

The diagram on the left side of the cover shows a vertical well structure. It consists of a central grey shaft with a black pump mechanism at the bottom. The well is filled with light blue water. To the right of the well, a horizontal grey pipe with vertical hatching extends across the middle of the page, representing a distribution or collection system. The background is divided into three horizontal layers: a dark blue top layer, a dark purple middle layer, and a brown bottom layer, representing different geological strata.

Guide d'opération de la prise d'eau sous-fluviale du poste de pompage des Îlets Ville de Québec

Rapport de recherche No R-1551
Octobre 2014

Final

INRS

Université d'avant-garde

GUIDE D'OPÉRATION DE LA PRISE D'EAU SOUS-FLUVIALE DU POSTE DE POMPAGE DES ÎLETS -VILLE DE QUÉBEC

Rapport de recherche (final) : R-1551

Remerciements

Nous désirons remercier la Ville de Québec et le Ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire (MAMROT) pour leur contribution financière au projet. Nous tenons à souligner notre reconnaissance aux efforts consentis par la Ville de Québec pour la mobilisation du personnel et des équipements qui ont permis de conduire les essais d'opération sur la prise d'eau sous-fluviale au poste de pompage des Îlets. Les résultats de ces essais ont servis à l'élaboration du présent guide.

Pour la ville de Québec

Service de l'ingénierie

Daniel Dumais, Ing. Gestionnaire de projet

Daniel C-Lessard, Tech. Chargé de projet

Service des travaux publics

Christian Pelletier, Ing., Ingénierie de procédé et projet, traitement des eaux

Michel C-Gagnon, Contremaître intérim aux opérations de production d'eau potable secteur EST

Pour l'Institut national de la recherche scientifique – Eau Terre Environnement

Responsables et analyse du rapport

Richard Martel, Ph.D., Professeur d'hydrogéologie

Claudio Paniconi, Ph.D., Professeur d'hydrogéologie

Rédaction du rapport

Cintia Racine, M.Sc., Assistante de recherche

Fanny Fortier-Fradette, Technicienne de recherche

Contenu

1 Introduction.....	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Structure du guide d’opération	2
2 Guide d’opération	3
2.1 Conception générale du système et instrumentation.....	3
2.1.1 Composantes principales de la prise d’eau sous-fluviale	3
2.1.2 Instrumentation de la prise d’eau sous-fluviale	12
2.2 Captage – balises d’opération et suivi de performance	14
2.2.1 Définition des concepts de performance de captage de la prise d’eau sous-fluviale.	15
2.2.2 Définition du débit de captage	16
2.2.3 Performance de captage de la prise d’eau sous-fluviale des îlets	16
2.2.4 Performance de captage sans colmatage de la prise d’eau sous-fluviale des îlets.....	16
2.2.5 Conditions critiques d’exploitation	18
2.2.6 Suivi de la performance de captage et du colmatage de la prise d’eau sous-fluviale des îlets lors des séquences de drainage	18
2.3 Rétrolavage – procédure, balises d’opération et suivi de performance	20
2.3.1 Mode opératoire du rétrolavage à l’eau de la prise d’eau sous-fluviale des îlets	20
2.3.2 Conditions critiques du rétrolavage à l’eau.....	22
2.3.3 Suivi de la performance du rétrolavage à l’eau en opération.....	23
2.2.4 Opérations de rétrolavage préventives.....	24
Conclusion	25

Liste des Tableaux

Tableau 1: Géométrie de la tranchée de captage et description des matériaux de remblai.....	4
Tableau 2: Description des conduites crépinées et du puits collecteur.....	7
Tableau 3: Dispositif et équipements de rétrolavage de la prise d’eau sous-fluviale des îlets	10
Tableau 4: Jeux de vannes associés aux opérations de la prise d’eau sous-fluviale des îlets.....	10
Tableau 5: Descriptif des instruments de mesure requis pour effectuer le suivi des opérations de la prise d’eau sous-fluviale des îlets	13

Liste des Figures

Figure 1: Vue de dessus du poste de pompage des Îlets de la Ville de Québec et des ouvrages de captage associés	5
Figure 2: Modèle conceptuel de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets de la Ville de Québec.....	8
Figure 3: Plan schématique des instruments de mesure associés à la prise d'eau sous-fluviale des Îlets	11
Figure 4: Propriétés, indicateurs et calculs de la performance de captage de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets et balises d'opération associées.	17
Figure 5 : Étapes et balises d'opération du rétrolavage à l'eau de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets et suivi de performance.....	21

Liste des Annexes

Annexe 1 : Clé USB – Fichiers des données d'opération de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets.	25
Annexe 2 : Affiche du guide d'opération de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets.....	27

1 Introduction

1.1 Mise en contexte

Afin de sécuriser l'approvisionnement en eau potable de l'arrondissement Beauport, dont la demande journalière est de 35 000 m³/j, la Ville de Québec a procédé à la construction d'un système de captage sous-fluvial dans la rivière Montmorency au site de la station de pompage des Îlets en janvier 2011. Ce type de prise d'eau est connu comme étant robuste à diverses contraintes de production, dont les étiages sévères, la mauvaise qualité de l'eau lors des étiages et des crues, le frasil et les embâcles et débâcles printanières. L'utilisation en conditions d'urgence est préconisée pour la prise d'eau sous-fluviale implantée à la station de pompage des Îlets, c'est-à-dire ponctuellement lors de besoins en eau extraordinaires qui ne peuvent être comblés par l'opération de la prise d'eau de surface en place.

La conception de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets étant unique, l'opération de cet ouvrage de captage fait l'objet d'un suivi détaillé de ses opérations à titre pilote dans le cadre du programme de recherche sur la conception, l'opération et la maintenance des prises d'eau sous-fluviales au Québec réalisé par l'INRS et financé par la Ville de Québec et le Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire, MAMROT (2009-2014). Les deux objectifs principaux de ce suivi en continu via l'instrumentation sont :

- Établir un guide de bonnes pratiques d'opération en captage et en rétrolavage afin d'assurer l'intégrité physique du système et un bon rendement à long terme. Encadrer les pratiques d'opération à l'aide de balises et de critères établis à partir de l'interprétation des données recueillies du suivi réalisé entre 2012 et 2014.
- Suivre la performance de captage du système qui évolue lors des séquences de drainage.

Ces objectifs de suivi sont nécessaires puisque la tranchée de captage agit comme un filtre et réduit la charge particulaire de l'eau de rivière captée par le système. Le processus de filtration induit un colmatage progressif de la tranchée de captage, principalement en surface dans la couche protectrice de cailloux, qui diminue le rendement de production du système dans le temps.

Le présent document fait état de la performance et du suivi des opérations de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets qui s'est échelonné de janvier 2012 à mars 2014. Durant cette période, dix-huit séquences de drainage et de rétrolavage ont été effectuées. L'interprétation des données recueillies du suivi a permis d'élaborer un guide d'opération de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets venant en appui aux utilisateurs de ce système de captage novateur.

1.2 Structure du guide d'opération

Le guide d'opération de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets se veut un outil pratique dans le but de transmettre aux opérateurs les connaissances requises afin d'assurer une bonne gestion des opérations du système. Le guide est structuré selon trois thématiques distinctes :

- Présentation de la conception générale du système et de l'instrumentation en place pour effectuer le suivi des opérations;
- Suivi des opérations en captage et description des balises (rendement initial- évolution du rendement et conditions critiques d'exploitation);
- Suivi des opérations de rétrolavage et description des balises (description des procédures, performance durant l'opération et conditions critiques d'opération).

Afin de rendre accessible les informations prioritaires transmises par le guide, une affiche grand format a été élaborée. Celle-ci est présentée en annexe du guide.

