

Comportement d'un couvert de glace soumis à une charge mobile



Le gouvernement du Québec, Ministère des Transports

Comportement d'un couvert de glace soumis à une charge mobile

Préparé par:

AECOM

4916 47th Street, Floor 3, GoGa Cho Building (PO Box 1259)

Yellowknife, NT, Canada X1A 2N9

www.aecom.com

Numéro de projet AECOM:

60240644

Date:

Novembre, 2012

MISE EN GARDE

Les informations contenues dans le rapport ci-joint (le « Rapport ») préparés par AECOM Canada Ltd. (« AECOM ») dans le cadre de la Convention d'Aide Financière No. 200988 (le « Contrat ») seront à l'usage exclusif du Gouvernement du Québec, Ministère des Transports (le « Client »).

AECOM a consacré des efforts professionnels raisonnables à la préparation du Rapport en tenant compte du temps et du budget disponible. Les conclusions d'AECOM représentent des jugements raisonnables en fonction de l'information dont AECOM disposait à l'époque de la préparation du Rapport, notamment celle fournie par le Client.

Le Rapport est susceptible de contenir des "prévisions". Ces prévisions peuvent être identifiées, entre autres, par l'utilisation de mots tels que « anticiper », « croire », « estimer », « s'attendre à », « avoir l'intention », « rechercher », « planifier », « projeter », « sera », « pourrait », « devrait », et toute autre expression similaire. Les prévisions reflètent les opinions, attentes, stratégies et les hypothèses d'AECOM en ce qui concerne les événements futurs en date de la préparation du Rapport et sont sujettes à des conditions économiques futures, et d'autres risques et incertitudes. Les résultats réels et/ou futurs pourraient différer considérablement de ceux énoncés dans ces prévisions en raison de divers facteurs, qu'AECOM ne peut contrôler ou prévoir.

Ni AECOM, ni sa société mère, ou une de ses sociétés affiliées, (a) ne donnent de garantie, expresse ou implicite, en ce qui concerne l'utilisation de toute information ou procédé décrits dans ce Rapport et/ou dans tout autre document qui seront préparés par AECOM dans le cadre du Contrat et (b) n'assument de responsabilité pour des dommages directs, indirects, ou spéciaux à l'égard de l'utilisation de toute information ou procédé décrits dans les documents qui seront préparés par AECOM dans le cadre de la préparation du Rapport et/ou du Contrat.

Aucune section ou partie du Rapport ne peut être retirée du document, reproduite, conservée sous forme électronique ou transmise sous quelque forme que ce soit à une tierce partie, à moins d'y être autorisée au préalable par AECOM, par écrit

AECOM ne s'engagera aucunement à, et n'acceptera aucune responsabilité à l'égard de toute tierce partie qui pourrait s'appuyer sur des informations contenues au Rapport, à moins d'y être autorisée au préalable par AECOM, par écrit.

Le 30 novembre 2012

Christian Therrien
Direction de l'environnement et de la recherche
Le gouvernement du Québec, Ministère des Transports
930, chemin Sainte-Foy, 6^e étage
Québec (Québec) G1S 4X9

**Objet : Comportement d'un couvert de glace soumis à une charge mobile
N/Réf. 60240644**

Monsieur,

AECOM Canada Ltd. (AECOM) est heureuse de soumettre au Ministère des Transports le rapport pour le projet cité en rubrique. Vous trouverez en pièce jointe le rapport complet dans les deux langues, français et anglais, comprenant une version électronique et cinq copies papier pour chacune des versions.

Ce rapport présente 1) les résultats des épreuves en chantier réalisées sur la route d'hiver de Tibbitt - Contwoyto aux Territoires du Nord-Ouest durant l'hiver 2012; 2) notre interprétation des processus physiques qui contrôlent le comportement d'un couvert de glace sujet à une charge mobile, et; 3) les recommandations pour des études supplémentaires.

Nous espérons que ce rapport soit à la hauteur de vos attentes et vous remercions pour votre collaboration et contribution dans ce dossier.

Nous resterons disponibles à votre convenance pour répondre à vos questions ou pour discuter de l'information présentée. Vous pourrez me rejoindre au (867) 873-6316, poste 22.

Veuillez agréer, Monsieur, l'expression de nos sentiments les meilleurs.

AECOM Canada Ltd.



Michel Lanteigne, M. Ing., P. Ing.,
Manager, Northwest Territories
michel.lanteigne@aecom.com

ML/jr
p.j. Rapport « Comportement d'un couvert de glace soumis à une charge mobile »

Distribution

# Copies papier	Électronique	Association / Compagnie
5	oui	Government of the Northwest Territories, Department of Transportation
3	oui	Government of Saskatchewan, Ministry of Transportation
5	oui	Le gouvernement du Québec, Ministère des Transports (versions anglaise)
5	oui	Le gouvernement du Québec, Ministère des Transports (version française)
3	oui	Tibbitt to Contwoyto Winter Road Joint Venture
3	oui	Nuna Logistics Ltd.
3	oui	RTL Robinson Enterprises Ltd

Révisions

# Révision	Par	Date	Version / Description des révisions

Rapport préparé par:



Michel Lanteigne, M.Eng., P.Eng.
 Manager, Northwest Territories
 AECOM Canada Ltd.

Rapport vérifié en
 Anglais par(*):

Gary Van Der Vinne, M.Sc., P.Eng.
 Principal
 Northwest Hydraulic Consultants Ltd.

(*) Étant donné que la version française de ce rapport est une traduction du rapport original préparé en langue anglaise, au cas de différences dans l'information présenté entre les deux rapports, le rapport en Anglais prime sur le rapport en Français.

Sommaire

La théorie des processus physiques qui contrôle le comportement d'un couvert de glace soumis à une charge mobile est basée sur le concept du « hydrodynamic wave » développé par le Conseil national de recherches Canada (CNRC). Ce concept, publié en 1971, stipule que :

“Un véhicule qui voyage sur un couvert de glace crée une vague dans l'eau sous le couvert. Cette vague se déplace à une vitesse qui dépend de la profondeur d'eau, de l'épaisseur du couvert et du coefficient d'élasticité de la glace. Si la vitesse du véhicule correspond à celle de la vague, la déflexion due au poids du véhicule renforce la déflexion due à la vague”.

Ce qui veut dire entre autres que :

- la vague dans l'eau doit posséder sa propre énergie, puisqu'elle se déplace à une vitesse différente de celle du véhicule;
- cette vague doit également posséder une très grande énergie, puisqu'elle peut déformer le couvert de glace.

Dans sa publication de 1971, le CNRC n'a pas présenté les résultats d'épreuves en chantier qui confirment la présence de ce type de vague dans l'eau. Après 1971, plusieurs chercheurs ont mesuré les déflexions du couvert soumis à une charge mobile, mais la présence d'une vague dans l'eau possédant une telle puissance n'a jamais été mesurée et/ou confirmée. Alors le concept de « hydrodynamic wave » est une théorie qui n'a jamais été prouvée.

En 2012, AECOM et Northwest Hydraulic Consultants (NHC) ont réalisé des épreuves en chantier pour déterminer les processus physiques qui entrent en jeu lorsqu'un couvert de glace est soumis à une charge mobile. Ce projet a été financé par les gouvernements du Québec, des Territoires du Nord-Ouest et de la Saskatchewan. Tibbitt-Contwoyto Winter Road Joint-Venture et Nuna Logistics Ltd. ont fourni divers équipements et supports logistiques.

Le programme d'épreuves en chantier a été réalisé sur la route d'hiver de Tibbitt-Contwoyto dans les Territoires du Nord-Ouest. Ce programme consistait à mesurer la réaction du couvert de glace et de l'eau lorsqu'un véhicule chargé passait près d'une station de mesures à différentes vitesses. Des essais ont été réalisés dans différentes profondeurs d'eau.

Dans ce rapport, AECOM présente les résultats de ces épreuves, l'interprétation de ces résultats, ainsi que les recommandations pour des études supplémentaires.

Lorsqu'un véhicule est placé sur un couvert de glace, le couvert s'enfonce dans l'eau comme un radeau jusqu'à ce que le poids d'eau déplacée soit égal au poids du véhicule (*le principe d'Archimède*). La glace est flexible alors en s'enfonçant, le couvert se plie pour former une déflexion en forme de bol sous le véhicule. Lorsque le véhicule avance, le bol avance avec le véhicule. En avançant, le bol déplace l'eau. L'eau revient après le passage du bol et le couvert revient à sa position originale.

En effet, le bol se comporte comme un « vaisseau » qui transporte le véhicule sur la surface de l'eau. Le comportement d'un vaisseau dans l'eau est régi par le principe de Bernoulli. Étant donné que la glace est flexible, la forme du vaisseau va changer en fonction des forces imposées. Ces forces changent avec la vitesse du véhicule.

Les résultats indiquent qu'en eau profonde (15.5 m) jusqu'à une vitesse de 17 km/h, la réaction de l'eau est comparable à la condition statique où le couvert est supporté par la pression hydrostatique de l'eau.

Au-dessus de 17 km/h, la réaction hydrodynamique de l'eau commence à entrer en jeu provoquant une réduction de pression sous le bol – telle que prévu par le principe de Bernoulli. En conséquence, le vaisseau s'enfonce plus profondément dans l'eau à la recherche de support.

Entre 38 et 44 km/h de vitesse en eau profonde (normalement considéré vitesse critique où les déflexions sont les plus grandes), la réaction du couvert et de l'eau sont en transition. Entre ces vitesses, le bol atteint sa profondeur maximale, une « bosse » apparaît dans le couvert devant le bol et la partie arrière du bol devient allongée. En même temps, une pointe de pression apparaît dans l'eau devant le bol suivie de fluctuations rapides de pression.

Lorsque la vitesse du véhicule augmente au-dessus de la zone de vitesse critique, les déflexions commencent à diminuer et la partie arrière du bol devient de plus en plus allongée. Par contre, la pointe de pression dans l'eau devant le bol ainsi que les fluctuations augmentent avec la vitesse.

Faisant une analogie avec un bateau, il semble que la vitesse critique pourrait être comparée à la vitesse de déplacement d'un bateau à déplacement ou à la vitesse de déjaugage d'un bateau planeur. Au-dessus de la vitesse critique, la pointe de pression devant le bol indique que la partie avant du bol voudrait demeurer en mode « planer », mais la forme allongée que le bol adopte indique que sa partie arrière demeure sous l'influence de l'eau. En fait, il semble que la force qui cause cette forme allongée pourrait être comparée à la force qui cherche à submerger l'arrière d'un bateau à déplacement lorsque celui-ci est poussé au-dessus de sa vitesse de déplacement. Les fluctuations de pression démontrent que l'eau n'arrive pas à suivre le contour du bol sous le couvert lorsque la pointe de pression devant le bol se dissipe, à cause de la vitesse.

En eau moins profonde, la vitesse critique est beaucoup moins élevée : 14.5 km/h dans 5.5 m de profondeur et 10 km/h dans 2 m de profondeur. Il semble que ceci serait dû à l'interférence du fond qui amplifierait l'effet Bernoulli. Il est intéressant de noter qu'un bateau naviguant en eau peu profonde est sujet à l'effet "squat"; un phénomène qui force un bateau à s'enfoncer plus profondément dans l'eau. La profondeur où l'interférence du fond entre en jeu pourrait être liée à la largeur du bol qui serait bien au-delà de 21 m de large.

Bien que les variations de pression qui se produisent sous le couvert lorsqu'un véhicule passe sont suffisantes pour modifier le support que l'eau apporte, ces variations de pression sont très petites: moins de 0.89 kPa ou 0.1 psi. Alors, il semblerait que ces variations de pression n'auraient aucune conséquence sur l'intégrité structurale d'un couvert de glace.

Un couvert de glace soumis à une charge mobile se briserait lorsque sa capacité en flexion serait excédée. Jusqu'à la vitesse critique, la flexion maximale se produit au fond du bol. Au-delà de la vitesse critique, la flexion maximale se produit dans la région de la bosse devant le bol. La vitesse critique semble présenter les pires conditions lorsque le bol atteint sa profondeur maximale et la bosse devant le bol atteint sa hauteur maximale. Alors, un couvert de glace soumis à une charge mobile pourrait se briser soit dessous ou devant le bol en fonction de la vitesse du véhicule.

Le concept de "hydrodynamic wave" suggère qu'une vague de très grande importance physique est formée dans l'eau sous une charge mobile et que cette vague normalement voyage à une vitesse différente de celle du véhicule. Le concept attribue l'augmentation des déflexions qui se produisent à la vitesse critique à un renforcement qui aurait lieu lorsque la vitesse de la vague coïncide avec la vitesse du véhicule.

Les résultats des épreuves en chantier indiquent que le bol formé dans un couvert de glace sous une charge mobile se comporte comme un vaisseau et que l'augmentation des déflexions qui se produisent près de la vitesse critique est prévue par le principe de Bernoulli. Les résultats confirment les conclusions du CNRC qu'indiquent que la profondeur d'eau a un effet sur la vitesse critique.

Par contre, bien que des courants soient sans doute produits alors que l'eau est déplacée et ensuite attirée après le passage du bol, aucune vague n'est produite et les très petites variations de pressions observées indiquent que très peu d'énergie est transférée dans l'eau. Par ailleurs, les perturbations au couvert de glace et à l'eau provoquées par le passage du véhicule voyagent avec le véhicule à n'importe quelle vitesse. En conséquence, il semble que le concept de « hydrodynamic wave » n'est pas valide.

L'objectif de ce projet de recherche est d'améliorer la compréhension des processus physiques qui entrent en jeu lorsqu'un véhicule voyage sur un couvert de glace pour permettre à l'industrie d'exploiter ce type de transport en sécurité et efficacité. Des études supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre ces processus physiques et pour s'assurer que les opérations s'alignent avec ces processus.

La vitesse autorisée sur les lacs au long de la route d'hiver de Tibbitt-Contwoyto est normalement de 25 km/h; avec réduction à 10 km/h en voyageant près des rives. Les résultats de cette étude indiquent qu'en respectant la vitesse autorisée, les véhicules voyagent à la vitesse critique et au-delà lorsque la profondeur d'eau est moins de 5.5 m et en voyageant près des rives. En conséquence, les résultats indiquent que la vitesse autorisée n'est pas adéquate pour maintenir les opérations en dehors de la zone de vitesse critique.

Les déflexions minimales semblent se produire lorsqu'un véhicule voyage à moins de 0.5 fois la vitesse critique ou au-delà de 2 fois la vitesse critique. Maintenir les opérations à 0.5 fois la vitesse critique semble peu pratique du point de vue opérationnel. Ceci exigerait une réduction de la vitesse autorisée, laquelle est déjà considérée très basse et augmenterait les coûts de transports. Par contre, une étude de faisabilité devrait être réalisée pour voir si la vitesse autorisée pourrait être augmentée.

Cette étude confirme l'opinion que la construction d'un virage sur un couvert de glace à l'approche des rives pour diriger la "hydrodynamic wave" en dehors de la trajectoire du véhicule n'est pas techniquement justifiée et devrait être abandonnée.

L'effet de la longueur des véhicules et de l'espacement entre les véhicules devrait être étudié. L'effet de la température ambiante sur la capacité d'un couvert de glace pour supporter une charge mobile devrait aussi être étudié. Finalement, l'effet de la température ambiante sur la vitesse critique devrait être étudié.

Table des matières

Mise en garde

Lettre de transmission

Distribution

Sommaire

	Page
1. Introduction	1
2. Programme d'épreuves	2
3. Résultats.....	3
3.1 Générale.....	3
3.2 Eau profonde.....	3
3.3 Eau peu profonde (près du bord)	4
4. Processus physiques	6
5. Discussion.....	10
6. Recommandations pour des études supplémentaires.....	12
7. Références	13

Liste des Figures

Figure A	Installation des équipements.....	2
Figure B	Principe de Bernoulli	6
Figure C	Vitesse de déplacement.....	7
Figure D	Distribution de pression hydrodynamique sous une surface qui plane sur l'eau.....	8

Liste des annexes

Annexe A Résultats

1. Introduction

Durant l'hiver 2012, AECOM et Northwest Hydraulic Consultants Ltd. ont réalisé un programme d'épreuves en chantier afin de mesurer la réaction du couvert de glace et de l'eau sous un véhicule passant près d'une station d'observation à différentes vitesses. Ce rapport présente les résultats du programme, l'interprétation des processus physiques qui entrent en jeu ainsi que les recommandations pour des études supplémentaires.

