

**MISE AUX NORMES DE L'EAU POTABLE –
CONDITIONS DE GLACE DE LA RIVIÈRE
MONTMORENCY – SECTEUR DES ÎLETS
MISE À JOUR À L'HIVER 2008-2009**

Rapport de recherche No R-1073

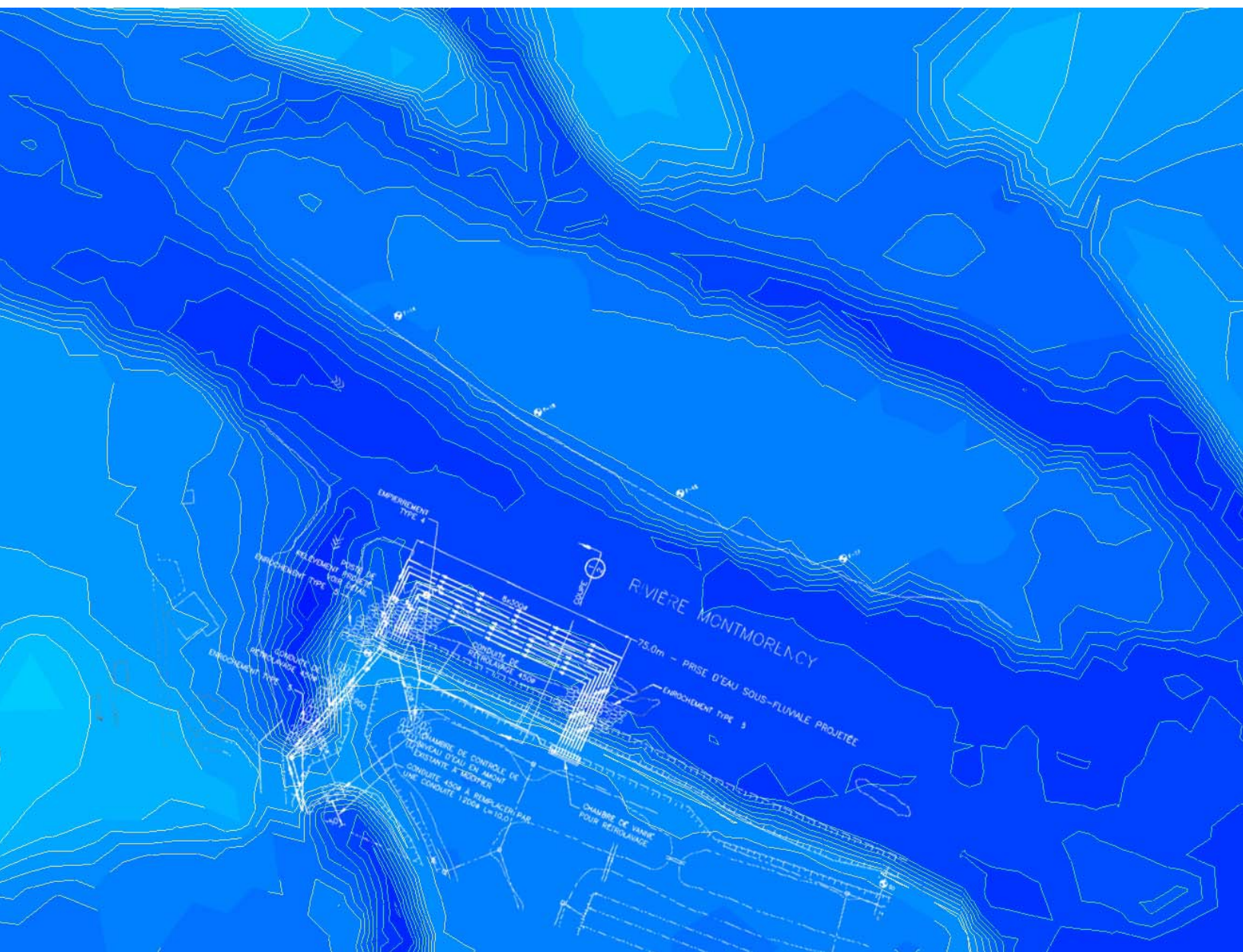
Avril 2009

INRS

Université d'avant-garde

Mise aux normes de l'eau potable - Conditions de glace de la rivière Montmorency – Secteur des Îlets Mise à jour à l'hiver 2008-2009

Rapport de recherche INRS-ETE #R1073 - Avril 2009



Mise aux normes de l'eau potable -
Conditions de glace
de la rivière Montmorency – Secteur des Îlets
Mise à jour à l'hiver 2008-2009

Pour le compte de la



Rapport de recherche INRS-ETE #R1073

Avril 2009



SOMMAIRE EXÉCUTIF

Référence pour fins de citation : Leclerc, M., F. Bérubé et C. Paniconi (2009). Mise aux normes de l'eau potable - Conditions de glace de la rivière Montmorency – Secteur des Îlets – Mise à jour à l'hiver 2008-2009. Rapport de recherche INRS-ETE #R1073. 35 pp. Avril.

© INRS-ETE, 2009

RÉSUMÉ

Contexte

Un système innovateur de captage d'eau potable formé de puits horizontaux est projeté dans le secteur des Îlets de la rivière Montmorency. La fonction de cet ouvrage innovateur est de permettre de fournir en eau brute l'usine de traitement lors d'épisodes hydrologiques particuliers comme des crues exceptionnelles ou en hiver sous couvert de glace. Devant le caractère évolutif de la morphologie d'un tronçon anastomosé (en tresse) comme celui à l'étude et de la dynamique hivernale du couvert de glace, le positionnement des conduites doit être optimisé en conséquence. De plus, la question des écoulements dirigés vers le fossé de ceinture en vue d'alimenter la future prise d'eau superficielle est aussi examinée à la lumière des nouveaux résultats de caractérisation.

Ce rapport présente plus particulièrement les résultats mis à jour en 2009 relatifs au couvert de glace et aux écoulements sous couvert. La géométrie et le dimensionnement du dispositif sous-fluvial proposé par la firme Génio Experts-Conseil sont examinés à la lumière de cette mise à jour et un avis est formulé sur ces aspects.

Caractérisations et interprétation

La caractérisation du couvert de glace a été réalisée à la fin mars 2009 au géoradar-glace, campagne validée cette fois avec des sondages directs réalisés en divers points du secteur d'analyse. La topographie n'a pas donné lieu à des mesures additionnelles de sorte que ce sont les données de 2008 qui ont servi à l'interprétation.

Comme en 2008, les résultats révèlent que la couche de glace solide finit par s'appuyer au fond sur une grande partie du lit mineur à mesure que l'hiver progresse. À la fin de la saison hivernale, il ne subsiste une couche d'eau liquide significative et détectable au géoradar qu'en certains trajets particuliers du cours d'eau, généralement à l'aplomb du thalweg, soit les parties les plus profondes du lit mineur. En ces sites particuliers, les données de sondage révèlent que le niveau d'eau hydrostatique atteint *grosso modo* celui du niveau de la glace ce qui suggère que l'écoulement peut s'effectuer en charge sous le couvert de glace lorsque l'espace résiduel le permet.

La présence de frasil accumulé sous le couvert n'a pas été constatée de façon significative en 2009 comme ce fut le cas en 2008. Il est possible que du frasil préalablement accumulé sous le couvert au début de l'hiver se soit graduellement consolidé sous le poids du couvert de glace et ne soit plus détectable en tant que tel en mars. Il est aussi possible que la génération de frasil en 2009 fût inférieure à celle de 2008 étant donné qu'une débâcle importante cette année-là, suivie d'un embâcle majeur à la hauteur du pont multi-fonctionnel, avait laissé la rivière à l'eau libre, une situation propice à la génération de frasil et à sa propagation soutenue vers l'aval.

Quand la topographie n'est pas trop contrastée latéralement, on note une distribution plus uniforme, quoique très mince de la couche d'eau liquide. C'est le cas vis-à-vis du site retenu pour implanter le système de captage. Il est à noter que cette couche d'eau très mince est donc difficile à détecter et à mesurer, mais qu'elle supporte une pression hydrostatique supérieure à sa seule épaisseur ce qui suggère qu'un écoulement y demeure possible.

Un nouveau constat relatif au potentiel de dérivation du débit vers le fossé de ceinture s'avère préoccupant quant à la sécurité de l'approvisionnement de la prise d'eau superficielle en hiver, voire même en été lors d'étiages très sévères. La topographie surélevée du cours principal à l'entrée du fossé et le comportement du couvert de glace qui se met rapidement en appui au fond sont peu propices à l'établissement d'un courant soutenu entre le cours principal et le fossé. Dans son état actuel, il semble que le fossé de ceinture soit principalement maintenu en eau par transfert à partir des bassins qui, eux-mêmes sont alimentés par pompage direct au cours principal, ou encore par percolation à travers les alluvions à l'entrée du fossé de ceinture

En conséquence, il pourrait se produire que la prise d'eau sous-fluviale, conçue pour un usage exceptionnel, voire d'urgence, soit plus souvent et plus systématiquement sollicitée que prévu à moins que la topographie du site ne soit adaptée et entretenue afin de maintenir des conditions d'écoulement satisfaisantes à cet endroit, surtout en hiver. Des recommandations à cet effet sont formulées ci-après.

Mise à jour des recommandations 2008

Les résultats de 2008 proposaient une variante plus optimale pour le positionnement des conduites que celle proposée préliminairement par la firme Génio Experts-conseils. La cote verticale et la position latérale du dispositif dans la section avaient été revisitées afin de maximiser l'efficacité du captage. Ci-après, ces recommandations sont revisitées.

Position verticale du dispositif sous-fluvial La recommandation de 2008 d'implanter le lit filtrant (surface) à une cote inférieure à celle retenue au départ (154 m), soit plutôt 153,4 m est maintenue, ce qui revient à abaisser le profil topographique du lit mineur à l'aplomb des conduites. Cette cote paraît toujours plus indiquée afin de favoriser la submersion du lit filtrant en tout temps, surtout en hiver. De plus, cette cote semble plus appropriée pour d'une part, maximiser la sécurité du dispositif de captage étant donné l'amplitude verticale des mouvements d'alluvions observés, et d'autre part, perturber le moins possible l'équilibre morphologique actuel du secteur. La position verticale des conduites doit donc être décalée vers le bas en conséquence.

Si la taille des conduites utilisées devait se démarquer de la proposition originale (ex : 600 mm plutôt que 300), il semble indiqué d'en abaisser le radier de la différence (300 mm) d'autant afin que l'épaisseur du remblai demeure la même et maintienne le niveau de sécurité initial du dispositif. Le projet initial (début 2008) prévoyait un recouvrement de 2,4 m d'épaisseur au-dessus des conduites. Dans la mesure du possible, cette épaisseur devrait être maintenue afin de procurer le meilleur niveau de sécurité possible contre une dégradation importante du lit de la rivière qui pourrait survenir suite à une crue majeure ou un embâcle abrasif. Une diminution de cette épaisseur comme celle plus récemment proposée (moins de 2 m) offre aussi un niveau de

sécurité intéressant mais moindre que la proposition originale. Il n'est pas possible dans nos connaissances actuelles de statuer sur la période de retour d'un événement qui risquerait de mettre en question l'intégrité du système.

Position horizontale du dispositif sous-fluvial. La position proposée du dispositif dans le plan se situe dans une zone d'accumulation naturelle de débris et de particules fines. Il avait été recommandé en 2008 de déplacer l'ensemble du dispositif d'un minimum de 5 m vers le nord (vers le centre du cours d'eau) afin de maintenir la couche superficielle d'alluvions formant le lit filtrant en contact avec les forces tractrices de l'écoulement, en crue notamment. Cette recommandation est maintenue et précisée dans le présent rapport. L'orientation de l'axe longitudinal du système est ainsi légèrement modifiée et la géométrie de la berme en rive est adaptée en conséquence avec un léger élargissement à son extrémité amont.

Topographie à l'entrée du fossé de ceinture. Concernant la topographie du lit mineur à l'entrée du fossé de ceinture, il pourrait sembler indiqué de l'excaver (ex : jusqu'à 152,5 m soit le radier du fossé lui-même) afin d'accroître la chenalisation de l'écoulement du cours principal vers le fossé. Cette option viserait à favoriser la présence d'eau liquide et d'un approvisionnement suffisant de la prise d'eau superficielle en tout temps mais plus particulièrement en hiver, faute de quoi, la prise d'eau sous-fluviale prévue pour une opération d'urgence risque d'être sollicitée sur une plus longue période de temps que prévu, c'est-à-dire à partir du moment où le couvert de glace appuyé au fond viendrait restreindre sévèrement, voire annihiler l'apport en eau vers le fossé. Dans la situation actuelle, le fossé de ceinture semble être maintenu en eau par un processus de vases communicants qui relie le fossé aux bassins existants, eux-mêmes approvisionnés par pompage dans le cours principal. Si ce système doit être abandonné comme prévu, on ne pourrait désormais plus compter sur lui pour soutenir le captage direct dans le fossé.

Limitations et risques additionnels de la chenalisation suggérée. Par contre, l'option d'excavation considérée ne va pas sans risque de comblement par les alluvions et les sédiments lors des crues annuelles étant donné que cette chenalisation artificielle serait implantée en travers de l'écoulement dans le cours principal et on ne pourrait pas s'appuyer sur la dynamique alluvionnaire naturelle du cours d'eau pour sa maintenance. On devrait donc planifier la mise en place d'un processus d'entretien périodique (annuel, saisonnier, voire événementiel) afin de maintenir le chenal proposé. De plus, l'appel de frasil créé par le courant vers le fossé pourrait aussi contribuer à diminuer le rendement de la prise d'eau superficielle. Cette option n'est donc pas retenue à ce stade.

Rouvrir le fossé de ceinture? À terme, il apparaît plus judicieux d'examiner la possibilité de rouvrir le fossé de ceinture à la circulation de l'eau afin de rétablir un patron de circulation favorable au maintien de la nouvelle configuration proposée du lit mineur. Cette suggestion comporte aussi plusieurs autres avantages qui ne seront pas détaillés ici (renaturalisation du site, rétablissement d'une dynamique sédimentaire naturelle en aval du fossé, utilité du fossé pour évacuer les débits de crue, etc.). En revanche, elle est aussi assortie de limitations par rapport au niveau d'eau résultant dans le fossé, dépendant de la ligne d'eau dans le cours principal, et qu'il importe de maintenir constamment à une cote suffisante pour le captage efficace en toutes saisons. La ré-ouverture du fossé de ceinture, si cette suggestion était un jour reprise par la Ville, devrait donc être soigneusement conçue et dimensionnée pour sécuriser le captage superficiel.

Suivi scientifique. La recommandation de mettre en place un processus de suivi scientifique périodique et à long terme du dispositif afin d'optimiser les futures opérations d'entretien est maintenue. En plus du système de captage lui-même, le suivi vise notamment l'évolution topographique, sédimentologique (alluvions) et glaciologique. Concernant ces derniers éléments,

la survenue d'événements exceptionnels tels que des embâcles ou des crues majeures constituent des événements déclencheurs de suivi.

