

Coupe de roc de 15 m de hauteur à proximité d'une tour de télécommunication. Méthodologie et contrôle des vibrations.

Par: Pierre Dorval, Service géotechnique et géologie, Transports Québec,
Francis Trépanier, Géophysique GPR International inc.,
Gilles Trudel, Castonguay Inc.

Résumé

Dans le cadre de la construction du tronçon de l'autoroute 50 entre les chemins Findlay à Doherty à Buckingham, des contraintes environnementales ont obligé le concepteur à adopter un tracé passant à proximité d'une tour de télécommunication appartenant à Hydro-Québec. Le rôle de cette tour étant de relier Montréal à l'Outaouais en terme de transmission de données servant à l'exploitation du réseau électrique, on comprendra qu'il était primordial d'assurer le bon fonctionnement des équipements de télécommunication en adoptant des méthodes de forage et sautage en mesure de respecter les critères de vibration spécifiques à cette infrastructure. Les travaux de forage et sautage ont été réalisés par le sous-traitant Castonguay Inc., tandis que la firme Géophysique GPR Inc., avait été mandatée par Hydro-Québec pour établir des critères de vibrations à exiger dans les documents de soumission et pour assurer un suivi lors de la construction. De son côté, Castonguay Inc., avait retenu les services de la firme Explotech Engineering Ltd et plus spécialement de l'ingénieur René A. Morin pour l'assister dans le contrôle des vibrations et des surpressions d'air.

Dans un premier temps cette présentation explique le projet et l'approche préconisée par l'entrepreneur. Dans un deuxième temps, on discutera des exigences au niveau du contrôle des vibrations et du suivi effectué.

1) Généralités

Ce tronçon de l'autoroute 50, situé entre le chemin Findlay et le chemin Doherty entre les municipalités de Masson-Angers et Buckingham a une longueur de 5,95 km (chaînages 1+050 @ 7+000) (figure 1). L'ingénieur concepteur retenu par le MTQ pour réaliser le dimensionnement de ce tronçon de l'autoroute est la firme « Les consultants BBL », aujourd'hui une division de Techsult.

Suite à l'appel d'offre, c'est l'entreprise « Excavation de Chicoutimi Inc. » qui a obtenu le contrat pour une somme d'un peu plus de 18,5 millions de dollars et les travaux de forage et sautage ont été réalisés par le sous-traitant Castonguay Inc. La quantité de roc estimée au moment de la soumission était de l'ordre de 718,000 m³.

De l'ensemble des déblais 1^{ère} classe requis, une importante coupe de roc était prévue entre les chaînages 5+260 et 6+000, la hauteur maximale de la coupe atteignant une trentaine de mètres au chaînage 5+800. De plus dans le secteur du chaînage 5+425, la présence d'une tour de télécommunication appartenant à Hydro-Québec représentait un élément important à protéger lors des travaux à l'explosif (photo

1). En fait la ligne de centre de la chaussée sud de l'autoroute passe à environ 32 mètres de la tour, mais 15 m en contrebas de sorte que le sommet de la paroi d'excavation se retrouvera à une dizaine de mètres de la fondation de la patte de la tour la plus rapprochée.

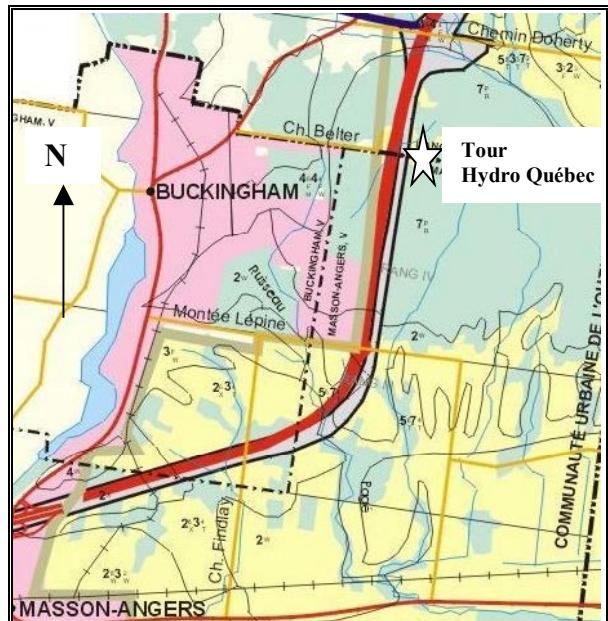


Figure 1: Localisation du projet.

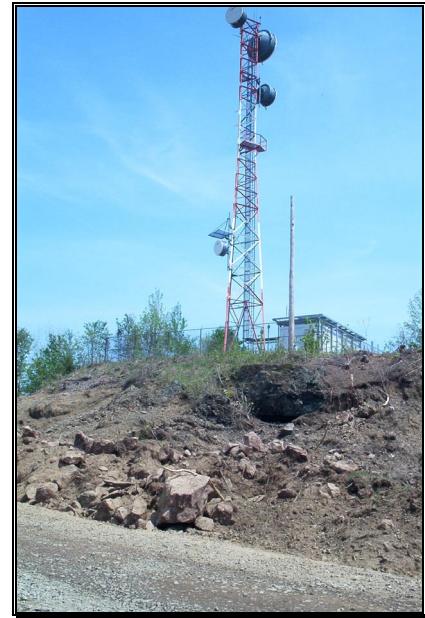


Photo 1: Tour de télécommunication.

Devant l'impossibilité de modifier le tracé, les concepteurs ont opté pour une coupe de 15 m de hauteur selon une pente 1H :10V réalisée en trois parois de 5 m de hauteur, en limitant la largeur de chacun des paliers à environ 0,5 m. Des boulons de consolidation et un treillis métallique étaient prévus pour assurer la stabilité de la paroi à long terme et empêcher les chutes de pierres (figure 2).

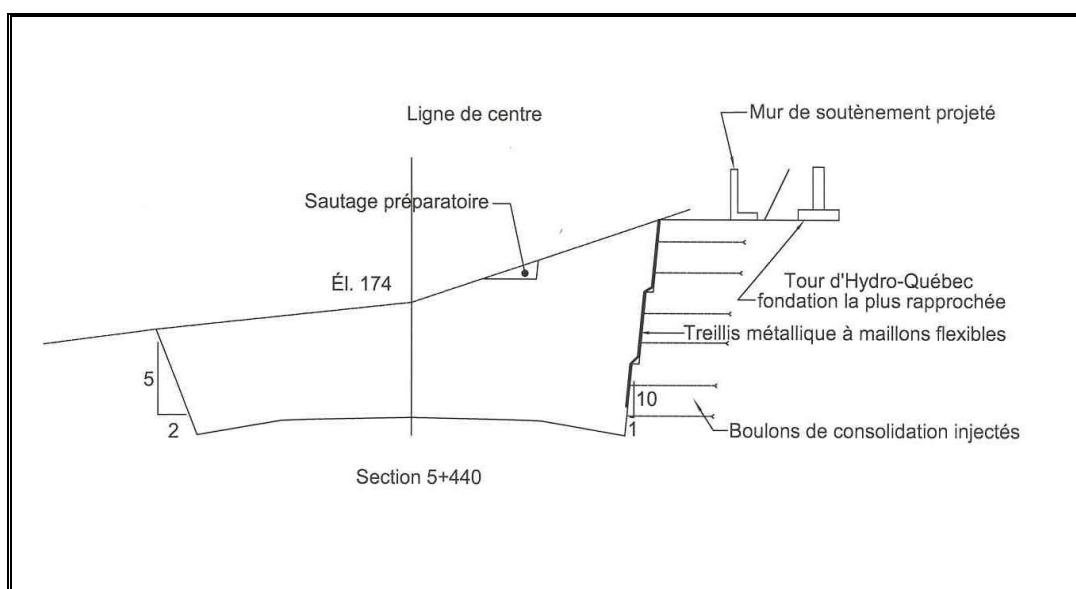


Figure 2: Section type au chaînage 5+440

2) Contexte géologique

L'étude géologique a consisté à relever et mesurer l'orientation et le pendage (angle du plan par rapport à l'horizontale mesuré perpendiculairement à l'orientation du joint) des principales structures géologiques observées sur les affleurements existants et le roc décapé. Les données ainsi recueillies ont par la suite été traitées à l'aide d'outils informatiques dans le but d'identifier les principales familles de discontinuités et d'analyser l'impact de leur présence sur la stabilité des excavations à réaliser.