Le programme a été réalisé sur la route d'hiver de Tibbitt-Contwoyto aux Territoires du Nord-Ouest. Le coût du programme a été partagé entre :

- le Gouvernement des Territoires du Nord-Ouest, Département des Transports;
- le Gouvernement de la Saskatchewan, Ministère des Routes et Infrastructures, et;
- le Gouvernement du Québec, Ministère des Transports.

Des apports en nature ont été fournis par :

- Tibbitt-Contwoyto Winter Road Joint-Venture et Nuna Logistics Ltd. qui ont fourni un véhicule et divers supports logistiques.
- Northwest Hydraulic Consultants Ltd. qui a fourni de l'assistance technique et a passé les documents en revue.
- AECOM Canada Ltd. qui a dirigé la recherche, le développement et l'exécution du projet.

2. Programme d'épreuves

Le programme d'épreuves en chantier consistait à mesurer les déflexions dans le couvert de glace ainsi que les changements de pression dans l'eau sous un véhicule qui passait près d'une station de mesures à différentes vitesses. Le programme a été réalisé sur le lac Ross (en eau profonde) et sur le lac Waite (en eau peu profonde). La première série de tests a eu lieu du 26 au 27 février 2012 et la deuxième du 20 au 21 mars 2012.

À la station de mesures, un trou de 200 mm de diamètre a été foré dans le couvert. La profondeur d'eau et l'épaisseur du couvert ont été mesurées. Un tuyau de fer de 25 mm de diamètre (interne) a été descendu dans le trou en travers d'un centreur et a été poussé dans le fond du lac pour servir de point de référence, tel qu'illustré dans la Figure A. Un capteur de déplacement rétractable avec précision de +1.0 mm a été attaché – un bout au couvert et l'autre au tuyau afin de mesurer les déflexions du couvert relatives au fond du lac. Un capteur de pression d'eau avec précision de ± 0.8 mm a été fixé sur le tuyau à environ 0.5 m sous la surface de l'eau pour mesurer les changements de pression relatifs au fond du lac. Les données de ces deux capteurs ont été saisies à intervalles de 0.1 second (10 Hz) par un enregistreur avec horloge interne.

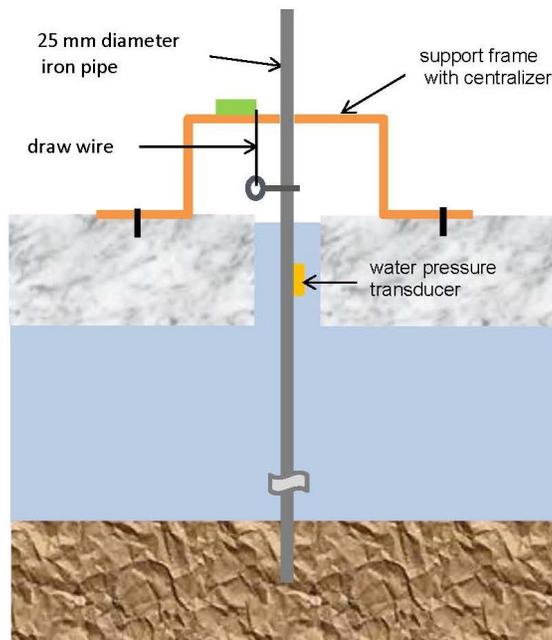


Figure A Installation des équipements

La station de mesure était normalement installée à 3.5 m de distance du centre de la voie d'essais. Le 21 mars, une série d'essais a été réalisée où la voie d'essais était centrée à 7 et 10.5 m de distance de la station de mesures.

La position du véhicule était suivie par GPS. Un détecteur de proximité qui enregistrait le passage du véhicule à la station de mesure a été utilisé pour synchroniser l'horloge du GPS avec celle de l'enregistreur de données.

Les essais ont généralement été réalisés avec le véhicule allant dans les deux directions, en incréments de 5 km/h. Le véhicule consistait d'un camion-citerne de 28,000 KG (masse brute). Un camion semi-remorque a été utilisé durant la dernière journée de la deuxième série d'essais.

Pour la deuxième série d'essais, un "Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)" a été installé sous le couvert de glace pour mesurer la vitesse et la direction des courants d'eau. Le ADCP a été installé dans un deuxième trou foré dans le couvert à environ 1 m de distance du premier.

3. Résultats

3.1 Générale

Les résultats d'essais en chantier sont présentés dans l'**Annexe A**. Les figures 1 à 10 présentent les mesures de déflexions et de pressions d'eau contre la distance pour différentes vitesses du véhicule.

L'axe vertical sur les graphiques présente l'élévation du couvert et la pression d'eau en millimètres. L'axe horizontal présente la distance relative à la station de mesures où le véhicule était situé lorsque ces mesures ont été captées.

Par exemple, les résultats indiqués à (-) 100 m sur l'axe horizontal ont été obtenus lorsque le véhicule était situé à 100 m avant la station de mesures. Les résultats indiqués à (+) 100 m sur l'axe horizontal ont été obtenus lorsque le véhicule était situé à 100 m après la station de mesures.

Le centre du véhicule est situé à zéro sur l'axe horizontal. Les essais ont été réalisés avec le véhicule allant dans les deux directions. Par contre, tous les résultats sont orientés tel que le véhicule voyage de droite à gauche.

En eau profonde où les conditions sont relativement uniformes, les résultats peuvent être considérés comme étant représentatifs des déflexions et pressions d'eau au long de la voie d'essai, avec le véhicule situé au zéro sur l'axe horizontal.

Par contre, ceci n'est pas le cas pour les essais réalisés au bord du lac où la profondeur d'eau varie le long de la voie d'essai. Par exemple, à 200 m de la station de mesures en direction du bord, le couvert reposait au fond du lac. Alors, ces résultats représentent les réactions obtenues à la station de mesures seulement.

3.2 Eau profonde

D'après les résultats obtenus dans 15.5 m d'eau (**Figure 1**, Annexe A), jusqu'à la vitesse de 17 km/h, la déflexion du couvert varie de 10 à 12 mm et la pression d'eau demeure constante. Le bol formé sous le véhicule est relativement symétrique par rapport à la position zéro sur l'axe horizontal. Par contre, le véhicule n'est pas centré dans le bol, mais est situé un peu à l'avant du centre. Le passage du véhicule cause des perturbations dans le couvert et dans l'eau sur une distance de 80 à 100 m.

Lorsque la vitesse du véhicule augmente au-dessus de 17 km/h, la pression d'eau sous le bol commence à diminuer et à 25 km/h la profondeur du bol commence à augmenter.

À 38 km/h, une « bosse » apparaît dans le couvert immédiatement derrière le bol et la pression d'eau commence à fluctuer rapidement à cet endroit.

À 44 km/h, la bosse à l'arrière du bol a disparu, mais une autre a maintenant apparu devant le bol et les fluctuations de pression d'eau à l'arrière du bol se répandent sur une plus grande distance. La pente de la partie avant du bol devient plus raide et l'arrière plus allongé. Une pointe de pression commence à se développer devant le bol. La courbe de pression d'eau et celle des déflexions se suivent de très près. La déflexion du couvert (profondeur du bol) est à son maximum de 22 mm.

Au-dessus de 44 km/h, les courbes de déflexion et de pression chacune ont adoptées une forme définie qui va changer avec la vitesse comme suit:

- Dans le couvert de glace: la pente devant du bol devient de plus en plus raide et l'arrière du bol de plus en plus allongé. La position du véhicule avance de plus en plus vers l'avant du bol. La bosse dans le couvert devant le bol prend plus d'importance et est précédée de petites ondulations. Lorsque la vitesse augmente au-delà de 55 km/h, les déflexions commencent à diminuer et le bol continue de s'allonger.
- Dans l'eau: la pointe de pression devant le bol devient plus grande que la hauteur de la bosse dans le couvert à cet endroit. À 49 km/h, cette pointe de pression est 2 fois plus haute que la bosse dans le couvert. À 79 km/h, elle est 5 fois plus haute. Les fluctuations de pression à l'arrière du bol deviennent aussi plus importantes et à 52 km/h, elles ont migré vers l'avant pour tomber immédiatement après la pointe de pression.

Les fluctuations de pression qui se produisent devant la pointe de pression se comportent différemment de celles qui se produisent derrière. Premièrement, la fréquence des fluctuations qui se produisent devant la pointe de pression est moins grande. Deuxièmement, la grandeur des fluctuations qui se produisent devant la pointe de pression demeure constante, même diminuent un peu lorsque la vitesse augmente. Par contre, les fluctuations qui se produisent derrière la pointe de pression continuent d'augmenter avec la vitesse et semblent grandir au même taux que la pointe de pression.

Au-delà de 44 km/h, le passage du véhicule cause des perturbations dans le couvert et dans l'eau en particulier sur une distance de plus de 200 m devant et derrière le véhicule.

La **Figure 5** présente les résultats obtenus dans 5.5 m de profondeur d'eau. Les graphiques des deux premières rangées en haut de la Figure ont été obtenus en utilisant un camion-citerne chargé à 16,700 kg allant dans les deux directions. La réaction du couvert et de l'eau obtenue à 14.5 km/h de vitesse semblent comparable aux réactions obtenues à 38 km/h de vitesse dans 15.5 m de profondeur d'eau (Figure 1). Les réactions obtenues à 20 km/h semblent comparable à celles obtenues à 44 ou 49 km/h dans 15.5 m de profondeur d'eau (Figure 1) – quand on considère les pointes de pression en particulier.

Les deux graphiques de la rangée en bas de la Figure 5 présentent les résultats obtenus sous deux véhicules commerciaux.

3.3 Eau peu profonde (près du bord)

La **Figure 2** présente les résultats obtenus dans 2.0m de profondeur d'eau en utilisant le camion-citerne qui se dirigeait du bord vers le centre du lac. Ces résultats indiquent que les plus grandes déflexions (20 mm) ont été obtenues à une vitesse de 9 km/h. Les déflexions diminuent lorsque la vitesse augmente. À 17 km/h, les déflexions sont moins de 10 mm.

La **Figure 3** présente les résultats obtenus au même endroit que ceux de la Figure 2, mais ici le camion se dirige du centre du lac vers le bord. Ces résultats indiquent que les plus grandes déflexions (30 mm) ont été obtenues à 12 km/h de vitesse. Les déflexions diminuent lorsque la vitesse augmente. À 20 km/h, les déflexions sont moins de 10 mm.

La **Figure 4** présente les résultats obtenus en utilisant quatre véhicules commerciaux qui se dirigent du centre du lac vers le bord à environ 10 km/h de vitesse.

Les **Figures 6 à 10** présentent les résultats obtenus en utilisant un véhicule de type semi-remorque chargé à 31,120 kg. La station de mesures était installée en 2.1 m de profondeur d'eau.

Dans la **Figure 6**, le véhicule se dirige du bord du lac en direction du centre. La déflexion maximale de 18 mm est obtenue à 7.6 km/h de vitesse. À 20 km/h, les déflexions sont moins de 10 mm.

Dans la **Figure 7**, le véhicule se dirige du centre du lac en direction du bord. La déflexion maximale de 25 mm est obtenue à 12 km/h de vitesse. À 17 km/h, les déflexions sont moins de 10mm. À 6.3 km/h, la pression d'eau n'a pas changé.

Dans la **Figure 8 et 9**, la voie d'essais est centrée à 7 m de la station de mesures. Dans la **Figure 8** le véhicule se dirige du bord du lac en direction du centre; dans la **Figure 9**, le véhicule se dirige du centre du lac en direction du bord.

Dans la **Figure 10**, la voie d'essais est centrée à 10.5 m de la station de mesures. Pour les résultats présentés dans les deux premières rangées, le véhicule se dirige du bord du lac en direction du centre. Pour les résultats présentés dans la rangée du bas, le véhicule se dirige du centre du lac en direction du bord.

Les résultats présentés dans les **Figures 6 à 10** indiquent que la réaction du couvert et de l'eau à 10.5 m de distance de la station de mesures est similaire à la réaction obtenue à 3.5 m de distance, ce qui indique que le bol est bien au-delà de 21 m de largeur.

4. Processus physiques

Le couvert de glace se plie sous le poids du véhicule pour former une déformation en forme de bol sous le véhicule. Lorsque le véhicule avance, le bol avance avec le véhicule. En avançant, le bol rencontre de la résistance, tel que démontré par le fait que le véhicule n'est pas centré dans le bol mais est situé en avant du centre. La forme allongée que le bol adopte lorsque la vitesse du véhicule augmente, offre un élément additionnel à l'appui de ce point.

Pour permettre au bol d'avancer, le couvert de glace doit continuellement bouger et se plier sous le passage du véhicule. Une partie de l'énergie produite par le moteur du véhicule sera consommée à surmonter la raideur et l'inertie du couvert pour le faire plier.

En avançant, le bol doit aussi déplacer l'eau. L'eau revient après le passage du bol, alors que le couvert revient à sa position originale. Effectivement, le bol se comporte comme un « vaisseau » qui transporte le véhicule sur la surface de l'eau. Une partie additionnelle de l'énergie produite par le moteur du véhicule sera consommée pour combattre l'inertie de l'eau ainsi que la friction entre l'eau et le couvert.

Les résultats indiquent qu'en eau profonde (Figure 1, Annexe A) jusqu'à la vitesse de 17 km/h, à l'exception du fait que le véhicule ne se trouve pas devant le centre du bol, la réaction du couvert et de l'eau est comparable à la condition statique où le couvert est supporté par la pression hydrostatique de l'eau.

Lorsque la vitesse augmente au-delà de 17 km/h, la pression d'eau commence à diminuer sous le bol. En conséquence, le bol s'enfonce plus profondément à la recherche de support.

Cette réduction de pression qui se produit sous le bol lorsque la vitesse du camion augmente est en accord avec le principe de Bernoulli qui stipule que: « dans un flux de fluide sans viscosité, une accélération se produit simultanément avec la diminution de la pression ».

Le principe de Bernoulli est illustré dans la Figure B à droite. La vitesse du fluide (ou de l'air) augmente lorsqu'il traverse la partie réduite du tuyau, ce qui produit une réduction de pression à cet endroit.

Dans la Figure A, la coque d'un bateau a été insérée dans la partie supérieure de la section réduite du tuyau, et l'aile d'un avion dans la partie inférieure pour illustrer l'application du principe.

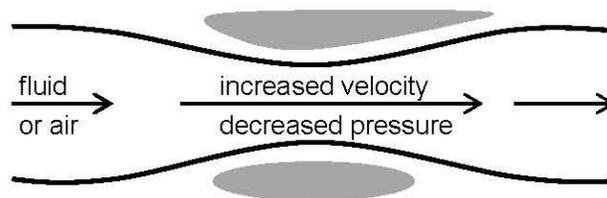


Figure B Principe de Bernoulli

Entre 38 et 44 km/h, la réaction du couvert et de l'eau sont en transition. Entre ces vitesses, le bol atteint sa profondeur maximale, une « bosse » apparaît dans le couvert devant le bol et la partie arrière du bol devient allongée. En même temps une pointe de pression apparaît dans l'eau devant le bol, suivie de fluctuations rapides de pression. Au-delà de 44 km/h, les courbes de déflexion et de pression ont adopté une forme définie qui va changer avec la vitesse.

Le domaine d'architecture navale offre un aperçu des processus qui se produisent ici. La description de bateaux avec deux formes de coques est présentée ci-dessous:

Bateau à déplacement

Un bateau avec coque à déplacement flotte dans l'eau. Lorsqu'elle est en cours, une coque à déplacement déplace l'eau lorsqu'elle s'approche. L'eau revient lorsque le point le plus grand de la coque est passé.

Pour réduire sa résistance, une coque à déplacement est conçue de façon à minimiser les perturbations dans l'eau. Elle fend l'eau avec son étrave (devant). L'eau ensuite suit ses courbes arrondies jusqu'à sa poupe (arrière).

Un bateau avec coque à déplacement doit: 1 – déplacer l'eau; et 2 – combattre la friction entre l'eau et sa coque. Ceci cause des perturbations dans l'eau qui résulte dans la formation d'un système de vagues complexe qui se propagent en différentes directions. En particulier, un de ses systèmes de vagues se propage le long de la coque du bateau.