2 Guide d'opération

2.1 Conception générale du système et instrumentation

2.1.1 Composantes principales de la prise d'eau sous-fluviale

La prise d'eau sous-fluviale des Îlets a été construite en complément à la prise d'eau de surface et des bassins utilisés pour l'alimentation en eau potable de l'arrondissement Beauport de la Ville de Québec. La Figure 1 présente une vue de dessus du site sur laquelle sont montrés les emplacements du poste de pompage, de la prise d'eau de surface, de la prise d'eau sous-fluviale et le périmètre des bassins. Les conduites principales servant à l'acheminement de l'eau des différentes prises d'eau vers le poste de pompage sont également indiquées. Les bassins du site des Îlets servent de réserve d'eau pour alimenter le poste de pompage, mais aussi pour fournir l'eau requise lors des opérations de rétrolavage de la prise d'eau sous-fluviale.

Le système de captage sous-fluvial est un agencement de quatre conduites crépinées en acier inoxydable de 20 m de long et 300 mm de diamètre installées horizontalement dans une tranchée de captage aménagée dans le lit de la rivière Montmorency, perpendiculairement au sens de l'écoulement. Les crépines sont connectées en berge à une conduite collectrice qui est reliée à un puits de pompage. Un schéma conceptuel du système est montré à la Figure 2. La tranchée de captage de 320 m² de surface a été effectuée à 2.1 m de profondeur et a été remblayée de trois couches de matériaux spécialement sélectionnés. À la base de la tranchée se trouve la couche d'assise et d'enrobage composée de gravier fin sur une épaisseur de 1.25 m. Cette couche est superposée au matériel naturel (alluvion) de la rivière provenant du déblai sur une épaisseur de 40 cm. La tranchée est complétée en surface par une couche de cailloux de 45 cm d'épaisseur servant de protection contre l'arrachement pouvant être exercé par le charriage des glaces. La description de la tranchée de captage ainsi que les granulométries des matériaux constituant la tranchée sont présentées au Tableau 1.

Les conduites crépinées sont installées à une profondeur de 1.8 m (élévation $z = 151.6$ m) et sont espacées de 4 m centre à centre. Une aire de captage de 80 m² par crépine est considérée. Les crépines sont connectées en berge à une conduite collectrice de 600 mm de diamètre. Celle-ci entre dans le puits collecteur à une élévation de 151.22 m. La base du puits se situe à une élévation de 149.85 m et l'aire occupée par celui-ci est approximativement 25 m². Trois autres conduites sont connectées au puits. Une conduite de 750 mm de diamètre ayant une élévation de 151.05 m permet le transfert de l'eau de manière gravitaire du puits collecteur vers le puits de la station de pompage des Îlets (ligne jaune pointillée à la Figure 1). Une conduite de 450 mm de diamètre ayant une élévation de 152.30 m alimente en eau, à partir des bassins, le puits collecteur lors des opérations de rétrolavage à l'eau de la tranchée de captage (ligne bleue pointillée Figure 1). Une conduite de refoulement de 600 mm de diamètre permet le transfert de l'eau du puits collecteur vers les bassins via le réseau de conduites de la pompe (ligne rose

pointillée à la Figure 1). L'ensemble de ces informations relatives aux conduites crépinées et au puits collecteur est présenté au Tableau 2.

Le réseau des conduites et des vannes de la prise d'eau sous-fluviale est adapté pour les opérations de captage et de rétrolavage du système. Le captage est effectué en mode gravitaire lorsqu'une différence de niveaux d'eau entre le puits collecteur et celui de la rivière Montmorency à l'emplacement de l'ouvrage est généré. Le schéma d'écoulement typique en captage est montré par les flèches bleues à la Figure 2.

Tableau 1: Géométrie de la tranchée de captage et description des matériaux de remblai

Géométrie de la tranchée de captage	Valeur
Largeur (à partir de la base de la tranchée)	16 m
Longueur (basée sur la longueur des crépines)	20 m
Aire efficace de captage (longueur x largeur)	320 m ²
Fonction et élévation des matériaux	Granulométrie
Couche d'assise et d'enrobage Élévations : 151.30 m à 152.54 m (n.m.m)	Gravier fin uniforme 6 mm de diamètre
Couche intermédiaire Élévations : 152.54 m à 152.96 m (n.m.m)	Sable et gravier avec cailloux et silts $d_{50}^{\#} = 1.4\text{mm}$ $C_u^{\sim} = 4$ (fraction de cailloux non-considérée dans le calcul du d_{50} et du C_u)
Couche armure Élévations : 152.96 m à 153.40 m (n.m.m)	Cailloux 50 à 300 mm de diamètre

[#] : 50 % massique du matériel présente un diamètre supérieur ou inférieur au d_{50} – paramètre d'analyse granulométrique standard

[~] : Coefficient d'uniformité – paramètre d'analyse granulométrique standard ($C_u = d_{60}/d_{10}$)

Le niveau d'eau dans le puits varie selon la vitesse de la pompe utilisée pour le transfert de l'eau vers la station de pompage. Le captage peut également s'effectuer en mode gravitaire du puits collecteur vers le puits de la station de pompage via la conduite de 750 mm de diamètre. Lorsque la prise d'eau sous-fluviale rencontre une diminution importante de rendement due principalement au colmatage de la tranchée de captage, une opération de rétrolavage à l'eau doit être conduite. Les conditions critiques de production sont discutées à la section 2.2.5. Cette opération est effectuée par l'injection d'eau à contre-courant dans le réseau de conduites en direction des crépines et du matériel de la tranchée de captage, tel que montré par les flèches rouges à la Figure 2.