2.1) Nature du roc

L'examen des affleurements a révélé des structures en plis suggérant des roches de nature métasédimentaire, soit des roches d'origine sédimentaire qui ont subit du métamorphisme, c'est-à-dire dont la texture, la structure et la minéralogie ont été modifiées sous l'effet de pression, de température, ou d'agents chimiques variés sans toutefois avoir passé à l'état de fusion (magma). Ce constat est confirmé par le géologue Yves Hébert dans son rapport DP 88-11, « Géologie de la région de Buckingham » dans lequel il identifie ces roches comme étant des paragneiss (photos 2 et 3).



Photos 2 et 3: Affleurements visibles sur le terrain lors de l'étude géologique. On remarque la forte densité de fracturation du roc.

2.2) Géologie structurale

En tout nous avons relevé l'orientation et le pendage de 112 discontinuités qui ont servi à l'analyse géostatistique à l'aide du logiciel DIPS développé par Rocscience Inc. Nous avons par la suite analysé l'impact des principales structures observées sur les excavations à réaliser compte tenu de l'orientation de l'autoroute (N165°) dans ce secteur.

En résumé, pour l'ensemble des travaux, l'analyse des relevés suggérait l'adoption d'une pente d'excavation de 2H:5V, soit de 68°. Plus particulièrement dans le secteur de la tour de télécommunication, la présence d'un joint N167°/46° SO représentait, quoique statistiquement de moindre importance, un système très défavorable pouvant nécessiter une révision du dimensionnement des ancrages si jamais nous rencontrions cette discontinuité au niveau de la paroi au droit de la tour. Par contre les ancrages prévus de 6 m de longueur étaient suffisants pour prévenir tout glissement qui pourrait survenir selon une pente de stabilité théorique de 2H :5V (figure 3). Nous verrons plus loin que le système à 46° de pendage vers le sud-ouest avait une bonne extension latérale qui n'a toutefois pas eu d'impact au niveau du secteur de la tour.

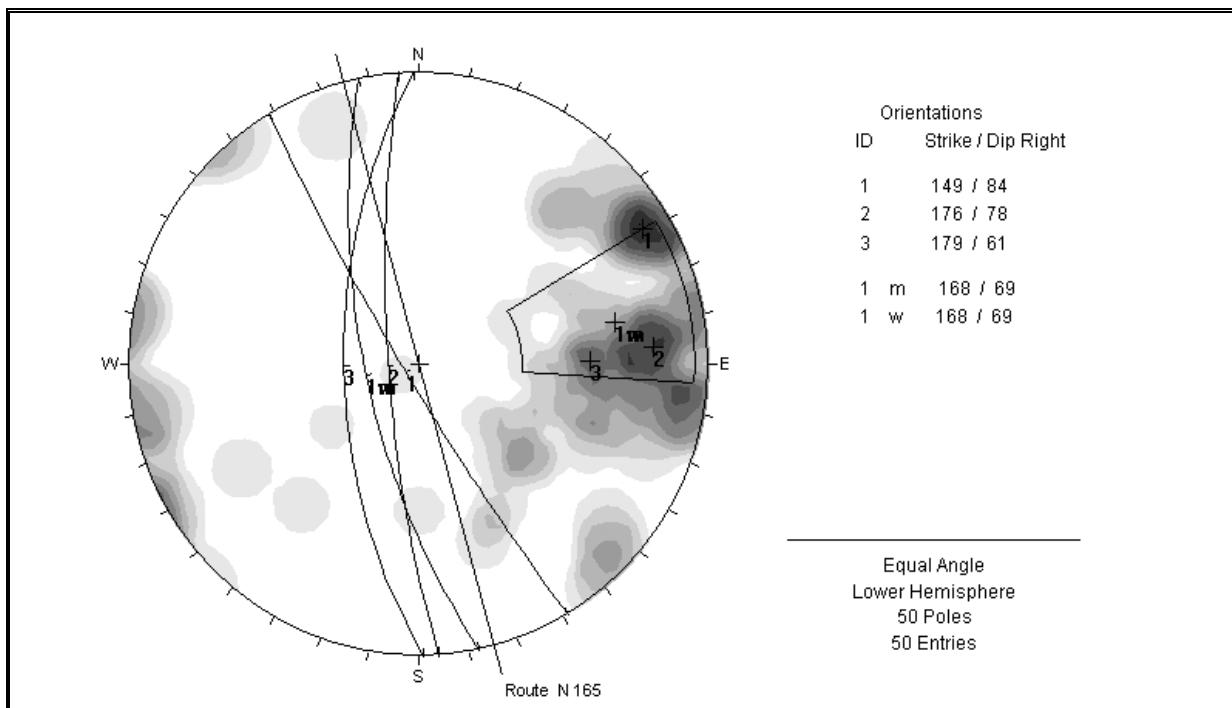


Figure 3: Analyse des données structurales au droit de la tour de télécommunication suite à un relevé complémentaire démontrant une direction moyenne des plans défavorables sensiblement parallèle à l'axe de la route et avec une pente de 69°vers la route, soit l'équivalent d'une pente de stabilité théorique de 2H:5V, justifiant ainsi la consolidation du roc au moyen d'ancrages actifs.

3) Méthodologie

Des travaux de sautage ont débuté dans la coupe principale dans les environs du chaînage 5+700 soit dans un secteur relativement éloigné de la tour afin d'évaluer les constantes du site et calibrer les sautages en fonction des limites de vibrations permises à la tour.

Par ailleurs, pour faciliter la circulation sur le chantier, deux sautages de 0 à 2 m de hauteur à flanc de coteau, donc avec une bonne surface libre, ont été réalisés dans le secteur de la tour correspondant à l'endroit identifié «sautage préparatoire» sur la figure 2. Ce faisant, l'entrepreneur a pu vérifier l'intensité des vibrations transmises à la tour lui permettant ainsi de mieux planifier les travaux à venir dans ce secteur.



Photo 4: Vue du site après les sautages dits préparatoires

La charge d'explosif retenue pour ces essais était de 4,72 kg/trou avec 1 trou par délai. On a utilisé un patron de 1,8 m x 1,8 m, 0,9 m de sous-forage et 1,5 m de collet, pour un facteur poudre de l'ordre de 0,9 kg/m³.

Finalement, après ces essais, et en fonction de l'expérience acquise suite aux travaux effectués ailleurs sur le chantier, Castonguay Inc. a opté pour l'approche suivante pour réaliser les travaux. Les figures 4 et 5 résument les étapes suivies lors des travaux.

