

Incidence des vibrations de sautage produites par la carrière BML de St-Jean-Chrysostome sur les sols et les bâtiments du quartier des Constellations

60245887-0522511

Novembre 2015

Signatures

Rapport préparé par :  Le 27 novembre 2015
Nicolas L'Ecuyer, ing., M.Sc.A.
Ingénieur senior - Géotechnique

Rapport vérifié par :  Le 27 novembre 2015
Romeo Ciubotariu, ing., M. Ing.
Chef de service géologie, géotechnique

/hc.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Données de l'étude	2
3	Conditions géotechniques	3
4	Notions de vibrations de sautages	6
4.1	Généralités.....	6
4.2	Description d'un sautage	6
4.3	Nature des vibrations.....	7
5	Sautages du printemps 2015	9
5.1	Généralités.....	9
5.2	Plans de sautages	9
5.3	Vibrations mesurées.....	12
6	Effets des vibrations de sautage sur les bâtiments	12
6.1	Généralités.....	12
6.2	Critères de contrôle des vibrations.....	12
6.3	Effet des sautages du printemps 2015 sur les bâtiments.....	14
7	Effets des vibrations de sautage sur les sols de fondation	15
7.1	Généralités.....	15
7.2	Critères de contrôle des vibrations.....	17
7.3	Effet des sautages du printemps 2015 sur les fondations des bâtiments.....	17
8	Conclusions et recommandations	18
9	Références	19

Liste des tableaux

Tableau 1 - Données de l'étude	3
Tableau 2 - Caractéristiques des principales unités stratigraphiques.....	5
Tableau 3 - Sautages du printemps 2015 - Caractéristiques et vibrations mesurées	11
Tableau 4 - Comportements observés de sols soumis à des vibrations de sautages	16

Liste des figures

Figure 1 - Plan de localisation du quartier des Constellations et de la carrière BML.....	2
Figure 2 - Principaux éléments d'un sautage typique	6
Figure 3 - Principaux types d'ondes	7
Figure 4 - Principales caractéristiques d'une onde	8
Figure 5 - Localisation approximative des sautages du printemps 2015	9
Figure 6 - Coupe A (approximative / positionnée sur la figure 5).....	10
Figure 7 - Limites de vibrations pour éviter l'endommagement des bâtiments résidentiels.....	14
Figure 8 - Vibrations mesurées et limites de vibration proposées.	15

Liste des annexes

Annexe A - Documents fournis

Annexe B - Planches sélectionnées du rapport d'AECOM de 2010

1 Introduction

Le projet domiciliaire des Constellations se trouve dans le secteur Saint-Jean-Chrysostome de la ville de Lévis, tout juste au sud de la carrière BML, tel que montré à la figure 1. Il occupe un espace plus ou moins carré, de 500 m par 500 m, en faible pente vers le nord. Près de 300 maisons unifamiliales y ont été construites entre les années 2002 et 2010. Les conditions géotechniques du site ont été caractérisées de façon détaillée par AECOM en 2010 (réf. 1).

Les vibrations associées à la reprise des activités de sautage à la carrière BML en avril 2015, après une période d'arrêt d'environ 8 ans, suscitent des inquiétudes quant à leur possible influence sur le comportement des fondations des maisons du quartier des Constellations.

En réponse à ces inquiétudes, la Ville de Lévis a mandaté AECOM afin de déterminer si les activités de sautage de la carrière BML sont susceptibles d'avoir un quelconque impact sur les terrains et bâtiments du quartier des Constellations. En particulier, le mandat consiste à identifier la présence ou non d'un quelconque risque de tassement des sols sous l'effet des vibrations induites par les activités de sautage de la carrière, à décrire les différents paramètres pouvant affecter les sols ainsi que les bâtiments et à recommander, s'il y avait lieu, des mesures à imposer pour diminuer les impacts.

Ce rapport présente l'étude réalisée afin de remplir ce mandat. Il comporte 7 chapitres principaux, qui énumèrent les données de l'étude, résumant les conditions géotechniques du site, donnent des notions de vibrations de sautage, résumant les sautages du printemps 2015, décrivent les effets des vibrations de sautage sur les bâtiments, puis sur leurs fondations, présentent les principales conclusions et formulent des recommandations.



Figure 1 - Plan de localisation du quartier des Constellations et de la carrière BML

2 Données de l'étude

L'étude a été effectuée sur la base des conditions géotechniques décrites dans le rapport préparé par AECOM en 2010 (réf. 1) et des documents décrits au tableau 1, fournis par la Ville de Lévis spécifiquement pour l'étude. Ces derniers sont reproduits à l'annexe A.

Tableau 1 - Données de l'étude

Description	Provenance	Remarques
Plan de localisation approximative des sautages du printemps 2015.	GéniArp	Photographie aérienne prise à l'aide d'un drone.
Sautage du 9 avril 2015 Rapport de sautage; Mesure de vibrations : <ul style="list-style-type: none"> • 1117 de la Licorne; • 1137 de la Licorne; • 1153 de la Licorne. 	Les Forages JRD Les Forages JRD Les Forages JRD Les Forages JRD	-
Sautage du 14 avril 2015 Rapport de sautage; Mesure de vibrations : <ul style="list-style-type: none"> • 1117 de la Licorne; • 1137 de la Licorne; • 1153 de la Licorne. 	Les Forages JRD Les Forages JRD Les Forages JRD Les Forages JRD	-
Sautage du 7 mai 2015 Rapport de sautage; Mesure de vibrations : <ul style="list-style-type: none"> • 1137 de la Licorne; • 1153 de la Licorne. 	Les Forages JRD Les Forages JRD Les Forages JRD	Charge max. par délai n/d
Sautage du 19 mai 2015 Rapport de sautage; Mesure de vibrations : <ul style="list-style-type: none"> • 1137 de la Licorne; • 1153 de la Licorne; • 1157 de la Licorne. Photographies des séismographes installés.	Les Forages JRD Les Forages JRD Les Forages JRD Les Forages JRD Les Forages JRD	-
Sautage du 1er juin 2015 Rapport de sautage; Mesure de vibrations : <ul style="list-style-type: none"> • 1117 de la Licorne; • 1137 de la Licorne; • 1139 de la Licorne; • 1157 de la Licorne; • 1157 de la Licorne. 	Les Forages JRD Les Forages JRD Les Forages JRD LVM (pour la Ville de Lévis) LVM (pour la Ville de Lévis) Les Forages JRD	Délais n/d

3 Conditions géotechniques

Les conditions géotechniques de la zone à l'étude sont résumées aux paragraphes suivants. Elles sont décrites en détails dans le rapport préparé en 2010 par AECOM (réf. 1), sur la base de 27 forages et 14 sondages au piézocône effectués par AECOM, ainsi que de 31 forages effectués pour des propriétaires individuels. Certaines des planches de ce rapport sont reproduites à l'annexe B, pour référence. La position des sondages est montrée à la planche 1, tandis que la stratigraphie est illustrée aux planches 2 à 5.