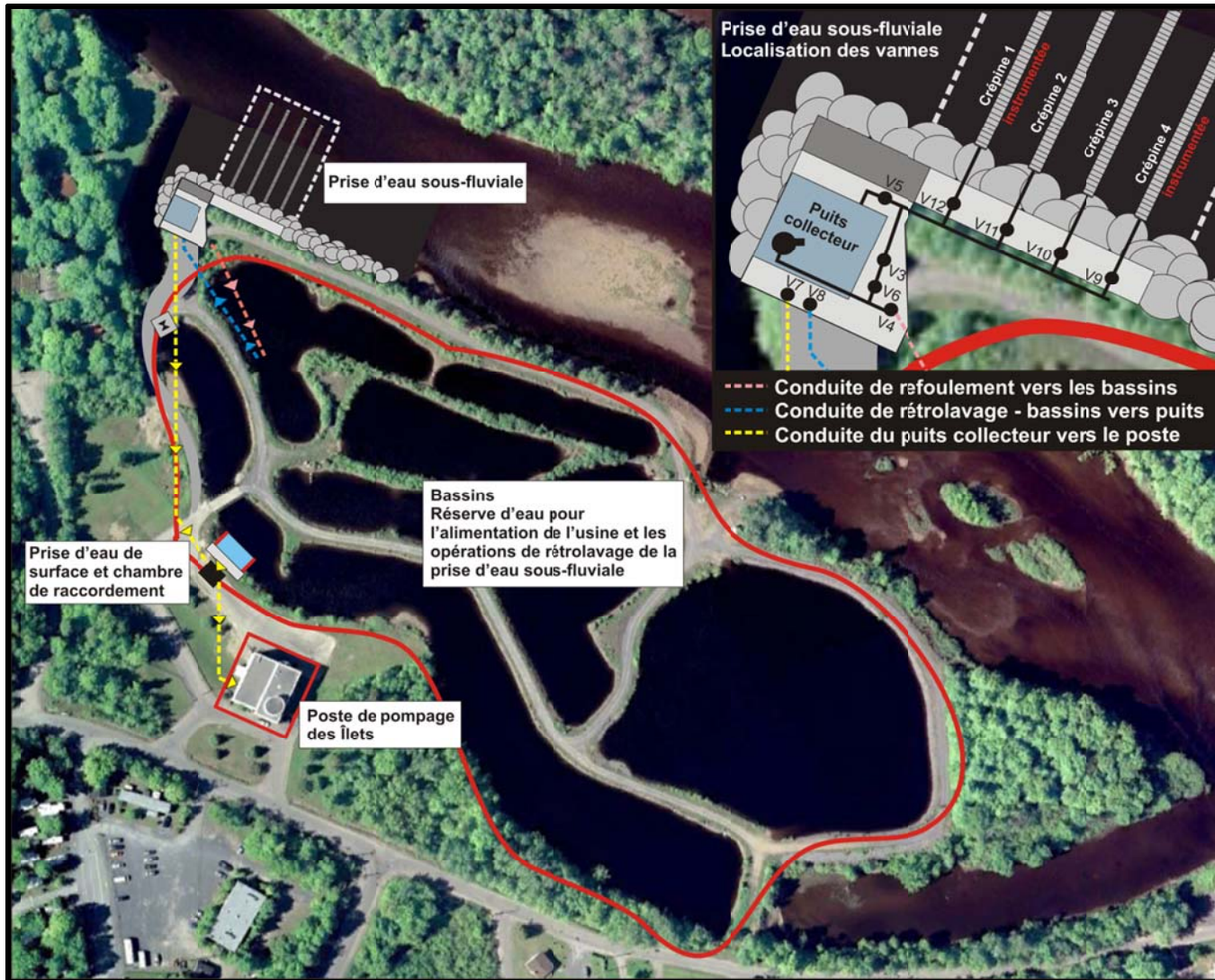


Figure 1: Vue de dessus du poste de pompage des Îlets de la Ville de Québec et des ouvrages de captage associés

Tableau 2: Description des conduites crépinées et du puits collecteur

Paramètre	Valeur
Crépines	
Nombre	4
Longueur crépinée	20 m
Diamètre	0.3 m
Largeur des ouvertures	1 mm
Élévation du radier	151.60 m (n.m.m)
Inclinaison	0°
Espacement entre les crépines	4 m centre à centre
Aire de captage approximative par crépine	80 m ²
Puits collecteur	
Élévation du radier de la conduite ϕ : 450 mm provenant des bassins et entrant dans le puits collecteur	152.30 m
Élévation du radier de la conduite collectrice ϕ : 600 mm entrant dans le puits collecteur provenant des crépines	151.22 m
Élévation du radier de la conduite ϕ : 750 mm servant au drainage par gravité du puits collecteur vers le puits du poste de pompage	151.05 m
Élévation de la base du puits collecteur	149.85 m
Aire approximative du puits collecteur	25 m ²

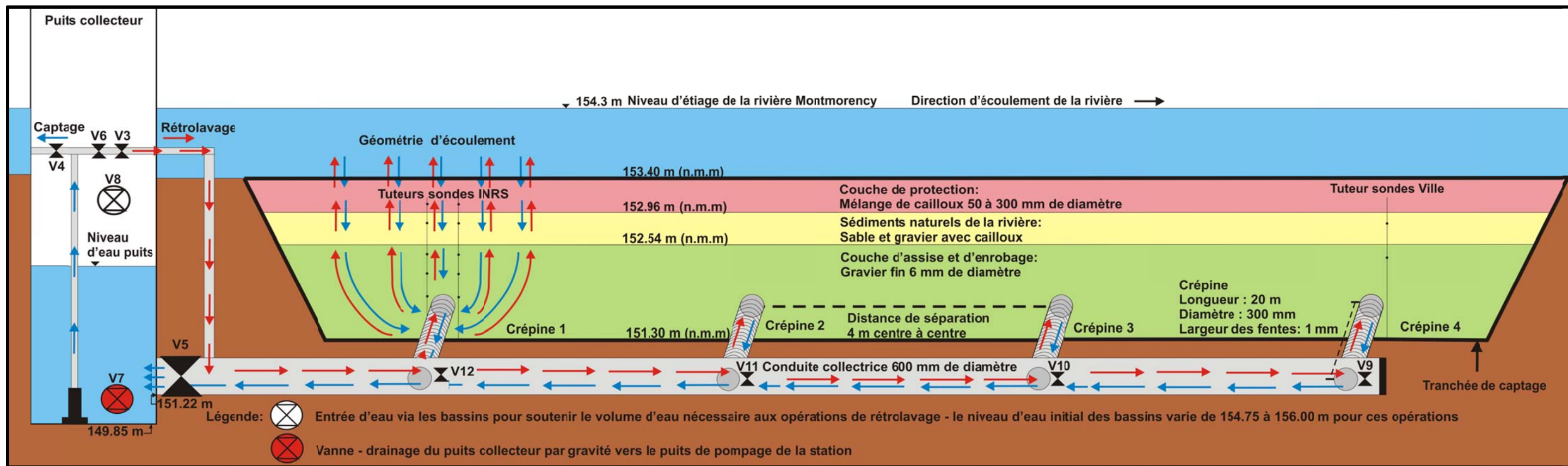


Figure 2: Modèle conceptuel de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets de la Ville de Québec

Le débit moyen d'injection simultané dans trois crépines est de 1535 m³/h et de 1360 m³/h dans une crépine. L'injection est réalisée par l'unique pompe présente dans le puits collecteur et les valeurs de débit correspondent à une vitesse de pompe de 100 %. Le volume d'eau nécessaire à cette opération provient principalement des bassins contigus au puits collecteur via la conduite 450 mm de diamètre et la vanne numéro 8. Lors des rétrolavages à l'eau, une attention particulière doit être apportée au niveau des bassins qui servent également de réserve pour les opérations régulières du poste de pompage. Le niveau critique opérationnel est de 154.50 m (opérateurs, communications personnelles). Toutefois, tel que décrit à la section 2.3.2, il est peu probable d'atteindre ce niveau en une opération de rétrolavage, du moins si le niveau des bassins est initialement à plus de 154.85 m. Le Tableau 3 résume les composantes et les informations associées aux opérations de rétrolavage à l'eau de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets.

Les opérations du système de captage décrites précédemment sont effectuées par l'usage de jeux de vannes présentés aux Figure 1 et 2 et résumés au Tableau 4.

Description des vannes

- V3 – Vanne à boisseau 350 mmφ sur le réseau du rétrolavage
- V4 – Vanne papillon 600 mmφ sur le réseau transférant par pompe l'eau du puits collecteur aux bassins
- V5 – Vanne papillon 600 mmφ sur la conduite collectrice connectée aux crépines entrant dans le puits collecteur sur le réseau du captage
- V6 – Vanne papillon 350 mmφ sur le réseau du rétrolavage
- V7 – Vanne papillon 750 mmφ sur le réseau transférant l'eau de manière gravitaire du puits collecteur au puits de la station de pompage (captage)
- V8 – Vanne papillon 450 mmφ sur la conduite transférant l'eau des bassins dans le puits collecteur pour effectuer les opérations de rétrolavage à l'eau
- V9 – Vanne papillon 300 mmφ sur la crépine 4
- V10 – Vanne papillon 300 mmφ sur la crépine 3
- V11 – Vanne papillon 300 mmφ sur la crépine 2
- V12 – Vanne papillon 300 mmφ sur la crépine 1

Tableau 3: Dispositif et équipements de rétrolavage de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets

Paramètre et descriptif	Valeur
Rétrolavage à l'eau	
Nombre de pompe	1
Débit total d'injection dans 3 crépines ouvertes à 100 % et une vitesse de pompe à 100 % Selon les observations d'opération	Valeurs observées au débitmètre: 1 475 m ³ /h (valeur minimale) 1 535 m ³ /h (valeur moyenne) 1 575 m ³ /h (valeur maximale)
Débit total d'injection dans 1 crépine ouverte à 100 % et une vitesse de pompe à 100 % Selon les observations d'opération	Valeurs observées au débitmètre: 1 300 m ³ /h (valeur minimale) 1 360 m ³ /h (valeur moyenne) 1 425 m ³ /h (valeur maximale)
Durée du rétrolavage	Durée limitée par le niveau d'eau disponible dans les bassins (voir Figure 3). Niveau moyen : 155.50 m Niveau critique opérationnel : 154.50 m Niveau critique physique (basé sur l'élévation du sommet de la conduite ϕ : 450 mm du côté des bassins) : 153.50 m
Rétrolavage à l'air	
Possibilité d'injecter de l'air dans la conduite de rétrolavage – unité mobile de capacité variable	

