



GEOQuébec
2015

Challenges from North to South
Des défis du Nord au Sud

MESURES DE RADAR EN PUIITS POUR LA LOCALISATION DU NOYAU IMPERMÉABLE DU BARRAGE ROMAINE 2

Michel CHOUTEAU, Ting-Kuei CHOU
École Polytechnique, Montréal, Québec, Canada
Alain CÔTÉ
IREQ, Hydro-Québec, Varennes, Québec, Canada

ABSTRACT

Radar surveys were conducted in the two vertical inclinometers located at the top of the Romaine 2 dam, on both sides of its asphaltic core, after filling the reservoir to 95% of the dam capacity. Tomography surveys between downstream and upstream inclinometers allowed the determination of the 2-D radar velocity distribution, directly related to water content. The radar reflection surveys have highlighted two reflectors parallel to the inclinometers at distances of ~ 2 m and 3.4 m respectively. The first could be linked to a variation in particle size composition between the protection material surrounding the inclinometer and the compacted embankment located on each side of the core. The second would be attributable to the embankment/core interface. The interfaces were resolved with an uncertainty of 30 cm to 40 cm approximately because of the weak reflections and the significant noise level. A strong attenuation of the radar signal at the base of the dam prevented from determining the position of the core in the vicinity of the concrete base. Two parallel steeply dipping reflectors have been highlighted between 35 and 50 m depth in the upstream inclinometer. They were not present during the survey carried out when the reservoir was empty.

RÉSUMÉ

Des levés radar ont été effectués dans les deux inclinomètres verticaux situés en crête de part et d'autre du noyau bitumineux du barrage Romaine 2, après le remplissage à 95% du réservoir. Les levés de tomographie entre les inclinomètres amont et aval ont permis de déterminer le champ 2-D des vitesses de propagation radar associées directement à la teneur en eau. Les levés radar en mode réflexion ont mis en évidence deux réflecteurs parallèles aux inclinomètres se situant à ~ 2 m et 3,4 m respectivement. Le premier serait lié à une variation de composition granulométrique entre l'îlot de protection entourant l'inclinomètre, et le remblai compacté situé de part et d'autre le noyau. Le second serait attribuable à l'interface remblai/noyau. La faiblesse des réflexions et le bruit important n'ont pas permis de positionner cette interface mieux qu'à 30 cm à 40 cm près. Une forte atténuation du signal radar localisée à la base du barrage n'a pas permis de déterminer la position du noyau au niveau de son assise sur le socle en béton. Deux réflecteurs parallèles à fort pendage ont été mis en évidence entre 35 et 50 m de profondeur dans l'inclinomètre amont. Ils n'étaient pas présents lors des levés lorsque le réservoir était vide.

1 INTRODUCTION

Hydro-Québec a construit le plus grand barrage avec noyau bitumineux en Amérique du Nord, Romaine 2 (Longtin et al, 2012). L'objectif des relevés est de mieux connaître la géométrie du noyau avant et après la mise en eau. Il a été décidé de mettre à profit les deux tubes d'inclinomètres verticaux situés de part et d'autre du noyau pour déterminer sa géométrie par méthode du radar en forage. Deux séries de mesure ont été préconisées : une campagne avant et l'autre après la mise en eau du réservoir.

Lors de la première campagne de mesures, en avril 2014, des levés de radar en tomographie et en réflexion ont été réalisés dans les inclinomètres amont INV01 et aval INV02 du barrage de Romaine-2. Les données tomographies en radar à 100 MHz et 250 MHz ont produit un modèle 2D qui représente la vitesse du remblai au barrage Romaine-2, d'abord dans les remblais non saturés pour les premiers 100 m, puis pour les remblais saturés pour les 10 derniers mètres avant de rentrer dans le roc. Les données de réflexion ont permis également de déterminer la vitesse moyenne autour des inclinomètres. Toutefois, les données radar en réflexion ont été marquées par de nombreuses diffractions causées par les hétérogénéités dans le remblai

et par des réverbérations. Les levés à 250 MHz se sont montrés de bien meilleure résolution que ceux à 100 MHz et l'essentiel de l'interprétation a été fondé sur les mesures à 250 MHz. Un réflecteur vertical autour de 30 ns (soit environ 2m des inclinomètres) a été mis en évidence des deux côtés du barrage, mais aucun réflecteur remarquable n'a été observé en provenance du noyau de 3 à 4 m des antennes radar.

