

Rapport d'étude sur la conception,
l'instrumentation et l'opération des
prises d'eau horizontales sous-fluviales

INRS

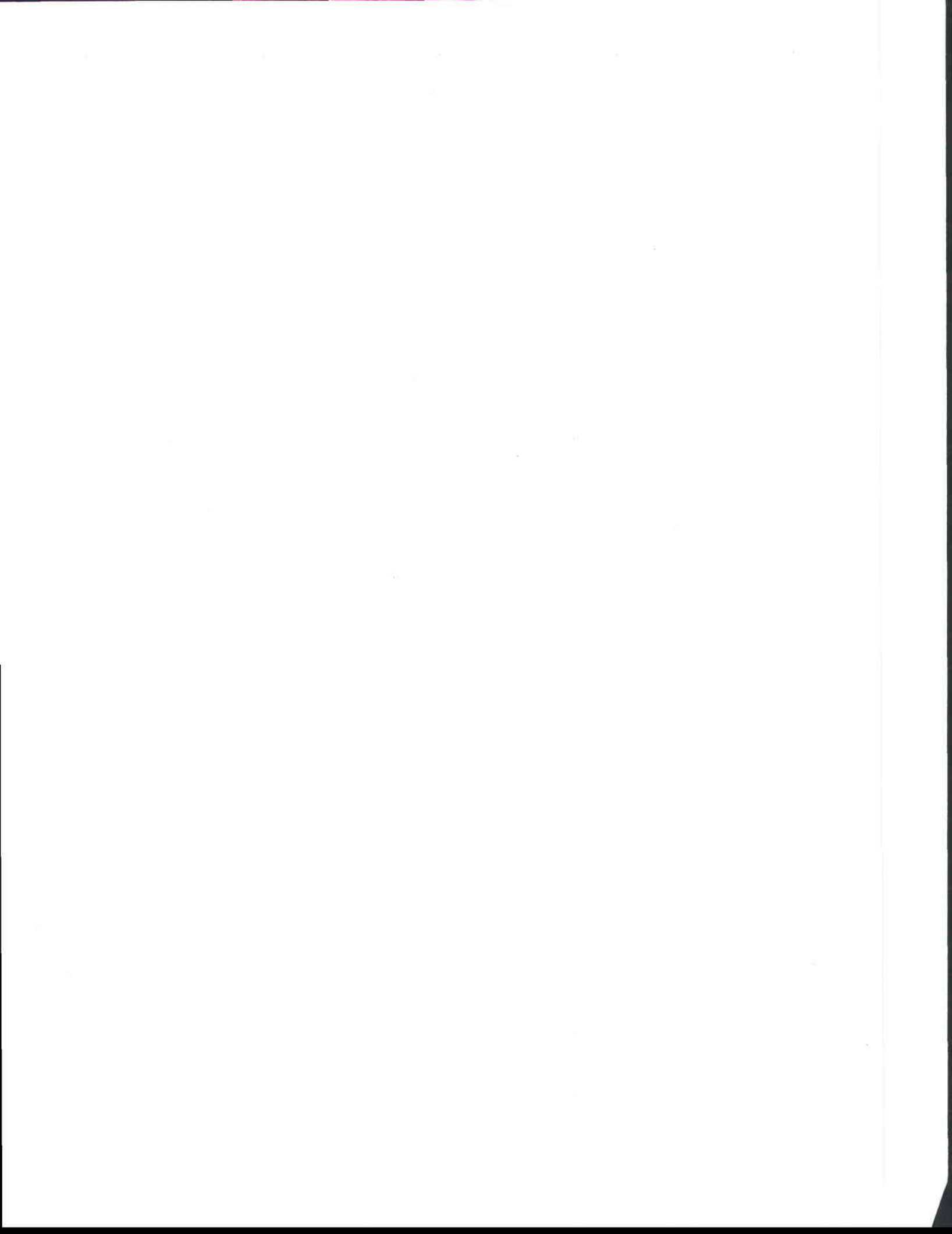
Université d'avant-garde

Rapport de recherche No R-1566
Janvier 2015

Final

Centre - Eau Terre Environnement

$$\frac{d[\text{Cd}]_{\text{coupepos}}}{dt} = \frac{(k_{uw}[\text{Cd}^{2+}] + k_{uf}[\text{Cd}]_f)}{K_e} (1 - e^{-k_e t})$$



RAPPORT D'ÉTUDE SUR LA CONCEPTION, L'INSTRUMENTATION ET L'OPÉRATION DES PRISES D'EAU HORIZONTALES SOUS-FLUVIALES

Rapport de recherche (final) : R-1566

Remerciements

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

Pour le MAMROT

Direction générale des infrastructures

René Caissy

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

Responsables et analyse du rapport

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

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

Rédaction du rapport

Cintia Racine, M.Sc., Assistante de recherche

Fanny Fortier-Fradette, Technicienne de recherche

ISBN : 978-2-89146-835-0

SOMMAIRE

L'INRS a reçu le mandat de réaliser une étude permettant de baliser la conception, l'instrumentation et l'opération des prises d'eau horizontales sous-fluviales.

Une prise d'eau sous-fluviale consiste à prélever l'eau dite de surface à partir d'un ouvrage de captation situé dans le lit d'un plan d'eau, ce qui le met à l'abri des conditions extrêmes d'écoulement en surface. L'utilisation d'une prise d'eau sous-fluviale en complément à une prise d'eau conventionnelle de surface permet d'accroître la robustesse du système par rapport à plusieurs conditions critiques d'alimentation en eau potable, telles les étiages sévères, le fragil et la glace de fond, les embâcles et débâcles. Reconnaisant l'intérêt d'application de cette technologie pour l'approvisionnement en eau potable municipal, mais aussi dans le secteur industriel Québec, l'INRS s'est donné comme objectif d'accroître les connaissances sur la conception et l'opération des prises d'eau horizontales sous-fluviales.

Cette étude a été conduite en trois axes d'activités de recherche.

- 1) Revue de la littérature
- 2) Documentations des conceptions et des opérations de systèmes construits avant 2012
- 3) Modélisations physiques des composantes de prises d'eau sous-fluviales

Les résultats de l'étude ont permis d'établir des principes de conception des systèmes de captage sous-fluviaux, d'identifier les instruments de mesure essentiels au suivi des opérations et d'établir des balises d'opération en captage et en rétrolavage afin d'assurer le rendement à long terme de ces systèmes. Les connaissances qui ont été développées, consolidées et validées lors de ces activités de recherche sont documentées dans le présent rapport. Celles-ci viendront en appui aux consultants œuvrant dans la conception de ces systèmes ainsi qu'aux futurs utilisateurs de prises d'eau sous-fluviales.

Depuis 2011, l'INRS a l'opportunité de transférer les connaissances émanant de la recherche dans la conception, la construction et l'opération de la prise d'eau sous-fluviale du poste de pompage de l'Ouvrage A de la Ville de Québec. Celui-ci constitue un système de démonstration unique qui servira à documenter le rendement en captage et la performance des opérations de rétrolavage sur plusieurs années. Le suivi permettra de confirmer la robustesse de la conception par rapport aux conditions critiques d'exploitation ainsi qu'à développer de nouveaux modes opérationnels des prises d'eau sous-fluviales.

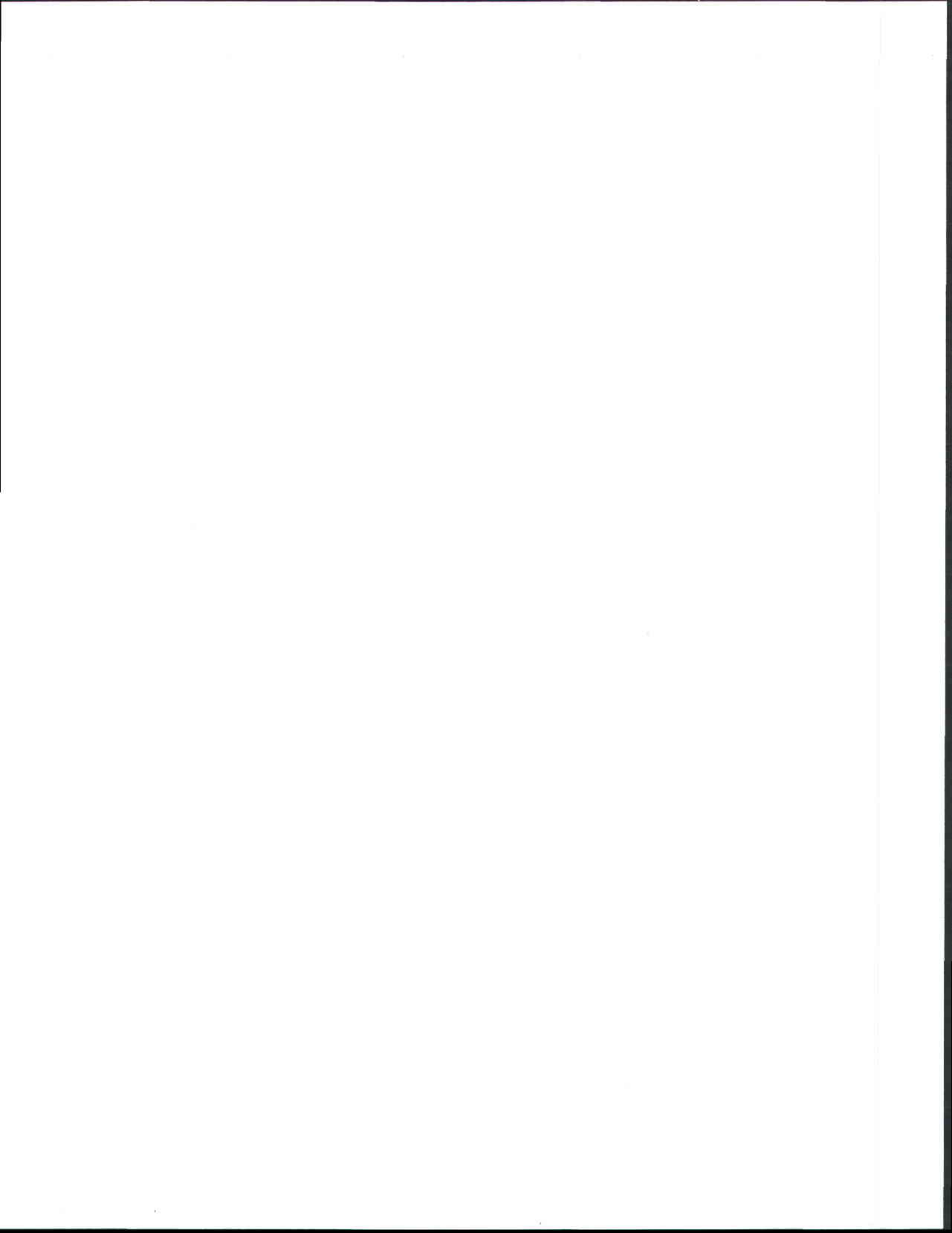


TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction.....	1
1.1	Concept général	2
1.2	Avantages et désavantages des prises d'eau horizontales sous-fluviales.....	3
1.2.1	Avantages	3
1.2.2	Désavantages.....	3
1.3	Contenu du rapport.....	4
2	Revue de littérature	5
2.1	Littérature sur les prises d'eau horizontales sous-fluviales	5
2.2	Littérature sur la conception des puits de captage d'eau souterraine	5
2.3	Littérature sur la conception des filtres rapides	5
3	Principes de conception	6
3.1	Choix de l'emplacement pour l'implantation d'une prise d'eau horizontale sous-fluviale ..	7
3.2	Matériaux constituant la tranchée de captage	7
3.3	Nombre et dimensionnement des conduites crépinées	10
3.4	Aménagement de la tranchée de captage	12
3.5	Rétrolavage.....	12
3.5.1	Rétrolavage à l'eau	13
3.5.2	Rétrolavage à l'air	14
3.5.3	Rétrolavage air-eau	15
3.5.4	Mode d'opération du rétrolavage	15
3.6	Instrumentation.....	16
3.6.1	Mesure de niveau d'eau	16
3.6.2	Mesure de pression	18
3.6.3	Mesure de la pression atmosphérique.....	19
3.6.4	Mesure de la température de l'eau de la rivière.....	19
3.6.5	Mesure du débit	19
3.6.6	Mesure de la turbidité de l'eau captée	19
4	Documentation des conceptions de prises d'eau sous-fluviales construites avant 2012 et suivis des opérations.....	20
4.1	Prise d'eau sous-fluviale de la Ville de Beaupré	20

4.1.1 Composantes principales de la prise d'eau sous-fluviale – Ville de Beaupré.....	20
4.1.2 Instrumentation de la prise d'eau sous-fluviale – Ville de Beaupré.....	23
4.1.3 Suivi des données d'opération journalière – Ville de Beaupré	26
4.1.4 Points forts et points faibles de la conception du système de captage sous-fluvial de la Ville de Beaupré	26
4.2 Prise d'eau sous-fluviale de la Ville de Trois-Pistoles	27
4.3 Prise d'eau sous-fluviale des Îlets de la Ville de Québec.....	27
4.3.1 Composantes principales de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets – Ville de Québec .	27
4.3.2 Instrumentation de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets – Ville de Québec.....	34
4.3.3 Suivi des données d'opération journalière – Ville de Québec (système des Îlets)	37
4.3.4 Points forts et points faibles de la conception du système de captage sous-fluvial des Îlets de la Ville de Québec	37
5 Modélisations physiques d'éléments de conception, d'instrumentation et d'opération des prises d'eau sous-fluviales.....	38
5.1 Composantes du modèle physique	39
5.2 Description des essais et résultats	40
6 Guide d'opération de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets de la Ville de Québec.....	43
6.1 Captage – balises d'opération et suivi de performance.....	43
6.1.1 Définition des concepts de performance de captage de la prise d'eau sous-fluviale.	44
6.1.2 Définition du débit de captage	45
6.1.3 Performance de captage de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets	45
6.1.4 Performance de captage sans colmatage de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets.....	45
6.1.5 Conditions critiques d'exploitation	47
6.1.6 Suivi de la performance de captage et du colmatage de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets lors des séquences de drainage	47
6.2 Rétrolavage – procédure, balises d'opération et suivi de performance	49
6.2.1 Mode opératoire du rétrolavage à l'eau de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets	49
6.2.2 Conditions critiques du rétrolavage à l'eau.....	51
6.2.3 Suivi de la performance du rétrolavage à l'eau en opération.....	52
6.2.4 Opérations de rétrolavage préventives.....	53
7 Conclusion	53
8 Références	55

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Schéma conceptuel d'une prise d'eau horizontale sous-fluviale	2
Figure 3. 1: Représentation schématique des composantes d'une prise d'eau sous-fluviale	9
Figure 3. 2: Description des paramètres utilisés dans l'équation pour déterminer la longueur totale de crépine requise dans la conception d'une prise d'eau sous-fluviale	10
Figure 3. 3: Schémas conceptuels de l'instrumentation requise pour le suivi des opérations d'une prise d'eau sous-fluviale	17
Figure 4. 1: Site de la prise d'eau sous-fluviale de la Ville de Beaupré	22
Figure 4. 2: Schéma conceptuel de la prise d'eau sous-fluviale de la Ville de Beaupré.....	25
Figure 4. 3: Vue de dessus du poste de pompage des Îlets de la Ville de Québec et des ouvrages de captage associés	30
Figure 4. 4: Modèle conceptuel de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets de la Ville de Québec...	31
Figure 4. 5: Plan schématique des instruments de mesure associés à la prise d'eau sous-fluviale des Îlets.....	36
Figure 5. 1: Composantes d'un modèle physique de prise d'eau sous-fluviale et équipements associés aux essais.....	42
Figure 6. 1: Propriétés, indicateurs et calculs de la performance de captage de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets et balises d'opération associées.	46
Figure 6. 2: Étapes et balises d'opération du rétrolavage à l'eau de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets et suivi de performance	50

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4. 1: Débits de captage – conception et production – Ville de Beaupré	20
Tableau 4. 2: Géométrie de la tranchée de captage et description des matériaux de remblai – Ville de Beaupré	21
Tableau 4. 3: Description des conduites crépinées et du puits d'eau brute – Ville de Beaupré...	22
Tableau 4. 4: Dispositif et équipements de rétrolavage de la prise d'eau sous-fluviale – Ville de Beaupré	24
Tableau 4. 5: Descriptif des instruments de mesure suivis et des données d'opération associées – Ville de Beaupré	24
Tableau 4. 6: Géométrie de la tranchée de captage et description des matériaux de remblai – des Îlets.....	29

Tableau 4. 7: Description des conduites crépinées et du puits collecteur de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets.....	32
Tableau 4. 8: Dispositif et équipements de rétrolavage de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets	33
Tableau 4. 9: Description des vannes manuelles de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets	33
Tableau 4. 10: Jeux de vannes associés aux opérations de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets.	34
Tableau 4. 11: Descriptif des instruments de mesure requis pour effectuer le suivi des opérations de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets.....	35

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Procédure de rétrolavage de la prise d'eau sous-fluviale de la ville de Beaupré.....	57
Annexe 2 : Fichiers numériques – Suivis et interprétations des opérations journalières des prises d'eau sous-fluviales de Beaupré et de Québec (système des Îlets).....	60

1 Introduction

Le présent rapport vise à transmettre de nouvelles connaissances sur la conception et l'opération des prises d'eau horizontales sous-fluviales adaptées au contexte Québécois. Depuis les années 2000, quelques municipalités et villes du Québec ont choisi d'implanter des systèmes de captage sous-fluviaux comme mode d'approvisionnement principal ou complémentaire d'eau potable.

Une prise d'eau sous-fluviale consiste à prélever l'eau dite de surface à partir d'un ouvrage de captation situé dans le lit d'un plan d'eau, ce qui le met à l'abri des conditions extrêmes d'écoulement en surface.

L'utilisation d'une prise d'eau sous-fluviale en complément à une prise d'eau conventionnelle de surface permet d'accroître la robustesse du système par rapport à plusieurs conditions critiques d'alimentation en eau potable, telles les étiages sévères, le frasil, la glace de fond, les embâcles et débâcles.

De 2005 à 2008, l'INRS a été impliquée dans la réalisation de modélisations numériques et physiques d'un concept de prise d'eau sous-fluviale exécuté dans le cadre d'un projet de mise aux normes de l'eau potable du Secteur Est de la Ville de Québec (Racine *et al.*, 2005) (Racine *et al.*, 2009). Cette étude a permis de montrer une part du potentiel d'applicabilité de cette technologie, mais aussi de mettre en évidence une littérature pauvre sur le sujet et inadaptée au contexte québécois. Reconnaisant l'intérêt d'application de cette technologie pour l'approvisionnement en eau potable municipal, mais aussi dans des domaines industriels au Québec, l'INRS s'est donné comme objectif de réaliser diverses activités de recherche ayant pour but de guider l'établissement de balises de conception et d'opération des prises d'eau horizontales sous-fluviales connues également sous l'appellation galerie d'infiltration (Racine *et al.*, 2011). Ce qui a donné lieu en 2010 au projet de recherche sur les prises d'eau sous-fluviales déposé au Ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire (MAMROT). Du projet initialement présenté au MAMROT, s'est ajouté d'autres activités de recherche qui ont mené à la conception, la construction et l'opération d'un système de captage sous-fluvial bénéficiant ainsi des connaissances acquises des premières années de recherche du projet.