COLLABORATEURS

Pour la Ville de Québec

Chargé de projet

Claude Goulet, ing.

Institut national de la recherche scientifique – Eau, Terre et Environnement

Responsable du projet,

Claudio Paniconi, Ph.D., Professeur titulaire INRS-ETE, Écoulements souterrains

Responsable du thème glaciologique

Michel Leclerc, ing., Ph.D., Professeur honoraire INRS-ETE, Hydraulique fluviale

Caractérisation glaciologique, traitement des données géoradar

Francis Bérubé, assistant de recherche INRS-ETE

Pour Génio Experts-Conseils

Intrants relatifs à la conception de la prise d'eau sous-fluviale

Denis Pinard, ing., M.Sc.

Projet FRAZIL (GÉOÏDE)

Prêt d'équipement radar (géoradar)

Yves Gauthier, Géogr., M.Sc, Agent de recherche

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

1	PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS	9
2	COUVERT DE GLACE	10
2.1	Problématique et objectifs	10
2.2	Caractérisation au géoradar	10
2.2.1	Méthodologie de traitement du signal radar	13
2.2.2	Validation des mesures par géoradar	15
2.2.3	Résultats du géoradar	16
2.3	Mesures de vitesse sous glace	22
2.4	Interprétation	23
2.4.1	Eau liquide et écoulements sous glace.	23
2.4.2	Couvert de glace.	24
2.4.3	Frasil.	25
2.4.4	Le fossé de ceinture et la future prise d'eau superficielle.	25
3	MISE À JOUR DE L'ANALYSE DE L'EMPLACEMENT PROPOSÉ	28
3.1	Dans le plan	28
3.1.1	Excaver l'entrée du fossé de ceinture?	28
3.1.2	Positionnement des conduites sous-fluviales dans le plan	29
3.2	En élévation	30
4	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	31
4.1	Conclusions par rapport au régime des glaces	31
4.2	Conclusions par rapport au positionnement des conduites	31
4.2.1	Captage sous-fluvial dans le plan	31
4.2.2	Captage sous-fluvial en élévation	32
4.3	Recommandations par rapport à la couche superficielle du lit filtrant	33
4.4	Recommandations concernant l'entrée du fossé de ceinture	33
	BIBLIOGRAPHIE	34

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Régime hydrologique annuel typique de la Montmorency – Données 2008-2009 Station 051001 (Marches –Naturelles) Source : http://www.cehq.gouv.qc.ca/suivihydro/graphique.asp?NoStation=051001	11
Figure 2 : Localisation des transects de mesure et sondages glaciologiques 2009 par géoradar ...	12
Figure 3 : Lignes de relevé géoradar retenues pour analyse – Hiver 2009	12
Figure 4 : Photographies des sondages (Photo : Michel Leclerc)	13
Figure 5 : Exemple de signal radar - Interprétation	13
Figure 6 : Décomposition continue par ondelette db2 à l'échelle 6.....	14
Figure 7 : Caractérisation au géoradar le 17 mars 2008 – Sur la photo : Francis Bérubé, INRS-ETE.....	15
Figure 8 : Graphique de validation des épaisseurs de glace – Hiver 2009.....	15
Figure 9 : Graphique de validation des épaisseurs d'eau sous glace – Hiver 2009	16
Figure 10 : Géoradar – 13 mars 2009 - Horizons du profil transversal #1	17
Figure 11 : Géoradar – 13 mars 2009 - Horizons du profil transversal #2	17
Figure 12 : Géoradar – 13 mars 2009 - Horizons du profil transversal #3	17
Figure 13 : Géoradar – 13 mars 2009 - Horizons du profil transversal #4	18
Figure 14 : Géoradar – 13 mars 2009 - Horizons du profil transversal #5	18
Figure 15 : Géoradar – 13 mars 2009 - Horizons du profil transversal #6	18
Figure 16 : Géoradar – 13 mars 2009 - Horizons du profil transversal #7	19
Figure 17 : Géoradar – 13 mars 2009 - Horizons du profil transversal #8	19
Figure 18 : Épaisseur (en m) de la couche d'eau liquide – 13 mars 2009 – Secteur des Îlets	20
Figure 19 : Épaisseur du couvert de glace (et possiblement de frazil consolidé (m) - 13 mars 2009 – Secteur des Îlets.....	20
Figure 20 : Épaisseur de la couche de neige superficielle (m)- 13 mars 2009 – Secteur des Îlets	21
Figure 21 : Positionnement des images dans le bief d'intérêt.....	21
Figure 22: Interprétation des trajets préférentiels d'écoulement sous glace à la fin de l'hiver 2009	23
Figure 23 : Topographie à l'entrée du fossé de ceinture. Sur cette image, 2 jeux de données (1995 et 2008 ont été joints, de là les discontinuités de contour	27
Figure 24 : Configuration du lit mineur au site d'implantation – Positionnement original des conduites et scénario d'aménagement d'un canal d'aménée vers le fossé de ceinture (Option #1).....	29
Figure 25: Positionnement proposé du système de captage sous-fluvial. Note : l'excavation d'un chenal montrée ici à l'entrée du fossé de ceinture est discutée dans le rapport.	30

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Vitesses de propagation des ondes électromagnétiques utilisées.....	1413
Tableau 2 : Vitesses d'écoulement mesurées sous glace	2221

1 Problématique et objectifs

Le présent mandat de l'INRS-ETE, complémentaire à celui de 2008, s'inscrit dans le projet de mise en place d'une prise d'eau horizontale sous-fluviale dans les sédiments et alluvions de la rivière Montmorency, dans le secteur des Îlets. Le mandat initial visait à répondre à certaines questions soulevées par la Ville de Québec relativement à la conception, la mise en œuvre et l'exploitation du système de captage sous-fluvial innovateur projeté, notamment en regard des conditions morpho-sédimentaires et glaciologiques. Le mandat de 2009 se concentre sur les aspects glaciologiques et examine la question de la sécurité de l'approvisionnement du système de captage superficiel dans le fossé de ceinture.

Les analyses présentées ici tiennent compte de la géométrie et du dimensionnement du dispositif projeté tel que proposé par la firme Génio Experts-conseils en 2008 et ne tiennent pas compte des modifications ultérieures pouvant être apportées au concept initial.

Concernant ce rapport, les objectifs sont de:

- 1. valider la méthode de caractérisation du couvert de glace par géoradar et mettre à jour ces observations dans les conditions de l'hiver 2009*
- 2. confirmer et préciser l'avis formulé en 2008 sur l'emplacement retenu pour l'implantation de la prise d'eau sous-fluviale tant dans le plan qu'en élévation.*

Et accessoirement

- 3. examiner d'autres contraintes ou conséquences possibles de l'évolution morphologique et du comportement du couvert de glace sur la sécurité de l'approvisionnement des installations de captage, notamment la prise d'eau superficielle dans le fossé de ceinture*

2 Couvert de glace

2.1 Problématique et objectifs

Nous reprenons ici quelques éléments pertinents déjà exposés dans notre rapport de 2008 (Leclerc *et al.*, 2008). L'implantation d'une prise d'eau sous-fluviale vise à répondre temporairement au besoin d'approvisionnement en eau brute lors d'épisodes hydrologiques problématiques pour la prise d'eau de surface, notamment en hiver lorsque les conditions de captage superficiel de l'eau sont rendues difficiles, voire interrompues, à cause des conditions de glace et de frasil. Il est donc nécessaire de documenter cette problématique à une phase avancée de la récession hydrologique hivernale permettant d'observer les différents horizons d'eau liquide, de frasil résiduel, de glace et de neige sur le site à l'étude. Cet aspect de la question a donc été abordé par le biais d'une caractérisation terrain mettant en œuvre un instrument de mesure conçu à cette fin, soit le géoradar et par un positionnement GPS de base. La campagne de 2008 n'avait pas permis de valider l'interprétation des observations au géoradar glace par des observations directes *in situ*. La campagne de 2009 ajoute cet aspect, notamment dans le but de mieux évaluer la présence d'eau à proximité du lit.

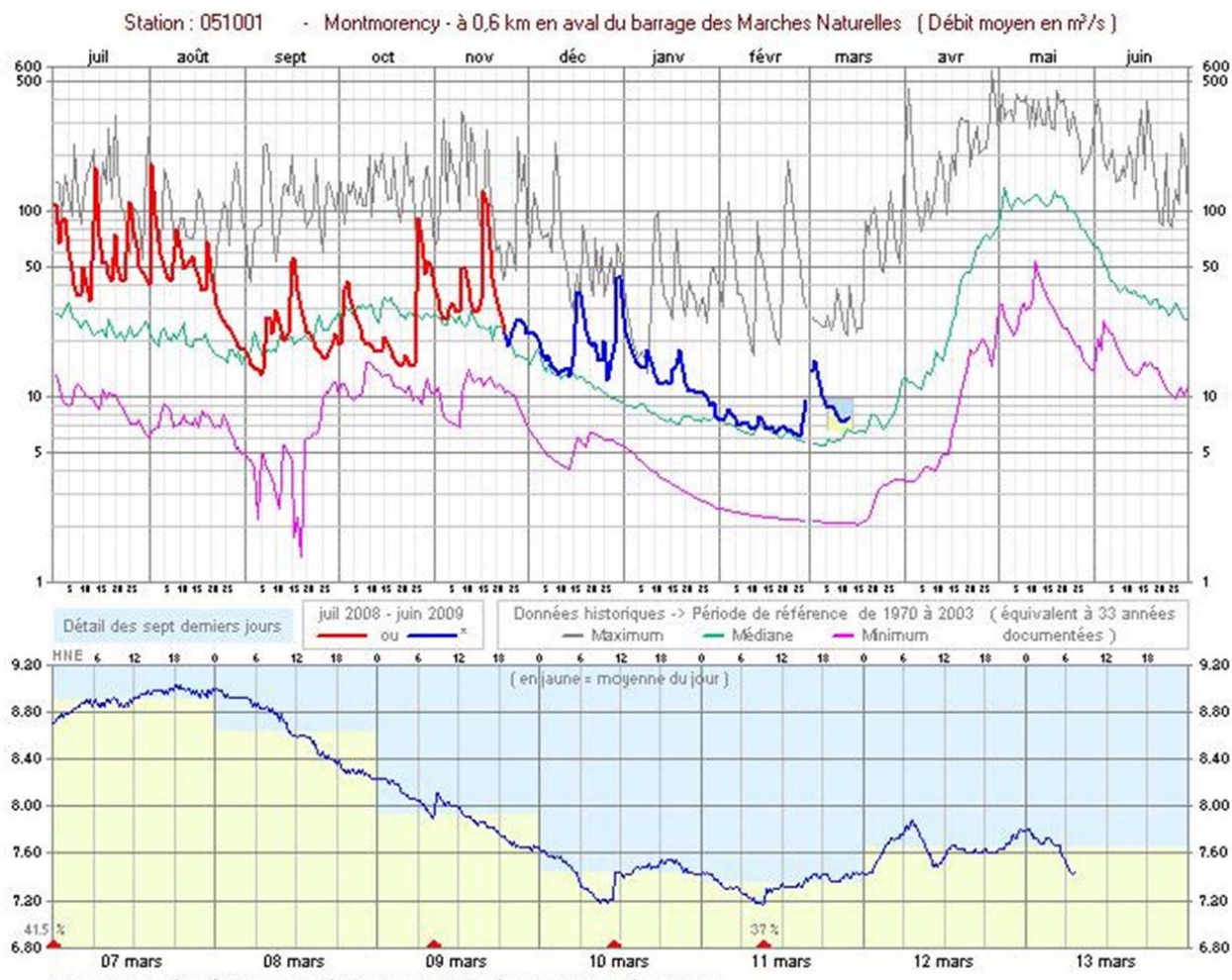
La campagne de l'hiver 2007-2008 a permis de découvrir que les endroits où le couvert de glace, et la couche de frasil sous-jacente, se trouvent appuyés au fond au site prévu d'implantation des conduites sous-fluviales. Dans ce cas, le chemin préférentiel d'infiltration de l'eau vers les conduites qui, en conditions libres de glace, emprunte en majorité le plus court chemin à l'aplomb de celles-ci, pourrait s'en trouver allongé, réduisant potentiellement l'efficacité nominale du dispositif projeté au moment même où son utilisation serait requise. Nous avons donc recommandé des ajustements au plan de localisation des conduites, tant en plan qu'en élévation. La campagne de cette année vise donc également à corroborer ces recommandations.

2.2 Caractérisation au géoradar

La caractérisation a été réalisée le 6 mars 2009 peu avant le début des conditions de fonte printanière et à la fin de la période normale de récession hydrologique hivernale. Cette phase du cycle hydrologique correspond aux conditions parmi les plus adverses pour l'opération d'un système de captage sous-fluvial.

Le débit moyen journalier observé pour le 6 mars 2008 était de $7,5 \text{ m}^3/\text{s}$ à la station 051001 (Marches-Naturelles; Source : Centre d'Expertise hydrique du Québec). Afin de tenir compte d'un bassin versant réduit à la hauteur du site, une valeur de $7,1 \text{ m}^3/\text{s}$ est retenue. Celle-ci correspond à la période d'étiage normalement la plus sévère de l'année sans toutefois atteindre le minimum moyen absolu qui se situe plutôt à $6 \text{ m}^3/\text{s}$ à la station, donc environ $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$ au site des Îlets. Il est toutefois à noter qu'une portion significative (appréciation visuelle) mais indéterminée

du débit court-circuite le site des Îlets en toutes saison à cause du caractère anastomosé du site et l'activation des bras secondaires en rive gauche (voir la Figure 1). Le débit réel qui transite directement dans le cours principal en hiver est donc sensiblement inférieur à la valeur de 7,1 m³/s mentionnée.



**Figure 1: Régime hydrologique annuel typique de la Montmorency – Données 2008-2009
Station 051001 (Marches –Naturelles)**

Source : <http://www.cehq.gouv.qc.ca/suivihydro/graphique.asp?NoStation=051001>

Les relevés radar ont été effectués à l'aide d'un radar de sol (géoradar) de la compagnie GSSI (modèle SIR-3000). Une antenne de 400 MHz (standard international 5103A) a été utilisée. Les relevés radar ont été effectués sous forme de transects en échantillonnage continu (5 Hz). La fréquence de saisie du radar a été fixée à 10 GigaHz.

La Figure 2 montre la position des transects réalisés qui sont au nombre de 18. Plusieurs de ceux-ci n'ont malheureusement pas pu être exploités en raison de conditions de mesure inappropriées (ex : réflexions parasites dans les transects du fossé de ceinture amont). Cette année, la campagne s'est concentrée sur la région immédiate du site de captage sous-fluvial. Huit transects ont ainsi été retenus pour analyse (voir la Figure 3), soit ceux vis-à-vis du site d'implantation des conduites.

