998. Preliminary results and tectonic setting of the Cap-Rouge earthquake of November 5, 1997, Quebec. Current research 1998-E, Geological Survey of Canada; Geological Survey of Canada, Current Research no. 1998-E, 105-115.

(<http://geoscan.nrcan.gc.ca/starweb/geoscan/servlet.starweb?path=geoscan/fulle.web&search1=R=209957>)

USARRAY (2016). USARRAY; A continent-scale seismic observatory.
(<http://www.usarray.org/maps>)

Tableau 1 : Séismes de magnitude m_N ou M_L 4,0 et plus localisés entre les latitudes 45° et 47°N et les longitudes 70° à 75°W (une région bien plus grande que la région où la fracturation hydraulique s'est faite). Pour la période 1600-2015, ce ne sont pas tous les séismes de magnitude m_N ou M_L 4,0 et plus qui ont été catalogués car les séismes étaient rapportés entre autres suivant la distribution de la population puis, à partir du 20^e siècle, suivant la capacité de détection du réseau sismographique. En jaune, la période de temps où les travaux de fracturation hydraulique ont été faits. Source : Base de données des séismes de la CGC

Date	Heure (TU)	Lat	Long	Prof (km)	Mag	Commentaires
2012/11/06	09:05:27	45.601	-74.591	6.5g	4.2MN	2 km E de Hawkesbury
2012/10/10	04:19:28	45.711	-73.257	14.0g	4.5MN	11 km S-E de Vercheres
2011/03/16	17:36:55	45.581	-74.553	12.8*	4.3MN	6 km S-E de Hawkesbury
2010/07/23	17:24:22	46.584	-71.665	23.5*	4.1MN	19 km S-E de Donnacona
2006/01/09	15:35:39	45.030	-73.903	12.5g	4.2MN	13 km S-E de Ormstown
2000/08/06	08:52:24	46.194	-74.972	18.0g	4.2MN	55 km S-E de MONT-LAURIER
1999/10/31	20:14:10	45.856	-74.304	18.0g	4.2MN	Ressenti
1998/07/30	08:57:21	46.194	-74.805	10.0g	4.4MN	Pres de Mont Tremblant
1998/04/18	16:22:52	45.578	-74.969	18.0g	4.1MN	L'est de l'Ontario. Ressenti
1997/11/06	02:34:33	46.801	-71.424	22.5g	5.1MN	Region de Quebec. Ressenti.
1997/05/24	18:52:09	45.911	-74.240	18.0g	4.2MN	L'OUEST DU QUEBEC. RESSENTI.
1996/03/14	10:42:26	45.925	-74.396	18.0g	4.4MN	Ressenti; Zone Seismique de l'Ouest du Quebec
1993/11/16	09:31:44	45.189	-73.460	15.1*	4.3MN	NAPIERVILLE
1992/11/17	03:58:01	45.774	-74.927	16.0g	4.4MN	26 km N-O de HAWKESBURY
1978/02/18	14:48:25	46.350	-74.110	7.0g	4.1MN	9 km N-E de Saint-Donat-de-Montcalm
1973/06/15	01:09:05	45.390	-71.030	10.0g	4.9MN	24 km S-O de Lac-Megantic
1964/01/20	18:57:55	46.830	-71.330	0.0*	4.0ML	8 km O de Quebec
1950/08/04	14:29:28	45.200	-74.720	0.0*	4.0ML	15 km S-O de Alexandria
1950/03/06	16:14:11	46.000	-74.500	0.0*	4.0ML	15 km S-E de Saint-Jovite
1949/10/16	23:33:42	45.300	-74.830	0.0*	4.2ML	16 km O de Alexandria
1948/05/07	12:02:26	45.750	-73.630	0.0*	4.0ML	15 km E de Sainte-Anne-des-Plaines
1942/05/20	12:19:22	45.770	-74.670	0.0*	4.4ML	17 km N de L'Orignal
1925/10/19	12:05:17	47.000	-73.000	0.0g	4.3ML	51 km S de La Tuque
1920/11/08	19:26:00	46.010	-73.430	0.0g	4.0ML	2 km S-E de Joliette
1917/01/26	07:35:48	46.800	-74.500	0.0*	4.3ML	46 km O de Saint-Michel-des-Saints
1914/02/22	19:15:00	45.000	-70.500	0.0*	4.0ML	72 km S-E de Lac-Megantic
1914/02/14	09:34:00	46.400	-73.600	0.0*	4.3ML	20 km N-O de Saint-Gabriel
1914/02/10	18:31:00	46.000	-75.000	0.0*	5.5ML	32 km N de Saint-Andre-Avellin
1908/06/16	20:41:52	45.100	-74.800	0.0*	4.3ML	9 km N-O de Cornwall
1897/03/23	00:00:00	45.500	-73.600	0.0*	5.0ML	0 km N de Montreal
1893/11/27	16:50:00	45.500	-73.300	0.0*	5.7ML	11 km S-O de Beloeil
1877/11/04	00:00:00	45.200	-73.900	0.0*	5.0ML	19 km E de Salaberry-de-Valleyfield
1871/01/03	00:00:00	45.600	-74.600	0.0*	4.4ML	1 km E de Hawkesbury

1864/04/20	18:15:00	46.900	-71.200	0.0*	5.0ML	10 km N	de Quebec
1861/10/00	00:00:00	45.600	-73.700	0.0*	4.4ML	14 km N-O	de Montreal
1842/11/09	00:00:00	46.000	-73.200	0.0*	5.0ML	8 km S-O	de Sorel
1816/09/16	00:00:00	45.500	-73.600	0.0*	5.0ML	0 km N	de Montreal
1816/09/09	00:00:00	45.500	-73.600	0.0*	5.7ML	0 km N	de Montreal
1732/09/16	16:00:00	45.500	-73.600	0.0*	5.8MN	0 km N	de Montreal
1661/02/10	12:00:00	45.500	-73.000	0.0*	5.7ML	9 km N	de Saint-Cesaire

Tableau 2 : Liste des séismes de magnitude (m_N) 2,8 et plus enregistrés entre 1980 et 2014 pour lesquels on a pu calculer la profondeur du foyer en utilisant les phases crustales (Ma and Lamontagne, 2017). On a séparé les séismes qui représentent des précurseurs, répliques ou essaims de séismes et qui ont nécessairement la même profondeur focale que le choc principal. En jaune, les séismes enregistrés entre 2005 et septembre 2012, la période d'examen de liens possibles avec la fracturation hydraulique.

No	Date	heure	Lat.	Lon	Prof	Mag	Référence
	yyyy/mm/dd	hh:mm:ss	(°N)	(°W)	(km)	(m_N)	
01	1980/03/11	04:15:55	46.792	-71.858	22.0	3.7	
02	1980/04/19	23:32:14	45.415	-72.508	12.0	2.8	Ma and Atkinson (2006)
03	1981/01/01	07:06:08	46.181	-73.079	10.0	2.9	
04	1981/12/06	16:11:26	45.384	-72.636	7.5	3.2	Ma and Atkinson (2006)
05	1982/11/24	07:34:39	45.424	-73.444	8.0	2.9	Ma (2010)
06	1983/03/21	03:30:08	46.977	-71.297	12.0	2.8	
07	1983/11/01	10:16:52	45.682	-73.903	17.0	3.4	
08	1983/12/21	15:04:44	45.213	-73.961	16.0	3.0	
09	1985/01/08	04:35:34	45.991	-72.234	12.0	2.8	Ma and Atkinson (2006)
10	1985/11/01	23:33:39	45.286	-73.485	12.0	3.4	Ma (2010)
11	1987/10/28	10:33:32	45.070	-73.975	12.5	2.9	
12	1990/04/24	13:46:19	45.893	-72.673	2.0	2.8	Ma and Atkinson (2006); Shallow
13	1991/07/05	01:47:36	45.203	-73.854	15.5	3.8	
14	1991/07/29	14:42:27	45.715	-73.669	12.5	2.8	
15	1992/06/28	12:31:00	46.843	-71.522	6.5	3.3	
16	1992/08/28	23:00:36	46.706	-71.122	6.5	3.6	
17	1992/09/02	20:13:49	45.747	-73.844	13.5	2.8	
18	1992/11/24	14:50:51	46.744	-71.187	12.0	2.8	
19	1993/04/25	19:05:33	46.138	-73.111	11.0	2.8	
20	1993/11/16	09:31:44	45.192	-73.460	15.7	4.3	Ma (2010) Earthquake Swarm near Napierville, Qc
21	1993/11/16	09:32:48	45.192	-73.462	15.7	3.5	Ma (2010)
22	1993/11/16	09:40:08	45.193	-73.464	15.4	2.9	Ma (2010)
23	1993/11/16	10:00:11	45.193	-73.464	15.1	2.8	Ma (2010)
24	1993/11/22	21:48:32	45.192	-73.462	15.4	2.9	Ma (2010)
25	1993/11/22	21:48:34	45.192	-73.462	15.4	2.9	Ma (2010) (2 seconds apart)
26	1993/11/23	16:29:51	45.192	-73.462	15.0	2.9	Ma (2010)
27	1994/02/28	18:52:24	46.225	-72.725	8.0	2.9	Ma and Atkinson (2006)
28	1995/08/20	16:15:26	45.407	-73.279	8.5	3.3	
29	1996/09/23	15:55:26	46.053	-73.590	13.5	3.0	