Tableau 4: Jeux de vannes associés aux opérations de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets

Type d'opération	Vannes ouvertes	Vannes fermées
Captage avec pompage dans le puits collecteur (eau vers les bassins)	V4 – V5 – V9 – V10 – V11 – V12	V3 – V6 – V7 – V8
Captage gravitaire vers le puits de la station de pompage	V5 – V7 – V9 – V10 – V11 – V12	V3 – V4 – V6 – V8
Rétrolavage à l'eau	V3 – V6 – V8 V9* – V10* – V11* – V12*	V4 – V5 – V7

* : Vannes ouvertes en fonction des crépines nettoyées (voir procédure section 2.3)

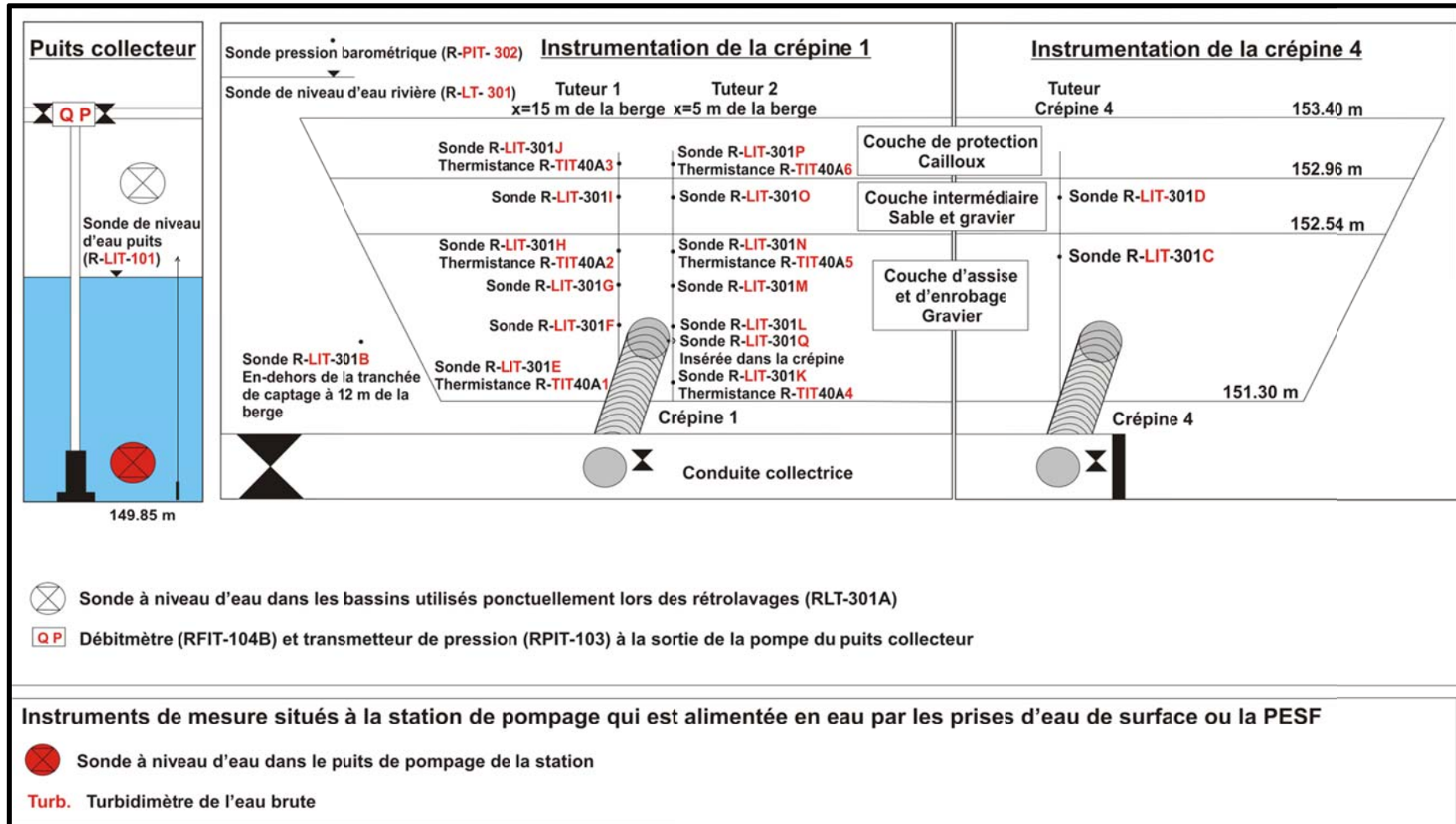


Figure 3: Plan schématique des instruments de mesure associés à la prise d'eau sous-fluviale des Îlets

2.1.2 Instrumentation de la prise d'eau sous-fluviale

Le suivi des opérations et du rendement de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets est réalisé par un ensemble d'instruments de mesure qui ont été mis en place lors de la construction de l'ouvrage sous-fluvial, mais aussi à l'aide d'instruments servant au suivi des opérations régulières de la station de pompage. Les localisations ainsi que les types d'instrument de mesure utilisés sont représentés schématiquement à la Figure 3.

Plusieurs points de mesure ont été implantés dans la tranchée de captage pour suivre les opérations de la crépine 1 qui est positionnée à l'aval de l'ouvrage sous-fluvial et le plus près du puits collecteur. La proximité de la crépine 1 au puits collecteur induit une plus grande sollicitation en captage et par conséquent les impacts du colmatage de la tranchée sur le rendement de la crépine 1 y sont observés plus rapidement que pour les autres crépines. Afin d'étudier les variations longitudinales de l'écoulement de l'eau en captage et en rétrolavage de la crépine 1, deux séries de points de mesure de pression et de température de l'eau ont été installées dans la tranchée de captage, soit à 15 m de la berge, tuteur 1, ainsi qu'à 5 m de la berge, tuteur 2. Les données recueillies de ces points de mesure permettent de suivre en opération les comportements hydrauliques de la crépine et des matériaux composant la tranchée de captage, soit la couche d'assise et d'enrobage, la couche intermédiaire de sable et gravier et la couche de protection constituée de cailloux.

Dans le but d'obtenir un portrait de performance de captage amont-aval de la prise d'eau sous-fluviale, quelques points de mesure ont été aménagés dans la tranchée de captage afin de suivre les opérations de la crépine 4.

Dans le puits collecteur, une sonde à niveau d'eau a été placée au niveau du plancher à 149.85 m. Sur la conduite de la pompe, un débitmètre et un transmetteur de pression ont été installés pour contrôler les opérations en captage et en rétrolavage.

Quelques instruments de mesure utilisés pour les opérations régulières de la station de pompage servent également au suivi des opérations de la prise d'eau sous-fluviale, dont la sonde à niveau d'eau de la rivière Montmorency à l'emplacement de l'ouvrage et la sonde à niveau d'eau des bassins. D'autres mesures, telles la turbidité de l'eau brute captée et transférée à la station de pompage, ainsi que le niveau d'eau du puits de la station de pompage seraient requis, mais ne sont pas actuellement suivi en lien avec l'utilisation de la prise d'eau sous-fluviale.

Les données recueillies par les instruments de mesures associés à la prise d'eau sous-fluviale des Îlets sont suivies et enregistrées en continu à chaque minute. L'analyse des données d'opération produites lors des dix-huit séquences de captage et de rétrolavage depuis la mise en route du système a permis d'identifier les instruments de mesure qui sont essentiels au suivi des opérations (Tableau 5).

