



**SNC • LAVALIN**

Conception et suivi de la performance des puits de décharge dans la fondation granulaire de la digue Moncouche du Lac Réservoir Kénogami au Saguenay; une approche originale couronnée de succès

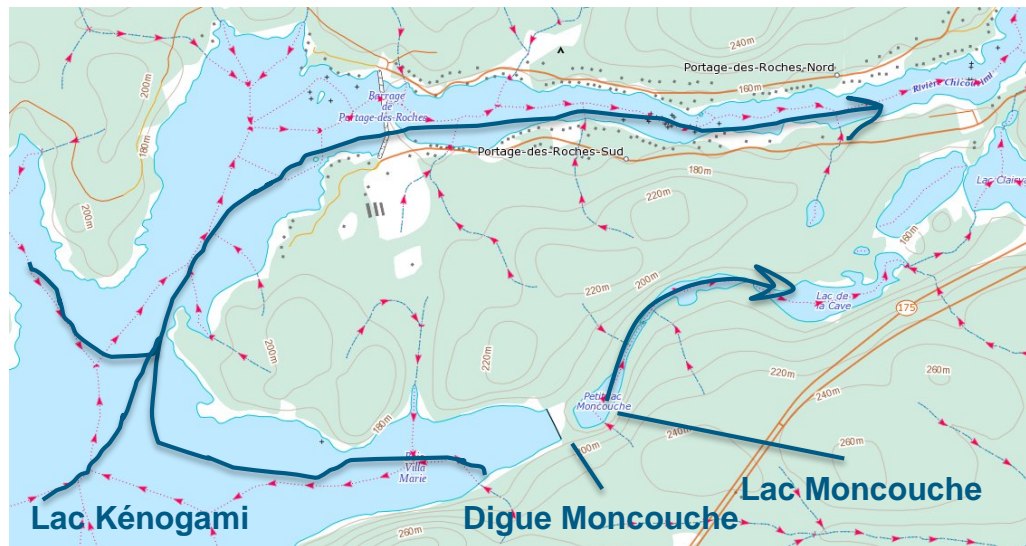
François Tremblay, ing. M. Sc. A. EESA  
Hydrogéologue, hydrogéochimiste  
et chargé de projet

SNC-Lavalin GEM Québec Inc.

# Plan de présentation

- › Localisation, objectifs et principaux défis du projet;
- › Justifications du projet;
- › Mise en situation (historique, conditions de terrain, stratigraphie, etc.);
- › Étude et révision de la conception;
- › Document photographique de la phase construction et des travaux de suivi;
- › Résultats du suivi de la performance;
- › Conclusions et impacts du projet.

# Localisation digue Moncouche



# Vue de la digue Moncouche avant le projet (été 2008)



Lac Moncouche

Envers le Lac Kénogami (Ouest)



Lac Moncouche

Envers le Lac Moncouche (Est)

# Vue aérienne envers le Lac Kénogami



Aluminerie Laterrière

Digue Moncouche



# Objectifs et défis du projet

- › Sécuriser la digue en relaxant les pressions interstitielles :
  - › Population, infrastructures urbaines et industrielles.
- › Réviser l'ingénierie de conception déjà produite par d'autres :
  - › Par tranchée drainante superficielle;
  - › Puits de décharge peu profond;
  - › Avec une modélisation numérique (exigence du client).
- › Produire plans et devis pour la solution proposée;
- › Démontrer avant la construction :
  - › Faisabilité financière du projet;
  - › Efficacité anticipée du concept;
  - › Faisabilité du protocole de contrôle des mesures de débits de relaxation (autres exigences du client).
- › Suivi pour valider l'efficacité (période de 2 ans).



# Justifications du projet

- › Révision des normes de sécurité d'ouvrages de retenue (suite au déluge de juillet 1996 au Saguenay et pour tenir compte du risque sismique de la région);
- › Nécessité de rehaussement de la digue de près de 2 m supplémentaire (30 % de la charge existante) pour tenir compte de crue maximale probable (CMP);
- › Risques de rupture (glissement) de la digue sous la condition CMP (plusieurs raisons) :
  - › Encastrement partiel de l'écran d'étanchéité dans la fondation granulaire;
  - › Présence d'un horizon argileux mou ou liquéfiable sous la berme en enrochement au pied de la digue;
  - › Conditions artésiennes connues avec risque de renard au pied de la digue.



# Historique

- › Première mise en eau en 1924;
- › Constat de résurgences importantes en aval;
- › Ajout de mesures de stabilisation dont une berme aval en enrochement;
- › Nombreuses études géotechniques antérieures pour caractériser le site et sa stabilité :
  - › Stratigraphie et granulométrie;
  - › Propriétés hydrauliques (essais de perméabilité);
  - › Piézométrie (piézomètres à niveaux multiples);
  - › Arpentage.