30	1997/04/03	04:44:12	45.969	-72.331	12.0	3.6	Ma and Atkinson (2006)
31	1997/11/06	02:34:33	46.801	-71.424	23.0	5.1	Cap-Rouge earthquake and aftershocks
32	1997/11/06	02:55:39	46.777	-71.393	24.0	2.8	
33	1997/11/06	03:05:57	46.762	-71.371	24.0	2.9	
34	1997/11/08	14:49:26	46.780	-71.372	23.5	2.9	
35	1998/02/24	08:23:59	46.138	-73.050	21.5	3.0	
36	1998/05/18	15:39:16	45.139	-73.988	19.5	2.9	(this is a foreshock 4s before mN 3.0)
37	2000/04/05	08:19:09	46.521	-72.285	11.5	3.1	Ma and Atkinson (2006)
38	2000/06/08	11:59:50	46.851	-71.412	4.5	2.8	
39	2001/02/27	05:22:22	45.204	-73.889	13.5	2.8	
40	2001/04/15	18:24:34	46.645	-71.217	5.0	2.8	Rg on QCQ; DPQ; MOQ; Shallow
41	2002/02/11	11:41:36	46.063	-73.458	20.5	3.8	
42	2002/04/25	12:51:04	46.223	-72.732	6.5	3.1	Ma and Atkinson (2006)
43	2002/06/01	11:35:29	45.589	-73.859	11.5	3.2	
44	2003/04/13	02:43:13	46.938	-71.162	6.0	3.4	Rg visible on MNT
45	2004/05/24	13:28:03	45.113	-73.870	11.0	2.9	
46	2005/04/08	04:32:38	46.270	-73.458	21.5	3.3	
47	2005/07/27	11:24:32	45.410	-73.340	13.0	3.2	
48	2006/01/09	15:35:39	45.029	-73.901	12.5	4.2	
49	2006/05/11	06:35:38	46.268	-72.683	19.0	3.1	
50	2008/10/02	04:10:24	45.221	-73.896	13.5	2.8	
51	2008/10/11	02:47:14	46.325	-72.542	3.0	2.9	Strong Rg; Shallow
52	2009/04/29	19:37:07	46.853	-71.058	18.5	3.4	
53	2009/11/09	13:07:14	45.575	-72.406	12.0	2.9	
54	2010/02/01	17:18:06	45.188	-73.208	18.5	2.8	
55	2010/04/05	05:54:11	46.176	-72.739	6.5	2.8	Weak Rg
56	2010/04/15	17:06:29	45.528	-72.406	9.0	3.0	
57	2010/06/15	14:59:48	45.972	-73.818	15.5	3.3	
58	2010/07/23	17:24:22	46.584	-71.665	21.0	4.1	Laurier-Station earthquake
59	2011/06/22	10:07:29	45.289	-73.079	9.0	3.2	
60	2012/09/15	17:09:40	46.733	-71.883	20.0	2.8	
61	2012/10/10	04:19:28	45.705	-73.268	19.0	4.5	also in Bent et al. (2014)
62	2014/02/07	15:45:05	45.080	-73.644	12.5	3.1	

Tableau 3 Commentaires mentionnant la phase Rg pour les séismes de la base de données des tremblements de terre canadien (date et heure en temps universel)

19900424.1346002 Clear Rg phase

19930730.2230002 RG VISIBLE AT MNT,WBO,MOQ

20010603.2242001 Strong Rg phase on QCQ. Pegged to 5km.

20010731.0100001 Strong Rg phase -set depth to 5km.

20010901.0544001 Strong Rg - set depth to 5km.

20030413.0243006 Rg phase on MNT

20040723.0533001 Possible Rg phase on QCQ but not clear enough to be sure.

20051214.0338003 rg on QCQ but not on others.

20081011.0247003 Probably a shallow event: strong Rg phase on many stations, including SADQ

20100322.1630001 Clear Rg-phase on several stations.

20100405.0554002 Possible weak Rg

20110822.0040003 Rg phase on DPQ.

20120113.2200002 MNTQ is very bad record; no BECQ record; Hint of an Rg on MOQ

20150127.1430001 Clear Rg-phase.

Tableau 4: Liste des 18 puits pour lesquels les dates de fracturation hydraulique sont connues (Source : Charles Lamontagne, Ministère du développement durable de la faune et des parcs du Québec)

No	Puits	Lat.	Long.	Fracturation		Commentaires
		(°N)	(°W)	Début	Fin	
1.	A248	46.091	-72.881	20061108	20061109	
2.	A250	46.362	-72.427	20071006	20071213	
3.	A252	46.394	-72.179	20070219	20070221	VERTICAL (MEME POSITION QUE 277)
4.	A253	46.041	-72.784	20071212	20071213	
5.	A254	45.852	-72.972	20081024	20081028	
6.	A255	46.427	-72.425	20071216	20071218	VERTICAL (MEME POSITION QUE 265)
7.	A257	46.756	-71.465	20091026	20091026	
8.	A259	45.951	-72.841	20090226	20090302	
9.	A261	46.096	-72.540	20081230	20090109	
10.	A265	46.414	-72.403	20090307	20090308	HORIZONTAL (MEME POSITION QUE 255)
11.	A266	46.504	-71.866	20090308	20090309	VERTICAL (MEME POSITION QUE 276)
12.	A267	46.526	-71.777	20090707	20090721	VERTICAL (MEME POSITION QUE 275)
13.	A273	45.696	-72.985	20091112	20091113	
14.	A274	45.728	-73.035	20091020	20090509	VERTICAL (MEME POSITION QUE 281)
15.	A275	46.526	-71.777	20091219	20100127	HORIZONTAL (MEME POSITION QUE 267)
16.	A276	46.504	-71.867	20100604	20100628	HORIZONTAL (MEME POSITION QUE 266)
17.	A277	46.389	-72.175	20100630	20100704	HORIZONTAL (MEME POSITION QUE 252)
18.	A281	45.728	-73.035	20100620	20100708	HORIZONTAL (MEME POSITION QUE 274)

Tableau 5 : Liste des épicentres des séismes localisés à l'intérieur d'un rayon de 15 km d'un puits et qui sont survenus après le début de la fracturation hydraulique dans le puits donné. Les cellules colorées réfèrent aux séismes avec une phase Rg, indicative d'un foyer à moins de 5 km de profondeur.

*1 : Référence pour profondeur :
 ML2017 : Ma and Lamontagne (2017)
 L2016 : Lamontagne(2016)

No.	Date	Lat	Lon	Mag	Intervalle de jours entre séisme et fracturation	Distance (km)	Puits	Date du début fracturation	Profondeur (km) Rg; < 5 km Référence*1
1	20071124.0626	46.343	-72.315	2.1	276	11.9	A252	20070221	
2	20081011.0247	46.325	-72.542	2.9	303	9.7	A250	20071213	Rg; ML2017
	20081011.0247	46.325	-72.542	2.9	298	14.5	A255	20071218	Rg ML2017
3	20081107.0958	46.508	-72.185	2.2	625	12.7	A252	20070221	Rg ML2017
4	20081209.0052	46.340	-72.614	2.0	362	14.6	A250	20071213	
5	20090124.1844	46.179	-72.577	1.9	24	9.7	A261	20081231	
6	20090304.0614	46.379	-72.489	1.8	447	5.1	A250	20071213	
	20090304.0614	46.379	-72.489	1.8	442	7.3	A255	20071218	
7	20090410.2108	46.138	-72.872	1.7	883	5.3	A248	20061109	
	20090410.2108	46.138	-72.872	1.7	481	12.7	A253	20071216	
8	20090528.0922	46.315	-72.261	2.3	532	13.8	A250	20071213	
	20090528.0922	46.315	-72.261	2.3	827	10.8	A252	20070221	
9	20090912.1501	46.323	-72.441	2.2	639	4.5	A250	20071213	
	20090912.1501	46.323	-72.441	2.2	634	11.6	A255	20071218	
	20090912.1501	46.323	-72.441	2.2	188	10.5	A265	20090308	
10	20100130.1759	46.348	-72.391	2.7	779	3.2	A250	20071213	
	20100130.1759	46.348	-72.391	2.7	774	9.2	A255	20071218	
	20100130.1759	46.348	-72.391	2.7	328	7.4	A265	20090308	
11	20100405.0554	46.176	-72.739	2.8	1243	14.5	A248	20061109	
12	20100627.2336	46.406	-72.180	2.4	1222	1.3	A252	20070221	
13	20100708.2311	46.329	-72.344	1.7	938	7.4	A250	20071213	
	20100708.2311	46.329	-72.344	1.7	1233	14.6	A252	20070221	
	20100708.2311	46.329	-72.344	1.7	933	12.5	A255	20071218	
	20100708.2311	46.329	-72.344	1.7	487	10.5	A265	20090308	
	20100708.2311	46.329	-72.344	1.7	8	14.6	A277	20100630	
14	20100723.1724	46.584	-71.665	4.1	381	10.7	A267	20090707	23 km L2016
	20100723.1724	46.584	-71.665	4.1	200	10.7	A275	20100104	23 km