Le présent rapport fait état des résultats des diverses activités de recherche conduites par l'INRS sur les prises d'eau horizontales sous-fluviales qui ont été intégrés à la conception et l'opération d'un système pilote instrumenté unique à la Ville de Québec au poste de pompage de l'Ouvrage A.

1.1 Concept général

Le principe d'opération d'une prise d'eau horizontale sous-fluviale est le captage combiné de l'eau de surface et de l'eau souterraine effectué par une série de puits horizontaux implantés typiquement dans une tranchée de captage de faible profondeur, moins de 2 m, aménagée dans le lit d'un plan d'eau plus souvent dans une rivière. La Figure 1.1 montre un schéma conceptuel d'une prise d'eau horizontale sous-fluviale. Le captage s'effectue par gravité en pompant l'eau du puits vertical installé en berge qui est connecté hydrauliquement aux conduites crépinées situées dans la tranchée de captage. En générant une différence de niveau d'eau entre la rivière et le puits collecteur, l'eau de la rivière s'écoule verticalement jusqu'au puits horizontal permettant ainsi une filtration naturelle de l'eau. En contrepartie, la filtration génère du colmatage dans le milieu poreux, ce qui provoque une perte de capacité de captage du système. Dans ce contexte, une composante d'eau souterraine peut contribuer pour soutenir les opérations de captage. Afin d'assurer le rendement du système à court, moyen et long termes, des opérations de rétrolavage à l'air et à l'eau sont requises pour déloger les particules à l'origine du colmatage. Ces opérations peuvent être comparées à celles qui sont conduites dans les usines d'eau potable pour nettoyer les filtres rapides au sable. Bien que méconnu, le concept de prise d'eau sous-fluviale présente de nombreux avantages par rapport aux prises d'eau conventionnelles de surface et aux puits d'eau souterraine, mais comporte également certains désavantages, décrits subséquemment.

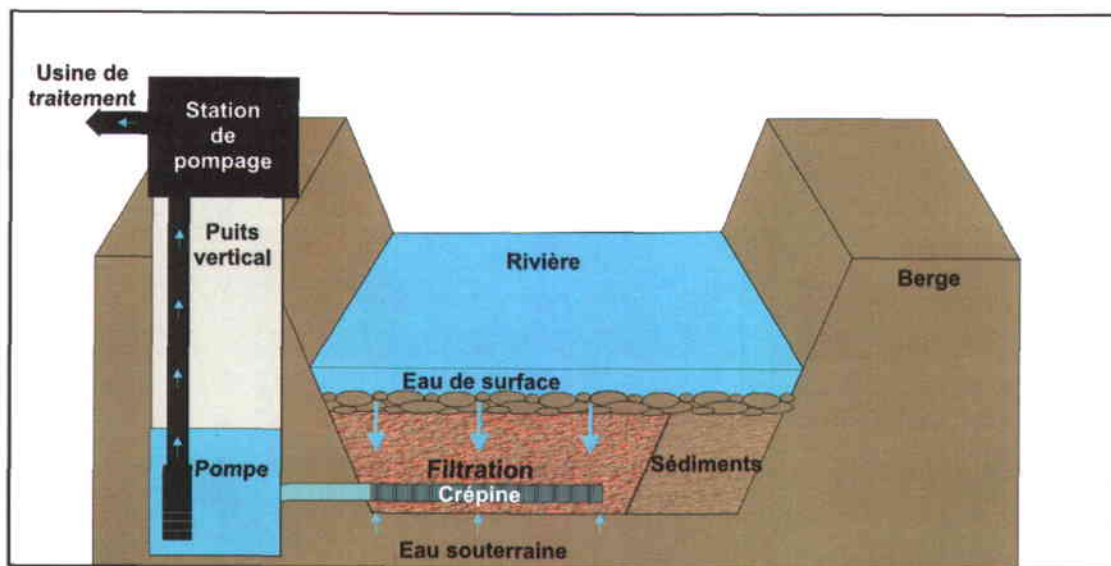


Figure 1.1: Schéma conceptuel d'une prise d'eau horizontale sous-fluviale

1.2 Avantages et désavantages des prises d'eau horizontales sous-fluviales

1.2.1 Avantages

Une prise d'eau horizontale sous-fluviale constitue une alternative d'intérêt lorsque :

- une source d'eau souterraine n'est pas disponible en quantité ou en qualité suffisante pour soutenir les besoins exigés ou n'est pas disponible à une distance acceptable; ou
- l'application d'une prise d'eau de surface peut être affectée significativement par des conditions critiques d'exploitation, telles les étiages sévères, le frasil, la glace de fond, les embâcles et débâcles.

Typiquement, une prise d'eau sous-fluviale est aménagée dans une tranchée de captage composée de matériaux granulaires de forte conductivité hydraulique, supérieure à 5×10^{-3} m/s, qui est excavée dans le lit d'une rivière constitué de matériaux alluvionnaires de sables, graviers et cailloux présentant généralement une bonne perméabilité. Ces dépôts alluvionnaires sont aussi fréquemment reliés hydrauliquement à un aquifère situé sous le lit de rivière qui présente une continuité dans les berges de la rivière. Lors du captage, le cours d'eau ainsi que l'eau souterraine de l'aquifère contribuent à la production du système.

Les contextes d'implantation des prises d'eau horizontales sous-fluviales permettent à ces systèmes de répondre aux besoins municipaux (quantité d'eau) et agissent comme des filtres naturels efficaces (qualité d'eau). Ceux-ci sont moins vulnérables que les prises d'eau de surface lors des conditions critiques d'exploitation suivantes :

- Étiages sévères, frasil et glace de fond : les prises d'eau sous-fluviales sont continuellement alimentées par les eaux de surface, les écoulements hyporhéiques et souterrains.
- Embâcles et débâcles : les profondeurs d'implantation de ces systèmes confèrent à ceux-ci une protection contre l'arrachement.
- Mauvaise qualité de l'eau associée à une hausse de la turbidité en condition de crue : la prise d'eau sous-fluviale agit comme un filtre et permet de diminuer significativement la charge particulaire de l'eau captée.

Bien que ces systèmes présentent un grand potentiel d'applicabilité, certains désavantages doivent être considérés.

1.2.2 Désavantages

Les principaux désavantages connus des prises d'eau sous-fluviales sont liés à la construction et à la maintenance de ces systèmes.

- Construction: puisque les systèmes sous-fluviaux sont aménagés dans les lits des rivières, plusieurs difficultés d'installation peuvent être rencontrées. Les travaux de construction doivent être généralement effectués en conditions immergées. Bien qu'il soit

possible d'effectuer un certain contrôle sur les vitesses d'écoulement dans la zone de travail, il est difficile de mettre à sec l'aire d'excavation à l'aide de pointes filtrantes et de la mise en place de palplanches (batardeau). Certaines de ces contraintes sont atténuées si les travaux sont réalisés en conditions d'étiages.

- Maintenance : en cas de bris majeur nécessitant une intervention sur le système en rivière, les problématiques de construction peuvent être renouvelées.
- Environnement: lors des travaux de construction et de maintenance, des précautions environnementales, liées entre autres à la gestion de la qualité de l'eau provenant de l'aire de travail et à l'empiétement du batardeau dans la rivière, pourraient être appliquées par le Ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques.

1.3 Contenu du rapport

Le programme de recherche sur les prises d'eau sous-fluviales au Québec de l'INRS a été conduit de mai 2010 à décembre 2014. Diverses activités de recherche ont été effectuées afin de mieux comprendre l'influence des paramètres de conception et d'opération sur le rendement de production d'eau de ces systèmes. Le présent document rapporte les résultats et les connaissances acquises des travaux complétés dans le cadre du projet :

- revue de littérature sur les prises d'eau sous-fluviales, les ouvrages de captage et les filtres;
- principes de conception d'une prise d'eau sous-fluviale;
- documentation des conceptions et suivis des opérations de systèmes de captage sous-fluviaux existants;
- modélisations physiques d'éléments de conception, d'instrumentation et d'opération des prises d'eau sous-fluviales – pilote du système de captage sous-fluvial de l'ouvrage A de la Ville de Québec;
- élaboration d'un guide d'opération d'une prise d'eau sous-fluviale – exemple du poste de pompage des îlets de la Ville de Québec.

Certaines thématiques associées aux prises d'eau sous-fluviales ne sont pas abordées dans la présente étude, soient :

- la conception de la prise d'eau sous-fluviale de l'ouvrage A
- la conception et la construction d'un poste de pompage;
- les étapes de construction d'une prise d'eau sous-fluviale en rivière; et
- la quantification détaillée du processus de filtration effectué par un système de captage sous-fluvial.

2 Revue de littérature

Plusieurs ressources littéraires ont été consultées afin d'établir une base de connaissances sur la conception, l'opération et la maintenance des prises d'eau horizontales sous-fluviales. Tel que mentionné précédemment, peu de littérature directement associée au sujet a été rédigée. Toutefois, l'intégration des connaissances acquises des références littéraires liées à la conception des ouvrages de captage souterrains et des filtres rapides au sable a permis d'identifier les composantes principales d'une prise d'eau sous-fluviale à modéliser physiquement en laboratoire pour mieux comprendre leur influence sur le rendement.

2.1 Littérature sur les prises d'eau horizontales sous-fluviales

La source d'information la plus complète sur la conception des prises d'eau sous-fluviales est contenue dans le livre *Groundwater and Wells*, 3e édition (Sterrett, 2007) où plusieurs principes de conception ont été testés et validés dans les différentes activités de recherche du programme. Toutefois, peu de connaissances sont transmises concernant: le mode opératoire en captage et en rétrolavage des prises d'eau sous-fluviales; et l'instrumentation à mettre en place pour effectuer un suivi en continu du rendement du système.

Plusieurs études de cas de prises d'eau horizontales sous-fluviales ou en berges sont présentées dans une publication de l'*International Water Association* (Hubbs et al, 2007). Ce rapport met en évidence l'influence des facteurs naturels et des composantes de ces systèmes sur leur rendement. Une emphase particulière est mise sur les processus de colmatage.

2.2 Littérature sur la conception des puits de captage d'eau souterraine

Puisqu'une prise d'eau sous-fluviale est constituée de puits horizontaux installés dans une tranchée de captage, une grande part de la littérature concernant le design de puits de captage d'eau souterraine peut être utilisée pour définir plusieurs éléments de conception et d'opération des prises d'eau sous-fluviales. Entre autres, les critères de conception liés au dimensionnement et la composition des conduites crépinées ainsi que la granulométrie et les propriétés des matériaux d'enrobage sont documentés dans Sterrett (2007) au Chapitre 9 consacré au design des puits de production d'eau.

Aussi, les méthodes de développement des capacités d'un puits de production sont présentées dans Sterrett (2007) et peuvent constituer une excellente référence dans la définition des premières opérations à effectuer sur un système de captage sous-fluvial pour en améliorer son rendement initial.

2.3 Littérature sur la conception des filtres rapides

Plusieurs similitudes existent entre les prises d'eau sous-fluviales, composées de matériaux de grande perméabilité de sable et gravier, et les filtres rapides au sable utilisés pour le traitement de l'eau potable. L'eau soutirée par le système de captage sous-fluvial est filtrée lors de son passage dans les matériaux de la tranchée de captage qui induit un processus de colmatage

réduisant ainsi dans le temps le rendement du système. Afin de limiter la vitesse de ce processus, il est recommandé de suivre les balises de débit surfacique proposées pour la conception des filtres rapides au sable. Une excellente revue des connaissances sur la conception des filtres est présentée dans le livre *Water Treatment Principles and Design*, 3^e édition (Crittenden *et al.*, 2012).

Le processus de colmatage d'une prise d'eau sous-fluviale est influencé par la charge particulaire du cours d'eau d'implantation qui peut varier de manière importante dans une année. Afin de contrer les processus de colmatage, plusieurs balises de conception et d'opération de rétrolavage sont recommandées dans Crittenden *et al.* (2012) en lien avec les équipements, les fluides d'injection et les débits surfaciques à utiliser. Afin de maximiser les impacts positifs des rétrolavages sur le rendement des filtres, il est préconisé d'effectuer une injection combinée d'air et d'eau dosée de sorte de générer un effet pulsé nommé le *collapse pulsing*. Cette méthode est décrite dans un article de la revue *Water Science and Technology* (Amirtharajah, 1993).

Afin d'assurer la stabilité des couches de matériaux constituant les prises d'eau sous-fluviales, il est approprié de vérifier la stabilité granulométrique de l'assemblage des couches qui sera soumis à des écoulements dirigés vers le bas en captage, mais plus particulièrement vers le haut en rétrolavage. Des critères de conception sont rapportés à ce sujet dans le livre intitulé *Introduction à la Géotechnique* (Holts et Kovacs, 1991) à la section contrôle des écoulements et filtres.

3 Principes de conception

Les connaissances acquises de la littérature et des modélisations physiques et numériques qui ont été réalisées pour guider la conception des prises d'eau sous-fluviales de «des Îlets» et de «l'Ouvrage A» de la Ville de Québec, ont permis d'établir les principes de design d'une prise d'eau sous-fluviale sur lesquels reposent les choix de composantes.

- Rencontrer les objectifs de captage, en choisissant des matériaux dont la conductivité hydraulique est élevée;
- Rendre les prises d'eau sous-fluviales robustes aux conditions d'érosion par le courant et les glaces;
- Reproduire les conditions naturelles des lits de rivière où sont installées les prises d'eau sous-fluviales, soient les épaisseurs des dépôts, et les caractéristiques granulométriques des matériaux *in situ* représentant des conditions stables par rapport aux conditions hydrauliques des cours d'eau;
- Assurer la stabilité des matériaux constituant les prises d'eau sous-fluviales lors des opérations de captage et de rétrolavage, soit de limiter la contamination entre les diverses couches de matériaux composant les tranchées de captage ou avec les matériaux naturels des lits des rivières dans lesquels les systèmes seront implantés;

- Choisir des matériaux qui permettront d'assurer des rétrolavages efficaces des prises d'eau sous-fluviales;
- Limiter le colmatage mécanique et biologique irréversible;
- Produire une qualité d'eau brute supérieure à celle des rivières d'implantation.

Plusieurs principes de conception des prises d'eau sous-fluviales décrits dans les prochaines sections sont représentés schématiquement à la Figure 3.1.

3.1 Choix de l'emplacement pour l'implantation d'une prise d'eau horizontale sous-fluviale

Une prise d'eau sous-fluviale doit normalement être implantée dans une section droite d'un cours d'eau principal ayant une vitesse moyenne d'écoulement supérieure à 0.3 m/s, afin de minimiser les processus de sédimentation au-dessus de la tranchée de captage. Les conduites crépinées devraient être orientées perpendiculairement au courant (Sterrett, 2007).

La surface de l'ouvrage et les dimensions physiques sont établies sur la base d'étude hydrologique au préalable. Aussi, les débits de production projetés doivent répondre aux exigences gouvernementales en matière d'environnement qui sont fonction du $Q_{2,7}$, soit le débit d'étiage de récurrence de 2 ans calculé sur une plage de 7 jours consécutifs.

3.2 Matériaux constituant la tranchée de captage

La tranchée de captage d'une prise d'eau sous-fluviale est composée d'un assemblage de matériaux présentant une conductivité hydraulique élevée. Le choix des matériaux est influencé fortement par la nature granulométrique des sédiments naturels composant le lit de la rivière d'implantation. Plusieurs rivières au Québec présentent en surface une couche armure dont la granulométrie est plus grossière que celle de la couche de sous-surface. L'échantillonnage des matériaux *in situ* jusqu'à la profondeur d'excavation prévue pour l'installation d'une prise d'eau sous-fluviale est préconisé pour définir leur granulométrie. Il faut tenir compte de toutes ces particularités lors de la conception, car les composantes de la prise d'eau sous-fluviales seront soumises à l'hydrodynamisme du cours d'eau d'implantation. Dans le cadre de notre étude, quatre couches de matériaux possédant des fonctions distinctes dans la conception des prises d'eau sous-fluviales ont été définies et sont présentées subséquemment en débutant par la base de la tranchée de captage, typiquement 2.3 m de profondeur, jusqu'à la surface du lit.