Des nouvelles mesures de radar en forage ont été prises en octobre 2014 après la mise en eau du réservoir, atteignant 95% de la hauteur du barrage. Le milieu amont étant maintenant saturé en eau, le contraste de vitesse entre le noyau et le remblai saturé devait augmenter fortement et les diffractions générées par les hétérogénéités dans le remblai devaient être réduites. Par conséquent, les possibilités de mettre en évidence le noyau et de décrire sa géométrie s'en trouvaient accrues. Bien que des essais aient aussi été réalisés avec les antennes à 100 MHz, les résultats présentés se limiteront aux antennes 250 MHz dont les données sont de bien meilleure résolution.

Dans cet article, nous rappellerons d'abord les principes de la méthode en forage, en mentionnant les propriétés électriques sur lesquelles elle est fondée, puis nous présenterons les travaux de terrain effectués en octobre

2014, les méthodes de traitement et d'interprétation utilisées, les résultats principaux obtenus et les modèles proposés.

2 MÉTHODOLOGIE

Deux types de levés de radar en forage ont été réalisés : des mesures entre les inclinomètres amont et aval, en mode tomographique, pour déterminer le champ des vitesses radar en tout point du milieu entre les deux inclinomètres, et des levés en réflexion radar, pour déterminer le profil des réflecteurs à proximité de chacun des inclinomètres.

Dans la première configuration (tomographie radar), le levé consiste à transmettre, pour des configurations multiples des antennes émettrice et réceptrice, une impulsion électromagnétique et de déterminer le temps de parcours pour se rendre à l'antenne réceptrice. Une technique d'inversion permet par la suite, à l'aide des premières arrivées et de la géométrie existante entre les divers couples émetteur-récepteur, de calculer les champs des vitesses v (ou des lenteurs $s = 1/v$) du milieu. Pour les levés en mode réflexion, les deux antennes émettrice et réceptrice sont placées dans le même inclinomètre, séparées par une distance fixe, et à chaque position verticale désirée, un signal radar est émis et le signal reçu enregistré en fonction du temps (Figure 1). On obtient ainsi une image des échos le long de l'inclinomètre.

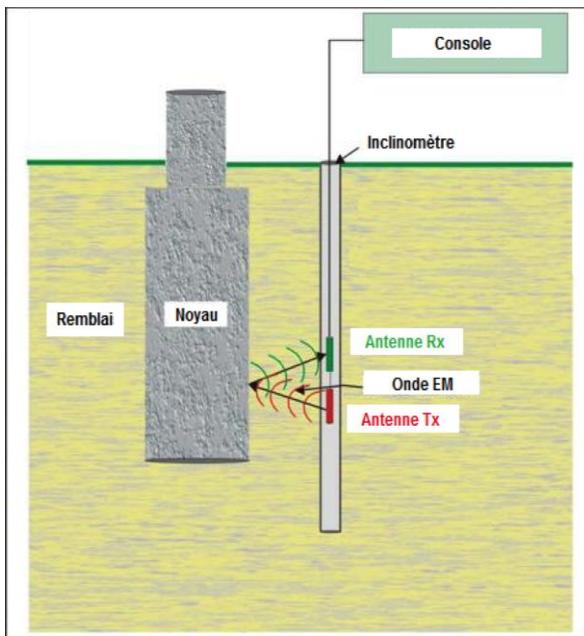


Figure 1. Levé radar en mode réflexion (dans un inclinomètre).

Afin de convertir le temps des arrivées des échos en distance, on se sert des vitesses déterminées en tomographie radar. On peut aussi se servir des temps d'arrivée directe entre les antennes émettrice et réceptrice puisque la distance entre les deux antennes est connue.

Pour améliorer le rapport signal/bruit, à chaque position des antennes, le signal est émis un certain nombre de fois, typiquement entre 8 et 64, et le signal reçu sommé. Les antennes utilisées (Mala Geoscience, Suède) ont une fréquence nominale de 250 MHz dans l'air; toutefois lorsque les antennes sont placées dans le sol, leurs fréquences centrales descendent à des fréquences comprises entre 120 et 170 MHz à cause du couplage avec le matériau environnant.

La vitesse et l'atténuation de l'onde radar dépendent étroitement des propriétés électriques des milieux traversés, ainsi que de la fréquence centrale de l'ondelette. Pour des milieux faiblement atténuants, la vitesse de l'onde radar v (m/ns) et le taux d'atténuation α (dB/m) sont donnés par :

$$v = \frac{0,3}{\sqrt{\kappa}}$$

$$\alpha = 1.69 \frac{\sigma_e}{\sqrt{\kappa}}$$

où κ , constante diélectrique (ou permittivité relative), et σ_e , conductivité électrique effective du milieu (en mS/m).

Au tableau 1, nous estimons les constantes diélectriques à partir des vitesses radar obtenues par tomographie ou en mode réflexion. Les résistivités, elles, ont été estimées à partir de notre expérience sur des remblais et sur des bétons.