									L2016
15	20100723.1919	46.580	-71.663	2.1	381	10.6	A267	20090707	23 km L2016
	20100723.1919	46.580	-71.663	2.1	200	10.6	A275	20100104	23 km L2016
16	20110107.0408	46.362	-72.390	1.9	1121	2.8	A250	20071213	
	20110107.0408	46.362	-72.390	1.9	1116	7.7	A255	20071218	
	20110107.0408	46.362	-72.390	1.9	670	5.9	A265	20090308	
17	20110822.0040	46.333	-72.530	1.8	1348	8.5	A250	20071213	Rg
	20110822.0040	46.333	-72.530	1.8	1343	13.2	A255	20071218	Rg
	20110822.0040	46.333	-72.530	1.8	897	13.3	A265	20090308	Rg
18	20120329.2136	46.264	-72.378	1.8	1568	11.5	A250	20071213	
19	20120701.0911	46.619	-71.880	2.1	1210.0	12.8	A266	20090309	
	20120701.0911	46.619	-71.880	2.1	1090.0	13.0	A267	20090707	
	20120701.0911	46.619	-71.880	2.1	909.0	13.0	A275	20100104	
	20120701.0911	46.619	-71.880	2.1	758.0	12.8	A276	20100604	
20	20121002.0800	46.372	-72.271	2.4	1755.0	12.0	A250	20071213	
	20121002.0800	46.372	-72.271	2.4	2050.0	7.5	A252	20070221	
	20121002.0800	46.372	-72.271	2.4	1750.0	13.3	A255	20071218	
	20121002.0800	46.372	-72.271	2.4	1304.0	11.1	A265	20090308	
	20121002.0800	46.372	-72.271	2.4	825.0	7.6	A277	20100630	
21	20121229.1006	45.722	-72.822	2.6	1142.0	13.0	A273	20091113	13.5 km L2016

Significant earthquakes in or near southeastern Canada, 1663 - 2006

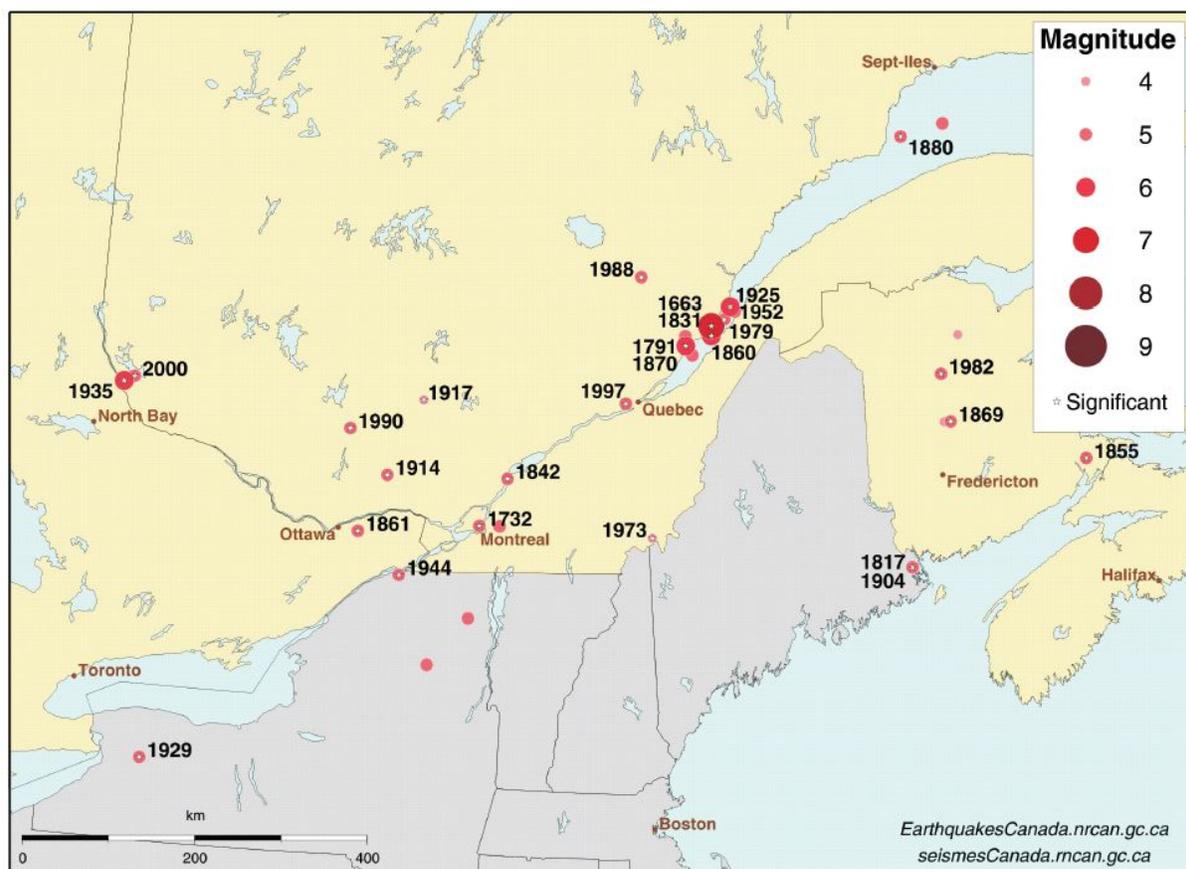


Figure 1a. Séismes significatifs de l'Est du Canada entre 1600 et 2006. Pour se qualifier comme séisme significatif, un tremblement de terre devait avoir un ou plusieurs de ces facteurs: magnitude 6,0 ou plus; séisme qui a pu causer des dommages légers ou plus forts; séisme ressenti par un nombre significatif de canadiens; évidences paléoséismologiques (Lamontagne et al., 2006).