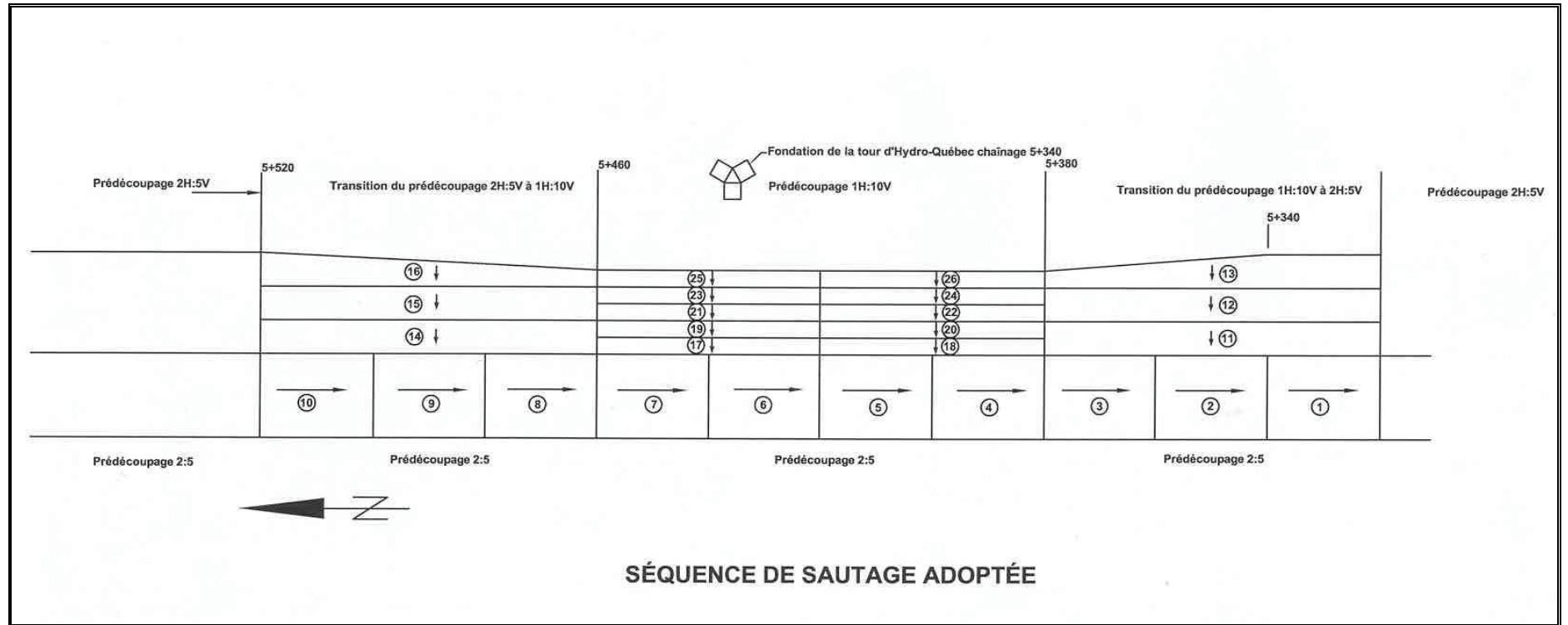


Figure 4: Vue en plan de la séquence de sautage adoptée dans le secteur de la tour de télécommunication.

Dans un premier temps, le forage et sautage du prédécoupage de la paroi ouest selon une pente 2H:5V ont été exécutés. Par la suite, Castonguay Inc. a procédé au sautage de la masse entre la paroi ouest et le centre de la chaussée en dirigeant les tirs vers le nord ou le sud, soit dans le sens de la route. En procédant ainsi, il dégageait une face libre lui permettant de diriger les tirs pour la prochaine étape, soit la plus cruciale, perpendiculairement à l'axe de la route.

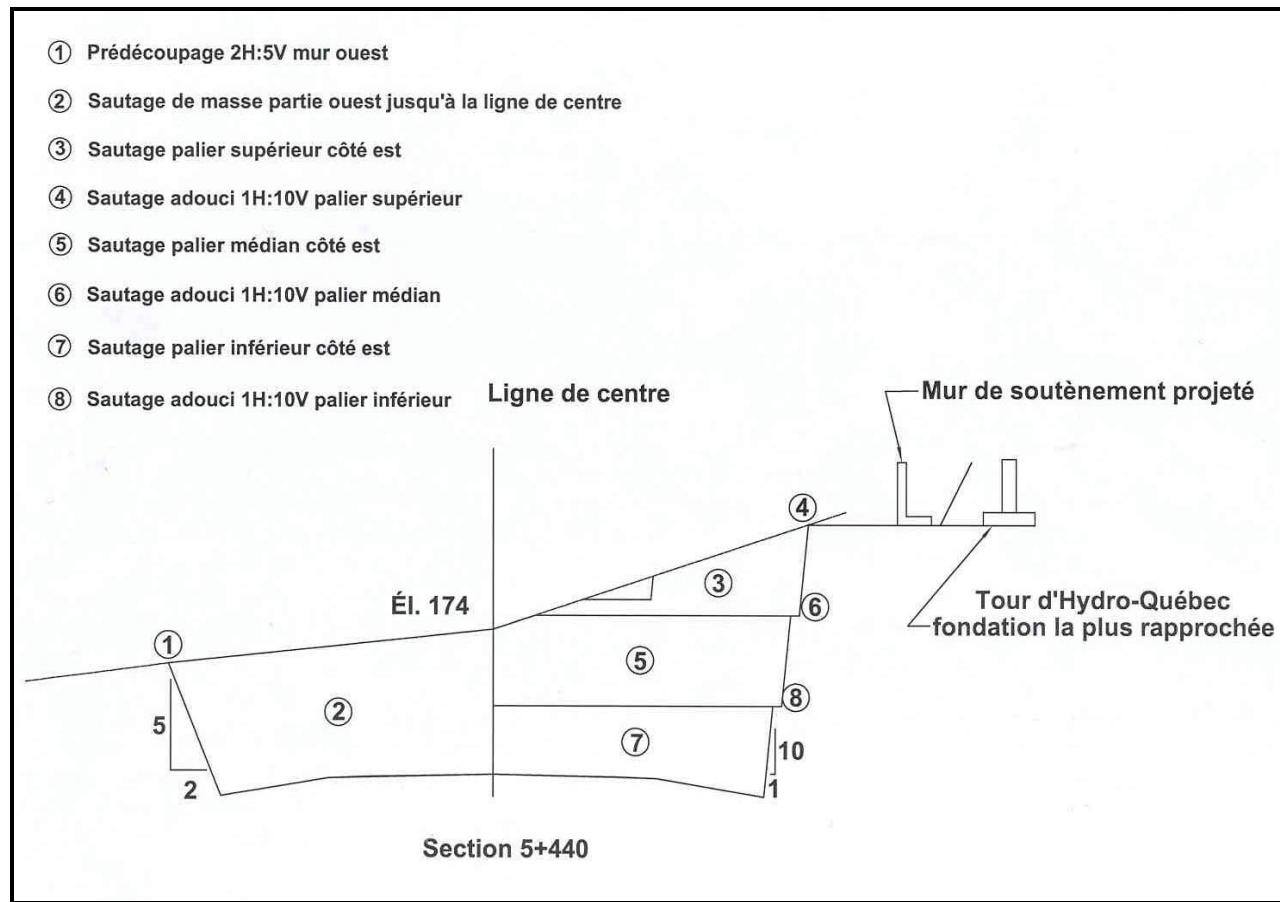


Figure 5: Séquence des travaux de sautage dans le secteur de la tour.

Tel que mentionné, le confortement à l'aide d'ancrages de la paroi est dans le secteur de la tour avait été prévu par le concepteur pour s'assurer de la stabilité de la paroi à long terme et éviter ainsi de déstabiliser les fondations de la tour. C'est pourquoi il était incontournable de réaliser la coupe en prenant soin de procéder au confortement à chacune des étapes, avant de poursuivre les opérations de forage et de sautage du palier suivant.

Ainsi des chaînages 5+380 @ 5+460, la coupe de roc a été divisée en trois paliers égaux d'une hauteur de plus ou moins 5 mètres. Chaque palier fut sauté par tranche de 1 ou 2 rangées (en fonction des vibrations enregistrées) jusqu'à une distance de 1,5 à 2,0 m de la paroi finale.

Compte tenu des conditions particulières et des contraintes au niveau des vibrations, des aménagements ont été acceptés au niveau de la méthode du tir périphérique dans le secteur de la tour. Ainsi le prédecoupage prévu a été réalisé en dernier correspondant davantage, par définition, à une méthode de sautage adouci qu'à un pré-clivage.