Tableau 1. Propriétés électriques typiques des matériaux dans le contexte du barrage de La Romaine 2

Propriété	Remblai	Remblai	Noyau	Béton	roc
	saturé	non-saturé	bitumineux	saturé	
σ (mS/m)	25	5	0,2	2,5	0,33
κ	22	10	3,5	8	7

3 MESURES ET RÉSULTATS

3.1 Tomographie radar

Des levés de tomographie radar ont été réalisés entre les inclinomètres du barrage Romaine 2. L'antenne émettrice était placée dans l'inclinomètre amont (INV01) et l'antenne réceptrice dans l'inclinomètre aval (INV02). Le positionnement des antennes se fait par rapport au sommet des inclinomètres amont et aval respectivement aux altitudes de 247.977 m et 248.204 m. Entre chaque groupe de traces, l'antenne émettrice descend de 5 m alors que l'antenne réceptrice balaie une distance maximale de 10 m au-dessus et en dessous la position de l'antenne émettrice avec un pas de mesure de 0,10 m. Une deuxième série de mesures a été aussi réalisée

sur les derniers 5 mètres (fond). Entre chaque groupe de traces, l'antenne émettrice remonte de 1m alors que l'antenne réceptrice balaie une distance maximale de 2 m au-dessus et en dessous la position de l'antenne émettrice avec un pas de mesure de 0,10 m. Cette deuxième série de données permet d'avoir une meilleure résolution dans la zone à la base du noyau, l'antenne émettrice étant déplacée tous les mètres (au lieu de 5 m pour la première série). Pour déterminer le temps t_0 , dit temps mort, on effectue avant et après les levés de tomographie des tirs dans l'air à 10 m, 20 m et 30 m de distance d entre l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice. Connaissant la vitesse de l'onde radar dans l'air (0,3 m/ns), par régression on obtient t_0 à l'origine (pour une séparation $d = 0$ m). Pour tous les tirs faits lors de la tomographie, on pointe les temps des premières arrivées desquels on soustrait t_0 pour avoir le temps de parcours entre les deux antennes

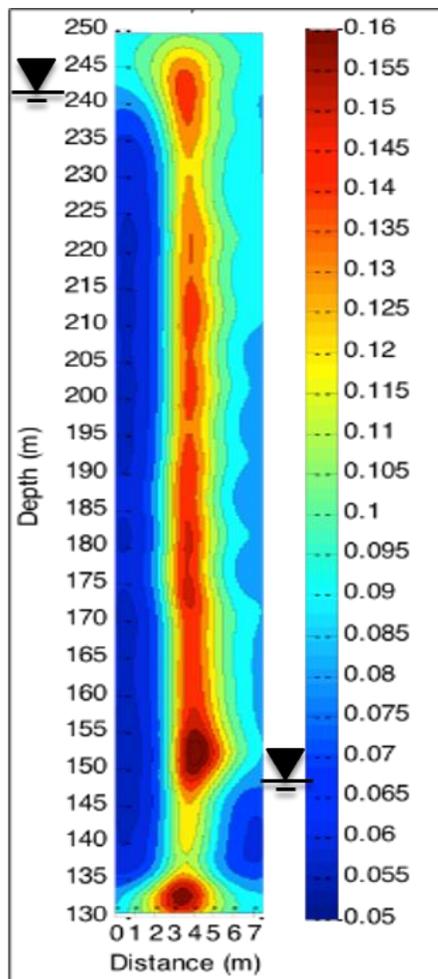


Figure 2. Distribution des vitesses obtenue par tomographie radar à 250 MHz lorsque le réservoir est plein à 95%.

La figure 2 présente la distribution de vitesses obtenue par la méthode LSQR pour les levés de tomographie et de réflexion en ajoutant comme contrainte une vitesse

quasi-constante du noyau (0,16m/ns). L'erreur RMS est de 3.94% dans le temps des premières arrivées.

3.2 Levé radar en réflexion

Des levés de radar en mode réflexion ont été réalisés dans chacun des inclinomètres. Les antennes de 250 MHz, utilisées en mode réflexion, ont une longueur totale de 2,940 m. Les mesures ont été réalisées avec un pas d'échantillonnage de 0,10 m le long des inclinomètres. Des mesures à la descente et à la montée ont été réalisées; elles permettent de s'assurer à la fois de la reproductibilité des mesures et de l'erreur possible de positionnement (position du zéro du levé).