Le mode opérationnel de la prise d'eau sous-fluviale ainsi que le suivi de la performance de captage présentés aux sections 2.2 et 2.3 sont basés sur les données recueillies par les instruments de mesure jugés essentiels.

Tableau 5: Descriptif des instruments de mesure requis pour effectuer le suivi des opérations de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets

Instruments de mesure	Localisation de la mesure	Identifiant – numéro électrique
Sondes à niveau d'eau	Au droit de la crépine 4 dans la couche de sédiments naturels à l'élévation $z = 152.815$ m	R-LIT-301D
	Au droit de la crépine 1 dans la couche d'assise et d'enrobage à l'élévation $z = 151.875$ m	R-LIT-301F
	Au droit de la crépine 1 dans la couche de sédiments naturels à l'élévation $z = 151.875$ m	R-LIT-301I
	Dans le lit de la rivière à l'extérieur de la tranchée de captage $z = 151.75$ m	R-LIT-301B
	Rivière Montmorency	RLT-301
	Puits collecteur des crépines $z = 149.85$ m	R-LIT-101
	Bassins	RLT-301A
Pression barométrique	Extérieur au poste de pompage	RPIT-302
Thermistance – température de l'eau	Tranchée de captage au droit de la crépine 1 $z = 151.450$ m	R-TIT40A4
Débitmètre – débit	À la sortie de la pompe du puits collecteur	RFIT-104B

2.2 Captage – balises d’opération et suivi de performance

Le captage de l’eau par la prise d’eau sous-fluviale débute par le choix du mode d’utilisation.

Captage en mode gravitaire (sans pompage) vers le poste de pompage :

Ouvrir dans l’ordre :

- Les vannes des crépines sous-fluviales : V9, V10, V11 et V12
- La vanne de la conduite collectrice : V5
- La vanne de la conduite reliant le puits collecteur au poste de pompage : V7

Fermer

- La vanne de la conduite reliant le puits collecteur des bassins : V8
- Par mesure de sécurité, les vannes V3, V4 et V6 devraient être fermées.

Captage avec pompage dans le puits collecteur vers les bassins

Ouvrir dans l’ordre :

- Les vannes des crépines sous-fluviales : V9, V10, V11 et V12
- La vanne de la conduite collectrice : V5
- La vanne sur le réseau transférant par pompe l’eau du puits collecteur aux bassins : V4

Fermer

- La vanne de la conduite reliant le puits collecteur des bassins : V8
- La vanne de la conduite reliant le puits collecteur au poste de pompage : V7
- Par mesure de sécurité, les vannes V3 et V6 devraient être fermées.

Mise en fonction de la pompe.

**Vitesse recommandée 60 % ou
un débit à la sortie de la pompe Q_p variant entre 400 à 500 m³/h**

Par la suite, la gestion des opérations de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets et l'évaluation de sa performance dans le temps sont liées au suivi en continu des données recueillies de l'instrumentation en place. L'utilisation du système selon les balises d'opération établies (section 2.2.5) favorise le maintien de ses capacités de production et assure son intégrité physique. Le suivi instrumenté permet notamment en captage de :

- Évaluer l'efficacité des opérations de nettoyage de la tranchée de captage, en comparant la performance de drainage obtenue à la suite de l'opération avec le rendement initial connu du système sans colmatage;
- Connaître l'état du rendement en continu de la prise d'eau sous-fluviale par rapport aux balises d'exploitation critiques; et
- Comprendre l'évolution des processus de colmatage principalement dans la tranchée de captage qui ont un impact direct sur les capacités de la prise d'eau sous-fluviale. Ces processus réduisent progressivement le rendement de production du système. L'analyse en continu des données d'opération permet de déterminer quelles couches de matériaux sont plus vulnérables au colmatage.

2.2.1 Définition des concepts de performance de captage de la prise d'eau sous-fluviale

Dans ce guide, la performance de captage de la prise d'eau sous-fluviale est représentée selon plusieurs propriétés, dont la conductivité hydraulique équivalente, K_{eq} (m/s) et la perméabilité équivalente, k_{eq} (m^2). Ces paramètres servent à décrire la performance de captage du système entier, mais sont aussi calculés indépendamment pour la production de la crépine 1 ou 4 ainsi que pour les différentes couches de matériaux présentes dans la tranchée de captage.

La conductivité hydraulique équivalente (K_{eq}) permet de décrire la capacité du système entier ou par couches de matériaux à laisser s'écouler un certain volume d'eau à travers la surface active de captage considérée sous un gradient hydraulique généré par la différence de niveaux d'eau entre le puits d'eau brute et celui de la rivière. Puisque l'entrée de la conduite collectrice dans le puits d'eau brute est fixe (151.22 m), il existe une différence de niveaux d'eau maximale, où au-delà de cette valeur, le débit de captage du système ne peut être accru. La conductivité hydraulique est influencée par les propriétés physiques de l'eau en fonction de sa température, soit la masse volumique ainsi que la viscosité dynamique.

La performance de captage journalière de la prise d'eau sous-fluviale est définie par la conductivité hydraulique équivalente et les balises d'exploitation critiques sont établies entre autre par les valeurs de cette propriété.

La perméabilité équivalente (k_{eq}) permet de caractériser l'écoulement de l'eau dans la tranchée de captage indépendamment des propriétés physiques du fluide impliqué soit l'eau ou l'air dans le cas de l'opération de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets. La perméabilité équivalente est uniquement dépendante des propriétés du milieu poreux et c'est la raison pour laquelle cette propriété est utilisée à titre de référence journalière afin de suivre l'impact des processus de colmatage sur la performance de captage du système.

Le terme «équivalente» indique que la conductivité hydraulique et la perméabilité sont affectées par des phénomènes hydrauliques qui ne peuvent être mesurés pour en soustraire leurs effets. Les calculs des propriétés d'écoulement intègrent entre autres l'effet des pertes de charge dans le réseau de conduites qui varie selon le débit transité. Également, les effets géométriques de captage selon le débit soutiré sont compris dans les valeurs de conductivité hydraulique et de perméabilité équivalente calculées.

2.2.2 Définition du débit de captage

Le débit de captage de la prise d'eau sous-fluviale n'est pas une mesure directe. Lorsque la pompe est en fonction, le débit de captage est calculé à partir d'un bilan d'eau dans le puits collecteur et de la lecture du débitmètre installé sur la conduite de la pompe. La relation mathématique utilisée pour le calcul du débit de captage est montrée à la Figure 4.

2.2.3 Performance de captage de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets

La performance de captage de la prise d'eau sous-fluviale est définie à l'aide de la conductivité hydraulique équivalente (K_{s-f}). Le calcul utilisé pour évaluer K_{s-f} sur l'ensemble de la tranchée de captage et ses conduites crépinées est décrit dans l'encadré situé au centre supérieur de la Figure 4.

2.2.4 Performance de captage sans colmatage de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets

Suite à une opération de rétrolavage à l'eau, la conductivité hydraulique équivalente calculée pour le système de captage devrait se rapprocher des valeurs présentées dans l'encadré situé dans le coin inférieur gauche de la Figure 4. Celles-ci peuvent être utilisées comme indicateurs de l'efficacité de l'opération de rétrolavage à l'eau. Dans le tableau, la valeur de K_{s-f} est fonction de la température de l'eau. La performance de captage sans colmatage associée à K_{s-f} varie de 4.2×10^{-3} m/s ($T_{eau} = 1^\circ\text{C}$) à 7.3×10^{-3} m/s ($T_{eau} = 20^\circ\text{C}$).