Lorsque la vitesse du bateau augmente, la distance entre les vagues qui se propagent le long de sa coque augmente aussi, jusqu'au point où son étrave et sa poupe sont supportées au sommet de deux vagues successives, et son centre se retrouve dans la zone de basse pression dans le creux de la vague. Cette vitesse est appelée « vitesse de déplacement », illustré ci-dessous dans la Figure C et varie avec la racine carrée de la longueur de la coque.

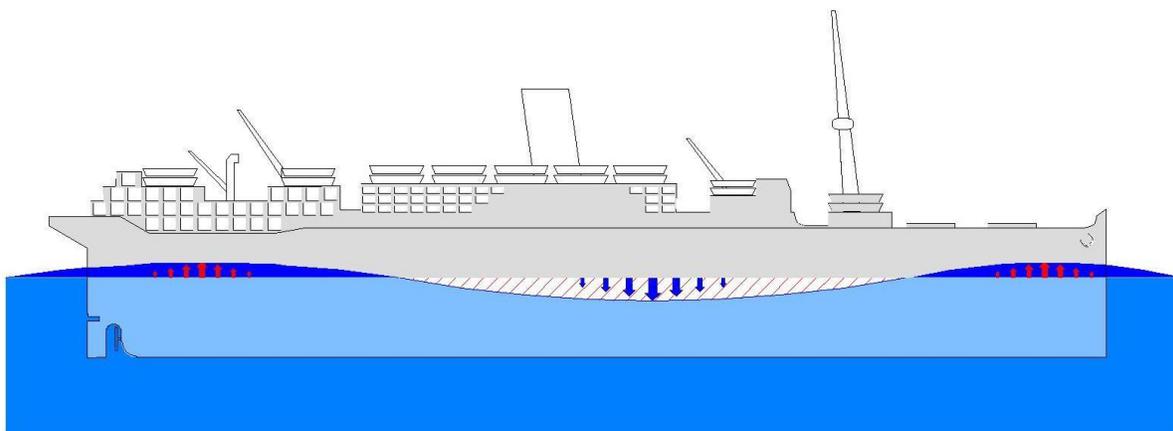


Figure C Vitesse de déplacement

Lorsqu'une coque à déplacement est poussée au-delà de sa vitesse de déplacement, la vague d'étrave reste sous son étrave, mais la vague arrière se forme plus loin derrière sa poupe, plaçant la poupe dans le creux de la vague – une zone de basse pression qui cherche à enfoncer sa poupe de plus en plus lorsque la vitesse augmente. Ce processus limite la vitesse qu'une coque à déplacement peut atteindre « économiquement ». Alors, à cause de sa forme, une coque à déplacement devient victime de son propre système de vagues.

Bateau planeur

La coque d'un bateau planeur est plutôt plate et se termine avec une traverse verticale. À sa vitesse de déplacement, un bateau planeur est très inefficace alors que les lignes d'eau cherchent à suivre sa forme et à monter le long de sa traverse. Cependant, lorsque sa vitesse augmente au-delà de sa vitesse de déjaugement, les lignes d'eau se détachent à sa traverse, ce qui dégage la coque de l'influence de l'eau, lui permettant de monter à la surface.

La Figure D présente la distribution de pression hydrodynamique sous une surface qui plane sur l'eau.

La grandeur de la force qui supporte une surface qui plane sur l'eau dépend de sa planéité, son angle d'attaque et de sa vitesse. En particulier, la force de support augmente avec la vitesse.

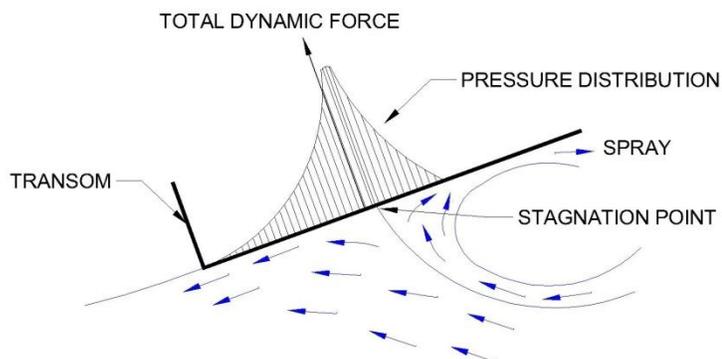


Figure D Distribution de pression hydrodynamique sous une surface qui plane sur l'eau

Pour revenir aux résultats, il semble que la zone de transition entre 38 et 44 km/h (vitesse critique) serait comparable à la vitesse de déplacement d'un bateau à déplacement ou à la vitesse de déjaugement d'un bateau planeur.

Au-dessus de la vitesse critique, il semble que la pointe de pression qui se produit devant le bol serait comparable à la distribution de pression hydrodynamique sous une surface planante. Étant donné que la pression hydrodynamique augmente avec la vitesse, il n'est pas surprenant de constater que la grandeur de la pointe de pression augmente avec la vitesse et que la grandeur des déflexions diminue. Les fluctuations rapides de pression qui suivent la pointe de pression démontrent que l'eau n'arrive pas à suivre le contour du bol sous le couvert pendant que la pointe de pression devant le bol se dissipe, due à la vitesse.

Il semble que la force responsable pour la forme allongée que le bol adopte lorsque la vitesse augmente pourrait être comparée à la force qui cherche à submerger la poupe d'un bateau à déplacement lorsque celui-ci est poussé au-delà de sa vitesse de déplacement. Les résultats indiquent que la pression moyenne est négative dans cette région.

Les fluctuations de pression qui se produisent devant la pointe de pression ont une fréquence différente de celles qui se produisent derrière, ce qui indique que ces fluctuations sont causées par des processus différents (la fréquence est fixée par le générateur).

Dans l'absence d'information relative aux courants, on assume que les fluctuations de pression qui se produisent devant la pointe de pression seraient causées par l'extrémité avant du bol qui est droit et aurait tendance à pousser l'eau vers l'avant plutôt que de la trancher. Nous remarquons aussi que les fluctuations de pression qui se produisent devant la pointe de pression sont beaucoup moins grandes que celles qui se produisent derrière et atteignent un maximum à une vitesse de 60 km/h.

Il semble que la bosse qui se produit dans le couvert devant le bol pourrait être attribuée à la raideur du couvert et serait due à l'arrondissement de la courbe qui se produit devant la pente raide de la partie avant du bol.

Les résultats obtenus dans 2 m de profondeur d'eau indiquent que la vitesse critique en eau peu profonde est beaucoup plus basse qu'en eau profonde; environ 10 km/h comparé à environ 40 km/h dans 15.5 m d'eau.

Cette situation peut être modélisée en suspendant un objet cylindrique (comme un contenant de peinture de 4 litres) tel qu'il puisse se balancer librement à environ 40 mm d'un mur. Si on souffle de l'air (d'un compresseur) entre l'objet et le mur, on s'aperçoit que l'objet est attiré vers le mur.

Si l'objet représente le bol et le mur représente le fond du lac, on peut imaginer que la même force va chercher à attirer le bol vers le fond en eau peu profonde. Ce phénomène est en accord avec le principe de Bernoulli.

Il est intéressant de mentionner qu'un bateau naviguant en eau peu profonde est sujet à l'effet « squat », un phénomène qui force un bateau naviguant en eau peu profonde de s'enfoncer plus profondément dans l'eau. Plusieurs navires se sont échoués à cause de l'effet squat, dans des tirants d'eau qui auraient été suffisants en haute mer.

L'effet « squat » est environ proportionnel à la racine carrée de la vitesse du bateau. Alors, en diminuant la vitesse par un facteur de deux, l'effet « squat » est réduit d'un facteur de quatre.

5. Discussion

L'approche empirique développée par le CNRC pour déterminer la charge sur un couvert de glace d'une épaisseur particulière qui peut être supportée en toute sécurité a contribué de façon importante au développement de routes d'hiver pour accéder aux sites isolés. Par contre, il semble que le concept de "hydrodynamic wave" qui a été suggéré pour expliquer le comportement d'un couvert de glace soumis à une charge mobile n'est pas valide.

Les résultats de cette étude indiquent que le bol formé dans le couvert sous un véhicule se comporte comme un vaisseau qui se déplace à la surface de l'eau. Le comportement d'un vaisseau qui se déplace à la surface de l'eau est régi par le principe de Bernoulli.

Les mesures obtenues dans 15.5 m d'eau indiquent que la réaction hydrodynamique de l'eau est mobilisée entre les vitesses de 17 et 25 km/h. La réduction de pression d'eau qui se produit sous le bol lorsque la vitesse augmente au-delà de 17 km/h est prévue par le principe de Bernoulli.

La vitesse autorisée sur les lacs de la route d'hiver de Tibbitt-Contwoyto est de 25 km/h, avec une réduction à 10 km/h sur les bords des lacs. À 25 km/h en eau profonde, le bol formé sous le véhicule est en mode de déplacement. C'est à cette vitesse que la réaction hydrodynamique de l'eau commence à entrer en jeu et que la déflexion du couvert (profondeur du bol) commence à augmenter. Alors, ceci est la vitesse idéale en eau profonde, particulièrement pour les charges lourdes parce qu'à cette vitesse la déflexion du couvert est minimale.

Par contre, les mesures obtenues dans 5.5 m d'eau indiquent que la vitesse critique était de 14.5 km/h (Figure 5). De plus, les mesures obtenues dans 2 m d'eau près du bord d'un lac indiquent que la vitesse critique était d'environ 10 km/h.

Alors, il semble que:

- 1) l'effet Bernoulli est très sensible à la profondeur d'eau, et;
- 2) la vitesse autorisée n'est pas adéquate.

La profondeur d'eau où l'effet Bernoulli entre en jeu pourrait être liée à la largeur du bol, qui d'après les résultats, serait bien au-delà de 21m de largeur.

Les résultats indiquent que les variations de pression d'eau qui se produisent sous le bol sont suffisantes pour modifier le support que l'eau apporte au couvert, et ainsi, affecte la grandeur des déflexions. Par contre, les variations de pressions les plus grandes qui ont été observées durant le programme d'épreuves étaient de 70mm (équivalent à 0.68 kPa ou 0.1 psi); alors, il semble que ces variations de pression sont trop petites pour avoir un effet sur l'intégrité structurale d'un couvert de glace.

Au-delà de la vitesse critique, il semble que les déflexions ne sont pas affectées par les fluctuations de pressions, mais sont contrôlées par les pressions moyennes.

Un couvert de glace soumis à une charge mobile se briserait lorsque sa capacité en flexion serait excédée. Étant donné que le couvert est flexible, il se plie en fonction des forces qui agissent sur lui et ces forces changent avec la vitesse du véhicule.

Jusqu'à la vitesse critique, la flexion maximale se produit au fond du bol. Au-delà de la vitesse critique, la flexion maximale se produit dans la région de la bosse devant le bol. La vitesse critique semble présenter les pires conditions lorsque le bol atteint sa profondeur maximale et la bosse devant le bol atteint sa hauteur maximale.

Alors, un couvert de glace soumis à une charge mobile pourrait se briser dessous ou devant le bol en fonction de la vitesse du véhicule.

En eau profonde, jusqu'à 25 km/h les déflexions sont d'environ 11mm. Près de la vitesse critique, ces déflexions doublent à 22 mm. Au-delà de 52 km/h, les déflexions diminuent avec une augmentation de vitesse jusqu'à 11 mm à 79 km/h. Alors, les déflexions obtenues à 79 mm sont équivalentes à celles obtenues à 25 km/h.

Les résultats obtenus au bord d'un lac dans 2 m d'eau indiquent que lorsque le véhicule se dirige du centre du lac vers le bord, les déflexions sont plus importantes que lorsqu'il se dirige dans l'autre direction. Par contre, les déflexions étaient moins de 10mm lorsque le véhicule allait au-delà de 20 km/h, dans les deux directions.

Les déflexions les moins grandes semblent se produire lorsque le véhicule voyage soit à la moitié de la vitesse critique ou à deux fois de la vitesse critique.

Contrôler la vitesse telle que les véhicules voyagent à la moitié de la vitesse critique est difficilement concevable. Ceci demanderait d'avoir les détails de bathymétrie de tous les lacs le long de la route, de gérer un grand nombre de panneaux de signalisation, et de réduire la vitesse qui est déjà considérée très basse – ce qui augmenterait les coûts de transports.

Par contre, quand on considère que les véhicules voyagent déjà à la vitesse critique et au-delà sans problèmes, il semble que la vitesse autorisée pourrait être augmentée sans compromettre la sécurité. Des études de faisabilité devraient être réalisées avant que cette solution soit mise en effet.

Cette étude confirme l'opinion que la construction d'un virage sur un couvert de glace à l'approche des rives pour diriger la "hydrodynamic wave" en dehors de la trajectoire du véhicule n'est pas techniquement justifiée et devrait être abandonnée.

6. Recommandations pour des études supplémentaires

Cette étude a été entreprise afin d'améliorer la compréhension des processus physiques qui entrent en jeu lorsqu'un véhicule voyage sur un couvert de glace pour permettre à l'industrie d'exploiter ce type de transport en sécurité et efficacité. Des études supplémentaires devraient être réalisées afin de mieux comprendre ces processus physiques et pour s'assurer que les opérations s'alignent avec ces processus.

- 1) La relation entre la profondeur d'eau et la vitesse critique devrait être étudiée. Il semble que l'effet Bernoulli est amplifié lorsque la profondeur d'eau diminue.
- 2) Une étude de faisabilité devrait être complétée pour voir si la vitesse autorisée pourrait être augmentée. Si les véhicules voyagent déjà à la vitesse critique et au-delà sans problèmes, il semble que ceci justifie une telle étude.
- 3) L'effet de la longueur des véhicules et de l'espacement entre les véhicules devrait être étudié.
- 4) Étant donné que la raideur de la glace dépend de sa température, des essais devraient être complétés dans les températures extrêmes afin de vérifier si la température ambiante a une influence sur le comportement d'un couvert de glace soumis à une charge mobile.
- 5) L'effet des mouvements thermiques qui se produisent dans le couvert devrait être étudié. Étant donné que la partie inférieure du couvert est continuellement en contact avec l'eau, sa température est constante à 0 °C et n'est pas sujet aux mouvements thermiques. Par contre, l'effet de contraction et d'expansion de la partie supérieure du couvert va créer des forces de tension et de compressions dans sa partie inférieure. Lorsque la température ambiante diminue, on observe des fissures de tension à la surface du couvert. Une étude devrait être réalisée pour voir si une augmentation de température ambiante cause des fissures de tensions dans la partie inférieure du couvert, ce qui réduirait sa capacité portante.
- 6) La direction et la vitesse des courants d'eau qui sont créés par le passage du bol devraient être étudiées.