Couche d'assise et d'enrobage : La granulométrie des matériaux composant la couche d'assise et d'enrobage est fonction de la granulométrie des matériaux *in situ* situés à la profondeur d'installation de cette couche, voir la méthode décrite par Sterrett (2007). Selon l'auteur, les matériaux d'assise et d'enrobage devraient être uniformes (coefficient d'uniformité (C_u) < 2), propres, arrondis, composés de minéraux siliceux. À titre de référence, un facteur multiplicateur de 6 sur le d_{30} des alluvions doit être appliqué afin de déterminer le d_{30} (diamètre des particules dont 30 % massique du matériel est passant lors d'une analyse granulométrique standard) du

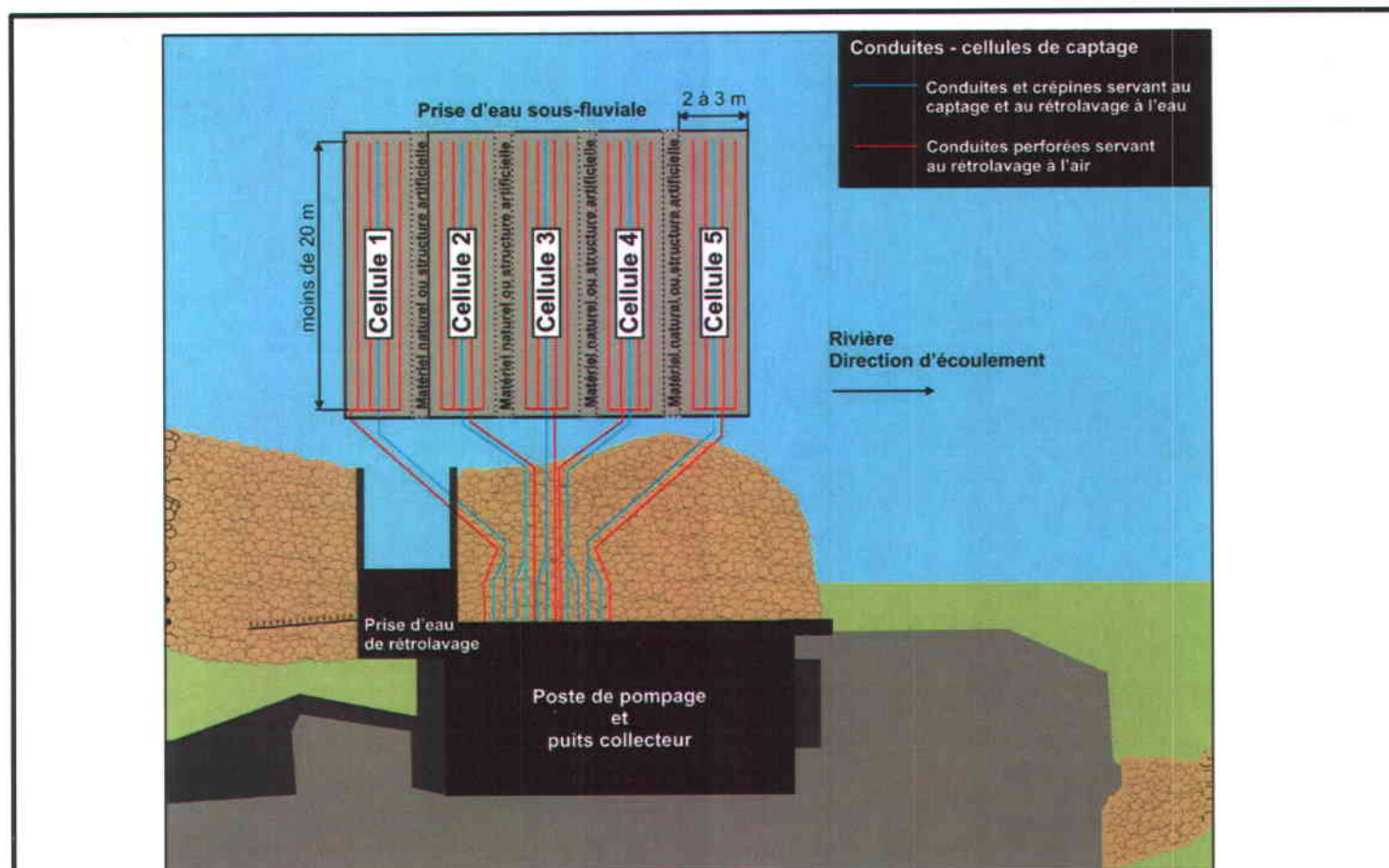
gravier filtrant constituant la couche d'assise et d'enrobage. Sous les conduites crépinées, une épaisseur de 0.3 m de matériaux d'assise est recommandée (Sterrett, 2007). De cette valeur, il est approprié d'ajouter à cette couche une épaisseur équivalente ou supérieure à 2 fois le diamètre des conduites crépinées.

Couche de filtration : la couche de filtration limite la pénétration en profondeur de la charge particulaire de l'eau de la rivière dans la tranchée de captage en favorisant un colmatage mécanique de surface. Il est recommandé de mettre en place une couche de filtration au-dessus de la couche d'assise et d'enrobage. Les matériaux de filtration devraient présenter une granulométrie assez similaire au gravier filtre de la couche d'assise et d'enrobage, mais légèrement moins uniforme (coefficient d'uniformité entre 2 et 3) en y incorporant des fractions de sable grossier et de diverses tailles de gravier. L'épaisseur minimale de la couche doit répondre aux critères des filtres (Holts et Kovacs, 1991). La hauteur totale de la couche est limitée en surface par la couche de protection et si nécessaire par la couche de transition.

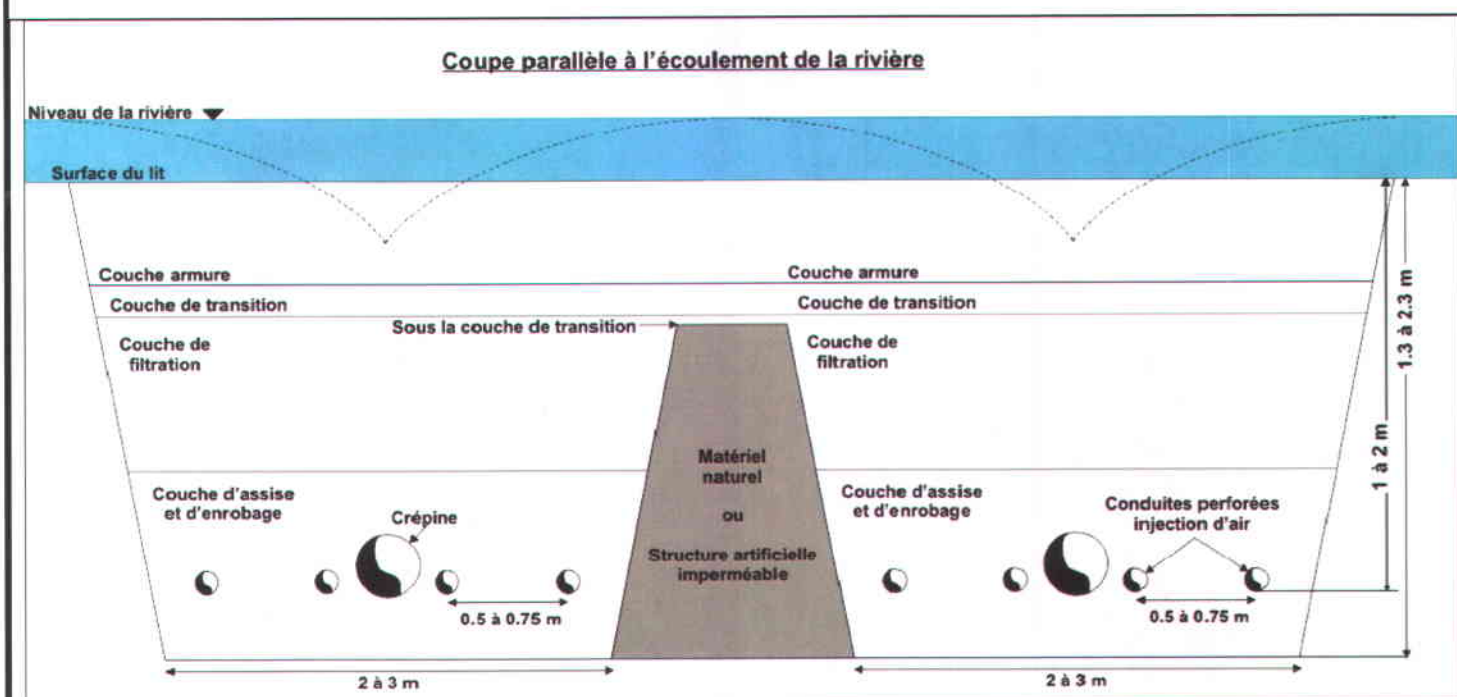
Couche de protection : une étude hydrodynamique du cours d'eau permettra d'établir l'épaisseur et la granulométrie des matériaux constituant la couche armure qui devront être reproduites à la surface de la tranchée de captage. Ces matériaux sont généralement stables par rapport à l'énergie hydrodynamique de la rivière. Par conséquent, l'épaisseur de la couche de protection devrait reproduire celle de la couche armure *in situ*. Il est également recommandé de combler les vides de la couche de protection avec les matériaux de la couche de filtration. Cette opération limite la pénétration incontrôlée de matière organique et de particules fines de la taille des silts et des argiles en profondeur dans cette couche.

Couche de transition : cette couche est requise entre la couche de filtration et la couche armure lorsqu'un contraste granulométrique important existe entre les deux matériaux. La granulométrie et l'épaisseur de la couche de transition doivent respecter les critères de conception des filtres (Holts et Kovacs, 1991).

Dans son ensemble, la conductivité hydraulique verticale moyenne de l'assemblage des matériaux de captage devrait être supérieure à 7×10^{-3} m/s (température de l'eau à 8°C). Sur la base du débit de captage journalier et de la conductivité hydraulique verticale des matériaux de la tranchée de captage, l'étape subséquente de conception d'une prise d'eau sous-fluviale est de définir les caractéristiques physiques des conduites crépinées et leur nombre.

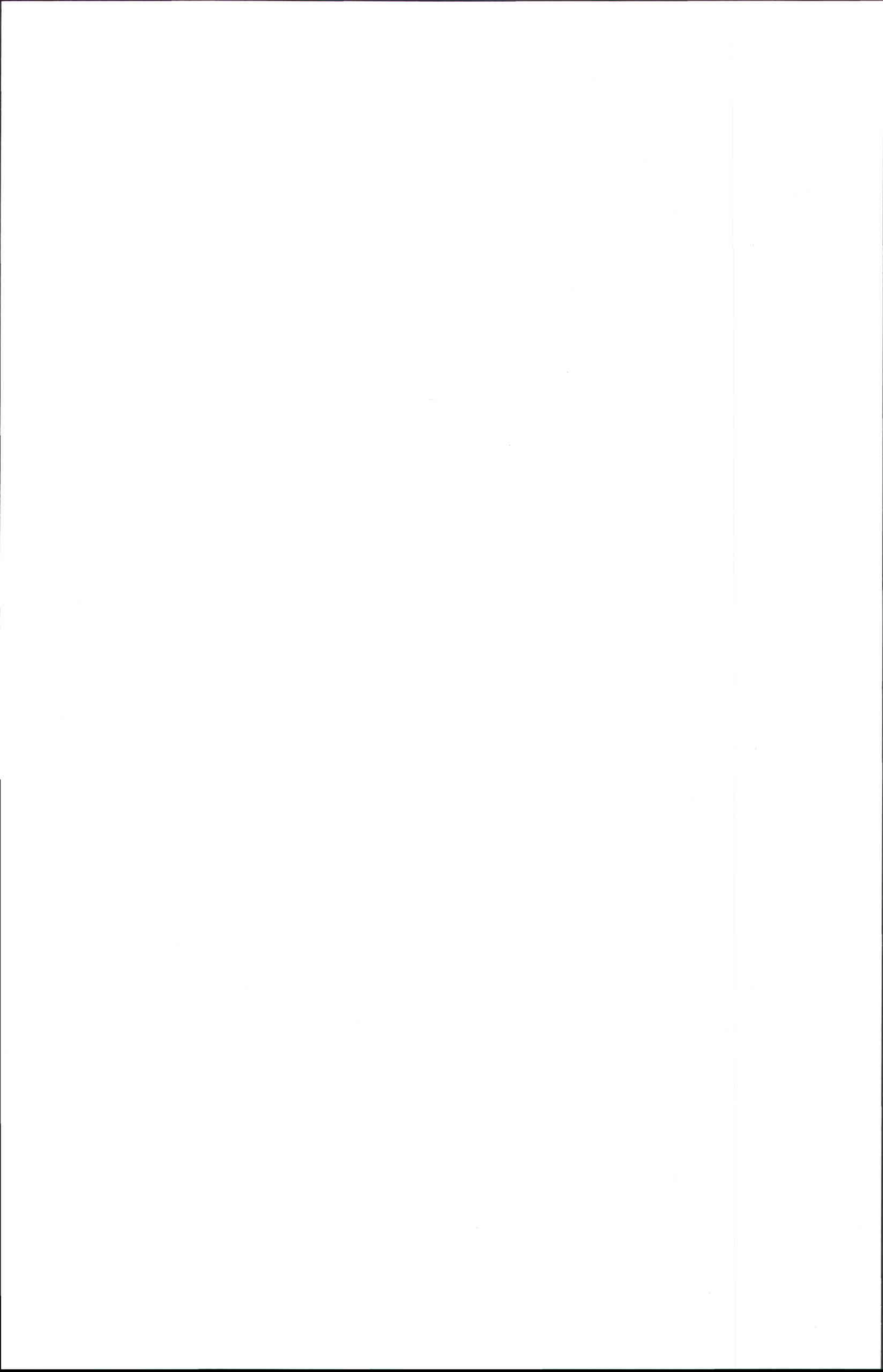


A) Vue de dessus d'une prise d'eau sous-fluviale composée de 5 cellules de captage



B) Coupe transversale schématique d'une prise d'eau horizontale sous-fluviale (parallèle à l'écoulement de la rivière)

Figure 3. 1: Représentation schématique des composantes d'une prise d'eau sous-fluviale



3.3 Nombre et dimensionnement des conduites crépinées

Une première étape dans le dimensionnement des crépines suggérée dans Sterrett (2007) est d'estimer la longueur des puits horizontaux par l'équation suivante.

$$L = \frac{0.366 Q \log\left(\frac{1.1p}{r}\right)}{0.25 K H} \quad (\text{Équation 3.1})$$

L : Longueur totale de crépine (m)

Q : Débit total de captage journalier ciblé (m³/j)

p : Profondeur d'installation de la crépine (m), typiquement 2 m

r : Rayon interne de la crépine (m), typiquement 150 mm pour une crépine de 300 mm de diamètre

K : Conductivité hydraulique verticale de l'assemblage des matériaux de captage (m/j), idéalement supérieure à 605 m/j

H : Hauteur d'eau disponible pour le captage. Il est recommandé d'utiliser le niveau d'eau de la rivière à l'étiage (m)

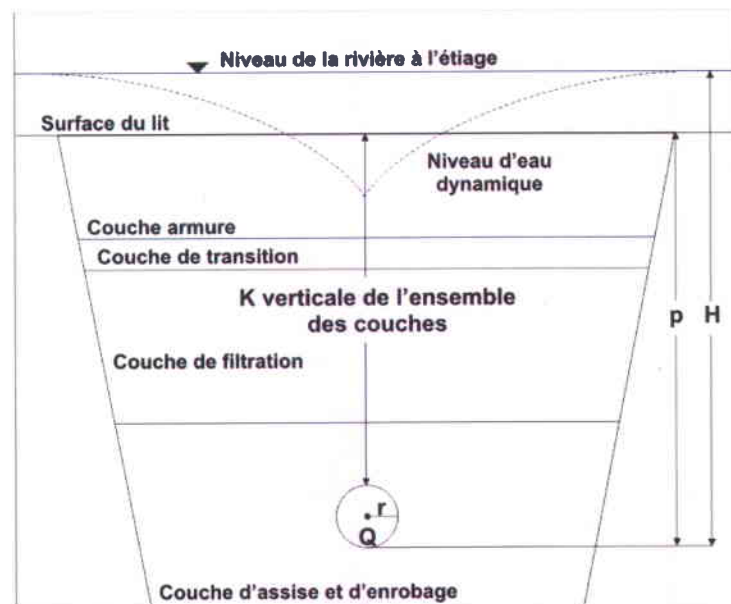


Figure 3. 2: Description des paramètres utilisés dans l'équation pour déterminer la longueur totale de crépine requise dans la conception d'une prise d'eau sous-fluviale

Avec le temps, une prise d'eau sous-fluviale peut perdre de la performance dû aux processus de colmatage. Alors, il est recommandé lors de la conception d'optimiser l'aire ouverte de la crépine, entre autre en multipliant par un facteur de sécurité de 2 la longueur totale de crépine obtenue de l'Équation 3.1 Sterrett (2007).

Le résultat de ce calcul s'avère très utile lorsqu'il est impossible de réaliser un modèle physique en laboratoire pour guider le dimensionnement d'une prise d'eau sous-fluviale à grande échelle. L'application de cette équation a été validée en laboratoire dans le cadre de la présente étude.

Sur la base des éléments de conception suivants :

- les dimensions de l'ouvrage en rivière autorisées;
- la longueur totale de crépine requise pour répondre au débit de captage journalier ciblé (Équation 3.1); et
- la longueur type d'une crépine, soit moins de 20 m (au-delà de cette longueur des problèmes hydrauliques, tels des pertes de charge linéaires importantes lors des rétrolavages à l'eau, peuvent survenir et limiter l'efficacité des opérations);

il est possible de déterminer la longueur individuelle des crépines qui composeront le système de captage sous-fluvial. Ensuite, il est essentiel de vérifier si la vitesse axiale d'écoulement dans chaque crépine sera inférieure à 0.9 m/s afin de limiter les pertes de charge linéaires. Pour ce faire, il faut diviser le débit total de captage journalier par le nombre de crépines défini à l'étape précédente et de calculer la vitesse axiale à l'aide de l'Équation 3.2.

$$V_{axiale} = \frac{1.16 \times 10^{-5} Q}{\pi r^2} \quad (\text{Équation 3.2})$$

V_{axiale} : Vitesse axiale d'écoulement (m/s)

Q : Débit de captage journalier par crépine (m³/j)

r : Rayon interne d'une crépine (m), typiquement 150 mm

Afin de maximiser l'aire ouverte des crépines tout en assurant la résistance en compression nécessaire contre la pression des terres, le matériel des crépines recommandé est l'acier inoxydable 314, pour le captage d'eau douce. Les ouvertures devraient être continues en forme de "v" dont la plus petite ouverture est située à l'extérieur de la crépine. Le choix de la taille des ouvertures ainsi que l'espacement entre celles-ci est documenté dans Sterrett (2007). La largeur des ouvertures devrait être déterminée sur le principe qu'aucune particule (0% passant) de la couche d'assise et d'enrobage ne peut pénétrer à l'intérieur de la crépine, donc inférieure au d_0 du gravier filtre. La taille de l'espacement entre les ouvertures d'une crépine doit être choisie pour maximiser la surface ouverte, typiquement plus de 40%. Cependant, une optimisation est requise par rapport à la résistance en compression de la crépine qui est fonction de la profondeur d'enfouissement. Une grande variété de modèle de crépine standard existe sur le marché et permette en général de rencontrer le critère optimal fixé pour l'aire ouverte.

Lors de la sélection de la taille et de l'espacement des ouvertures d'une crépine, une vérification au niveau de la vitesse d'entrée de l'eau dans les ouvertures est requise afin d'assurer qu'elle ne dépasse pas 0.03 m/s, ce qui favoriserait l'incrustation des ouvertures de la crépine par les particules de taille limite (Sterrett, 2007). Une perte d'aire ouverte serait probable dans ces conditions.

Tel que mentionné précédemment, les conduites crépinées sont typiquement installées à 2 m de profondeur dans les tranchées de captage. Afin de maximiser les opérations de captage par gravité, il est requis d'allouer un potentiel de dénivelé important entre le niveau de la rivière à l'étiage connu et celui de l'entrée des conduites collectrices des crépines dans le puits collecteur. Un dénivelé supérieur à 3.5 m est fortement suggéré.

3.4 Aménagement de la tranchée de captage

Lorsque le système de captage comporte plus d'une conduite crépinée, il est recommandé d'installer chaque crépine dans une tranchée individuelle de 2 à 3 m de largeur mesurée à la base qui sont séparées entre elles par un volume de matériel in situ moins perméable ou simplement des matériaux imperméables, par exemple des géomembranes ou des structures en béton. Cet élément de conception est essentiel pour maximiser la performance des opérations de rétrolavage en favorisant l'écoulement des fluides vers la surface et en minimisant les capacités des équipements requis. Toutefois, l'élévation des matériaux artificiels ne devrait pas dépasser celle de la couche de transition, pour que ces structures ne limitent pas le captage des écoulements hyporhéiques lors des étiages sévères ou ne rendent vulnérable le système à l'arrachement lors des crues. Dans une volonté d'optimiser le nombre d'entrées de conduite dans le puits collecteur, il est possible de jumeler une à trois crépines dans une tranchée de captage unique. La distance de séparation entre les conduites recommandée est de 2 à 3 m centre à centre.