OPÉRATIONS ET SUIVI LORS DU CAPTAGE (DRAINAGE)

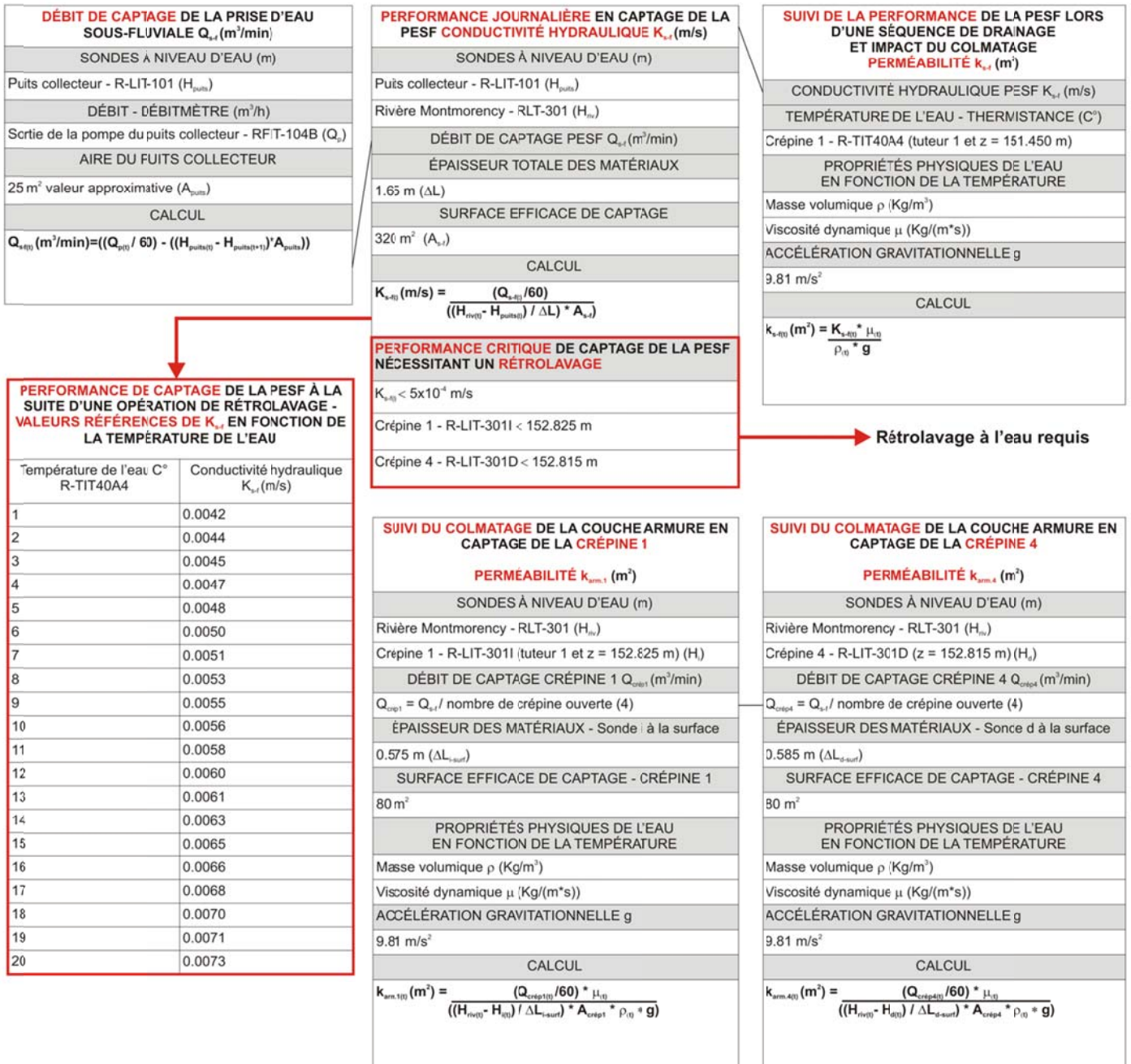


Figure 4: Propriétés, indicateurs et calculs de la performance de captage de la prise d'eau sous-fluviale des îlets et balises d'opération associées.

2.2.5 Conditions critiques d'exploitation

Lorsque la performance de captage de la prise d'eau sous-fluviale (K_{s-f}) atteint la valeur de 5×10^{-4} m/s ou que les sondes à niveau d'eau R-LIT-301I et R-LIT-301D atteignent les valeurs respectives de 152.82 m et 152.81 m ou moindres, une opération de rétrolavage à l'eau est nécessaire afin de retrouver la capacité sans colmatage du système (voir encadré rouge au centre de la Figure 4). Ces critères indiquent généralement une tendance décroissante irréversible et rapide de la production du système. En poursuivant les opérations de captage malgré l'atteinte de ces critères, cela pourrait entraîner entre autres:

- Une désaturation de la tranchée de captage rendant propice la précipitation de métaux et l'incrustation du média de captage par ces métaux. Ce colmatage pourrait se produire à même les ouvertures des conduites crépinées;
- Une stimulation de l'activité bactérienne aérobie favorisée par l'apport d'air dans le média de captage pourrait induire du colmatage biologique; et
- Des conditions de tension dans le média, ce qui favoriseraient un colmatage compact des matériaux de la tranchée de captage, principalement dans la couche de protection, par la rétention de sédiments fins (silt et particules de la taille des argiles). Ce phénomène nuit à l'efficacité des opérations de rétrolavage, car le média compact tendrait à se fracturer pour laisser écouler les fluides lors de l'opération créant ainsi des zones préférentielles d'écoulement. L'action du nettoyage étant concentrée dans ces zones, la distribution des fluides de rétrolavage dans la tranchée de captage ne serait pas uniforme.

Conséquemment, la répétition de ces phénomènes pourrait générer des dommages irréversibles à la structure de la tranchée de captage qui limiteraient à moyen et long terme la performance de la prise d'eau sous-fluviale. Dès lors, seules des interventions mécaniques, tel que l'excavation, sur la structure de l'ouvrage de captage en rivière permettraient de recouvrer le rendement désiré.

2.2.6 Suivi de la performance de captage et du colmatage de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets lors des séquences de drainage

Pour suivre adéquatement la performance de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets et les processus de colmatage lors des séquences de drainage, le rendement doit être exprimé à l'aide d'une propriété qui n'est pas influencée par les propriétés physiques de l'eau. Dans ce guide, la propriété utilisée est la perméabilité équivalente, $k_{\text{éq}}$. Celle-ci est calculée pour l'ensemble de la tranchée de captage (k_{s-f}), tel que montré dans l'encadré situé dans la partie supérieure droite de la Figure 4.

Le suivi des deux dernières années a démontré que la couche de protection composée de cailloux de la tranchée de captage est la plus vulnérable aux impacts du colmatage mécanique. L'évolution de la perméabilité équivalente de cette couche est étroitement liée au rendement de production du système. La perméabilité équivalente de la couche de protection est la plus faible, donc la plus résistante à l'écoulement. Cette conclusion mène à suivre stratégiquement l'évolution de la perméabilité équivalente de ces matériaux influencée par les processus de colmatage. Dans les deux encadrés situés dans la partie inférieure au centre et à la droite de la Figure 4, sont montrées les relations mathématiques devant être utilisées pour calculer les perméabilités équivalentes de la couche de protection au droit des crépines 1 et 4. Ce paramètre hydraulique ne peut être calculé aux crépines 2 et 3 puisqu'elles ne sont pas instrumentées. L'hypothèse formulée est que le comportement des crépines 1 et 4 est représentatif de l'ensemble du système.

Lorsque les processus de colmatage induisent une diminution de rendement atteignant les conditions critiques d'exploitation mentionnées à la section 2.2.5, une opération de rétrolavage à l'eau doit être exécutée pour recouvrir la performance de captage sans colmatage de la prise d'eau sous-fluviale et de pouvoir soutenir ce rendement à moyen terme.