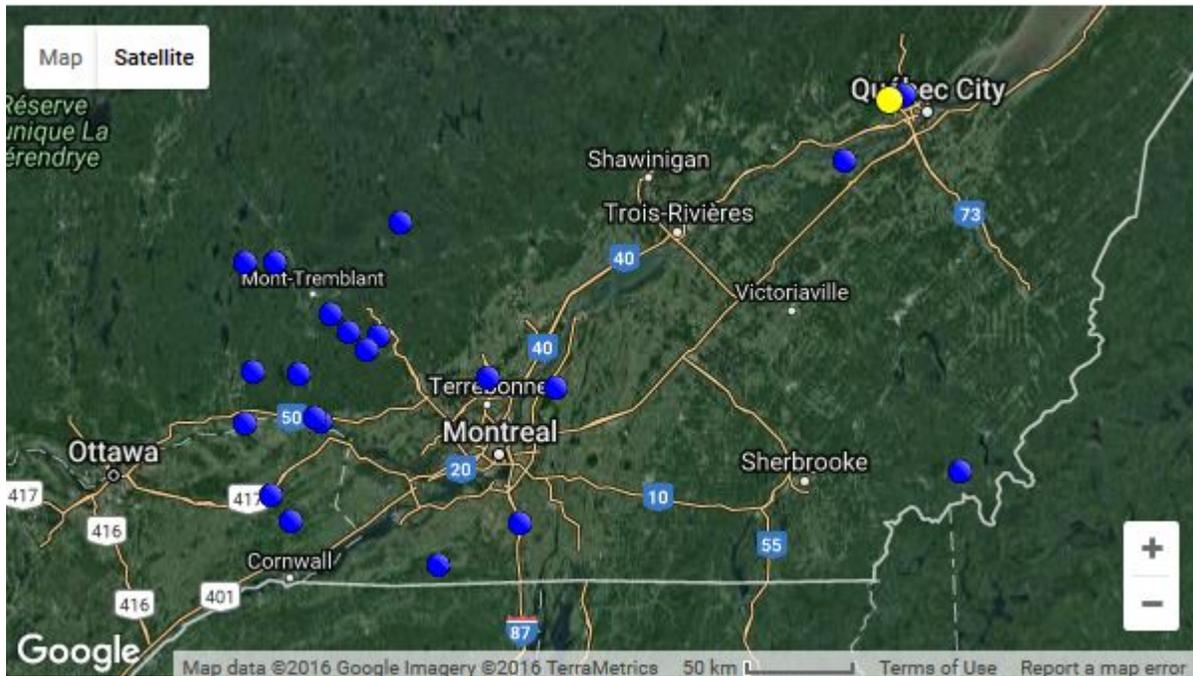
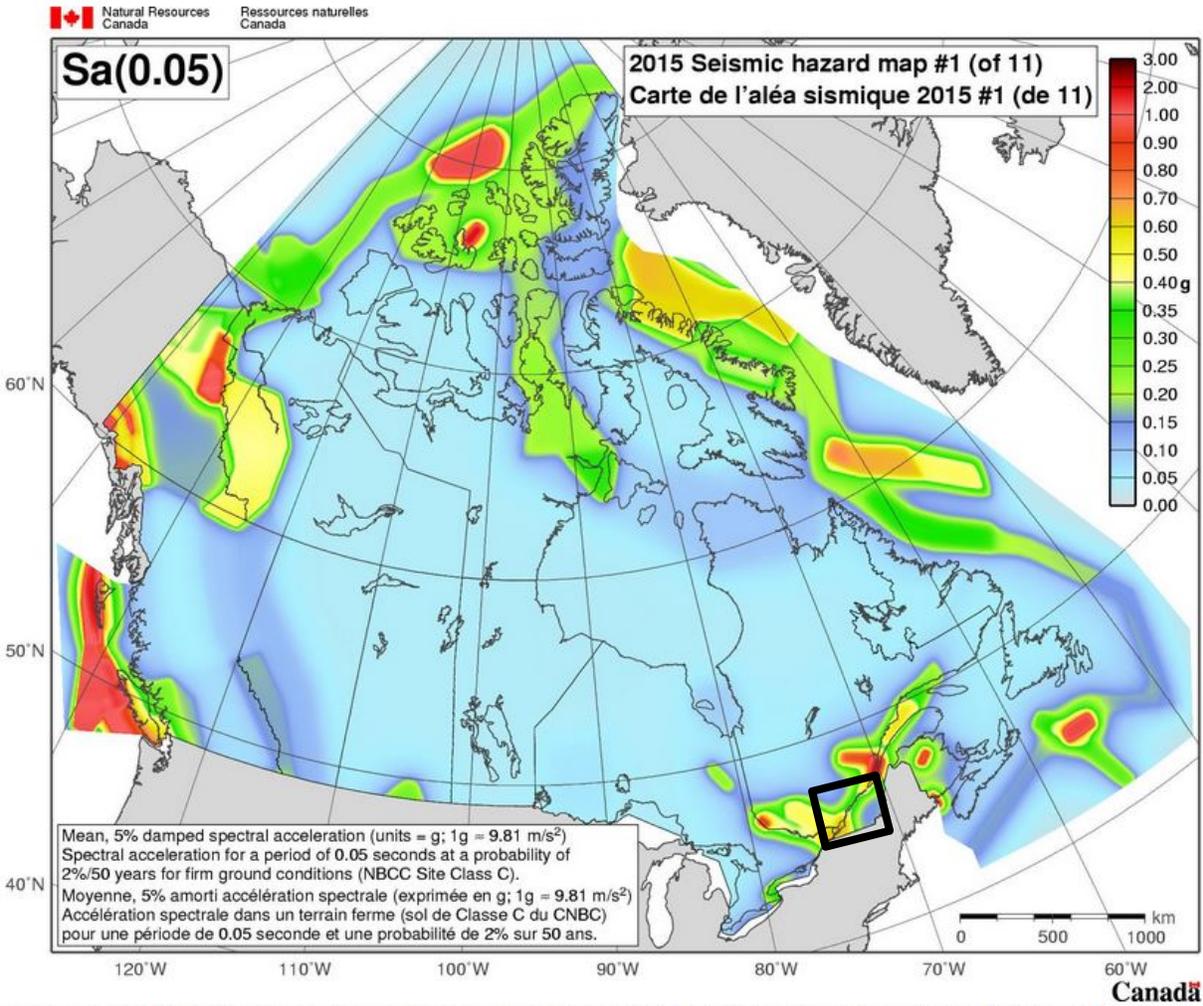


Figure 1b. Pour la période 1940-2016, tremblements de terre de magnitude (M_L et m_N) 4,0 et plus localisés entre les latitudes 45°N et 47°N et les longitudes 70°W à 75°W (une région plus grande que la région où la fracturation hydraulique s’est faite; voir Tableau 1 pour la liste complète des séismes de cette carte). Source : Base de données de séismes de la CGC (<http://www.earthquakescanada.nrcan.gc.ca/stndon/NEDB-BNDS/bull-fr.php>).



Accélération spectrale dans un terrain ferme (sol de Classe C du CNBC) pour une période de 0,05 seconde et une probabilité de 2 % sur 50 ans. L'accélération spectrale est exprimée en g.

Figure 1c.

Localisation de la zone d'étude par rapport à la carte de zonage sismique version 2015 pour une période de vibrations de 0.05 seconde. (Source :

<http://www.earthquakescanada.nrcan.gc.ca/hazard-alea/zoning-zonage/NBCC2015maps-fr.php>)



Figure 2A : Positions de tous les postes sismographiques qui ont été en opération à un moment ou à un autre entre 1980 et 2015. Voir la Figure 3 pour connaître les périodes de fonctionnement de chaque poste.

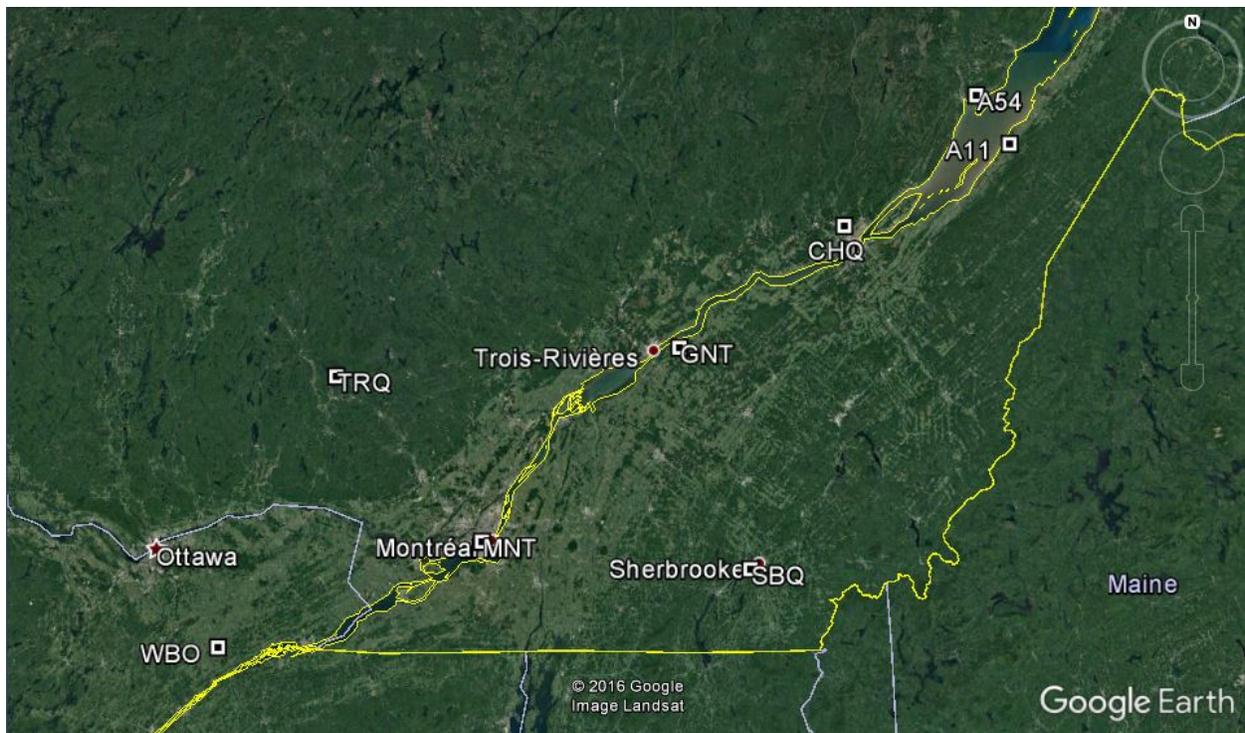


Figure 2B : Emplacements des stations du Réseau télémétrique de l'Est du Canada tel qu'il était au début des années 1980. Le poste GNT (Gentilly) a été déplacé à DPQ (St-Jean-des-Piles) vers 1988 alors que SBQ fut déplacé à MOQ (Mont-Orford) au début des années 1990. QCQ était une station analogique pendant cette période. Voir la Figure 3 pour connaître les périodes de fonctionnement de chaque poste.



Figure 2C : Emplacements des postes permanents du Réseau sismographique national canadien dans la région d'étude entre 2005 et 2015. Voir la Figure 3 pour connaître les périodes de fonctionnement de chaque poste.



Figure 2D : Emplacements des stations temporaires déployées à un moment donné ou un autre entre 2005 et 2016. Les postes BCLQ, STUQ et BECQ étaient liés en temps réel alors que les autres requéraient des visites sur le terrain, ce qui a parfois causé des pertes de données. Voir la Figure 3 pour connaître les périodes de fonctionnement de chaque poste.