# Mise en situation

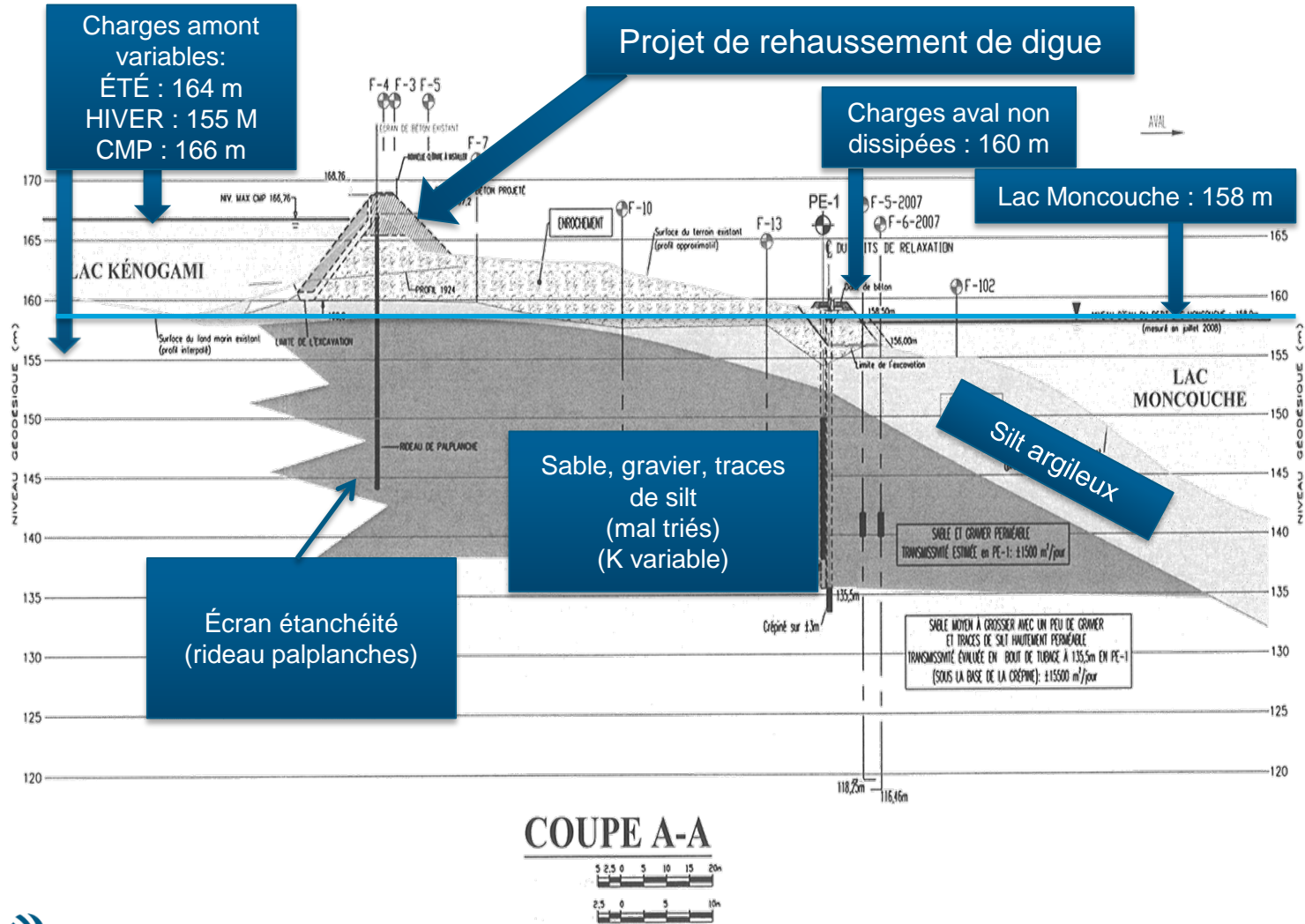
- › Digue et sols de fondations :
  - › Hauteur approximative : 9 m;
  - › Écran d'étanchéité en béton avec remblai granulaire sur environ 9 m suivi d'un rideau de palplanches partiellement enfouies dans la fondation granulaire de la digue;
  - › Longueur : 190 m (largeur de la vallée glaciaire comblée de sédiments et bordée par des crêtes rocheuses peu perméables).
- › Caractéristiques du terrain :
  - › Granulométrie variable de la fondation granulaire : succession de couches de sols sableux à sablo-graveleux avec traces de silt sous la digue (> 30 m);
  - › Conductivité hydraulique variable :  $10^{-4}$  à  $10^{-1}$  cm/sec;
  - › Horizon connu de sols silto-argileux peu perméables en aval de la digue et à la base du Lac Moncouche :
    - › *Mous ou liquéfiables;*
    - › *Jusqu'à 20 m sous la surface du lac.*