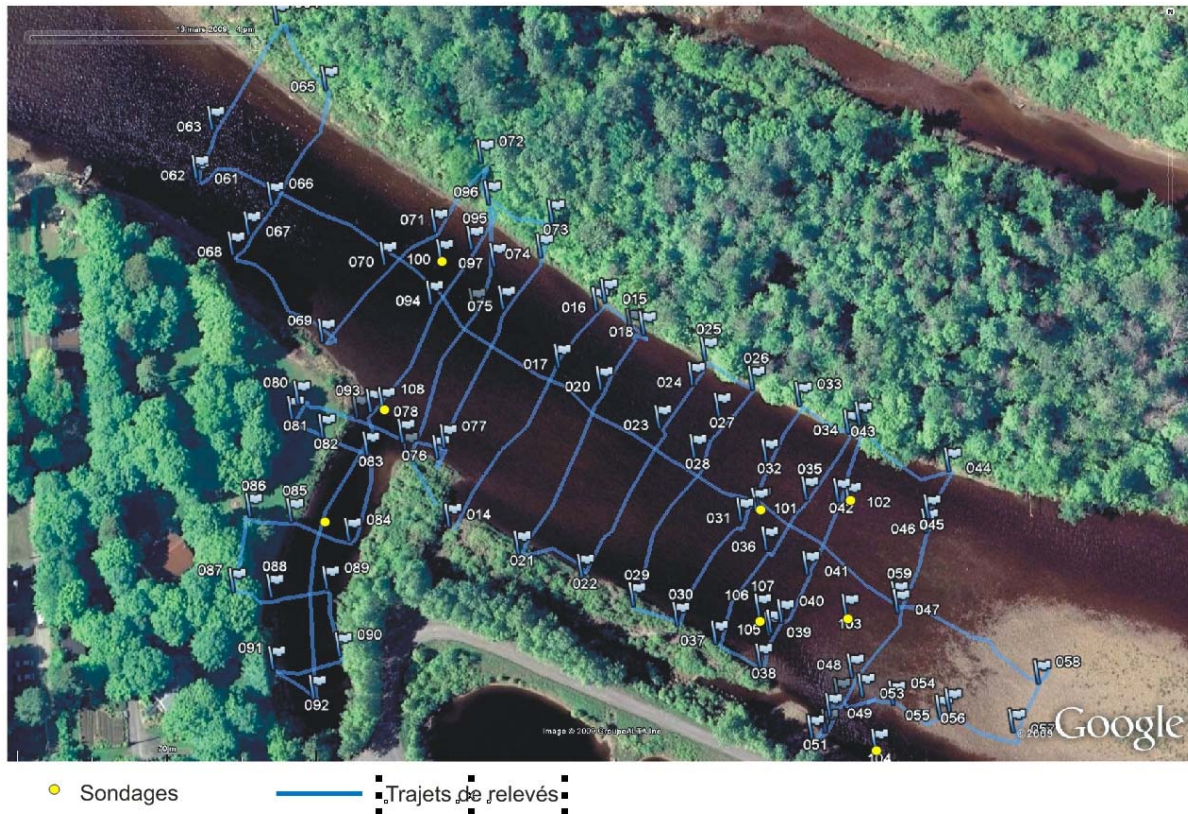


Figure 2 : Localisation des transects de mesure et sondages glaciologiques 2009 par géoradar

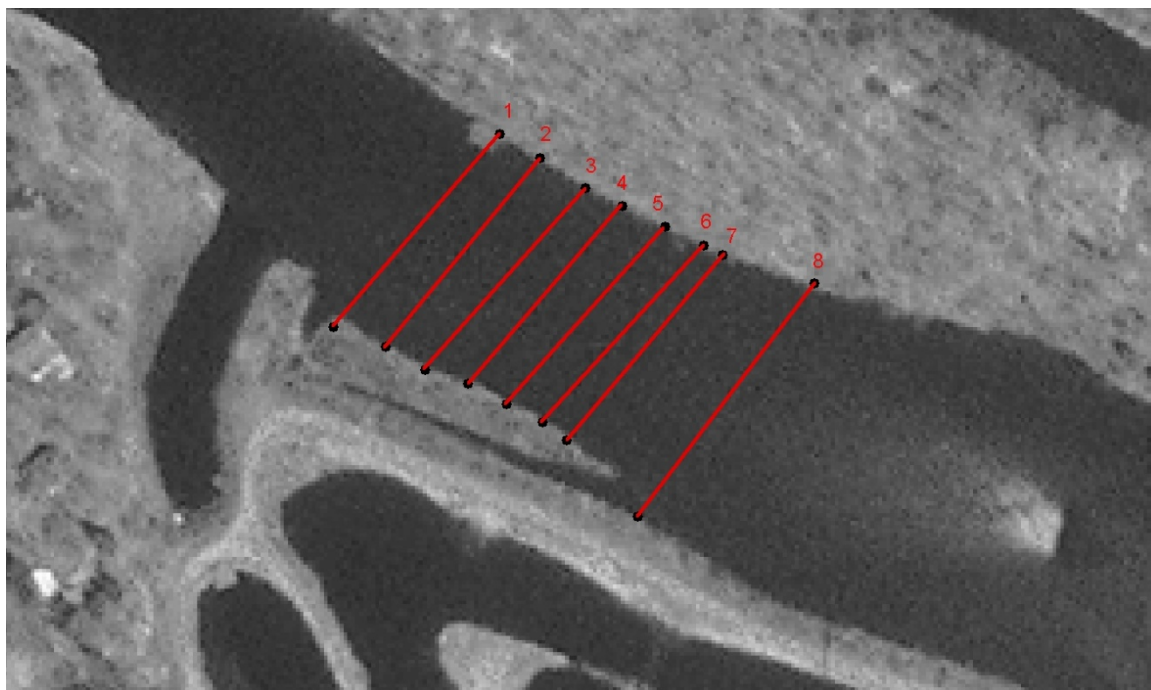


Figure 3 : Lignes de relevé géoradar retenues pour analyse – Hiver 2009

Comme il a déjà été mentionné, la campagne de 2009 visait aussi à valider les algorithmes d'interprétation du signal. La Figure 2 montre aussi la position des sondages réalisés dans le but

de valider les algorithmes d'interprétation du signal radar. La Figure 4 illustre les opérations terrain.



Figure 4 : Photographies des sondages (Photo : Michel Leclerc)

L'analyse du signal du géoradar a pu être réalisée à l'aide d'algorithmes permettant de discriminer l'épaisseur de la neige superficielle, de la glace, du frasil résiduel présent sous le couvert et enfin, de la couche d'eau liquide en écoulement et vraisemblablement en charge (sous pression).

2.2.1 Méthodologie de traitement du signal radar

Nous reprenons ci-après la méthodologie présentée dans notre dernier rapport et reprise intégralement en 2009. La validation de ces calculs est présentée plus loin. Les épaisseurs de neige et de glace ont été obtenues directement sans filtrage des données. La forte intensité de ces réflecteurs électromagnétiques ont permis de suivre ces interfaces de façon continue à l'aide d'algorithmes de suivi de pics tel que proposés dans la bibliographie (Gilman *et al.*, 1963 ; Lau & Weng, 1995 ; Torrence & Compo, 1998 ; Weng & Lau, 1994). La Figure 5 montre un tracé du retour du signal radar et les échos des différentes interfaces des matériaux solides.

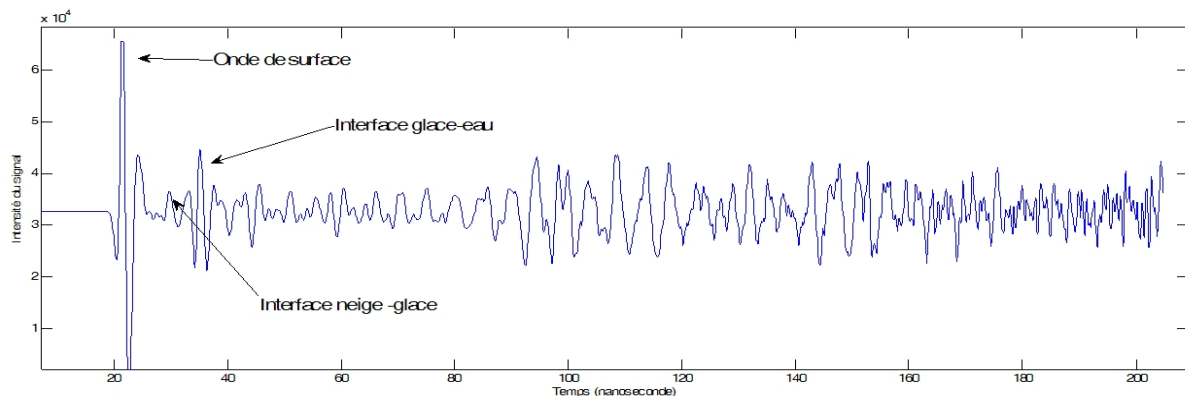


Figure 5 : Exemple de signal radar - Interprétation

Le frasil (sous forme consolidée en 2009) présent sous le couvert de glace peut causer une grande diffusion du signal rendant l'identification visuelle directe des échos électromagnétiques du frasil ainsi que du lit de la rivière impossibles. Par contre, un phénomène de réflexions multiples a été

identifié entre le lit de la rivière et l'interface frasil-eau. Cet effet de battement a été exploité afin d'extraire les épaisseurs des matériaux sous glace.

Un premier traitement des signaux consiste en la décomposition en continue du signal par ondelette. Une ondelette orthogonale Daubechies d'ordre 2 a été utilisée. L'équation suivante représente la décomposition continue par l'ondelette ψ du signal réel $s(t)$ (Figure 6).

$$W(b, a) = \frac{1}{(a)^{1/2}} \int \psi * \left(\frac{t-b}{a} \right) s(t) dt$$

Les signaux obtenus ont ensuite été décomposés de façon continue par ondelette complexe de type Morlet (équation suivante). Le signal complexe obtenu a ensuite permis d'extraire le spectre de puissance du battement. Une relation entre les échelles de grandeur des ondelettes et des fréquences a été calculée. Les périodes obtenues ont ainsi été associées aux épaisseurs d'eau présentes sous le couvert de glace.

$$\psi(t) = e^{ik_{\psi}t} e^{-|t|^2/2}$$

Les vitesses de propagation des ondes électromagnétiques utilisées pour la reconstruction des épaisseurs sont indiquées au Tableau 1.

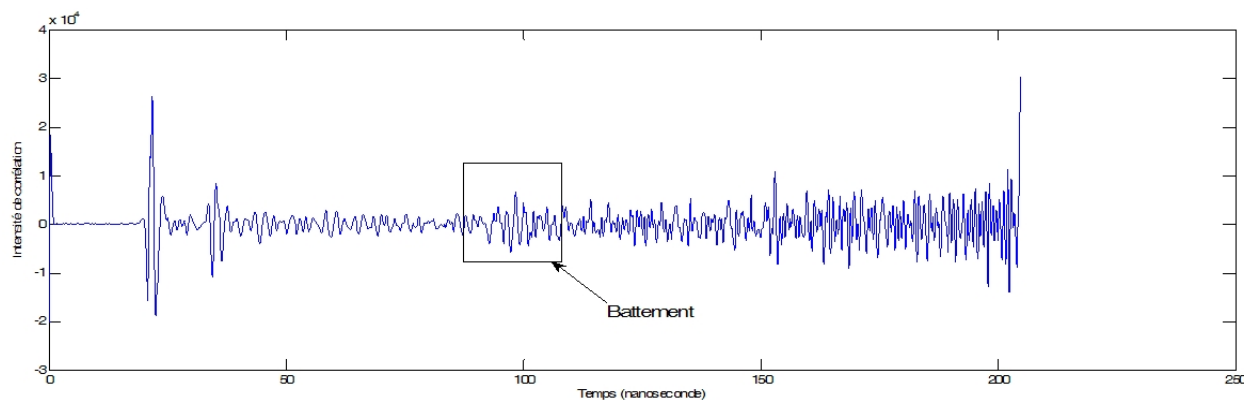


Figure 6 : Décomposition continue par ondelette db2 à l'échelle 6.

Tableau 1 : Vitesses de propagation des ondes électromagnétiques utilisées

Horizon	Vitesses (cm/ns)
Neige	28
Glace	17
Frazil	4
Eau	3.3



Figure 7 : Caractérisation au géoradar le 17 mars 2008 –
 Sur la photo : Francis Bérubé, INRS-ETE

2.2.2 Validation des mesures par géoradar

La Figure 8 montre la correspondance entre les données d'épaisseur de glace mesurées et celles obtenues par interprétation du signal radar. La correspondance est probante avec un R^2 de 0,9865.

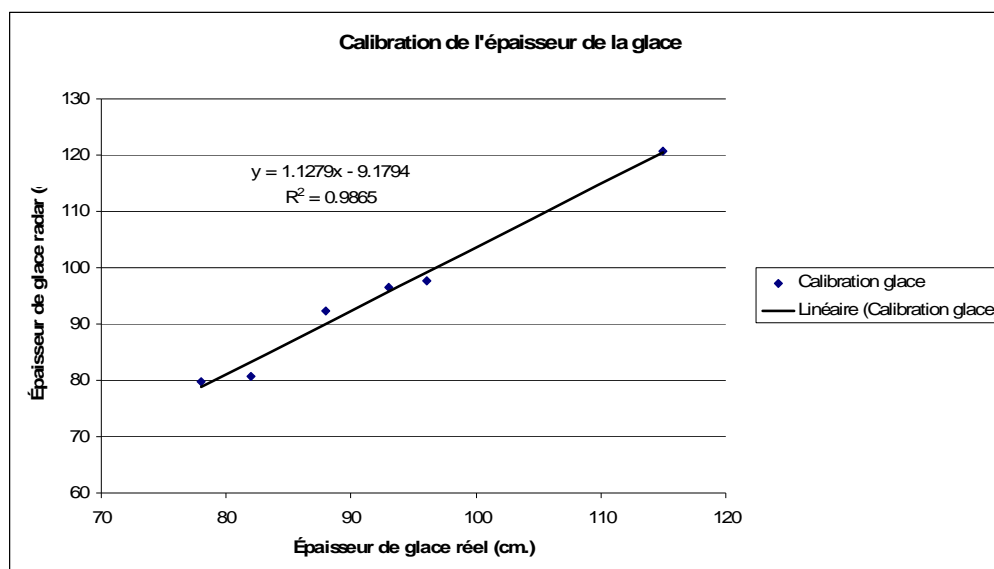


Figure 8 : Graphique de validation des épaisseurs de glace – Hiver 2009

La Figure 9 montre les données de validation des épaisseurs d'eau sous glace lesquelles sont très bien caractérisées au géoradar avec dans le cas présent un R^2 de 0,9959 ce qui est très satisfaisant. Par contre, la fine lame d'eau possiblement présente sous le couvert de glace appuyé au fond peut s'avérer difficile à détecter s'il en est, et donc à caractériser. Il ne faut pas oublier que l'épaisseur de la couche d'eau liquide exclut ici la hauteur équivalant à la pression hydrostatique qui fait normalement remonter l'eau jusqu'en surface dans les trous de sondage. Là où l'eau liquide n'a pas été observée dans le trou de sondage (un point), on peut supposer que la pression hydrostatique des écoulements à proximité n'a pas permis à l'eau de percoler jusqu'au site de mesure. Ce constat incite donc à la prudence par rapport à la possibilité que le lit filtrant soit tout de même alimenté en eau lorsque le couvert de glace se retrouve en appui au fond