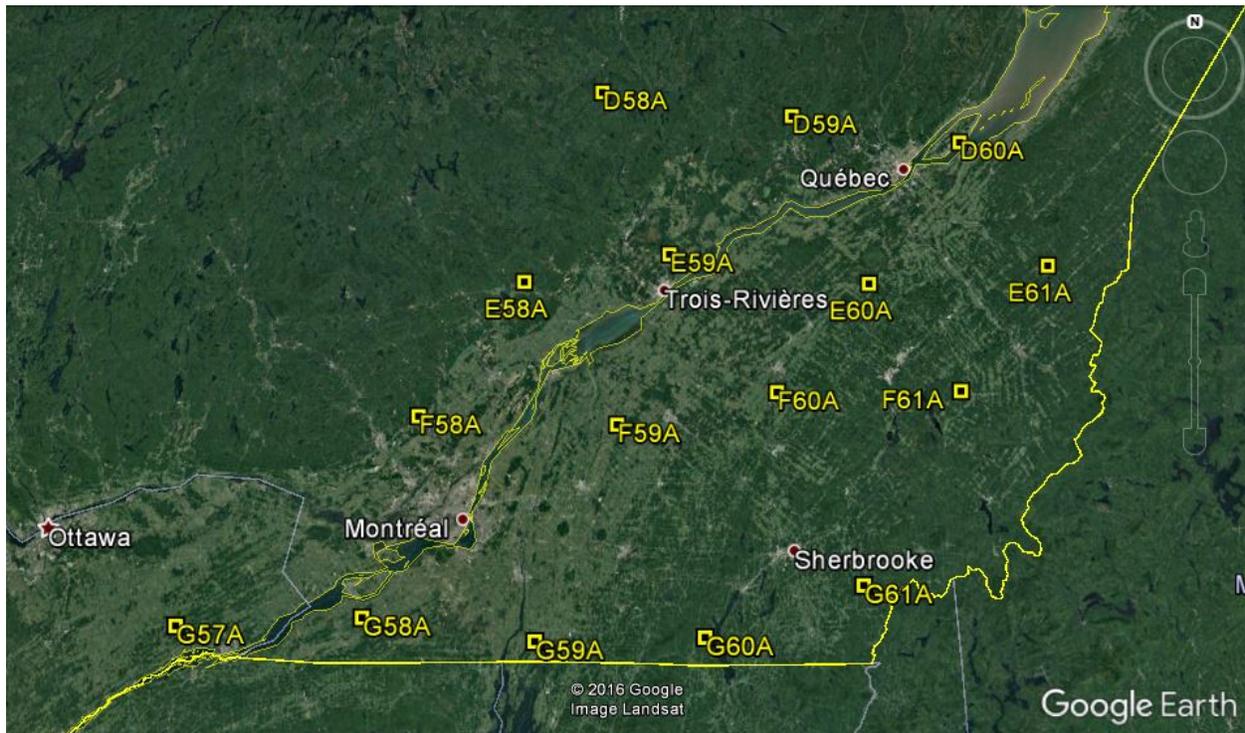


Figure 2E : Postes sismographiques du Transportable Array (USArray) qui furent en opération entre les étés de 2013 à 2015 dans la région d'intérêt. Voir la Figure 3 pour connaître les périodes de fonctionnement de chaque poste.

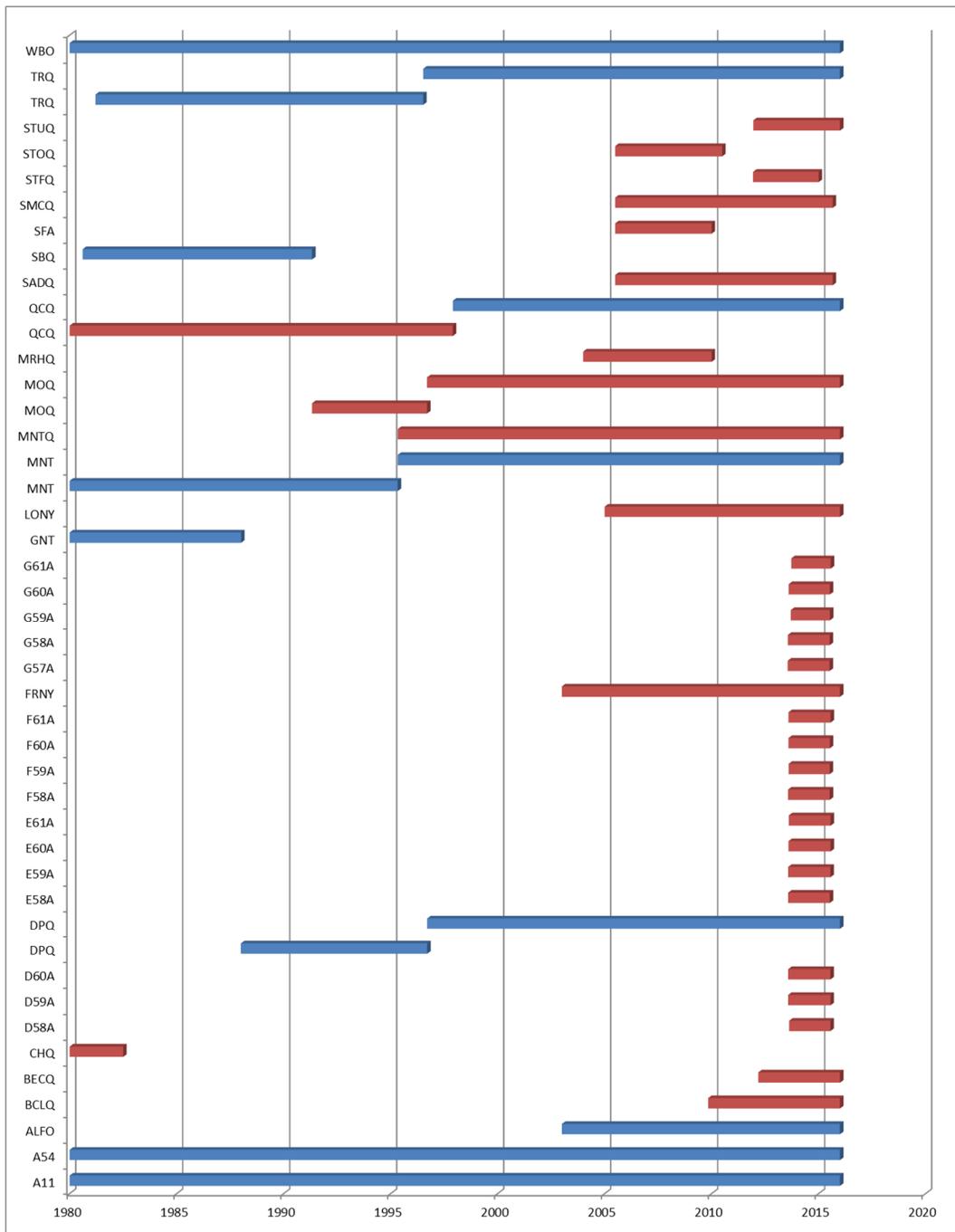


Figure 3. Période de fonctionnement de chaque poste sismographique de la VSL entre 1980 et 2016. Voir les Figures 2A à 2E pour le positionnement des stations.

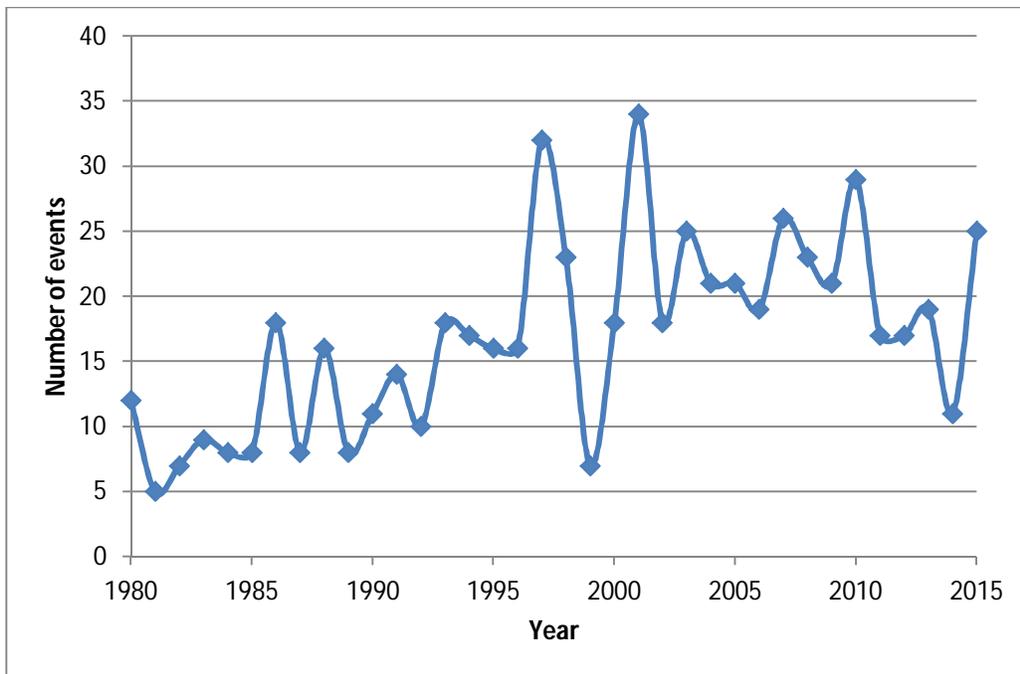


Figure 4. Nombre de séismes localisés dans la région d'intérêt entre 1980 et 2015 inclusivement. Le nombre n'est pas un indicateur non-équivoque du niveau d'activité sismique car le seuil de détection a varié au cours de la période considérée, ce qui influence le nombre de séismes détectés.