La stratigraphie du site est très variable, mais comporte généralement la séquence suivante, de la surface à la base :

- Remblai;
- Dépôt granulaire supérieur;
- Dépôt argileux;
- Dépôt granulaire inférieur;
- Dépôt de till;
- Socle rocheux.

L'épaisseur, les profondeurs auxquelles elles sont rencontrées et les caractéristiques de chacune de ces unités stratigraphiques, sont données au tableau 2. La sensibilité relative des sols aux vibrations est abordée au chapitre suivant.

Selon les piézomètres installés à différents endroits sur le site, la nappe phréatique se trouve généralement entre 1 et 2 m de profondeur.

Tableau 2 - Caractéristiques des principales unités stratigraphiques

Unité	Épaisseur (m)	Rencontrée entre les profondeurs (m)	Description des sols identifiés	Sensibilité relative aux vibrations
REMBLAI	0 - 3	0 - 3	Silt argileux avec un peu de sable de consistance molle à ferme.	moyenne
			Sable de compacité moyenne.	moyenne
			Mélange de sable et de silt de compacité moyenne.	moyenne
DÉPÔT GRANULAIRE SUPÉRIEUR	0 - 12	0 - 12	Sable avec un peu de silt de compacité faible ou moyenne.	élevée
			Silt et sable de compacité faible ou moyenne.	élevée
DÉPÔT ARGILEUX	0 - 10	1 - 16	Argile silteuse à silt argileux de consistance très molle, de faible plasticité.	moyenne
			Argile silteuse à silt argileux de consistance ferme ou raide, de faible plasticité.	faible
DÉPÔT GRANULAIRE INFÉRIEUR	0 - 6	4 - 16	Sable avec un peu de silt, de compacité faible.	élevé
			Silt avec un peu d'argile, de consistance ferme.	faible
DÉPÔT DE TILL	1 - 12	6 - 26	Mélange variable de gravier, de sable, de silt et d'argile, de compacité moyenne.	faible
			Mélange variable de gravier, de sable, de silt et d'argile, de compacité élevée ou très élevée.	nulle
SOCLE ROCHEUX	-	14 - 26	Shale rouge ou grès.	nulle

4 Notions de vibrations de sautages

4.1 Généralités

Ce chapitre fournit des notions de base concernant les sautages et les vibrations qu'ils génèrent, requises afin de bien comprendre les phénomènes impliqués, ainsi que l'analyse et les recommandations présentées aux chapitres suivants.

4.2 Description d'un sautage

La figure 2 illustre les principaux éléments d'un sautage typique de carrière. Pour préparer un sautage de carrière, on fore d'abord des trous d'environ 75 à 200 mm de diamètre dans le roc, disposés selon un patron préétabli. Un explosif et un détonateur sont ensuite placés à l'intérieur de chaque trou. La partie restante des trous (collet) est comblée de pierre concassée. Tous les détonateurs sont reliés à une même boîte de contrôle (explodeur) au moyen de câbles électriques. Au moment du sautage, les explosifs contenus dans chacun des trous sont détonés suivant une séquence de mise à feu précise (pas simultanément) et un intervalle de l'ordre de quelques millièmes de secondes.

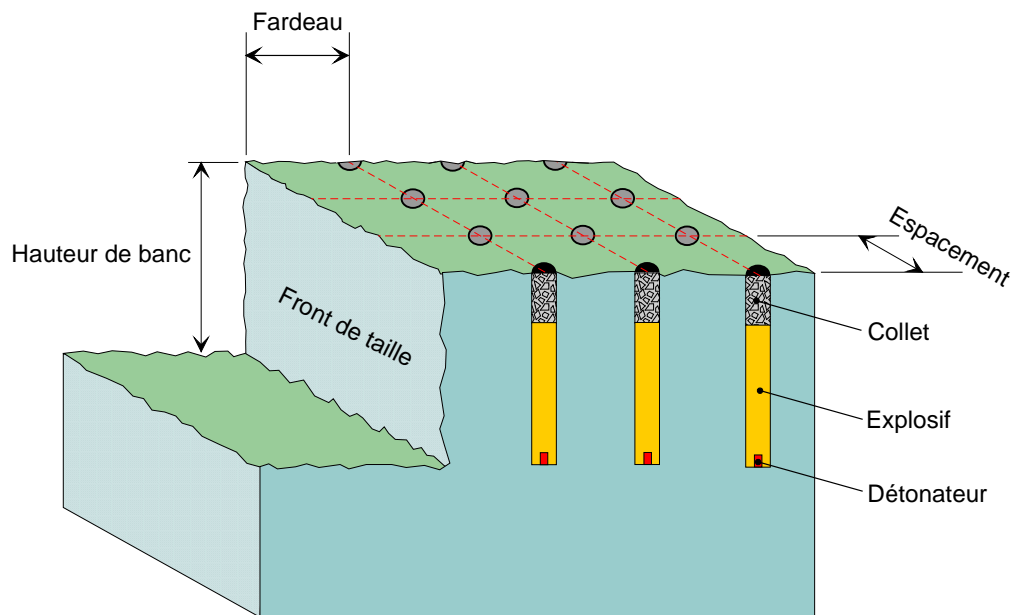


Figure 2 - Principaux éléments d'un sautage typique

Les principaux paramètres qui décrivent un sautage et qui ont une influence sur les vibrations qu'il générera, sont l'intervalle de temps ou délai séparant les charges successives, la charge maximale d'explosif par délai, la hauteur de banc, l'espacement des trous, le fardeau et l'orientation du front de taille. La charge maximale par délai est la masse maximale d'explosif détonée simultanément, c'est-à-dire dans le même intervalle de temps. Le fardeau est la distance entre le front de taille et la première rangée de trous.