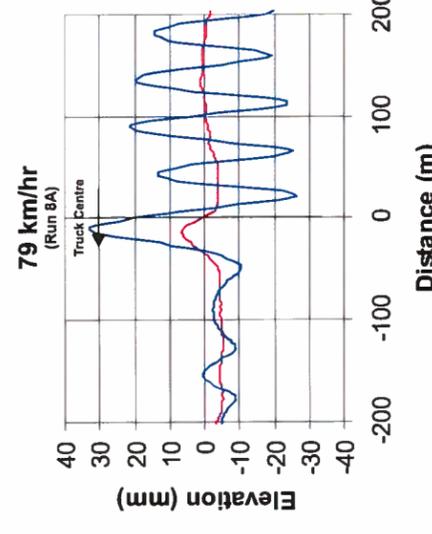
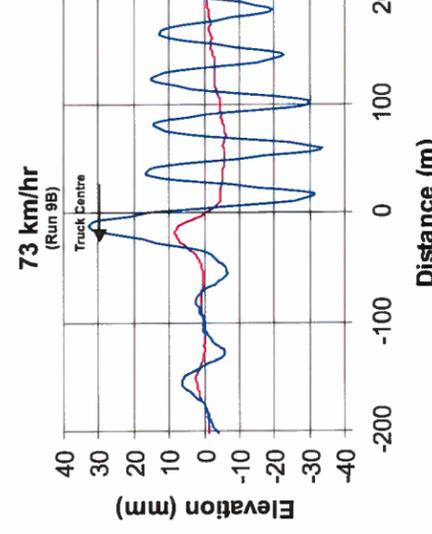
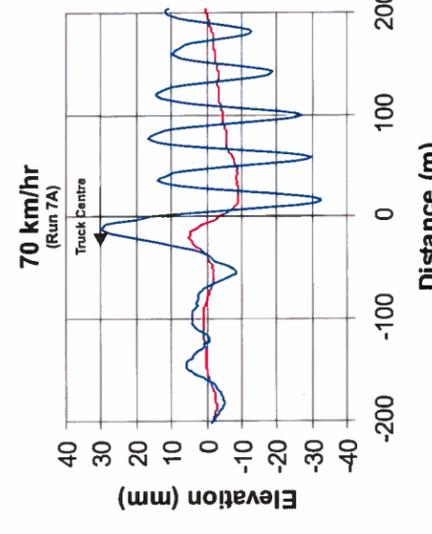
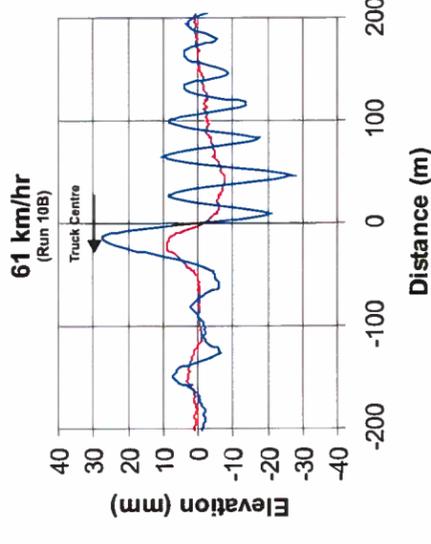
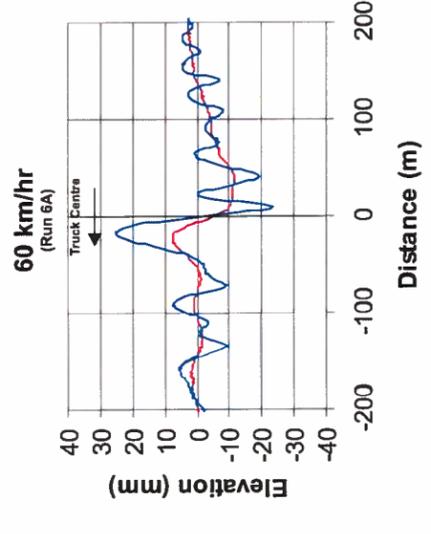
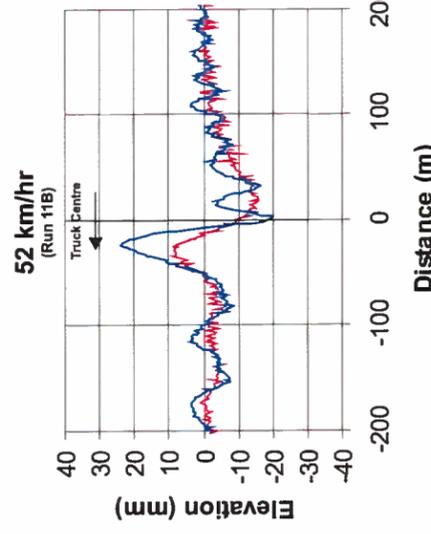
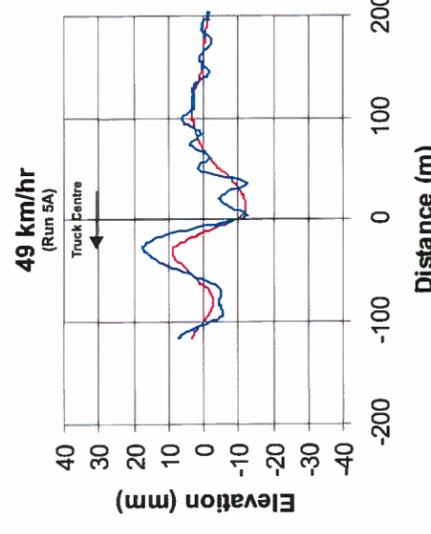
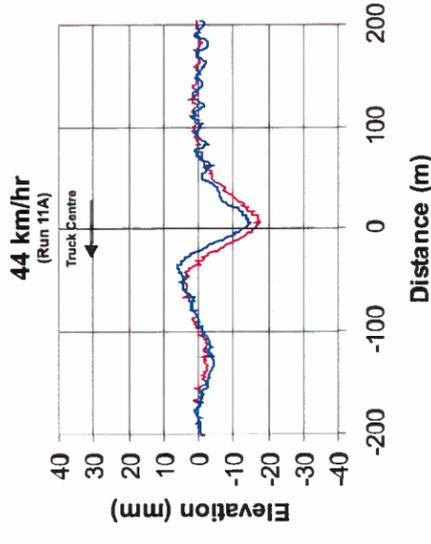
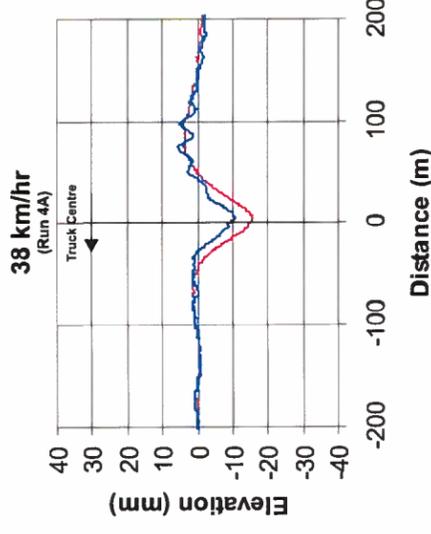
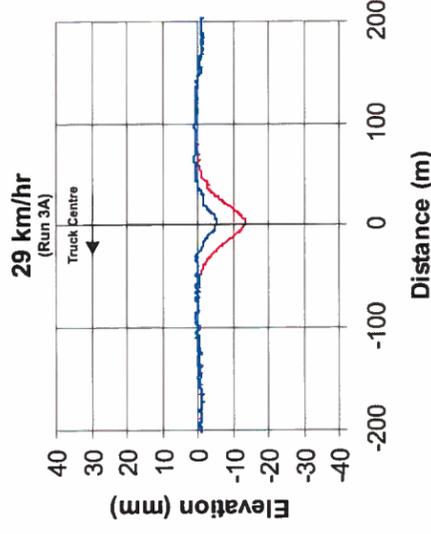
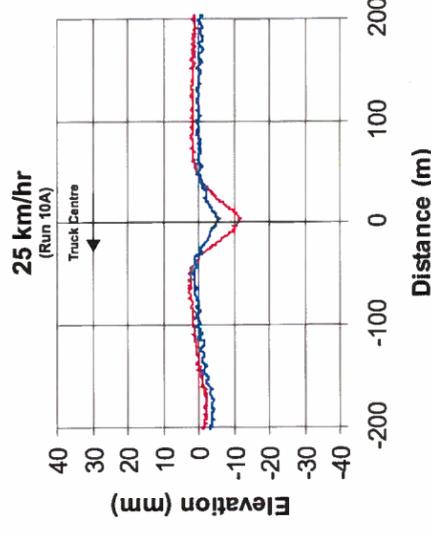
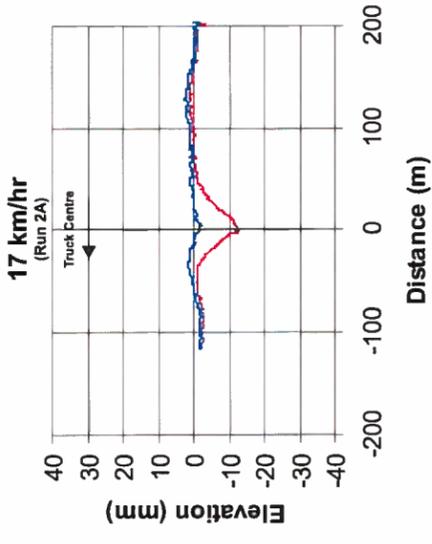
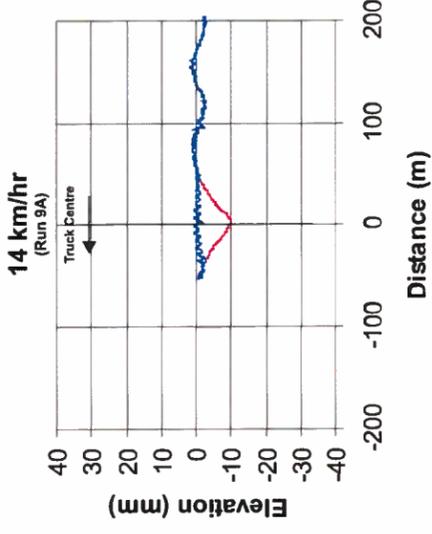
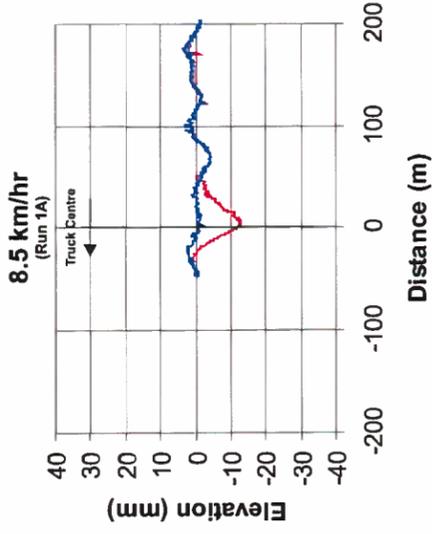
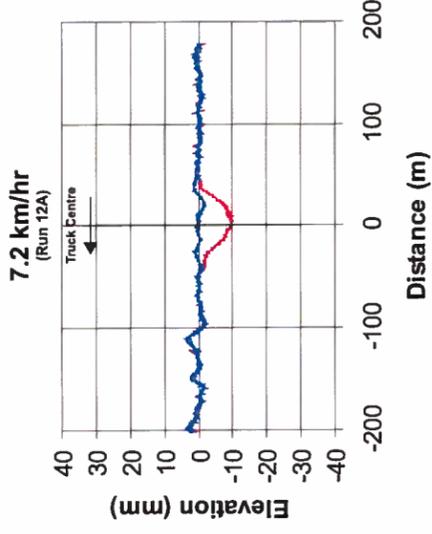
7. Références

- 1) A Field Guide to Ice Construction Safety,
Government of the Northwest Territories, Department of Transportation, 2007
- 2) Best Practices for Building and Working Safely on Ice Covers in Alberta
Publication No SH010, Work Safe Alberta, Government of Alberta, 2009.
- 3) Field Studies of the Response of Floating Ice Sheets to Moving Loads, by S. Beltaos
Transportation and Surface Water Engineering Division, Alberta Research Council.
Contribution Series 938, 1978.
- 4) Guide for the Construction and Operation of Winter Roads
Copyright 2011, Transportation Association of Canada, Ottawa
- 5) Introduction to Naval Architecture, by Thomas C. Gillmer and Bruce Johnson.
Publish by National Institute Press, Annapolis Maryland.
Copyright 1982 by the United States Naval Institute.
- 6) Managing the Safety of Ice Covers Used for Transportation in an Environment of Climate Warming
By Don Hayley, P.Eng., and Sam Proskin, P.Eng., EBA Engineering Consultants Ltd.
4th Canadian Conference on Geohazards
University Laval, Quebec, 2008.
- 7) Principles of Yacht Design, third edition, by Lars Larsson and Rolf E. Eliasson.
Published by International Marine/McGraw Hill;
Copyright 1994, 2000, 2007 by Lars Larsson and Rolf E. Eliasson.
- 8) The Professional Engineers Role in Determining Safety of Ice Covers for Northern Transportation,
by Don Hayley, P.Eng., EBA Engineering Consultants Ltd.
NAPEG Professional Development Conference, Yellowknife, NT, 2005.
- 9) Use of Ice Covers for Transportation, by L. W. Gold.
Research Paper No. 469, Division of Building Research, National Research Council
Published by Canadian Geotechnical Journal, Vol 8, No. 2, May 1971.

Annexe A

Résultats





← Direction of Travel Water Truck, 21,500 kg
 — Ice Deflection Water Depth = 15.5 m
 — Water Pressure Ice Thickness = 1.19 m
 Air Temperature = -10°C

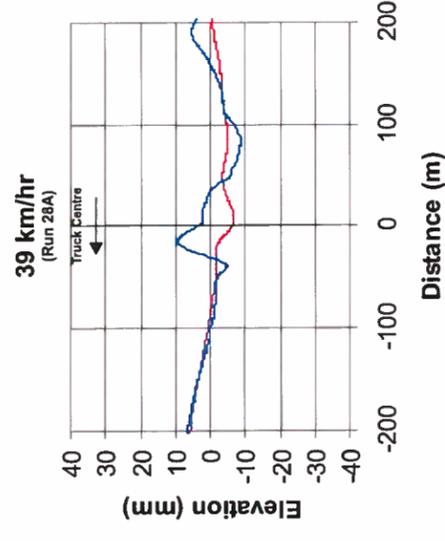
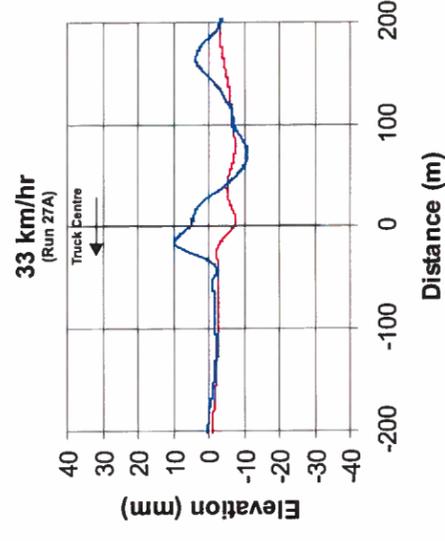
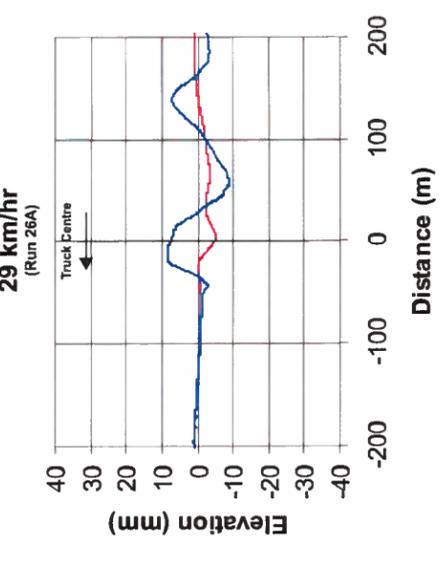
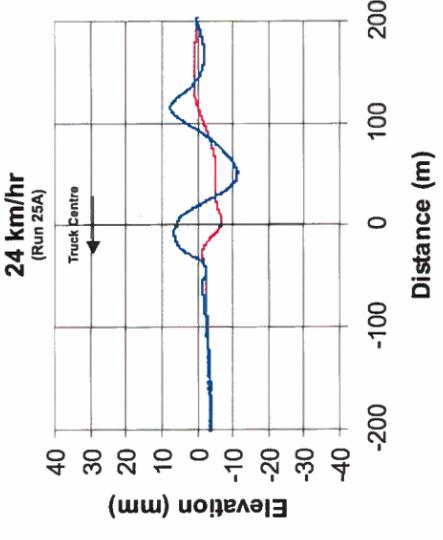
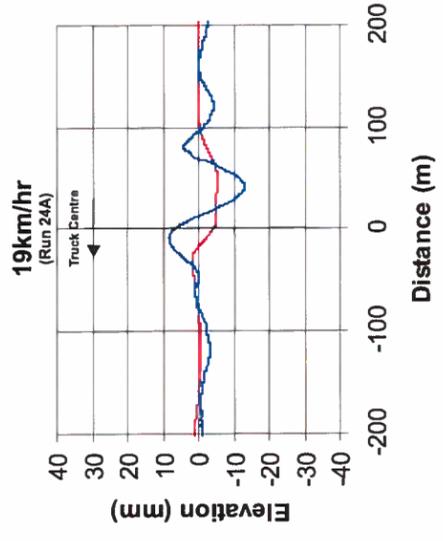
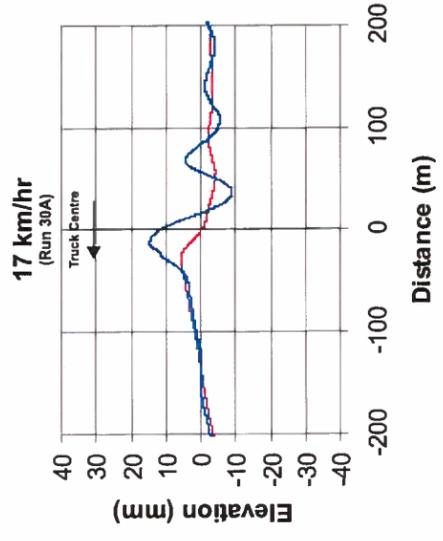
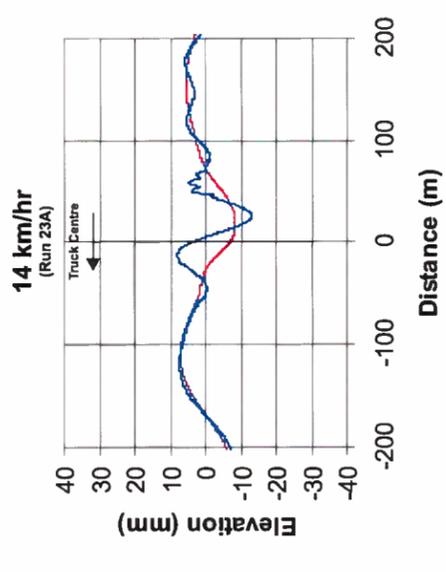
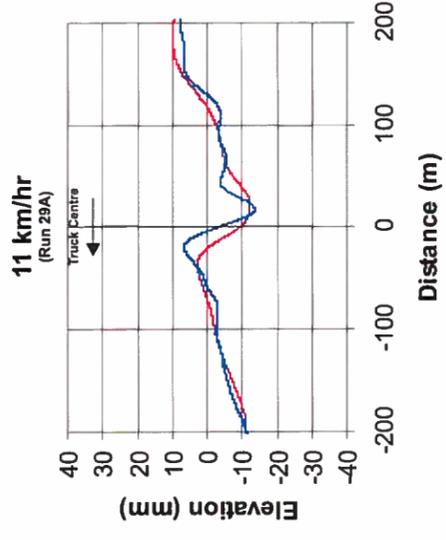
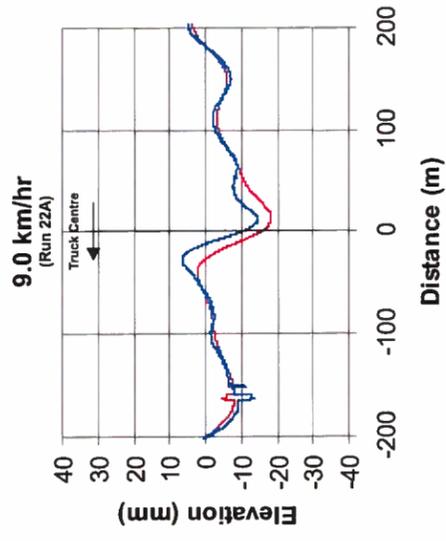
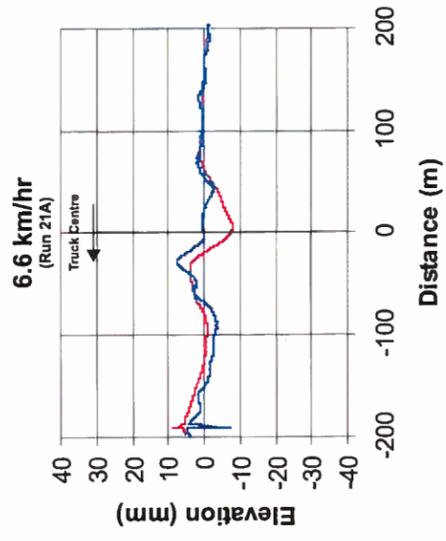
AECOM