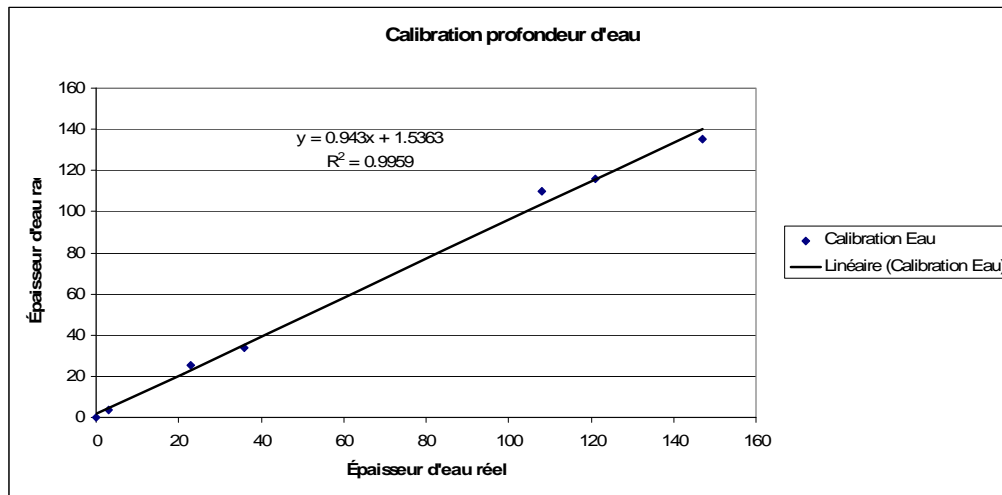


Figure 9 : Graphique de validation des épaisseurs d'eau sous glace – Hiver 2009

2.2.3 Résultats du géoradar

Les figures suivantes (10 à 17) présentent les interprétations des différents horizons d'eau liquide ou solide observés au géoradar dans la région du site d'implantation de la prise d'eau sous-fluviale. La position des sections est telle que démontrée à la Figure 3.

La légende d'interprétation des figures suivantes est comme suit :



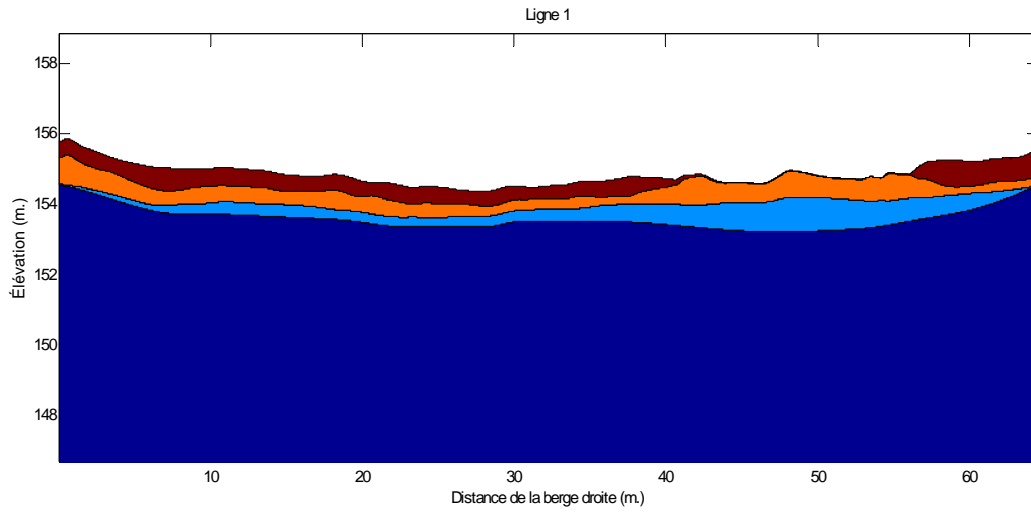


Figure 10 : Géoradar – 13 mars 2009 - Horizons du profil transversal #1

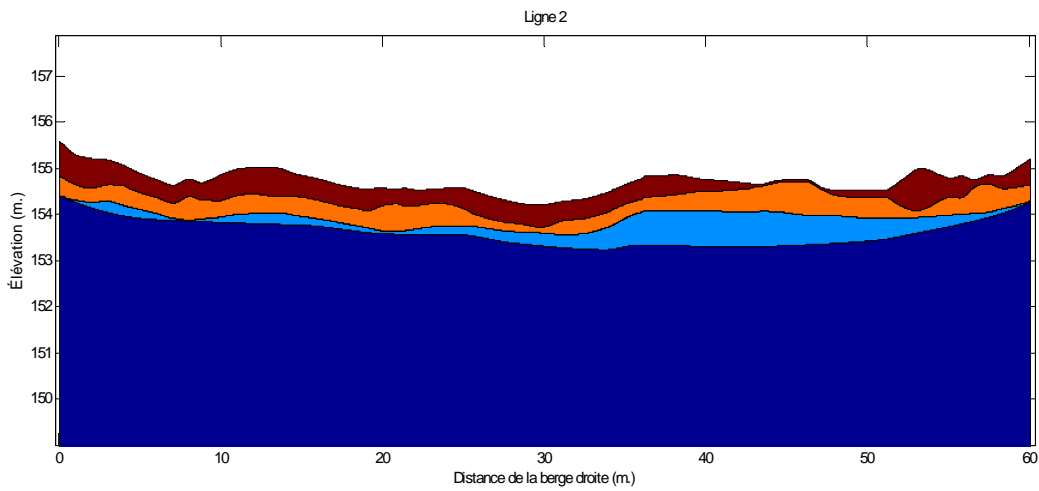


Figure 11 : Géoradar – 13 mars 2009 - Horizons du profil transversal #2

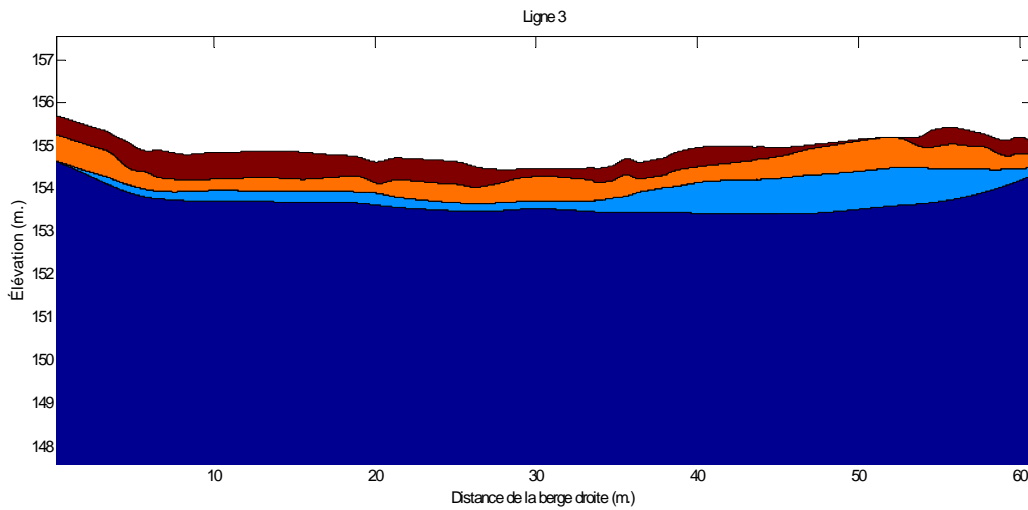


Figure 12 : Géoradar – 13 mars 2009 - Horizons du profil transversal #3

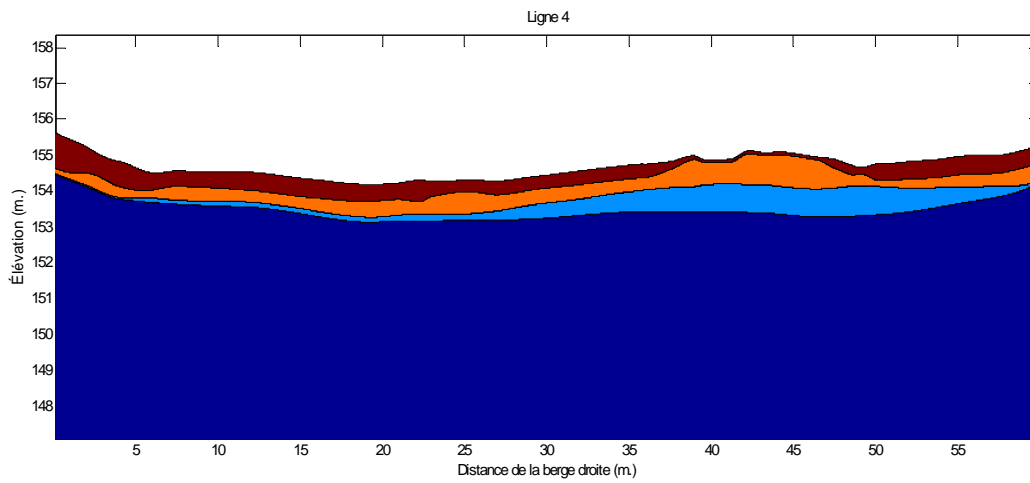


Figure 13 : Géoradar – 13 mars 2009 - Horizons du profil transversal #4

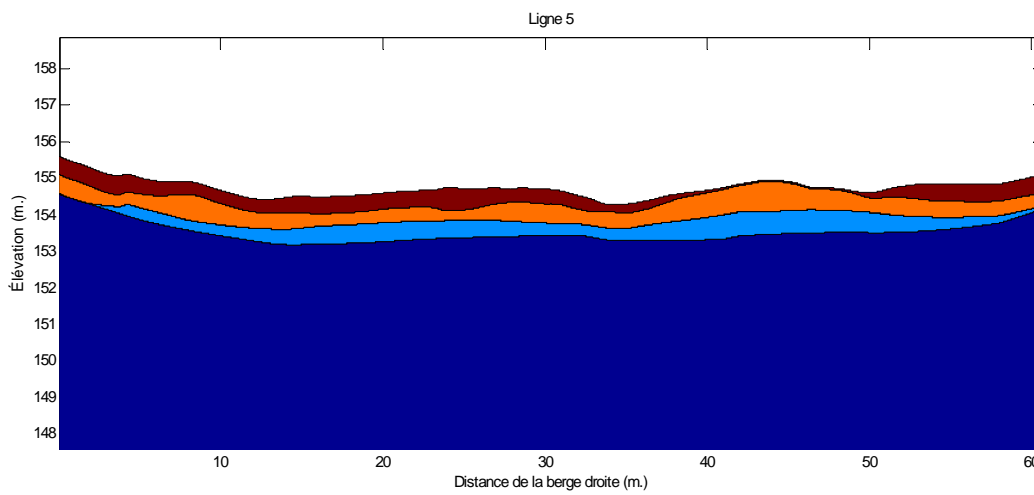


Figure 14 : Géoradar – 13 mars 2009 - Horizons du profil transversal #5

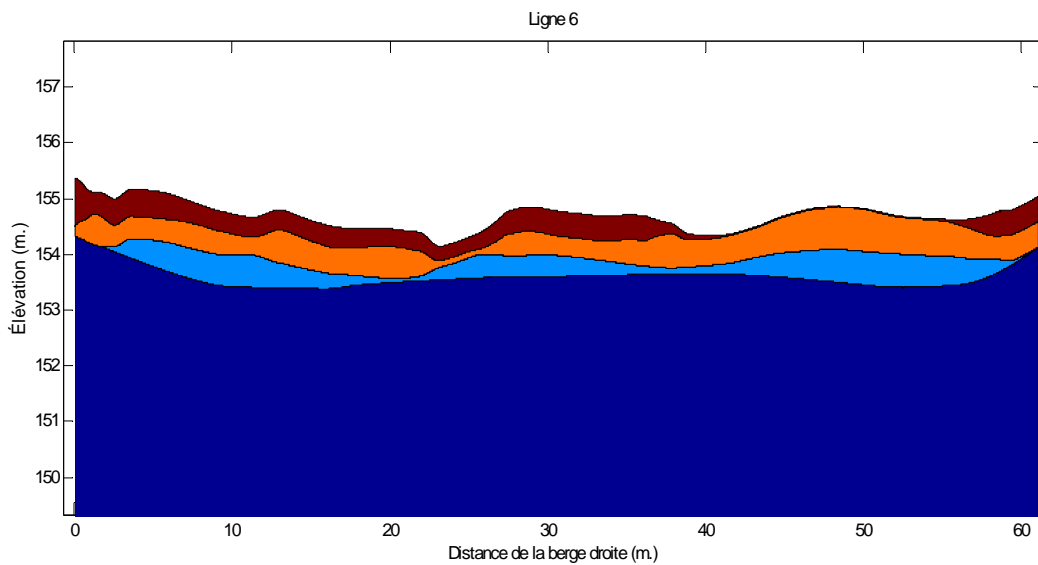


Figure 15 : Géoradar – 13 mars 2009 - Horizons du profil transversal #6

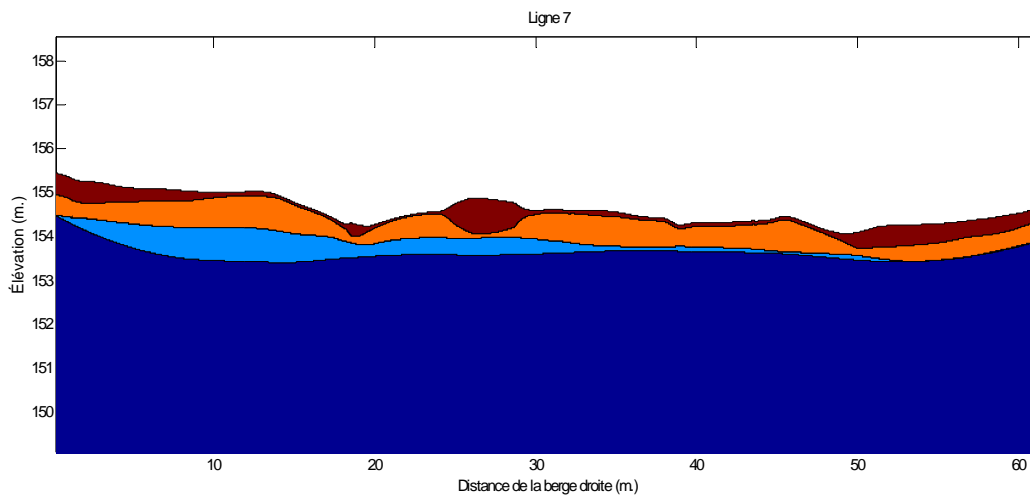


Figure 16 : Géoradar – 13 mars 2009 - Horizons du profil transversal #7

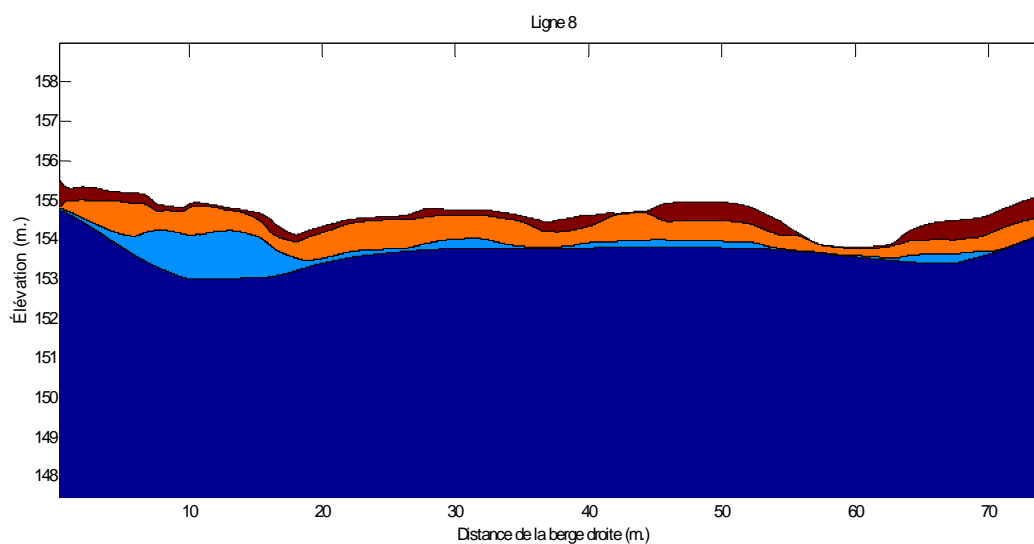


Figure 17 : Géoradar – 13 mars 2009 - Horizons du profil transversal #8

Dans ces illustrations, le profil du fond (cote d'altitude) est conforme à celui existant au moment de la prise de données réalisée en octobre 2008 par la firme Géolocation. La cote du fond a été introduite ici afin de faciliter l'interprétation des données du radar dans le profil vertical.