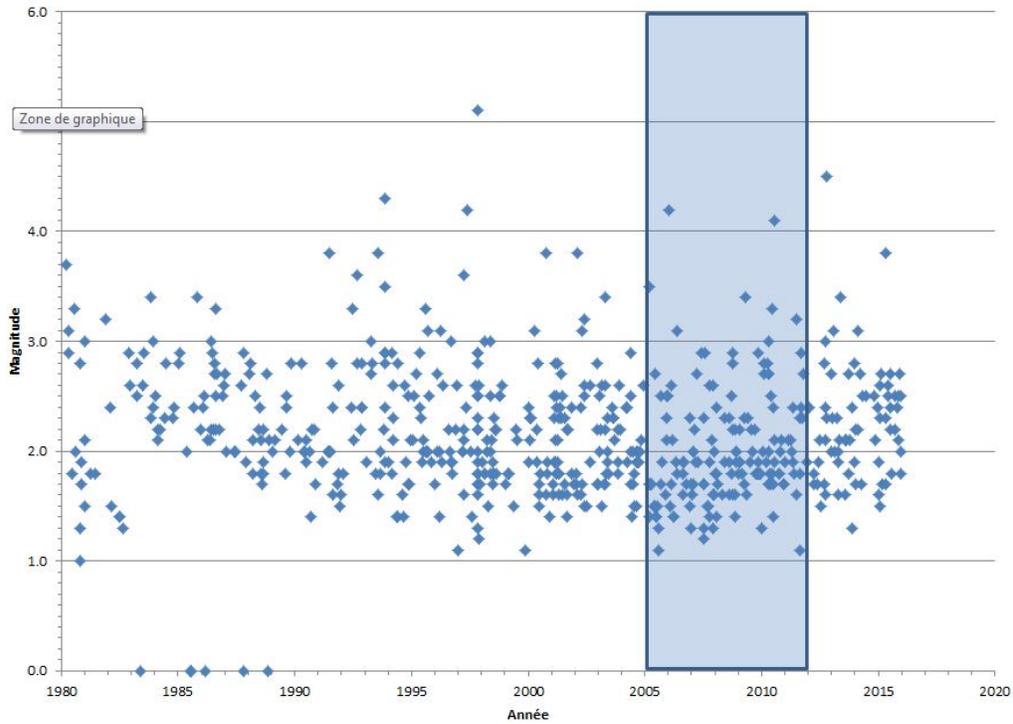


Figure 5. Magnitude des séismes localisés dans la région d'intérêt pour la période 1980 à 2015 inclusivement. Les quelques séismes de magnitude 0.0 entre 1983 et 1989 sont ceux détectés uniquement par les stations américaines. La période 2005-2012 (donc deux ans après le dernier test de fracturation hydraulique) est mise en évidence. La période 1992 à 2015 semble plus riche en séisme de magnitude m_N 3,0 et plus comparativement aux 12 années précédentes.

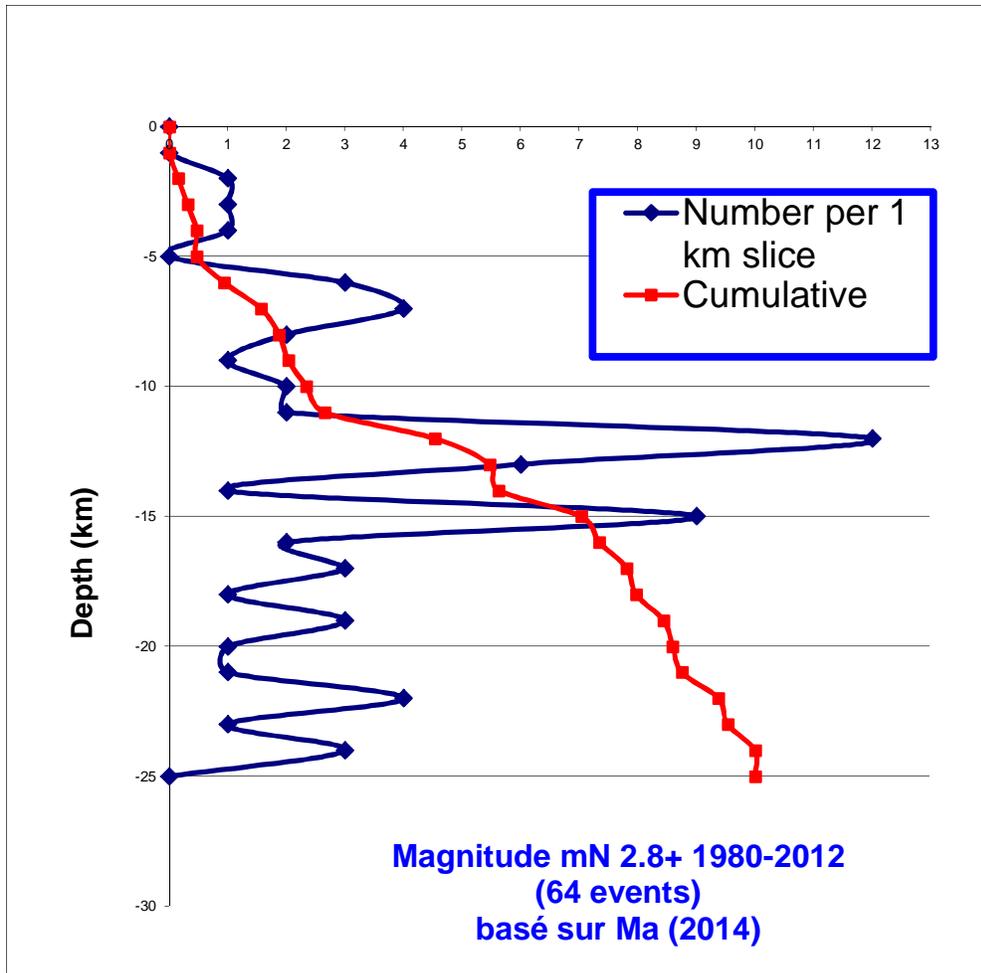


Figure 7. Distribution en profondeur des séismes par tranche de 1 km et par pourcentage cumulatif pour les foyers calculés à partir des phases crustales (Ma et Lamontagne, 2017).

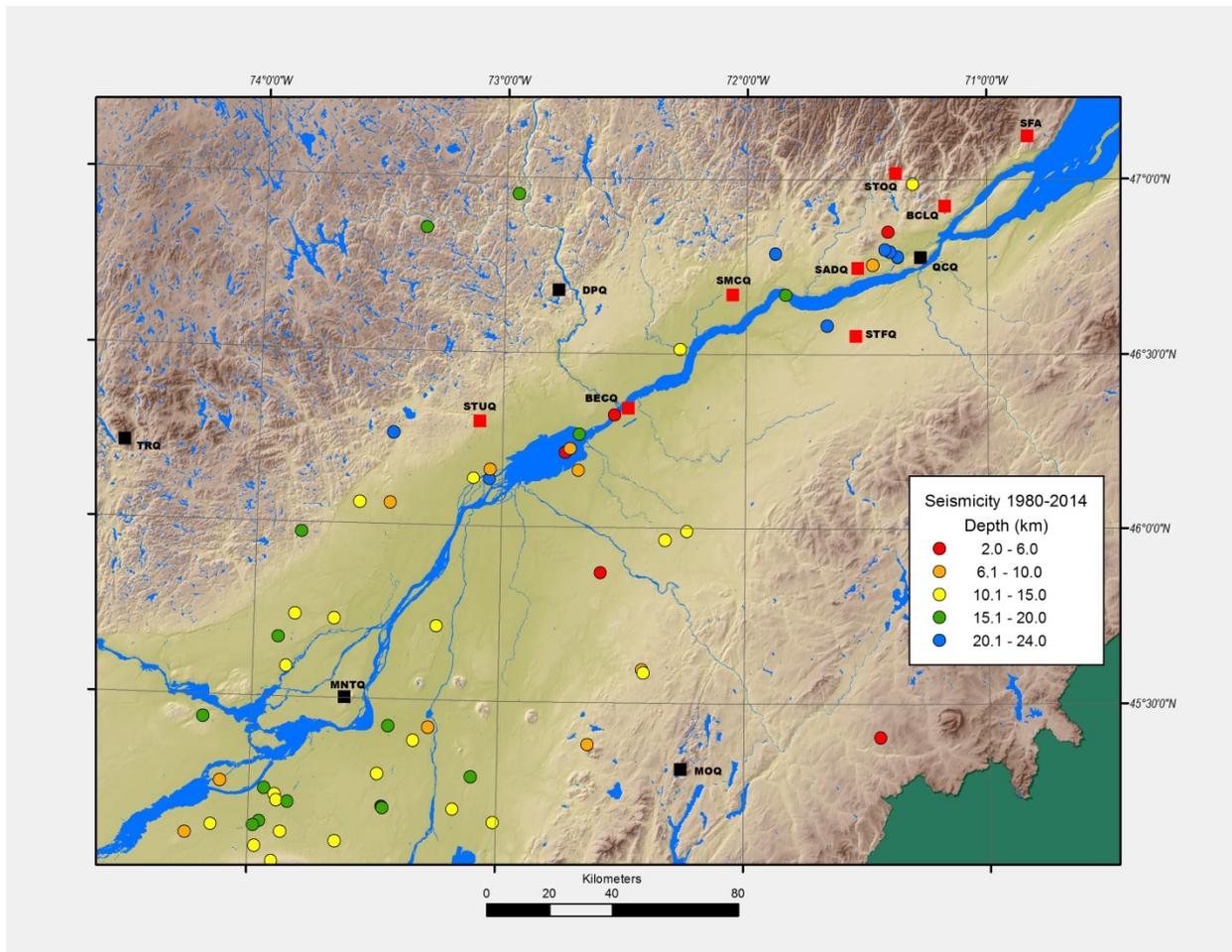


Figure 8. Épicentres des séismes de magnitude (m_N) 2,8 et plus pour lesquels on a calculé la profondeur du foyer.

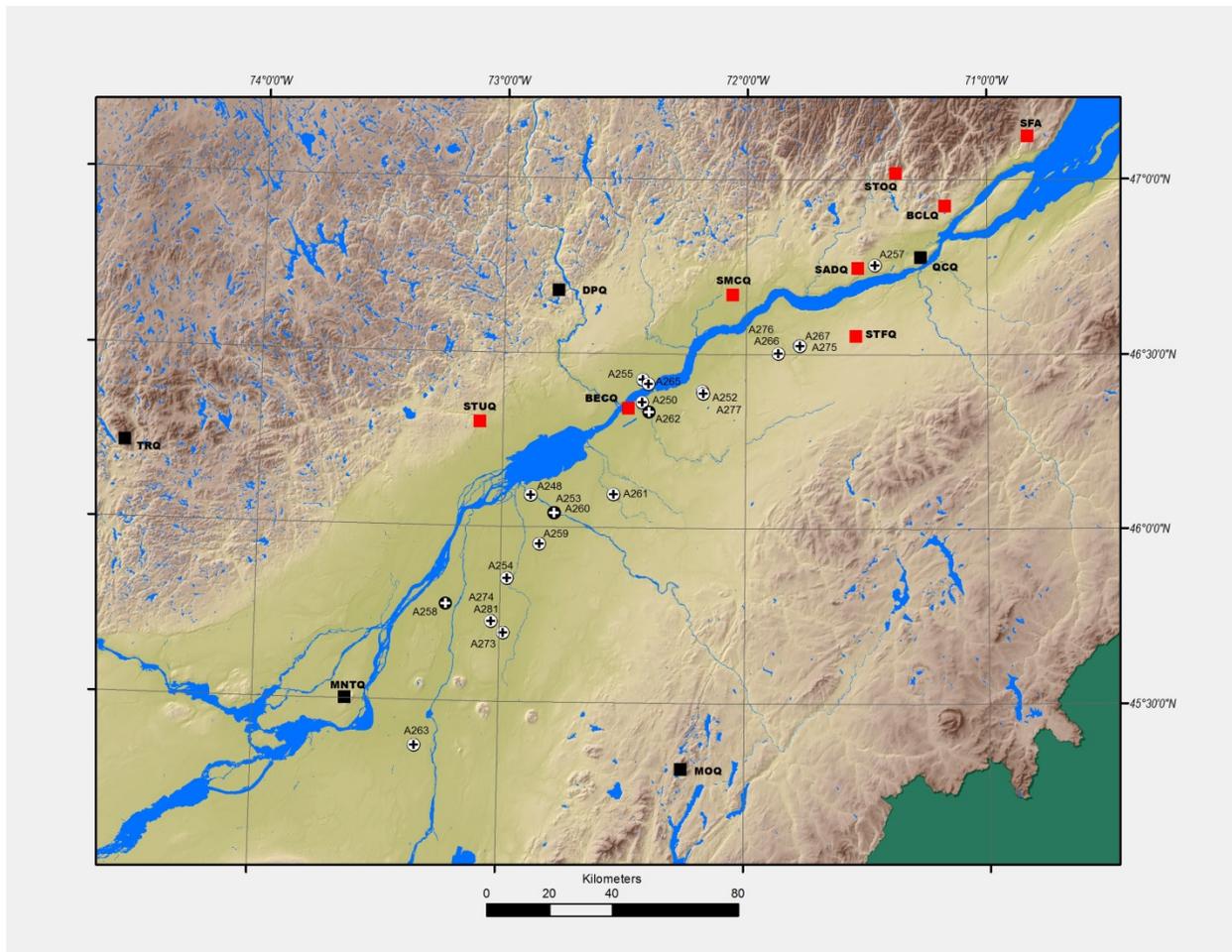


Figure 9. Topographie de la Vallée du Saint-Laurent et positions des puits dans lesquels de la fracturation hydraulique a été faite (croix noire dans cercle blanc) et ceux pour lesquels nous ne disposons pas d'information (croix blanche dans cercle noir). Les carrés noirs montrent la position des postes sismographiques permanents et les carrés rouges, celles des stations temporaires.

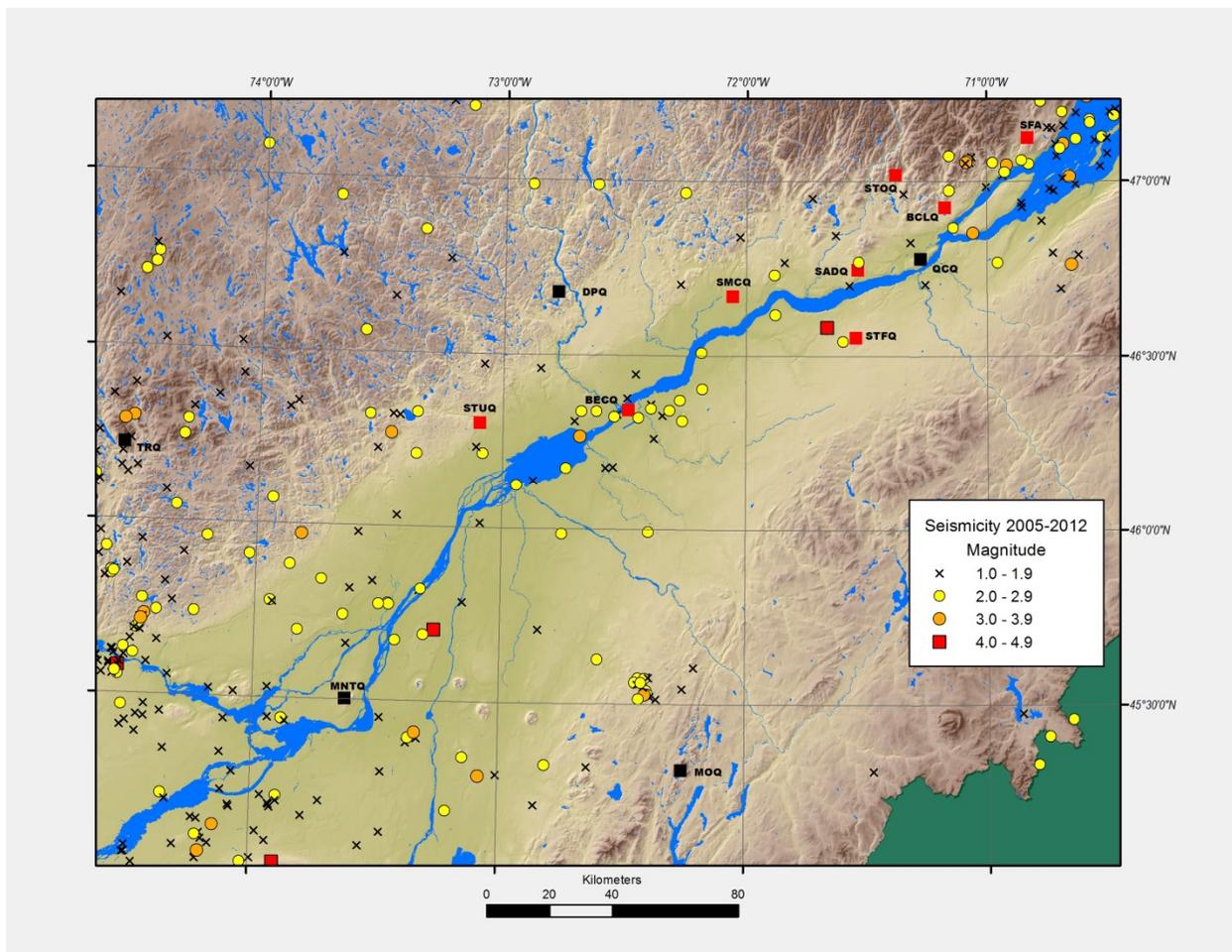


Figure 10. Topographie de la Vallée du Saint-Laurent et épacentres des séismes (cercles de couleur) enregistrés par le Réseau sismographique national canadien entre janvier 2005 et la mi-octobre 2012. Pour les épacentres, la couleur et la grandeur des cercles réfèrent à la magnitude des séismes : noir; magnitude (m_N) < 2; jaune; $2.0 \leq m_N < 3.0$; orange : $3.0 \leq m_N < 4.0$; Rouge : $4.0 \leq m_N < 5.0$; Même si quelques séismes de magnitude inférieurs à m_N 2,0 sont indiqués, on estime que la couverture est complète seulement pour les séismes de magnitude m_N 2.0 et plus. Les carrés noirs montrent la position des postes sismographiques permanents et les carrés rouges, celles des stations temporaires.