MOVING LOADS ON ICE - TEST RESULTS

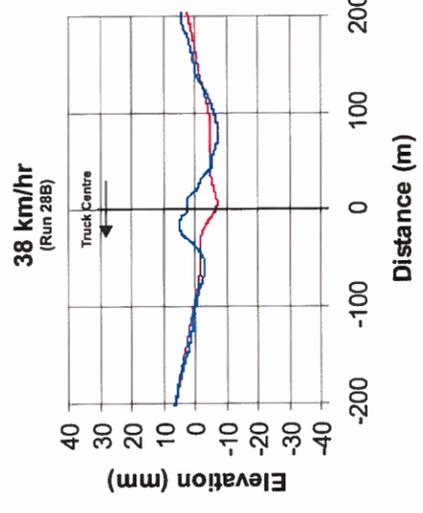
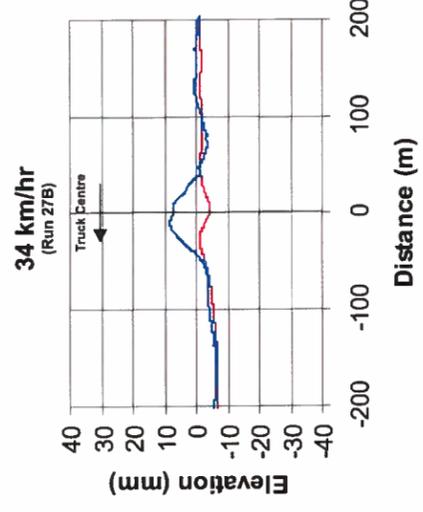
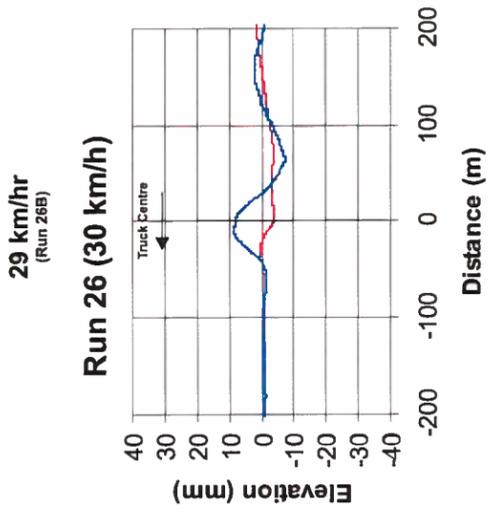
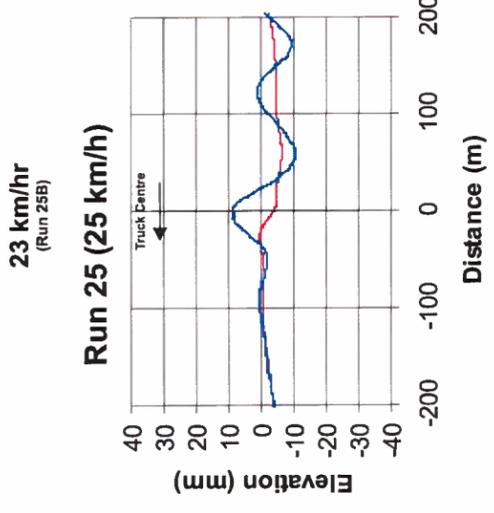
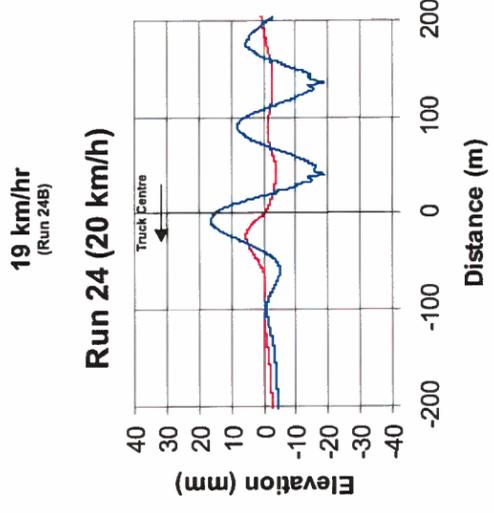
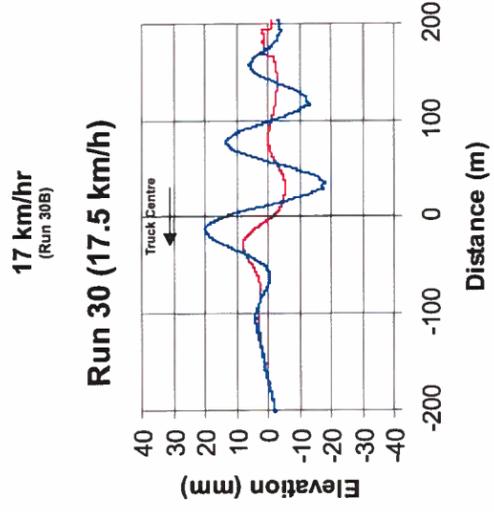
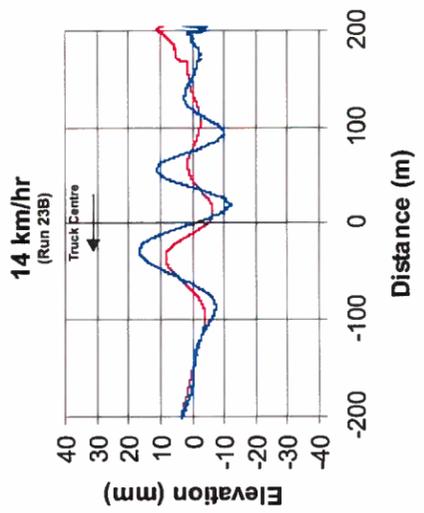
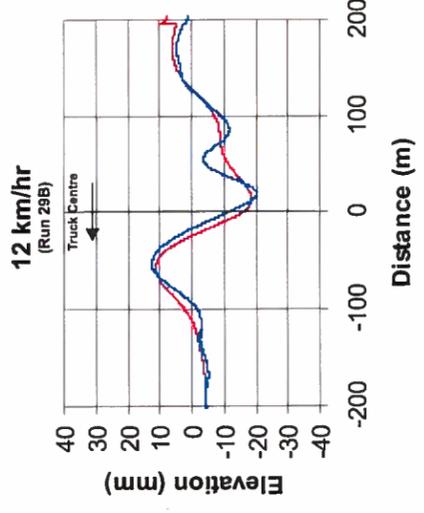
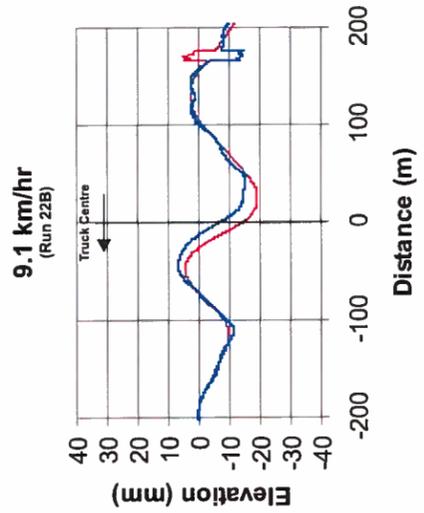
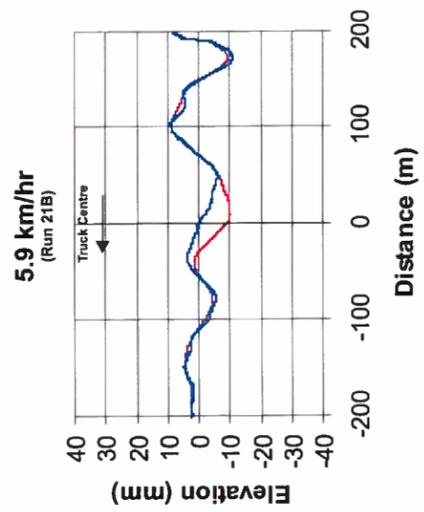
ICE COVER DEFLECTIONS AND WATER PRESSURES FOR VARIOUS VEHICLE SPEEDS ON ROSS LAKE ON FEB 28, 2012

Project 100019	2 Oct 2012	Figure 1
----------------	------------	-----------------

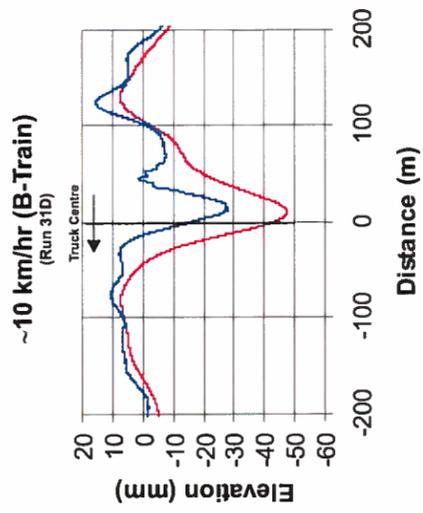
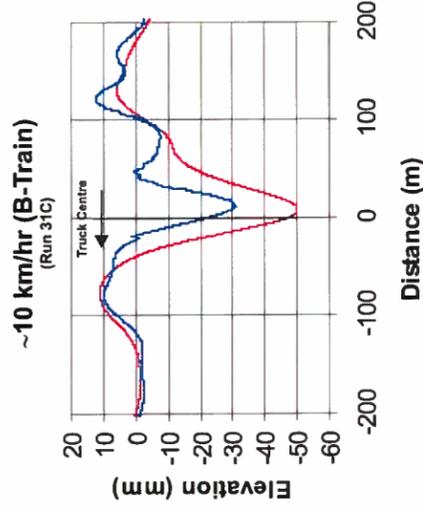
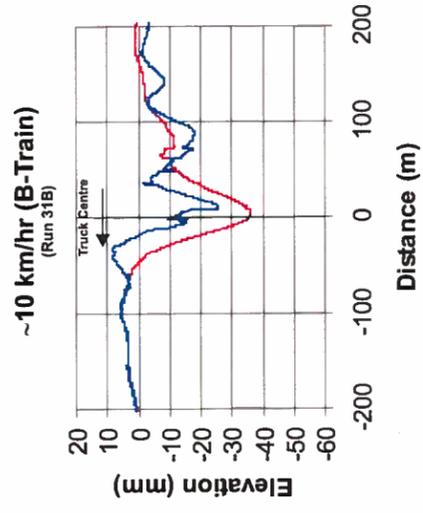
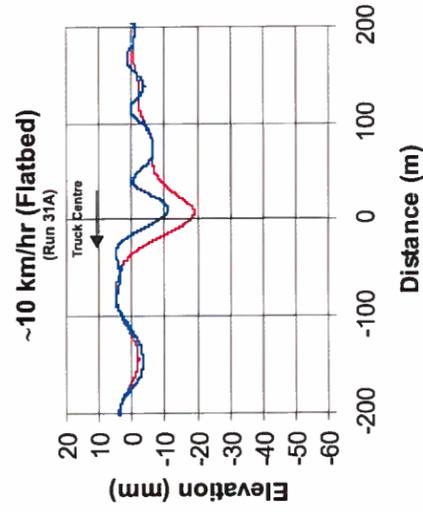
northwest hydraulic consultants ltd.