D'une façon générale, une réduction du délai ou une augmentation de la charge par délai, du fardeau ou de l'espacement des trous, auront toutes pour effet d'augmenter les vibrations engendrées par un sautage. De plus, les vibrations maximales sont susceptibles de se produire dans une orientation perpendiculaire à celle du front de taille, dans le sens opposé à celui vers lequel est dégagé le roc brisé. Finalement, l'utilisation de détonateurs

électroniques, plus précis que les autres types, permet d'éviter la superposition de charges et l'augmentation des vibrations associées.

4.3 Nature des vibrations

Au moment de leur détonation, chacune des charges d'explosif génère une impulsion considérable. Cette impulsion fracture le roc situé dans un rayon de quelques mètres, absorbant une part importante de l'énergie libérée. Le reste de l'énergie se propage au-delà de cette zone fracturée, sous forme d'ondes élastiques dans l'air, l'eau, le roc et les sols. On appelle communément bruit, les ondes de haute fréquence se déplaçant dans l'air et vibrations, les ondes se déplaçant dans les solides.

Il existe plusieurs types d'ondes, qui diffèrent selon leur mode de propagation, c'est-à-dire leur façon de perturber le matériau qu'elles traversent. Les principaux types d'ondes sont illustrés à la figure 3. Il s'agit des ondes de compression, des ondes de cisaillement et des ondes de Rayleigh.

Les ondes de compression se propagent en comprimant et en dilatant alternativement le matériau parallèlement leur direction de propagation. Elles peuvent se propager dans l'air, les fluides et les solides.

Les ondes de cisaillement se propagent en déformant le matériau perpendiculairement à leur direction de propagation, c'est-à-dire en le cisillant, comme leur nom l'indique.

Finalement, les ondes de Rayleigh déforment le matériau dans les deux directions, mais sont restreintes à la surface du sol ou du roc.

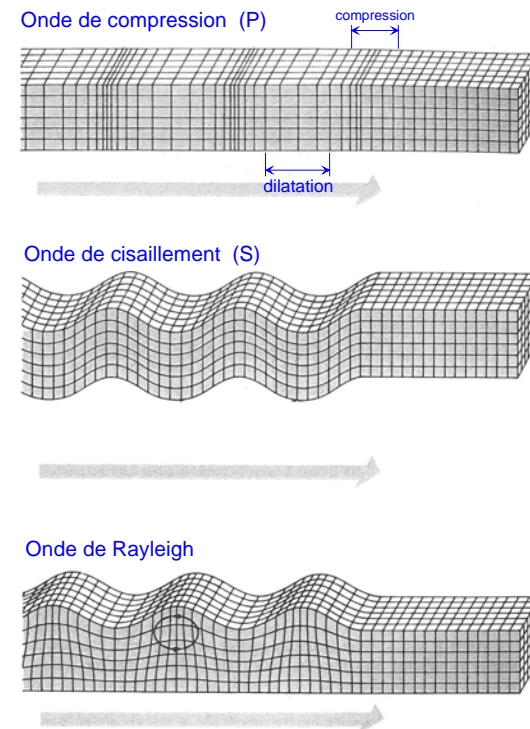


Figure 3 - Principaux types d'ondes

Les différentes caractéristiques qui décrivent une onde sont illustrées à la figure 4 et décrites ci-dessous :

- Longueur d'onde (λ) : longueur d'un cycle complet de l'onde dans l'espace;
- Période (T) : durée d'un cycle complet de l'onde;
- Fréquence (f) : nombre de cycles complets que l'onde exécute en une seconde et s'exprime en Hertz;
- Amplitude (A) : déplacement maximal des particules d'un matériau que produit l'onde en le traversant;
- Vitesse particulaire résultante maximale (PVS) : vitesse maximale à laquelle se déplacent les particules d'un matériau au passage de l'onde (« peak vector sum »);
- Vitesse de propagation de l'onde (C) : vitesse à laquelle l'onde chemine dans le matériau;
- Déformation maximale (γ_{max}) : distorsion maximale du matériau causée par le passage de l'onde.

Certains de ces paramètres sont reliés par les relations suivantes :

$$\lambda = C/f$$
$$f = 1/T$$

Les ondes émanant d'un sautage s'atténuent progressivement en s'éloignant de la source. L'atténuation dépend de plusieurs variables, dont la nature des matériaux traversés et les caractéristiques des ondes. Elle est beaucoup plus prononcée dans les sols que dans le roc.