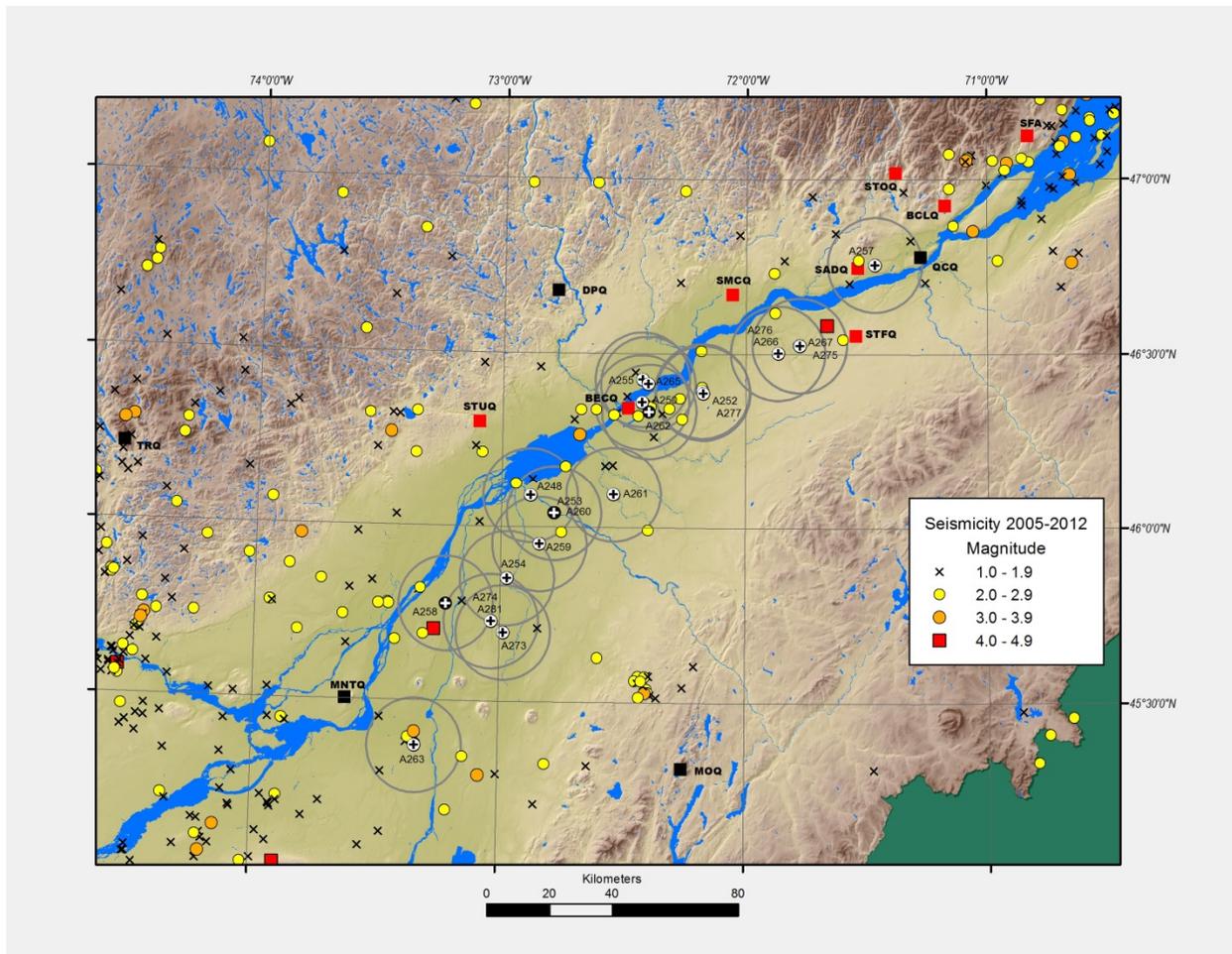


Figure 11. Fusion des cartes des figures 8 et 9. De plus, un cercle de 15 km de rayon a été dessiné autour de chacun des puits.

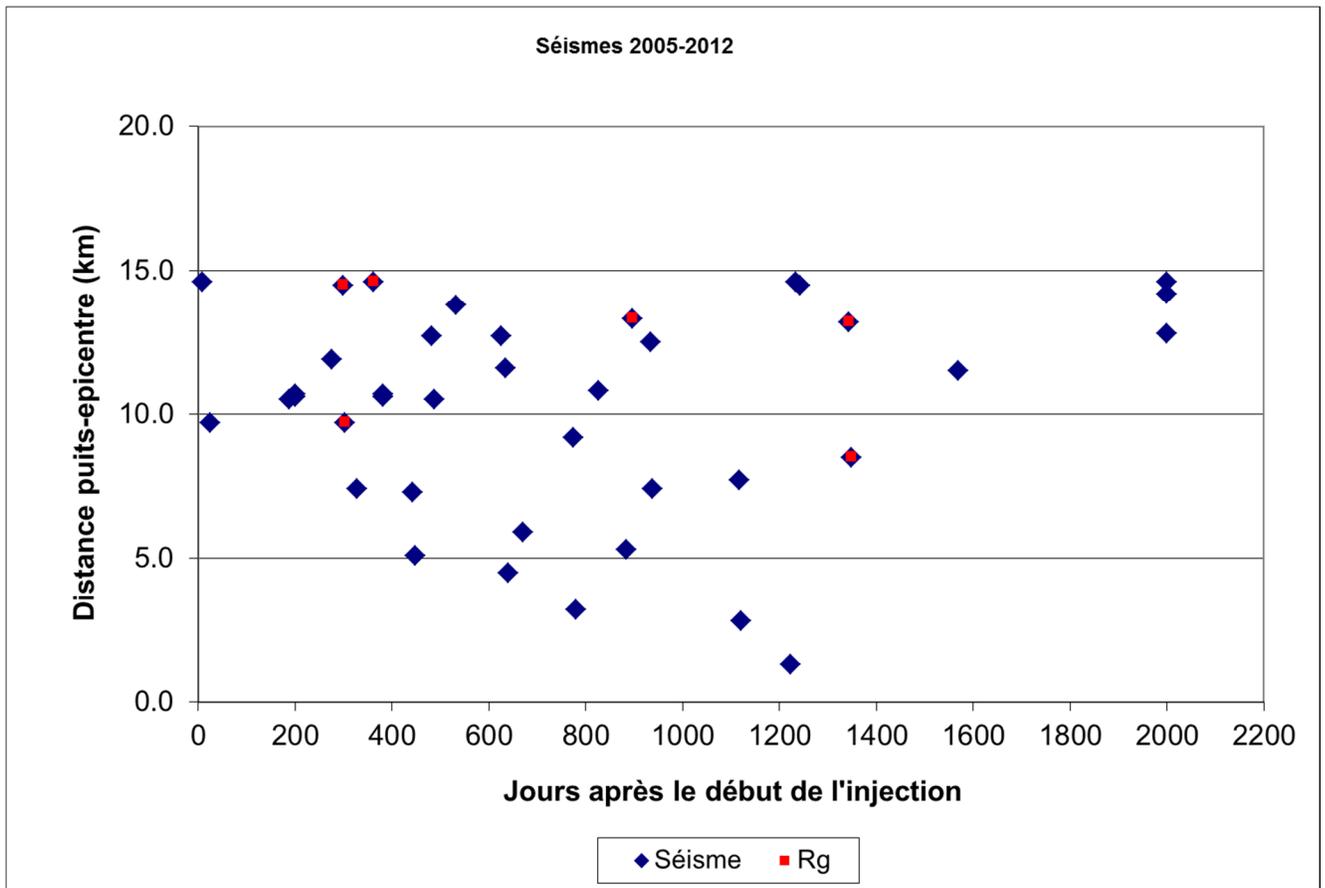


Figure 12 : Distance séparant les épacentres de séismes des puits en fonction du temps écoulé en jours entre le début de l'injection dans le puits donné et le séisme. Seuls les séismes à l'intérieur d'un rayon de 15 km du puits donné sont illustrés. Quelques séismes étaient à proximité de plusieurs puits.