← Direction of Travel Water Truck, 21,500 kg
 — Ice Deflection Water Depth = 2.0 m
 — Water Pressure Ice Thickness = 1.17 m
 Air Temperature = -16°C

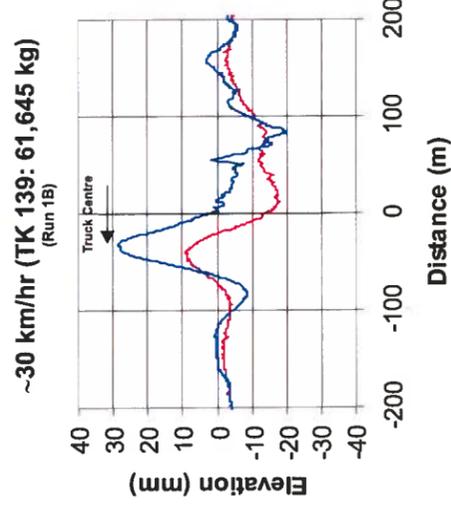
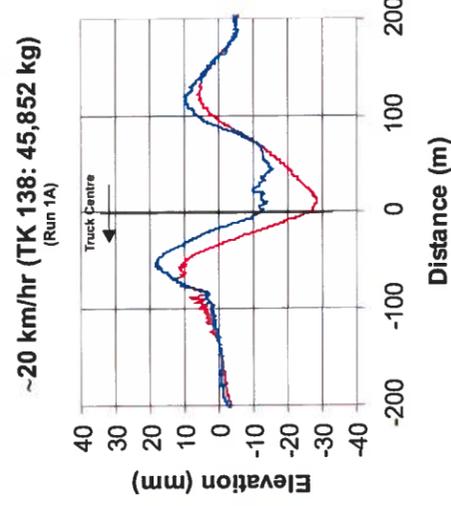
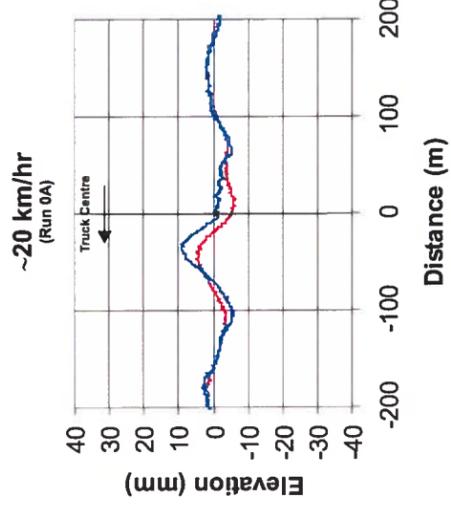
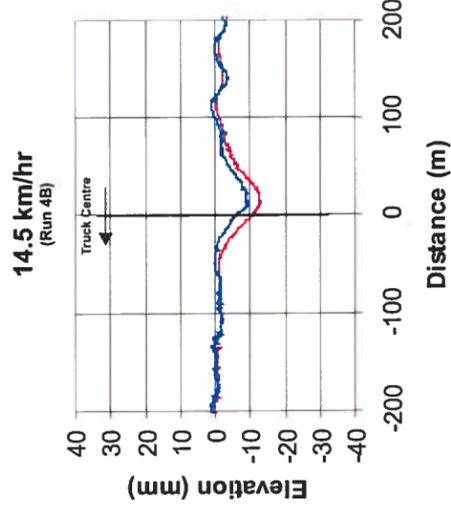
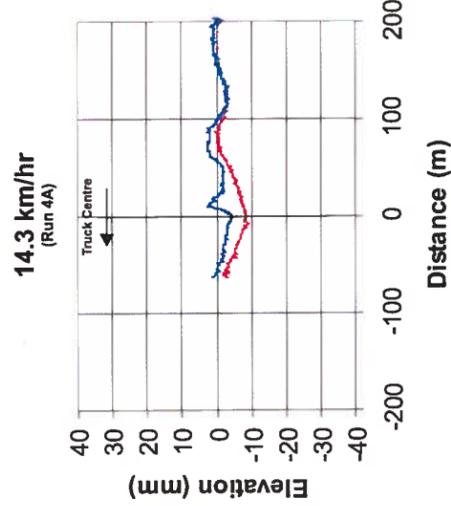
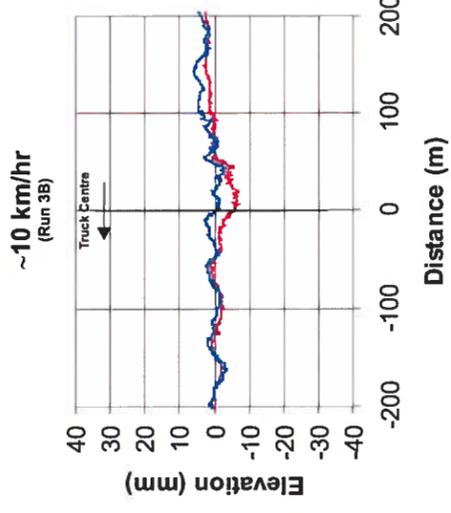
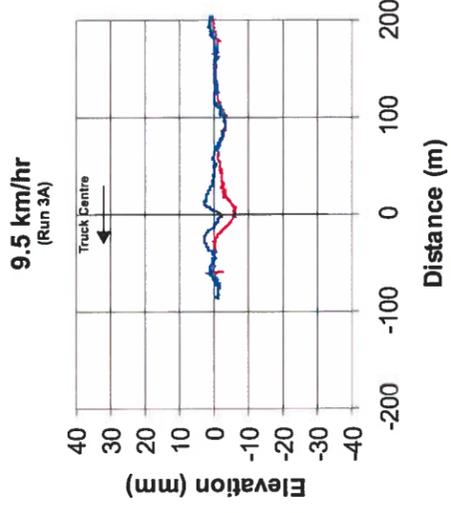
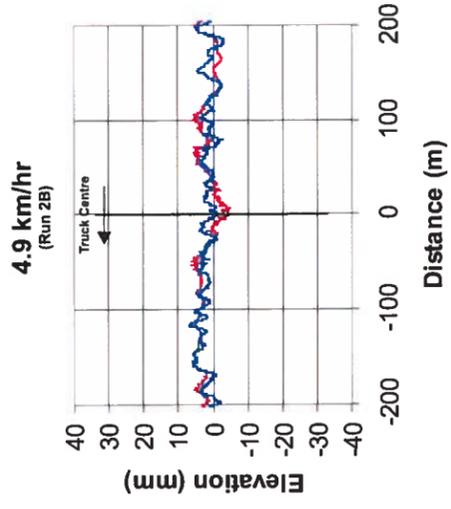
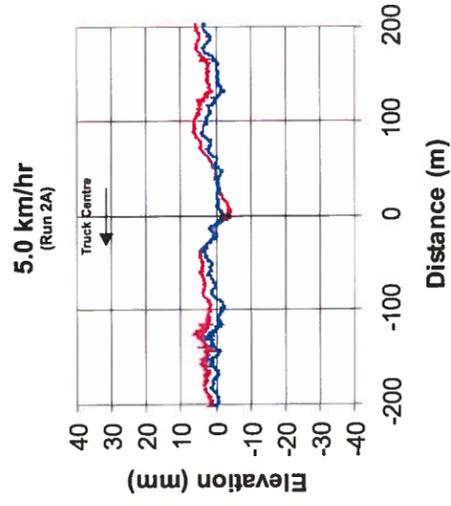


← Direction of Travel Water Truck, 21,500 kg
 — Ice Deflection Water Depth = 2.0 m
 — Water Pressure Ice Thickness = 1.17 m
 Air Temperature = -16°C



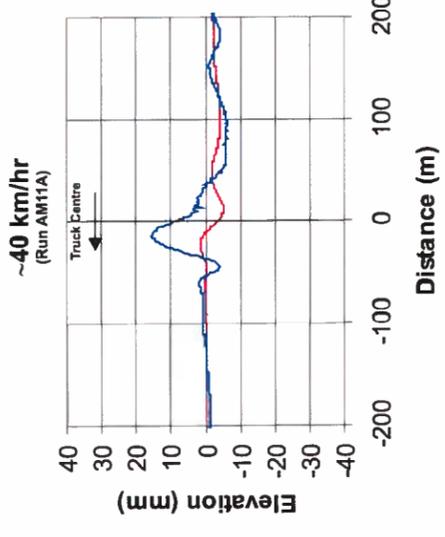
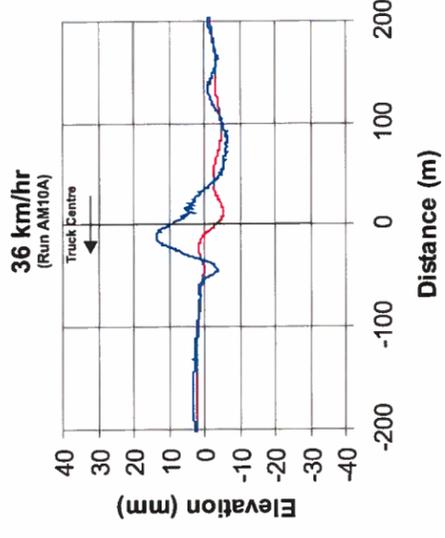
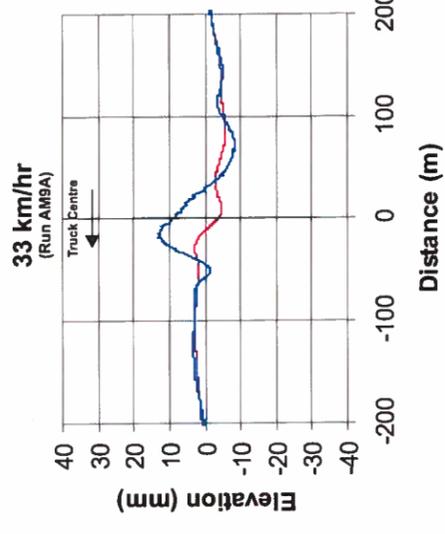
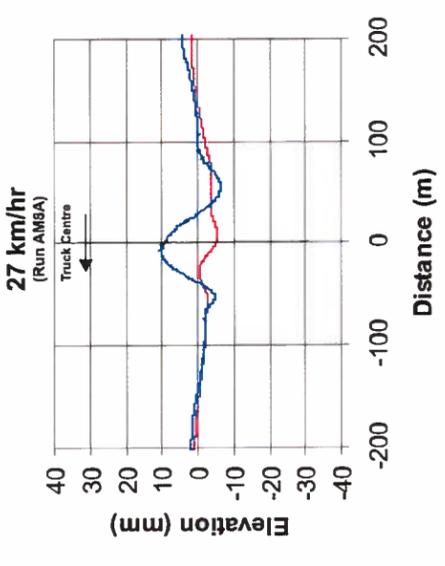
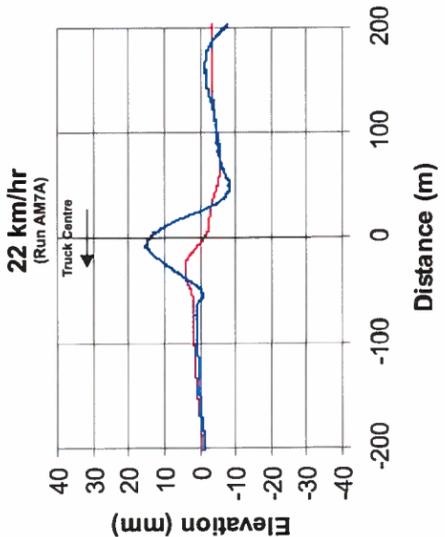
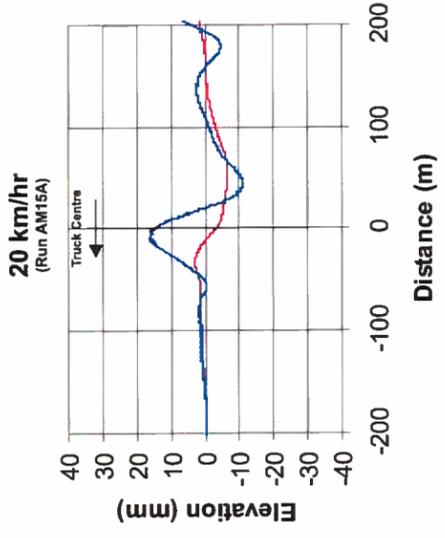
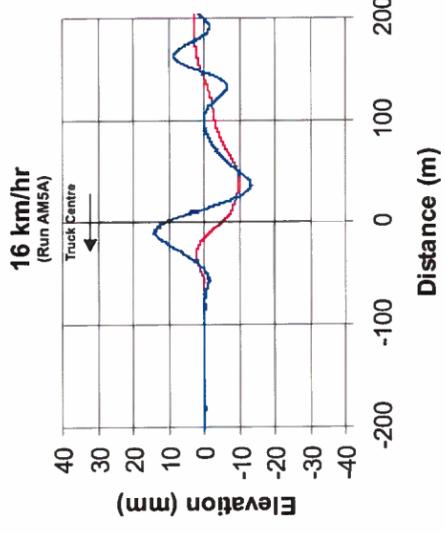
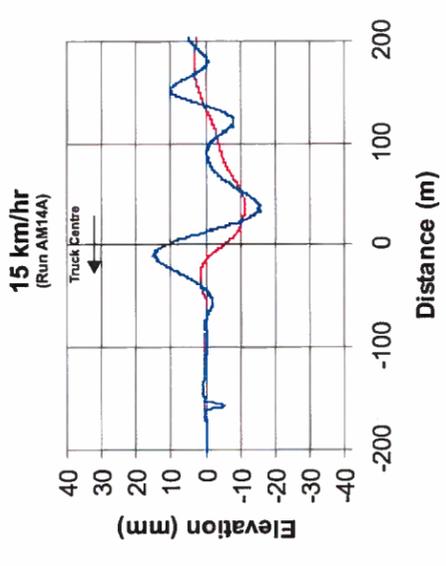
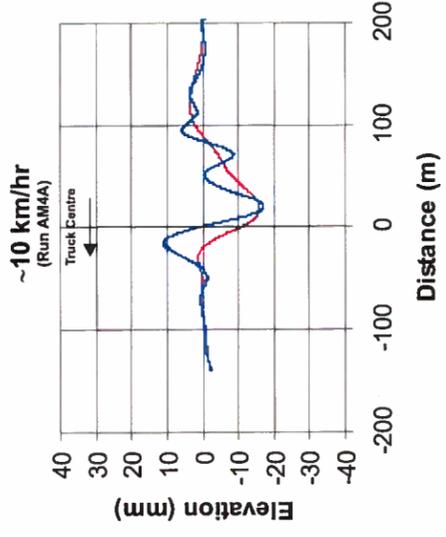
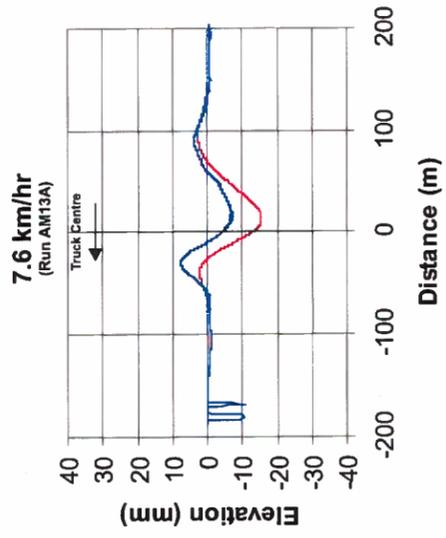
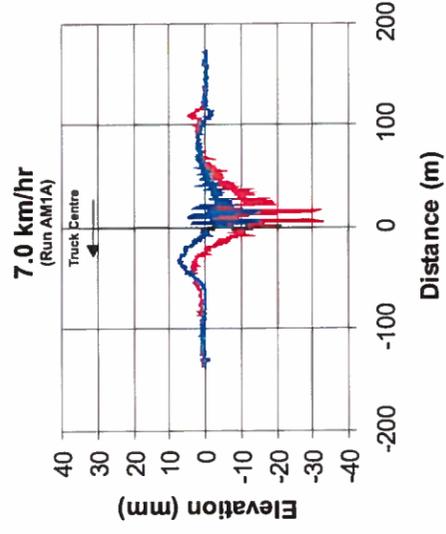
← Direction of Travel Air Temperature = -16°C
 — Ice Deflection Water Depth = 2.0 m
 — Water Pressure Ice Thickness = 1.17 m

AECOM		
MOVING LOADS ON ICE		
ICE COVER DEFLECTIONS AND WATER PRESSURES FOR VARIOUS LOADED TRUCKS TRAVELING FROM ICE TO SHORE ON WAITE LAKE ON FEB 29, 2012		
Project 100019	2 Oct 2012	Figure 4
northwest hydraulic consultants ltd.		