L'aire totale de captage du système étant connue à cette étape, une vérification doit être effectuée sur la vitesse moyenne de captage qui sera générée par la prise d'eau sous-fluviale sur la base du débit total journalier fixé. La vitesse est calculée en divisant le débit de captage journalier par la surface effective du système. Une vitesse de captage moyenne située entre 117 m/j et 293 m/j favorisera un meilleur rendement à long terme. Lorsque la vitesse est inférieure à 117 m/j une déposition importante de sédiment peut s'effectuer à la surface de la prise d'eau sous-fluviale tandis qu'au-delà de 293 m/j, le processus de colmatage mécanique peut être accéléré (Sterrett, 2007).

3.5 Rétrolavage

Lorsque les effets du colmatage sont importants et que le rendement du système décroît rapidement, des opérations de rétrolavage sont requises pour nettoyer la tranchée et de retrouver la capacité de captage initiale sans colmatage du système. Dans le cadre de l'étude, deux modes opérationnels de rétrolavage ont été développés et sont basés sur les théories des filtres et des critères de conception proposés dans Sterrett (2007).

3.5.1 Rétrolavage à l'eau

Cette opération s'effectue par l'injection d'eau à contre-courant dans les crépines d'une section de captage à nettoyer. Le débit d'eau requis pour cette opération est déterminé à l'aide des paramètres suivants :

- la surface effective de captage à nettoyer; et
- la conductivité hydraulique moyenne des matériaux composant la couche de surface (protection ou filtration) la plus résistante à l'écoulement dû à sa granulométrie et aux processus de colmatage.

Afin de maximiser le nettoyage et de préserver la structure des matériaux de la tranchée de captage, le débit de rétrolavage utilisé doit permettre de générer des conditions de fluidisation uniquement dans la couche de surface qui est généralement la plus vulnérable aux processus de colmatage. La fluidisation peut être induite dans cette couche par un écoulement vertical d'eau des crépines vers la surface, dont le gradient hydraulique vertical est supérieur à 1. Le débit d'eau de rétrolavage est déterminé par l'Équation 3.3.

$$Q_{\text{rétro_eau}} = 3600(K i_v A) \quad (\text{Équation 3.3})$$

$Q_{\text{rétro_eau}}$: Débit de rétrolavage à l'eau (m^3/h)

i_v : Gradient hydraulique vertical de la couche à fluidiser, constante = 1 (limite)

A : Surface effective de captage à nettoyer (m^2) (longueur d'une crépine x largeur de la tranchée de captage ou longueur de la crépine x distance de séparation entre 2 crépines)

K : Conductivité hydraulique verticale moyenne (température de l'eau 8°C) de la couche de surface (protection ou filtration) (m/s)

Il est recommandé d'utiliser un facteur de sécurité de 1.5 sur le débit calculé de l'Équation 3.3 pour fixer la capacité totale des pompes servant aux opérations de rétrolavage à l'eau. Au point d'injection des crépines, la pression devrait être supérieure au poids de la colonne d'eau (pression d'élévation) additionnée de la pression d'écoulement requise dans le média. Afin d'accroître la flexibilité d'opération du rétrolavage à l'eau, l'utilisation de variateur de vitesse est suggérée sur le moteur des pompes.

Sterrett (1989) propose un débit de rétrolavage à l'eau surfacique de $24.5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$. Cette recommandation est inférieure aux débits suggérés pour cette opération dans les filtres rapides au sable, plus de $30 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ (Crittenden *et al.*, 2012). L'utilisation d'un facteur de sécurité de 1.5 sur le débit de rétrolavage à l'eau calculé de ces rapports surfaciques est toujours préconisée pour établir les capacités de pompe requises.

Afin d'assurer une distribution uniforme de l'eau sur la surface entière de captage en rétrolavage, il est nécessaire de limiter la longueur des conduites crépinées à moins de 20 m. Les vi-

tesses d'écoulement d'eau élevées dans les conduites crépinées induites lors de cette opération peuvent générer des pertes de charge linéaires significatives qui défavoriseraient la distribution uniforme de l'eau le long des crépines.

Typiquement, une prise d'eau de surface doit être aménagée en amont du système de captage sous-fluvial pour soutenir le débit d'eau requis aux opérations de rétrolavage à l'eau.

3.5.2 Rétrolavage à l'air

L'opération du rétrolavage à l'air peut s'effectuer seule ou combinée à l'injection d'eau à contre-courant dans les crépines. Sterrett (2007) suggère un débit d'air basé sur l'aire de captage à nettoyer, de $18.3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ à $36.6 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$. Cette proposition a été vérifiée lors d'essais sur un modèle physique de prise d'eau sous-fluviale en laboratoire ($27.5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$) ainsi que sur un système pleine grandeur au site de l'Ouvrage A de la Ville de Québec ($30 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$).

Pour les filtres rapides au sable, un débit d'air surfacique supérieur à $36 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ est suggéré (Crittenden *et al.*, 2012).

De ces travaux, il est recommandé d'utiliser un débit d'air surfacique de $36 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ et d'appliquer un facteur de sécurité de 1.5 afin d'établir la capacité du surpresseur à air. La pression d'injection devra combattre le poids de la colonne d'eau. Afin d'accroître la flexibilité d'opération du rétrolavage à l'air, l'utilisation d'un variateur de vitesse est suggérée sur le moteur du surpresseur d'air. Aussi, le moteur devrait supporter des arrêts-départs successifs pour pouvoir créer des écoulements pulsés dans la tranchée de captage à nettoyer et augmenter l'efficacité de l'opération.

Une tranchée de captage de 2 m à 3 m de largeur requiert 4 conduites d'injection d'air installées parallèlement aux crépines et équidistantes (entre 0.5 à 0.75 m centre à centre). La longueur des conduites perforées, le diamètre des trous et la profondeur d'installation doivent être similaires aux crépines. Le diamètre des conduites (typiquement 75 mm), le nombre de trous et leur espacement sont déterminés en fonction du débit d'air total à injecter et la profondeur d'installation des conduites (résistance en compression). Les pertes de charge doivent être minimisées pour assurer une distribution uniforme du fluide dans la tranchée de captage. À titre de référence, les conduites d'injection d'air du système de captage sous-fluvial de l'Ouvrage A de la Ville de Québec ($450 \text{ m}^3/\text{h}$ par conduite de 15 m de longueur) possèdent deux alignements de trous à 4h et 7h percés en quinconce 80 mm centre à centre.

Le matériel recommandé pour les conduites perforées est le polyéthylène haute densité (PEHD). Dans Sterrett (2007) l'utilisation de conduites microporeuses pour l'injection d'air est suggérée. Toutefois, la robustesse de ce produit n'a pas été confirmée sur une prise d'eau sous-fluviale existante au Québec.

3.5.3 Rétrolavage air-eau

Le rétrolavage combiné à l'air et à l'eau d'une prise d'eau sous-fluviale est opéré avec les équipements de rétrolavage décrits précédemment. Ce type de nettoyage a démontré son efficacité en laboratoire ainsi que sur des systèmes existants. Pour cette opération, le débit d'injection d'air reste inchangé à la valeur calculée par le rapport surfacique de 27.5 à 36 m³/h/m² de l'aire de captage à nettoyer. Toutefois, le débit de rétrolavage à l'eau doit être réduit, soit se situer entre 50% à 85% la valeur recommandée pour le rétrolavage à l'eau seulement ($Q_{\text{rétro_eau}}$). Il est approprié de débiter l'injection au débit d'eau le plus faible (50% du $Q_{\text{rétro_eau}}$) et de l'accroître progressivement en fonction de la performance de l'opération.

3.5.4 Mode d'opération du rétrolavage

Dans le cadre du programme de recherche sur les prises d'eau sous-fluviales plusieurs modes opérationnels du rétrolavage ont été testés. Dans ce rapport, deux procédures sont présentées, soient le rétrolavage court à l'air et un rétrolavage mixte à l'air et à l'eau. Il est possible et souhaitable que ces opérations puissent être effectuées en mode automatique à l'aide de vannes motorisées. Cette condition permet d'alléger les opérations manuelles multiples à réaliser (ouverture et fermeture de vannes) pour le nettoyage d'une prise d'eau sous-fluviale comportant parfois plusieurs cellules de captage.

Rétrolavage court à l'air

Ce rétrolavage peut être conduit lorsqu'il y a une diminution du rendement de 50 % (basé sur la conductivité hydraulique équivalente du système – Chapitre 6) et que la turbidité de l'eau de la rivière est supérieure à 1 NTU. Cette opération de courte durée permettra de prolonger la séquence de captage sans avoir à procéder à une opération de rétrolavage mixte plus coûteuse en temps et en manipulations.

Procédure :

- 3 injections au débit d'air fixé (27.5 à 36 m³/h/m² de surface à nettoyer)
- Durée de 3 minutes par injection
- Attendre 1 à 2 minutes environ entre les arrêts-départs du surpresseur d'air.

Rétrolavage mixte à l'air et à l'eau

Lorsque le colmatage de la prise d'eau sous-fluviale induit une diminution du rendement (conductivité hydraulique de la tranchée de captage inférieure à 7x10⁻⁴ m/s (Chapitre 6)), ou que des conditions de désaturation (pressions hydrauliques négatives) sont mesurées dans la tranchée, une procédure de rétrolavage mixte à l'air et à l'eau doit être conduite. Cette opération permet généralement de faire recouvrer au système sa capacité initiale de captage sans colmatage.

Procédure :

- 5 minutes d'injection d'air au débit fixé (27.5 à $36 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ de surface à nettoyer)
- 4 fois 3 minutes d'injection simultanée d'air au débit fixé (27.5 à $36 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ de surface à nettoyer) et d'eau 50% à 85 % du $Q_{\text{rétro_eau}}$ (Équation 3.3 ou 24.5 à $30 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$)
- 10 minutes d'injection d'eau au débit du $Q_{\text{rétro_eau}}$ (Équation 3.3 ou 24.5 à $30 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$)
- Attendre 1 à 2 minutes environ entre les arrêts-départs des équipements

3.6 Instrumentation

Le suivi du rendement d'une prise d'eau sous-fluviale en fonction des conditions d'exploitation et la gestion des opérations s'effectuent à l'aide de divers instruments situés au poste de pompage et de points de mesure en rivière, tels que montrés dans les deux schémas conceptuels de la Figure 3.3. La modélisation physique d'une prise d'eau sous-fluviale en laboratoire et les suivis détaillés des opérations de deux prises d'eau existantes ont permis de définir les instruments essentiels à la gestion des opérations d'un système de captage sous-fluvial ainsi qu'à leur emplacement spécifique. Les instruments requis sont regroupés selon les classes suivantes :

- Mesure de niveau d'eau (H (m d'eau)) : sonde à niveau d'eau;
- Mesure de la pression (P (kPa)): transmetteur de pression;
- Mesure de la pression atmosphérique (P_{atm} (kPa)): sonde barométrique;
- Mesure de la température de l'eau de la rivière (T (°C)) : thermistance;
- Mesure de débit (Q (m^3/h)) : débitmètre;
- Mesure de la turbidité de l'eau captée (Turb (NTU)) : turbidimètre en ligne.

Le traitement des données d'opération enregistrées en continu constitue la base de la gestion des opérations d'une prise d'eau sous-fluviale. Au chapitre 6, le plan de gestion des opérations de la prise d'eau sous-fluviale des îlets de la Ville de Québec est présenté.

3.6.1 Mesure de niveau d'eau

Les mesures de niveau d'eau (charge hydraulique (H (m))) dans le système de captage sous-fluvial sont essentielles entre autres pour calculer le rendement de production d'eau, suivre les pertes de charge occasionnées par les processus de colmatage ainsi que de surveiller les gradients hydrauliques verticaux lors des opérations de rétrolavage à l'eau pour qu'ils ne surpassent les critères de fluidisation. Les schémas A et B de la Figure 3.3 montrent les diverses mesures de niveau d'eau associées au suivi des opérations.

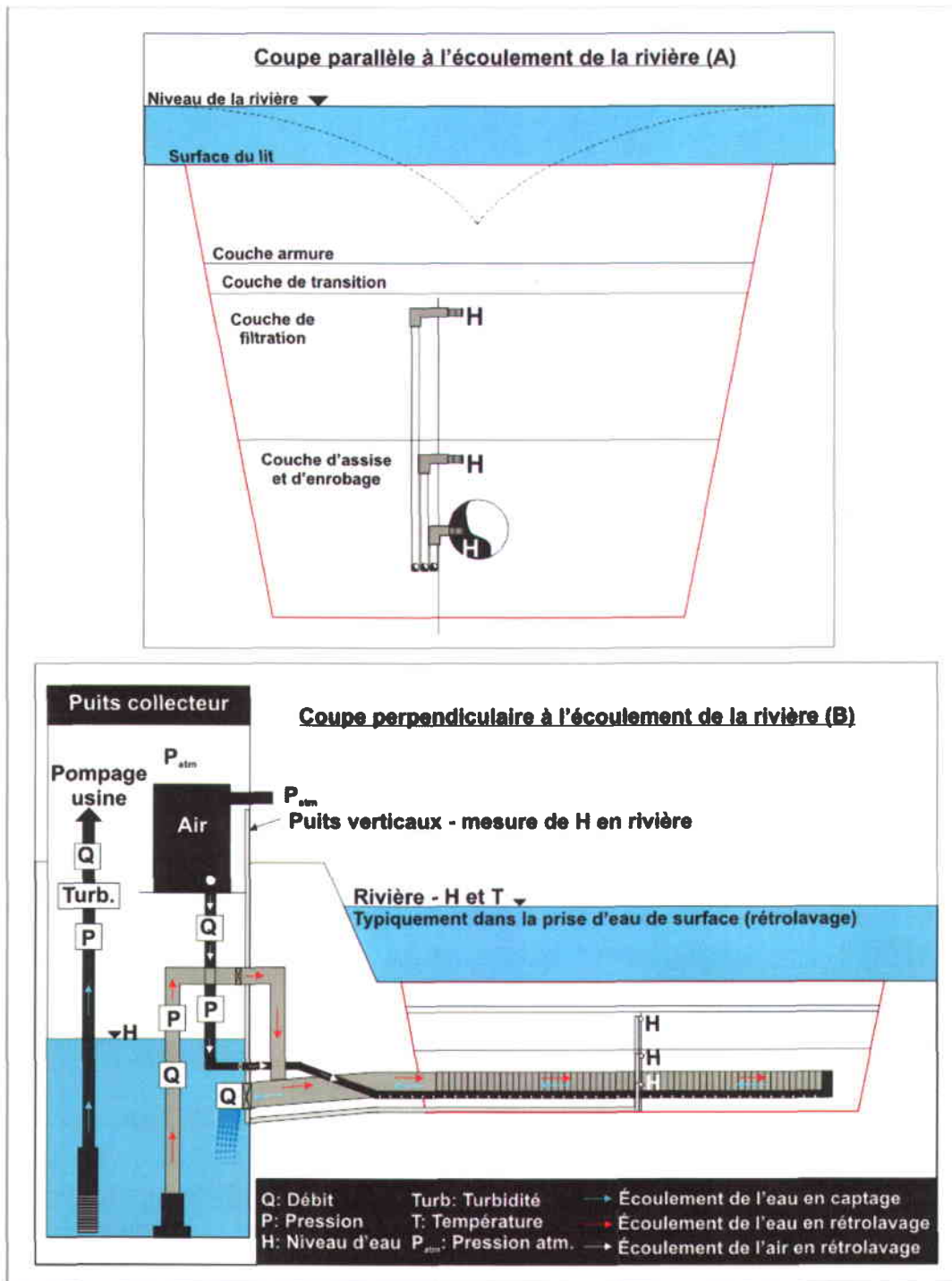


Figure 3. 3: Schémas conceptuels de l'instrumentation requise pour le suivi des opérations d'une prise d'eau sous-fluviale

Une prise d'eau sous-fluviale devrait comporter les mesures de niveau d'eau montrées à la Figure 3.3.

- Niveau d'eau de la rivière (et de la température), sonde installée typiquement dans la prise d'eau de surface servant aux opérations de rétrolavage à l'eau.
- Niveau d'eau dans le puits collecteur.
- Dans la tranchée de captage au centre et au droit d'une conduite, selon les schémas de la Figure 3.3, il est recommandé de mesurer le niveau d'eau dans la couche de filtration (près de l'interface avec la couche de transition ou de protection), dans la couche d'assise et d'enrobage (près de l'interface avec la couche de filtration) et dans la crépine. Pour les systèmes comportant 4 conduites crépinées et plus, il est suggéré de suivre les charges hydrauliques des crépines positionnées en amont et en aval. Si le système est composé de 9 crépines et plus, le suivi des charges hydrauliques de 3 crépines est recommandé, soit les crépines installées en amont, au centre et à l'aval du système. Les points de mesure des charges hydrauliques dans la tranchée de captage s'effectuent à l'aide de petites conduites perforées (ouvertures similaires aux crépines) positionnées aux niveaux décrits précédemment. Celles-ci sont jointes à des tuyaux de PEHD de 38 à 50 mm de diamètre qui sont menés sans point haut en berge à une élévation inférieure au radier des conduites crépinées. En berge, au poste de pompage, les tuyaux sont orientés à la verticale jusqu'à une élévation équivalente au niveau en crue de la rivière additionné de la profondeur d'installation des crépines, tels des puits de petit diamètre dans lesquels les sondes à niveau d'eau sont placées. Ces tuyaux doivent être en équilibre avec la pression atmosphérique, alors il est suggéré de perforer les tuyaux de 4 trous de 5 mm de diamètre en croix sous la limite des bouchons qui retiennent les fils électriques des sondes.

3.6.2 *Mesure de pression*

Plusieurs mesures de pression d'eau et d'air (P (kPa)) sont requises pour suivre le fonctionnement d'une prise d'eau sous-fluviale. Celles-ci permettent principalement d'identifier l'état des opérations en captage ou en rétrolavage, de suivre le rendement des équipements, tels que les pompes et le surpresseur d'air, et d'indiquer si des pertes de charge significatives se développent dans les réseaux de conduites associés au système. Le schéma B de la Figure 3.3 montre les mesures de pression essentielles au suivi des opérations.

- Pression d'eau à la sortie des pompes de captage
- Pression d'eau à la sortie des pompes de rétrolavage
- Pression d'air à la sortie du surpresseur

L'automatisation des opérations d'une prise d'eau sous-fluviale peut nécessiter une quantité plus importante de mesures de pression.