2.3 Rétrolavage – procédure, balises d'opération et suivi de performance

Le suivi des opérations de rétrolavage à l'eau effectuées de janvier 2012 à mars 2014 et le traitement des données d'opération des rétrolavages et des drainages subséquents ont permis de définir :

- Le mode opératoire optimal du rétrolavage à l'eau de la prise d'eau sous-fluviale des îlets;
- Les conditions critiques d'opération du rétrolavage à l'eau; et
- Le paramètre de suivi permettant d'évaluer l'efficacité du rétrolavage à l'eau lors de l'opération.

Ces informations sont résumées à la Figure 5.

2.3.1 Mode opératoire du rétrolavage à l'eau de la prise d'eau sous-fluviale des îlets

Lorsque les conditions de captage de la prise d'eau sous-fluviale atteignent les critères limites d'exploitation, une procédure de rétrolavage à l'eau est nécessaire pour nettoyer la tranchée de captage et retrouver une conductivité hydraulique s'approchant de la valeur initiale du système sans colmatage, typiquement 5×10^{-3} m/s ($T_{\text{eau}} = 6^\circ\text{C}$). Le mode opératoire du rétrolavage à l'eau de la prise d'eau sous-fluviale des îlets est présenté dans l'encadré gauche de la Figure 5. Celui-ci est basé sur les résultats obtenus des dix-huit opérations de rétrolavage à l'eau qui ont été conduites depuis la mise en route du système. La performance des opérations de rétrolavage à l'eau est plus amplement analysée pour la crépine 1. L'étude des données d'opération portait entre autres sur :

- La perméabilité de la tranchée de captage au droit de la crépine 1 atteinte à la fin des opérations de rétrolavage à l'eau en fonction de la durée d'injection dans la crépine 1.
- La perméabilité de la tranchée de captage au droit de la crépine 1 aux premiers instants des drainages suivants les rétrolavages à l'eau; et
- L'évolution de la perméabilité de la tranchée de captage de la crépine 1 durant la séquence de drainage succédant l'opération de rétrolavage à l'eau. Toutefois, ce dernier point d'analyse est vulnérable aux variations de la turbidité de l'eau de la rivière Montmorency qui influencent directement la vitesse à laquelle le processus de colmatage de la tranchée de captage se produit.

OPÉRATIONS ET SUIVI LORS DU RÉTROLAVAGE

RÉTROLAVAGE DE LAPESF OPÉRATIONS - ÉTAPES	RÉTROLAVAGE DE LA PESF DONNÉES
FERMETURE DES VANNES SERVANT AU CAPTAGE: V7-V4-V5	DÉBIT - DÉBITMÈTRE (m ³ /h)
OUVERTURE À 100 % DES VANNES POUR LE RÉTROLAVAGE : V8-V6-V3	Sortie de la pompe du puits collecteur - RFIT-104B (Q _p)
OUVERTURE DES VANNES À 100 % DES CRÉPINES 1(V12)-2(V11)-3(V10)	Valeurs de Q _p lors de l'injection dans 3 crépines Q _{p3crép} : 1 475 m ³ /h (valeur minimale) 1 535 m ³ /h (valeur moyenne) 1 575 m ³ /h (valeur maximale)
MISE EN FONCTION DE LA POMPE DU PUIITS COLLECTEUR À LA VITESSE 100 %	Valeurs de Q _p lors de l'injection dans 1 crépine Q _{p1crép} : 1 300 m ³ /h (valeur minimale) 1 360 m ³ /h (valeur moyenne) 1 425 m ³ /h (valeur maximale)
Durée d'injection 25 minutes	SONDES À NIVEAU D'EAU (m)
VANNE DE LA CRÉPINE 2(V11) OUVERTE À 100 % OUVERTURE DE V12 ET V10 À 5 TOURS	Crépine 1 - R-LIT-301F (tuteur 1 et z = 151.875 m) H _i
Durée d'injection 25 minutes	Crépine 1 - R-LIT-301I (tuteur 1 et z = 152.825 m) H _i
VANNE DE LA CRÉPINE 2(V11) OUVERTE À 100 % FERMETURE DE V12 ET V10	Rivière Montmorency - RLT-301 (H _{riv})
Durée d'injection 25 minutes	Bassin - RLT-301A
OUVERTURE DES VANNES À 100 % DES CRÉPINES 1(V12)-2(V11)	ÉPAISSEUR DES MATÉRIEAUX
Durée d'injection 25 minutes	Sonde f jusqu'à la surface de la tranchée de captage 1.525 m (ΔL _{f-surf})
VANNE DE LA CRÉPINE 1(V12) OUVERTE À 100 % OUVERTURE DE V11 À 5 TOURS	Sonde i jusqu'à la surface de la tranchée de captage 0.575 m (ΔL _{i-surf})
Durée d'injection 25 minutes	TEMPÉRATURE DE L'EAU - THERMISTANCE (C°)
VANNE DE LA CRÉPINE 1(V12) OUVERTE À 100 % FERMETURE DE V11	Crépine 1 - R-TIT40A4 (tuteur 1 et z = 151.450 m)
Durée d'injection 25 minutes	PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE L'EAU EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE
OUVERTURE DES VANNES À 100 % DES CRÉPINES 2(V11)-3(V10)-4(V9) FERMETURE DE V12	Masse volumique ρ (Kg/m ³)
Durée d'injection 25 minutes	Viscosité dynamique μ (Kg/(m*s))
VANNE DE LA CRÉPINE 3(V10) OUVERTE À 100 % OUVERTURE DE V11 ET V9 À 5 TOURS	ACCÉLÉRATION GRAVITATIONNELLE g
Durée d'injection 25 minutes	9.81 m/s ²
VANNE DE LA CRÉPINE 3(V10) OUVERTE À 100 % FERMETURE DE V11 ET V9	CONDITIONS CRITIQUES EN RÉTROLAVAGE OPÉRATIONS DANS LA CRÉPINE 1
Durée d'injection 25 minutes	CONDITIONS DE FLUIDISATION DANS LA TRANCHÉE
OUVERTURE DES VANNES À 100 % DES CRÉPINES 3(V10)-4(V9)	Gradient hydraulique vertical i_{v, tranchée} $i_{v, tranchée(t)} = \frac{(H_{(t)} - H_{riv(t)})}{\Delta L_{f-surf}} > 1 \text{ fluidisation probable}$
Durée d'injection 25 minutes	CONDITIONS DE FLUIDISATION DANS LA COUCHE ARMJRE
VANNE DE LA CRÉPINE 4(V9) OLVERTE À 100 % OUVERTURE DE V10 À 5 TOURS	Gradient hydraulique vertical i_{v, armure} $i_{v, armure(t)} = \frac{(H_{(t)} - H_{riv(t)})}{\Delta L_{f-surf}} > 1 \text{ fluidisation probable}$
Durée d'injection 25 minutes	Niveau critique des bassins pour les rétrolavages Bassin - RLT-301A < 154.5 m
VANNE DE LA CRÉPINE 4(V9) OLVERTE À 100 % FERMETURE DE V10	SUIVI DE LA PERFORMANCE DU RÉTROLAVAGE EN OPÉRATION
Durée d'injection 25 minutes	PERMÉABILITÉ k_{v-rétro} (m²)
ARRÊT DE LA POMPE DU PUIITS COLLECTEUR	$k_{v-rétro(t)} (m^2) = \frac{(Q_{p3crép} / 3600) * \mu_{(t)}}{((H_{(t)} - H_{riv(t)}) / \Delta L_{f-surf}) * A_{crép1} * \rho_{(t)} * g}$
OUVERTURE DES VANNES À 100 % DES CRÉPINES 1(V12)-2(V11)-3(V10)-4(V9)	
FERMETURE DES VANNES POUR LE RÉTROLAVAGE : V8-V6-V3	
OUVERTURE DES VANNES SERVANT AU CAPTAGE: V7-V4-V5 V7 OUVERTE SI CAPTAGE PAR GRAVITÉ	

Figure 5 : Étapes et balises d'opération du rétrolavage à l'eau de la prise d'eau sous-fluviale des îlets et suivi de performance

De cette analyse, une procédure de rétrolavage à l'eau a été établie en fonction des paramètres d'opération présentant les meilleurs résultats sur le rendement de la prise d'eau sous-fluviale. La procédure est présentée dans l'encadré gauche de la Figure 5. Trois conditions d'opération influencent considérablement la performance de nettoyage de la prise d'eau, soit:

- La création de barrières hydrauliques pour contraindre et concentrer l'écoulement de l'eau vers les surfaces ciblées pour le nettoyage. Cette action est initiée par l'injection d'eau simultanée dans trois crépines ($Q_{p3crép} \approx 1535 \text{ m}^3/\text{h}$), suivi d'une restriction d'écoulement dans les deux crépines présentes latéralement, pour injecter la totalité du débit d'eau dans la crépine centrale ($Q_{p1crép} \approx 1360 \text{ m}^3/\text{h}$).
- L'ordre de nettoyage des crépines doit être respecté afin de poursuivre et d'optimiser l'effet de barrière hydraulique à chacune des opérations, et ;
- La durée de réalisation de chacune des étapes de la procédure doit être minimalement de 25 minutes.