Finalement, après excavation de chaque palier, l'entrepreneur procérait à la consolidation avant de poursuivre l'excavation du palier subséquent. Le forage des ancrages a été exécuté par Castonguay Inc., alors que la pose des boulons, la mise en tension et le serrage final fut exécuté par Excavation de Chicoutimi Inc. Un autre sous-traitant s'est chargé du scellement à l'aide d'un coulis de ciment.

En résumé, les patrons de forages utilisés furent de $1,5m \times 1,5m$ – $1,5m \times 1,8m$ et de $1,8m \times 1,8m$. Jusqu'à trois (3) délais par trous ont été requis afin de maintenir les vibrations à un niveau acceptable. Les charges par délai ont varié de 2 kg @ 40 kg.

4) Résultats

En résumé les résultats obtenus sont conformes à nos attentes comme le démontrent les photographies suivantes qui illustrent quelques étapes des travaux.



Photos 5 et 6: Suite aux étapes 1 et 2, excavation jusqu'à la ligne de centre de la chaussée.



Photo 7: Après l'excavation et le confortement de la première paroi.



Photo 8: Paroi finale une fois l'excavation complétée.

Suite à l'excavation de la moitié ouest de la chaussée, on pouvait voir dans ce secteur un contact géologique entre deux unités distinctes, soit le paragneiss noir décrit précédemment avec des joints très rapprochés et une roche rosée calco-silicatée. Toutefois, en fonction de la géométrie de ce contact, on était en droit de s'attendre à retrouver une paroi finale réalisée presque complètement dans l'unité de paragneiss. L'excavation laissait également voir, à ce moment, des résurgences d'eau au niveau des parois de roc (photos 9 et 10).

D'autre part, le fameux système N167°/46° SO a été intercepté au sud du secteur de la tour se traduisant par des masses instables dans la paroi est qui furent excavées. Fort heureusement, ce système de discontinuité n'a pas eu d'impact au niveau de la tour (photos 11 et 12).

En ce qui a trait aux travaux de confortement à l'aide d'ancrages, le concepteur a dû augmenter le diamètre des boulons, car le degré de fracturation du paragneiss ne permettait pas de développer la tension requise au niveau de la coquille d'expansion de l'ancrage actif.

Finalement le concepteur a ajouté des barbacanes (trous forés pour permettre le drainage de l'eau dans le massif) afin de soulager le roc des pressions d'eau qui pourraient se bâtir suite à l'infiltration des eaux de précipitations ou de fonte. Un treillis métallique a par la suite été épingle sur la paroi pour retenir d'éventuelles chutes de débris (photos 13 et 14).



Photo 9: Contact entre le paragneiss et la roche calco-silicatée rose.



Photo 10: Venues d'eau dans la paroi au droit de la tour.



Photo 11: Plan à 46° de pendage avec instabilités.



Photo 12: Suite à la stabilisation du secteur, ce plan n'a heureusement pas eu d'impact au niveau de la tour.



Photo 13: Ancrages, treillis métallique et barbacanes.



Photo 14: Vue rapprochée de l'épinglage du treillis métallique.

5) Suivi des vibrations

Géophysique GPR International Inc. fut mandatée au mois de mai 2002 par Martoni, Cyr et Associés Inc., afin d'agir comme consultant en dynamitage, pour son client Hydro-Québec pendant les travaux de prolongement de l'autoroute 50 à Buckingham (tronçon Findlay – Doherty). Principalement, les buts du mandat étaient les suivants :

- Établir une procédure de suivi des vibrations en fonction des méthodes de travail prévues par l'entrepreneur.
- Évaluer les paramètres de propagation et d'atténuation des vibrations lors d'essais de dynamitage avant le début des travaux dans la zone de la tour de télécommunication d'Hydro-Québec.
- Effectuer le contrôle de la qualité des dynamitages (vibrations, surpressions d'air, projections, etc.) à l'intérieur de la zone de la tour (entre les chaînages 5+340 et 5+540, dans le devis de GPR). La zone protégée dans le programme de l'entrepreneur était entre les chainages 5+270 et 5+540.

5.1) Méthodologie

Le contrôle continu des opérations de dynamitage avait pour but de protéger la tour de télécommunication et les équipements d'Hydro Québec, en limitant les vibrations et les surpressions d'air, causées lors des dynamitages, aux normes établies et de modifier le cas échéant, les procédures de dynamitage. De plus, GPR enregistrait chaque tir sur caméra vidéo.

La tour est de type autoportante et triangulaire avec une hauteur de 35 m. La figure 6 et le tableau 1 décrivent la localisation des sismographes.

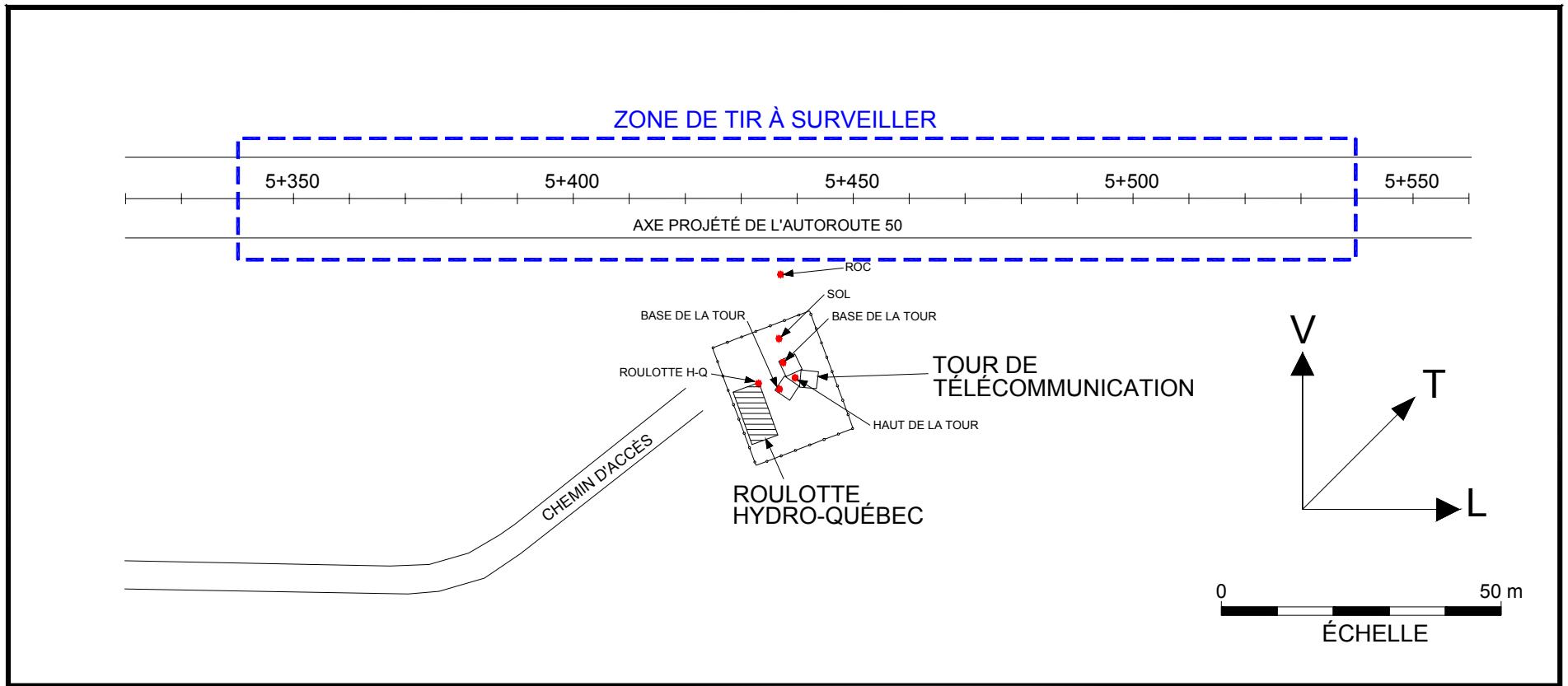


FIGURE 6
PLAN DE LOCALISATION ET INSTALLATION DES SISMOGRAPHES

TABLEAU 1

EMPLACEMENT DES SISMOGRAPHES SUR LE SITE

Emplacement	Commentaires
Haut de la tour	Sismographe opéré par GPR
Base de la tour (patte avant)	Sismographe opéré par GPR
Roulotte H-Q	Sismographe opéré par Castonguay
Base de la tour (patte arrière)	Sismographe opéré par Castonguay
Zone de la tour (sol)	Sismographe opéré par GPR
Zone de la tour (roc)	Sismographe opéré par GPR

Pour tous les tirs dans la zone de la tour, le technicien de GPR installait un sismographe sur la patte avant à la base de la tour. De plus, un sismographe avait été installé en haut de la tour au début des travaux pour toute la durée des dynamitages dans la zone de la tour.