# Mise en situation (suite)

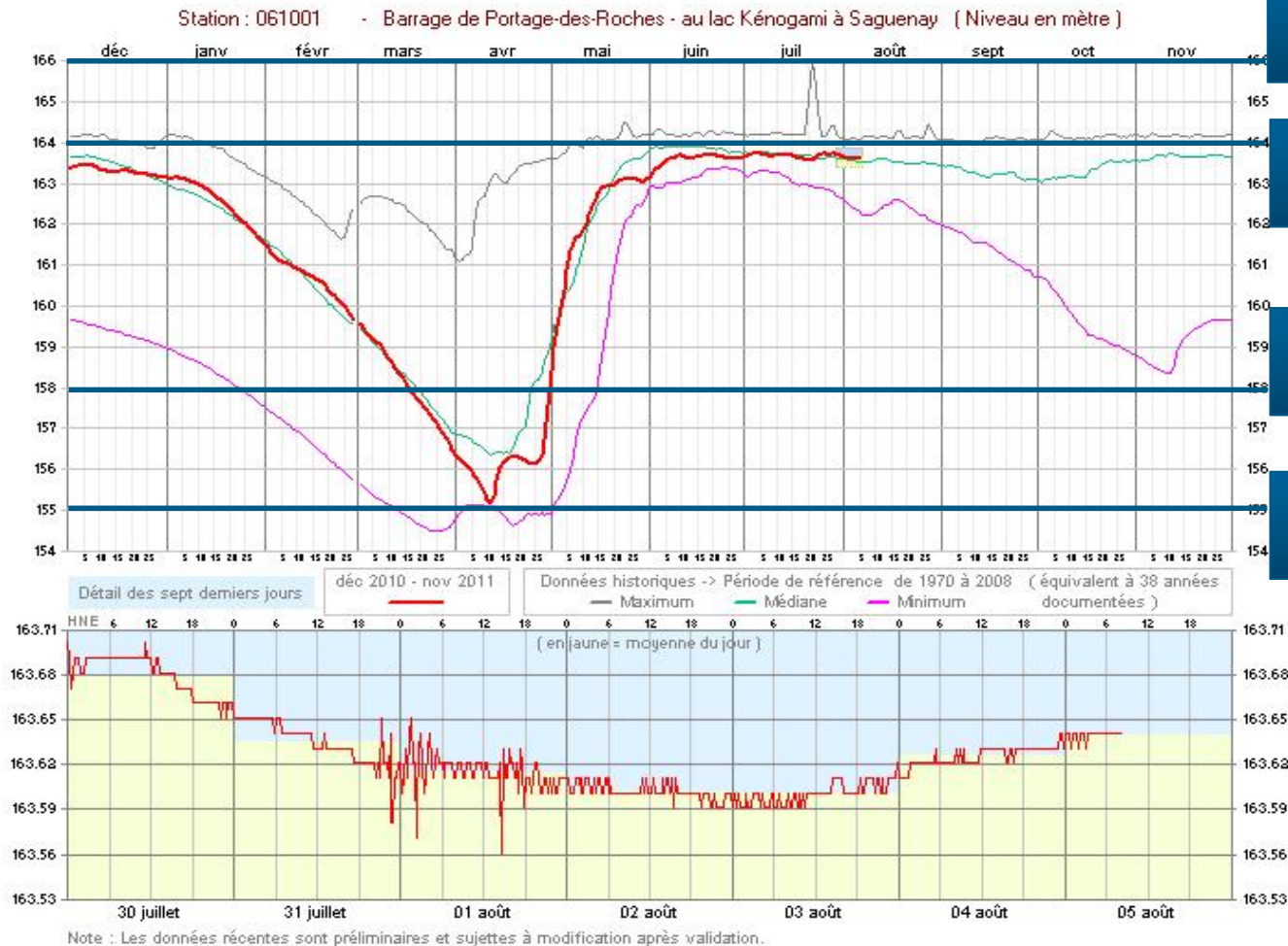
- › Fluctuations importantes du Lac réservoir Kénogami :
  - › Environ 3 m au-dessous du Lac Moncouche en condition d'étiage hivernal;
  - › Environ 6 m au-dessus du Lac Moncouche en condition normale d'exploitation (été-automne);
  - › Charges piézométriques non dissipées à la limite aval à la berme en enrochement de la digue (jusqu'à près de 2 m au-dessus du Lac Moncouche).