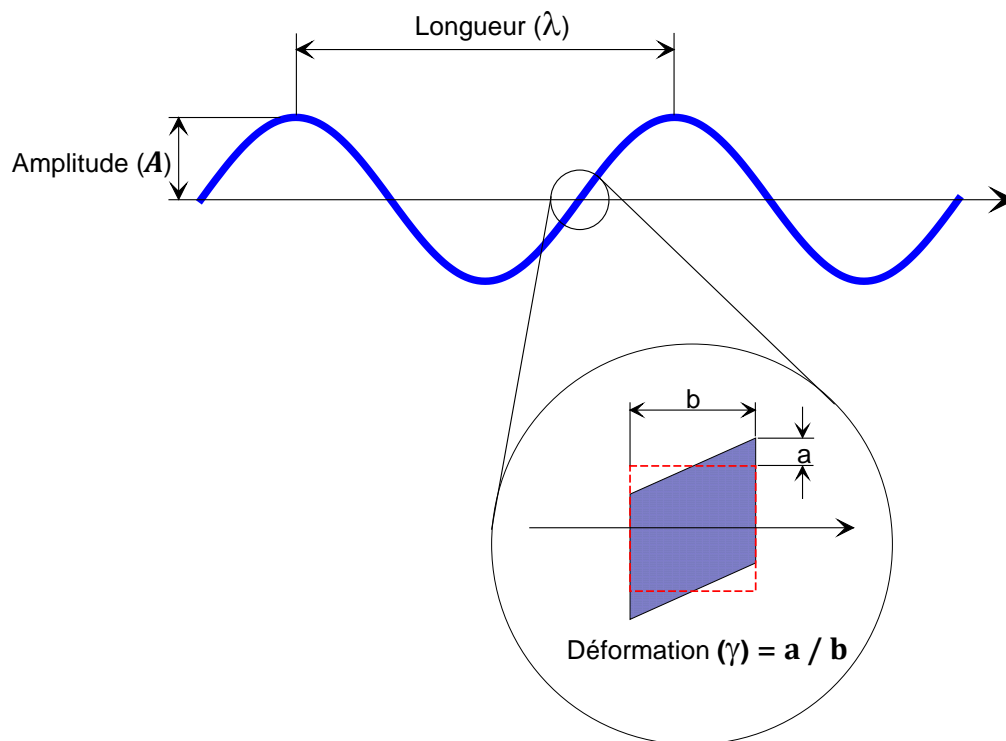


Figure 4 - Principales caractéristiques d'une onde

5 Sautages du printemps 2015

5.1 Généralités

Des données ont été fournies concernant cinq sautages, réalisés les 9 et 14 avril, 7 et 19 mai et 1^{er} juin 2015. Ce chapitre décrit ces sautages ainsi que les mesures de vibrations réalisées.

5.2 Plans de sautages

Les sautages ont été réalisés par l'entrepreneur Les Forages JRD. La figure 5 montre la position approximative des sautages effectués au printemps 2015 à la carrière BML, tandis que la figure 6 montre la coupe A, localisée à la figure 5. Cette coupe est approximative et a été obtenue du modèle topographique de Google Earth, combiné aux données géotechniques disponibles. Les bâtiments résidentiels du quartier des Constellations les plus près se trouvent à environ 500 m de distance, le long de la portion sud-ouest de la rue de la Licorne.

Les données disponibles concernant les cinq sautages sont résumées au tableau 3. La hauteur de banc est d'environ 10 m. Chaque sautage couvre une surface allant de 32 m x 22 m à 40 m x 39 m. La charge maximale par délai varie de 86 à 140 kg.

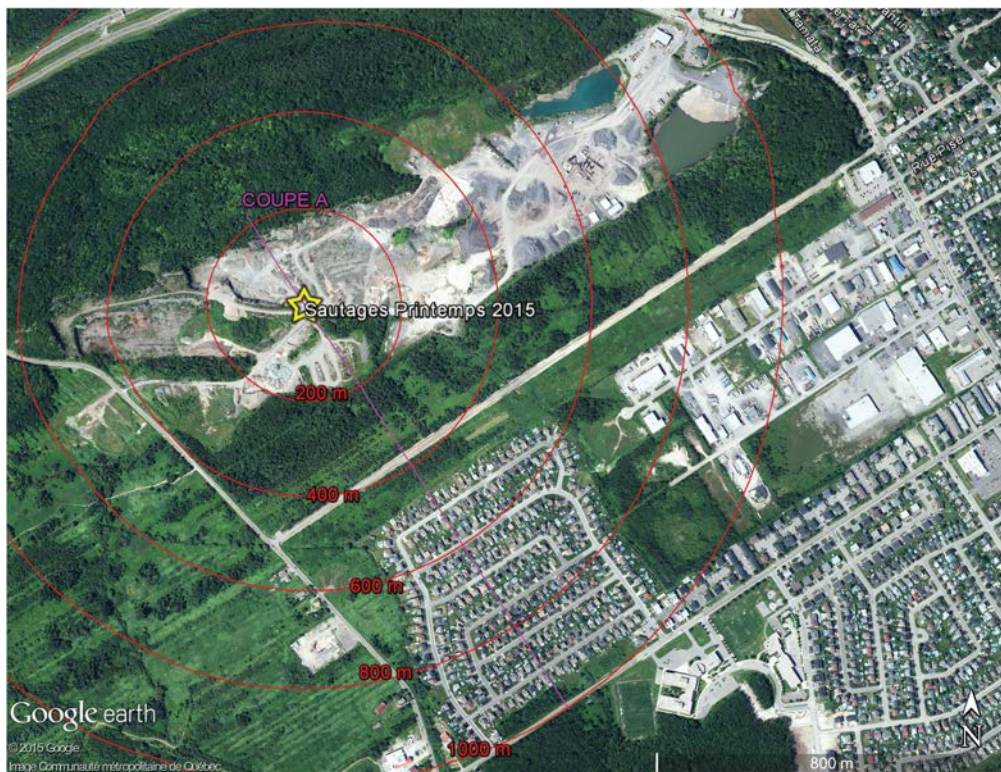


Figure 5 - Localisation approximative des sautages du printemps 2015

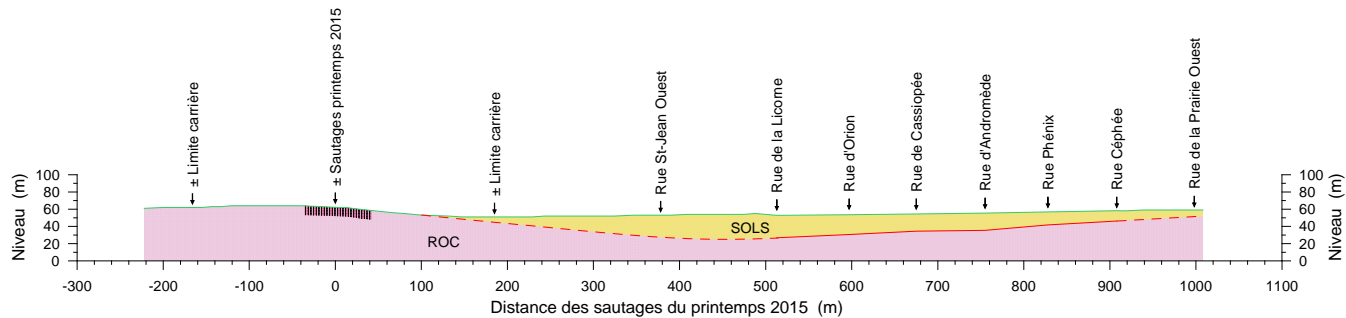


Figure 6 - Coupe A (approximative / positionnée sur la figure 5).