Comme en 2008, et en lien avec les profils verticaux, une cartographie bidimensionnelle (2D) des différentes couches a été réalisée afin de faire ressortir l'organisation synoptique des écoulements au site d'implantation des conduites. La Figure 18 rapporte l'extension dans le plan de la couche d'eau libre sous le couvert de glace. La Figure 19 présente l'épaisseur de la couche de glace laquelle recoupe possiblement une couche non discriminée de frasil consolidé. La Figure 20 fait de même pour la couche de neige superficielle tandis que la Figure 21 permet de positionner les figures précédentes dans le bief d'intérêt.

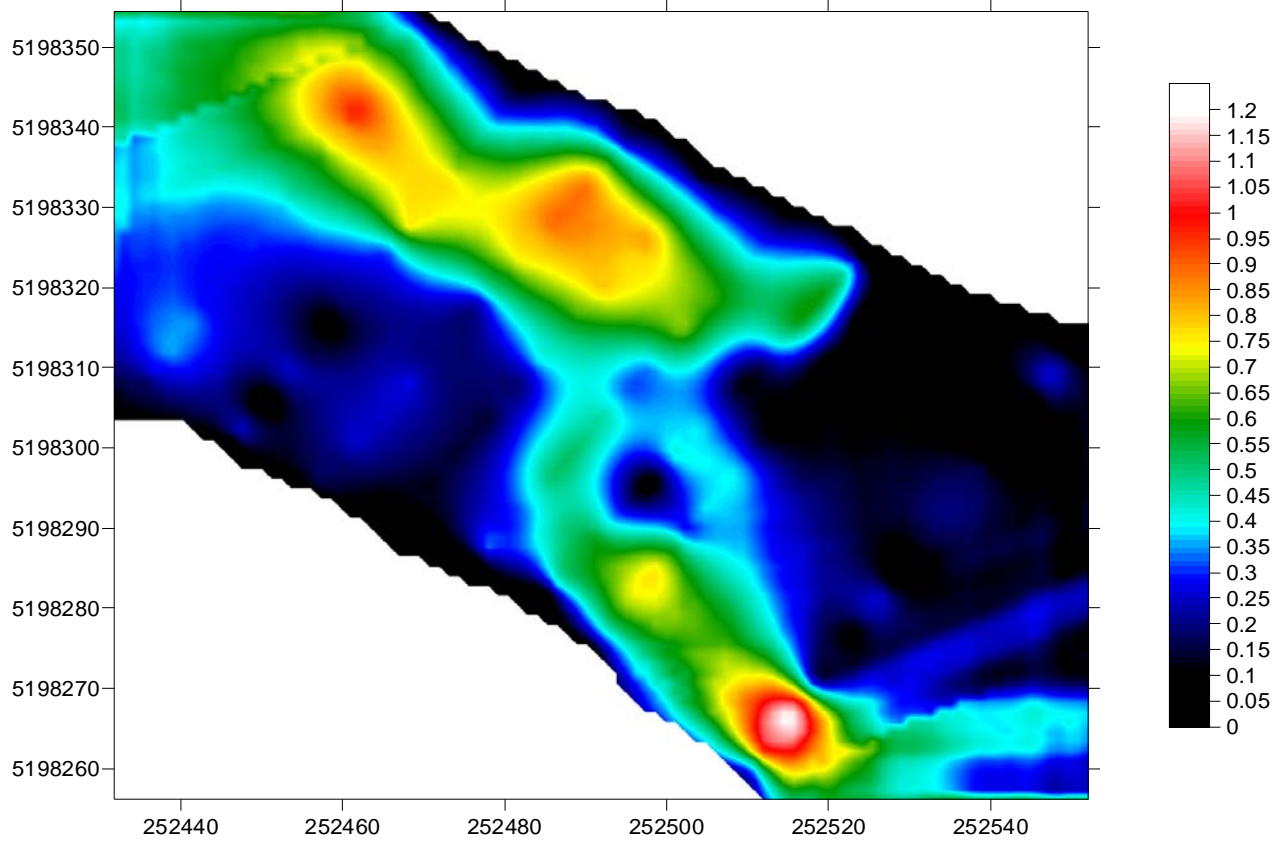


Figure 18 : Épaisseur (en m) de la couche d'eau liquide – 13 mars 2009 – Secteur des Îlets

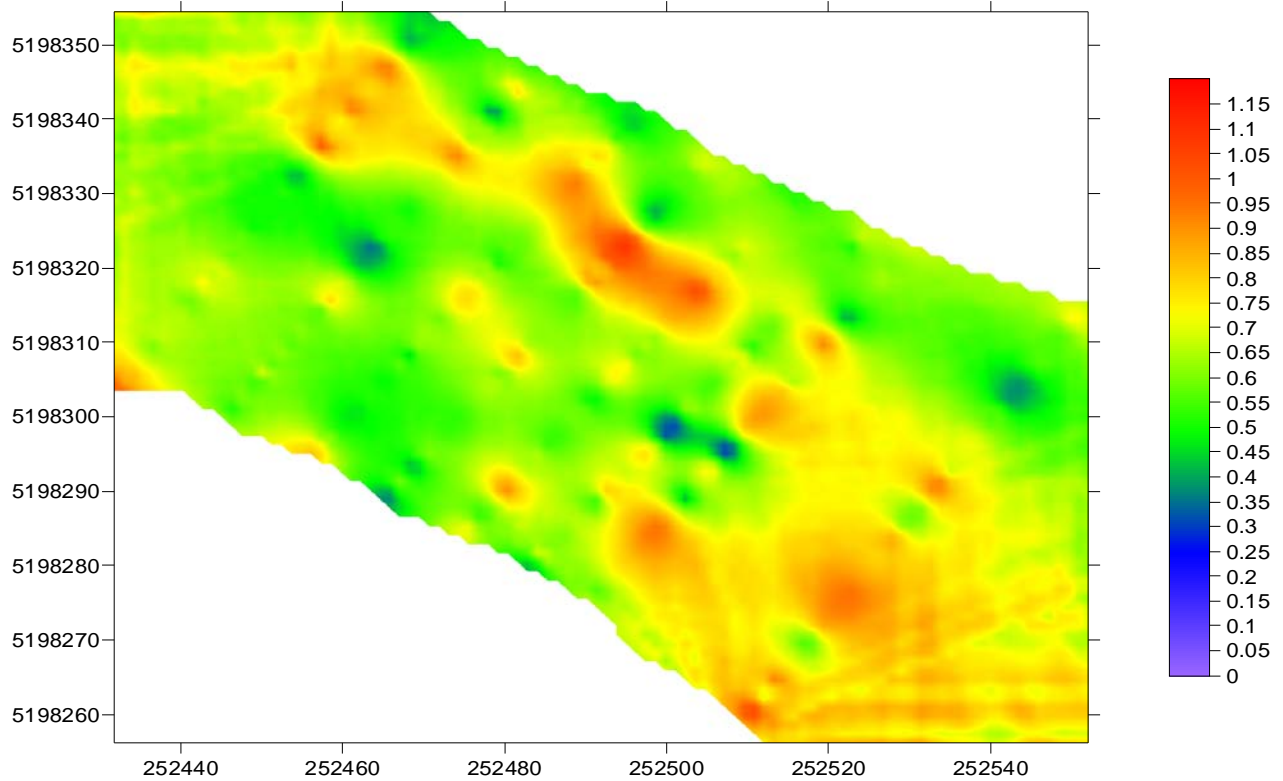
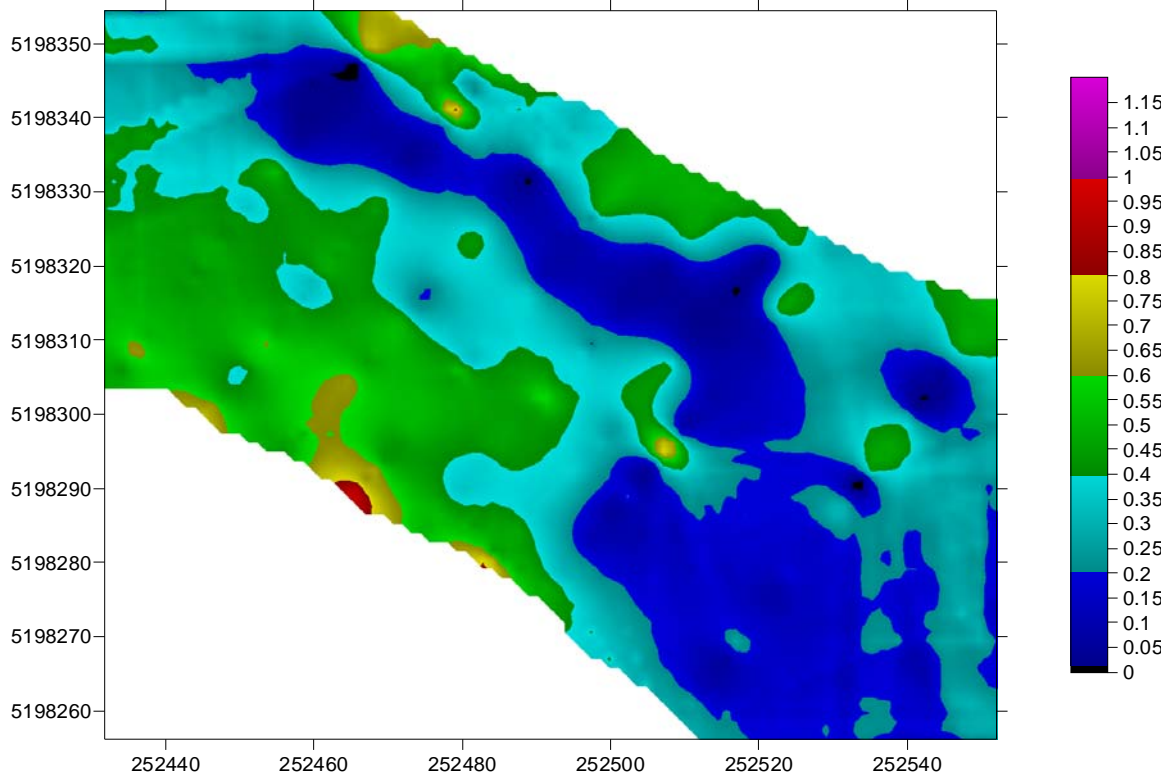


Figure 19 : Épaisseur du couvert de glace (et possiblement de frazil consolidé) (m) - 13 mars 2009 – Secteur des Îlets



**Figure 20 : Épaisseur de la couche de neige superficielle (m)-
13 mars 2009 – Secteur des Îlets**

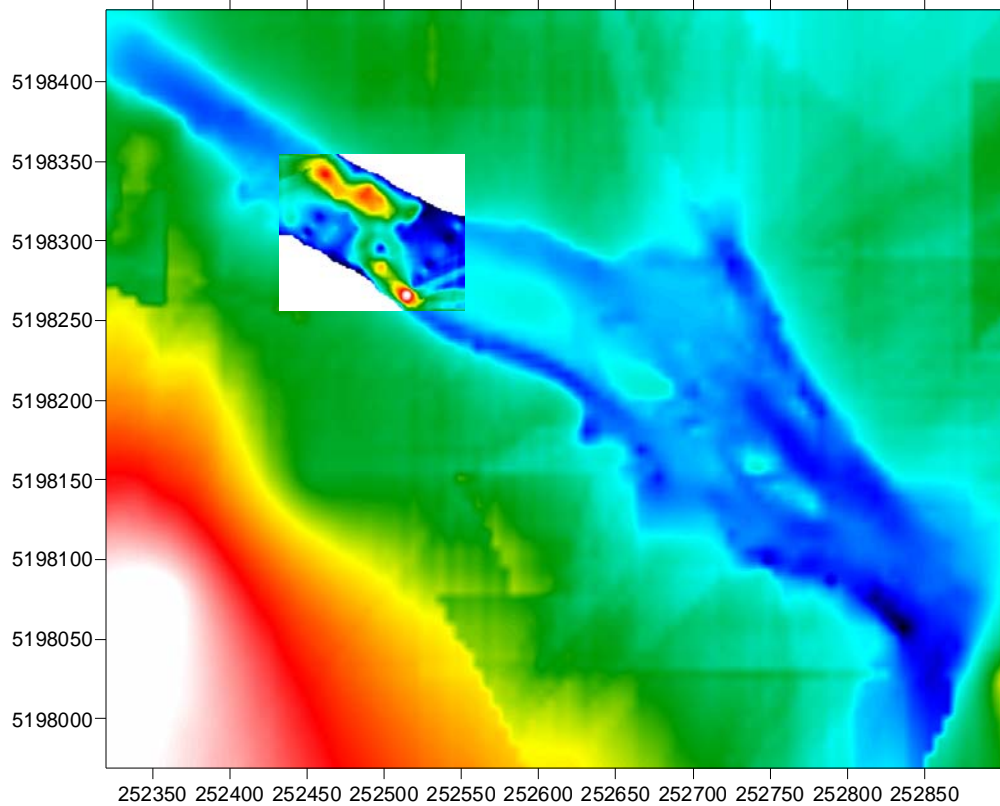


Figure 21 : Positionnement des images dans le bief d'intérêt

2.3 Mesures de vitesse sous glace

Il apparaissait indiqué de procéder à des mesures de vitesse sous glace afin de vérifier le dynamisme de ces écoulements. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un courantomètre Flo-Mate™ Model 2000 de la compagnie Marsh-McBirney. Les sites de mesures sont les mêmes que ceux ayant servi à valider les mesures d'épaisseur de glace et de la lame d'eau. Ils ont été positionnés principalement aux endroits où le couvert de glace surbaissé semblait correspondre aux endroits où un écoulement persistant semblait présent. D'autres points ont été échantillonnés en dehors de ces régions dont un, le #6, (le Tableau 2 rapporte les résultats obtenus) n'a pas révélé la présence d'eau.