L'analyse des données d'opération de rétrolavage à l'eau a permis d'identifier que les débits d'injection d'eau actuels ne sont pas suffisants pour atteindre des conditions de fluidisation de la tranchée de captage indépendamment de la température de l'eau, de l'état de colmatage de la tranchée de captage et du niveau des bassins. De ce constat, il est possible d'utiliser la pompe à sa vitesse maximale lors des opérations de nettoyage, jusqu'à un éventuel réajustement des capacités. Malgré ce fait, la prochaine section présente les conditions hydrauliques considérées critiques pour les opérations de rétrolavage à l'eau de la prise d'eau sous-fluviale des îlets.

2.3.2 Conditions critiques du rétrolavage à l'eau

La procédure complète du rétrolavage à l'eau de la prise d'eau sous-fluviale présente une durée d'injection d'eau de 300 minutes. Lors de cette opération, le niveau d'eau des bassins diminue en moyenne de 0.35 m. Afin de soutenir les besoins quotidiens en eau de l'usine d'eau potable de l'arrondissement Beauport, un seuil critique de niveau d'eau des bassins a été établi à 154.5 m. En considérant cette élévation, il serait nécessaire de prévoir un niveau d'eau des bassins minimal de 154.85 m pour la réalisation des opérations de rétrolavage à l'eau de la prise d'eau sous-fluviale.

Lors des opérations de nettoyage, il est primordial d'éviter de fluidiser la tranchée de captage. Cet état induirait un remaniement important des matériaux de la tranchée, entraînerait les cailloux de la couche armure vers les crépines et rendrait vulnérable la surface du lit à l'érosion par le courant de la rivière. L'analyse en continu des données d'opération de rétrolavage permet d'évaluer si le phénomène de fluidisation se produit dans la tranchée de captage. L'analyse est basée sur le calcul du gradient hydraulique vertical au droit de la crépine 1 ($i_{v, tranchée(t)}$), montré

dans l'encadré rouge à la droite de la Figure 5. Bien que cette condition ne peut être vérifiée que pour la crépine 1, celle-ci sert de référence pour les autres crépines afin d'établir le débit sécuritaire d'injection d'eau. En aucun moment le gradient hydraulique vertical ne doit dépasser la valeur de 1.

Puisque la couche armure est constituée des matériaux les plus résistants à l'écoulement dans la tranchée de captage, le suivi du gradient hydraulique vertical dans cette couche au droit de la crépine 1 peut prévenir éventuellement d'atteindre les conditions hydrauliques générant la fluidisation complète du lit de captage. En général, le gradient hydraulique vertical de cette couche ($i_{v.armure(t)}$) atteindra les critères de fluidisation ($i_{v.armure(t)} > 1$) avant l'ensemble de la tranchée. Il est calculé à partir de l'équation présentée dans l'encadré rouge sous le titre : conditions de fluidisation dans la couche armure.

2.3.3 Suivi de la performance du rétrolavage à l'eau en opération

En général, une opération de rétrolavage efficace va progressivement diminuer les pertes de charge dans les matériaux de la tranchée de captage pour le même débit d'injection. Il est possible de constater l'amplitude de ce phénomène par le suivi du paramètre de la perméabilité équivalente de la tranchée de captage lors du nettoyage à l'eau à contre-courant dans la crépine 1 ($k_{s-f,rétro(t)}$) qui va augmenter conséquemment à la diminution des pertes de charge. Ce paramètre peut être calculé à l'aide de l'équation montrée dans le coin inférieur droit de la Figure 5.

Résultat d'une opération de rétrolavage à l'eau

La conductivité hydraulique de la prise d'eau sous-fluviale K_{s-f} devrait s'approcher de la valeur moyenne sans colmatage, soit de 4.2×10^{-3} m/s ($T_{eau} = 1^\circ\text{C}$) à 7.3×10^{-3} m/s ($T_{eau} = 20^\circ\text{C}$), référence à la Figure 4.

Dans le cas contraire, il serait recommandé de réaliser une seconde opération de rétrolavage.

2.2.4 Opérations de rétrolavage préventives

L’usage de la prise d’eau sous-fluviale est complémentaire à celui de la prise d’eau de surface et est destiné à pallier au manque d’eau qui surviendrait lors de certaines conditions critiques d’exploitation de la prise d’eau de surface telles que les étiages sévères, la présence de frasil ou de glace de fond, des embâcles et débâcles, dans la rivière Montmorency au site des Îlets. L’utilisation ponctuelle dans le temps du système sous-fluvial complexifie le suivi de sa performance de captage et l’identification de l’atteinte des conditions critiques nécessitant la réalisation d’opérations de rétrolavage. Afin que la prise d’eau sous-fluviale ait un rendement suffisant à la demande lors de son utilisation, des opérations de rétrolavage dites préventives doivent être exécutées. Les périodes de l’année ciblées pour ces opérations de rétrolavage sont les suivantes :

- à la fin d’une période de captage qui a mené à l’atteinte des conditions critiques d’exploitation;
- dans la semaine précédant une utilisation;
- au mois de juillet-août en prévention d’un étiage sévère dans la Rivière Montmorency;
- au mois de novembre-décembre afin de sécuriser l’approvisionnement en conditions hivernales; et
- au mois de mai pour nettoyer le système après la crue printanière.

Conclusion

La prise d'eau sous-fluviale des îlets de la Ville de Québec est un concept novateur qui a fait l'objet de deux années de suivi afin de développer de bonnes pratiques d'utilisation. Le présent guide d'opération vient principalement en appui aux utilisateurs de la prise d'eau sous-fluviale. Il contient notamment :

- La description des éléments de conception du système, les équipements et les instruments de mesure associés;
- L'énumération des paramètres requis pour analyser et suivre la performance du système ainsi que pour détecter les problématiques de rendement; et,
- des balises d'opération en captage ainsi qu'en rétrolavage.

La gestion adéquate des opérations de la prise d'eau sous-fluviale favorisera le maintien du rendement du système à long terme et assurera son intégrité physique.

En complément à ce guide, l'ensemble des données d'opération disponibles de la prise d'eau sous-fluviale des îlets est présenté en annexe. Celles-ci sont organisées dans une structure facilitant la reconnaissance et le suivi des paramètres requis pour la gestion adéquate des opérations du système. Les traitements de données présentés dans ces fichiers constituent une référence pour la construction d'un outil de gestion des opérations de la prise d'eau sous-fluviale des îlets au sein de la ville de Québec. Également, une affiche regroupant l'ensemble des figures du guide est annexée au document et sert de repère aux utilisateurs pour accroître leur compréhension de l'opérabilité du système.

ANNEXE 1

Fichiers des données d'opération de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets

ANNEXE 2

Affiche du guide d'opération de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets