

# **Auscultation des ouvrages hydrauliques par méthodes non destructives dans le cadre de l'évaluation de la sécurité des barrages**

François Saint-Pierre, Alain Philibert, Bernard Turcotte  
SMi inc., 740 rue Galt Ouest 2<sup>e</sup> étage, Sherbrooke, Québec, Canada J1H 1Z3

## **RÉSUMÉ:**

Six ans après la mise en vigueur de la Loi sur la sécurité des barrages, de nombreux ouvrages sont soumis à des évaluations détaillées de leur état. Ces barrages, datant parfois du début du XX<sup>e</sup> siècle, comportent des ouvrages en béton qui ont subi de nombreuses réhabilitations dont l'envergure et la nature sont inconnues. Il arrive parfois même que la géométrie de ces ouvrages ne soit pas documentée ou encore que les structures en béton soient cachées sous de multiples couches de revêtement de surface ayant une belle apparence. Dans ce contexte, l'évaluation de la sécurité de ces ouvrages se transforme finalement en une véritable enquête afin de recueillir les informations nécessaires pour la réalisation des études hydrauliques et de stabilité requises par la Loi sur la sécurité des barrages.

Les deux barrages que nous allons présenter ont fait l'objet de travaux d'auscultation. Ces travaux ont permis d'évaluer l'état du béton du barrage et de récupérer des informations sur la géométrie de certains éléments inaccessibles du barrage (acier d'armature, ancienne vanne de fond condamnée). À travers ces deux exemples, nous montrerons aussi la démarche que nous avons suivie afin que les résultats des mesures non-destructives puissent aussi orienter la réalisation d'autres essais nécessaires pour mener à bien l'évaluation de la sécurité de l'ouvrage. L'auscultation du béton par méthodes soniques ou RADAR devient alors un outil précieux pour trouver la géométrie de l'ouvrage ou encore pour connaître l'état des structures des ouvrages hydrauliques.

## **1 INTRODUCTION**

En avril 2002, le gouvernement québécois adopte la Loi sur la sécurité des barrages [1]. Cette Loi a pour objectif de mettre en place un programme de sécurité pour chacun des barrages visés. La nature des activités de surveillance et d'évaluation de la sécurité dépend du classement du barrage et du niveau de conséquence en cas de rupture.

Depuis six ans les travaux nécessaires pour la mise en place d'un programme de sécurité pour chacun des barrages sont en cours de réalisation et les propriétaires d'ouvrage doivent respecter l'échéancier prévu par la Loi. Ce programme doit contenir un plan de mesure d'urgence, un plan de gestion des eaux retenues ainsi que des évaluations de sécurité de l'ouvrage. D'autre part, les barrages visés par la Loi font l'objet, chaque année, d'activités de surveillance qui doivent être consignées dans un registre.

La première évaluation de la sécurité d'un barrage ancien constitue une activité difficile à réaliser. Ces ouvrages datent généralement du début de siècle et sont peu documentés. Malgré l'absence relative de documentation, nous devons tout de même répondre aux exigences du Règlement relatives à l'évaluation de sa sécurité en ce qui concerne l'état, la stabilité et la fonctionnalité du barrage, la conformité de sa conception et de sa construction par rapport aux règles de l'art et aux normes de sécurité ainsi qu'à déterminer les correctifs appropriés. [1].

Pour ce faire, nous devons réaliser en premier lieu une cueillette d'informations exhaustive auprès du propriétaire de l'ouvrage, des Municipalités et de la population locale. De plus, des techniques d'investigation destructives et non destructives sont utilisées afin de connaître la géométrie de l'ouvrage et les caractéristiques des matériaux constitutifs.

Dans les paragraphes suivants, nous montrons comment l'auscultation par méthodes non destructives a été utilisée dans le cadre de l'évaluation de sécurité des barrages Eustis et Frontenac situés en Estrie.

## **2 DESCRIPTION DES BARRAGES**

### **2.1 Barrage Eustis**

Le barrage Eustis a été construit en 1903 sur la rivière Coaticook, à quelques kilomètres en aval de la municipalité de Waterville (Figure 1). Ce barrage en béton comporte une section en contrefort, un déversoir de type poids dont la crête est surmontée d'un seuil gonflable. Sa hauteur de retenue dans le bief amont est de 8,6 m.



**Fig. 1: Photographie du barrage Eustis**

### **2.2 Barrage Frontenac**

Le barrage Frontenac a été construit en 1917 sur la rivière Magog, au cœur de la Ville de Sherbrooke (Figure 2). Ce complexe hydroélectrique comprend, de la rive gauche à la rive droite, un déversoir comportant cinq vannes de surface et une vanne de fond, un mur en béton appelé « mur des prises d'eau », avec deux prises d'eau opérationnelles et une prise d'eau inopérante et finalement, à l'extrême droite, un mur d'aile. À chaque extrémité du déversoir, on trouve un mur d'épaulement. Le mur d'épaulement droit protège les bâtiments abritant les génératrices et une salle d'exposition qui lui est annexée. La hauteur de la retenue dans le bief amont est de 14,6 m. L'ensemble du complexe est montré sur la figure 2. Les documents historiques nous indiquent qu'en 1957, l'ouvrage a fait l'objet d'une réfection majeure et que du béton projeté a été mis en place à certains endroits du barrage.



**Fig. 2: Photographie du barrage Frontenac**

### **3 ÉVALUATION DE SÉCURITÉ DES BARRAGES**

#### **3.1 Le cadre réglementaire**

Selon le Règlement sur la sécurité des barrages, l'évaluation de la sécurité d'un barrage à forte contenance doit comporter les éléments principaux suivants :

1. l'inspection détaillée de chacune des composantes du barrage ;
2. l'analyse des résultats des dernières inspections ;
3. la vérification de la fonctionnalité et de la fiabilité des appareils d'évacuation ;
4. la vérification des critères de conception, soit les données sur l'hydrologie, l'hydraulique, la structure, la capacité d'évacuation et le laminage des crues ;
5. la vérification de la stabilité du barrage et du terrain de fondation, incluant des calculs de stabilité de la structure et du terrain de fondation du barrage et la caractérisation des matériaux constituant le barrage ;
6. la vérification des dispositifs de sécurité dont est muni le barrage;
7. la révision du classement accordé au barrage;
8. dans certains cas, la révision du plan de gestion des eaux retenues.

#### **3.2 Problématique rencontrée**

Avant la mise en vigueur de la loi, peu d'informations ont été conservées sur les ouvrages concernés. Les seuls documents actuellement disponibles sont des notes, des croquis ou bien des rapports d'inspection de composantes spécifiques des barrages. On trouve aussi des photos anciennes prises par un riverain le jour d'une crue ou encore des plans tels que construits lors d'une réhabilitation ne couvrant qu'une partie du barrage.

Finalement, l'évaluation de sécurité consiste, pour les ouvrages les plus anciens, non pas à vérifier la conception des ouvrages à partir des plans tels que construits, mais à étudier sa conception dans son ensemble. Autrement dit, il faut réaliser des études hydrauliques approfondies, une mise en plan détaillée et enfin, des calculs de stabilité. Ces calculs de stabilité

étant sur la géométrie et les caractéristiques des matériaux qui sont déterminées par des mesures *in situ* et en laboratoire.

#### **4. ESSAIS RÉALISÉS SUR LE BARRAGE EUSTIS**

Le barrage Eustis, datant de 1903, fait partie des ouvrages où le manque d'informations nous oblige à réétudier l'ouvrage dans sa totalité. Dans cette situation, il est difficile de savoir quelles sont les premières études à entreprendre pour caractériser à la fois l'état des matériaux constituant l'ouvrage et connaître le comportement éventuel de l'ouvrage sous diverses sollicitations. Il est donc pertinent, dans le cas de ce barrage, de posséder une vision globale de l'ouvrage à l'aide de diverses méthodes d'auscultation non destructives. Cette approche permet d'obtenir, en plus des propriétés physiques de l'ouvrage, les informations suivantes :

- repérer, pour l'ensemble de l'ouvrage, les « anomalies » (valeurs mesurées différentes de la valeur moyenne);
- mesurer les éléments accessibles de l'ouvrage à partir d'un seul côté (épaisseur de dalle et de pilier);
- détecter les armatures du béton et leurs répartitions.

##### **4.1 Inspection visuelle**

Cette inspection permet, à partir d'observations de surface des éléments submergés et non submergés de l'ouvrage, de percevoir les détériorations de surface. L'observation de la partie submergée de l'ouvrage est généralement réalisée en plongée sous-marine et les informations consignées sur une bande vidéo. C'est aussi dans le cadre de cette inspection que les dimensions de l'ouvrage sont déterminées pour être ensuite reportées sur les plans.

L'inspection met essentiellement en évidence les défauts de l'ouvrage dus à l'âge comme la dégradation du contact entre le roc et le pied de l'ouvrage, ou encore les fissures, les efflorescences, les exfiltrations d'eau ainsi que les délaminations et les zones de béton éclaté en surface. D'autre part, dans le cas du barrage Eustis, il apparaît aussi que la structure originale de l'ouvrage a été recouverte au cours de son histoire par de multiples couches de béton. Cependant, ce béton de surface empêche de percevoir la qualité du béton d'origine. Enfin, nous avons aussi pu constater que des ouvrages d'évacuation avaient été condamnés et recouverts par du béton.

##### **4.2 Essais de résonance dynamique au marteau**

Le martelage du béton de surface permet de relever et positionner les zones de faible résonance dynamique caractéristique de la faible cohésion du béton et des délaminations de surface. L'essai s'effectue par l'impact manuel d'un marteau contre la surface du béton. Les variations de la tonalité des émissions sonores permettent de détecter les vides proches de la surface du béton. Les anomalies détectées sont également reportées aux plans afin que l'information obtenue puisse être corrélée aux résultats d'autres essais.

##### **4.3 Essais soniques**

Cette méthode d'auscultation non destructive permet de repérer les anomalies de vitesse des ondes soniques traversant l'ouvrage en béton. Ces anomalies correspondent à des zones de vitesses différentes des vitesses moyennes rencontrées.

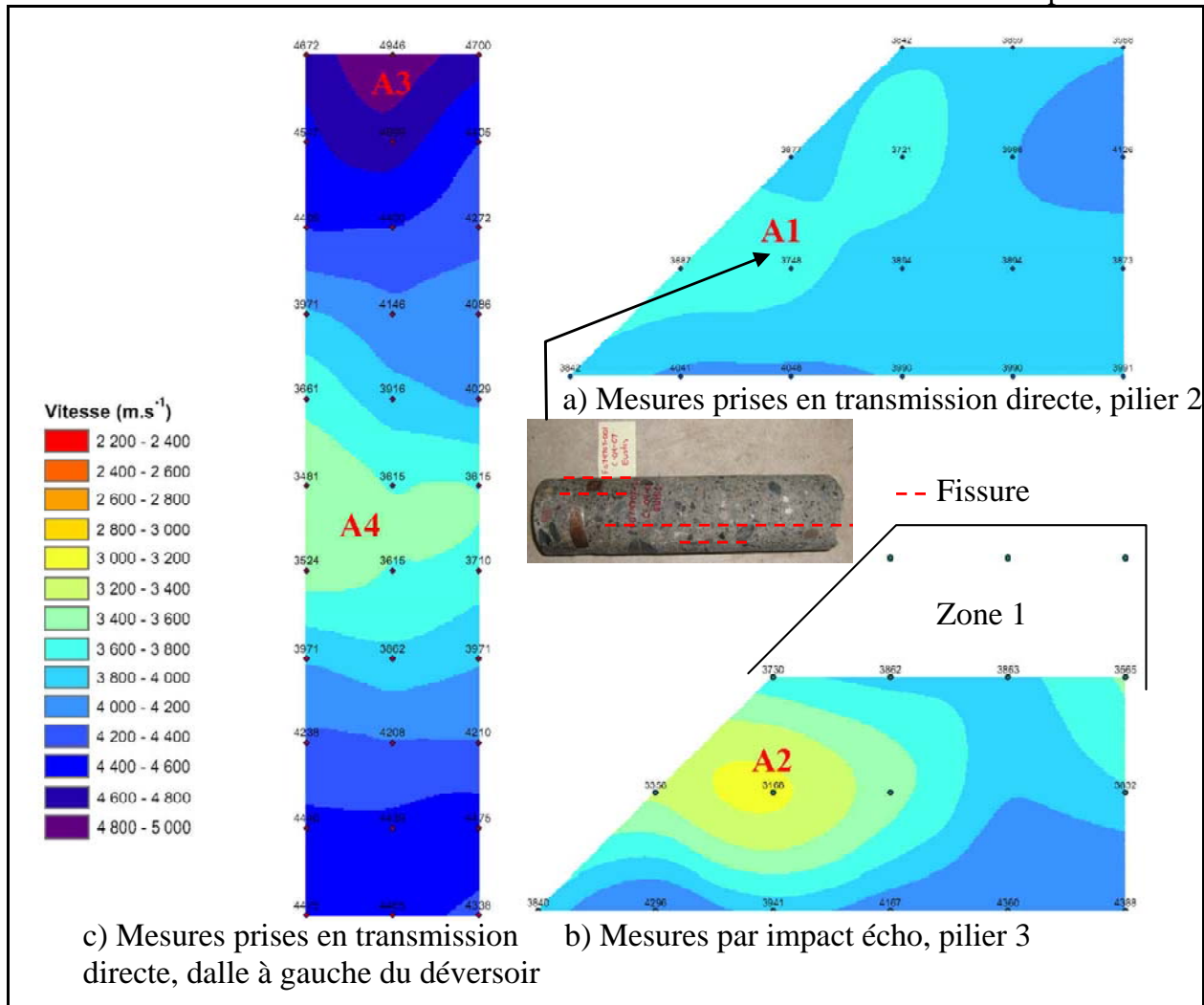
Deux techniques normalisées [2] sont utilisées pour mesurer ces vitesses : l'impact-écho et la mesure des vitesses par transmission directe.

En mode transmission directe, les vitesses de propagation des ondes sonores sont obtenues à partir de la mesure du temps de propagation des ondes dans une masse de béton de dimension

donnée. Pour réaliser ces mesures, les émetteurs et les récepteurs sont installés sur la surface et l'intrados de la structure.

En mode Impact-écho, les vitesses de propagation sont calculées à partir de la fréquence propre du signal reçu alors que l'émetteur et le récepteur sont placés l'un à près de l'autre sur le même côté de l'ouvrage.

Dans le cas qui nous concerne, les essais soniques ont été réalisés à l'aide du système Andescop de la compagnie ANDEC sur les piliers de la partie gauche du barrage et sur une dalle de béton construite récemment pour agrandir vers la gauche le coursier du déversoir. La figure 3 représente les vitesses mesurées à la surface de la dalle de béton du coursier du déversoir et des piliers 2 et 3.



**Fig. 3 : Essai sonique sur le barrage Eustis**

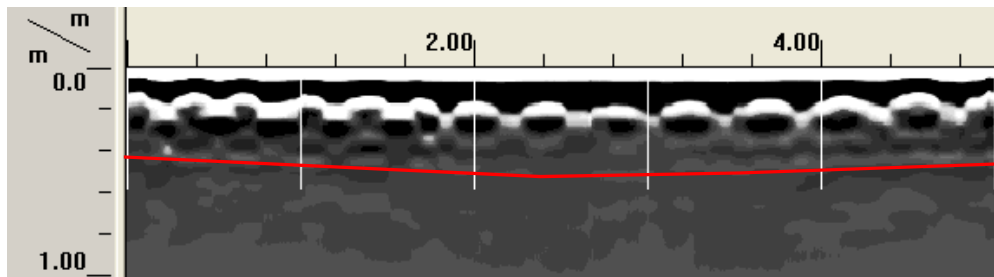
#### 4.4 Essais RADAR

Le « ground penetrating RADAR » est une méthode d'auscultation basée sur la propagation des ondes électromagnétiques dans le milieu. Elle permet de localiser les aciers d'armature, d'identifier les zones altérées ou fissurées près de la surface des ouvrages en béton ainsi que d'évaluer l'épaisseur d'une couche de béton [3]. La profondeur d'investigation de ce procédé

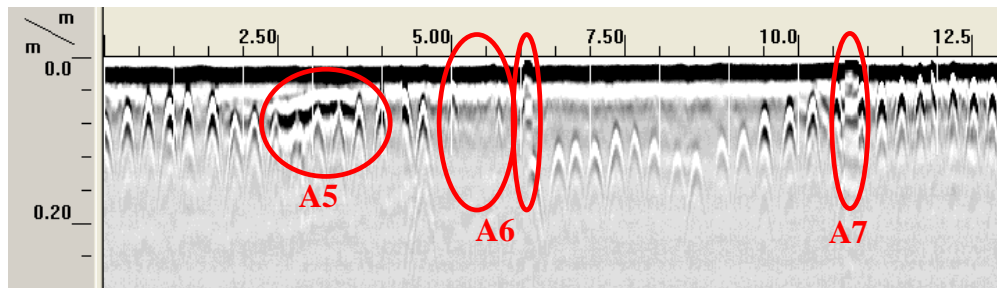
varie entre 200 et 900 mm et dépend de la fréquence centrale de l'antenne ainsi que de la teneur en eau du béton.

À l'emplacement du barrage Eustis, un appareil RADAR GSSI SIR-20 a été utilisé et la fréquence des antennes a été de 1,5 GHz et 400 MHz.

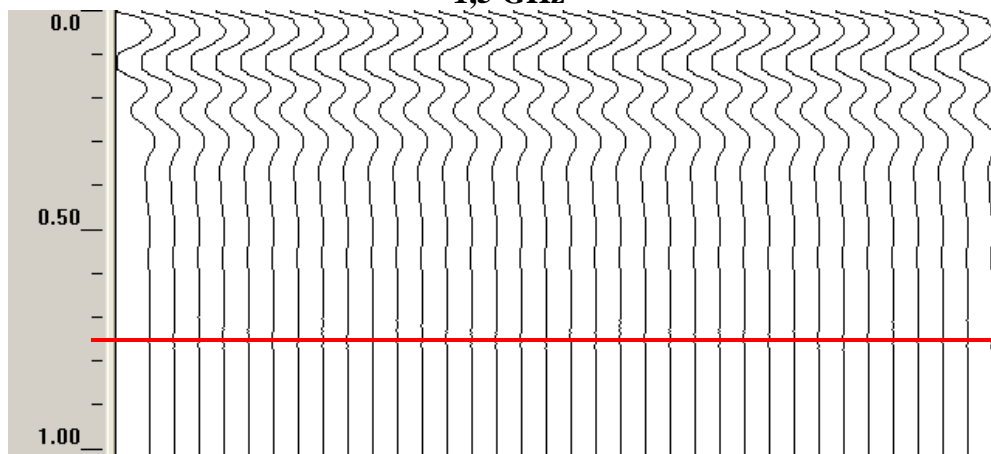
Les profils RADAR obtenus, appelés « radargrammes », permettent de visualiser, le long du chemin parcouru par l'antenne, une coupe perpendiculaire à la surface auscultée. Dans ces profils, les anomalies apparaissant sous forme d'hyperboles correspondent à des armatures. Lorsque le béton est humide ou endommagé, les ondes électromagnétiques sont atténuées et bruitées. Les figures 4 à 6 représentent les profils obtenus au niveau du déversoir et de la face aval du pilier 3.



**Fig. 4 : Mesures RADAR, profil de haut en bas de la dalle du coursier du déversoir, antenne 400 MHz**



**Fig. 5 : Mesures RADAR, profil de gauche à droite du coursier du déversoir, antenne 1,5 GHz**



**Fig. 6 : Mesure RADAR en un point fixe, face aval du pilier 3, antenne 400 MHz,**

## 5. ESSAIS RÉALISÉS SUR LE BARRAGE FRONTENAC

Le barrage Frontenac, datant de 1917, fait aussi partie des barrages peu documentés et qui incite à refaire entièrement l'étude du comportement de l'ouvrage. Ce barrage a fait l'objet d'une évaluation de sécurité en 2005. Dans les paragraphes suivants, nous allons voir comment l'auscultation a été utilisée pour déterminer dans quelle proportion il fallait réhabiliter un des éléments du barrage.

### 5.1 Évaluation de sécurité et travaux complémentaires

L'évaluation de sécurité réalisée en 2005 a mis en évidence une dégradation importante du béton au niveau des parements amont et aval du mur des prises et de la partie gauche du tablier de l'évacuateur de crues. De plus, en 1995, des carottes prélevées dans le béton du parement aval du mur situé en arrière des prises d'eau avaient mis en évidence la faible cohésion entre le béton de surface et le béton au cœur de l'ouvrage. Suite à ces observations, il a été recommandé d'augmenter la stabilité du mur des prises d'eau en effectuant une réfection complète de cette partie de barrage.

En 2007, une campagne d'investigation a été réalisée afin de mieux connaître les caractéristiques du béton à cet endroit et de mieux cerner l'étendue des travaux de réfection.

C'est dans ce contexte qu'il a été décidé de réaliser, en 2007, en plus des forages verticaux conventionnels et des essais d'eau sous pression, une campagne d'auscultation non destructive à partir d'essais soniques par transmission directe.

### 5.2 Essais soniques

Dans ce type d'essais, les vitesses de propagation des ondes sonores sont mesurées entre une série de récepteurs placés en amont de l'ouvrage à une distance variant entre 0,2 et 0,4 m du dessus du mur et une série d'émetteurs répartis régulièrement sur la face aval du mur. Le chemin parcouru par les ondes sonores (rais) est présenté sur la figure 7. La figure 8 donne les vitesses apparentes mesurées sur la face aval du mur des prises d'eau correspondant à la vitesse moyenne à laquelle les ondes sonores ont parcouru chacune des « rais ».

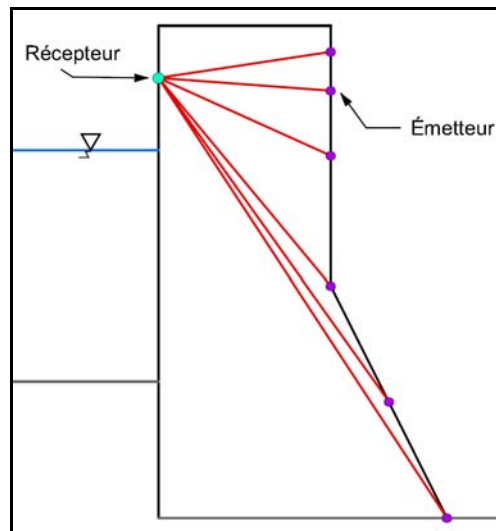


Fig. 7 : Tracé de rais (chemin parcouru par les ondes soniques)

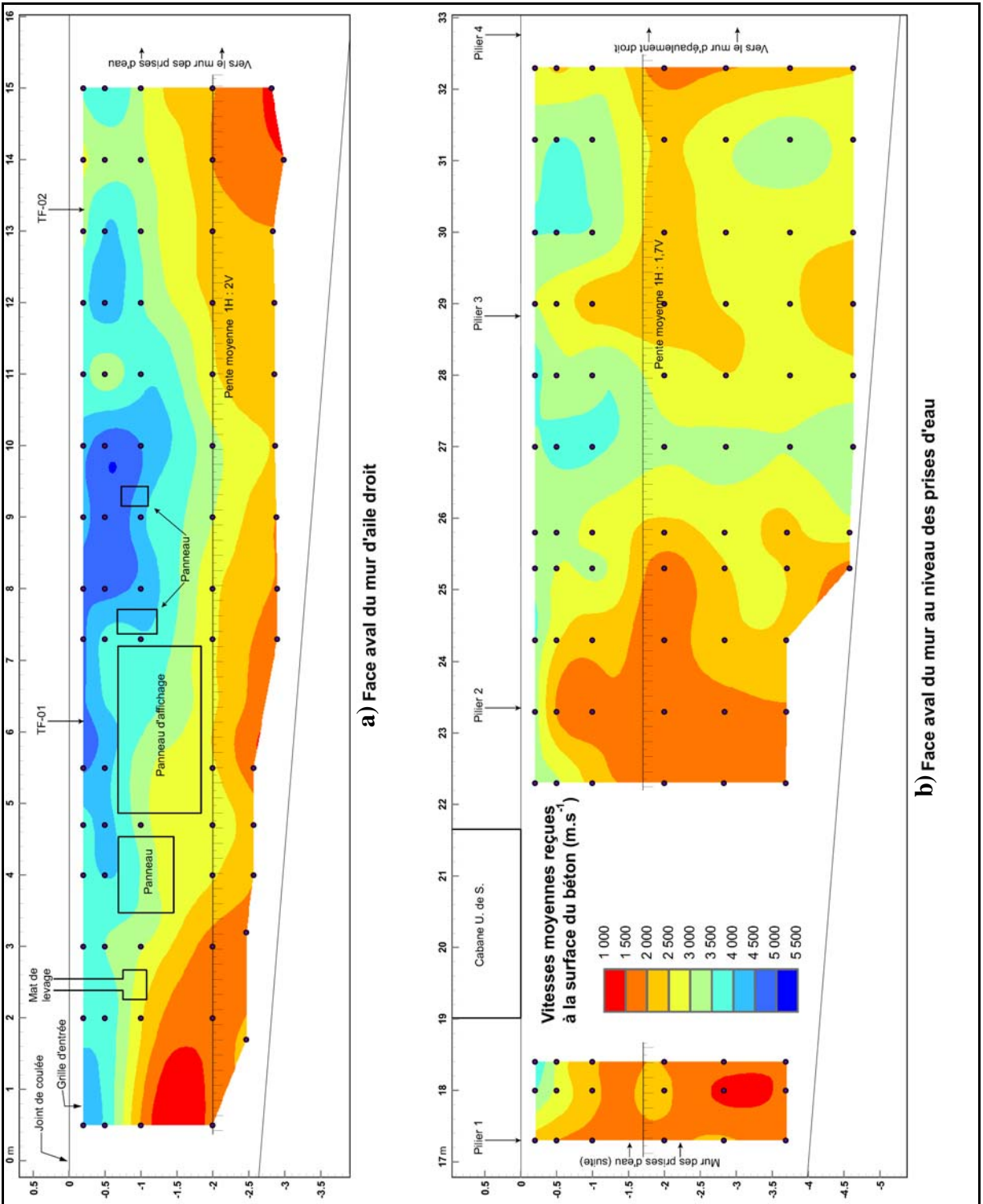


Fig. 8 : Auscultation du barrage Frontenac par méthode sonique



## 6. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans les deux sections suivantes, nous discutons des essais d'auscultation par méthode sonique et RADAR. Une corrélation entre ces essais non destructifs et les résultats obtenus par forage, carottage, inspection visuelle et essai de martelage est aussi réalisée, afin de valider nos observations.

### 6.1 Travaux réalisés sur le barrage Eustis

Les résultats obtenus à partir des deux côtés du pilier 2 indiquent que le béton constituant cet élément est de qualité moyenne à bonne, comme le montrent les vitesses de propagation variant entre 3 700 et 4 100 m.s<sup>-1</sup>. Vers l'amont du pilier (Figure 3a anomalie A1), on observe que la vitesse de propagation est légèrement inférieure à la vitesse moyenne rencontrée dans cette partie de l'ouvrage. Un carottage effectué à cet endroit indique que le béton est fissuré horizontalement (Figure 3, photographie de la carotte de béton). Un autre carottage a été réalisé dans une zone où le béton affiche une vitesse proche de la vitesse moyenne et le béton de la carotte prélevée était en bon état.

Le pilier 3 est constitué de deux murs de 0,8 m d'épaisseur espacés de 1,4 m. L'espace entre ces deux murs est fermé en aval par une dalle de béton dont l'épaisseur n'était pas connue. Les relevés réalisés en mode impact-écho à partir de la surface du mur droit du pilier 3 sont présentés à la figure 3b. Les vitesses mesurées dans la partie supérieure de ce pilier (figure 3 zone 1) ont donné des résultats erronés, car le béton à ce niveau était beaucoup plus épais que prévu. En effet, le vide entre les deux murs constituant ce pilier a été comblé par un béton de remplissage. Les ondes se propageant dans le premier mur ne se sont pas réfléchies à l'interface entre le mur et le béton de remplissage. C'est grâce à ces observations que nous avons appris qu'il existait un béton de remplissage dans la partie supérieure du pilier (zone 1) entre les deux murs et que le contact entre le béton d'origine et le béton de remplissage est bon. Par ailleurs, les vitesses mesurées dans la partie inférieure du mur en béton varient entre 3 500 et 4 400 m.s<sup>-1</sup>, ce qui correspond à un béton de qualité variant de moyenne à bonne. Une anomalie de basses vitesses a été repérée dans la partie amont du mur (Figure 3b anomalie A2). Les essais de martelage réalisés à ce niveau nous indiquent que cette anomalie correspond à une zone de vides située près de la surface.

La nouvelle section du coursier du déversoir du barrage Eustis se compose d'un béton de bonne qualité. La figure 3c montre que les vitesses des ondes qui se sont propagées dans le béton atteignent plus de 4 400 m.s<sup>-1</sup> dans les parties supérieure et inférieure de la dalle. Cependant, vers le centre de cette partie de coursier, une anomalie de vitesse (anomalie A4) correspond à des vitesses inférieures à 3 400 m.s<sup>-1</sup>. À cet endroit, aucune fissuration ou délamination n'a été observée. Il est donc probable que cette anomalie soit le résultat d'un défaut de mise en place du béton (nids d'abeille, augmentation localisée de l'épaisseur de la dalle). Nous allons voir que, d'après les résultats du RADAR, cette anomalie serait finalement attribuable à une augmentation de l'épaisseur de la dalle. À l'inverse, dans la partie haute du coursier, une anomalie de haute vitesse est observée. On pourrait penser qu'il s'agit d'une zone où le béton est de qualité supérieure à la moyenne, mais en réalité, le profil RADAR nous indique qu'à ce niveau, l'épaisseur de la dalle est plus faible. La faible épaisseur de la dalle à cet endroit implique que les vitesses apparentes sont plus élevées.

Les essais réalisés avec l'antenne 400 MHz, (Figure 4) permet d'évaluer à la fois l'augmentation de la profondeur des armatures mais également la variation de l'épaisseur de la dalle. Cette

dernière est d'environ 400 mm en haut du coursier, 500 mm vers le milieu et 450 mm en bas du coursier. Ces variations d'environ 100 mm ont aussi eu un impact sur le calcul des vitesses de propagation des ondes sonores dont nous avons discuté précédemment.

Le profil de la figure 5 est situé à environ 1,5 m au-dessus de la semelle du coursier. Dans ce profil, on rencontre une anomalie au niveau des armatures à environ 3 m du début du profil (anomalie A5). Cette anomalie peut être attribuée à un vide situé à l'interface entre deux coulées de béton. Entre 5 et 6 mètres, les signaux sont bruités et les anomalies (A6) correspondant à des armatures sont très peu visibles, ce qui signifie que le béton est de mauvaise qualité. À environ 6 m du début du profil, une anomalie verticale représente un mauvais contact entre un béton de réparation entourant une ancienne vanne et le béton d'origine. À gauche du coursier (vers l'anomalie A7), les armatures de l'ancienne partie sont situées à environ 100 mm de profondeur et celles de la nouvelle partie sont près de la surface (<50 mm). À 10,7 m, l'anomalie verticale observée (A7) correspond à un problème d'acquisition.

Le relevé illustré à la figure 6 a été réalisé sur le parement aval du pilier 3 et a consisté en la mesure de plusieurs signaux en un point fixe placé à 1,1 m du dessus de la semelle. Ces mesures, effectuées avec l'antenne 400 MHz, avaient pour objectif d'évaluer l'épaisseur de la dalle située entre les deux murs du pilier. Sur le profil, on trouve, à environ 750 mm de profondeur, une faible oscillation du signal correspondant à l'intrados de la dalle. La dalle aurait donc une épaisseur d'environ 750 mm au droit de ce point de mesure.

## **6.2 Résultats des travaux réalisés sur le barrage Frontenac**

Les forages géotechniques verticaux ont mis en évidence la présence d'un béton maigre à la base du mur d'aile et la présence de cavités au contact entre le rocher et le béton dans la partie gauche du mur d'aile droit (Figure 8a). Les essais d'eau sous pression indiquent que les valeurs d'absorption sont légèrement plus élevées au niveau du béton maigre (environ 9 litres par minute et par mètre) que dans le béton de la partie supérieure de l'ouvrage (environ 2 litres par minute et par mètre).

Les essais soniques présentés à la figure 8 nous permettent de constater que les vitesses de propagation des ondes traversant le béton varient entre 1 000 et 5 000 m.s<sup>-1</sup>. Ces vitesses correspondent à un béton très endommagé à bon.

En regardant la répartition des anomalies de vitesse sur la face aval du mur d'aile droit (Figure 8a), nous constatons que le béton de la partie supérieure (entre 0 et 1,5 m de profondeur) est en bon état. Cette observation est confirmée par les résultats obtenus dans les forages géotechniques verticaux réalisés sur le site.

À partir de 1,5 m sous la crête du barrage et en particulier dans la partie inclinée du mur d'aile (Figure 8a), les vitesses sont basses et correspondent à un béton endommagé à très endommagé. À ce niveau, les chemins parcourus par les ondes soniques sont proches de la surface. On peut donc affirmer que du côté aval, dans la partie basse du mur qui est éclaté en surface, le béton est très endommagé sur une trentaine de centimètres.

Dans la partie gauche du mur d'aile droit (Figure 8), les anomalies de basse vitesse commencent à partir de 1 m de profondeur. C'était dans cette zone que l'on a rencontré de faibles récupérations de béton entre 3 et 4 m de profondeur et traversé une cavité entre 4 et 5 m de profondeur dans un

des forages géotechniques. Ainsi, dans la partie gauche du mur, à plus de 11 m à gauche du joint de coulée, le béton est fortement endommagé.

Au niveau des piliers 1, 2, 3 et 4, des anomalies de vitesse inférieures à  $2\ 000\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  sont rencontrées à partir de 0,5 m en dessous de la crête du barrage. À ce niveau, le chemin parcouru par les ondes soniques est pratiquement horizontal (condition idéale pour réaliser des mesures en transmission directe), ce qui laisse penser que le béton au cœur de l'ouvrage est aussi fortement endommagé. D'autre part, sur la face aval du mur au niveau des prises d'eau (Figure 8b), des anomalies de basses vitesses sont majoritairement rencontrées. Ces anomalies se concentrent généralement au niveau des piliers 1, 2, 3 et 4, tel que montré sur la figure 8b. Des sondages réalisés en 1995 nous informent que le béton de surface est composé d'un béton projeté d'une dizaine de centimètres d'épaisseur et d'un béton de correction par endroits et qu'il y a une mauvaise adhésion entre le béton projeté et le béton sous-jacent. Les anomalies de basses vitesses situées en bas du mur, au niveau des prises d'eau, sont donc attribuables au béton fortement endommagé dans la partie supérieure et au béton de surface présentant une mauvaise cohésion avec le béton d'origine.

### **6.3 Discussion**

Les travaux réalisés sur le barrage Eustis ont débuté à l'aide des méthodes soniques et RADAR. Ces deux méthodes nous ont permis de connaître la répartition des anomalies au niveau des mesures de vitesse et des profils RADAR. L'origine de ces anomalies a pu être connue en réalisant une faible quantité d'essais destructifs ou bien en réalisant des essais de martelage. D'autre part, les essais soniques et RADAR ont aussi permis de percevoir l'ampleur des dégradations de surface observées lors de l'inspection visuelle et bien souvent nous avons pu confirmer que ces dégradations étaient normales et localisées près de la surface ou bien correspondaient à des problèmes de cohésion entre le béton d'origine et le béton de réparation. Les méthodes soniques et RADAR nous ont également permis de déterminer la géométrie de la dalle du coursier du déversoir, d'un des piliers et d'un mur où une seule des faces était accessible. Toutes ces informations ont permis d'orienter l'ingénieur en structure et l'ingénieur en hydraulique dans le choix des paramètres à considérer dans les calculs. Notons aussi que l'ingénieur en structure peut optimiser le calcul de la résistance équivalente des matériaux testés en laboratoire [4] en considérant la répartition des dommages présentés dans les résultats des essais d'auscultation.

Finalement, grâce aux essais non destructifs, nous avons pu évaluer de façon approfondie l'état du barrage en minimisant les coûts des essais destructifs.

Les études antérieures réalisées sur le barrage Frontenac ont consisté en de nombreux sondages destructifs qui ont mis en évidence des désordres majeurs mais dont l'ampleur était difficile à évaluer. D'autre part, l'observation du parement aval du mur des prises d'eau montre des dégradations de surface dans la partie droite alors que le béton de surface de la partie gauche a une belle apparence. Ces observations laissaient croire que seule la partie gauche de l'ouvrage était en bon état. C'est pour cela que les forages verticaux ont été réalisés dans la partie droite mais des doutes persistaient quant à la qualité du béton d'origine vers la gauche du mur. Finalement, les essais soniques ont confirmé les informations des forages géotechniques verticaux et ont mis en évidence une mauvaise qualité du béton d'origine dans la partie gauche du mur.

Les travaux complémentaires réalisés sur le barrage Frontenac en 2007, consistant en la réalisation de sondages géotechniques et d'essais soniques, ont permis de statuer définitivement sur l'état de l'ouvrage.

## **7. CONCLUSION**

Les travaux effectués sur les barrages Eustis et Frontenac montrent que l'auscultation des ouvrages en béton par méthodes soniques et RADAR est un outil précieux qui permet de répondre aux exigences du Règlement sur la sécurité des barrages et en particulier lors des évaluations de sécurité. Ces méthodes non destructives permettent, dès le début de l'évaluation, d'avoir une idée de la répartition des défauts probables dans le béton de l'ouvrage. Elles permettent aussi d'orienter les autres travaux nécessaires pour évaluer l'état du barrage et de diminuer significativement la quantité de ces derniers. En effet, connaissant à l'avance la localisation des désordres, il suffit par la suite de ne réaliser que quelques sondages ou observations visuelles pour valider les résultats. Cette approche permet aussi de diminuer considérablement les risques d'évaluations erronées, qui consisteraient, par malchance, à ne carotter que du béton sain ou bien que du béton endommagé.

Enfin, les informations recueillies par les méthodes non destructives sont par la suite exploitées dans les études de stabilité et les études hydrauliques requises pour compléter l'évaluation de la sécurité des barrages car elles permettent de fournir les données qui n'ont pu être recueillies lors de la cueillette d'informations et des essais destructifs. Par exemple, dans le cadre des barrages Eustis et Frontenac, les informations suivantes ont pu être obtenues :

- épaisseur de la dalle de béton ;
- répartition et profondeur des aciers d'armature ;
- répartition, dans l'ensemble de la structure, des zones endommagées et des zones saines ;
- élément de l'ouvrage le plus vulnérable à considérer pour l'étude hydraulique de bris de barrage.

L'auscultation des ouvrages hydrauliques par des méthodes non destructives, corrélée à quelques essais destructifs *in situ* et en laboratoire, permet d'évaluer rapidement et de manière approfondie l'état des ouvrages anciens, peu documentés, pour lesquels une évaluation de sécurité est requise selon la Loi sur la sécurité des barrages.

## **REMERCIEMENTS**

Les auteurs tiennent à remercier l'équipe du GRAI de l'Université de Sherbrooke pour leur aide lors de la réalisation de ces travaux. Nous tenons aussi à remercier Daniel Richer, lequel nous a autorisé à présenter les résultats des travaux de deux barrages appartenant à Hydro-Sherbrooke.

## **REFERENCES**

- [1] Gouvernement du Québec, Loi et Règlement sur la sécurité des barrages, c. S-3.1.01, r.1, © Éditeur officiel du Québec, avril 2002.
- [2] ASTM C1383-04 Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method, *Norme ASTM*, 2004
- [3] ASTM D4748-06 Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar, *Norme ASTM*, 2006
- [4] CSA-S6-06 Annexe A14.1 du Code Canadien sur le calcul des ponts routiers, *Norme CSA*, 2006