# Vue en coupe de la digue Moncouche



# Fluctuations du niveau d'eau du Lac Kénogami (source : site Internet du CEHQ)



Lac Kénogami :  
CMP : 166 m

Lac Kénogami :  
été-automne : 164 m

Élévation Lac Moncouche :  
158 m

Lac Kénogami :  
Étiage hiv.: 155 m

Produit le 2011-08-05 à 09:57

# Étude et révision de la conception

- › Revue des exigences et critère de conception :
  - › CMP (crue maximale probable) : + 2 m versus avant-projet;
  - › Présentation et démonstration de performance anticipée du concept avant et après la construction.
- › Revue des concepts antérieurs proposés :
  - › Amélioration de la tranchée drainante en place;
  - › Puits de décharge (crépines acier inoxydable sur toute la hauteur de l'horizon vulnérable au glissement 0-20 m);
  - › Rejet des canalisations de drainage sous le niveau du Lac Moncouche (protection contre le gel).
- › Revue des dizaines de milliers de données de suivis piézométriques historiques (1989-2008);
- › Mise en graphique et contrôle de la qualité des données :
  - › Constat de relation hydraulique et de gradient ascendant vers l'Est dans la fondation granulaire sauf en période hivernale (gradients orientés vers l'Ouest en raison de la baisse de 9 m du Lac Réservoir).



# Étude et révision de la conception (suite)

- › Visite et cartographie de terrain et des écoulements d'eaux de surface;
- › Constats de la visite :
  - › Présence de castors et d'obstructions sur les ponceaux aval du Lac Moncouche avec possibilité de hausse maximale d'environ 30 cm
  - › Débit très élevé en aval du Lac Moncouche :
    - › *Plusieurs milliers de gallons par minute*
  - › Débit très faible en aval de la tranchée drainante en place
  - › Accumulation de sédiments et autres débris dans un regard d'accès à la tranchée (signe d'intrusion et de colmatage par les castors)
  - › Présence de résurgences artésiennes d'eaux agressives à la tête des piézomètres (potentiel de corrosion des ouvrages de relaxation).



# Étude et révision de la conception (suite)

Photo des ouvrages de castors et obstructions sur les écoulements aux ponceaux aval du Lac Moncouche



# Étude et révision de la conception (suite)

Importance des écoulements d'eaux en aval du Lac Moncouche (eaux froides et limpides provenant essentiellement des résurgences d'eaux souterraines de la digue Moncouche)





# Étude et révision de la conception (suite)

Photo de la berme en aval en enrochement lors de la visite d'inspection initiale de juillet 2008



Absence de débits significatifs de résurgences au point de rejet de la canalisation de la tranchée drainante en place.



# Étude et révision de la conception (suite)

Présence de résurgences artésiennes d'eaux agressives à la tête des piézomètres



# Étude et révision de la conception (suite)

## Constats de la visite et impact sur la conception

- › Concept de tranchée drainante est voué à l'échec (non retenu)
  - › Transmissivité ou perméabilité insuffisante au niveau des sols;
  - › Problème additionnel anticipé de colmatage par les refoulements d'eaux et de sédiments en période hivernale (lorsque le lac Moncouche est plus haut que le lac Kénogami)
- › Problèmes similaires et des risques d'échec anticipés avec le concept des puits de décharge prévus dans l'horizon 0-20 m pour différentes raisons:
  - › refoulements d'eaux et sédiments et colmatage en période hivernale
  - › obstruction et mauvaise protection contre le gel
  - › matériaux granulaires insuffisamment drainants;
  - › sous-évaluation du débit souterrain pour la condition CMP (crue maximale)
  - › concept insuffisamment efficace (aucun pompage et réseau électrique prévu).



# Étude et révision de la conception (suite)

## Questions clés pour la conception (défi majeur)

- › La perméabilité (transmissivité) des sols de l'horizon 0-20 m est-elle suffisante pour permettre une relaxation efficace (pas seulement dans les puits de décharge, mais également dans les piézomètres et le terrain en périphérie)?
- › Est-ce réalisable dans la portion aval de la berme pour réduire les coûts des canalisations de rejet?
- › Si oui, sur quel intervalle de profondeur doit-on crépiner les puits de décharge?
- › Comment garantir et uniformiser la relaxation (sans pompage) en considérant que l'analyse des données géotechniques disponibles et la modélisation numérique ne permet pas de fournir cette garantie?



# Étude et révision de la conception (suite)

Phase d'investigation additionnelle non prévue et recommandée et principaux constats

- › Forage de reconnaissance hydrogéologique avec essai de pompage (évaluation de l'« architecture » et des propriétés hydrauliques de la fondation dans l'horizon 0-20 m)
- › Perméabilité de l'horizon 0-20 m variable mais jugé trop faible pour relaxer les charges;
- › Décision d'approfondir le forage sur le terrain;
- › Horizon voisin de 23 m :
  - › potentiel de relaxation jugé suffisamment élevé
  - › preuve d'une relation hydraulique avec l'horizon 0-20 m à risque de glissement;
- › Analyse de l'eau (constat d'eau agressive et naturellement corrosive).