D'autre part, GPR travaillait également en collaboration avec l'entrepreneur Castonguay, qui installait ses propres sismographes sur la structure. Ils fournissaient les données au technicien de GPR au fur et à mesure de l'avancement du projet. De plus, un technicien d'Hydro-Québec était parfois sur place lors des tirs pour vérifier l'influence des dynamitages sur le signal des antennes.

Finalement, les sismographes installés sur le sol et le roc, ont permis d'établir l'atténuation des vibrations avec la distance et l'effet de la géologie.

5.2) Résultats

La zone prévue du suivi des dynamitages était de 100 mètres de part et d'autre de la tour de télécommunication et des équipements d'Hydro Québec. Tous les dynamitages effectués à l'intérieur de cette limite étaient enregistrés par GPR, ainsi que quelques tirs hors de la zone au début des travaux afin d'effectuer les essais de dynamitage au début des travaux. Les photos 15 à 17 montrent les installations des sismographes et la tour pendant les travaux.

Le premier dynamitage enregistré a eu lieu le 16 mai 2002, il s'agissait d'un tir de pré-découpage à 275 mètres de la tour. Le deuxième tir (tir de masse) a été effectué à 200 mètres de la tour le 22 mai 2002. Le premier tir à l'intérieur de la zone de la tour a eu lieu le 18 juin 2002, et le dernier

tir le 12 novembre 2002. Dans cette période, 101 enregistrements de vibrations ont été effectués en haut de la tour et 90 à la base de la tour (patte avant). De plus, 60 enregistrements à la base de la tour (patte arrière) et 58 à la roulotte d'Hydro-Québec ont été fournis par Castonguay.



PHOTO 15 – TOUR DE COMMUNICATIONS ET CHANTIER DE CONSTRUCTION



PHOTO 16 – ROULOTTE HYDRO-QUÉBEC ET BASE DE LA TOUR



PHOTO 17 – PATTE AVANT DE LA TOUR, AVEC GÉOPHONE ET SISMOGRAPHE

Le tableau 2 présente les valeurs moyennes et maximales des vibrations et des surpressions d'air pour tous les points de mesures.

Le seuil maximum de vibrations dans le devis du projet était de 25 mm/s à 30 Hz. Cependant, ce seuil variait entre 3 et 25 mm/s avec des fréquences entre 1 et 30 Hz et diminuait jusqu'à 7,8 mm/s pour des fréquences entre 30 et 100 Hz. Ces limites avaient été établies à partir des spécifications les plus sévères des équipements dans la roulotte près de la tour. Ce seuil a été modifié le 6 août 2002, suite à l'analyse des résultats obtenus à ce jour. En effet, aucun dommage apparent n'a été constaté sur la structure et aucune diminution de signal ou effet sur les équipements n'a été enregistré par Hydro-Québec pendant la période du 16 mai au 5 août 2002. De plus, les valeurs de vibrations mesurées à la roulotte d'Hydro-Québec sur le sol étaient environ 50% moins élevées que celles mesurées à la base de la tour déposée sur le roc. Par conséquent, GPR a recommandé de limiter les vibrations à 50 mm/s à la base de la tour (patte avant), afin de s'assurer de la sécurité des structures et des équipements ainsi que d'éviter toute diminution significative du signal.

TABLEAU 2

RÉSULTATS MOYENS ET MAXIMUMS DES VIBRATIONS ET SURPRESSIONS D'AIR POUR CHAQUE POINT DE MESURE

Localisation du sismographe	Surpressions d'air		Vibration Résultante	
	Moy. (dB)	Max. (dB)	Moy. (mm/s)	Max. (mm/s)
Base de la tour (patte avant)	133	148*	52,3	141,6
Base de la tour (patte arrière)	126	140*	21,5	78,0
Haut de la tour (GPR)	131	140*	45,7	170,5
Roulotte (Castonguay)	130	140*	13,4	42,3

* Saturation du signal

5.3) Analyse des vibrations

Les vibrations enregistrées à la roulotte ont été inférieures à la limite de 50 mm/s établie le 6 août 2002.

À la base de la tour (patte arrière), trois (3) tirs ont été enregistrés avec des vibrations résultantes dépassant 50 mm/s. À la base de la tour (patte avant), quarante-sept (47) tirs ont été enregistrés par GPR avec des résultats supérieurs à la limite de 50 mm/s établie le 6 août 2002. Ces tirs ont été réalisés à des distances variant de 13 à 81 m du géophone, et les résultats ont varié entre 50,5 mm/s et 141,6 mm/s. En haut de la tour, quarante (40) tirs ont été enregistrés par GPR avec des résultats supérieurs à la limite de 50 mm/s établie le 6 août 2002, soit entre 51,1 mm/s et 170,5 mm/s.

D'autre part, à partir des mesures de vibrations dans la zone de la tour d'Hydro Québec et de la relation mathématique ci-dessous, on a pu établir le niveau des vibrations aux alentours des dynamitages et ainsi évaluer la qualité des dynamitages et la distance ou la charge requise pour respecter la limite de 50 mm/s.

$$V = K \left[\frac{d}{w^{1/2}} \right]^\beta$$

où V: Vitesse de particules (mm/s)
w: Charge maximale par délai (kg)
d: Distance (m)
K et β : Constantes de dynamitage et de site

Pour ce faire, on doit déterminer les constantes K et β pour chaque emplacement de sismographes en se référant aux figures 7 à 9 qui représentent les dynamitages dans la zone de la tour pour les différents points de mesures (base et haut de la tour, roulotte). Par conséquent, on peut extrapoler à quelle distance et pour quelle charge le critère de 50 mm/s est généralement respecté. De plus, pour faire une comparaison, les vibrations enregistrées au sol et sur le roc près de la tour sont présentées aux figures 10 et 11.

À quelques reprises pendant les travaux de dynamitage, des vibrations importantes en basses fréquences ont été enregistrées sur la patte avant de la base de la tour. Il y a eu un total de 15 enregistrements à la base de la tour avec des vibrations dépassant la limite de 50 mm/s avec des fréquences moins de 15 Hz. Le plus important résultat était celui où une vitesse de particules résultante de 81,4 mm/s a été mesurée avec une fréquence de 2,8 Hz (selon l'axe latéral). Pour une même vitesse de particules, le déplacement en mm est beaucoup plus important lorsque les fréquences sont de l'ordre de 3 Hz comparativement à 50 Hz. En effet, le déplacement de particule pour une vibration de 81,4 mm/s à 3 Hz est de 4,3 mm, tandis que le déplacement causé par une vibration de 81,4 mm/s à 50 Hz serait seulement de 0,26 mm.

Pour comprendre cette problématique de basses fréquences, Géophysique GPR International Inc. a étudié les installations des

géophones, les appareils d'acquisition et les géophones afin de vérifier si les basses fréquences étaient induites par un problème mécanique ou par la structure ou la géologie. Des essais ont été réalisés tant sur le chantier qu'au laboratoire de Géophysique GPR International inc. Suite à nos vérifications, aucune anomalie n'a été observée sur les différentes installations.

Nous pouvons suggérer quelques possibilités qui causeraient de telles vibrations;

- La géologie particulière du site.
- L'effet du contact entre la patte avant et le roc.

De plus, les résultats de vibrations enregistrées sur la patte arrière, ne montrent aucune vibration importante avec de basses fréquences.

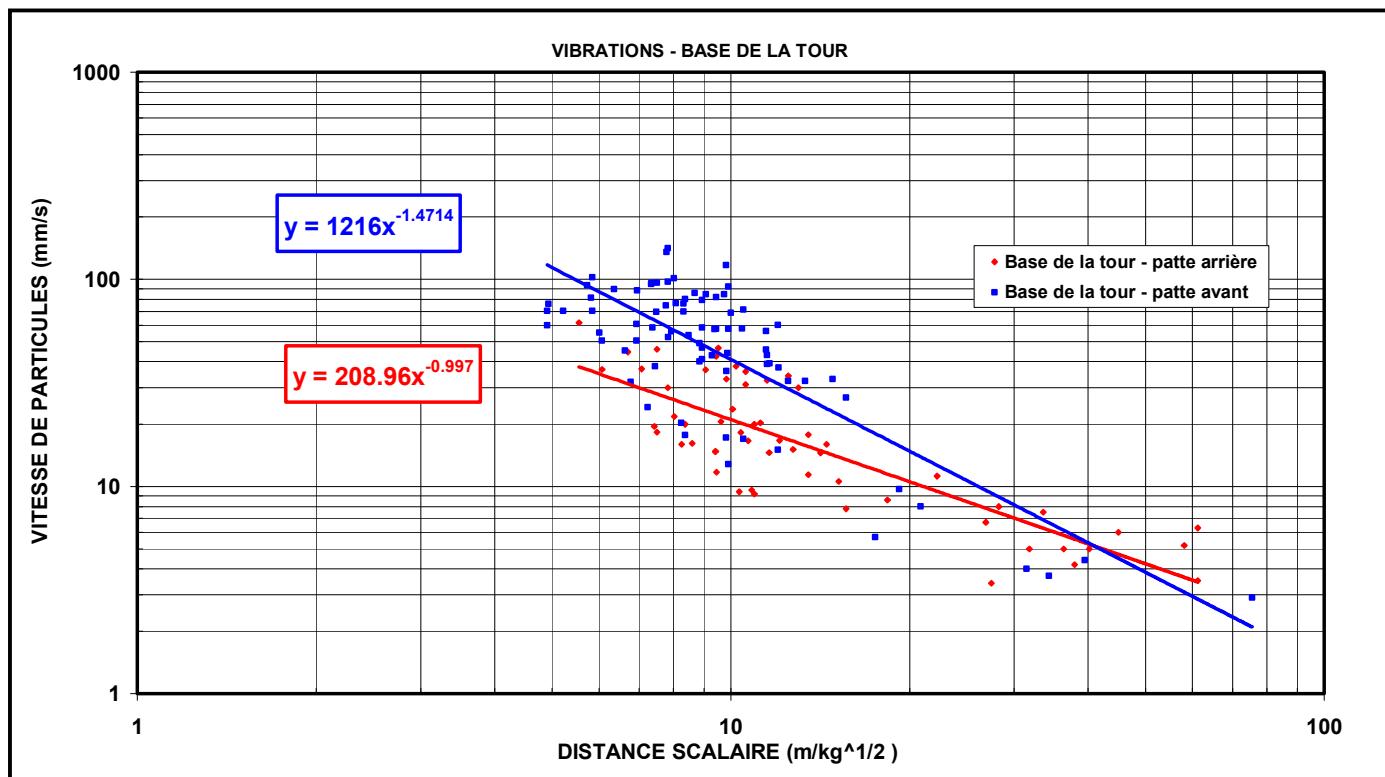


FIGURE 7
**EXTRAPOLATION DE LA DISTANCE POUR RESPECTER LE CRITÈRE
 À LA BASE DE LA TOUR (PATTES AVANT ET ARRIÈRE)**

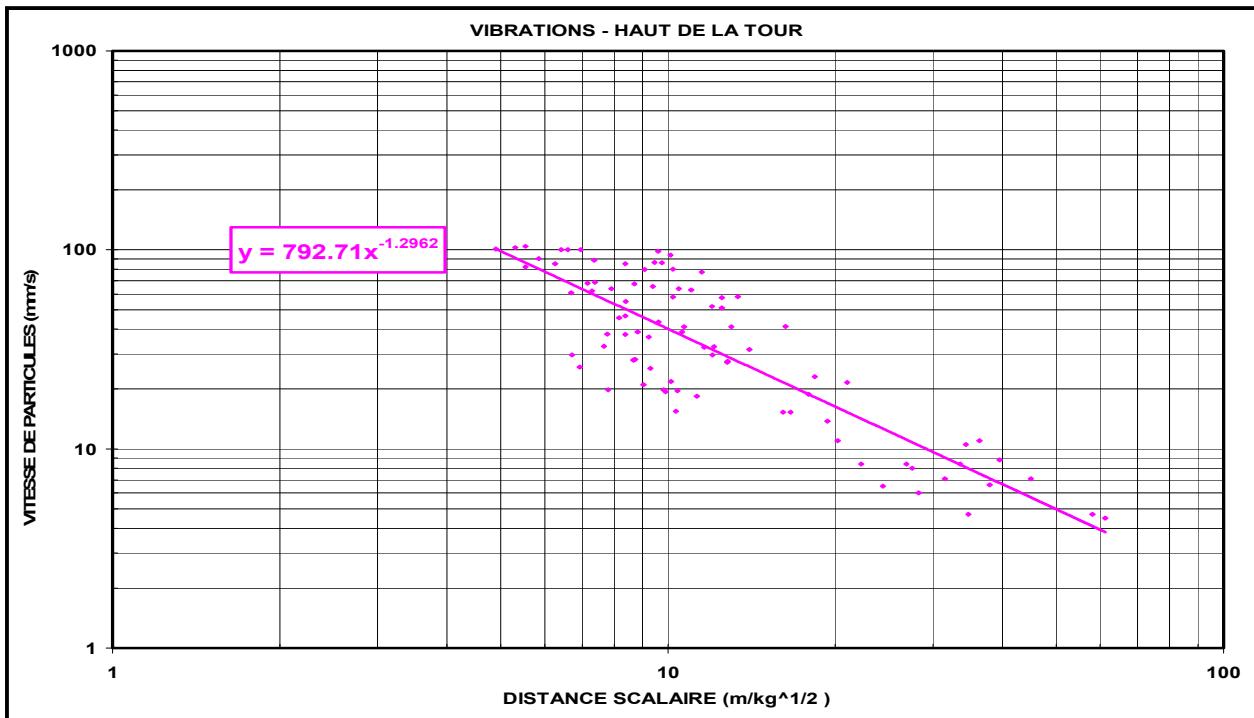


FIGURE 8

EXTRAPOLATION DE LA DISTANCE POUR RESPECTER LE CRITÈRE
EN HAUT DE LA TOUR (SANS LES RÉSULTATS SATURÉS)

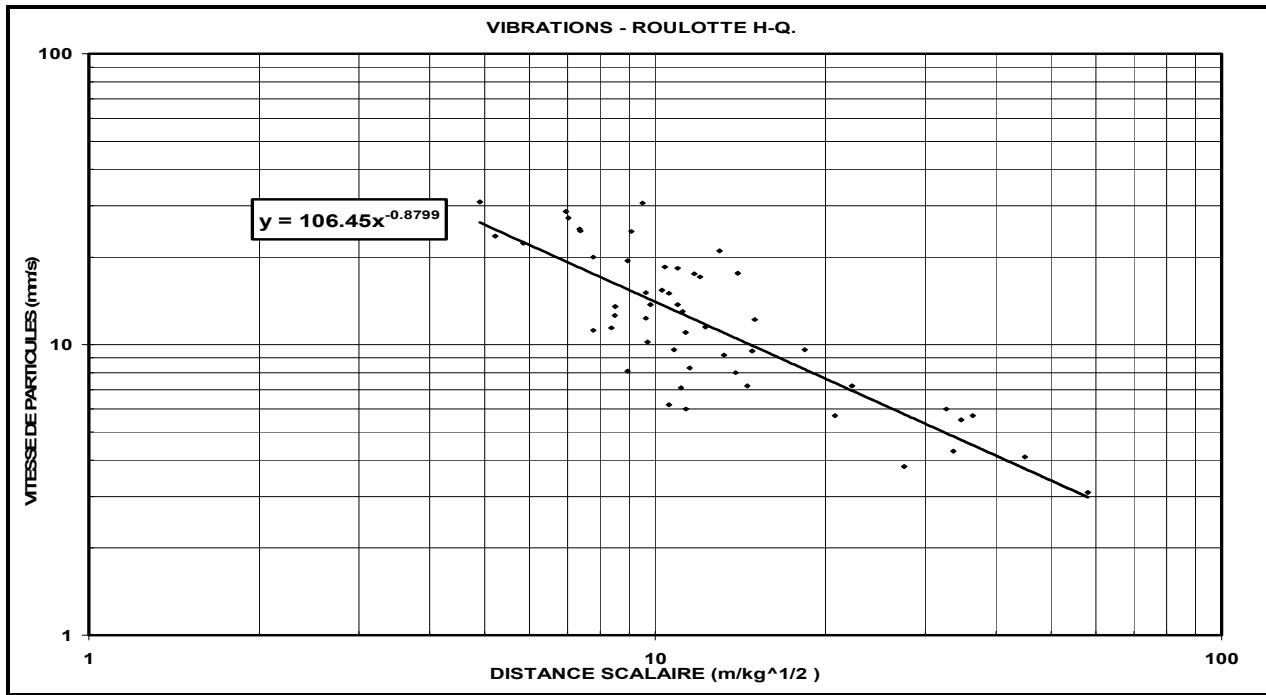


FIGURE 9

EXTRAPOLATION DE LA DISTANCE POUR RESPECTER LE CRITÈRE
À LA ROULOTTE H-Q

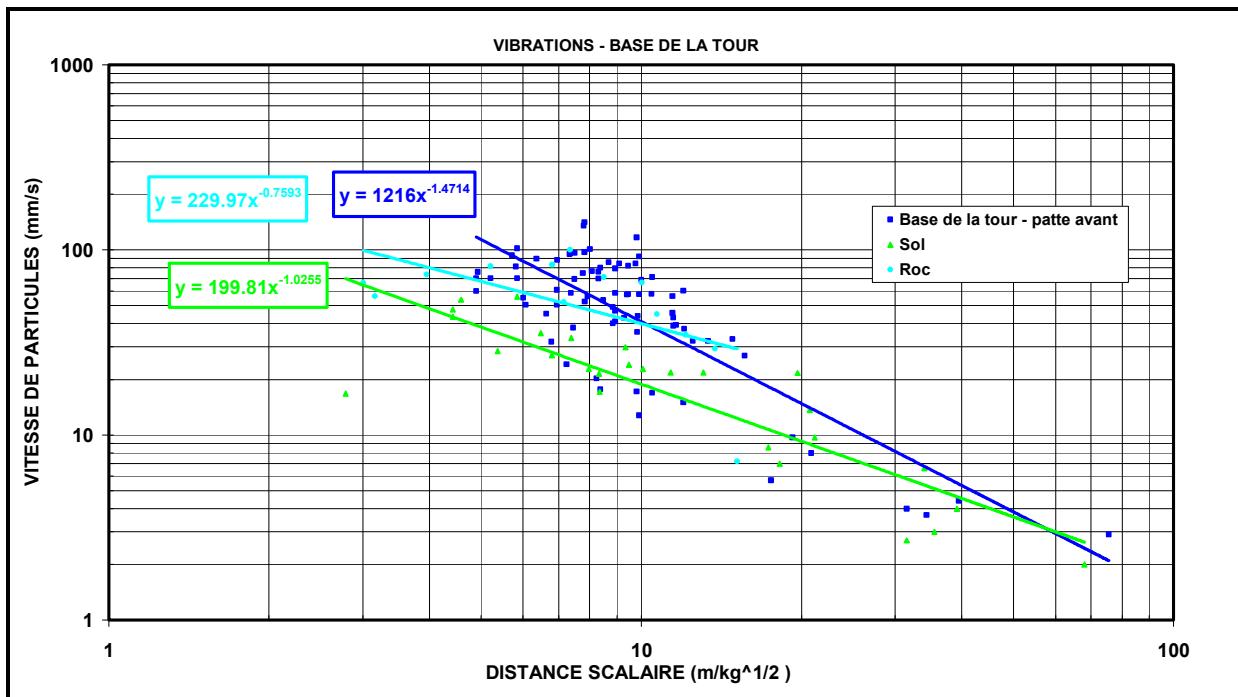


FIGURE 10

COMPARAISON ENTRE RÉSULTATS OBTENUS À LA BASE DE LA TOUR
ET CEUX OBTENUS AU SOL ET SUR LE ROC

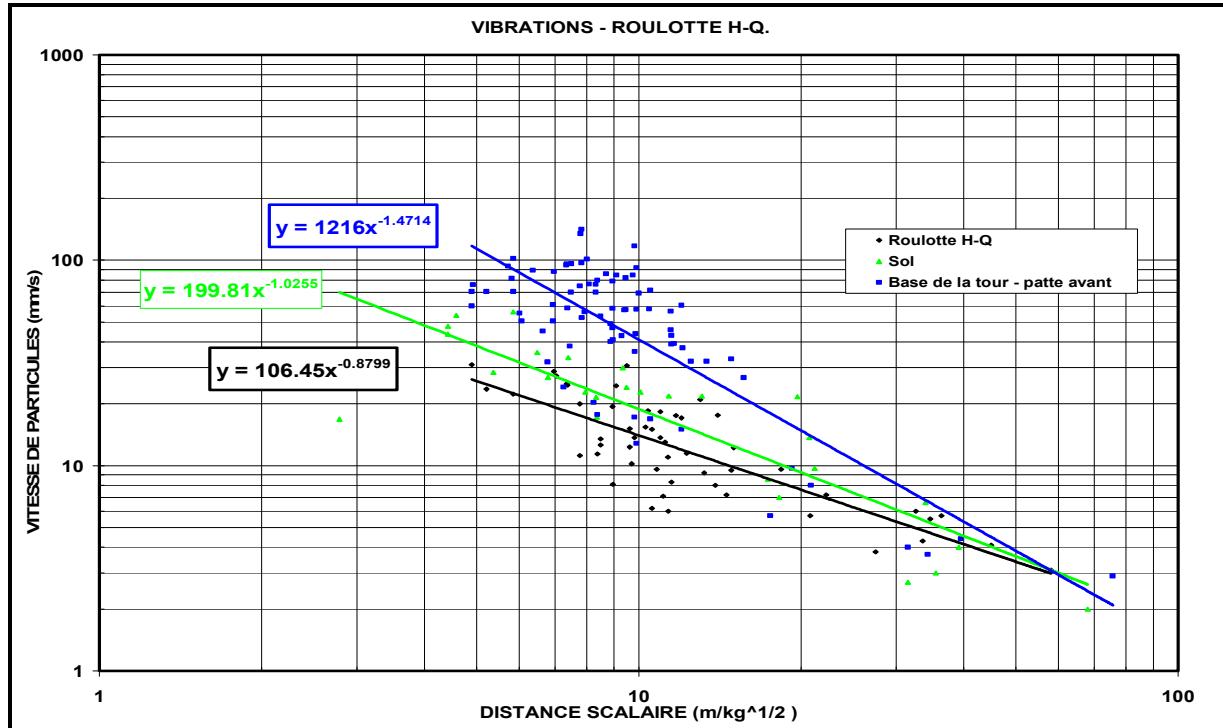


FIGURE 11

COMPARAISON ENTRE RÉSULTATS OBTENUS À LA BASE DE LA TOUR
ET CEUX OBTENUS AU SOL ET À LA ROULOTTE

5.4) Vibrations causées par le vent

Au cours des travaux de dynamitage, nous avons constaté que le vent pouvait engendrer des déplacements importants en haut de la tour. La hauteur de la tour est d'environ 35 mètres, et le capteur a été installé à 27,5 mètres. Le capteur installé permettait de faire un suivi des effets du vent. Le tableau 3 montre les résultats des événements déclenchés par le vent. Il est à noter que les déplacements maximaux mesurés sont dans le sens latéral et transversal.

Selon l'analyse des résultats, on peut constater que le vent peut engendrer des déplacements importants par rapport à l'effet des vibrations causées par les dynamitages. Par exemple, la journée du 1^{er} juin 2002 à 14h09, un déplacement latéral en haut de la tour de 7,70 mm a été enregistré. Ce déplacement représente la valeur la plus élevée mesurée pendant le projet. L'analyse des tirs qui ont causé des vibrations élevées (autour de 100 mm/s) en haut de la tour, montre un déplacement en moyenne de 0,37 mm (selon l'axe vertical). Le maximum était de 0,54 mm (selon l'axe vertical) enregistré le 15 juillet 2002. Donc, l'effet réel du déplacement de la tour causé par le vent est environ 20 fois plus élevé que le déplacement causé par les vibrations des dynamitages.

TABLEAU 3

**ENREGISTREMENTS DECLENCHÉS PAR LE VENT
HAUT DE LA TOUR**

Date	Heure	Latéral			Transversal			Vertical			Resultant (mm/s)	Son dB
		mm/s	Hz	Dépl mm	mm/s	Hz	Dépl mm	mm/s	Hz	Dépl mm		
2002-05-16	18h52	9.6	2.0	0.70	1.6	20.0	0.03	1.8	57.0	0.08	9.6	108
2002-05-16	20h35	20.5	1.7	2.20	17.6	1.8	1.50	1.4	57.0	0.08	21.6	100
2002-05-17	0h03	0.8	102.0	0.00	14.3	1.8	1.10	1.4	57.0	0.08	14.3	100
2002-05-22	13h23	10.6	128.0	0.06	15.0	1.8	1.30	1.6	51.2	0.08	15.1	100
2002-05-24	16h47	10.0	1.7	0.85	24.6	1.5	2.46	5.1	64.0	0.02	24.7	120
2002-05-24	19h11	28.7	1.5	2.84	67.2	1.7	6.09	5.0	51.2	0.02	67.2	117
2002-05-24	19h25	14.0	1.6	1.33	37.0	1.2	4.38	5.5	85.3	0.01	37.0	120
2002-06-01	12h28	58.4	1.2	6.49	45.7	1.7	4.32	3.7	51.2	0.02	72.0	120
2002-06-01	13h12	13.7	1.5	1.30	28.1	1.7	2.46	6.3	64.0	0.01	28.8	132
2002-06-01	13h42	52.2	1.7	4.88	34.0	1.7	3.07	5.1	64.0	0.02	52.2	123
2002-06-01	13h54	69.3	1.7	6.38	26.2	1.4	2.43	3.7	64.0	0.01	69.7	124
2002-06-01	14h09	72.5	1.5	7.70	33.2	1.7	3.10	4.0	64.0	0.02	72.5	129
2002-06-01	14h51	54.5	1.6	5.20	53.5	1.6	5.68	3.1	64.0	0.01	60.3	124
2002-06-01	20h08	59.2	1.4	6.96	28.7	1.8	2.52	4.3	51.2	0.02	62.6	127
2002-06-02	07h57	43.2	1.7	3.90	35.2	1.7	3.00	5.5	85.3	0.02	49.7	117
2002-06-23	15h37	5.1	1.6	0.42	7.2	2.0	0.57	1.4	51.2	0.01	8.2	115
2002-06-23	16h09	2.7	1.8	0.16	6.6	2.0	0.55	1.4	57.0	0.01	6.7	117
2002-06-23	16h59	8.8	1.8	0.78	9.6	1.8	0.83	2.3	57.0	0.01	12.3	104
2002-06-23	17h05	20.5	1.4	2.16	30.3	1.7	2.87	2.2	51.2	0.01	32.0	116
2002-06-26	12h55	12.5	1.8	1.05	17.2	1.6	1.54	2.2	51.2	0.01	17.2	114
2002-10-07	9h21	76.2	1.6	7.37	39.8	1.3	4.25	3.5	57.0	0.01	79.0	124
2002-10-07	10h48	33.0	1.6	3.10	16.4	2.0	1.29	4.7	57.0	0.01	34.8	122
2002-10-07	11h09	31.4	1.6	3.10	15.6	1.8	1.30	3.7	64.0	0.01	33.0	122
2002-10-07	11h23	32.4	1.8	2.65	28.3	1.7	2.54	3.7	57.0	0.01	37.6	131
2002-10-07	11h41	36.7	1.7	3.30	24.0	1.8	2.10	4.0	64.0	0.01	41.0	128

Finalement, le but principal de ce suivi était de s'assurer de l'intégrité de la tour et des installations d'Hydro-Québec et d'éviter des diminutions significatives de signaux par la tour. Le suivi des vibrations et de surpressions d'air pendant la période du 16 mai au 12 novembre 2002 a fait ressortir les résultats suivants:

- Le seuil de vibrations dans le devis du projet (25 mm/s) a été augmenté le 6 août 2002 à 50 mm/s car aucun dommage apparent n'avait été constaté sur la structure et les équipements, ainsi qu'aucune diminution de signal n'avait été enregistrée par Hydro-Québec lors de leurs visites au chantier;
- Malgré que les charges maximales aient été respectées par rapport à nos recommandations du 15 août 2002, les vibrations ont dépassé la limite de 50 mm/s à la base de la tour à plusieurs reprises. Selon nos observations et analyses, il y aurait eu une addition des ondes sismiques entre certaines charges étagées ou charges de pré découpage. GPR a par la suite proposé des modifications dans les paramètres de dynamitage afin de réduire ces additions d'ondes;
- Pendant le projet, GPR a remarqué que les déplacements en haut de la tour engendrés par le vent étaient plus importants que ceux causés par les vibrations des dynamitages;
- À la fin du projet, aucun dommage n'a été constaté sur les installations et les équipements de la tour de télécommunication d'Hydro Québec. De plus, le technicien d'Hydro Québec n'a constaté aucune diminution du signal pendant ces visites.

6) Conclusion

La réalisation d'une coupe de roc de cette envergure à proximité d'une tour de télécommunication n'aurait pu connaître le succès sans, évidemment, une bonne préparation et une bonne planification autant de la part du concepteur que de l'exécutant. De plus, de tels travaux exigent également une bonne collaboration de la part de tous les intervenants afin d'adapter les solutions retenues et de régler les petits problèmes qui peuvent survenir au fur et à mesure que la situation au chantier évolue.

Nous avons voulu également démontrer que même si la géologie est défavorable et que la pente optimale d'excavation ne peut être employée pour diverses raisons, il y a moyen de conforter les massifs rocheux pour les rendre plus stables et, dans le cas qui nous concerne, de s'assurer de la pérennité des installations en place. Ceci demande toutefois une bonne connaissance de la géologie structurale du site et un suivi en cours de réalisation afin d'être en mesure d'adapter les solutions retenues le cas échéant.

En conclusion, l'approche retenue par Castonguay Inc. pour effectuer l'excavation du roc dans le secteur de cette structure à protéger s'est avérée dans l'ensemble efficace. Le suivi des vibrations a permis, en cours de chantier, d'augmenter les seuils de tolérance préalablement établis au devis. Finalement l'analyse des résultats démontre que les mouvements générés par les éléments naturels comme le vent engendraient des déplacements beaucoup plus importants que ceux attribuables aux travaux à l'explosif.