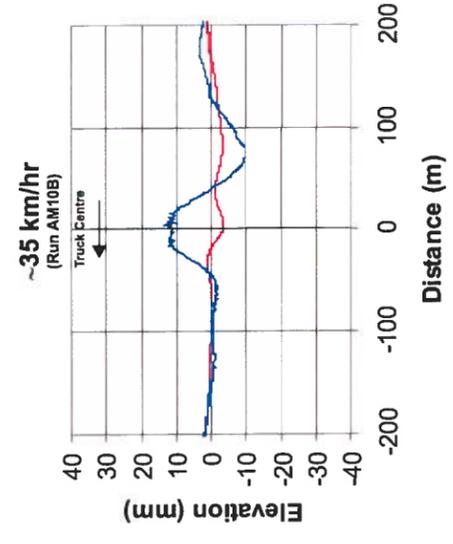
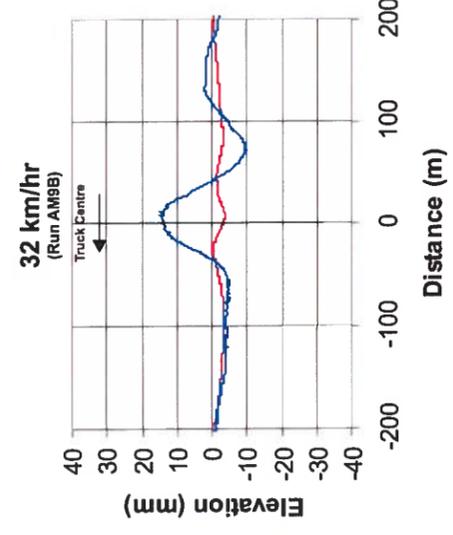
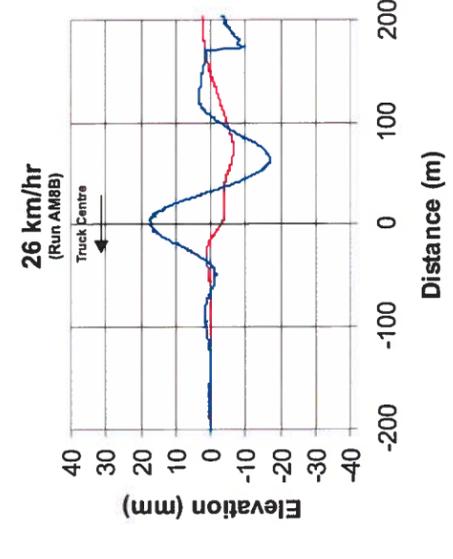
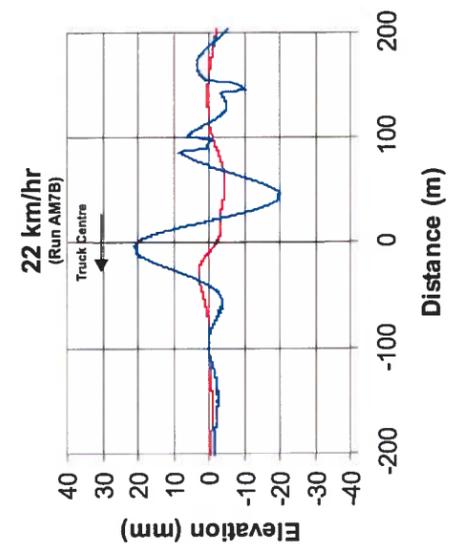
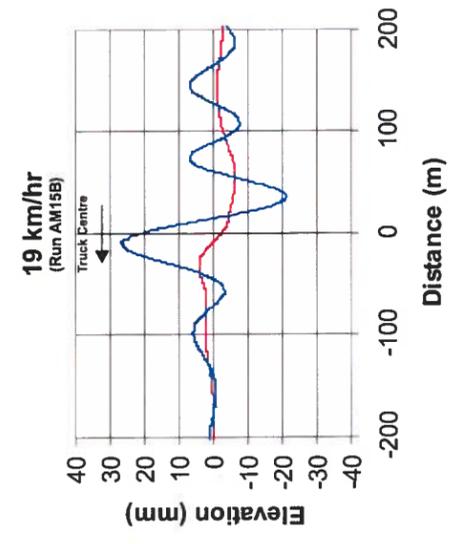
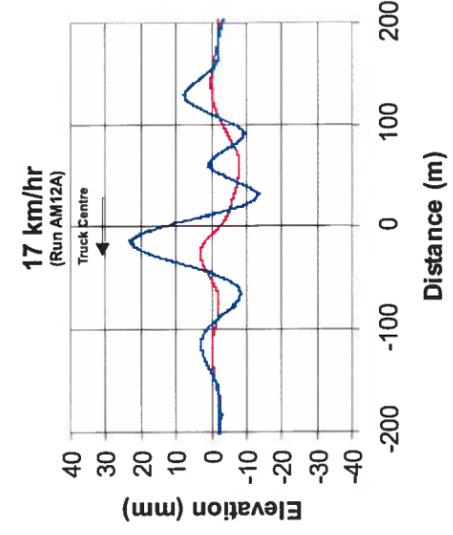
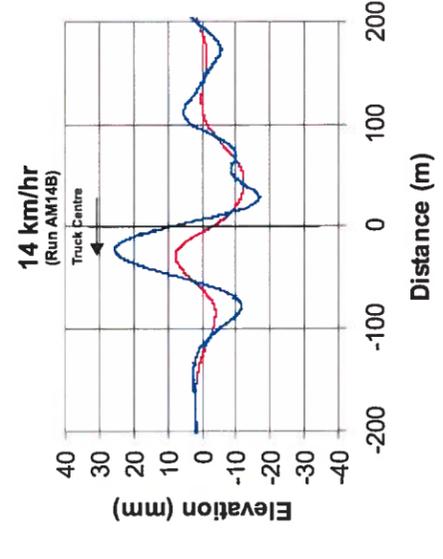
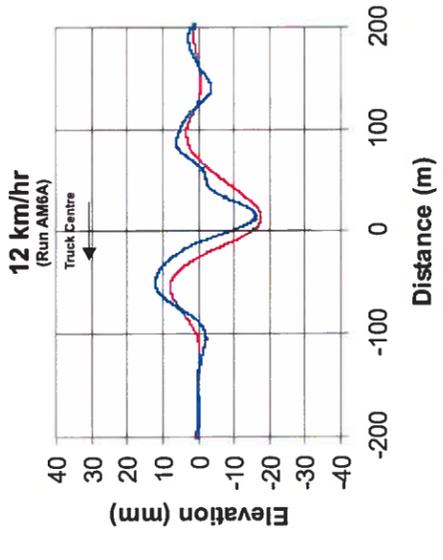
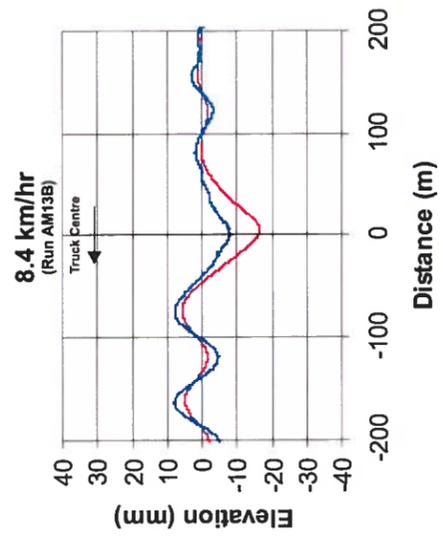
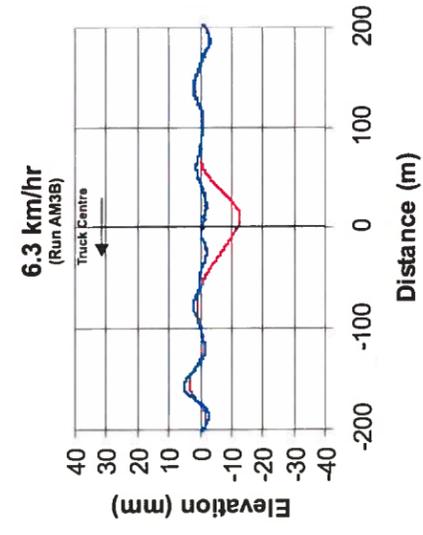


- ← Direction of Travel Water Truck, 16,700 kg
 - Ice Deflection Water Depth = 5.5 m
 - Water Pressure Ice Thickness = 1.40 m
- Air Temperature = -14°C

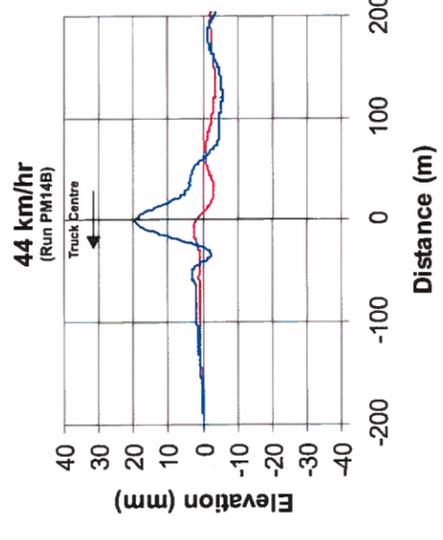
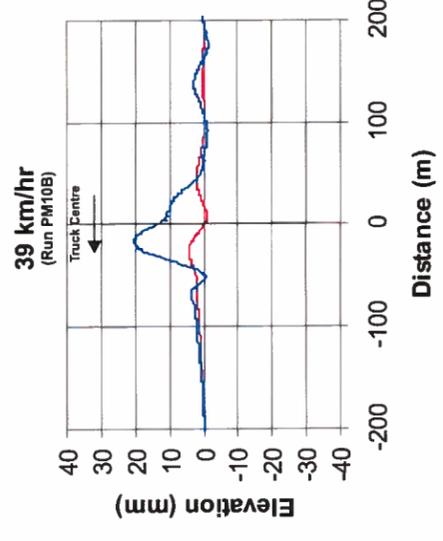
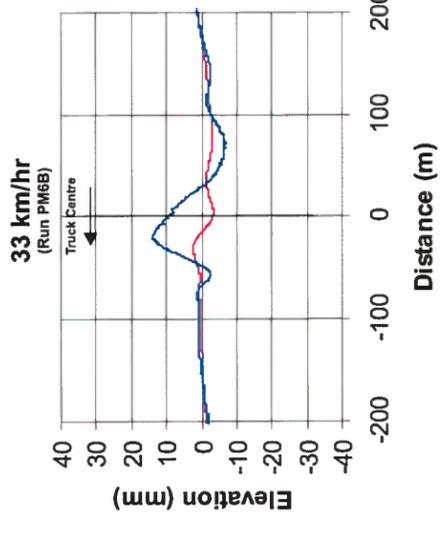
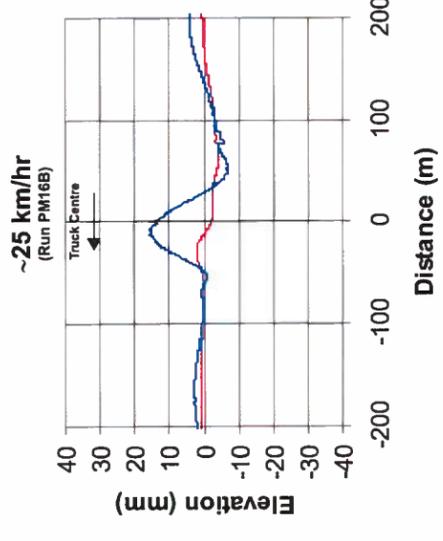
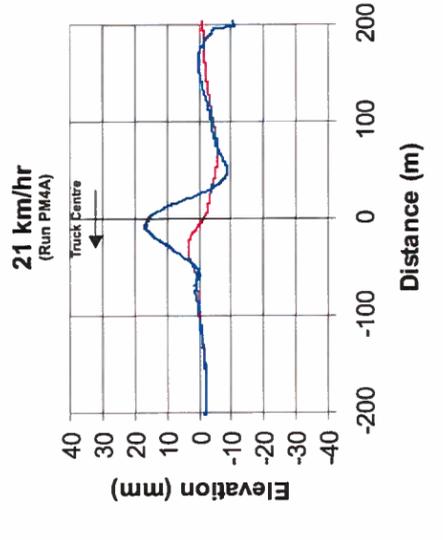
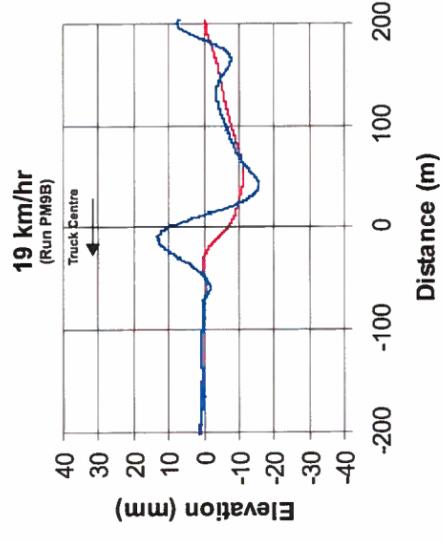
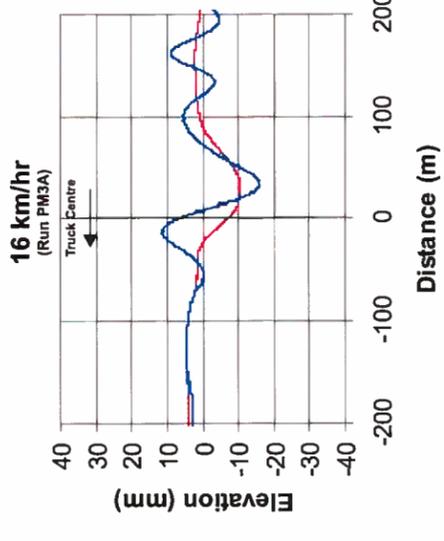
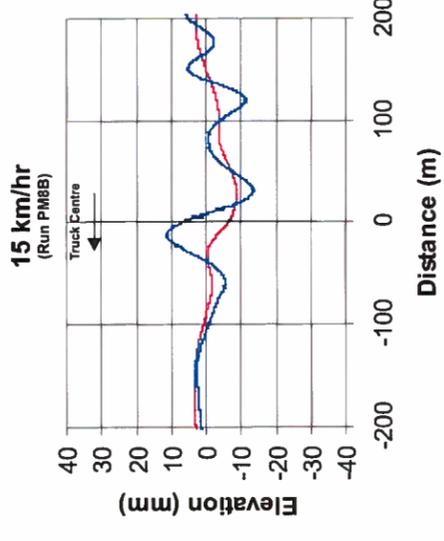
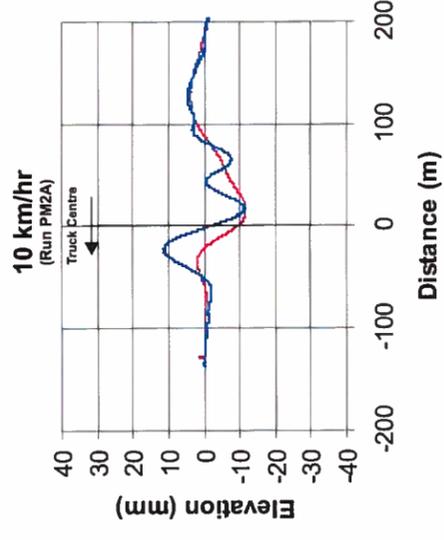
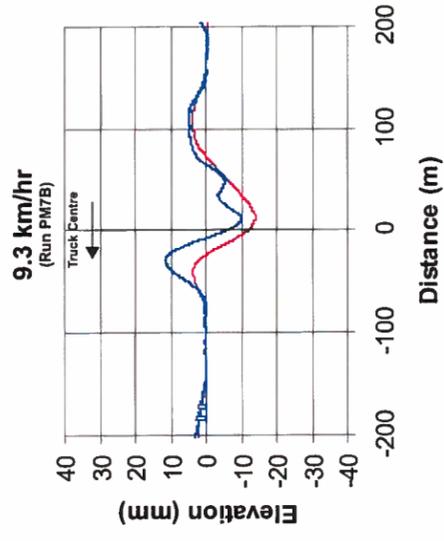
AECOM		
MOVING LOADS ON ICE		
ICE COVER DEFLECTIONS AND WATER PRESSURES FOR VARIOUS VEHICLE SPEEDS ON ROSS LAKE ON MAR 20, 2012		
Project 100019	2 Oct 2012	Figure 5
northwest hydraulic consultants ltd.		



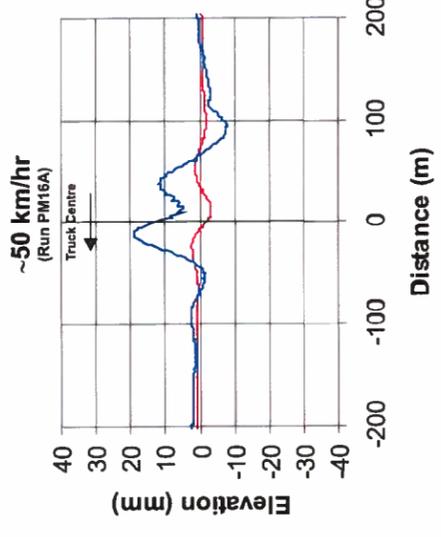
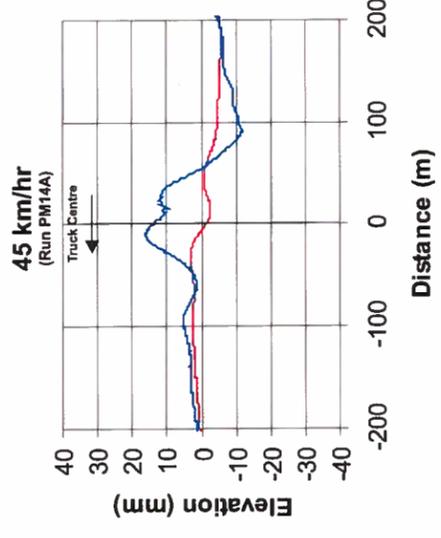
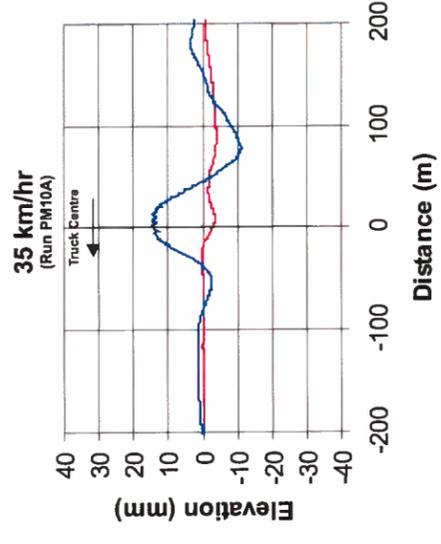
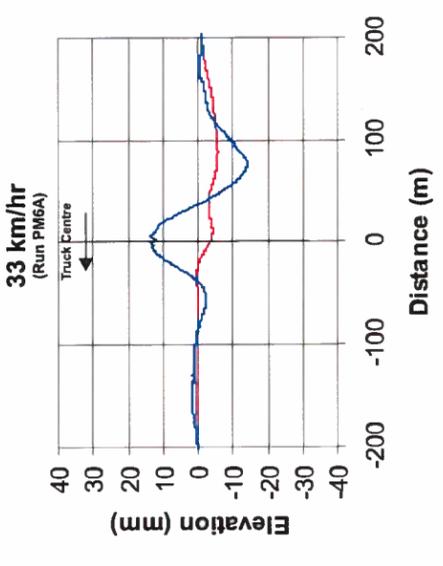
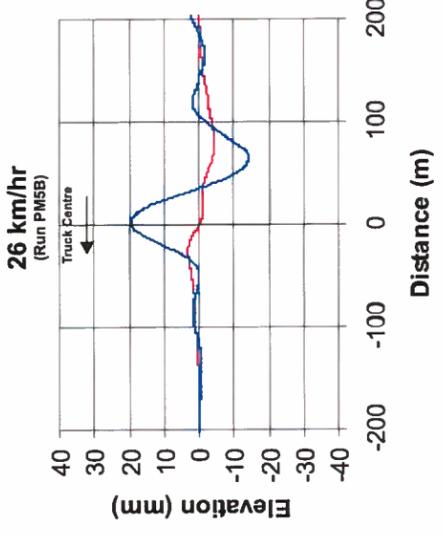
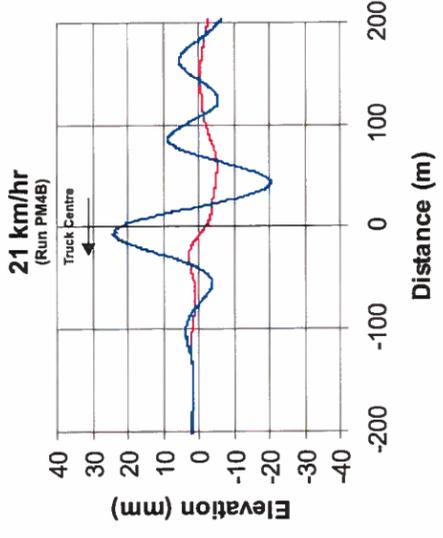
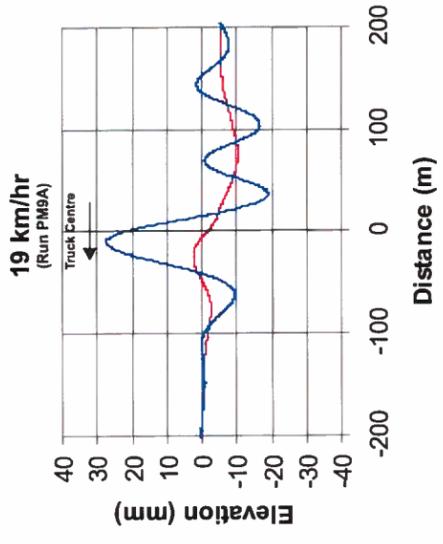
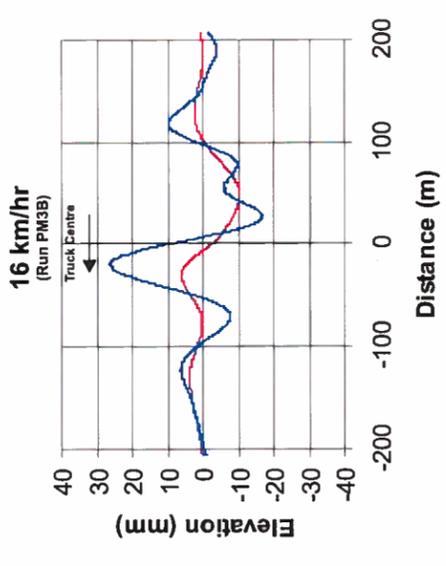
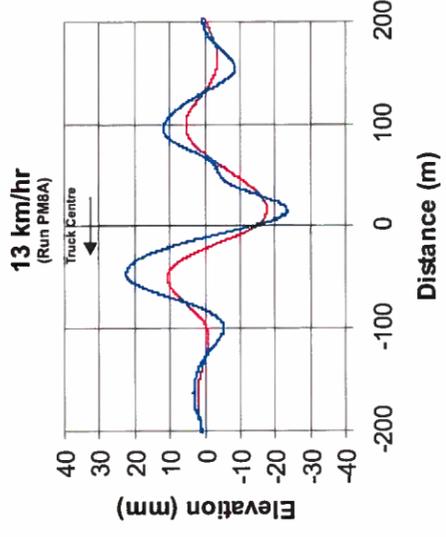
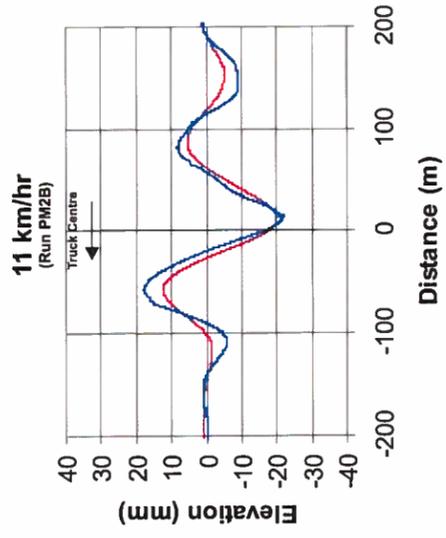
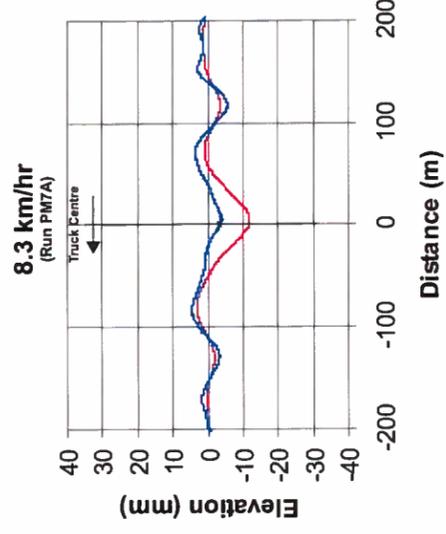
← Direction of Travel Gravel Truck, 31,120 kg
 — Ice Deflection Water Depth = 2.1 m
 — Water Pressure Ice Thickness = 1.32 m
 Air Temperature = -17°C



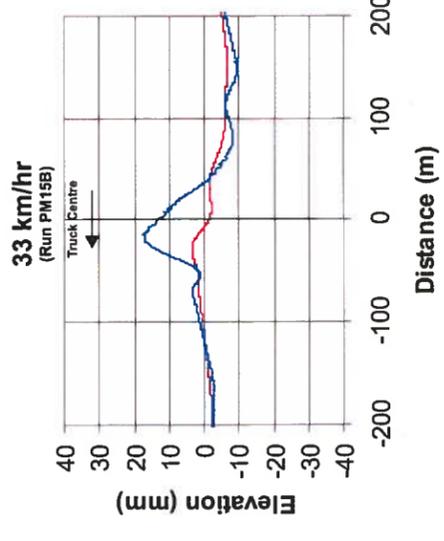
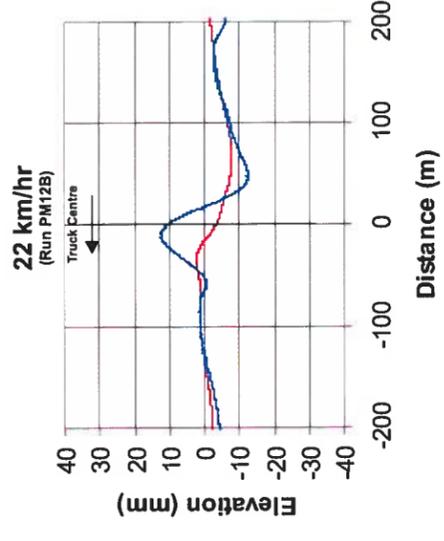
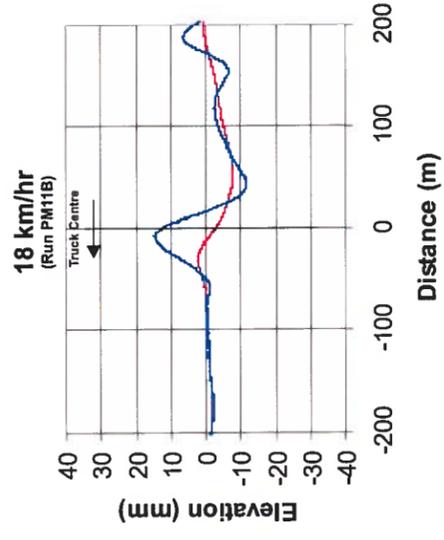
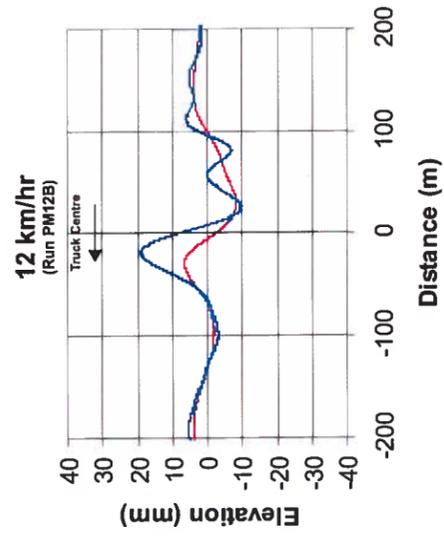
← Direction of Travel Gravel Truck, 31,120 kg
 — Ice Deflection Water Depth = 2.1 m
 — Water Pressure Ice Thickness = 1.32 m
 Air Temperature = -17°C



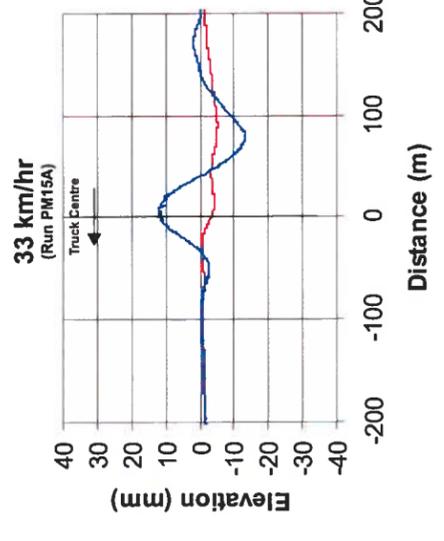
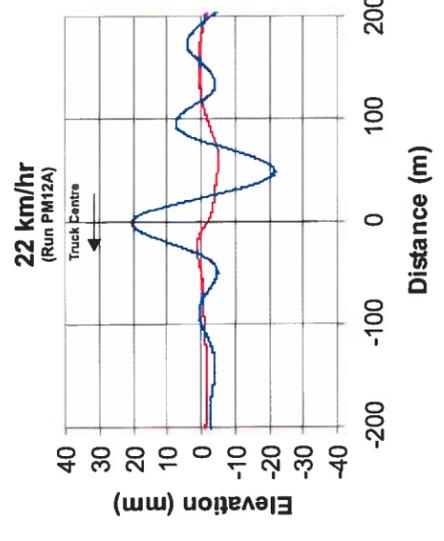
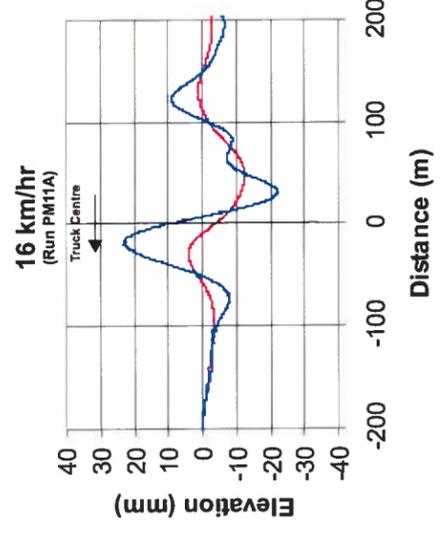
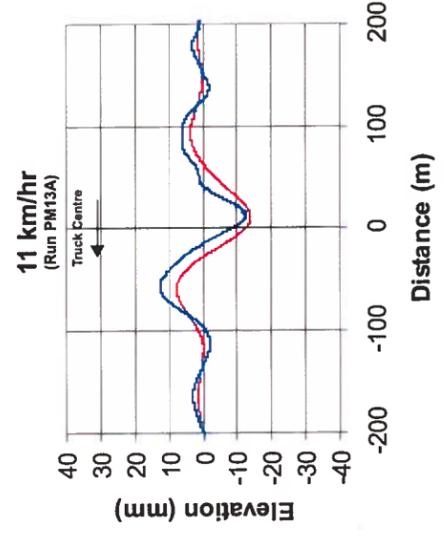
← Direction of Travel Gravel Truck, 31,120 kg
 — Ice Deflection Water Depth = 2.1 m
 — Water Pressure Ice Thickness = 1.32 m
 Air Temperature = -17°C



← Direction of Travel Gravel Truck, 31,120 kg
 — Ice Deflection Water Depth = 2.1 m
 — Water Pressure Ice Thickness = 1.32 m
 Air Temperature = -17°C



TRAVELING AWAY FROM SHORE



TRAVELING TOWARD SHORE

- ← Direction of Travel Gravel Truck, 31,120 kg
- Ice Deflection Water Depth = 2.1 m
- Water Pressure Ice Thickness = 1.32 m
- Air Temperature = -17°C

AECOM	
MOVING LOADS ON ICE	
ICE COVER DEFLECTIONS AND WATER PRESSURES FOR VARIOUS VEHICLE SPEEDS OFFSET 10.5 m FROM TEST HOLE ON WAITE LAKE ON MAR 21, 2012	
Project 100019	2 Oct 2012
Figure 10	
northwest hydraulic consultants ltd.	

À propos d'AECOM

AECOM est un fournisseur mondial de services techniques professionnels et de gestion-conseil sur une grande variété de marchés comme le transport, le bâtiment, l'environnement, l'énergie, l'eau et les services gouvernementaux. Avec quelque 45 000 employés autour du monde, AECOM est un leader sur tous les marchés clés qu'elle dessert. AECOM allie portée mondiale et connaissances locales, innovation et excellence technique afin d'offrir des solutions qui créent, améliorent et préservant les environnements bâtis, naturels et sociaux dans le monde entier. Classée dans la liste des compagnies du Fortune 500, AECOM sert des clients dans plus de 130 pays et a enregistré des revenus de 8,2 milliards de dollars pour la période de douze mois se terminant le 30 juin 2012. Des renseignements supplémentaires sur AECOM et ses services sont disponibles au www.aecom.com