# Étude et révision de la conception (suite)

Photos des travaux additionnels de reconnaissance hydrogéologique



État général des lieux (vue vers l'aval)



# Étude et révision de la conception (suite)

Photos des retours d'eau typiquement faibles sur l'horizon 0-20 m en bout de tubage (transmissivités faibles confirmées par essais de pompage)



# Étude et révision de la conception (suite)

Photos des retours d'eau largement plus élevés sur l'horizon 23 m en bout de tubage



Transmissivité très élevée  
calculée par essai de pompage



# Étude et révision de la conception (suite)

Avant de justifier l'aménagement des crépines des puits drainants sur l'horizon 23 m

Évaluation de la capacité de drainage de cet horizon (Transmissivité)

Selon deux méthodes:

- › Par interprétation théorique des essais de pompage;
- › Par une validation et une calibration avec des relevés simultanés de débit et gradient hydraulique sur le terrain et à l'aide de la loi de Darcy :
  - › Selon Darcy,  $Q = TiL$  ou  $T = Q/iL$  avec
    - ›  $Q$  : débit mesuré en aval du Lac Moncouche (19 000 m<sup>3</sup>/jour)
    - ›  $L$  : largeur de la vallée glaciaire (190 m)
    - ›  $I$  : gradient hydraulique relevé (18 juillet 2008) sous la berme aval : 0,72 %



# Étude et révision de la conception (suite)

- › Transmissivité calculée par calibration avec le débit du Lac Moncouche :
  - › T : 17 300 m<sup>2</sup>/d.
- › Transmissivité maximale théorique estimée par essai de pompage :
  - › 0-20 m : 1 500 m<sup>2</sup>/d (valeur cumulative jugée insuffisante pour relaxer);
  - › 23 m : 15 000 m<sup>2</sup>/d (valeur cohérente avec la calibration et jugée suffisamment élevée pour favoriser la relaxation).
- › Critères retenus pour calcul du débit à drainer et conception des puits de décharge en condition CMP :
  - › Transmissivité maximale probable sur l'horizon 23 m : 17 300 m<sup>2</sup>/d
  - › Horizon offrant le meilleur potentiel de relaxation : > 23 m (crépine: 3 m de haut min.);
  - › Différence majeure avec la conception initiale prévue (crépine 0-20 m);
  - › Potentiel de réduction des coûts de crépines (3 m versus 20 m).

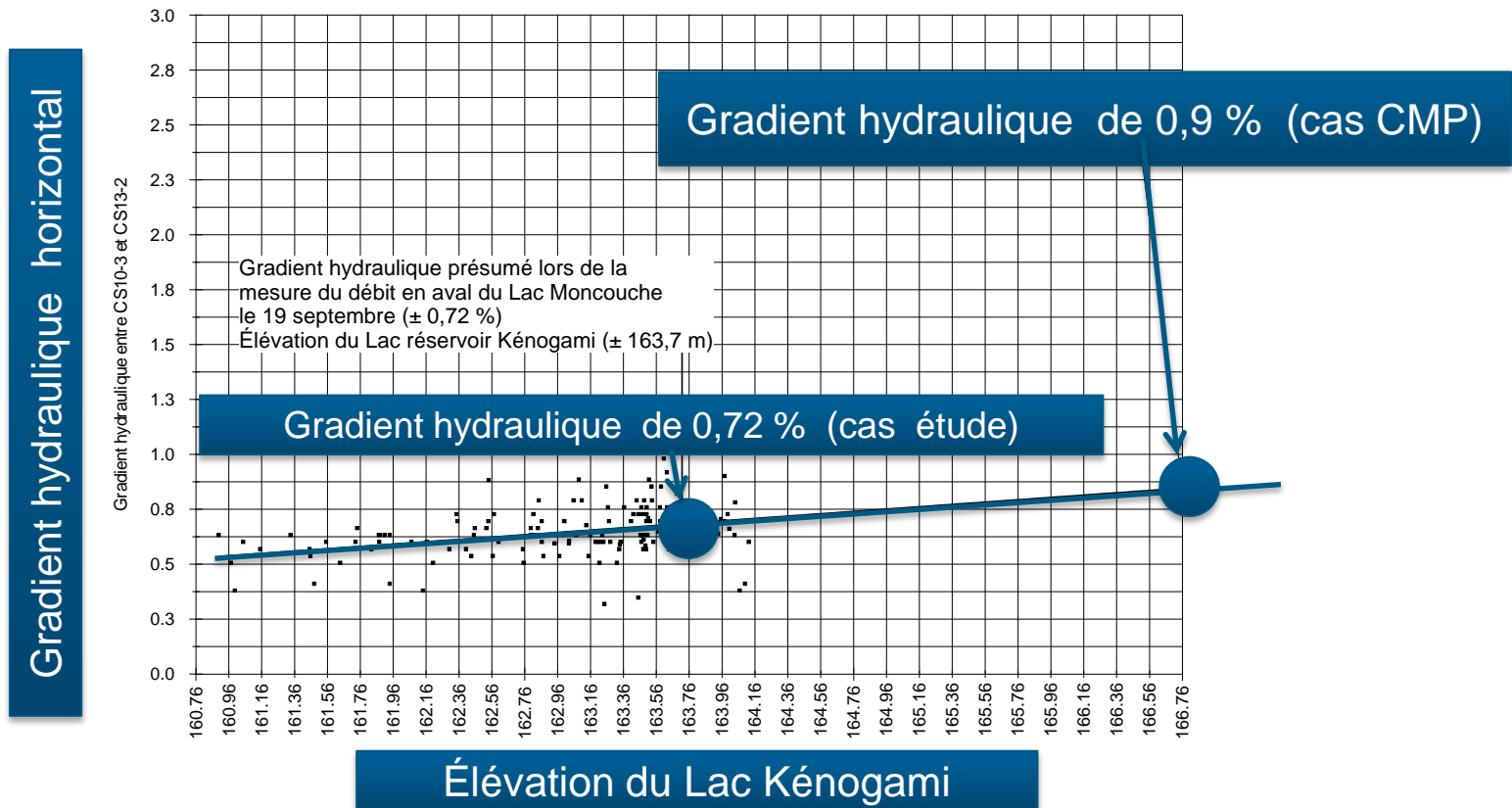


# Étude et révision de la conception (suite)

- › Estimation du débit prévisionnel des puits de décharge pour la condition CMP avec la loi de Darcy :
  - ›  $Q = T i L$  avec
  - ›  $T : 17\,300 \text{ m}^2/\text{jour}$
  - ›  $L : 190 \text{ m}$
  - ›  $i_{\text{CMP}}$  (gradient hydraulique en condition CMP) : ??

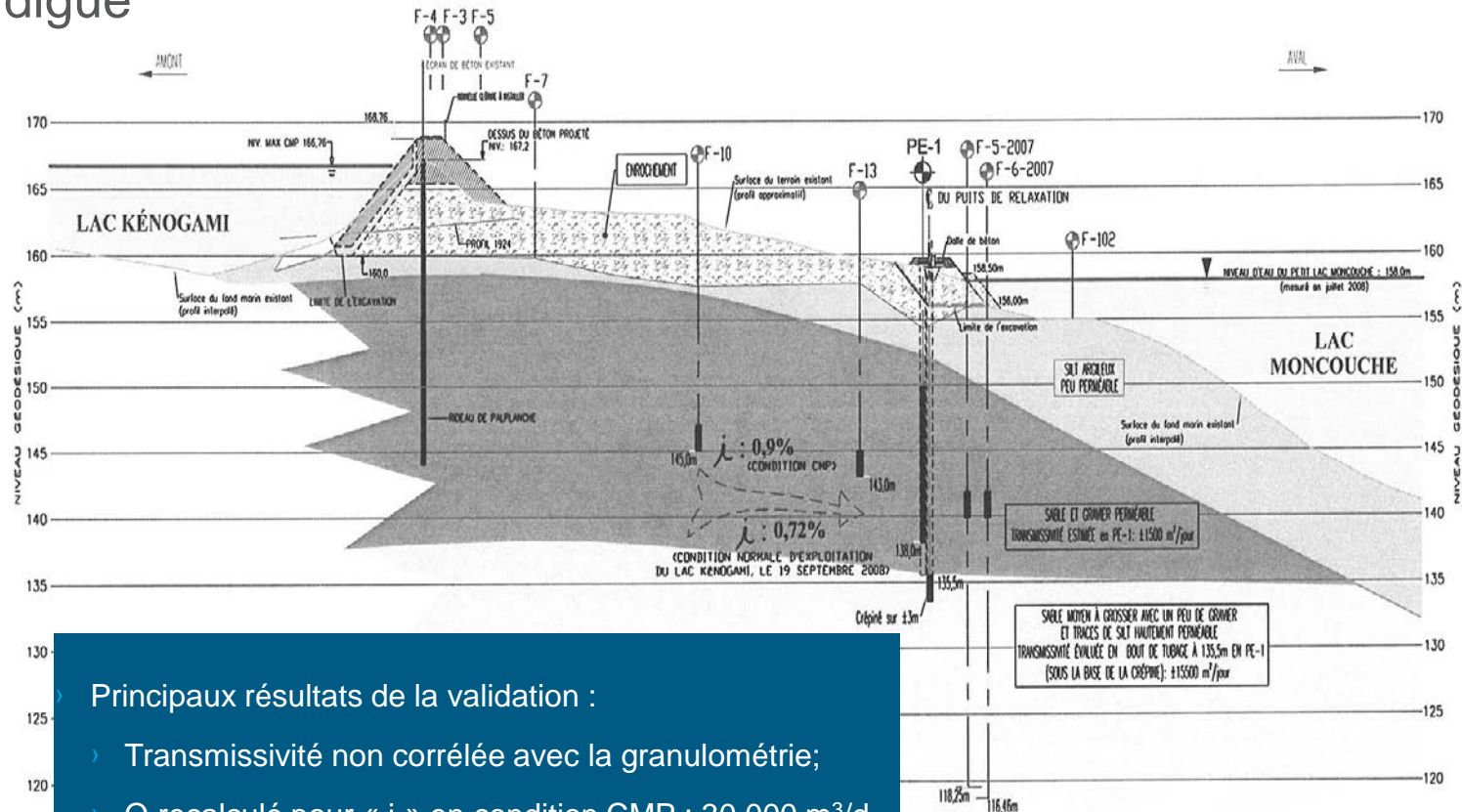
# Étude et révision de la conception (suite)

Justification du choix du gradient «  $i_{CMP}$  » par régression linéaire sur les données historiques



# Étude et révision de la conception (suite)

Modèle hydrogéologique schématique dans l'axe transversal de la digue



Principaux résultats de la validation :

- Transmissivité non corrélée avec la granulométrie;
- Q recalculé pour « i » en condition CMP : 30 000 m<sup>3</sup>/d (20 m<sup>3</sup>/min).

Débit à relaxer (CMP) : 20 m<sup>3</sup>/min sur l'horizon > 23 m



# Étude et révision de la conception (suite)

Justifications des choix de la conception des puits basées sur :

- › Possibilité d'une certaine variabilité et anisotropie des propriétés hydrauliques de la fondation granulaire avec nécessité d'apporter des ajustements lors de la construction;
- › 14 puits minimum espacés de 10 m pour uniformiser la relaxation (environ 1,5 m<sup>3</sup>/min/puits);
- › Horizon > 23 m ciblé pour le drainage et relaxation;
- › Éléments filtrants (crépines)
  - › Diamètre couramment disponible : 150 mm (approvisionnement plus rapide si changement);
  - › Longueur : 3 m minimum (réduction pertes de charges parasites);
  - › Ouverture : 2,5 mm (selon essais granulométriques antérieurs);
  - › Gravier filtre calibré (optimisation développement et réduction risques d'infiltration de sable);
  - › Matériaux résistants au poinçonnement (cailloux et bloc) et à l'eau agressive:
    - › *Crépine acier inoxydable: SS304;*
    - › *Tubage en CPV (Calibre épais SCH 80)*
    - › *Tête de puits métallique (au dessus du niveau des eaux)*



# Étude et révision de la conception (suite)

Conception partie supérieure des puits de relaxation et justifications :

- › Niveau de rejet choisi à l'épreuve des risques de bris ou de colmatage dû aux refoulements d'eaux de surface, de sédiments ou du gel :
  - › Structure renforcée pour la circulation, isolée du froid et accessible pour le suivi et la réhabilitation éventuelle des puits;
  - › Clapet anti-retour en cas de hausse imprévue du niveau d'eau par les barrages de castors (contrôle périodique recommandé);
  - › Enrochement périphérique jusqu'au Lac Moncouche (pour assurer le drainage sous la ligne de gel et des embâcles de glace).





# Aménagement des ouvrages de relaxation et de l'instrumentation de suivi de la performance

Document photographique



# Photo de l'état des lieux lors de la construction des puits de décharge (avril 2009)



Photo du 29 avril 2009 et des premières venues d'eau à la tête d'un puits de décharge avant le recouvrement de la fosse d'infiltration en enrochement par une dalle structurale et un regard d'accès à l'épreuve du gel et des embâcles

Valve de fermeture avant son raccordement à la tête du puits hors-sol

Margelle du puits en CPV



Vue de la berme en aval et des regards d'accès aux puits de décharge, après la consolidation de la digue (printemps 2009)



Vue plongeante à l'intérieur d'un regard d'accès, après la pose du clapet anti-retour sur l'extrémité de la canalisation de rejet et de la valve de fermeture

# Téléchargement des données des sondes automatisées d'enregistrement des fluctuations de niveaux d'eau de type « levelogger » (18 mai 2011)

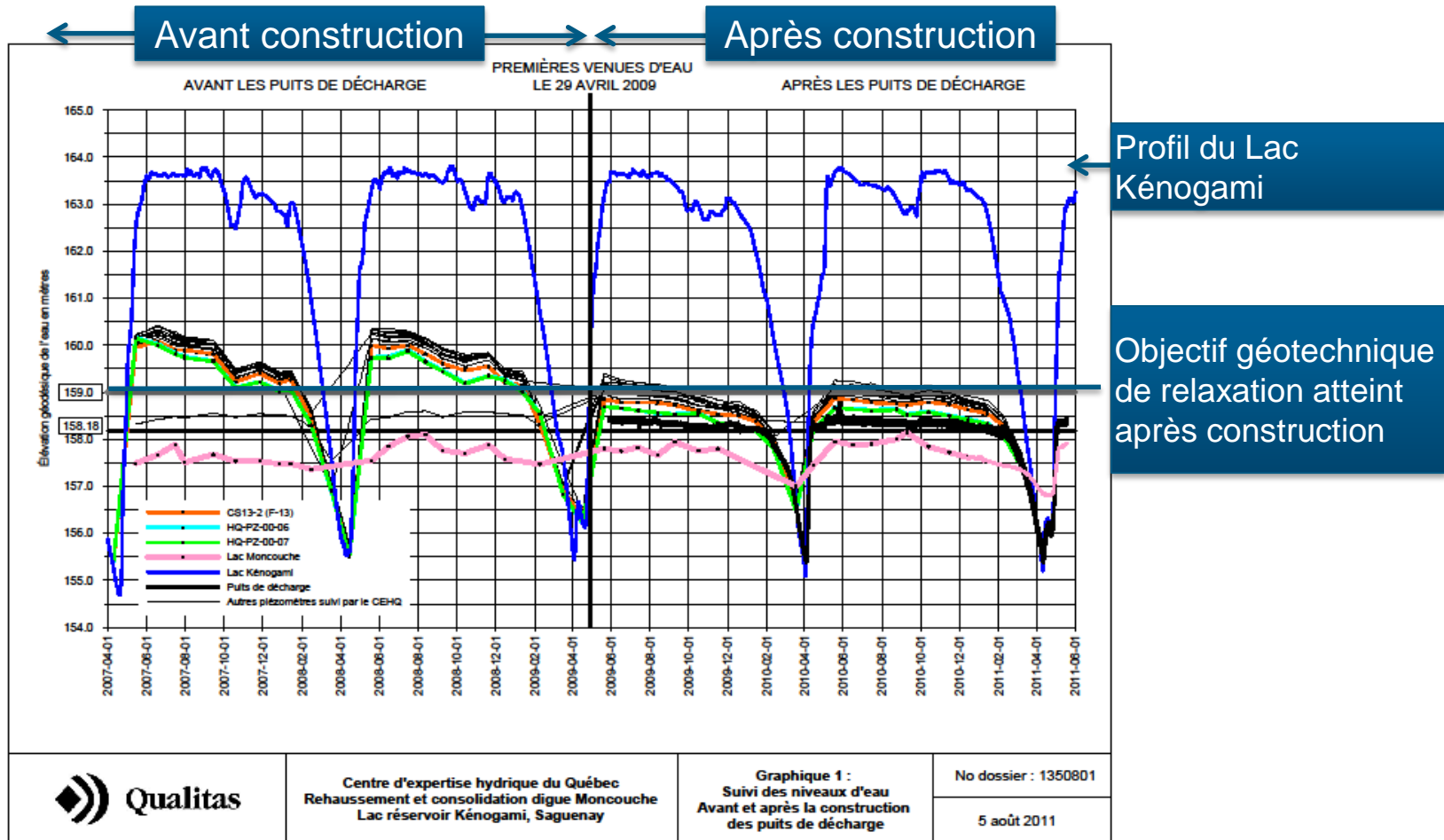


# Mesure de la vitesse d'écoulement ascensionnelle de l'eau dans le tubage d'un puits de décharge avec un vélocimètre à hélice (18 mai 2011)



# Résultats du suivi de la performance

Influence des puits de décharge sur la relaxation des charges hydrauliques des piézomètres au pied aval de la digue



# Conclusions et impacts

- › Succès technique et financier du projet;
- › Guidé d'abord par des observations de terrain et leur interprétation pour identifier et contourner les contraintes névralgiques de projet et pour orienter l'ingénierie avec des mesures sécuritaires et efficaces :
  - › Problèmes anticipés de vulnérabilité des ouvrages (refoulements, colmatage et gel);
  - › Problèmes anticipés d'inefficacité et de transmissivité insuffisante au niveau de la fondation granulaire (horizon 0-20 m prévu versus celui ciblé entre 23 et 26 m).
- › Importance de comprendre et d'élucider « l'architecture » géologique de la fondation granulaire de la digue :
  - › Choix plus éclairés (propriétés hydrauliques, conception, efficacité du projet);
  - › Optimisation des coûts et de la sécurité du projet (réduction des sections crépinées).

# Collaborateurs du projet

- › Madame Hélène Tremblay, ing. pH. D. CEHQ
- › Monsieur Simon Fleury, ing., hydrogéologue
- › Madame Valérie Michaud, ing. M. Sc., géotechnicienne
- › Monsieur Régis Bouchard, ing. M. Sc., géotechnicien
- › Monsieur Daniel Couture, ing. civil
- › Monsieur Benoît Turgeon, ing. civil (volet rehaussement de digue / gestion projet)







Questions ?