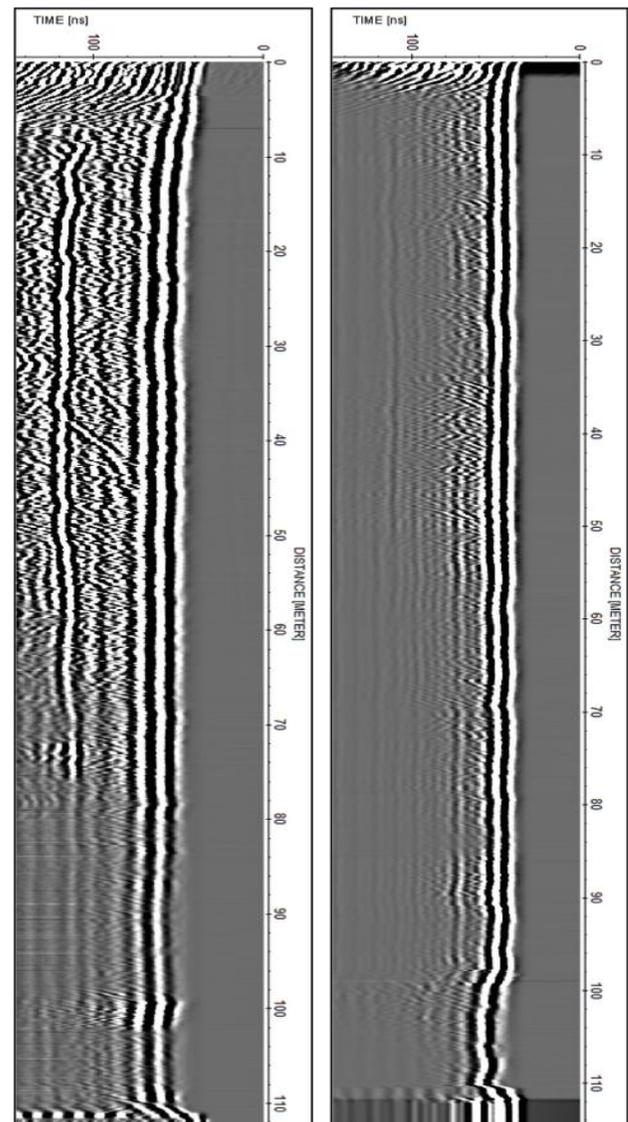


Figure 3. Levé en mode réflexion, Gauche: inclinomètre amont (INV-01); Droite: inclinomètre aval (INV-02). Données observées traitées (filtre *dewow* et gain linéaire à partir de 60 ns).

Pour pouvoir interpréter les réflexions, nous avons déterminé le délai électronique t_0 , estimé à l'aide des mesures de calibration dans l'air.

4 RÉSULTATS

4.1 Tomographie radar

On obtient la distribution des vitesses à partir des données de tomographie radar par l'inversion de type LSQR des temps des premières arrivées pointées. L'espace délimité entre les deux inclinomètres est découpé par un maillage dont les cellules rectangulaires mesurent 0.225m de large et 1.300m de hauteur. L'inversion permet une reconstruction spatiale des vitesses du sol entre les inclinomètres. Les deux séries de données (temps en tomographie et vitesses le long des inclinomètres en réflexion) ont été combinées pour les traitements et les analyses. Ceci permet d'avoir une bonne résolution le long des inclinomètres et encore meilleure au fond des inclinomètres. Les inclinomètres amont (INV01) et aval (INV02) se trouvent respectivement à $x = 0 \text{ m}$ et $x = 7,39 \text{ m}$. Pour réduire la non-unicité de la solution, on a imposé une vitesse constante de 0,16 m/ns au centre du noyau (Figure 2).

On note que la face aval (droite; remblai non saturé) présente une vitesse plus grande que celle de la face amont (gauche; remblai saturé), de l'ordre de 0,1 m/ns à comparer à 0,06-0,07 m/ns.

4.2 Levés en réflexion

Les temps critiques t_1 , onde directe ou la première arrivée, t_2 et t_3 , temps d'arrivée des réflexions successives, ont été déterminés. Pour faciliter le pointé des arrivées, quelques traitements ont été appliqués sur les données: Une correction "dewow" a été appliquée pour enlever la dérive basse fréquence qui affecte l'amplitude des traces enregistrées, et un gain linéaire avec le temps a été imposé à partir de 60 ns. Les données filtrées sont présentées à la figure 3.