3.6.3 *Mesure de la pression atmosphérique*

La pression atmosphérique (P_{atm} (kPa)) doit être mesurée à l'intérieur et à l'extérieur du poste de pompage afin de corriger les charges hydrauliques mesurées dans les puits verticaux installés dans le poste de pompage.

- Pression atmosphérique extérieure.
- Pression atmosphérique à l'intérieur du bâtiment.

3.6.4 *Mesure de la température de l'eau de la rivière*

La température de l'eau de la rivière d'implantation (T (°C)) est une donnée indispensable pour évaluer le rendement en captage et en rétrolavage d'une prise d'eau sous-fluviale (Chapitre 6). La température de l'eau de la rivière peut être mesurée par une thermistance montée sur la sonde à niveau d'eau de la rivière.

3.6.5 *Mesure du débit*

Diverses mesures de débit (Q (m³/h)) sont requises pour suivre le rendement d'une prise d'eau sous-fluviale et gérer les opérations de captage et de rétrolavage (Chapitre 6). La Figure 3.3 désigne les mesures de débit utiles.

- Débit d'eau à la sortie des pompes de captage.
- Débit d'eau à la sortie des pompes de rétrolavage.
- Débit d'air à la sortie du surpresseur.
- Débit de captage d'une conduite collectrice (jointe aux crépines) mesuré à son entrée dans le puits collecteur. Pour les systèmes comportant 4 conduites crépinées et plus, il est recommandé de suivre les débits de captage des crépines positionnées en amont et en aval. Si le système est composé de 9 crépines et plus, le suivi des débits de captage de 3 crépines est suggéré, soit les crépines installées en amont, au centre et à l'aval du système.

3.6.6 *Mesure de la turbidité de l'eau captée*

La turbidité de l'eau captée est une mesure indirecte et parfois directe des variations de la charge particulaire contenue dans l'eau de la rivière d'implantation d'une prise d'eau sous-fluviale. Cette donnée d'opération est utile au suivi puisqu'elle est un bon indicateur des périodes où les processus de colmatage mécaniques sont les plus importants. Aussi, il est recommandé de ne pas opérer des rétrolavages à l'eau lorsque la turbidité de l'eau captée est supérieure à 2 NTU. Au schéma B de la Figure 3.3, il est proposé d'effectuer la mesure en continu à la sortie des pompes de captage.

La documentation des conceptions de systèmes de captage sous-fluviaux existants et les suivis de leurs opérations ont permis de confirmer la nécessité de mettre en place les instruments de

mesure décrits précédemment pour permettre une gestion adéquate des opérations (Chapitres 4 et 6).

4 Documentation des conceptions de prises d'eau sous-fluviales construites avant 2012 et suivis des opérations

Dans le cadre du programme de recherche sur les prises d'eau sous-fluviales, trois systèmes construits avant 2012 ont fait l'objet d'études qui avaient comme objectifs communs de :

- documenter les éléments principaux de conception;
- suivre le rendement et les opérations de captage et de rétrolavage; et
- recommander un mode opérationnel efficace.

Les systèmes de captage sous-fluviaux concernés par ces études sont localisés dans les villes de :

- Beauré (Racine *et al.*, 2014a);
- Trois-Pistoles; et
- Québec, au site de pompage des Îlets (Racine *et al.*, 2014b).

Les éléments principaux de conception, les suivis d'opération et les points forts et faibles de chaque système sont rapportés dans les prochaines sections. Le plan opérationnel de la prise d'eau sous-fluviale des îlets de la Ville de Québec est discuté au Chapitre 6, tandis que le mode opérationnel du système de captage sous-fluvial de la Ville de Beauré est présenté à l'Annexe 1.

4.1 Prise d'eau sous-fluviale de la Ville de Beauré

4.1.1 Composantes principales de la prise d'eau sous-fluviale – Ville de Beauré

La prise d'eau horizontale sous-fluviale de la Ville de Beauré a été construite en 2007 pour répondre à une demande journalière moyenne d'eau potable de 6 000 m³/j. L'ouvrage de captage a été aménagé dans la rivière Ste-Anne en aval du barrage de l'ancienne usine d'Abitibi-Consolidated. Le dimensionnement de la prise d'eau sous-fluviale permet un niveau de sécurité d'approvisionnement de deux fois la demande journalière, soit une production de 12 000 m³/j. En 2013, la demande moyenne journalière d'eau brute pour l'usine se situe à 2 500 m³/j (Tableau 4.1).

Tableau 4. 1: Débits de captage – conception et production – Ville de Beauré

Débit	Valeur (m ³ /j)
Débit de conception	12 000
Débit nominal de l'usine	6 000
Débit journalier moyen	2 500

Le système de captage sous-fluvial est un agencement de 2 conduites crépinées en acier inoxydable de 22 m de long et 300 mm de diamètre installées horizontalement dans une tranchée de captage aménagée dans le lit de la rivière Ste-Anne, parallèlement au sens de l'écoulement, tel que montré à la Figure 4.1. Un schéma conceptuel est montré à la Figure 4.2. La surface occupée par la tranchée d'excavation, 260 m², est plus importante que la surface active du captage établie à 180 m². Les données décrivant la géométrie et les matériaux de la tranchée de captage sont présentées au Tableau 4.2.

Tableau 4. 2: Géométrie de la tranchée de captage et description des matériaux de remblai – Ville de Beaupré

Géométrie de la tranchée de captage	Valeur
Largeur (mesure parallèle à la longueur des crépines)	26 m
Longueur (mesure perpendiculaire à la longueur des crépines)	10 m
Aire efficace de captage (basée sur les limites physiques des diffuseurs d'air)	180 m ²
Fonction et élévation des matériaux	Granulométrie
Couche d'assise et d'enrobage (11.16 m – 11.96 m)	Cailloux de 100 mm de diamètre – uniforme
Couche intermédiaire (11.96 m - 13.40 m)	Cailloux de 100 à 200 mm de diamètre
Gabion (13.4 m – 13.7 m)	Cailloux de 80 à 140 mm de diamètre

Les matériaux composant la tranchée de captage sont relativement uniformes et la couche intermédiaire dominante par son épaisseur présente une granulométrie s'étalant de 100 à 200 mm de diamètre. Le matériel d'assise et d'enrobage composé de cailloux de 100 mm de diamètre est uniforme.

Dans la tranchée de captage, les crépines ont été installées à 2.2 m de profondeur (radier) et sont espacées de 5 m centre à centre à 0° d'inclinaison. Les crépines captent majoritairement l'eau de la rivière Sainte-Anne qui transite dans les matériaux de remblai décrits précédemment. Les fentes des crépines possèdent une largeur de 5.1 mm. Les conduites crépinées sont reliées par leur centre à une conduite collectrice de 500 mm de diamètre qui amène de façon gravitaire l'eau au puits de pompage de l'usine selon une pente de 1% et à une élévation de 10.25 m. La base de puits d'eau brute est à 9.25 m d'élévation et le trop-plein à 21.175 m. Les informations liées aux conduites crépinées et au puits d'eau brute sont présentées au Tableau 4.3. La Figure 4.2 montre un schéma conceptuel de la prise d'eau sous-fluviale perpendiculaire au sens de l'écoulement.

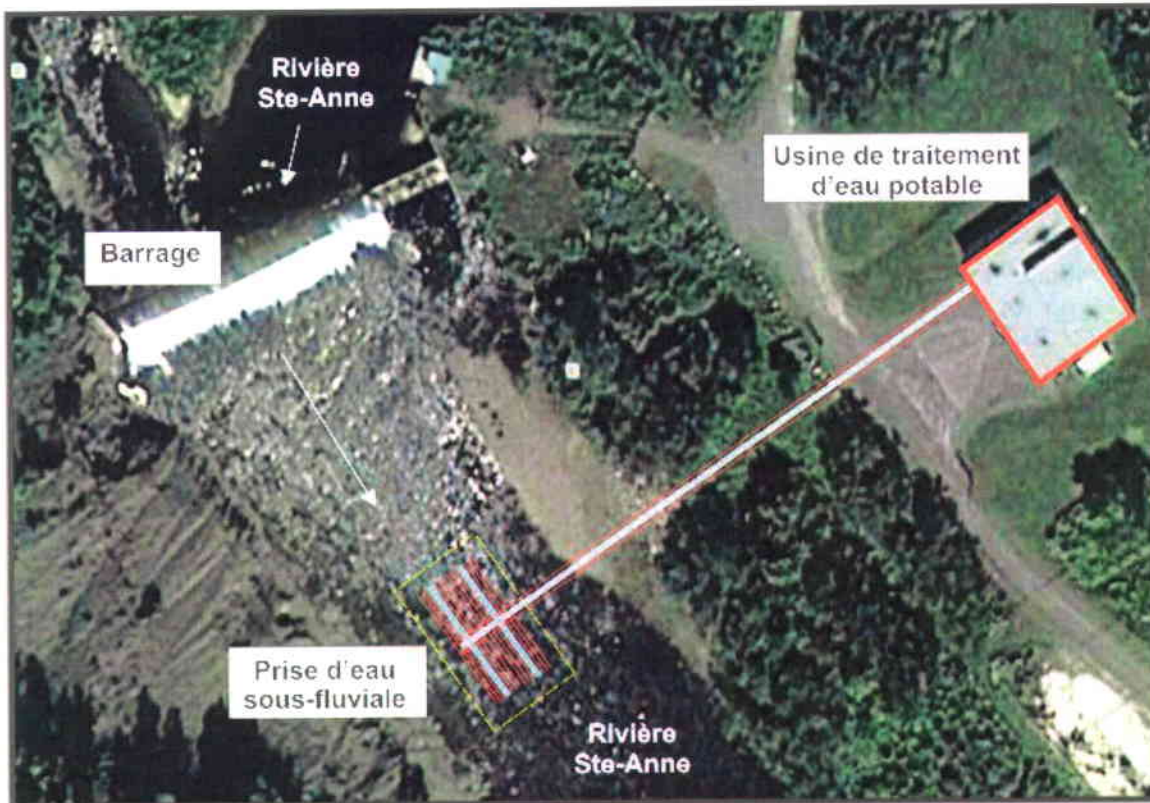


Figure 4. 1: Site de la prise d'eau sous-fluviale de la Ville de Beaupré

Tableau 4. 3: Description des conduites crépinées et du puits d'eau brute – Ville de Beaupré

Paramètre	Valeur
Crépines	
Nombre	2
Longueur crépinée	22 m
Diamètre	0.3 m
Largeur des ouvertures	5.1 mm
Élévation du radier	11.46 m
Inclinaison	0°
Puits d'eau brute	
Élévation du radier de la conduite collectrice - intrant	10.25 m
Élévation de la base du puits	9.25 m
Élévation du trop-plein du puits	21.17 m

Le système de captage est pourvu d'équipements pour effectuer des opérations de rétrolavage à l'eau, à l'air et une combinaison des deux fluides. Lors des rétrolavages à l'eau, les 2 pompes d'alimentation de l'usine injectent à contre-courant dans les crépines un débit d'eau pouvant atteindre au maximum 445 m³/h. Afin de soutenir le volume d'eau nécessaire au nettoyage, un réservoir d'eau non-chlorée de 135 m³ est disponible et relié de façon gravitaire au puits d'eau brute. Lors des opérations de rétrolavage à l'air, le soufflante peut injecter jusqu'à 5097 m³/h d'air dans les crépines ou dans les séries de diffuseurs.

L'injection simultanée des deux fluides peut être opérée par les équipements en place selon deux procédures :

- Injection d'eau dans les crépines et injection d'air dans les diffuseurs d'air, ou
- Injection d'eau et d'air dans les crépines.

Les informations liées aux équipements de rétrolavage de la prise d'eau sous-fluviale sont indiquées au Tableau 4.4.

4.1.2 Instrumentation de la prise d'eau sous-fluviale – Ville de Beaupré

L'usine d'eau potable de la ville de Beaupré comporte plusieurs instruments de mesure qui permettent de suivre les opérations de la prise d'eau sous-fluviale en temps réel et d'en évaluer sa performance, soit

- une sonde à niveau d'eau dans le puits d'eau brute;
- un débitmètre à la sortie des pompes d'eau brute; et
- un turbidimètre en ligne à la sortie des pompes d'eau brute.

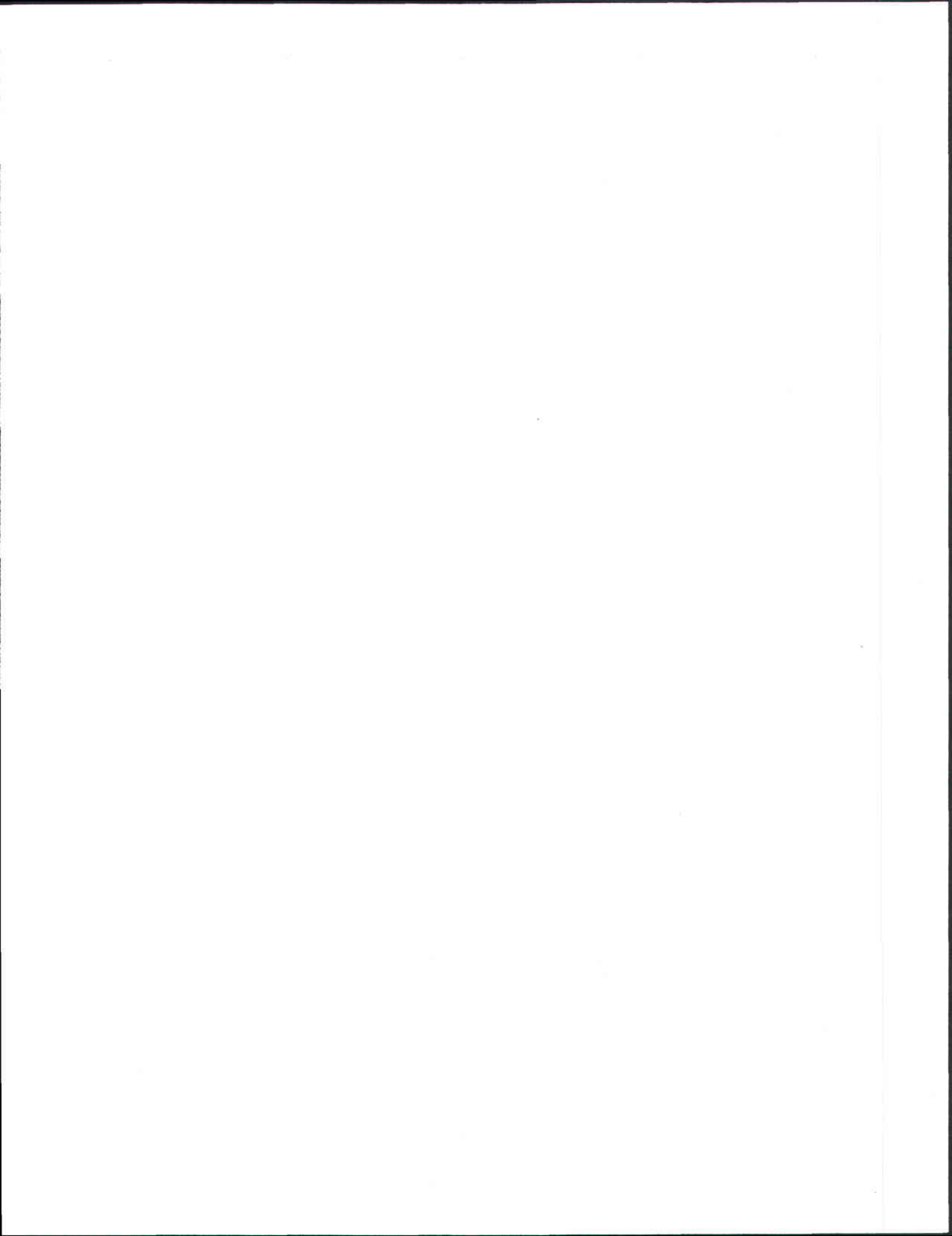
Les données journalières enregistrées en continu par ces instruments sont traitées pour montrer les variations dans le temps de la performance de captage du système selon différents contextes de production, étiages sévères, crues automnales, hivernales et printanières. Les descriptions des instruments de mesure et des données recueillies de la prise d'eau sous-fluviale de Beaupré sont présentées au Tableau 4.5.

Tableau 4. 4: Dispositif et équipements de rétrolavage de la prise d'eau sous-fluviale – Ville de Beupré

Paramètre et descriptif	Valeur
Rétrolavage à l'eau – injection dans les crépines	
Nombre de pompe	2
Capacité par pompe	222,5 m ³ /h
Volume du réservoir d'eau non-chlorée	135 m ³
Hauteur maximale d'eau dans le puits d'eau brute	11.92 m
Durée – limitée par le volume d'eau disponible dans le puits d'eau brute	10 à 15 minutes
Rétrolavage à l'air	
Soufflante – capacité	5097 m ³ /h
Types d'injection	Une ou l'autre des deux options suivantes : <ul style="list-style-type: none"> - Injection dans les crépines - Injection dans les groupes de diffuseurs 1 ou 2 à la fois
Nombre de diffuseurs	12 au total - par crépine : 6 diffuseurs espacés de 590 mm centre à centre
Diamètre des diffuseurs	75 mm
Diamètre des ouvertures des diffuseurs	6 mm
Espacement entre les ouvertures	100 mm centre à centre
Élévation du radier des diffuseurs	Environ 11.85 m
Durée du nettoyage à l'air	Illimitée

Tableau 4. 5: Descriptif des instruments de mesure suivis et des données d'opération associées – Ville de Beupré

Instrument de mesure	Données analysées
Sonde à niveau d'eau dans le puits d'eau brute	<ul style="list-style-type: none"> - En arrêt d'opération : indique le niveau de la rivière - En opération de captage : indique le niveau d'eau affecté par le pompage dans le puits d'eau brute - En opération de rétrolavage : indique le niveau d'eau maintenu ou variable dans le puits d'eau brute
Débitmètre à la sortie des pompes (alimentation usine)	<ul style="list-style-type: none"> - En opération de captage : indique le débit d'eau prélevé dans le puits d'eau brute
Turbidimètre en ligne à la sortie des pompes (alimentation usine)	<ul style="list-style-type: none"> - En opération de captage : indique la turbidité de l'eau prélevée dans le puits d'eau brute. Indicateur d'évènement générant du colmatage.



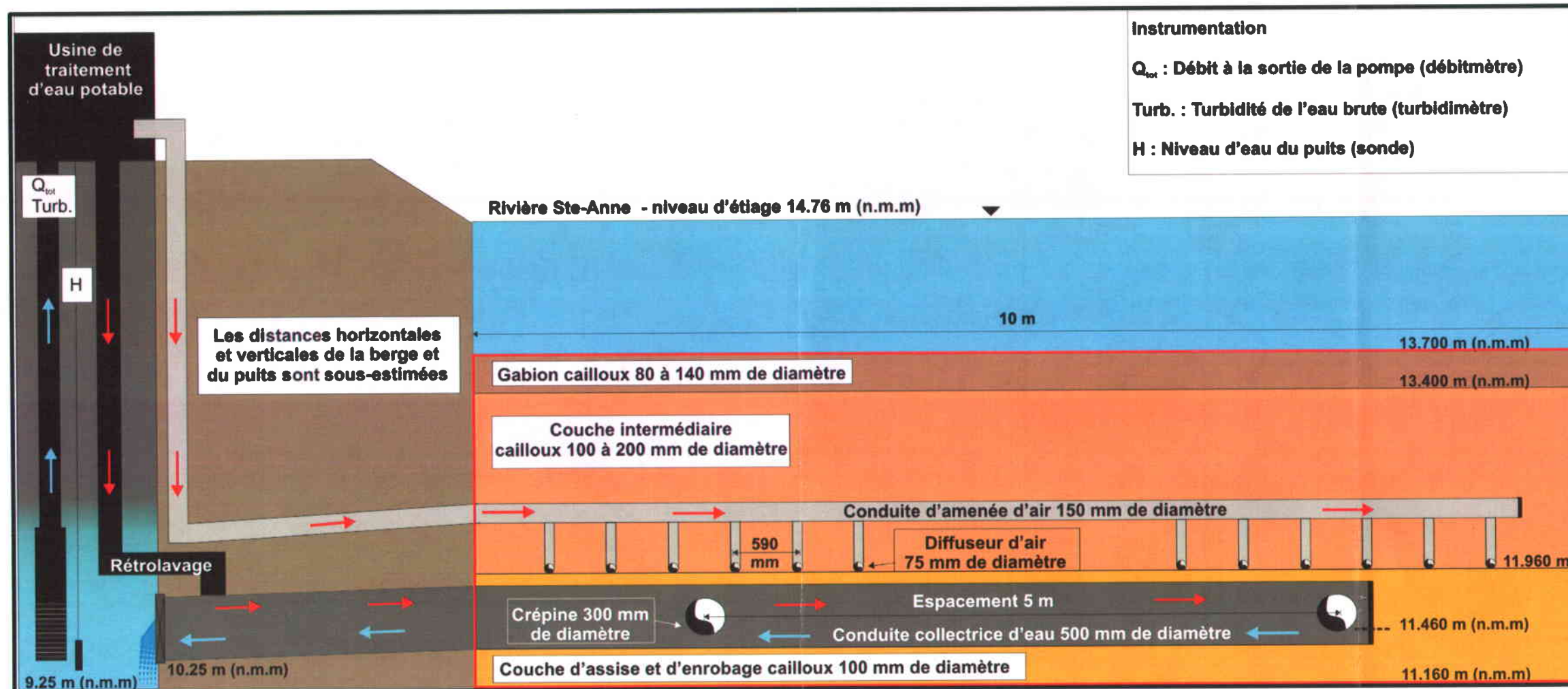


Figure 4. 2: Schéma conceptuel de la prise d'eau sous-fluviale de la Ville de Beaupré



4.1.3 Suivi des données d'opération journalière – Ville de Beaugré

Les données d'opération de la prise d'eau sous-fluviale de la Ville de Beaugré et leurs interprétations sont présentées en fichier numérique à l'Annexe 2. Le suivi couvre la période s'étalant d'octobre 2009 à septembre 2013.

4.1.4 Points forts et points faibles de la conception du système de captage sous-fluvial de la Ville de Beaugré

Basé sur les informations disponibles de la conception du système de captage ainsi que sur l'interprétation des données d'opération, il est possible d'établir les points forts et faibles du système qui ont un impact sur son rendement à court, moyen et long termes.

Points forts de la conception – Ville de Beaugré

- La composition de la tranchée de captage, soit majoritairement des cailloux de plus de 100 mm de diamètre, est robuste contre les phénomènes d'érosion et d'arrachement qui peuvent survenir selon les conditions hydrodynamiques du cours d'eau.
- La conductivité hydraulique initiale élevée des matériaux de la tranchée de captage composés de cailloux, telle que rapportée dans Freeze et Cherry (1979) soit plus de 1×10^{-3} m/s, confère au système un rendement initial élevé.
- Le surpresseur d'air, les conduites de distribution ainsi que le nombre et le dimensionnement des diffuseurs d'air dans la tranchée de captage répondent aux critères de conception proposés dans Sterrett (2007), dont entre autre un débit de rétrolavage à l'air surfacique situé entre 18,3 et 36,6 m³/h/m² de surface à nettoyer. L'observation visuelle du rétrolavage à l'air permet de confirmer la distribution uniforme du fluide lors de cette opération.

Points faibles de la conception – Ville de Beaugré

- Le grand volume de vide contenu dans la structure de cailloux composant la tranchée de captage est vulnérable au colmatage mécanique produit par la déposition en profondeur dans la tranchée et les crépines de sédiments organiques et inorganiques transportés par la rivière.
- La largeur des ouvertures des crépines de 5.1 mm permet la pénétration du gravier fin et des particules de taille inférieure (sable, silt, argile, matières organiques) dans les crépines. Une déposition permanente des fractions grossières de sable et gravier dans les crépines pourrait causer une diminution du rendement à long terme nuisant aux opérations de captage (pertes de charge) et de rétrolavage à l'eau (distribution).
- Le surdimensionnement important du système, soit une conception basée sur un débit de production de 12 000 m³/j par rapport à une demande journalière moyenne de 2 500 m³/j, induit des vitesses d'écoulement faibles dans les crépines et la conduite d'aménée (collectrice), favorisant ainsi la sédimentation du sable et gravier à l'intérieur des conduites.

- Plusieurs instruments essentiels au suivi des opérations de captage et de rétrolavage sont manquants, tels une sonde à niveau et de température de l'eau de la rivière au site, un débitmètre sur la conduite collectrice pour mesurer le débit de captage réel du système, un débitmètre à la sortie de la pompe pour mesurer le débit de rétrolavage à l'eau, ainsi que des sondes et des points de mesure de la charge hydraulique dans la tranchée de captage et dans les crépines.
- La capacité de rétrolavage à l'eau de la prise d'eau sous-fluviale, $2.5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$, est insuffisante par rapport à la surface de captage à nettoyer (Sterrett, 2007). Par conséquent, la distribution de l'eau est inadéquate, les vitesses d'écoulement dans le média sont faibles, et s'effectuent préférentiellement dans la crépine positionnée la plus près de l'usine. Le débit du rétrolavage à l'eau devrait se situer entre 24.5 à $30 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ de surface à nettoyer ou selon le $Q_{\text{rétro_eau}}$ calculé de l'Équation 3.3, tel que discuté à la section 3.5.1.

4.2 Prise d'eau sous-fluviale de la Ville de Trois-Pistoles

La prise d'eau sous-fluviale de la ville de Trois-Pistoles, aménagée dans la rivière du même nom en 2006, doit répondre à une demande en eau journalière de $2000 \text{ m}^3/\text{j}$. La conception de ce système présente plusieurs similitudes à celui de la ville de Beaupré à l'exception qu'il est composé d'une seule conduite crépinée. Il est complétement d'une prise d'eau de surface en aval. Dû au fait que la ville a privilégié de s'alimenter principalement par la prise d'eau de surface et que le système sous-fluvial est très peu instrumenté, le suivi des opérations est peu détaillé. De ce fait, il a été décidé de ne pas documenter dans ce rapport les composantes et les opérations de ce système.

4.3 Prise d'eau sous-fluviale des Îlets de la Ville de Québec

4.3.1 Composantes principales de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets – Ville de Québec

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, dont la demande journalière est de $35\,000 \text{ m}^3/\text{j}$. La Figure 4.3 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 4.4. 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 4.6.

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 4.3). 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 4.3). 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 4.3). L'ensemble de ces informations relatives aux conduites crépinées et au puits collecteur est présenté au Tableau 4.7.

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 4.4.

Tableau 4. 6: Géométrie de la tranchée de captage et description des matériaux de remblai – des îlets

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 est conduite. 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 4.4.

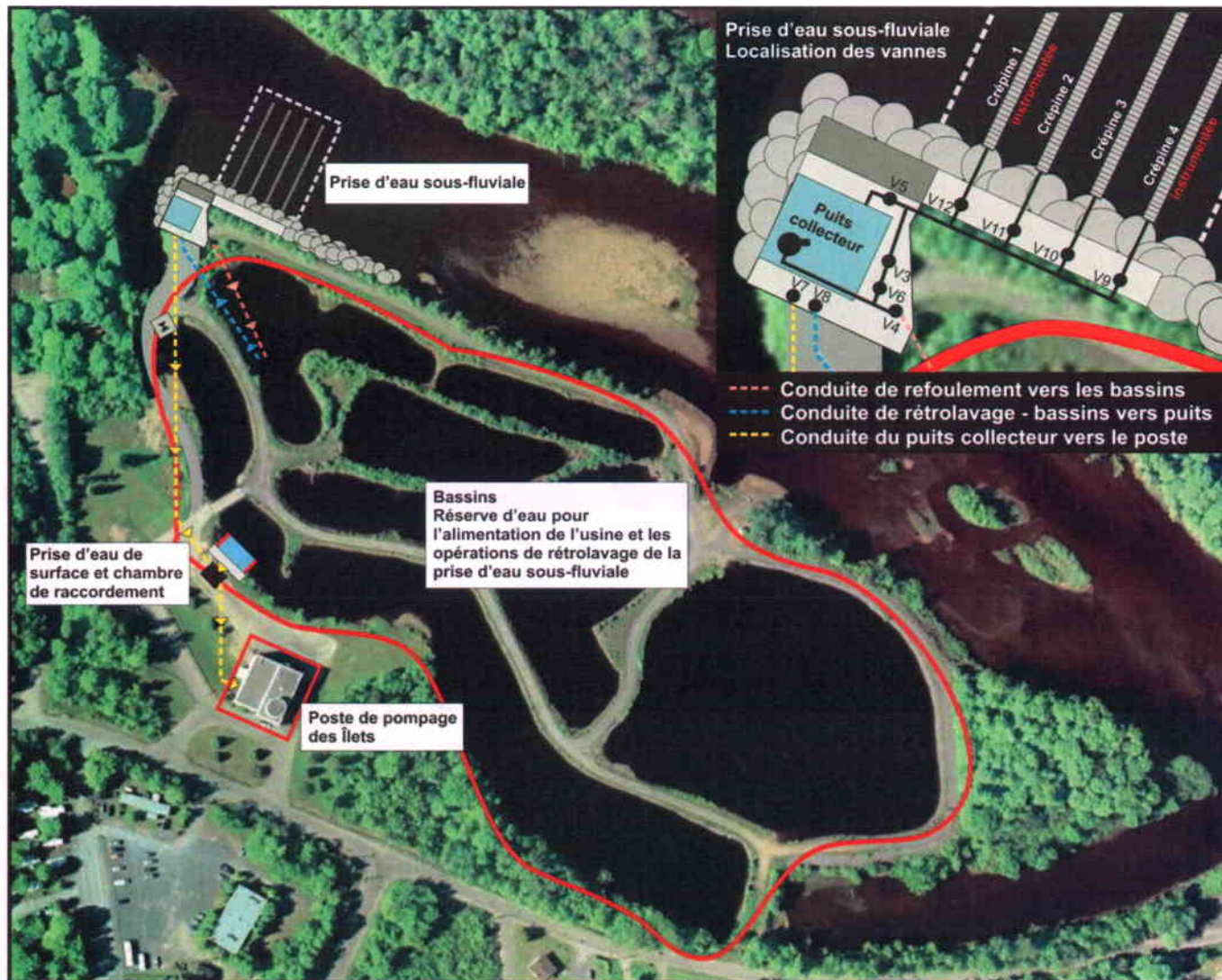
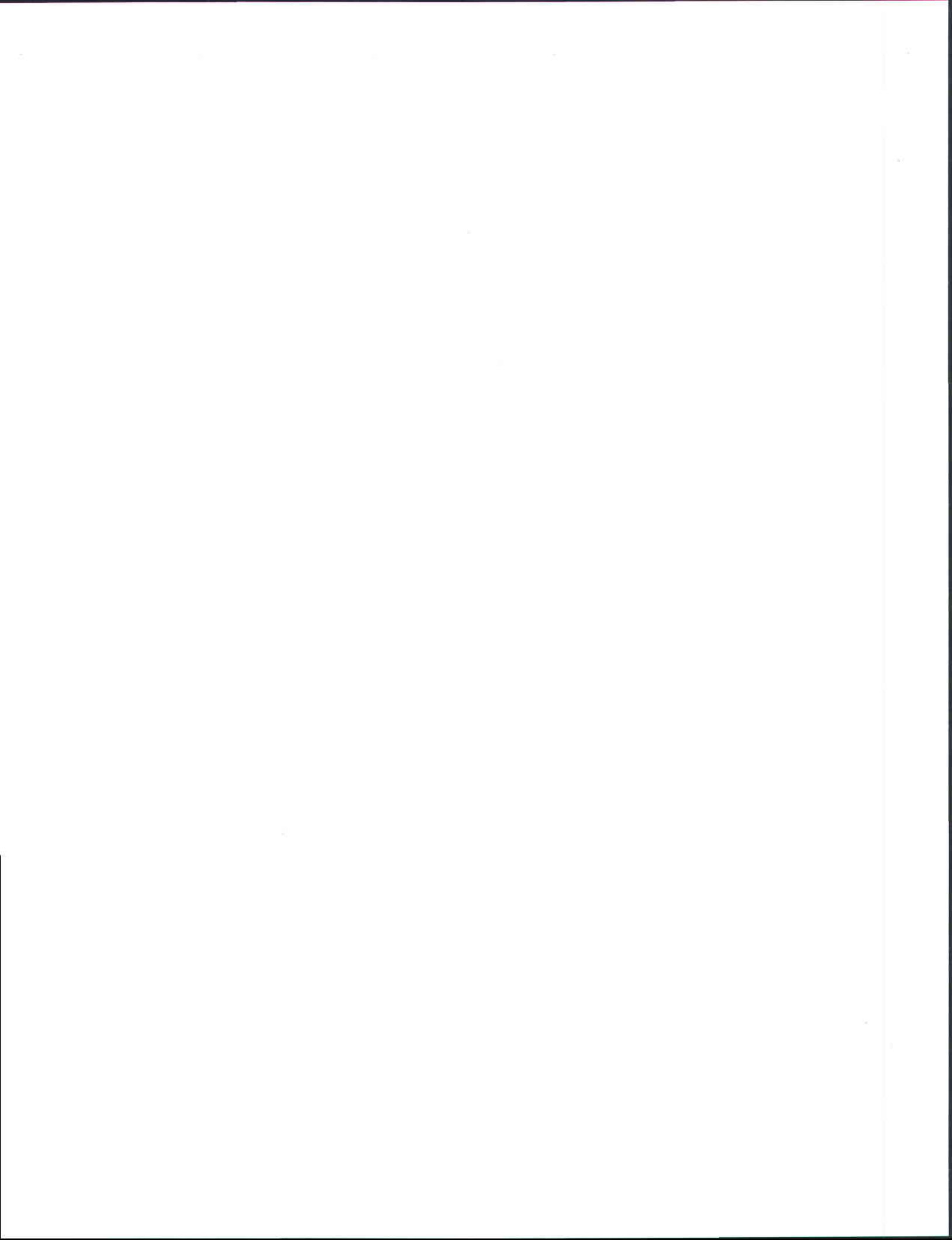


Figure 4. 3: Vue de dessus du poste de pompage des Îlets de la Ville de Québec et des ouvrages de captage associés



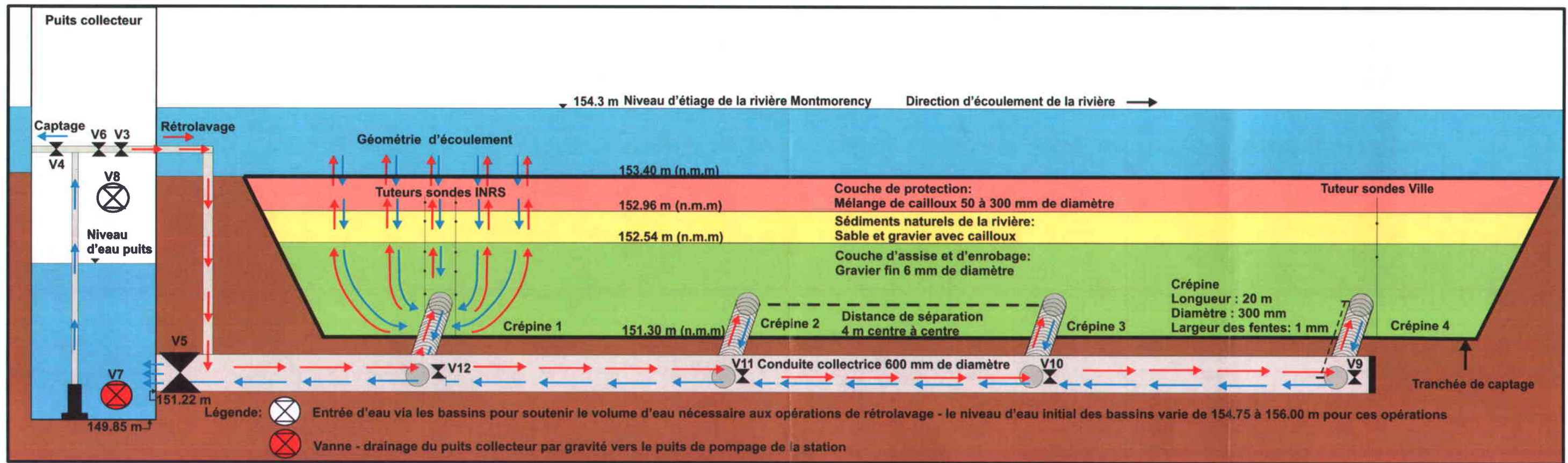


Figure 4. 4: Modèle conceptuel de la prise d'eau sous-fluviale des îlets de la Ville de Québec



Tableau 4. 7: Description des conduites crépinées et du puits collecteur de la prise d'eau sous-fluviale des îlets

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

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, 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 4.8 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 Figures 4.3 et 4.4 et résumés aux Tableaux 4.9 et 4.10.

Tableau 4. 8: 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. 9: Description des vannes manuelles de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets

Description des vannes
<ul style="list-style-type: none"> • 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 4. 10: 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 Chapitre 6)

4.3.2 Instrumentation de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets – Ville de Québec

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 4.5.

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 4.11).

Le mode opérationnel de la prise d'eau sous-fluviale ainsi que le suivi de la performance de captage sont présentés dans le guide d'opération de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets au Chapitre 6.

Tableau 4. 11: Descriptif des instruments de mesure requis pour effectuer le suivi des opérations de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets

Instrument 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 $z = 152.825$ 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

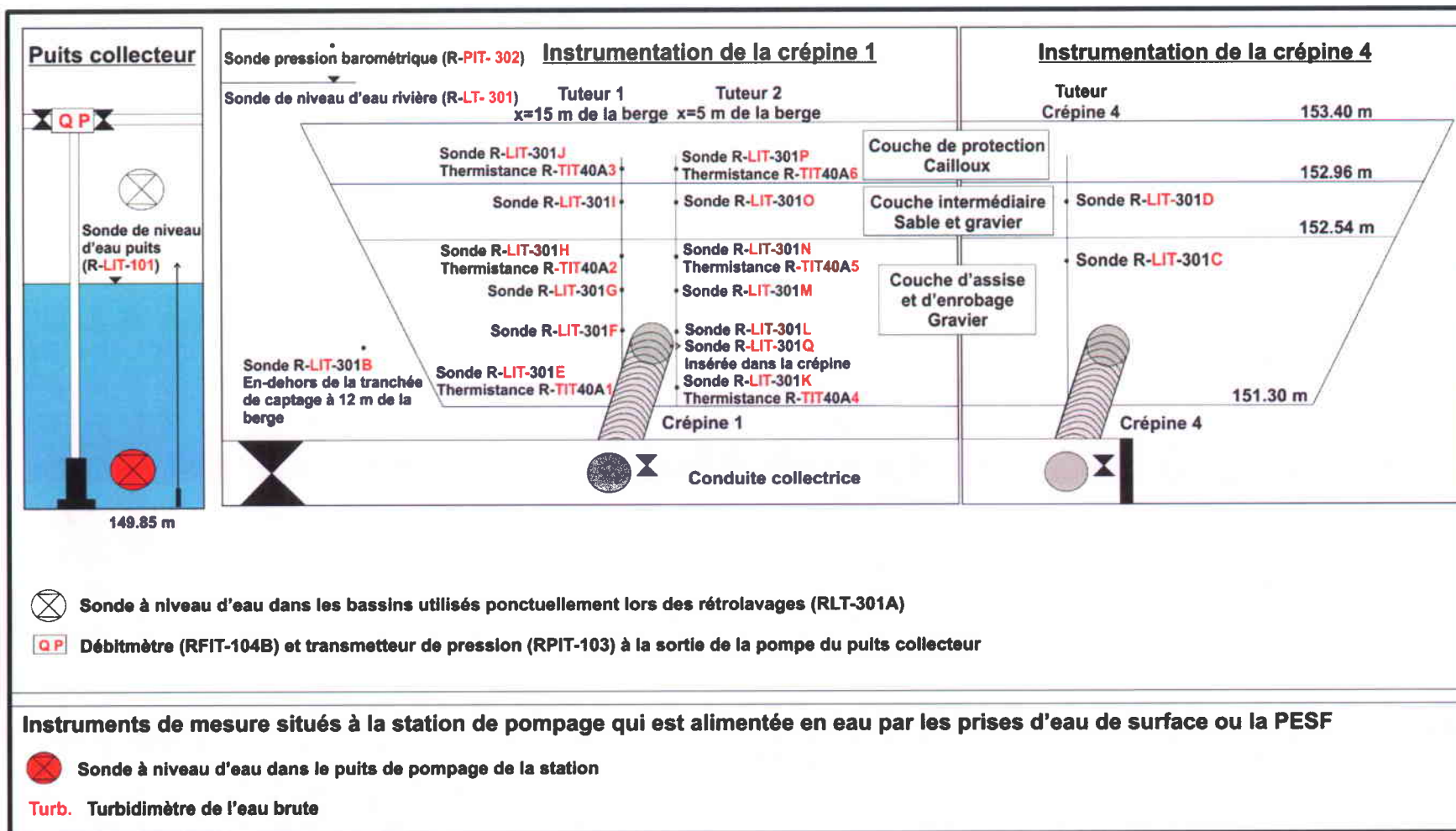


Figure 4. 5: Plan schématique des instruments de mesure associés à la prise d'eau sous-fluviale des Îlets

4.3.3 Suivi des données d'opération journalière – Ville de Québec (système des Îlets)

Les données d'opération de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets de la Ville de Québec et leurs interprétations sont présentées en fichier numérique à l'Annexe 2. Le suivi couvre la période s'étalant de janvier 2012 à juillet 2014.

4.3.4 Points forts et points faibles de la conception du système de captage sous-fluvial des Îlets de la Ville de Québec

Basé sur les informations disponibles de la conception du système de captage ainsi que sur l'interprétation des données d'opération, il est possible d'établir les points forts et faibles du système qui ont un impact sur son rendement à court, moyen et long termes.

Points forts de la conception – Ville de Québec (système des Îlets) :

- La tranchée de captage est constituée d'un assemblage de matériaux sélectionnés de grande conductivité hydraulique. Les granulométries des matériaux de la couche d'assise et d'enrobage et de filtration permettent d'agir comme un filtre et de retenir les particules en surface de la tranchée de captage plutôt qu'en profondeur. Cet action a pour effet de faciliter les opérations de rétrolavage et d'en accroître leur efficacité.
- La couche de protection à la surface de la tranchée de captage présente une épaisseur et une granulométrie représentatives de la couche armure de la rivière. Ces matériaux devraient être stables par rapport aux conditions hydrodynamiques variables du cours d'eau.
- L'instrumentation de la prise d'eau sous-fluviale est appropriée pour suivre et gérer les opérations de captage et de rétrolavage du système.

Points faibles de la conception – Ville de Québec (système des Îlets):

- La couche de protection composée de cailloux de 50 à 300 mm de diamètre comporte des vides qui sont comblés par des sédiments organiques et inorganiques de tailles variables transportés par la rivière. Ce colmatage mécanique pourrait favoriser des écoulements préférentiels et nuire à la bonne distribution de l'eau lors des opérations de rétrolavage, ce qui diminuerait la performance de captage du système à moyen et long termes.
- Les crépines de la prise d'eau sous-fluviale ont été installées dans une tranchée de captage unique. Lors des rétrolavages à l'eau, aucune barrière physique n'est présente entre les crépines pour contraindre latéralement l'écoulement de l'eau à se diriger vers la surface ciblée pour le nettoyage. Ce problème peut être remédié en créant des barrières hydrauliques latérales induites par l'injection d'eau dans 3 crépines simultanément, et ainsi concentrer l'écoulement de l'eau dans l'aire de captage de la crépine centrale. Toutefois, cette opération peut accroître significativement le débit d'eau requis pour atteindre des résultats de nettoyage satisfaisants.

- La capacité de rétrolavage à l'eau du système est insuffisante pour produire un nettoyage efficace du matériel de captage selon la méthode susmentionnée qui implique la création de barrières hydrauliques.
- La prise d'eau sous-fluviale ne possède aucun équipement pour effectuer des opérations de rétrolavage à l'air. Des opérations de rétrolavage combinant l'injection simultanée d'air et d'eau sont recommandées pour maximiser l'efficacité du nettoyage sans que la fluidisation de la tranchée de captage soit requise.

Le plan de gestion des opérations d'une prise d'eau sous-fluviale présenté au Chapitre 6 a été élaboré sur la base du suivi de la performance et des opérations de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets de la Ville de Québec.

Conjointement aux activités du programme de recherche, l'INRS a été impliquée en septembre 2011 dans un projet de conception d'une seconde prise d'eau sous-fluviale à la Ville de Québec au poste de pompage de l'Ouvrage A. En laboratoire, un modèle physique de prise d'eau sous-fluviale a été élaboré à partir des principes de conception présentés au Chapitre 3 qui ont tenu compte des caractéristiques du site d'implantation de cet ouvrage et des exigences de la ville en matière de conception, dont répondre à une demande en eau journalière de 56 000 m³/j. Les résultats des essais de captage et de rétrolavage conduits sur le modèle physique ont guidé la conception, l'instrumentation et les modes opérationnels du système pleine grandeur.

5 Modélisations physiques d'éléments de conception, d'instrumentation et d'opération des prises d'eau sous-fluviales

Les modélisations physiques des composantes d'une prise d'eau sous-fluviale ont été réalisées dans un bac de 2.8 m de hauteur, 1 m de largeur et 0.5 m de longueur montré à la Figure 5.1. Les principes de conception qui ont été validés lors des essais sont :

- l'espacement entre les crépines (paramètre définissant l'aire de captage). Il est à noter que le modèle physique représente les écoulements d'une moitié de tranchée de captage sur le sens de la largeur;
- le choix des matériaux, l'épaisseur des couches et leur assemblage;
- le dimensionnement d'une crépine et ses caractéristiques. Une demi-crépine a été utilisée lors des essais (simulations des écoulements produits dans une demi-tranchée de captage)
- les équipements de rétrolavage à l'eau et les capacités d'injection;
- les équipements de rétrolavage à l'air, le dimensionnement des conduites perforées et les capacités d'injection; et
- l'instrumentation à mettre en place pour suivre les opérations en captage et en rétrolavage.

Afin de guider la conception et l'opération d'une prise d'eau sous-fluviale basées sur les caractéristiques d'un site d'implantation réel, soit la rivière Montmorency au poste de pompage de l'Ouvrage A de la Ville de Québec, plusieurs forages ont été conduits dans le lit du cours d'eau pour confirmer la nature des matériaux en place, leur épaisseur et leur continuité spatiale. Aussi une étude hydrodynamique a permis d'identifier le niveau d'étiage critique de la rivière au site.

L'agencement des matériaux testés par le modèle physique tient compte des contextes géologiques de mise en place suivants :

- Lit de rivière présentant une couche armure d'environ 50 cm d'épaisseur, granulométrie variable de cailloux;
- Sous la couche armure, des dépôts alluvionnaires de sable et gravier avec cailloux et trace de silt et de particules de la taille des argiles ont une épaisseur variable de plus de 2 m sur la surface de l'ouvrage projetée;
- Le niveau d'étiage critique de la rivière au site d'implantation est de 0.3 m.

5.1 Composantes du modèle physique

Le modèle physique est constitué de quatre couches de matériaux : la couche d'assise et d'enrobage à la base du bac est recouverte successivement d'une couche de filtration, d'une couche de transition et d'une couche de protection en surface.

Couche d'assise et d'enrobage, épaisseur de 80 cm : Un matériel contenant peu de particules de la taille des silts et des argiles (fines) est utilisé pour l'assise et l'enrobage. Afin de limiter la contamination par le matériel naturel en place, soit des alluvions de granulométrie étalée allant de sables fins à graviers grossiers, un gravier fin (6.35 mm de diamètre) net et uniforme (Cu de 2) a été choisi comme matériel d'assise et d'enrobage. Ce choix est guidé par la théorie des graviers filtrants utilisés dans la construction de puits horizontaux (Sterrett, 2007).

Couche de filtration, épaisseur de 85 cm : La couche de filtration est constituée d'un mélange de sable et gravier de 0.3 à 10 mm de diamètre, dont le $d_{50} = 3$ mm. La granulométrie peu étalée de ce matériel, Cu de 3, permet à celui-ci d'être très perméable tout en permettant une filtration de l'eau transitant dans cette couche. La granulométrie respecte les critères de filtre pour minimiser la contamination du gravier fin net de la couche d'assise et d'enrobage (Sterrett, 2007).

Couche de transition, épaisseur de 15 cm : La couche filtre de transition a comme objectif de retenir la couche de filtration en place lors des opérations de rétrolavage et de soutenir la couche de protection. Cette couche est composée d'un gravier sableux de 0.3 à 20 mm de diamètre dont le $d_{50} = 7$ mm. La présence de sable dans ce matériel permet également de filtrer l'eau en opération de captage.

Couche armure, épaisseur de 30 cm : Cette couche a comme objectif de reproduire la surface naturelle du lit de rivière où sera implantée la prise d'eau sous-fluviale. Le matériel est constitué d'un mélange de cailloux de 50 à 300 mm de diamètre dont les vides sont comblés de sables et de graviers (matériel de la couche de filtration). La présence de sable dans ce matériel permet également de filtrer l'eau en opération de captage.

La demi-crépine, dont le radier est à 30 cm d'élévation à partir de la base du bac d'essais, possède un diamètre de 30 cm (15 cm en largeur). Deux tuyaux connectés à l'intérieur de la crépine permettent de lire la pression lors des opérations de captage et de rétrolavage à l'eau. Lors des rétrolavages à l'air, ces tuyaux sont connectés, par un jeu de valves, à un compresseur à air qui injecte l'air dans la crépine. Les ouvertures de la crépine possèdent 1 mm de largeur. Les opérations de rétrolavage à l'eau s'effectuent par la conduite principale servant également au captage.

À la hauteur du radier de la crépine dans le matériel d'assise et d'enrobage, deux tuyaux d'injection d'air ont été disposés parallèlement à la crépine, comme il est montré à la Figure 5.1. Le tuyau espacé de 17 cm à partir du centre de la crépine est un diffuseur à micro-bulles. Un second tuyau perforé, similaire à ceux insérés dans la crépine, a été placé à 50 cm à partir du centre de la crépine.

Les instruments de mesure servant au suivi des opérations de drainage, de rétrolavage et des processus de colmatage dans le bac d'essais sont montrés à la Figure 5.1. Des mesures de pression sont prises manuellement à huit niveaux d'élévation, dont cinq sont enregistrées en continu par un système d'acquisition de données, soit un CR10X de Campbell Scientific. Les débits à la sortie de la conduite de captage (en drainage) et à l'entrée (en rétrolavage) sont mesurés par un débitmètre et sont également enregistrés en continu. La turbidité de l'eau injectée dans le bac d'essais est mesurée et enregistrée en continu par un turbidimètre en ligne. Aussi, plusieurs données de turbidité à la sortie de la conduite de captage sont mesurées ponctuellement avec un turbidimètre de table, afin de suivre dans le temps l'évolution de la filtration de l'eau en fonction du colmatage du modèle physique. Enfin, lors des rétrolavages à l'air, la pression d'air à la sortie des compresseurs et le débit d'air sont mesurés.

5.2 Description des essais et résultats

Plusieurs essais de captage et de rétrolavage ont été réalisés afin de définir les paramètres d'opération optimaux du modèle physique de prise d'eau sous-fluviale.

Lors des essais en captage, une eau turbide de 4 à 9 NTU circule à la surface du système de captage pour reproduire les conditions favorables en rivière à l'accélération du processus de colmatage mécanique. L'eau turbide de 4 à 9 NTU est générée en mélangeant des particules fines à l'eau de l'aqueduc de Valcartier. Une hauteur d'eau de 30 cm est maintenue constante à la surface de la couche de protection, simulant les conditions d'étiage du cours d'eau modélisé. Lors-

que le colmatage du matériel de captage induit une diminution de la conductivité hydraulique de plus de 50 % de la valeur initiale, diverses opérations de rétrolavage à l'air, à l'eau et mixte ont été testées afin d'évaluer leur performance à faire recouvrir au système sa conductivité hydraulique initiale sans colmatage.

Les essais ont permis d'établir la capacité de captage nominale de la conception du modèle physique testé. La capacité nominale a été calculée à partir de la perméabilité intrinsèque sans colmatage de la tranchée de captage simulée dans le bac d'essais, soit $1.6 \times 10^{-9} \text{ m}^2$. De plus, les essais de rétrolavage ont permis de définir des conditions de rétrolavage performantes :

- Rétrolavage à l'air d'une durée de 5 minutes – débit d'injection : $27.5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2_{\text{surf}}$
- Rétrolavage combiné air-eau d'une durée de 15 minutes – débit d'air : $27.5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2_{\text{surf}}$ et débit d'eau : $11.5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2_{\text{surf}}$
- Rétrolavage à l'eau d'une durée de 15 minutes – débit d'injection : $27.5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2_{\text{surf}}$

Lors de ces essais, il a été démontré que la réalisation d'un rétrolavage à l'eau ($27.5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2_{\text{surf}}$), d'une durée de 15 minutes, 24 heures suivant le premier nettoyage, permet d'expulser l'excédent d'air capturé dans les pores du matériel de captage et accroît ainsi l'efficacité du nettoyage pour atteindre de nouveau la capacité de captage initiale du système.

Depuis la mise en route de la prise d'eau sous-fluviale de l'Ouvrage A, la procédure de rétrolavage élaborée du modèle physique en laboratoire a été conduite à plusieurs reprises. Bien que son efficacité a été démontrée et qu'elle permette au système de recouvrer son rendement initial sans colmatage, quelques ajustements aux débits d'injection des fluides ont été nécessaires afin d'améliorer leur distribution sur la surface de captage à nettoyer. Aussi, il a été observé que l'injection simultanée air-eau est plus performante lorsqu'elle est pulsée, par exemple 4 injections air-eau d'une durée de 3 minutes chacune. Enfin, les durées des étapes de rétrolavage ont été réduites. Les essais sur le système réel ont permis d'élaborer les modes d'opération de rétrolavage présentés au Chapitre 3, soient le rétrolavage court à l'air et le rétrolavage mixte à l'air et à l'eau (Racine *et al.*, 2014c).

Les modélisations physiques d'un concept de prise d'eau sous-fluviale en laboratoire ont permis d'identifier les instruments clé pour effectuer des suivis efficaces des opérations de ces systèmes. Au chapitre 6, un guide d'opération d'une prise d'eau sous-fluviale basé sur l'analyse des données recueillies des instruments de mesure est présenté. L'utilisation des balises d'opération établies dans le guide assurera l'intégrité physique du système et un bon rendement à long terme.

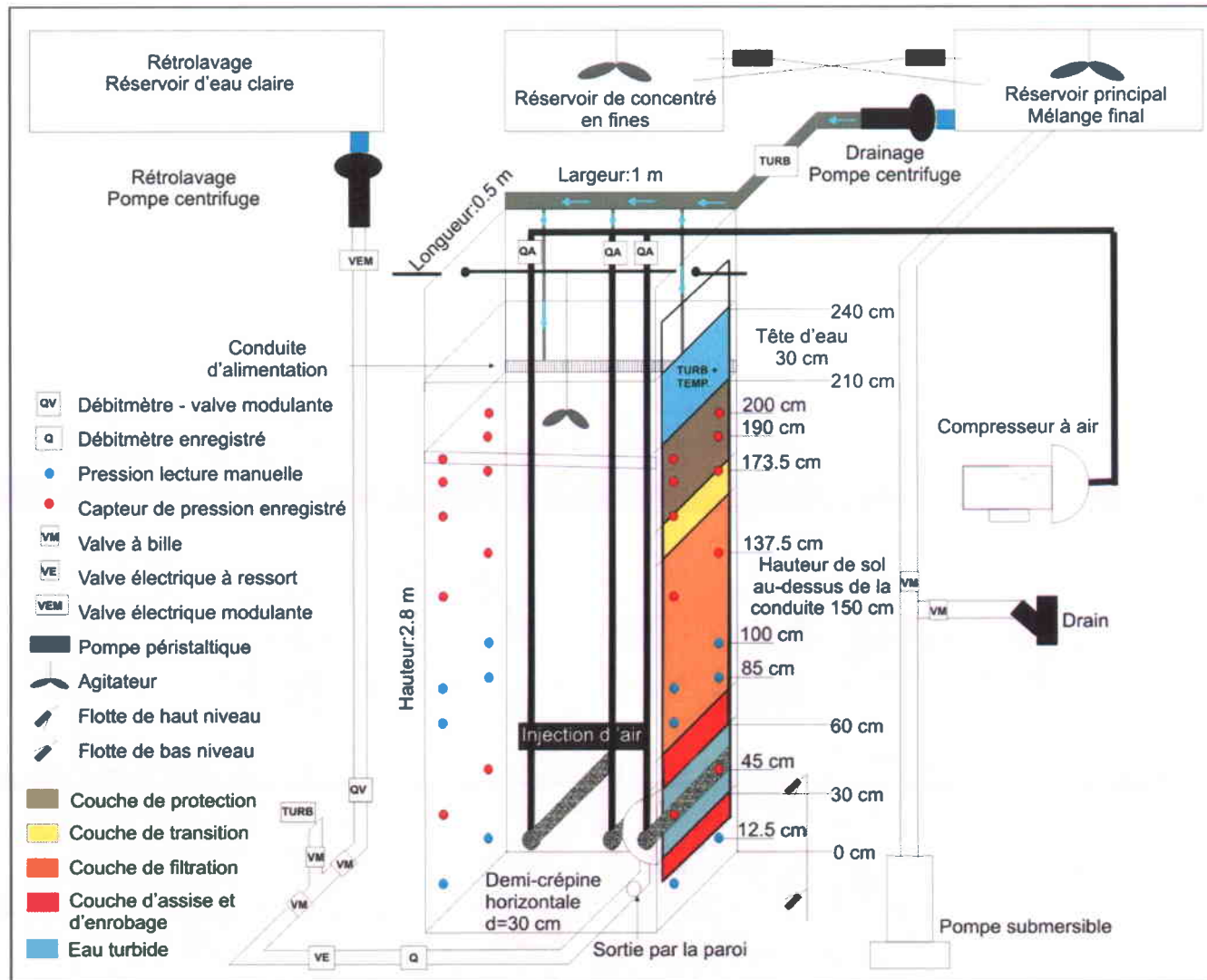


Figure 5. 1: Composantes d'un modèle physique de prise d'eau sous-fluviale et équipements associés aux essais

6 Guide d'opération de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets de la Ville de Québec

Au Chapitre 4, les composantes de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets, l'instrumentation, les données d'opération journalière ainsi que les points forts et faibles de la conception ont été présentés. Dans ce chapitre, il est décrit comment les données provenant de l'instrumentation peuvent guider les opérations de la prise d'eau sous-fluviale et permettre le suivi du rendement en continu. Les sections 6.1 et 6.2 sont la suite des informations présentées à la section 4.3.

6.1 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 6.1.5) 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.

6.1.1 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 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.

6.1.2 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 6.1.

6.1.3 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 6.1.

6.1.4 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 6.1. 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)

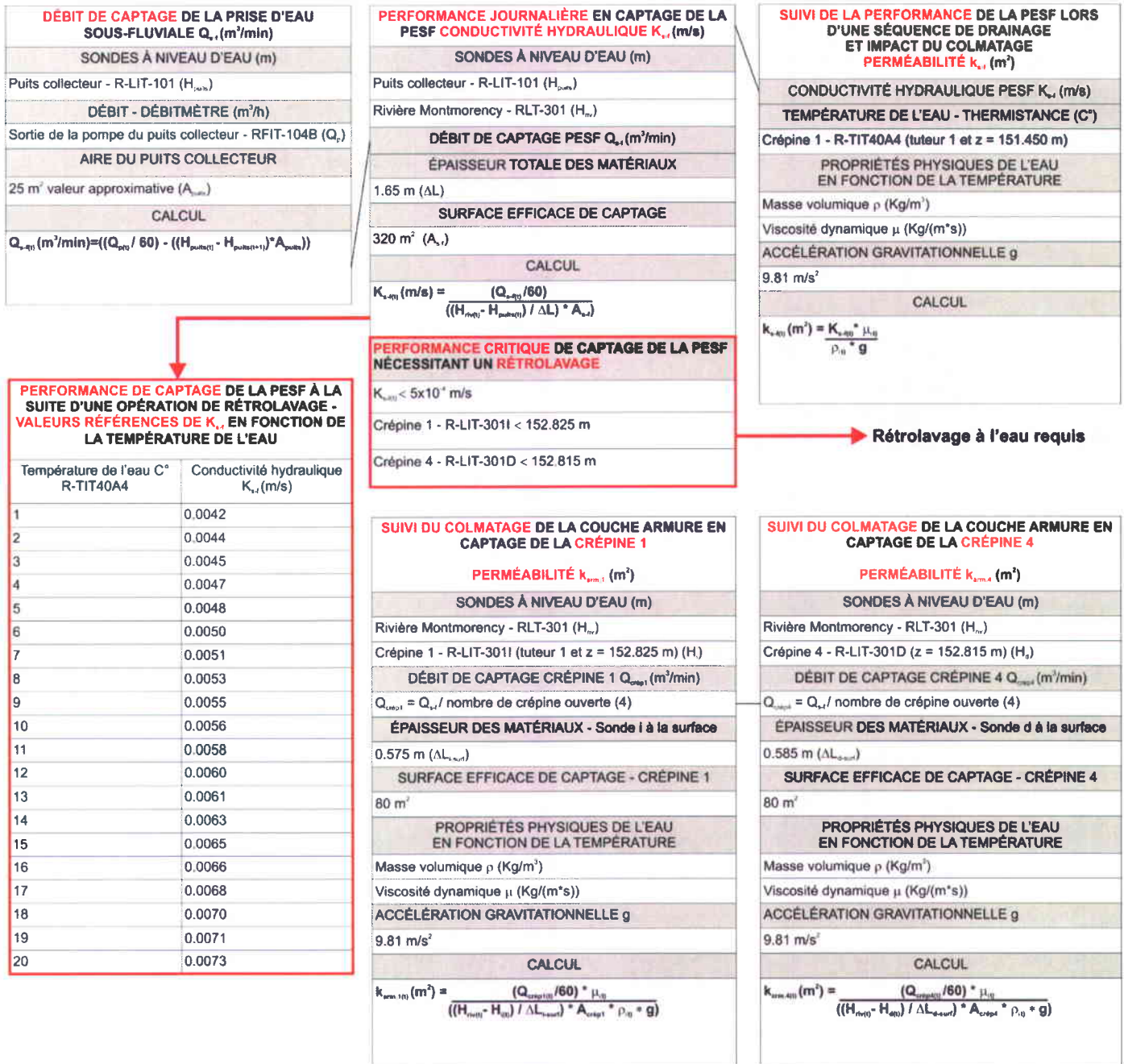


Figure 6. 1: Propriétés, indicateurs et calculs de la performance de captage de la prise d'eau sous-fluviale des îlets et balises d'opération associées.

6.1.5 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 6.1). Ces critères indiquent généralement une tendance décroissante 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 aérobique 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 nuirait 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.

6.1.6 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 6.1.

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 6.2 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 6.1.5, 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.

6.2 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 6.2.

6.2.1 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 6.2. 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 LA PESF OPÉRATIONS - ÉTAPES	RÉTROLAVAGE DE LA PESF DONNÉES
FERMETURE DES VANNES SERVANT AU CAPTAGE: V7-V4-V5	DÉBIT - DÉBITMÈTRE (m³/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 PUIIS 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 _{rv})
Durée d'injection 25 minutes	Bassin - RLT-301A
OUVERTURE DES VANNES À 100 % DES CRÉPINES 1(V12)-2(V11)	ÉPAISSEUR DES MATÉRIAUX
Durée d'injection 25 minutes	Sonde f jusqu'à la surface de la tranchée de captage 1.525 m (ΔL _{1,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 _{2,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,transchée} $i_{v,transchée(t)} = \frac{(H_{rt(t)} - H_{rv(t)})}{\Delta L_{1-surf}} > 1 \text{ fluidisation probable}$
Durée d'injection 25 minutes	CONDITIONS DE FLUIDISATION DANS LA COUCHE ARMURE
VANNE DE LA CRÉPINE 4(V9) OUVERTE À 100 % OUVERTURE DE V10 À 5 TOURS	Gradient hydraulique vertical i_{v,armure} $i_{v,armure(t)} = \frac{(H_{rt(t)} - H_{rv(t)})}{\Delta L_{1-surf}} > 1 \text{ fluidisation probable}$
Durée d'injection 25 minutes	Niveau critique des bassins pour les rétrolavages Bassin - RLT-301A < 154.5 m
VANNE DE LA CRÉPINE 4(V9) OUVERTE À 100 % FERMETURE DE V10	SUIVI DE LA PERFORMANCE DU RÉTROLAVAGE EN OPÉRATION
Durée d'injection 25 minutes	PERMÉABILITÉ k_{s,transchée} (m²)
ARRÊT DE LA POMPE DU PUIIS COLLECTEUR	$k_{s,transchée(t)} (m^2) = \frac{(Q_{p,transchée} / 3600) * \mu_{(t)}}{((H_{rt(t)} - H_{rv(t)}) / \Delta L_{1-surf}) * A_{crép} * \rho_{(t)} * g}$
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 GRAVITE	

Figure 6. 2: 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 6.2. 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 sont insuffisants 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.

6.2.2 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 6.2. 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.

6.2.3 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 6.2. Suite à l'opération de rétrolavage à l'eau, la prise d'eau sous-fluviale devrait recouvrer son rendement initial sans colmatage.

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 6.1.

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

6.2.4 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.

7 Conclusion

Le programme de recherche sur l'application des prises d'eau horizontales sous-fluviales au Québec de l'INRS a été conduit d'août 2010 à décembre 2014. Une prise d'eau sous-fluviale consiste à prélever l'eau dite de surface à partir d'un ouvrage de captation situé dans le lit d'un plan d'eau, ce qui le met à l'abri des conditions extrêmes d'écoulement en surface. Depuis les années 2000, plusieurs systèmes de captage sous-fluviaux ont été construits au Québec. Toutefois, la majorité de ces systèmes présente des problématiques de conception affectant leur rendement. Une revue de littérature sur le sujet a vite démontré des lacunes importantes au niveau des connaissances sur la réalisation de ces ouvrages qui présentent pourtant un grand potentiel d'application pour l'approvisionnement en eau potable municipal, mais aussi dans le secteur industriel au Québec.

Les activités de recherche du programme avaient pour objectif d'accroître les connaissances dans le domaine des prises d'eau sous-fluviales et portaient sur la revue de la littérature associée au sujet, des modélisations physiques conduites en laboratoire et les suivis des conceptions et des opérations de systèmes construits avant 2012. Les résultats de ces travaux ont permis d'établir des principes de conception, d'instrumentation et d'opération des prises d'eau sous-fluviales qui sont rapportés dans le présent document. Les principes de conception ont été ap-

pliqués et validés dans la réalisation d'une prise d'eau sous-fluviale à la Ville de Québec, installée dans la rivière Montmorency au site de pompage de l'ouvrage A. Également, le mode opérationnel du rétrolavage développé en laboratoire sur un modèle physique de prise d'eau sous-fluviale a pu être validé et bonifié sur le système pleine grandeur.

Aussi, un guide d'opération basé sur le suivi des données d'opération en continu de la prise d'eau sous-fluviale des Îlets de la Ville de Québec a été présenté et montre l'utilité de l'instrumentation en place pour encadrer les pratiques d'opération de ces systèmes.

Les nouvelles connaissances sur la conception, l'instrumentation et l'opération des prises d'eau sous-fluviales présentées dans ce guide viendront en appui aux consultants œuvrant dans la conception de ces systèmes ainsi qu'aux futurs utilisateurs de prises d'eau sous-fluviales.

La prise d'eau sous-fluviale de l'Ouvrage A de la Ville de Québec a été conçue selon les nouveaux principes développés du programme de recherche et constitue un système pilote unique par son instrumentation stratégique. Le suivi de sa performance et de ses opérations de rétrolavage sur plusieurs années permettra de confirmer la robustesse de la conception par rapport aux conditions critiques d'exploitation ainsi qu'à développer de nouveaux modes opérationnels.

Des travaux futurs porteront sur une plus grande optimisation des composantes de la tranchée de captage pour accroître la constructibilité des prises d'eau sous-fluviales. Aussi, une étude plus approfondie sur l'amélioration de la qualité de l'eau captée par de tels systèmes constituerait une nouvelle perspective de recherche intéressante.

8 Références

- Amirtharajah, A., (1993). Optimum backwashing of filters with air scour : a review. Article de revue scientifique: Water Science & Technology - International Association on Water Quality. 16 (p). Vol 27 No 10 pp 195–211.
- Crittenden, J. C., R. R. Trussell, D. W. Hand, K. J. Howe, et G. Tchobanoglous, (2012). Water treatment principles and design third edition. Par MHW. 1901 (p). TD430.W375 2012.
- Freeze, A., et J.A. Cherry, (1979). Groundwater. Par Prentice-Hall. 604 (p). ISBN 0-13-365312-9
- Holtz, R.D., et W.D. Kovacs, (1991). Introduction à la géotechnique. Éditions de l'école Polytechnique de Montréal. 808 (p). ISBN 2-553-00222-3
- Hubbs, S., K. Ball, T. Caldwell, (2007). Riverbank Filtration: An evaluation of RBF hydrology and impacts on yield. Par les presses International Water Association Publishing, IWA. 124 (p). ISBN 9781843398325
- Racine, C., R. Martel, C. Paniconi, (2014c). Guide d'opération de la prise d'eau sous-fluviale du poste de pompage de l'Ouvrage A – Ville de Québec. Rapport de recherche de l'INRS No. R-1560. 42 (p).
- Racine, C., R. Martel, C. Paniconi, (2014b). Guide d'opération de la prise d'eau sous-fluviale du poste de pompage des Îlets – Ville de Québec. Rapport de recherche de l'INRS No. R-1551. 34 (p).
- Racine, C., R. Martel, C. Paniconi, (2014a). Analyse de performance des opérations de la prise d'eau sous-fluviale de la ville de Beaupré. Rapport de recherche de l'INRS No. R-1490. 49 (p).
- Racine, C., R. Martel, C. Paniconi, M. Leclerc, D. Pinard (2011). Conception d'une prise d'eau sous-fluviale sur la base de modélisations physiques et numériques. Géohydro 2011, In : Joint meeting of the Canadian Quaternary Association and the Canadian Chapter of the International Association of Hydrogeologists. 8 p.
- Racine, C., R. Lefebvre, R. Martel, C. Paniconi (2009). A physical model study of a horizontal riverbed filtration system design for the Montmorency river, Québec, Canada. In: 62th Canadian Geotechnical Conference / 10th Joint CGS/IAH-CNC Conference, CD-ROM, Canadian Geotechnical Society. 7 p.
- Racine, C., C. Paniconi, R. Lefebvre, M. Leclerc and D. Pinard (2005). Analyse numérique d'un concept de prise d'eau sous-fluviale horizontale. In: 58th Canadian Geotechnical Conference / 6th Joint CGS/IAH-CNC Conference, CD-ROM, Canadian Geotechnical Society. 8 p.
- Sterrett, R. J.(2007). Groundwater and Wells, Third Edition. Par la compagnie Johnson screens. 812 (p). TD405.S74 2007.

Sterrett, R. J.(1989). Groundwater and Wells, Second Edition. Par la compagnie Johnson screens.
1089 (p). TD 403 D781 1986.

ANNEXE 1

Procédure de rétrolavage de la prise d'eau sous-fluviale de la ville de Beaupré

Plan d'opération du rétrolavage pour la ville de Beaupré (18 septembre 2013)

Préparation

1. Fermeture des pompes en captage dans le puits d'eau brute
2. Laisser établir le niveau d'eau dans le puits d'eau brute avec celui de la rivière
3. Fermer la vanne de la conduite collectrice
4. Vider totalement le réservoir d'eau non-chlorée dans le puits d'eau brute

Rétrolavage air-eau

Étape 1 : Injection d'air dans les diffuseurs et injection d'eau dans les crépines

1. Démarrer l'injection d'air à 100 % dans les diffuseurs (durée 5 minutes)
2. Temps 5 minutes : ouvrir la vanne de la conduite collectrice (injection d'eau par mode gravitaire)
3. Temps 10 minutes : fermer la vanne collectrice et démarrer les pompes (idéalement les 2 unités à 100 %) pour continuer l'injection d'eau
4. Poursuivre l'opération d'injection d'eau jusqu'à la limite de la quantité d'eau disponible dans le puits. Ensuite, fermer les pompes (Temps 20 minutes environ)
5. Fermer l'injection d'air par la soufflante

Préparation

1. Ouvrir la vanne de la conduite collectrice
2. Remplir le réservoir d'eau non-chlorée avec les pompes
3. Fermer les pompes
4. Laisser établir le niveau d'eau dans le puits d'eau brute avec celui de la rivière
5. Fermer la vanne de la conduite collectrice
6. Vider le réservoir d'eau non-chlorée dans le puits d'eau brute

Rétrolavage air-eau

Étape 2 : Injection d'air et d'eau dans les crépines

Cette opération devrait être utilisée exceptionnellement

1. Démarrer la soufflante - injection d'air dans les crépines
2. Démarrer les pompes - injection d'eau (idéalement les 2 unités à 100 %)
3. Poursuivre l'opération d'injection d'eau jusqu'à la limite de la quantité d'eau disponible dans le puits.
4. Ensuite, fermer les pompes
5. Fermer l'injection d'air par la soufflante

Préparation

1. Ouvrir la vanne de la conduite collectrice
2. Remplir le réservoir d'eau non-chlorée avec les pompes
3. Fermer les pompes
4. Laisser établir le niveau d'eau dans le puits d'eau brute avec celui de la rivière
5. Fermer la vanne de la conduite collectrice
6. Vider totalement le réservoir d'eau non-chlorée dans le puits d'eau brute

Rétrolavage eau

Étape 3: Injection d'eau dans les crépines

1. Temps zéro : ouvrir la vanne de la conduite collectrice (injection d'eau par mode gravitaire)
2. Temps 5 minutes : fermer la vanne collectrice et démarrer les pompes (idéalement les 2 unités à 100 %) pour continuer l'injection d'eau
3. Poursuivre l'opération d'injection d'eau jusqu'à la limite de la quantité d'eau disponible dans le puits. Ensuite, fermer les pompes
4. Ensuite ouvrir la vanne de la conduite collectrice

ANNEXE 2

Fichiers numériques

**Suivis et interprétations des opérations journalières
des prises d'eau sous-fluviales de Beaupré et de Québec
(système des Îlets)**