Tableau 3 - Sautages du printemps 2015 - Caractéristiques et vibrations mesurées

SAUTAGE						VIBRATIONS						
Date	Nombre de Trous	Fardeau (m)	Esp. (m)	Prof. moy. (m)	Charge max/délai (kg)	Par	Adresse	Distance ± (m)	Sol		Air	
									PVS (mm/s)	f (Hz)	Surpres. (dBL)	f (Hz)
9 avril 2015	104	3,2	3,4	10,4	140	JRD	1117 Licorne	568	< 2,0	-	-	-
							1137 Licorne	502	3,7	19	98	171
							1153 Licorne	496	< 2,0	-	-	-
14 avril 2015	45	4,0	4,3	8,5	108	JRD	1117 Licorne	568	< 2,0	-	-	-
							1137 Licorne	502	< 2,0	-	-	-
							1153 Licorne	496	< 2,0	-	-	-
7 mai 2015	90	4,0	4,3	9,1	n/d	JRD	1137 Licorne	568	4,3	15	98	6
							1153 Licorne	496	2,7	10	99	24
19 mai 2015	90	4,0	4,3	8,8	112	JRD	1137 Licorne	502	< 2,0	-	-	-
							1153 Licorne	496	< 2,0	-	-	-
							1157 Licorne	499	< 2,0	-	-	-
1 ^{er} juin 2015	77	4,0	4,3	9,1	86	JRD	1117 Licorne	568	1,9	13	n/d	n/d
							1137 Licorne	502	2,6	14	n/d	n/d
							1157 Licorne	499	1,7	11	99	1
						LVM	1139 Licorne	500	1,2	± 17	121	15
							1157 Licorne	499	1,7	± 13	98	6

5.3 Vibrations mesurées

L'entrepreneur en sautage (Les Forages JRD) a mesuré les vibrations engendrées par chacun des sautages à l'aide de deux ou trois séismographes. Les séismographes ont été installés tour-à-tour aux 1117, 1137, 1153 et 1157, rue de la Licorne. Pour certains sautages, le seuil de déclenchement des séismographes était fixé à 2,00 mm/s (*PVS*) et n'a pas été atteint, de sorte qu'aucune mesure de vibration n'est disponible.

Des mesures de vibrations ont également été réalisées par LVM pour le compte de la Ville de Lévis, pour le sautage du 1^{er} juin 2015. Les séismographes ont été installés aux 1139 et 1157, rue de la Licorne.

Les mesures sont résumées au tableau 3. La vitesse particulière résultante maximale (*PVS*) varie de 1,2 à 4,3 mm/s et se produit à une fréquence située entre 10 à 19 Hz. Ces valeurs sont compatibles avec les charges d'explosif, la distance et l'épaisse couche de mort-terrain présente sur le site. La surpression d'air maximale varie de 98 à 120 dBL.

6 Effets des vibrations de sautage sur les bâtiments

6.1 Généralités

Ce chapitre résume les principaux critères de contrôle des vibrations de sautage utilisés afin d'éviter l'endommagement aux bâtiments résidentiels, propose des critères adaptés au quartier des Constellations, puis évalue l'effet probable des sautages du printemps 2015 sur les bâtiments.

6.2 Critères de contrôle des vibrations

Les bâtiments résidentiels sont susceptibles d'être endommagés par des vibrations de sautages se propageant dans le sol ou le roc, si ces dernières sont suffisamment intenses. En principe, un bâtiment pourrait aussi être endommagé par les ondes se propageant dans l'air. Cependant, il n'existe aucun cas documenté de dommage à une structure par les surpressions dans l'air (« airblast ») causées par un sautage de carrière (réf. 4). En effet, ce type de sautage n'est pas susceptible de générer des surpressions d'air s'approchant du seuil de 140 dBL au-delà duquel des dommages structuraux ont une probabilité significative de se produire (réf. 5).

Au Québec, le Règlement sur les carrières et sablières (réf. 6) impose des limites aux vibrations de sautages de carrières. Selon l'article 34 de ce règlement, la vitesse maximale des particules (*PVS*) ne doit pas dépasser 40 mm/s à moins de 30 m de toute habitation. Cette limite n'est pas jugée suffisante pour éviter tout endommagement aux bâtiments résidentiels, en particulier pour des fréquences inférieures à 30 Hz.

Différents organismes ont élaboré des critères fixant des limites sécuritaires de vibrations afin d'éviter l'endommagement de bâtiments. Les critères les plus connus sont présentés dans le rapport RI-8507 du US Bureau of Mines (réf. 7), la norme anglaise BS-7385 (réf. 2) et la norme allemande DIN-4150 (réf. 8). Ces critères sont essentiellement empiriques, c'est-à-dire qu'ils sont issus de l'analyse du comportement de bâtiments soumis à des vibrations. Les trois organismes expriment les limites de vibrations en termes de vitesse particulière maximale et de fréquence, reconnaissant que ce sont ces propriétés des vibrations qui corréleront le mieux avec les dommages produits aux bâtiments. Les limites proposées sont comparées à la figure 7. Elles correspondent à un seuil d'endommagement, en-dessous duquel des dommages, même d'ordre cosmétique, sont improbables. La norme BS-7385 (réf. 2) indique également des seuils pour des dommages plus importants et définit les trois degrés d'endommagement suivants :

Dommages cosmétiques : Formation de fissures minces dans les panneaux en gypse ou les surfaces recouvertes de plâtre ou progression de fissures existantes. Formation de fissures minces dans les joints de mortier de maçonnerie.

Dommmages mineurs :	Formation de fissures importantes ou chute de morceaux de plâtre ou de gypse. Fissures de briques ou de blocs en béton.
Dommmages majeurs :	Dommmage aux éléments structuraux du bâtiment. Fissures dans les colonnes de support. Dislocation de connexions structurales.

Les critères du USBM (7) distinguent deux types de finition intérieure. Les panneaux en gypse (placoplâtre), couramment employés dans les constructions récentes, sont plus résistants aux vibrations que les surfaces composées de plâtre appliqué sur latte, surtout retrouvées dans les habitations plus anciennes.

Tel que montré à la figure 7, les seuils d'endommagement proposés par le USBM (gypse) (réf. 7) et la norme BS-7385 (réf. 2) sont pratiquement les mêmes, tandis que les limites de la norme DIN-4150 (réf. 8) sont beaucoup plus sévères. En Amérique, le contrôle des vibrations de sautage suit généralement les critères du USBM (réf. 7) et la norme DIN-4150 (réf. 8) est jugée trop sévère. Selon Dowding (réf. 9), il semblerait que les limites de la norme DIN-4150 (réf. 8) se rapportent au confort des occupants plutôt qu'aux dommages aux bâtiments. Les fondements de la norme allemande ne sont d'ailleurs pas bien documentés (réf. 9), de sorte qu'il est difficile de dire à quel point ils sont conservateurs. En revanche, la base des critères du USBM (réf. 7) et de la norme anglaise est très bien documentée. La norme anglaise est la plus récente et donc basée sur une plus grande quantité de données empiriques.

En somme, les critères proposés par le USBM (réf. 7) et la norme BS-7385 (réf. 2) sont jugés les plus appropriés, en général, afin d'évaluer le risque d'endommagement des bâtiments résidentiels par les vibrations de sautage. Cependant, le critère du USBM (réf. 7) ne s'applique qu'aux bâtiments fondés sur sol ferme ou le roc (réf. 7). À vitesse de particule (*PVS*) et fréquence (*f*) égales, un bâtiment sur sol mou sera généralement plus sollicité que s'il se trouvait sur une fondation ferme ou le roc (réf. 2). De plus, les limites de vibrations pourraient être plus faibles dans le cas de bâtiments montrant déjà des dommages majeurs (structuraux), associés au tassement des fondations par exemple (réf. 2).

Compte tenu des conditions géotechniques du site, il est requis d'ajuster les critères usuels à la baisse. Les limites recommandées sont comparées aux différents critères usuels à la figure 7.

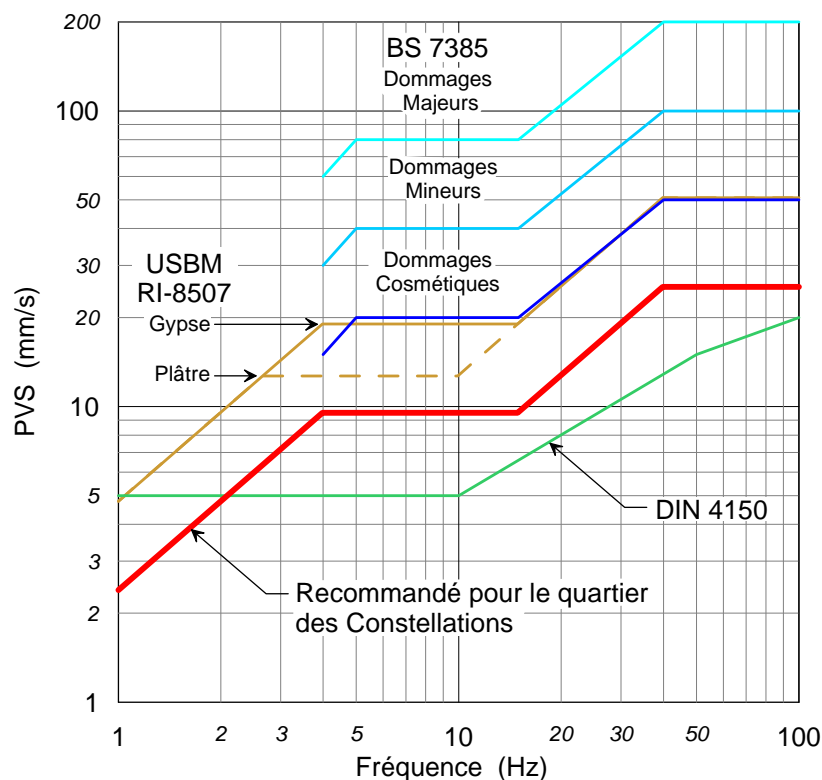


Figure 7 - Limites de vibrations pour éviter l'endommagement des bâtiments résidentiels.

6.3 Effet des sautages du printemps 2015 sur les bâtiments

Les vibrations enregistrées lors des sautages du printemps 2015 sont comparées aux limites de vibrations proposées à la figure 8. Cette figure montre la plage des vitesses particulières résultantes mesurées, ainsi que les valeurs maximales (*PVS*). Les vibrations mesurées sont largement inférieures aux limites fixées, de sorte qu'il est très peu probable qu'elles aient causé un quelconque dommage aux bâtiments où elles ont été enregistrées. Malgré les variations possibles d'intensité des vibrations d'un endroit à l'autre, il est très peu probable que les vibrations aient été plus élevées ailleurs dans le quartier des Constellations.

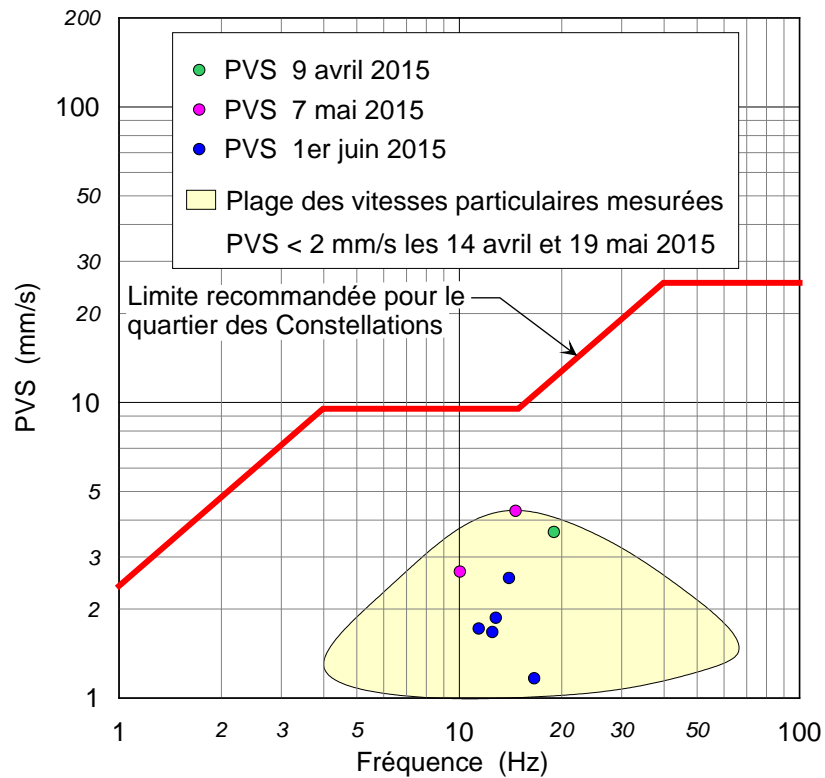


Figure 8 - Vibrations mesurées et limites de vibration proposées.

7 Effets des vibrations de sautage sur les sols de fondation

7.1 Généralités

Les vibrations de sautage sont susceptibles d'endommager les sols granulaires de compacité moyenne ou faible, ainsi que les sols argileux, si elles sont assez intenses. Cet endommagement peut se manifester par une perte de capacité portante et des tassements différentiels des fondations et mener à des dommages aux bâtiments résidentiels. Les critères de contrôle des vibrations mentionnés au chapitre précédent ne précisent aucune limite de vibration pour éviter ce type de problème. Cependant, la norme BS-7385 (réf. 2) contient une mise en garde concernant les effets néfastes des vibrations sur certains sols, en particulier les sols granulaires lâches.

L'utilisation courante d'explosifs afin de densifier les sols granulaires démontre bien l'influence que peut avoir un sautage sur ce type de sol. De plus, de nombreux auteurs ont relié les tassements, liquéfactions et surpressions interstitielles, occasionnés par des vibrations de sautage, à la vitesse maximale des particules (*PVS*). Quelques-unes de ces observations sont résumées au tableau 4.

Tableau 4 - Comportements observés de sols soumis à des vibrations de sautages

Observation	Sol	PVS (mm/s)	Réf. #
Augmentation de la pression interstitielle résiduelle	silt argileux (consistance ?)	> 110	10
	sable lâche	> 50	10
	remblai hydraulique ("tailings")	> 20	10
	sable dense	> 30	11
Tassement	sable lâche	> 25-75	9
Liquéfaction	sable lâche	>110	10
	non spécifié	65	12
	non spécifié	50	12
	sable dense	> 160	11

Tel qu'indiqué au tableau 4 pour un silt argileux, les sols cohérents sont, eux aussi, susceptibles de perdre une part de leur résistance lorsqu'ils sont soumis à des vibrations de sautage. D'ailleurs, le phénomène de dégradation de la résistance d'argiles soumises à des sollicitations cycliques est bien connu et a fait l'objet de nombreux travaux de recherche. La sensibilité aux vibrations des sols cohérents est d'autant plus grande que leur consistance est molle.

La sensibilité relative des sols aux vibrations dépend de leur composition, de leur densité et de leur consistance. D'une façon générale, les sols granulaires lâches sont les plus sensibles, les sols granulaires de densité moyenne et les sols argileux mous ont une sensibilité moyenne, tandis que les sols granulaires denses et les sols argileux raides sont peu ou pas sensibles aux vibrations. Une appréciation de la sensibilité relative aux vibrations des sols rencontrés au quartier des Constellations est donnée au tableau 3.

La sollicitation au-delà de laquelle la résistance des sols sensibles aux vibrations se dégradent est appelée seuil de stabilité cyclique. Le concept de seuil est important lors de l'évaluation de l'influence de sollicitations cycliques sur la résistance des sols. Le seuil de stabilité cyclique s'exprime en termes de contrainte ou de déformation. En termes de déformation, il correspond à l'amplitude de la déformation cyclique en deçà de laquelle la structure du sol n'est pas affectée et aucune surpression interstitielle n'est générée, indépendamment du nombre de cycles.

Dobry et Vucetic (réfs. 13, 14 et 15) ont déterminé que le seuil de stabilité cyclique d'un sol dépend principalement de sa composition et de sa plasticité, et varie entre 0,01 % et 0,10 %. Selon ces auteurs, le seuil des argiles plus plastiques se situe près de l'extrémité supérieure de cette plage ($\approx 0,10$ %), tandis qu'il se situe près de l'extrémité inférieure de cette plage ($\approx 0,01$ %) pour les argiles de faible plasticité et les autres sols non plastiques, tels que les silts et les sables. Par ailleurs, selon les résultats d'un nombre d'essais restreint, il semble que le seuil des argiles sensibles soit relativement élevé, malgré leur faible plasticité (réf. 15).

Lorsque la déformation cyclique dépasse le seuil de stabilité, la résistance du sol est progressivement dégradée et des surpressions interstitielles sont générées. La dissipation éventuelle de ces surpressions est associée à une compression du sol (tassement). Le nombre de cycles de sollicitation requis pour causer un degré de dommage donné est inversement proportionnel à l'amplitude de la sollicitation.

7.2 Critères de contrôle des vibrations

Puisqu'il est très difficile de prévoir l'ampleur des dommages associés à la dégradation des sols de fondation des bâtiments du quartier des Constellations et parce que la carrière BML est susceptible de procéder à une quantité indéterminée de sautages dans le futur, chacun générant plusieurs cycles de sollicitation, il convient d'éviter en tout temps que le seuil de stabilité cyclique des sols soit dépassé.

Le concept de seuil de stabilité cyclique a été employé par différents spécialistes afin d'évaluer le comportement des sols soumis aux vibrations de sautages (voir entre autres les réfs. 10 et 16). La norme BS-7385 (réf. 2) y fait d'ailleurs allusion. La vitesse particulière maximale (*PVS*) limite est reliée à la déformation maximale du sol (γ_{max}), en faisant intervenir la vitesse de propagation des ondes de cisaillement (C_s), selon l'équation suivante :

$$PVS = \gamma_{max} \times C_s$$

Cette équation suppose que la *PVS* est associée à une onde de cisaillement, ce qui est conservateur, compte tenu que les ondes de cisaillement produisent les plus grandes contraintes de cisaillement pour une valeur de *PVS* donnée.

Des sols sensibles d'être endommagés par des vibrations de sautages sont retrouvés dans le quartier des Constellations dans chacune des unités stratigraphiques décrites au tableau 2, où est donnée une appréciation de leur sensibilité relative. Le seuil de déformation cyclique des sols les plus sensibles aux vibrations est estimé à 0,01% suivant les relations empiriques proposées par Dobry et Vucetic (réf. 15). La vitesse de propagation des ondes de cisaillement (C_s) dans ces sols est estimée à au moins 100 m/s sur la base de relations empiriques. Ces propriétés mènent à une *PVS* de 10 mm/s (100 m/s * 1000 mm/m * 0,01%). Cette valeur paraît raisonnable, compte tenu des effets importants décrits au tableau 4 pour les *PVS* de l'ordre de 20 à 25 mm/s.

Sans une analyse plus détaillée, il est difficile d'estimer la *PVS* en profondeur à partir de la *PVS* mesurée en surface. L'atténuation des ondes entre le roc et la surface et la réponse dynamique des couches successives de mort-terrain, pourraient faire en sorte que la *PVS* en profondeur soit plus élevée que celle qui est mesurée en surface. Compte tenu de cette incertitude, une limite de *PVS* mesurée en surface de 5 mm/s, soit 50% de la valeur calculée plus haut, est proposée afin d'éviter l'endommagement des sols de fondation. Cette limite est indépendante de l'endroit où est réalisé le sautage à l'intérieur des frontières de la carrière BML.

7.3 Effet des sautages du printemps 2015 sur les fondations des bâtiments

La vitesse particulière résultante maximale (*PVS*) enregistrée lors des sautages du printemps 2015 varie de 1,2 à 4,3 mm/s. Ces valeurs sont inférieures à la limite de 5 mm/s recommandée à la section précédente. Des vibrations sensiblement plus intenses ont pu être ressenties ailleurs. Néanmoins, il est jugé très peu probable que les vibrations engendrées par les sautages du printemps 2015 aient significativement endommagé les sols de fondation des bâtiments du quartier des Constellations.

8 Conclusions et recommandations

- a) Des vibrations de sautage suffisamment intenses pourraient endommager les bâtiments du quartier des Constellations, indépendamment de la nature de leur fondation. Des limites de vibrations adaptées ont été recommandées (figure 7), afin de rendre très peu probables un endommagement des bâtiments par les vibrations.
- b) Les fondations des bâtiments du quartier des Constellations comportent des sols qui sont susceptibles d'être dégradés par des vibrations de sautages. À la limite, la dégradation produite par un sautage ou une succession de sautages, pourrait vraisemblablement occasionner des tassements significatifs et ainsi endommager les bâtiments résidentiels. Afin de rendre très peu probable un endommagement des sols de fondation des bâtiments par les vibrations, il est recommandé de limiter la vitesse particulière résultante (*PVS*) mesurée en surface à 5 mm/s. Cette limite est indépendante de l'endroit où est réalisé le sautage à l'intérieur des frontières de la carrière BML.
- c) Il est jugé très peu probable que les vibrations enregistrées lors des sautages du printemps 2015 aient endommagé les bâtiments ou leurs fondations. En effet, les vibrations mesurées sont largement inférieures à la limite recommandée afin d'éviter l'endommagement des bâtiments (figure 7) et sont inférieures à la limite de 5 mm/s recommandée pour éviter l'endommagement des sols de fondation. Malgré les variations possibles d'intensité des vibrations d'un endroit à l'autre, il est très peu probable que les vibrations aient été significativement plus élevées ailleurs dans le quartier des Constellations.

9 Références

1. AECOM (2010) : « *Évaluation de la problématique de consolidation des sols du Projet domiciliaire des Constellations* », Rapport préparé pour la Ville de Lévis, 43 pages.
2. BRITISH STANDARDS INSTITUTE (1993): « *Evaluation and Measurement for Vibration in Buildings* », Standard BS-7385.
3. INTERNATIONAL SOCIETY OF EXPLOSIVES ENGINEERS (2009): « *Field Practice Guidelines For Blasting Seismographs* ».
4. BRITISH STANDARDS INSTITUTE (2014) : « *Code of Practice for Noise and Vibration Control on Construction and Open Sites* », Standard BS-5228.
5. UNITED STATES BUREAU OF MINES (1980): « *Structure Response and Damage Produced by Airblast from Surface Mining* », Report RI-8485, 111 pages.
6. CODE CIVIL DU QUÉBEC (2015) : « *Règlement sur les carrières et sablières* », www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca.
7. UNITED STATES BUREAU OF MINES (1980): « *Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration* », Report RI-8507, 74 pages.
8. DEUTSCHE INSTITUTE FÜR NORMUNG (1999): « *Structural vibration - Part 2: Effects of Vibration on Structures* », Standard DIN-4450-2.
9. DOWDING, H.D. (2000) : « *Construction Vibrations* », 610 pages.
10. CHARLIE, W.A., LEWIS, A.L., DOEHRING, D.O. (2001): « *Explosive Induced Pore Pressure in Sandfill Dam* », Geotechnical Testing Journal, ASCE, Vol. 24, No. 4, pp. 391-400.
11. CHARLIE, W.A., JACOBS, P.J., DOEHRING, D.O.(1992): « *Blast-Induced Liquefaction of an Alluvial Sand Deposit* », Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 15, No. 1, pp. 14-23.
12. SISKIND, D. (2000): « *Vibrations from blasting* », International Society of Explosives Engineers, OH USA.
13. VUCETIC, M. and DOBRY, R. (1991): « *Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response* », ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 117, No. 1, pp. 89-107.
14. VUCETIC, M. (1994): « *Cyclic Threshold Shear Strains in Soils* », ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 12, pp. 2208-2228.
15. DOBRY, R. and VUCETIC, M. (1987): « *Dynamic Properties and Seismic Response of Soft Clay Deposits* », Proceedings, International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils, Mexico City, Vol. 2, pp. 51-87.
16. LIST, B.R., LORD, E.R.F., FAIR, A.E. (1985): « *Investigation of Potential Detrimental Effects Resulting from Blasting in Oilsand* », dans *Vibration Problems in Geotechnical Engineering*, Proceedings of a Symposium sponsored by the Geotechnical Engineering Division in conjunction with the ASCE Convention in Detroit, Michigan, ASCE, pp. 266-285.