On peut constater que les vitesses d'écoulement varient considérablement d'un point à l'autre, sans doute à cause des grandes variations de la section résiduelle offerte à l'écoulement. Ainsi, les points #1, 2 et 3 (#100, 101 et 102 sur la Figure 2), localisés dans le thalweg en rive gauche présentent des vitesses significatives variant entre 0,26 et 1,3 m/s. La précision est toutefois très aléatoire à cause de ces mesures position dans la zone de forts gradients de vitesse de la couche limite l'omniprésence de turbulence. Elle a été estimée à $\pm 15\%$.

Tableau 2 : Vitesses d'écoulement mesurées sous glace

<i>Sondage</i>	<i>Description du lieu</i>	<i># du point terrain</i>	<i>Remarque</i>	<i>Vitesse mesurée (m/s: $\pm 15\%$)</i>
#1	Écoulement principal	100	Thalweg - Rive gauche	0,57
#2	Écoulement principal	101	Thalweg - Rive gauche	1,3
#3	Écoulement principal	102	Thalweg - Rive gauche	0,26
#4	Écoulement principal	103	Transfert de rive	0,08
#5	Écoulement principal	104	Thalweg	0,6
#6	Couvert appuyé	105	Haut fond – Site sous-fluvial	Nul
#7	Couvert appuyé	108	Entrée du fossé de ceinture	Nul
#8	Dans le fossé de ceinture	Mi-chemin des points terrain #84 et #85		0,06

Note : la position des points est telle qu'exposée à la Figure 2.

Le point # 5 est localisé dans le chenal aménagé en rive droite (joutant le talus des bassins). La vitesse mesurée atteint 0,6 m/s ce qui confirme que l'écoulement dans le chenal principal traverse le lit mineur de la rive gauche à la droite. Ce transfert qui est confirmé par le point #4 (#103 sur

le terrain) s'effectue toutefois en aval du site retenu pour implanter les conduites sous-fluviales. La vitesse relativement faible mesurée à cet endroit reflète sans doute la répartition assez large mais mince de l'écoulement à cet endroit. Un point de mesure localisé à l'aplomb du site d'implantation des conduites (le #6) n'a pas permis de détecter la présence d'eau liquide, *a fortiori* d'écoulement à cet endroit. Une autre mesure réalisée directement à l'entrée du fossé de ceinture n'a pas pu être complétée pour les mêmes raisons : couvert appuyé, pas d'eau liquide. Enfin, une mesure a été effectuée dans le fossé de ceinture à l'amont de l'ouvrage de compensation. Une vitesse relativement faible de 0,06 m/s y a été observée sans que l'on puisse déterminer la provenance de cette eau.

2.4 Interprétation

2.4.1 Eau liquide et écoulements sous glace.

À la lumière de ces données, on peut déjà observer que l'écoulement de l'eau en phase liquide se produit tel qu'on s'y attendait, soit dans ou à proximité des zones les plus profondes (thalweg) du lit mineur confirmant ainsi notre hypothèse déjà émise en 2008 relative à la formation graduelle et différentielle du couvert de glace. Ces zones plus profondes sont d'ailleurs visibles sur les photos aériennes de la rivière tel que démontré sur Google Earth (photographie datant de juillet 2007).

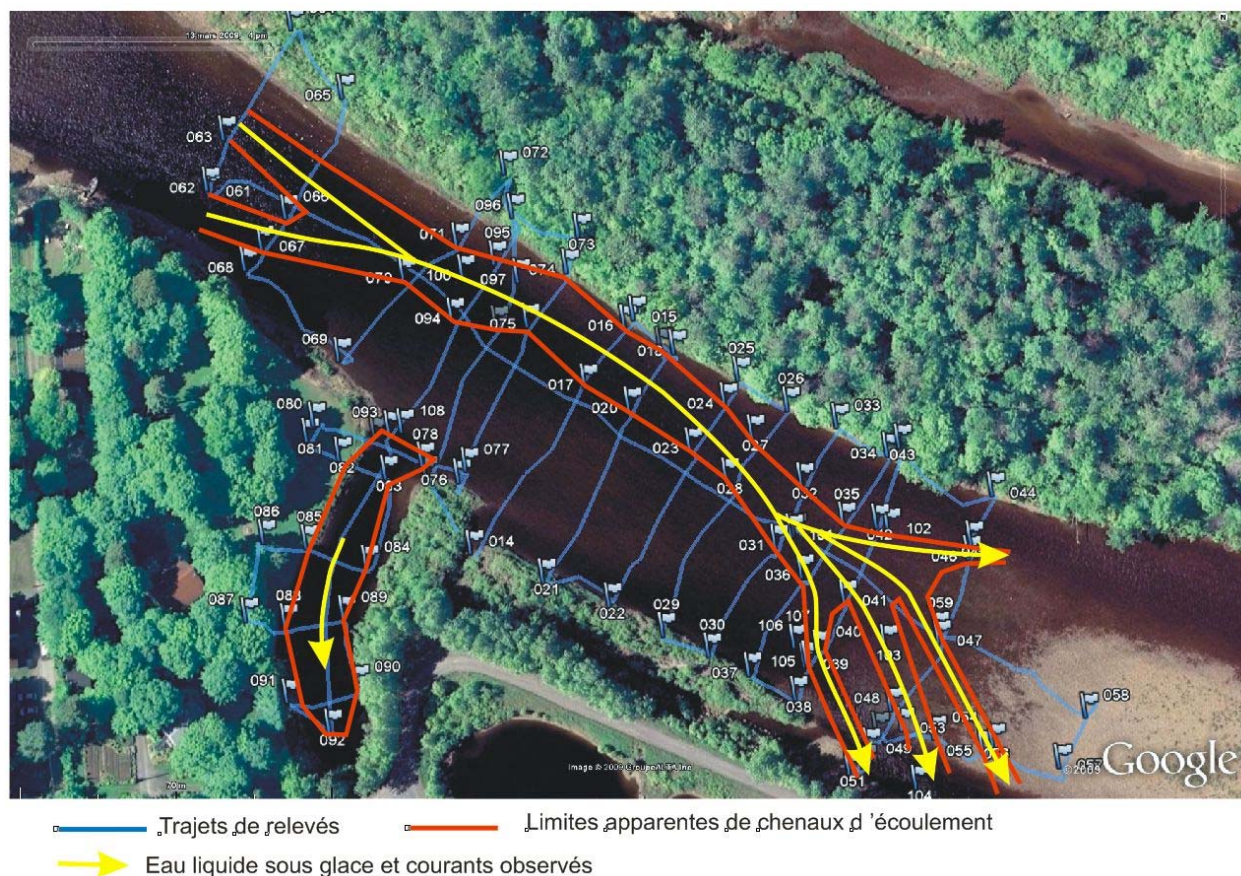


Figure 22: Interprétation des trajets préférentiels d'écoulement sous glace à la fin de l'hiver 2009

L'écoulement sous la glace est donc structuré en fonction de la dynamique de la prise du couvert de glace, elle-même conditionnée par la topographie. En 2008, nous avons émis l'hypothèse que l'écoulement se produisait en charge (sous pression) sous le couvert de glace, avec une valeur de pression sans doute près d'une valeur hydrostatique avec une hauteur d'eau équivalente à celle des différents horizons. Ce fait a été confirmé par les sondages.

Il en résulte que la section d'écoulement au site d'implantation des conduites est très peu sinon pas du tout en contact avec la section mouillée du tronçon de sorte que des interventions sur la morphologie du tronçon paraissent requises afin d'assurer la submersion du site en toutes circonstances.

On peut également observer que le trajet préférentiel de l'eau sous glace en face des bassins se divise en deux afin de contourner un haut-fond important au milieu du lit mineur. Il est à noter ici que des travaux en rivière (excavation du lit mineur en berge) réalisés au cours des dernières années par la Ville ont permis de créer un courant d'appel en direction des installations de pompage superficiel. D'ailleurs, comme nous l'avons aussi constaté pour l'évolution topographique, ces travaux ont eu pour résultat de consolider la structuration des écoulements évoquée autour du banc central d'alluvion qui, de son côté, tend lui aussi à s'engraisser au cours du temps.

Enfin, on peut observer que, si le chemin préférentiel de l'écoulement se situe plutôt en rive gauche vis-à-vis du site d'implantation des conduites, la tendance de l'écoulement est de se rabattre vers la rive droite en hiver. La consolidation de ce comportement par une intervention morphologique paraît requise pour garder le lit filtrant du dispositif sous-fluvial en eau en tout temps. Nous reviendrons sur ce point au prochain chapitre.

En termes de profondeur, les écoulements préférentiels varient, comme en 2008 d'ailleurs, entre 0,3 m et 1 m avec des valeurs typiques de 0,5 m. Dans le secteur d'implantation des puits horizontaux, la couche d'eau libre est beaucoup plus mince et avoisine parfois une profondeur de variant entre 0,3 m et zéro (hauteur imperceptible au radar). C'est toutefois dans cette zone que l'écoulement liquide paraît le mieux distribué latéralement d'après le radar (voir aussi de la Figure 11 à la Figure 13 montrant les profils verticaux au site retenu) allant même parfois jusqu'à recouvrir l'ensemble du lit mineur. Ceci semble confirmer l'intérêt du site retenu pour l'implantation des puits horizontaux. Toutefois, le trajet préférentiel de l'eau se situant en général dans le thalweg, et les zones situées près des rives étant les premières à s'assécher avec l'épaississement des glaces et la récession hydrologique, il est important de tenir compte de ce comportement pour assurer le plus possible un apport d'eau libre à l'aplomb des conduites. L'absence d'eau au point de mesure #6 confirme d'ailleurs cette mise en garde.

2.4.2 Couvert de glace.

Un couvert de glace formée dès le début de l'hiver, et encore intact le 13 mars 2009, recouvrait l'ensemble du site à l'étude. Il atteignait plus d'un mètre d'épaisseur vis-à-vis de zones où l'eau libre a été détectée sous couvert mais il se situe plutôt autour de 50 cm ailleurs où le couvert de glace se retrouve en appui sur le fond. Généralement, on ne retrouvait plus de couche de neige en ces endroits à la fin de l'hiver, celle-ci ayant fondu et recongelé sur place, contribuant ainsi à épaissir le couvert. Il est aussi à remarquer que des précipitations liquides quelques jours ou semaines avant la caractérisation ont aussi pu contribuer à épaissir le couvert par le dessus. Aux

endroits où le couvert se trouve appuyé au fond, on comprend que l'absence d'eau ne peut contribuer à la croissance sous-jacente du couvert.

2.4.3 Frasil.

En 2009, la couche de frasil s'il en était, n'a pas pu être identifiée. Serait-ce dû à son état de consolidation sous le couvert de glace à ce stade de l'hiver ? La base de nos carottages montraient à l'occasion un genre de glace vraisemblablement formé d'un tel matériau à l'origine. Rappelons toutefois que le frasil non consolidé est formé d'un mélange de particules de glace et d'eau de sorte que son comportement hydrodynamique peut être associé à celui d'un milieu poreux. Il en résulte que, contrairement à la glace solide qui s'y juxtapose ou au frasil consolidé avec le couvert, la couche de frasil libre présente au début de l'hiver pourrait participer à alimenter les processus d'infiltration vers les conduites, mais à un taux sûrement inférieur à la couche d'eau liquide.

L'absence apparente de frasil, ou sa présence consolidée est possiblement liée à l'absence de débâcle-embâcle à l'hiver 2008-2009, du moins dans le voisinage immédiat de l'ouvrage projeté. En 2008, la survenue d'une débâcle importante le 8 janvier la même année a rendu à la surface libre plusieurs kilomètres de la rivière entre l'amont de l'Île-Enchanteresse (habituellement, depuis le secteur des Grands Rapides commençant à l'amont du PK18 par rapport à l'embouchure). Un embâcle important s'est ensuite formé à la hauteur du pont multifonctionnel immédiatement en aval de la rue du Cantaloup (autrefois du Bocage) et à l'amont de la prise d'eau des Îlets. Suite à de tels épisodes, le couvert se reforme très graduellement, habituellement après plusieurs jours, voire semaines, étant donné le débit et les vitesses de courant qui demeurent longtemps trop élevés pour la formation d'un couvert de glace stable. La conséquence est un apport important de frasil produit par le temps froid nocturne mais aussi diurne consécutif (une température extérieure inférieure à -8°C produit du frasil). Le frasil tend alors à poursuivre son chemin à travers l'embâcle et va ensuite se loger sous le couvert de glace resté en place en aval.

Un tel phénomène s'est aussi produit fin 2008 sur la Montmorency (débâcle suivi d'un embâcle léger et bien étalé vers la rue du Cantaloup) mais le couvert de glace s'est reformé rapidement de sorte que l'épisode frasil s'est considérablement réduit par rapport à l'embâcle précédent.

2.4.4 Le fossé de ceinture et la future prise d'eau superficielle.

La sécurité de l'approvisionnement en eau par la prise d'eau superficielle projetée dans le fossé de ceinture soulève des préoccupations qui n'avaient pas été identifiées en 2008. Suite à notre campagne de cette année, il apparaît que la topographie surélevée à l'entrée du fossé (Typiquement 153,5 m; voir la Figure 23) et le comportement du couvert de glace (et possiblement du frasil consolidé), qui tend graduellement à prendre appui au fond au cours de l'hiver, risquent d'interrompre tout écoulement en direction du fossé au cours de l'hiver, surtout s'il est froid et propice, suite à une débâcle à la formation de frasil. Un sondage réalisé dans l'axe du fossé à son entrée a d'ailleurs démontré une totale absence d'eau sous le couvert à cet endroit bien que l'hiver 2009 fut plutôt clément. La durée de ce tarissement n'est pas déterminée mais pourrait être de plusieurs semaines, particulièrement les hivers rigoureux.

Un autre sondage réalisé en aval dans le fossé, à l'amont de l'ouvrage de compensation, a pourtant permis de détecter une lame d'eau significative à cet endroit sans courant notable cependant. La profondeur à cet endroit est suffisante pour cela (altitude du fond autour de 152 m, voir la Figure 23). La question qui se pose est : d'où provient cette eau, par percolation depuis les bassins (Hypothèse 1), ou par percolation *via* la couche superficielle d'alluvions depuis le cours principal?

1^{ère} hypothèse : Il est possible que le segment amont du fossé soit maintenu en eau par percolation à partir des bassins adjacents, eux-mêmes étant opérés à une cote élevée (typiquement 156,5-156,8m) *via* le jeu de vases communicants entre les différentes unités de stockage. Ces bassins sont, rappelons-le, approvisionnés en eau à partir de la prise d'eau superficielle actuelle, localisée en rive sur le cours principal. C'est donc la sécurité de l'approvisionnement superficiel dont il est question ici. Dans les épisodes où le fossé de ceinture ne pourrait pas être approvisionné directement au cours principal, c'est la prise d'eau sous-fluviale qui devra prendre le relais, et ce, pour un temps indéterminé, sans doute plus long que prévu au départ et non seulement en période d'urgence.

2^{ème} hypothèse : il est aussi possible que l'eau percole par les alluvions depuis le cours principal, même si le couvert de glace est appuyé au fond. Reste à établir cette capacité d'approvisionnement, et si elle peut répondre à la demande hivernale du poste des Îlets. En cas de défaillance, c'est la prise d'eau sous-fluviale qui pourra prendre le relais. Il est toutefois à noter que l'eau percolée dans les alluvions bénéficierait, le cas échéant, d'un certain degré de filtration comparable à celui des puits horizontaux. Cette hypothèse sous-tend aussi que la topographie surélevée à l'entrée du fossé de ceinture prévient l'invasion du fossé par le frazil, dès lors que le couvert de glace s'appuie au fond.

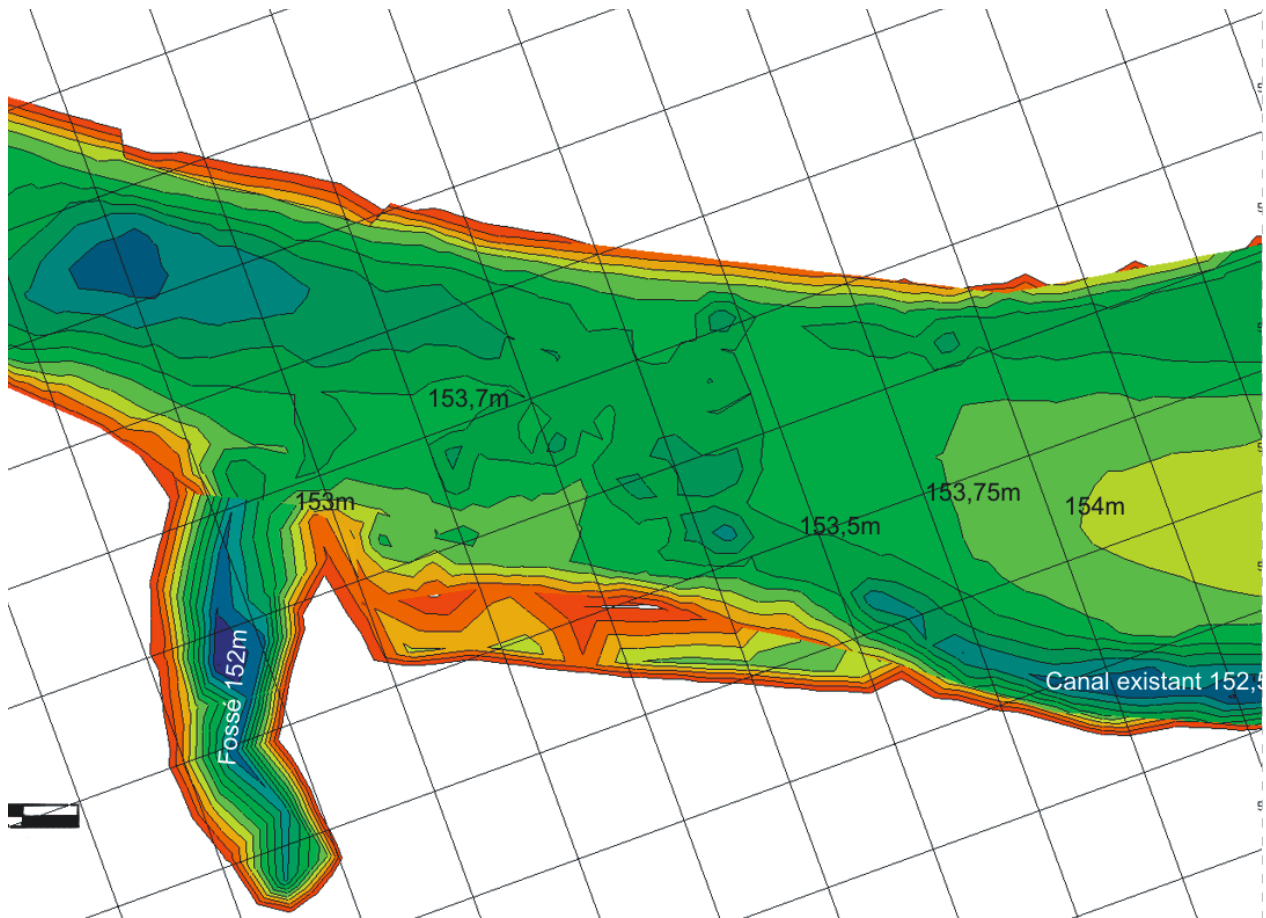


Figure 23 : Topographie à l'entrée du fossé de ceinture. Sur cette image, 2 jeux de données (1995 et 2008) ont été joints, de là les discontinuités de contour

Ce nouveau constat peut porter à conséquence pour la conception du dispositif de captage superficiel dans le fossé de ceinture et des recommandations à cet effet sont formulées au chapitre suivant.

3 Mise à jour de l'analyse de l'emplacement proposé

Ci-après, nous re-examinons la proposition initiale de positionnement des conduites dans le lit de la rivière (Version 8x75mx30cm) sous l'angle des conditions hydrodynamiques requises pour le captage efficace en situation hivernale. Dans le même ordre d'idée, il est apparu nécessaire de considérer les possibilités de sécuriser par des aménagements appropriés l'approvisionnement de la prise d'eau superficielle par le fossé de ceinture.

3.1 Dans le plan

La Figure 24 représente le système de captage (version 8 x 75m x 30cm) tel que proposé en 2008. Toute modification à ce concept s'il devait être adapté devrait tenir compte des éléments qui suivent.

3.1.1 Excaver l'entrée du fossé de ceinture?

Considérons d'abord l'approvisionnement du fossé de ceinture en direction de la prise d'eau superficielle. Compte tenu du comportement de la glace et de la topographie surélevée à l'entrée du fossé, il semblerait indiqué d'abaisser la cote du fond de la rivière afin d'y aménager un canal d'amenée comme le suggère la Figure 24. Cette intervention serait similaire à celle effectuée au cours des dernières années pour alimenter l'actuelle prise d'eau au cours principal. L'intervention consisterait à excaver le lit de la rivière à la cote 152,5 m (actuellement autour de 153,5 m) jusqu'au thalweg jouxtant la rive gauche. L'objectif ici serait de maintenir une lame d'eau significative sous le couvert de glace dans cette région du lit mineur afin que le fossé de ceinture demeure connecté en tout temps avec le thalweg du cours principal.

Limitations possibles. Cette intervention serait-elle durable? Cette option d'aménagement comporte des inconnues importantes relatives à l'accumulation possible de débris et d'alluvions de différentes tailles dans le canal lors des crues. En effet, l'axe du canal étant placé transversalement au cours principal, on peut anticiper cette conséquence qui nécessiterait alors des opérations de maintenance périodiques (B. Morse, Communication personnelle, 2009). De plus, on peut aussi s'attendre à voir du frasil s'accumuler dans le fossé de ceinture lui-même, surtout si un appel de courant (pompage par la prise d'eau superficielle) attire le frasil transitant normalement dans le cours principal.

Dans la configuration actuelle, la topographie élevée et le couvert de glace appuyé empêchent le frasil de passer dans le fossé ce qui est un avantage. On revient donc à la question posée au chapitre précédent. D'où vient l'eau présente à l'entrée du fossé : percolation par les alluvions superficiels du lit mineur à partir du cours principal, ou encore, percolation à partir des bassins?

Dans le premier cas, si le débit percolé est suffisant, on n'a pas besoin d'excaver un canal d'amenée. S'il est insuffisant, on mobilise la prise d'eau sous-fluviale conçue pour répondre à ce besoin et dans ce cas aussi, on n'a pas besoin d'excaver.

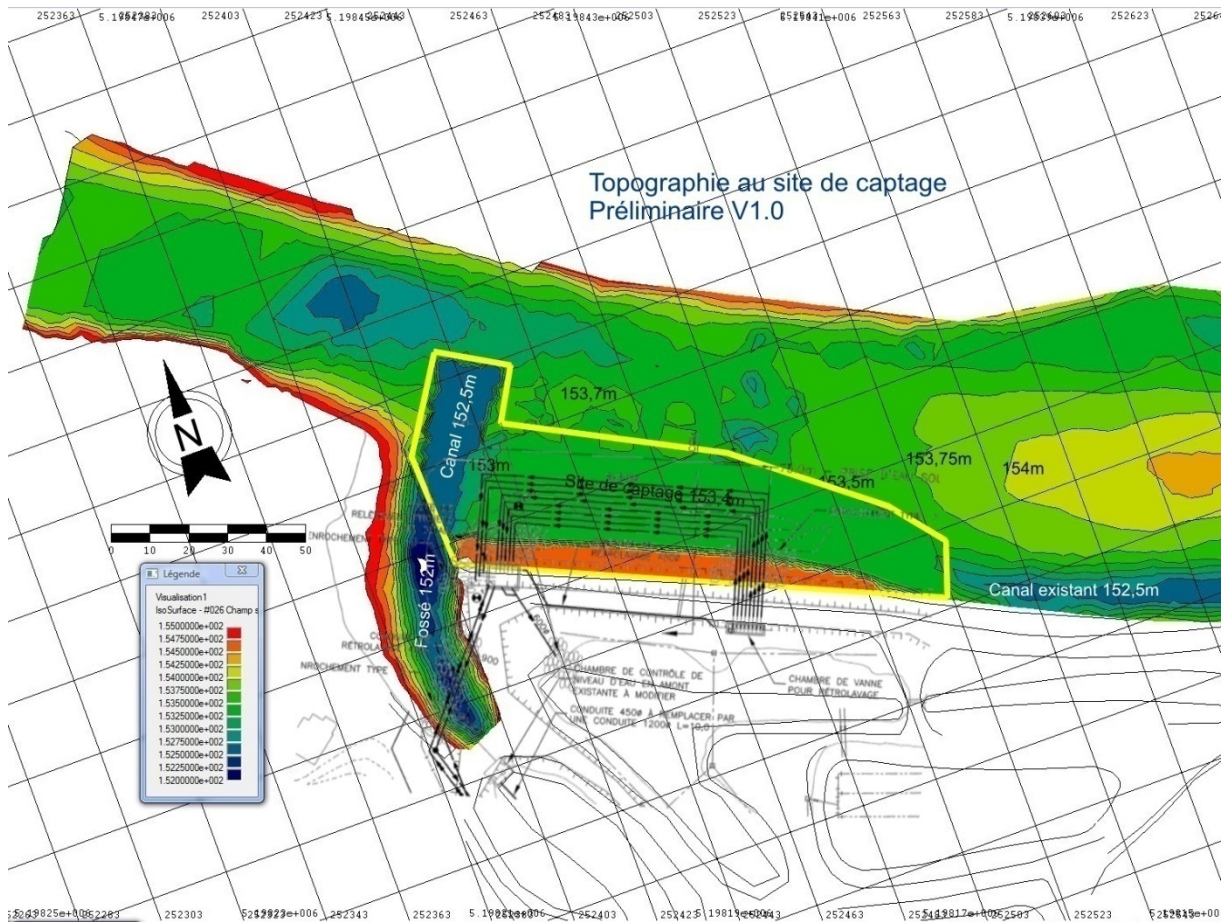


Figure 24 : Configuration du lit mineur au site d'implantation – Positionnement original des conduites et scénario d'aménagement d'un canal d'amenée vers le fossé de ceinture (Option #1)

3.1.2 Positionnement des conduites sous-fluviales dans le plan

En 2008, en plus de préconiser une excavation du site à la cote 153,4 m, nous avons recommandé de déplacer le dispositif de captage sous-fluvial de 5 m vers le nord sans plus de précision. Le but était de mieux exposer les alluvions à l'écoulement en hiver et de mieux exposer le site aux crues afin de faciliter le transit des débris et l'entretien des alluvions superficiels

La Figure 24 précédente reprenait le positionnement des conduites sous-fluviales tel que proposé initialement en 2008 par Génio Experts-Conseil. Afin de préciser notre recommandation de 2008 de déplacer le système vers le nord et d'excaver la topographie du site pour un meilleur contact des alluvions avec l'eau liquide, nous soumettons une version revisitée de la Figure 24 (Voir la Figure 25 ci-après). On peut y voir que l'axe du dispositif serait déplacé dans le sens horaire, son extrémité aval servant de pivot de rotation. La berme en rive serait ajustée en conséquence.

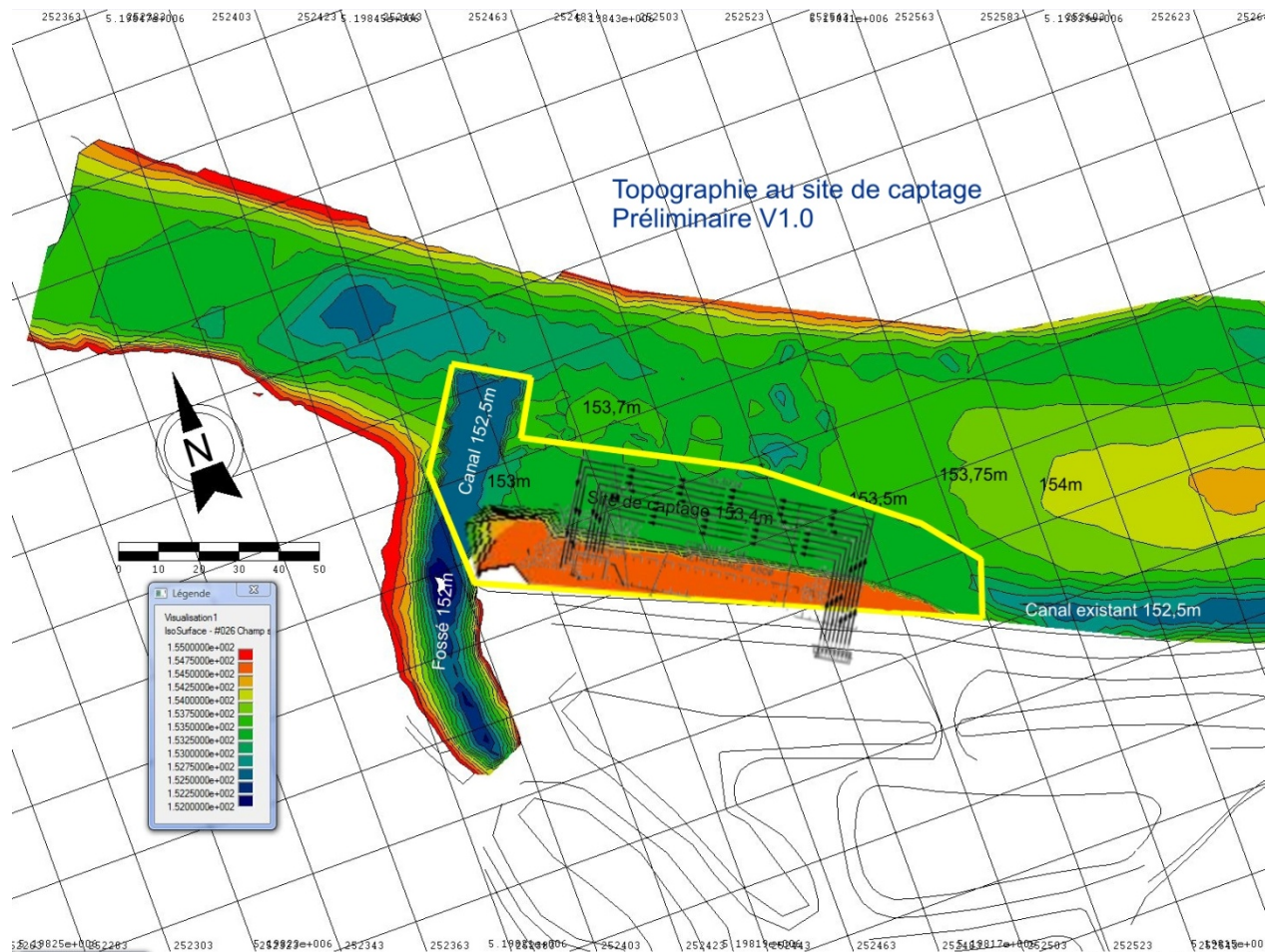


Figure 25: Positionnement proposé du système de captage sous-fluvial.

Note : l'excavation d'un chenal montrée ici à l'entrée du fossé de ceinture est discutée dans le rapport.

3.2 En élévation

Notre proposition de 2008 concernant le positionnement des conduites en élévation n'a pas changé. Toutefois, si le dimensionnement final des conduites devait changer de 8x300 mm à 3x600 mm comme cela a été récemment proposé, alors notre proposition devrait tenir compte du changement aux plans. Il semblerait indiqué de maintenir la distance de sécurité entre le haut des conduites et la cote superficielle des alluvions au site. Dans ce cas, il faudrait abaisser la cote du radier des conduites de 300 mm.

Le projet initial (début 2008) prévoyait un recouvrement de 2,4 m d'épaisseur au-dessus des conduites. Dans la mesure du possible, cette épaisseur devrait être maintenue afin de procurer le meilleur niveau de sécurité possible contre une dégradation importante du lit de la rivière qui pourrait survenir suite à une crue majeure ou un embâcle abrasif. Une diminution de cette épaisseur comme celle finalement retenue (moins de 2 m) offre aussi un niveau de sécurité intéressant mais moindre que la proposition originale. Toutefois, il n'est pas possible avec nos connaissances actuelles de statuer sur la période de retour d'un événement qui risquerait de mettre en question l'intégrité du système.

4 Conclusions et recommandations

4.1 Conclusions par rapport au régime des glaces

La réalisation d'une campagne de mesure synoptique des différents horizons d'eau liquide ou solide en 2009, encore rendue possible grâce à un appareil géoradar a permis de confirmer la cartographie du couvert de glace réalisée en 2008 sur l'ensemble du cours principal de la rivière en face des bassins. L'analyse de l'épaisseur du couvert et la présence d'eau liquide ont pu être validées à l'aide de sondages et de mesures directes de la lame d'eau et des vitesses d'écoulement. Dans la topographie actuelle, le couvert de glace se retrouve souvent très près, voire même appuyé au fond dans deux zones sensibles pour le captage : au-dessus du système de captage sous-fluvial ainsi qu'à l'entrée du fossé de ceinture.

Les écoulements sous-glaciels en contact avec les alluvions s'avèrent très turbulents et ils se produisent en charge (sous pression du couvert de glace). Le chemin préférentiel de ces écoulements suit un trajet fortement structuré par la topographie existante, principalement vis-à-vis du thalweg. Les observations de 2009 n'ont pas révélé de présence généralisée de frasil comme en 2008, sans doute à cause du comportement différent du couvert de glace en 2009 par rapport à 2008 (embâcle du 17 janvier 2008 à la hauteur du pont multifonctionnel).

4.2 Conclusions par rapport au positionnement des conduites

4.2.1 Captage sous-fluvial dans le plan

Rappelons que la logique d'analyse appliquée ici s'appuie sur la présence permanente souhaitable d'eau libre à l'aplomb des conduites et sur l'établissement d'un équilibre alluvionnaire dynamique mais relativement stable au secteur d'implantation. C'est cette configuration qui produirait le rendement maximum de captage par les puits horizontaux. Un couvert de glace appuyé au fond à l'aplomb des conduites produirait un rendement réduit à cause d'un chemin d'infiltration allongé tel que l'ont démontré les études précédentes, tandis que des mouvements alluvionnaires de grande amplitude pourraient modifier la profondeur relative des conduites (épaisseur de matériaux filtrants et de la couche d'alluvions naturels notamment).

D'après les observations réalisées au géoradar, l'ensemble du lit mineur y est en contact avec la couche d'eau liquide en certaines sections même à la fin de l'hiver, tandis qu'à d'autres, situées plus loin en aval, le couvert de glace s'appuie au fond et ne permet pas de détecter l'eau liquide. À cet égard, le site retenu semble généralement se situer dans la plus propice des sections d'écoulement caractérisées à cause d'une distribution plus uniforme de la lame d'eau liquide.

Toutefois, sans doute pour de plus grandes facilités de construction et d'entretien, la position latérale proposée des conduites dans la section hydraulique se situe à la marge du lit mineur. Il paraît plus indiqué de déplacer le dispositif tel que proposé au chapitre précédent. Nous reformulons nos recommandations de 2008 ainsi :

Recommandation # 1. Longitudinalement, le site d'implantation des puits horizontaux à la hauteur de la section retenue semble le plus propice et devrait être conservé.

Recommandation # 2. Il est recommandé de réorienter l'axe du dispositif dans le sens horaire avec son extrémité aval comme pivot afin de perturber le moins possible la configuration actuelle d'écoulement qui semble relativement stable malgré une morphologie relativement très dynamique dans le secteur, et de soumettre le plus possible la couche superficielle d'alluvions naturels au-dessus du dispositif aux forces tractrices du courant.

Recommandation # 3. Le cas échéant (recommandation # 2), un suivi morphosédimentaire devrait être réalisé périodiquement afin de vérifier les impacts du comportement de la rivière sur le dispositif. La fréquence de suivi devrait être liée à la survenue d'événements très énergétiques comme une crue importante (période de retour de 10 ans ou plus), ou encore, suite à un embâcle se produisant dans le secteur et au minimum annuellement au cours des cinq premières années.

Recommandation # 4. Il est recommandé de mettre à jour le modèle hydrodynamique 2D du secteur d'étude (Leclerc *et al.*, 1998; Heniche *et al.*, 1999) comme mécanisme de mise à jour et de suivi de l'hydrodynamique. La mise à jour devrait être envisagée dès qu'un changement morphologique important est enregistré, y compris avec la topographie mise à jour en 2008.

4.2.2 Captage sous-fluvial en élévation

La logique d'analyse appliquée ici porte sur l'optimisation de l'efficacité du captage liée à la submersion du lit filtrant en toutes saisons, d'une part, et à la sécurité du dispositif par rapport aux mouvements verticaux du lit mineur liés aux processus morpho-sédimentaires (crues et embâcles). La recherche d'un équilibre morpho-sédimentaire relatif dans le secteur est aussi souhaitable afin de conserver autant que possible les caractères du cours d'eau sur lesquels s'appuient les critères de conception, notamment l'épaisseur du lit filtrant. En conséquence,

Recommandation # 5. La cote du lit mineur à l'aplomb des conduites devrait être fixée à 153,4 m plutôt que 154 m tel qu'initialement proposé.

Recommandation # 6. Si les conduites retenues sont de 300 mm, elles devraient être implantées à la cote à la cote maximale de 150,7 m (radier : 153,4 m - 2,4 m - 0,3 m) afin de préserver le paramètre de conception originale relatif à l'épaisseur du lit filtrant (2,4 m). Si des conduites de 600 mm étaient plutôt retenues, leur radier devrait être implanté 30 cm plus bas, soit 150,4 m afin de maintenir la distance de sécurité précédente.

Dans la mesure du possible, cette épaisseur devrait être maintenue afin de procurer le meilleur niveau de sécurité possible contre une dégradation importante du lit de la rivière qui pourrait survenir suite à une crue majeure ou un embâcle abrasif. Une diminution de cette épaisseur comme celle plus récemment proposée (moins de 2 m, voire 1,5 m) offre aussi un certain niveau de sécurité mais moindre que la proposition originale. Dans ce cas, le radier des conduites de 600 mm serait placé au minimum à 151,3 m (153,4 m - 1,5 m - 0,6 m). Sera-ce suffisant à long terme pour protéger le système contre les forces hydrauliques? Et quelle est la période de retour d'un événement fluvial qui menacerait directement le dispositif? Il n'est pas possible dans nos connaissances actuelles de statuer sur la récurrence d'un tel événement qui risquerait de mettre en question l'intégrité du système tel que récemment dimensionné.

Recommandation # 7. Afin de se prémunir contre une dérive de l'épaisseur ou de l'efficacité du captage dans le lit filtrant, possiblement liée à la sédimentation superficielle, à l'exondation liée à

un bas niveau d'eau hivernal ou à la présence de glace de fond, il est recommandé de dimensionner le dispositif (longueur des conduites) avec un coefficient de sécurité suffisant pour faire face à ces conditions d'aléa.

4.3 Recommandations par rapport à la couche superficielle du lit filtrant

Notre avis précédent concernant la couche superficielle d'alluvions est maintenu, c'est-à-dire :

Recommandation # 8. Il est donc recommandé de mettre en place en surface du lit filtrant un matériau possiblement hétérogène, issu localement du lit mineur du cours d'eau, mais ayant typiquement les mêmes caractéristiques dominantes de taille médiane qu'on retrouve transversalement dans le thalweg de la rive gauche, soit 300 mm. Cette spécification devrait toutefois faire l'objet d'une validation terrain finale lors de la mise en place du lit filtrant.

4.4 Recommandations concernant l'entrée du fossé de ceinture

Comme nous l'avons vu précédemment, l'entrée du fossé de ceinture semble obstruée en hiver à la fois par le profil surélevé de la topographie à cet endroit et par le couvert de glace qui s'appuie au fond. Ce constat devient préoccupant considérant que la future prise d'eau superficielle sera localisée dans le fossé de ceinture et que son approvisionnement en eau brute pourrait être réduit, sinon interrompu. De là d'ailleurs la nécessité d'un ouvrage complémentaire sous-fluvial visant à sécuriser l'approvisionnement de l'usine de traitement. Il semble par contre qu'un débit indéterminé d'eau parvient à l'amont du fossé de ceinture sans qu'on puisse préciser quelle en est la provenance : percolation à partir des bassins adjacents, ou percolation à travers les alluvions de l'entrée du fossé. Il n'est pas possible de préciser quel est le débit concerné ni la durée de l'obstruction constatée de sorte que l'utilisation en appoint de la prise sous-fluviale pourrait s'étendre sur une période prolongée en hiver.

À première vue, il semblerait indiqué d'aménager un chenal plus profond qui permettrait de connecter plus directement le fossé de ceinture avec le cours principal. Une telle intervention, si elle permettait de mieux connecter ces masses d'eau à l'eau libre (3 saisons), risquerait aussi d'attirer plus facilement le frasil généré à l'occasion suite à une débâcle hivernale suivie de temps froid. Le cas échéant, le fossé de ceinture et les ouvrages situés à l'entrée se retrouveraient encore obstrués. De plus, l'axe du chenal envisagé, normal à l'écoulement dans le cours principal, se révélerait propice à la sédimentation et à l'accumulation de débris lors des crues annuelles de sorte qu'un entretien périodique et fréquent deviendrait nécessaire.

Recommandation # 9. Il paraît donc prématuré et hasardeux à cette étape de recommander d'excaver le lit de la rivière entre le fossé de ceinture et le cours principal. Il est donc plutôt recommandé de laisser le profil topographique à l'entrée du fossé dans l'état actuel. En revanche, il est recommandé de procéder à un suivi rigoureux des écoulements hivernaux à cet endroit afin d'en préciser le comportement suite à la mise en eau de la prise d'eau superficielle projetée.

Bibliographie

- Gilman, D.L., F.J. Fuglister, & J.M. Mitchell, Jr. (1963). On the power spectrum of "red noise". *J. Atmos. Sci.*, **20**, 182-184.
- Heniche, M., M. Leclerc, Y. Secretan et Taha Ouarda (1999). Travaux d'atténuation des risques de crue à l'eau libre de la rivière Montmorency dans le secteur des Îlets – Phase 2. Mise à jour de l'analyse hydrologique, dimensionnement des travaux d'atténuation et analyse de l'impact sur les risques résiduels de dommage aux résidences. Rapport scientifique INRS-Eau #R555.
- Lau, K.-M. & H.-Y. Weng (1995). Climate signal detection using wavelet transform: How to make a time series sing. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **76**, 2391-2402.
- Leclerc, M., F. Bérubé et C. Paniconi (2008). Mise aux normes de l'eau potable - Évolution topographique et conditions de glace de la rivière Montmorency – Secteur des Îlets. Rapport de recherche INRS-ETE #R1072. 50 pp. Décembre
- Leclerc, M., B. Morse, S. Bélanger et P. Boudreau, (2004). Mise aux normes de l'eau potable - Analyse des conditions d'implantation d'une prise d'eau dans le secteur des Îlets de la rivière Montmorency. Pour le compte de GENECOR- Civil et la Ville de Québec (Service de l'Ingénierie). Rapport INRS-ETE #R-692. Aussi enregistré au Dépt. de Génie civil de l'Université Laval sous le #GCT-04-06. Mars, 55 pages.
- Leclerc, M., Doyon, B., Y. Secretan, M. Heniche, M. Lapointe et P. Boudreau (1998). Simulation hydrodynamique et analyse morphodynamique de la rivière Montmorency dans le secteur des Îlets. Pour le compte de la ville de Beauport. Rapport scientifique INRS-Eau #R522. 120 p.
- Torrence, C. & G.P. Compo (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **79**, 61-78.
- Weng, H. & K.-M. Lau (1994). Wavelets, period doubling, and time-frequency localization with application to organization of convection over the tropical western Pacific. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 2523-2541.