Pour l'inclinomètre amont, nous observons un réflecteur t_2 qui se trouve entre 33.5 ns et 42.2 ns, et un deuxième réflecteur t_3 aux alentours de 50.1 ns et 61.6 ns après l'arrivée première t_1 (~45 ns). Pour l'inclinomètre aval, nous observons une interface t_2 qui se trouve entre 28 ns et 44.3 ns, et une deuxième interface t_3 aux alentours de 64.6 ns et 68.1 ns après l'arrivée première t_1 (~40 ns). On remarque aussi que le signal réfléchi est très atténué pour des profondeurs > 80 m. On peut, par amplification, encore observer ces réflexions jusqu'à 100 m de profondeur, mais pas au-delà. Or, la zone de grand intérêt pour Hydro-Québec, celle où se situe la jonction du noyau bitumineux avec le socle en béton sur lequel il repose, se trouve dans cette zone « aveugle » (100m < profondeur < 110m). Au-delà de 110 m, c'est le roc.

Le constat est le même pour les données de l'inclinomètre aval (Figure 2). La zone pour les profondeurs comprises entre 100 et 110 m montre des signaux très atténués et il est difficile, voire impossible, de mettre en évidence les

réflexions autour de 30 ns et 70 ns après l'arrivée de l'onde directe. Les causes de cette absorption du signal ne sont pas connues. L'hypothèse la plus probable est qu'elle est causée par une augmentation de la conductivité du matériau.

Une fois que toutes les données de radar en forage ont été réduites pour le t_0 , le temps pris par l'onde directe est déterminé (t_1) et la vitesse du milieu est calculée (figure 4). Comme la distance entre les antennes est connue ($d=1,7\text{m}$ pour les antennes 250 MHz utilisées), la vitesse est estimée par l'équation suivante,

$$v_1 = \frac{d}{t_1}$$

Cette vitesse obtenue est celle du matériau à proximité immédiate (environ 0,5 m) des inclinomètres. Comme, par tomographie radar, la vitesse est connue entre l'inclinomètre et le noyau, on peut déterminer la vitesse du matériau au-delà de 0,5 m des inclinomètres.

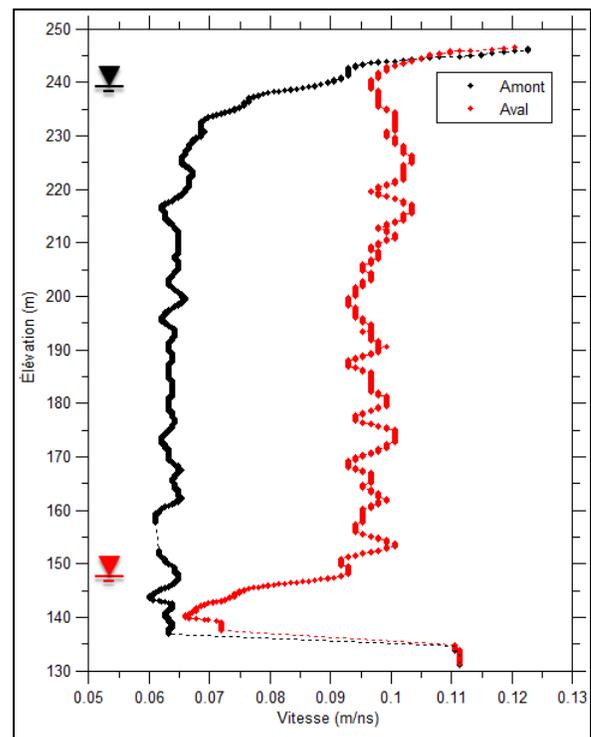


Figure 4 : Vitesse calculée du milieu autour des inclinomètres en fonction de l'élévation en utilisant le temps de la première arrivée (noir, amont; rouge, aval). Les niveaux d'eau dans les deux inclinomètres sont indiqués.

La distribution granulométrique suivant l'horizontale des remblais du barrage est connue (Figure 5). Entre les deux inclinomètres et le noyau, se trouve 2 types de remblais: le remblai de l'îlot de protection et le remblai 3M. Les îlots de protection des tubes d'inclinomètres sont constitués de remblai compacté manuellement autour des tubes d'inclinomètres de manière circulaire avec un rayon de 2 m. Le remblai 3M a été compacté à l'aide d'un rouleau

compacteur. Pour déterminer la vitesse des remblais, plusieurs suppositions ont été faites: les remblais utilisés sont les mêmes pour le côté amont et pour le côté aval. La vitesse v_1 , déterminée à l'aide de l'onde directe, correspond à la vitesse du milieu immédiat. Elle est donc associée au remblai de l'îlot de protection.

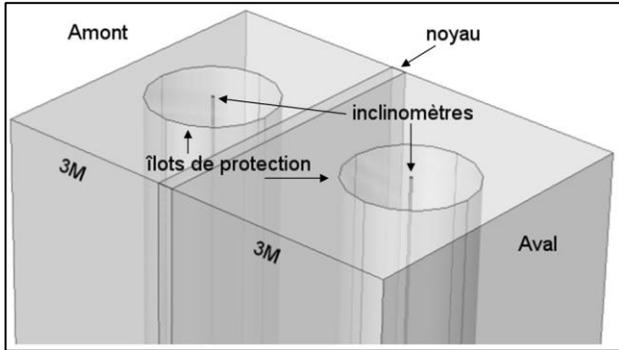


Figure 5. Une coupe du barrage à l'élévation 230 m qui démontre la distribution des types de remblai du barrage Romaine 2, entre les inclinomètres amont et aval. Les inclinomètres sont installés au centre des îlots de protection de part et d'autre du noyau. L'inclinomètre amont se trouve plus près du noyau que l'inclinomètre aval. Si le centre des inclinomètres aval et amont se trouve respectivement à 0 m et 7.39 m, le centre du noyau se trouve à 4.36 m. Les îlots de protection font 2 m de rayon autour des inclinomètres et le noyau a une épaisseur de 0.5 m à cette élévation.

Les distances aux réflecteurs t_2 et t_3 ont été calculées à l'aide des vitesses ainsi estimées. Comme les erreurs sur les pointés des arrivées de l'onde radar (± 2 ns) ont aussi une incidence sur les vitesses estimées, on a évalué les erreurs sur les distances déterminées entre 30 et 40 cm. On reporte à la figure 6 les distances aux réflecteurs imagés ainsi que les erreurs associées. On a aussi, pour des fins de comparaison, indiqué la position connue du noyau (face amont et face aval), tirée des plans de construction, par rapport aux inclinomètres. On note le bon accord entre les distances obtenues par radar et celles des plans.

4.3 Réflecteurs inclinés dans l'inclinomètre amont

Dans le levé radar de l'inclinomètre amont, deux réflecteurs inclinés ont été observés (Figure 3) entre les élévations 202.1 m et 212.5 m. Ces réflecteurs n'étaient pas présents lors des levés du mois d'avril 2014 (bassin du barrage non-rempli). Le pointé des premières arrivées a été fait (Figure 7). Les distances entre les réflecteurs inclinés et le noyau ont été calculées en considérant le pendage du plan incliné associé à chacun des réflecteurs. Nous avons aussi assumé que la vitesse moyenne à ces élévations est de 0.063 m/s (obtenue par le levé en réflexion; voir figure 4). La correction géométrique opérée revient au principe de migration à vitesse constante. Le résultat est présenté à la figure 8a. Le pendage du premier plan qui se trouve entre 208.5 m et 212.5 m est estimé à 80° par rapport à l'horizontale. Le deuxième plan semble plus courbé et divisé en deux pentes distinctes. La section qui se trouve entre 205.3 m et 208.5 m

possède un pendage de 77° , et la section qui se trouve entre 202.1 m et 205.3 m, a un pendage de 85° par rapport à l'horizontale. Le pendage moyen pour ce deuxième plan est de 81° .

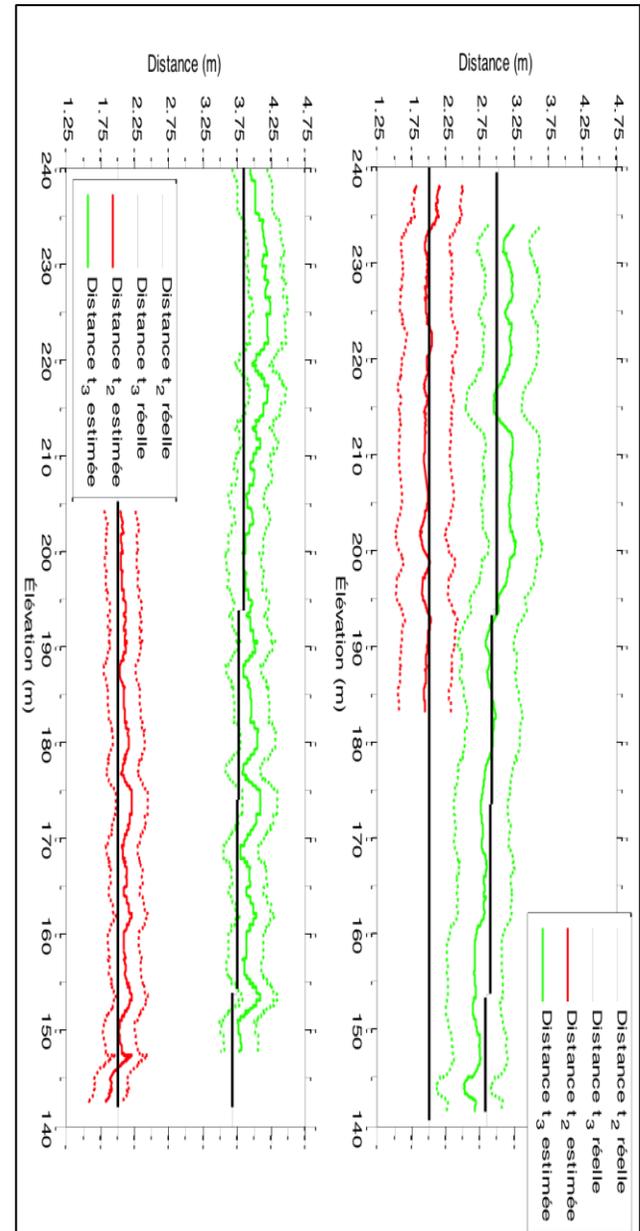


Figure 6. Distances aux interfaces déterminées en utilisant les vitesses séparant les interfaces. **Gauche** : inclinomètre amont (INV01); **Droite** : inclinomètre aval (INV02). Les lignes pleines représentent la valeur la plus probable et les lignes pointillées, l'incertitude sur la distance. En rouge : première interface îlot-3M; en vert : interface remblai 3M/noyau bitumineux.

Les plans sont redessinés avec les interfaces du noyau et du remblai 3M comme références (figure 8b). La distance qui sépare les plans de l'inclinomètre permet de proposer deux interprétations. Soit les plans inclinés sont limités à

la zone comprise entre le noyau et l'inclinomètre, mais ne traversent pas l'inclinomètre, soit ils s'étendent du noyau jusqu'au remblai de l'îlot de protection.

Nous ne pouvons pas déduire l'extension maximum de ces réflecteurs, car les ondelettes de l'arrivée première dominent les premières 15-20 ns du signal mesuré masquant toutes les réponses provenant des réflecteurs, anomalies, etc.

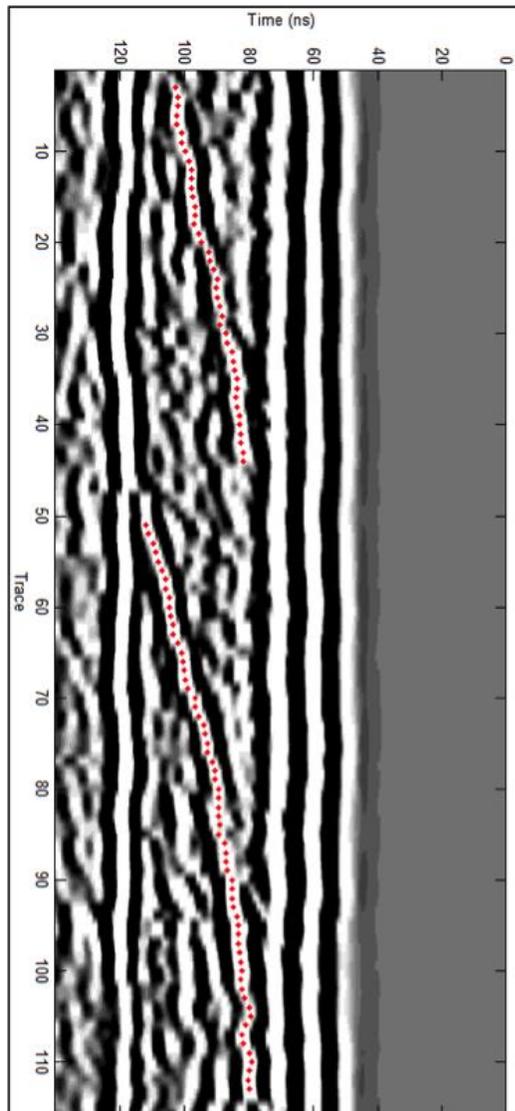


Figure 7 : Pointés (points rouges) sur les arrivées des deux réflecteurs inclinés

Nous avons donc prolongé en ligne droite les plans associés aux réflecteurs inclinés jusqu'au point d'intersection avec l'inclinomètre amont afin de représenter les scénarios possibles si l'extension de ces plans atteint l'inclinomètre. Du haut vers le bas de l'inclinomètre, les plans associés aux réflecteurs inclinés interceptent l'axe des élévations aux positions 196 m, 195 m et 180 m. On remarque que ces positions correspondent approximativement aux élévations

auxquelles des faibles déviations brusques de l'inclinomètre ont été notées dans le temps par les lectures d'inclinométrie entre mai et septembre 2014.

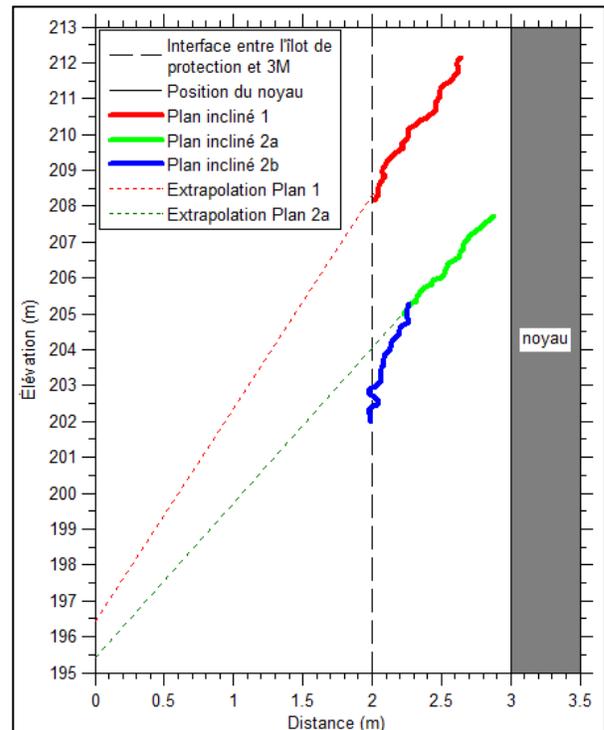


Figure 8: Positions des plans inclinés obtenues avec les données de réflexion par rapport à l'inclinomètre amont. Les plans 1 et 2a ont été prolongés jusqu'à l'inclinomètre. L'axe horizontal représente la distance horizontale (en m) des réflecteurs à l'inclinomètre. L'axe vertical est l'élévation (en m).

5 DISCUSSION ET CONCLUSION

La tomographie radar nous a fourni un modèle de vitesse 2D du barrage entre les inclinomètres. Nous voyons effectivement, après la mise en eau, une vitesse de 0,060-0,065 m/ns dans le milieu saturé amont. En fixant la vitesse du noyau à 0,16 m/ns, nous obtenons pour le milieu non saturé une vitesse de 0.095 m/ns.

Les réflecteurs sont beaucoup plus nets après la mise en eau du barrage, même sur le côté aval non-saturé. Du côté saturé, ceci est le fait du plus fort contraste de propriétés diélectriques entre le remblai saturé et le noyau. Du côté aval, une légère augmentation de l'humidité ne suffit pas à expliquer le meilleur signal obtenu, d'autant plus que le niveau de bruit EM sur l'enregistrement radar est resté inchangé entre les mesures du printemps et de l'automne.

Les données de réflexion nous ont permis de déterminer la position des interfaces entre les inclinomètres, les remblais (îlot de protection et 3M) et le noyau. En tenant compte des erreurs associées au pointé des arrivées et à l'estimation des vitesses il existe une incertitude qui varie

de 30 cm à 40 cm sur la distance estimée entre l'inclinomètre et le noyau.

Finalement, le signal radar est très atténué en profondeur (élévation < 150 m ou profondeur >100 m) et nous ne pouvons pas localiser le positionnement du noyau à cette profondeur. Cette zone correspond à la base du noyau bitumineux qui repose sur le socle en béton.

Dans le levé de réflexion, deux réflecteurs inclinés vus dans l'inclinomètre amont semblent rejoindre le noyau. L'extension des plans associés aux deux réflecteurs semble s'arrêter soit au contact du remblai de l'îlot de protection avec le remblai 3M, soit à l'inclinomètre.

6 REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Hydro-Québec de permettre la présentation des résultats de ce projet, en particulier le chef centrale, D. Asselin.

7 RÉFÉRENCES

- Archie, G.E. 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Transactions of the American Institute of Mechanical Engineers*, 146: 54-67.
- Gloaguen, E., Marcotte, D., Chouteau, M., Perroud, H. 2005. Borehole radar velocity inversion using cokriging and cosimulation, *Journal of Applied Geophysics* 57: 242-25.
- Keller, G.V., Frischknecht, F.C. 1966. Electrical methods in geophysical prospecting, Pergamon Press.
- Longtin, H., Péloquin, É., Verret, D., Mathieu, B., Beauséjour, N., Hammanji, Y., Rattue, A. 2012. Romaine 2 hydroelectric project: Design of the first large asphalt core rockfill dam and dykes in North America, *Proc. of Canadian Dam Association Conf.*, Saskatoon.
- Sandmeier, K.-J. 2014. ReflexW Version 7.2.3 from 14.04.2014.
- Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines, *Water Resour. Res.* 16 (3): 574-582.
- Wharton, R.P., Hazen, G.A., Rau, R.N., Best, D.L.1980. Electromagnetic propagation logging: advances in technique and interpretation, *55th Ann. Fall Tech. Conf. Exhib. Soc. Petrol. Eng. AIME*, Dallas, TX. Pap. 9267.