



Analyse de performance des opérations de la prise d'eau sous-fluviale de la ville de Beaupré

INRS

Université d'avant-garde

Rapport de recherche No R-1477
Décembre 2013

Préliminaire

Centre - Eau Terre Environnement

$$\frac{d[\text{Cd}]_{\text{copepoa}}}{dt} = \left(\frac{k_{uw}[\text{Cd}^{2+}] + k_{ur}[\text{Cd}]_r}{K_e} \right) (1 - e^{-k_e t})$$

**Analyse de performance des opérations
de la prise d'eau sous-fluviale de la ville de Beaupré**

Pour le compte de la
Ville de Beaupré, Québec

Collaborateurs

Pour la ville de Beaupré

Roch Lemieux, Directeur général et Trésorier

Johanne Gagnon, Directrice générale adjointe et Greffière

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

Rédaction du rapport

Cintia Racine, M. Sc., Fanny Fortier-Fradette, Tech.

Responsable et analyse du rapport

Richard Martel, Ph. D. et Ing.

Analyse du rapport

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

Décembre 2013

Sommaire

Dans un contexte de futurs développements domiciliaires et de partage de réseaux avec d'autres villes, la ville de Beaupré désire connaître le potentiel de captage actuel de la prise d'eau sous-fluviale qui est la principale source d'approvisionnement de son usine d'eau potable. La prise d'eau a été conçue pour fournir le débit nominal de traitement de l'usine de 6000 m³/j.

La présente étude réalisée par l'INRS répond à cette question en mettant à profit l'ensemble des informations recueillies dans le cadre de son programme de recherche sur les prises d'eau sous-fluviales qui a porté, entre autres, sur le système de captage de la ville de Beaupré. L'interprétation de ces données permet de dresser un portrait de la performance réelle de captage de la prise d'eau et d'identifier des pistes de solution qui permettraient de maintenir et possiblement d'améliorer à long terme la performance de captage du système.

La méthodologie de recherche employée dans cette étude est l'intégration des connaissances acquises du traitement des données provenant de sources diverses.

- Analyse des éléments de conception de la prise d'eau sous-fluviale;
- Traitement des données journalières d'opération (suivi par les instruments en place);
- Analyse des résultats obtenus de divers essais de performance (méthodes proposées par l'INRS);
- Analyse des observations visuelles des opérations de rétrolavage; et
- Analyses physico-chimiques de l'eau de la rivière Sainte-Anne et de l'eau captée dans le puits d'eau brute.

L'analyse des résultats notamment a permis de tirer les conclusions suivantes.

Les essais de pompage réalisés en 2013 ont démontré que le système pouvait maintenir un débit d'opération d'environ 6500 m³/j, sans perte de performance enregistrée, lorsque l'eau de la rivière Sainte-Anne est peu turbide. L'opération de la prise d'eau à ce débit de captage pourrait être conduite sur une plus grande période de temps, afin d'évaluer la faisabilité d'alimenter en eau à long terme les futurs projets de la ville de Beaupré. Par contre, il est montré dans cette étude que le système est régulièrement affecté par des processus de colmatage qui limitent sa performance. Ces processus peuvent survenir entre autres, en périphérie des crépines, dans le média de captage, et également dans les crépines où des sables et graviers peuvent s'accumuler. L'augmentation du débit journalier de captage de la prise d'eau devrait accroître la vitesse du colmatage et la décroissance de sa performance. Pour contrer ce phénomène, il faut mettre en place des opérations de rétrolavage efficace. D'autre part, plusieurs résultats d'analyse indiquent que l'opération du rétrolavage à l'eau possède une capacité insuffisante. L'action limitée de cette opération, confirmée par les observations visuelles, pourrait avoir donné lieu à la création de chemins préférentiels d'écoulement dans la tranchée de captage de la prise d'eau sous-fluviale. L'existence de ces chemins préférentiels se

confirme également par l'interprétation des données d'opérations journalières ainsi que par les propriétés physico-chimiques des échantillons d'eau recueillis dans la rivière et dans le puits d'eau brute. La présence de cheminement préférentiel dans le média de captage indique que le système possède des zones de conductivité hydraulique moindre, voire colmatées. Cette constatation implique que la surface active de captage de la prise d'eau est possiblement réduite et que la performance de captage est diminuée par rapport à la conception initiale de 2008. Afin de conserver une surface de captage adéquate pour répondre aux besoins en eau de la ville et de limiter les impacts du colmatage qui pourraient éventuellement menacer à long terme le débit d'opération journalier de la prise d'eau, il est recommandé de:

- Suivre les opérations journalières de captage à l'aide des instruments du système actuel et installer une sonde à niveau d'eau avec acquisition de données dans la rivière Sainte-Anne;
- Améliorer les capacités de rétrolavage à l'eau, avec un débit d'injection qui devrait être compris entre 1755 à 4375 m³/h. Les capacités d'injection d'air sont quant à elles adéquates.
- Développer un plan d'opération stratégique de rétrolavage intégrant ces nouvelles capacités d'injection d'eau;
- Poursuivre l'échantillonnage ponctuel de l'eau de la rivière Sainte-Anne et de l'eau brute captée dans le puits de l'usine à raison d'une fois par semaine; et
- Réaliser une inspection visuelle de la condition d'encombrement des crépines et de la conduite collectrice à l'aide d'une caméra.

Étant donné le caractère novateur de la prise d'eau sous-fluviale de la ville de Beupré, il apparaît indiqué, voire nécessaire, de poursuivre les efforts de suivi visant à mieux comprendre l'évolution à long terme et le comportement opérationnel d'un tel système. De nouveaux essais de captage et de rétrolavage pourraient être réalisés afin de guider les choix futurs d'opérations de la prise d'eau. Ainsi, il est recommandé d'effectuer :

- Des essais de pompage au débit de production projeté pour rencontrer les besoins futurs en eau de la ville sur plus de deux semaines d'opération dans deux contextes d'exploitation différents, soit en condition d'étiage avec une eau de rivière peu turbide et soit en condition de crue lors d'une période de turbidité élevée de la rivière. Pour démontrer la performance du système de captage pour répondre à la nouvelle demande en conditions critiques d'exploitation.
- Un essai de pompage ayant un débit supérieur à 6500 m³/j lors d'une période de basse turbidité de la rivière permettrait d'augmenter la vitesse d'écoulement de l'eau dans les crépines et possiblement d'entraîner des particules accumulées dans les conduites vers le puits d'eau brute qui serait nettoyé.
- Un essai de rétrolavage à l'eau avec un débit d'injection près de la valeur limite requise, 1755 m³/h (décrit à la section 4.2) pourrait être conduit afin de confirmer la performance de cette opération, combinée aux autres étapes du rétrolavage avec injection d'air.

- Des essais de rétrolavage en omettant l'opération d'injection d'air et d'eau simultanément dans les conduites crépinées. L'observation visuelle de cette opération a montré que l'action de nettoyage s'effectue sur une faible surface. Ceci a pour effet de favoriser la création et le maintien de chemins préférentiels d'écoulement dans la tranchée de captage qui pourraient limiter à moyen et long termes la surface de captage et le rendement du système. De cette hypothèse, les opérateurs pourraient essayer de délaissier cette pratique dans les séquences de nettoyage et suivre l'impact de cette décision d'opération sur la performance de captage du système.

Contenu

Sommaire	i
Liste des Tableaux	v
Liste des Figures	v
Liste des Annexes	v
1 Mise en contexte	1
2 Méthodologie	1
2.1. Analyse des éléments de conception du système.....	1
2.2. Description du suivi du système par l'instrumentation de l'usine	2
2.3. Types d'essais analysés.....	2
2.4. Observations visuelles des opérations de rétrolavage.....	2
2.5. Analyses physico-chimiques	2
3 Présentation des données d'opération et des résultats des essais	3
3.1. Conception de la prise d'eau sous-fluviale	3
3.1.1. Débits de captage - conception et production	3
3.1.2. Géométrie de la tranchée de captage et description des matériaux de remblai	3
3.1.3. Description des conduites crépinées et du puits d'eau brute.....	4
3.1.4. Description des équipements de nettoyage de la prise d'eau sous-fluviale.....	6
3.1.5. Paramètres permettant d'évaluer la conductivité hydraulique équivalente.....	7
3.2. Suivi des opérations de la prise d'eau sous-fluviale – les données	8
3.3 Résultats des essais de pompage	13
3.3.1 Essai de pompage par paliers	13
3.3.2 Essais de pompage au débit cible de 6500 m ³ /j	15
3.4 Résultats des observations visuelles des opérations de rétrolavage	16
3.5 Résultats des analyses physico-chimiques	18
4 Interprétation des résultats et discussion	21
4.1 Captage de la prise d'eau sous-fluviale et existence de zones préférentielles d'écoulement	21
4.2 Optimisation des opérations de rétrolavage.....	23
4.3 Amélioration du suivi des données d'opérations journalières.....	24
5 Conclusions et recommandations	25
6 Bibliographie.....	27

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Débits de captage – conception et production	3
Tableau 2 : Géométrie de la tranchée de captage et description des matériaux de remblai.....	4
Tableau 3 : Description des conduites crépinées et du puits d'eau brute.....	5
Tableau 4 : Dispositif et équipements de rétrolavage de la prise d'eau sous-fluviale.....	6
Tableau 5 : Paramètres entrant dans le calcul de la conductivité hydraulique équivalente	7
Tableau 6 : Descriptif des instruments de mesure suivis et des données d'opération associée	8
Tableau 7 : Analyses physico-chimiques des échantillons prélevés le 9 janvier 2013	18

Liste des Figures

Figure 1 : Diagramme à bandes représentant les périodes de données d'opérations traitées.....	9
Figure 2 : Séquences de drainage de la prise d'eau sous-fluviale de Beaupré : valeurs du paramètre de la conductivité hydraulique lors des séquences de drainage	10
Figure 3 : Fluctuations du niveau d'eau de la rivière Sainte-Anne et de la turbidité de l'eau brute captée par la prise d'eau sous-fluviale de la ville de Beaupré.	11
Figure 4 : Résultats de l'essai de pompage par paliers	14
Figure 5 : Séquences des opérations et des événements de l'essai de pompage par paliers	15
Figure 6 : Résultats des essais de pompage au débit cible de 6500 m ³ /j.....	16
Figure 7 : Étape 1 - Injection d'air dans les diffuseurs et injection d'eau dans les crépines.....	19
Figure 8 : Étape 2- Début de l'injection d'air et d'eau dans les crépines	19
Figure 9 : Étape 2 – Injection d'air et d'eau dans les crépines	20
Figure 10 : Étape 3 – Injection d'eau dans les crépines	20

Liste des Annexes

ANNEXE 1.....	28
ANNEXE 2.....	32
ANNEXE 3.....	36
ANNEXE 4.....	38
ANNEXE 5.....	40

1 Mise en contexte

En 2009, l'INRS a débuté un programme de recherche portant sur la conception, l'opération et la maintenance des prises d'eau horizontales sous-fluviales au Québec. Le projet subventionné par le MAMROT comprend un volet de suivi des opérations des systèmes sous-fluviaux existants, dont celui de la ville de Beaupré. Construite en 2008 dans le lit de la rivière Sainte-Anne en aval du barrage de l'ancienne papetière d'Abitibi-Consolidated, la prise d'eau sous-fluviale alimente l'usine d'eau potable de la ville de Beaupré bâtie dans la même année. L'usine a été conçue pour produire 6 000 m³/j d'eau potable et la demande annuelle moyenne de la ville est de 2 500 m³/j. La ville a opté pour un concept de prise d'eau sous-fluviale présentant une robustesse par rapport à celui d'une prise d'eau de surface présentant des problématiques de frasil et d'érosion par les glaces qui sont des contraintes d'opération importantes en périodes hivernale et printanière.

Dans le cadre du projet de recherche de l'INRS, les données d'opérations de la prise d'eau sous-fluviale de la ville de Beaupré ont été recueillies et interprétées afin de suivre l'évolution de la performance de captage du système depuis sa mise en route. Également divers essais ont été conduits sur le système afin de mieux comprendre sa dynamique de captage et de rétrolavage et d'évaluer si les opérations menées sur le système sous-fluvial pourraient être optimisées en fonction des conditions saisonnières et hydrodynamiques du cours d'eau.

Dans un contexte de futurs développements domiciliaires et de raccordement de réseaux à d'autres villes, la ville de Beaupré désire connaître le potentiel de captage actuel de sa prise d'eau sous-fluviale. Par cette étude, l'INRS rend disponible l'ensemble des informations recueillies sur le système de la ville pour dresser un portrait de la performance réelle de captage de la prise d'eau et d'identifier des pistes de solution qui permettraient de maintenir et possiblement d'améliorer à long terme la performance de captage du système.

2 Méthodologie

L'étude de l'INRS conduite sur l'opération et la performance de la prise d'eau sous-fluviale de la ville de Beaupré est basée sur diverses sources de données décrites subséquentement.

2.1. Analyse des éléments de conception du système

Les données de conception proviennent essentiellement des plans de construction disponibles à l'usine. Ces données ont permis de relever les critères de conception, la géométrie du système, le contexte d'implantation dans le lit de la rivière, la nature de la tranchée de captage, les capacités des équipements servant au captage et au rétrolavage, les positions et la nature des instruments servant au suivi des opérations.

2.2. Description du suivi du système par l'instrumentation de l'usine

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. Les données d'opération qui seront présentées dans la section 3.2 ont été recueillies à partir des instruments de mesure suivants :

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

2.3. Types d'essais analysés

Depuis mai 2013, 4 essais ont été conduits par l'INRS afin d'évaluer la performance du système en condition de captage et de rétrolavage.

En période critique d'opération lors de la crue printanière de 2013,

- un essai de pompage à divers débits d'exploitation, ainsi
- qu'un essai de pompage au débit cible de 6 500 m³/j (légèrement supérieur au potentiel de production de l'usine) ont été menés.

En conditions d'étiages en périodes estivale et automnale,

- un rétrolavage (nettoyage) du système par gravité, et
- un essai de pompage au débit cible de 6 500 m³/j ont été réalisés.

Les résultats de ces essais seront montrés à la section 3.3.

2.4. Observations visuelles des opérations de rétrolavage

Plusieurs rétrolavages de la prise d'eau sous-fluviale conduits entre octobre 2011 et septembre 2013 ont fait l'objet d'observations visuelles. Le but de ce suivi était de relever qualitativement la distribution des fluides lors des opérations de rétrolavage à l'air, à l'eau, et aux deux fluides combinés. La distribution uniforme des fluides de lavage est un des paramètres qui influencent le succès de l'opération de rétrolavage du système sous-fluvial.

2.5. Analyses physico-chimiques

Le 9 janvier 2013, des échantillons d'eau de la rivière Sainte-Anne à l'emplacement du système de captage, ainsi que des échantillons d'eau brute provenant du puits de l'usine ont été prélevés. L'objectif de cet échantillonnage est d'évaluer les concordances et les divergences des paramètres physico-chimiques aux deux sources d'eau. Cette analyse pourrait identifier des modifications physico-chimiques de l'eau de rivière par divers processus d'échange et de rétention de composés dans la tranchée de captage et le réseau de conduites ainsi que le mélange possible avec de l'eau souterraine ou de l'eau stagnante accumulée dans l'ensemble du système de captage.

3 Présentation des données d'opération et des résultats des essais

La section suivante rapporte les données liées aux étapes méthodologiques mentionnées précédemment.

3.1. Conception de la prise d'eau sous-fluviale

Dans cette étude, l'analyse des critères et des éléments de conception permet de répondre à deux objectifs distincts. Premièrement, de fournir les informations clé pour l'évaluation de la conductivité hydraulique équivalente servant comme indicateur de performance de captage de la prise d'eau sous-fluviale en mode opératoire. Deuxièmement, d'établir des hypothèses sur le comportement hydraulique du système indépendantes des données de suivi et basées sur la théorie connue des prises d'eau horizontales sous-fluviales, telle que décrit dans Sterrett, 2007. L'ensemble des données qui ont été relevées par l'analyse est présenté à l'annexe 1 et les informations indispensables à la compréhension des résultats de cette étude sont décrites dans les tableaux subséquents.

3.1.1. Débits de captage - conception et production

La prise d'eau sous-fluviale de la ville de Beaupré a été conçue pour répondre à une demande journalière d'eau brute de 6 000 m³/j. Le dimensionnement de la prise d'eau sous-fluviale devait permettre un niveau de sécurité d'approvisionnement de 2 fois la demande journalière, donc 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 1).

Tableau 1 : Débits de captage – conception et production

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

3.1.2. Géométrie de la tranchée de captage et description des matériaux de remblai

Les données décrivant la géométrie de l'ouvrage et la nature des matériaux constituant la tranchée de captage sont essentielles à la compréhension du fonctionnement et de la performance de la prise d'eau sous-fluviale. Elles permettent entre autre, de déterminer la surface théorique active du captage qui, suite à un colmatage, devra être entièrement couverte par les actions de nettoyage afin de maintenir les capacités du système. Les données décrivant la géométrie et les matériaux de la tranchée de captage sont présentées au Tableau 2.

La surface du lit de la rivière couverte par l'ouvrage, 260 m², est plus importante que la surface active de captage qui a été définie à partir des limites physiques des diffuseurs d'air. L'hypothèse posée pour évaluer ce paramètre est que la zone active pour le captage correspond à la surface du lit qui peut être nettoyée efficacement par les équipements de nettoyage, en l'occurrence les diffuseurs d'air.

Tableau 2 : Géométrie de la tranchée de captage et description des matériaux de remblai

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. Les granulométries grossières des matériaux confèrent à la tranchée de captage une conductivité hydraulique initiale élevée, soit plus de 1×10^{-3} m/s (Freeze et Cherry, 1979). Par contre, les vides de grandes dimensions dans les matériaux de captage sont propices à laisser écouler des particules de petites tailles (argiles, silts, sables et graviers, débris organiques) ou en être comblés par des processus d'accumulation, de retenu et enfin de filtration. Ces phénomènes font évoluer avec le temps la distribution granulométrique des matériaux de la tranchée de captage et diminuent généralement la conductivité hydraulique globale du système et la performance de captage. Les stratégies de nettoyage par rétrolavages doivent donc être adaptées à ces changements pour pouvoir maintenir à long terme les capacités de captage du système pour toutes les conditions d'exploitation saisonnières.

3.1.3. Description des conduites crépinées et du puits d'eau brute

La prise d'eau sous-fluviale de la ville de Beaupré est composée de 2 crépines en acier inoxydable de 22 m de longueur. Les crépines possèdent un diamètre de 300 mm et sont installées à une profondeur de 2.2 m (radier). Elles ne sont pas inclinées. Les crépines captent majoritairement de 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 10.25m. La base du puits d'eau brute est à 9.25 m d'élévation et le trop-plein à 21.175m. Les informations liées aux conduites crépinées et au puits d'eau brute sont présentées au Tableau 3.

Tableau 3 : Description des conduites crépinées et du puits d'eau brute

Paramètre	Valeur
Crépinés	
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

La largeur des ouvertures est un paramètre important dans la compréhension des phénomènes d'accumulation de particules dans les matériaux de captage. Une hypothèse peut être posée quant à la taille des particules pouvant transitées dans le matériel de captage et pénétrées dans les crépinés tandis que d'autres fractions granulométriques de particules seront retenues au pourtour des crépinés et dans le média de captage. Selon la théorie des filtres (Crittenden et al., 2012) et sur la base de la granulométrie de la couche d'assise et d'enrobage des crépinés,

- les particules de diamètre supérieur à 15 mm pourraient être retenues à travers le média ou à la surface du lit, et
- les particules de diamètre inférieur à 15 mm pourraient s'écouler à travers le média sans être retenues.

De cette dernière hypothèse,

- les particules dont le diamètre est compris entre 5.1 mm et 15 mm seraient interceptées et accumulées au pourtour des crépinés dans les vides du média filtrant, et
- les particules de diamètre inférieur à 5.1 mm pourraient pénétrer dans les crépinés, et ensuite en fonction des vitesses d'écoulement se déposer à l'intérieur des conduites crépinées pour les ensabler ou être transportées par l'eau vers le puits de pompage.

L'accumulation de particules de taille inférieure au média de captage au pourtour des crépinés et dans le média diminue la conductivité hydraulique globale du système et constitue une nouvelle référence granulométrique dans le processus de retenu (filtration). La prise d'eau sous-fluviale de la ville de Beaupré pourrait avoir subi cette transformation et la performance actuelle de la prise d'eau est le résultat à la fois de cette évolution et des actions de nettoyage qui ont été opérées depuis sa construction en 2008.

3.1.4. Description des équipements de nettoyage de la prise d'eau sous-fluviale

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, la 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 de deux manières:

- 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.

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

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 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

L'analyse des données disponibles concernant les opérations de rétrolavage permet de relever une problématique au niveau des capacités du nettoyage à l'eau. Selon la théorie disponible sur la conception des ouvrages de captage sous-fluviaux (Sterrett, 2007), le débit de nettoyage devrait se situer entre 9.75 à 24.5 m³/h/m² de surface. Le rapport minimal de débit requis reporté sur la surface active de captage de la prise d'eau sous-fluviale de la ville de Beaupré, 180 m², indique qu'un débit minimal de 1 755 m³/h serait adéquat. Le débit maximal actuel de 445 m³/h et est en-dessous de ce critère. D'ailleurs, l'étude des données d'opérations présentée aux sections 3.2 et 3.4 montre une performance mitigée par ce type de nettoyage.

3.1.5. Paramètres permettant d'évaluer la conductivité hydraulique équivalente

La conductivité hydraulique équivalente (K_{eq}) est un indicateur important de la performance de captage de la prise d'eau sous-fluviale. Ce paramètre permet de décrire la capacité du système à écouler un certain volume d'eau à travers la surface active de captage 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 dans le puits d'eau brute de la conduite collectrice est fixe, il existe une différence de niveaux critique, où au-delà de cette valeur, le système ne pourra accroître le débit de captage.

Le terme «équivalente» indique que le paramètre de la conductivité hydraulique est attribuable à d'autres propriétés d'écoulement que celle de la tranchée de captage et du lit de rivière environnant. Le calcul du paramètre intègre 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 équivalente calculées. Les données de conception nécessaires au calcul sont montrées au Tableau 5.

Tableau 5 : Paramètres entrant dans le calcul de la conductivité hydraulique équivalente

Paramètre et descriptif	Valeur
Épaisseur de matériel au-dessus du sommet des crépines	1.9 m (approximative)
Surface efficace de captage, valeur basée sur les limites physiques du positionnement des diffuseurs d'air	180 m ² (approximative)

La conductivité hydraulique équivalente est calculée à l'aide de la relation suivante.

$$K_{eq} = Q / (i \times A) \quad (\text{équation 1})$$

Où K_{eq} est la conductivité hydraulique équivalente (m/s)

Q : Le débit d'eau produit (m³/s)

A : Surface efficace de captage (180 m²)

i : gradient hydraulique vertical, où $i = dH/dL$

dH : différence de niveaux d'eau entre la rivière et le puits d'eau brute (m)

dL : Épaisseur de matériel au-dessus du sommet des crépines (1.9 m)

3.2. Suivi des opérations de la prise d'eau sous-fluviale – les données

Dans cette étude, les données d'opération journalières ont été traitées pour montrer les variations dans le temps du paramètre de la conductivité hydraulique équivalente et donc de présenter la performance de la prise d'eau sous-fluviale selon différents contextes de production, étiages sévères, crues automnales, hivernales et printanières. Également, l'analyse de ce paramètre permet de documenter la performance des opérations de rétrolavage.

Le suivi des opérations journalières de la prise d'eau sous fluviale a été effectué sur les mesures enregistrées en continu des instruments de l'usine d'eau potable décrits à la section 2.2 et montrés au Tableau 6.

Tableau 6 : Descriptif des instruments de mesure suivis et des données d'opération associée

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.

Depuis la mise en route de la prise d'eau sous-fluviale, une quantité importante de données d'opération a été récupérée pour être analysée. La Figure 1 montre les périodes d'opération pour les données recueillies.

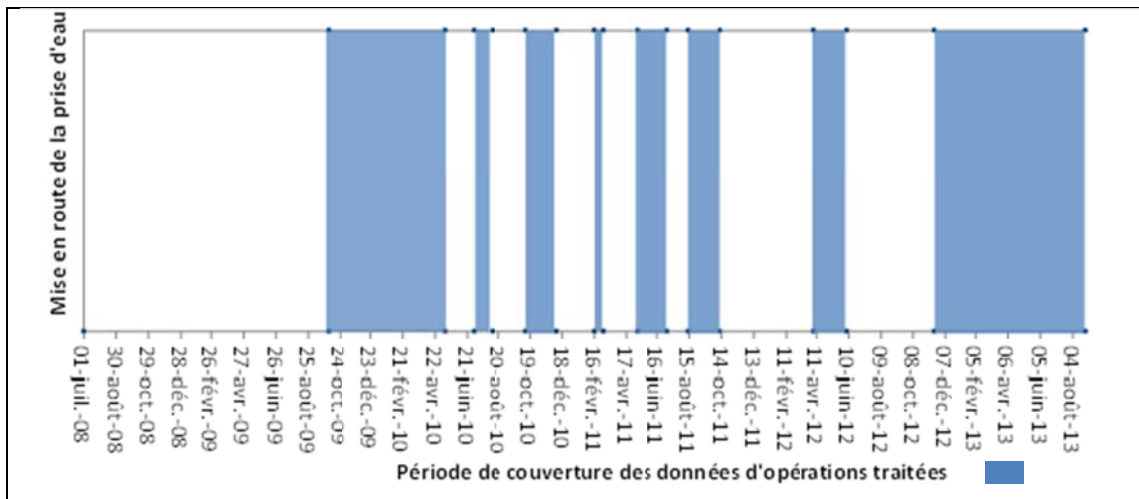
Ensuite, les données d'opération journalière ont été traitées afin d'en extraire la valeur du paramètre de la conductivité hydraulique équivalente (K_{eq}) pour différents débits de captage. Également, les niveaux de rivière ou de turbidité élevés sont mis en relation avec les valeurs de K_{eq} . Les étapes de traitement des données d'opération journalières sont décrites subséquemment.

1. Mettre en graphique le niveau d'eau du puits d'eau brute, le débit à la sortie des pompes et la turbidité de l'eau brute en fonction du temps.
2. Déterminer le niveau d'eau de la rivière qui est équivalent au niveau d'eau du puits d'eau brute lorsque les pompes sont en arrêt. Il est à noter que certaines journées, il est impossible de déterminer le niveau d'eau de la rivière, puisqu'il n'y a pas d'arrêt d'opération.

3. Définir des périodes stables de captage où le débit à la sortie des pompes et le niveau d'eau du puits d'eau brute varient peu. Définir les valeurs de K_{eq} pour ces débits de pompage à l'aide de l'équation 1.

Conditions de production exceptionnelles

4. Montrer les tendances journalières du niveau d'eau de la rivière et de la turbidité de l'eau brute pour diagnostiquer des conditions naturelles d'exploitation qui vont influencer la performance de captage du système. Lorsque le niveau d'eau de la rivière Sainte-Anne est élevé, plus de 6.9 m, ou lorsque la turbidité de l'eau brute est supérieure à 5 NTU, il est possible de lier ces données à des périodes de fortes précipitations ou du dégel du couvert de glace. Ces conditions sont susceptibles de générer du colmatage dans la prise d'eau sous-fluviale et de faire chuter rapidement la valeur de K_{eq} et par conséquent la performance de captage du système.



Les données d'opérations journalières traduites en conductivités hydrauliques équivalentes sont montrées à la Figure 2. Sur le graphique, les séquences de drainage et leur durée sont indiquées. Également, les journées d'opération des rétrolavages, les procédures et la nature des fluides utilisés pour ces opérations sont mentionnées. Depuis la mise en route de la prise d'eau, 21 séquences de drainage et 24 opérations de rétrolavage ont été effectuées. Les valeurs des conductivités hydrauliques équivalentes de la Figure 2 sont associées aux débits de captage de 180 et 200 m³/h. Le déroulement des séquences de drainage est décrit en tableau à l'annexe 2.

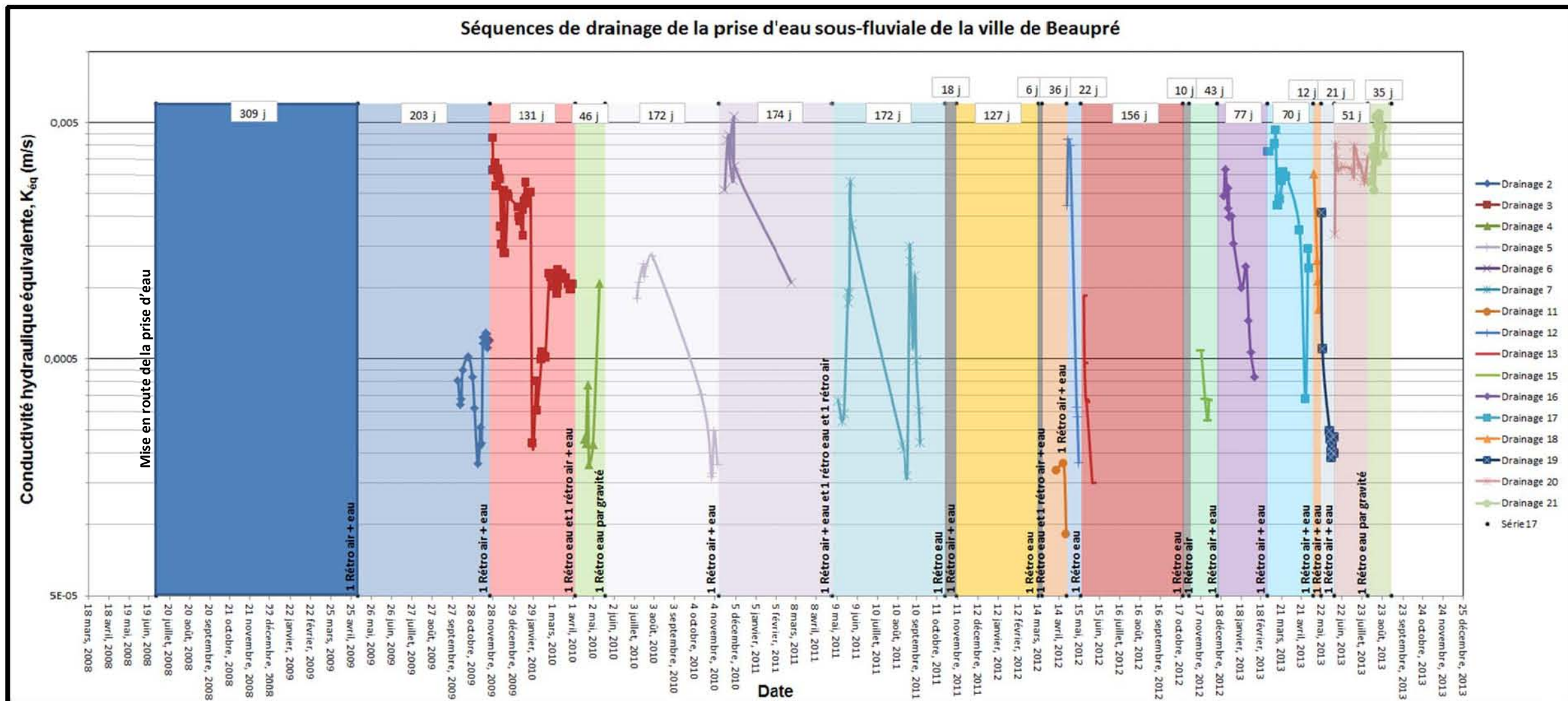


Figure 2 : Séquences de drainage de la prise d'eau sous-fluviale de Beaupré : valeurs de conductivité hydraulique équivalente lors des séquences de drainage

Données journalières : niveaux d'eau de la rivière Sainte-Anne et turbidité moyenne de l'eau brute captée par la prise d'eau de la ville de Beaupré depuis la mise en route jusqu'en septembre 2013

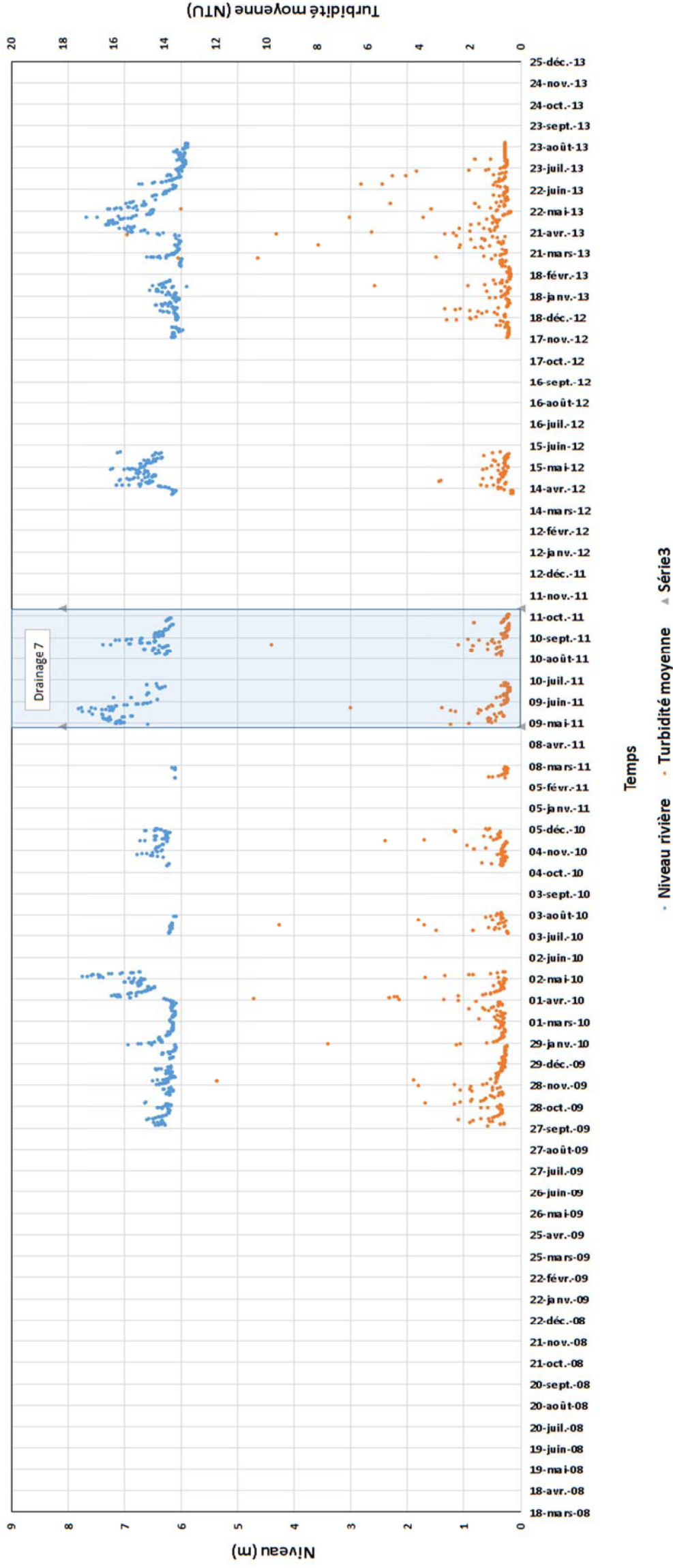


Figure 3 : Fluctuations du niveau d'eau de la rivière Sainte-Anne (points bleus) et de la turbidité de l'eau brute (points oranges) captée par la prise d'eau sous-fluviale de la ville de Beaupré.

Les épisodes où le niveau d'eau de la rivière Sainte-Anne sont élevés ou que la turbidité de l'eau brute est importante sont également indiqués au tableau de l'annexe 2. D'autres informations telles que des pertes significatives de performance de la prise d'eau liées à la décroissance du paramètre $K_{\text{éq}}$ ainsi que l'efficacité des opérations de rétrolavage pour améliorer la capacité de captage y sont décrites. Afin de montrer l'impact des fluctuations du niveau d'eau de la rivière Sainte-Anne et de sa turbidité sur la performance de captage de la prise d'eau, la Figure 3 montre les variations de ces paramètres sur une échelle de temps similaire à la Figure 2.

Les données mises en graphique aux Figures 2 et 3 permettent d'établir les constats suivants :

- La prise d'eau sous-fluviale de la ville de Beaupré subit des pertes de performance de captage généralement associées à des événements de turbidité élevée dans la rivière. Ce constat est appuyé par les diminutions régulières de la conductivité hydraulique équivalente combinées aux données de turbidité élevée du puits d'eau brute. Les pertes de performance les plus importantes sont associées à des données de turbidité moyenne journalière de l'eau brute supérieures à 6 NTU.
- Les durées des séquences de drainage entre deux opérations de rétrolavage diminuent depuis la mise en route du système. La première séquence de drainage a duré 309 jours comparativement aux dernières séquences de captage qui ont duré entre 10 à 160 jours.
- La performance de captage la plus élevée de la prise d'eau est généralement observée suite à une opération de rétrolavage air-eau combinés et est associée à une valeur moyenne de $K_{\text{éq}}$ de 5×10^{-3} m/s pour un débit de captage de $180 \text{ m}^3/\text{h}$.
- La diminution de la performance de captage de la prise d'eau est générée entre autre par le colmatage de la surface active de captage. Lorsque la rivière est à son plus bas niveau (≈ 6 m) et que le paramètre de conductivité hydraulique équivalente approche la valeur de 1.5×10^{-4} m/s, la prise d'eau sous-fluviale présente des limitations à produire un débit de $180 \text{ m}^3/\text{h}$ ($3420 \text{ m}^3/\text{j}$ sur 19 heures d'opération). Il est possible d'observer sur le graphique que lorsque $K_{\text{éq}}$ atteint une valeur près de 1.5×10^{-4} m/s, une opération de rétrolavage est généralement requise dans les jours suivants.
- La conductivité hydraulique équivalente est influencée lorsque le niveau d'eau de la rivière est particulièrement élevé, à plus de 7.30 m. Cependant, il ne s'agit pas de l'effet d'un nettoyage naturel de la prise d'eau par le courant de la rivière (érosion-affouillement), mais plus précisément d'un effet géométrique d'écoulement. Ce phénomène démontre l'existence de cheminements préférentiels de captage qui permettent, lorsque le niveau d'eau de la rivière est élevé, de contribuer plus amplement à la demande. Lorsque le niveau d'eau de la rivière diminue, la valeur de $K_{\text{éq}}$ chute rapidement pour atteindre sa valeur avant l'évènement. Le phénomène est particulièrement visible à la séquence de drainage 7 qui s'est déroulée du 3 mai au 22 octobre 2011, tel que montré aux Figures 2 et 3.
- Les opérations de rétrolavage à l'eau ne permettent pas de recouvrir une conductivité hydraulique équivalente de 5×10^{-3} m/s. Fréquemment, cette opération doit être

succédée par un rétrolavage air-eau combinés pour effectuer un nettoyage adéquat de la prise d'eau. Les séquences de drainage 8, 10 et 14 qui ont été initiées par un rétrolavage à l'eau présentent des durées très courtes, soit approximativement de 10 jours, voir Figure 2.

- Depuis la mise en fonction d'une soufflante à l'usine d'eau potable de la ville de Beaupré, le 31 octobre 2012, la valeur de la conductivité hydraulique équivalente du système se maintient au-dessus de la valeur de 1×10^{-3} m/s sur une plus longue durée de drainage. Également, la disponibilité de cet équipement essentiel pour effectuer des nettoyages efficaces de la prise d'eau sous-fluviale (Sterrett, 2007) permet d'organiser au besoin des séquences de nettoyage ciblées, dont le débit d'air est contrôlé. L'utilisation de cet équipement permet de soutenir une performance de captage moyenne plus élevée comparativement à toutes les autres séquences de drainage montrée au graphique de la Figure 2. L'élaboration d'une stratégie d'opération de nettoyage intégrant le nouvel équipement a possiblement joué un rôle dans l'amélioration de la performance de captage de la prise d'eau sous-fluviale en 2013.

En complément de l'analyse des données d'opération journalières, la réalisation d'essais de pompage par paliers et en continu permet de mieux comprendre les limitations de captage lors de contextes particuliers de production.

3.3 Résultats des essais de pompage

Tel que discuté à la section 2.3, 4 essais ont été conduits par l'INRS afin d'évaluer les performances du système en condition de captage et de rétrolavage. Les prochaines sections décrivent les résultats obtenus.

3.3.1 Essai de pompage par paliers

Lors de la crue printanière de 2013, un essai de pompage par paliers a été effectué afin d'évaluer les limites d'exploitation de la prise d'eau sous-fluviale en conditions critiques d'opération. Cette période de l'année est caractérisée par des conditions hydrauliques particulières, dont un niveau d'eau de rivière élevé ainsi qu'une turbidité importante de l'eau. Le captage d'une eau de rivière hautement chargée en sédiments occasionne l'obstruction des chemins d'écoulement dans la prise d'eau sous-fluviale et diminue alors la performance de captage. Dans ce contexte, procéder à un test de pompage par paliers permet de baliser les opérations du système de captage qui n'entraîneront pas la journée même un colmatage important nécessitant un rétrolavage immédiat de la prise d'eau pour poursuivre les opérations de captage. Les résultats de cet essai sont montrés à la Figure 4. Ceux-ci décrivent l'évolution du gradient hydraulique vertical en fonction du temps pour un débit de captage donné. Le calcul du gradient hydraulique vertical est montré à l'Équation 1. L'essai de pompage s'est déroulé du 14 au 24 mai. Le 9 mai, une opération de rétrolavage air-eau combinés a été conduite afin d'initialiser la performance de captage avant l'essai de pompage par paliers. Les débits de pompage qui ont été testés sont : 3000, 4500, 6500 et 9280 m³/j. Chacun des débits de captage

testés devait être maintenu pour une durée de 24 h. Suite à l'essai de pompage réalisé à un débit de 6500 m³/j, la conductivité hydraulique équivalente montrait une diminution importante, indiquant donc un colmatage partiel de la prise d'eau. Afin de diminuer l'influence des pompages précédents sur celui projeté à 9280 m³/j, un rétrolavage air-eau combinés a été réalisé le 21 mai. La Figure 5 montre un calendrier rappelant les événements et les opérations qui se sont déroulés lors de l'essai de pompage par paliers. Les débits de captage testés de 3000 et 4500 m³/j sont sous le débit nominal de l'usine (capacité de traitement) de 6000 m³/j, tandis que les essais réalisés à 6500 et 9280 m³/j sont une projection de débits d'opérations futures dans une perspective de développement de la ville ou de raccordement de réseaux avec d'autres villes.

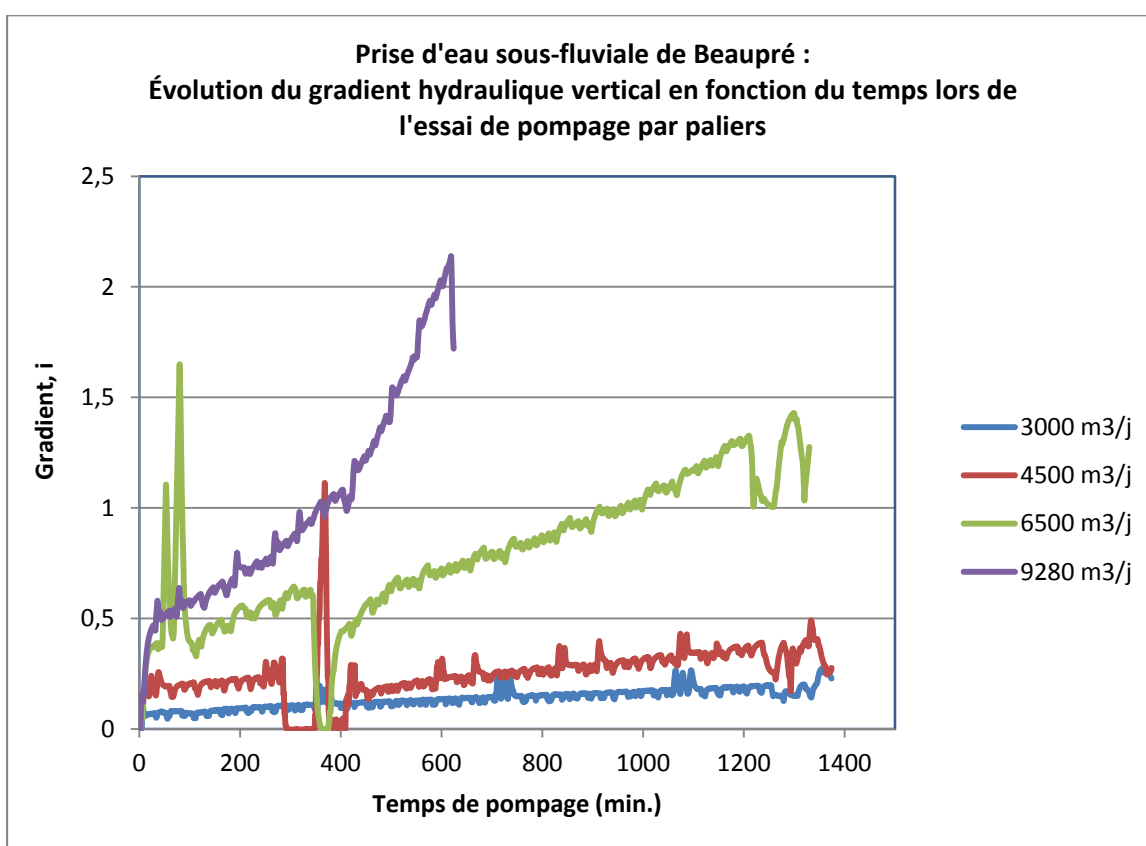


Figure 4 : Résultats de l'essai de pompage par paliers, évolution du gradient hydraulique vertical en fonction du temps.

				9 mai Rétrolavage air-eau	10 mai	11 mai Turb. eau brute 12 NTU
12 mai Turb. eau brute 2 NTU	13 mai Diminution de $K=1.2 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ Turb.=1 NTU	14 mai Essai palier 3000 m ³ /j Turb.<1 NTU	15 mai Essai palier 2- 4500 m ³ /j Turb.<1 NTU	16 mai Essai palier 3- 6500 m ³ /j Turb.<1 NTU	17 mai Turb. eau brute <1 NTU	18 mai Turb. eau brute <1 NTU
19 mai Turb. eau brute <1 NTU	20 mai Turb. eau brute <1 NTU	21 mai Rétrolavage air-eau $K=3.6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$	22 mai Turb. eau brute 1 NTU	23 mai Turb. eau brute 40 NTU	24 mai Essai palier 4- 9280 m ³ /j Turb.=5 NTU	

Figure 5 : Calendrier des opérations et des observations lors de l'essai de pompage par paliers

Malgré des conditions d'exploitation exceptionnelles durant l'essai, avec des niveaux de turbidité élevée à l'eau brute le 11 et 12 mai et le 23 et 24 mai, il est possible de faire les observations suivantes :

- Tous les débits de captage testés ont généré une perte de performance de la prise d'eau. Ce phénomène est montré par l'augmentation du gradient hydraulique vertical pour un débit fixe d'exploitation.
- La prise d'eau a pu maintenir une capacité de captage de 4 500 m³/j avec une décroissance de $K_{\text{éq}}$ de moins de 30 % sur 21 h d'opération.
- Pour les essais de captage à un débit de 6500 et 9280 m³/j, l'augmentation significative du gradient d'écoulement sur une journée d'exploitation suggère que la performance de captage de la prise d'eau n'est pas suffisante pour soutenir ces débits fixés par l'essai. Des pertes de 75 % de performance de captage ont été enregistrées aux deux essais, en 23 h pour le débit de 6500 m³/j et en 10 h pour le débit de 9280 m³/j. Toutefois, l'essai par palier à 9280 m³/j a été réalisé à la suite d'un évènement important de turbidité élevée de l'eau dans la rivière associé à la crue printanière (40 NTU à l'eau brute le 23 mai 2013).

3.3.2 Essais de pompage au débit cible de 6500 m³/j

Trois essais de pompage près du débit nominal de l'usine de 6000 m³/j ont été conduits afin d'évaluer la performance de captage de la prise d'eau sous-fluviale sous diverses conditions d'exploitation. Les dates et les débits maintenus lors des essais sont énumérés ci-dessous.

- 4 au 12 novembre 2009 - Débit : 255 m³/h (6120 m³/j)
- 27 au 30 mai 2013 (crue printanière) – Débit : 293 m³/h (7032 m³/j)
- 15 au 18 octobre 2013 – Débit : 267 m³/h (6408 m³/j)

Les résultats des essais de pompage au débit cible de 6500 m³/j sont montrés à la Figure 6. La conductivité hydraulique équivalente est le paramètre utilisé pour décrire la performance de captage du système en fonction de la durée des essais.

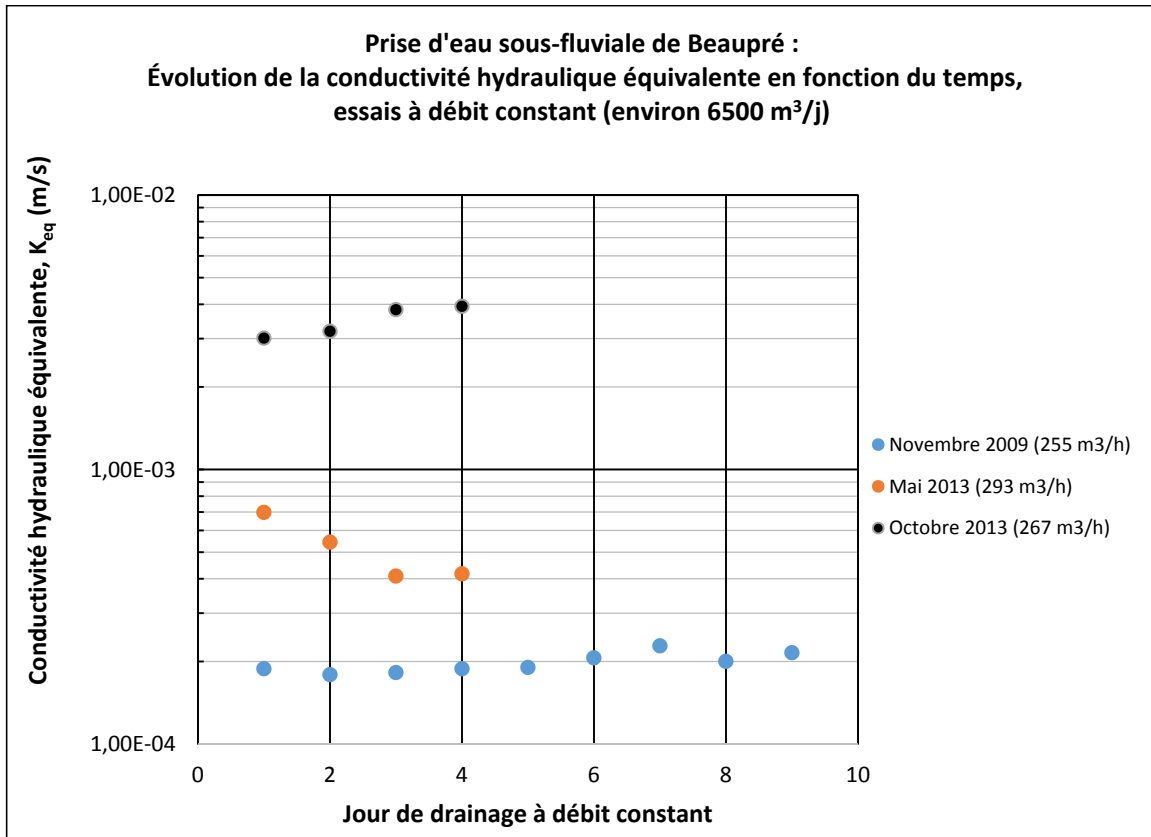


Figure 6 : Résultats des essais de pompage au débit cible de 6500 m³/j

Les essais de novembre 2009 et d'octobre 2013, n'ont pas induit de pertes de performance de captage significatives (Figure 6). Lors de ces essais, les turbidités enregistrées à l'eau brute étaient inférieures à 6 NTU et sont associées à des périodes de faible turbidité en rivière, où le processus de colmatage est moins actif. Bien qu'en novembre 2009 la conductivité hydraulique équivalente du système était faible, l'essai de pompage à 6120 m³/j a pu être maintenu pendant 9 jours sans décroissance de performance. Pour l'essai réalisé en mai 2013, en période de crue printanière, une diminution de la performance de captage de 40 % a été observée après quatre jours d'essai seulement. Ce test a été réalisé à la suite de l'essai de pompage par paliers à 9280 m³/j et donc tributaire de l'effet de colmatage induit par l'évènement de haute turbidité dans la rivière Sainte-Anne le 23 mai décrit précédemment à la section 3.3.1.

3.4 Résultats des observations visuelles des opérations de rétrolavage

Afin de soutenir la performance de captage à long terme de la prise d'eau sous-fluviale de la ville de Beaupré, les opérations de rétrolavage doivent être optimales. L'analyse des données d'opération avant et après les opérations de rétrolavage a été présentée à la section 3.2. Une conclusion importante de l'analyse est que l'opération de rétrolavage à l'eau seulement ne permet pas au système de prendre un gain significatif de performance; ainsi la durée de la période de captage suivante se trouve limitée. Également, par l'analyse des données de

conception, les capacités de pompe servant au rétrolavage à l'eau sont insuffisantes par rapport aux débits requis pour nettoyer efficacement la surface de captage de 180 m², tel que documentés dans la littérature (Sterrett, 2007).

Afin de confirmer ces affirmations, des observations visuelles ont été réalisées lors de plusieurs opérations de rétrolavage à l'eau, mais également durant les opérations de nettoyage air-eau combinés. La séquence opérationnelle de nettoyage est décrite ici :

1. Injection d'air dans les diffuseurs à capacité maximale et injection d'eau dans les crépines à capacité maximale pendant environ 15 minutes;
2. Injection d'air et d'eau à capacité maximale dans les crépines pendant environ 15 minutes; et
3. Injection d'eau à capacité maximale dans les crépines pendant environ 15 minutes.

Les capacités maximales des équipements de rétrolavage, soit de la souffante (air) et des pompes (eau), peuvent varier selon les conditions hydrauliques de la rivière Sainte-Anne et du réservoir d'eau brute, des niveaux d'eau et de la température de l'eau. Lors des opérations de nettoyage, l'air est le fluide le plus visible quant à sa distribution lors de l'injection. Toutefois, la distribution de l'eau peut être déduite en partie par les endroits relâchant une grande quantité de bulles d'air lors du rétrolavage à l'eau seulement. Les observations visuelles réalisées lors de ces opérations sont décrites selon les étapes de nettoyage de la prise d'eau sous-fluviale.

Étape 1

L'action de l'air domine le visuel dans cette opération de nettoyage, et la distribution de l'air est concordante avec le nombre de diffuseurs à air et leur longueur. La distribution, telle qu'observée en berge, est assez uniforme. La Figure 7 montre l'effet de surface observée lors de l'injection d'air dans les diffuseurs.

Étape 2

L'action de l'air est très limitée lors de l'injection air et eau combinés dans les crépines comme il est montré aux Figures 8 et 9. La crépine la plus près du poste de pompage semble avantagée par un débit d'air plus grand observable par l'action de bouillonnement à la surface de la rivière plus prononcée. Cependant, cette action de nettoyage s'effectue sur moins de deux mètres environ de part et d'autre de la conduite collectrice. Chaque section de crépine mesure 11 m, alors il est possible de conclure que lors de cette opération, la distribution de l'air est inadéquate.

Étape 3

Lors du rétrolavage à l'eau seulement, il est possible de déduire certains écoulements préférentiels de ce fluide par l'effet de balayage créé dans la tranchée de captage et le dégagement de bulles d'air. Tel que montré à la Figure 10, des bulles d'air sont observées à la surface de la rivière seulement dans les deux premiers mètres des crépines de part et d'autre de

la conduite collectrice. Cette constatation permet de renforcer le doute sur la distribution adéquate de l'eau sur l'entière longueur des crépines lors de l'injection.

Par ailleurs, il est possible d'émettre une hypothèse quant à l'existence d'un cheminement préférentiel d'écoulement dans la tranchée de captage très près de la conduite collectrice, puisque cette zone est activement nettoyée lors des opérations de rétrolavage.

3.5 Résultats des analyses physico-chimiques

Les résultats des analyses physico-chimiques réalisées sur les échantillons d'eau qui ont été prélevés le 9 janvier 2013 sont montrés au Tableau 7. D'après les analyses, les compositions chimiques de l'eau de la rivière Sainte-Anne et de l'eau captée de la prise d'eau sous-fluviale présentent peu de différence. Cela confirme que la source principale d'eau du système de captage provient de la rivière Sainte-Anne et que l'apport d'eau souterraine est négligeable. Également, le cheminement de l'eau de la rivière Sainte-Anne dans la tranchée de captage ne semble pas affecter de manière significative la composition chimique de l'eau. Cet indice permet de renforcer l'hypothèse de l'existence de chemins préférentiels où le processus de filtration est peu effectif à cet instant dans la séquence de drainage.

Tableau 7 : Analyses physico-chimiques des échantillons prélevés le 9 janvier 2013

	Al 167.019 (mg/L)	B 249.678 (mg/L)	Ba 455.403 (mg/L)	Ca 315.887 (mg/L)	Cu 324.754 (mg/L)	Fe 238.204 (mg/L)	K 766.491 (mg/L)	Mg 279.078 (mg/L)
Limite de détection	0,0013	0,0007	0,00005	0,003	0,0006	0,0007	0,002	0,003
Rivière Saint-Anne (Beaupré) : échantillon 1	0,039	0,0018	0,0061	6,1	0,0013	0,126	0,302	1,31
Rivière Saint-Anne (Beaupré) : échantillon 2	0,039	0,0019	0,00615	6,07	0,0014	0,124	0,305	1,32
Puits d'eau brute - prise d'eau : échantillon 3	0,039	0,0025	0,00709	5,97	< 0,0006	0,129	0,303	1,29
Puits d'eau brute - prise d'eau : échantillon 4	0,039	0,002	0,007	5,9	0,0009	0,128	0,299	1,3

	Mn 257.610 (mg/L)	Na 588.995 (mg/L)	P 177.434 (mg/L)	S 181.972 (mg/L)	Si 251.611 (mg/L)	Sr 407.771 (mg/L)	Ti 334.941 (mg/L)	Zn 213.857 (mg/L)
Limite de détection	0,00012	0,007	0,006	0,006	0,0017	0,00005	0,00012	0,00019
Rivière Saint-Anne (Beaupré) : échantillon 1	0,0046	2,21	0,014	1,03	5,75	0,0397	0,0002	0,00149
Rivière Saint-Anne (Beaupré) : échantillon 2	0,0046	2,23	0,013	1,04	5,72	0,0399	0,00023	0,0021
Puits d'eau brute - prise d'eau : échantillon 3	0,0043	2,31	0,019	1	5,73	0,0409	0,00025	0,00185
Puits d'eau brute - prise d'eau : échantillon 4	0,0041	2,3	0,016	1,01	5,71	0,0405	0,00028	0,00165

	Anions			CID (mg/L)	COD (mg/L)	Alcalinité CaCO3 (mg/L)	Conductivité uS/cm	pH	Turbidité NTU
	Cl (mg/L)	SO4 (mg/L)	NO3 (mg/L)						
Limite de détection	0,009	0,05	0,018	0,05	0,05
Rivière Saint-Anne (Beaupré)	2,74	2,3	0,66	4	2,2	20	53,9	7,21	0,58
Puits d'eau brute - prise d'eau	2,64	2,2	0,59	3,9	2,1	19	53,7	7,28	0,54



Figure 7 : Étape 1 - Injection simultanée d'air dans les diffuseurs et d'eau dans les crépines



Figure 8 : Étape 2- Début de l'injection simultanée d'air et d'eau dans les crépines



Figure 9 : Étape 2 – Injection simultanée d'air et d'eau dans les crépines



Figure 10 : Étape 3 – Injection d'eau dans les crépines postérieure à l'injection d'air

4 Interprétation des résultats et discussion

4.1 Captage de la prise d'eau sous-fluviale et existence de zones préférentielles d'écoulement

Le suivi des opérations de la prise d'eau sous-fluviale de la ville de Beaupré ainsi que les essais de performance réalisés en 2013 ont permis de développer les connaissances sur le comportement hydraulique du système.

La prise d'eau sous-fluviale a été conçue pour répondre à une demande de 6 000 m³/j. Toutefois, depuis la mise en route du système, elle a été rarement (4 fois) opérée à ce débit. Un essai de performance à l'usine en novembre 2009 réalisé sur 9 jours consécutifs a permis de montrer que ce système est capable de soutenir ce débit.

Au mois d'octobre 2013 en période d'étiage et de basse turbidité de l'eau de la rivière Sainte-Anne, il a été possible de maintenir un débit de captage de 6400 m³/j pendant près de 4 journées consécutives. Lors de cet essai, la conductivité hydraulique est restée stable entre 3 à 4x10⁻³ m/s, indiquant aucune perte de performance. Néanmoins, il est impossible avec les informations disponibles d'évaluer combien de temps une opération à ce débit pourrait être maintenue. Dans une volonté de démontrer l'efficacité de captage de la prise d'eau aux limites de production d'eau potable de l'usine, il serait pertinent d'effectuer un essai semblable sur 14 jours.

Dans un contexte différent, en période de crue printanière (2013), la prise d'eau sous-fluviale a pu soutenir difficilement un débit de 7032 m³/j entre le 27 et 30 mai, accusant une diminution de K_{éq} de 40 % entre le début et la fin de l'essai. Également, lors de l'essai par paliers, un débit de 6500 m³/j a été maintenu péniblement en 24 heures, ce qui a amené une baisse de la conductivité hydraulique de 75 %.

Normalement, la prise d'eau est opérée à un débit moyen situé entre 2000 à 3000 m³/j et la performance de captage diminue après des épisodes de hautes turbidités dans la rivière Sainte-Anne dues à des précipitations ou des périodes de dégel.

Ces résultats démontrent clairement que la prise d'eau sous-fluviale de Beaupré est sujette au processus de colmatage mécanique qui limite sa performance de captage avec le temps. Le phénomène est accentué lorsque la turbidité de l'eau de la rivière Sainte-Anne est élevée, à plus de 6 NTU enregistrée à l'eau brute en moyenne journalière. L'analyse des données de conception et d'opération du système permettent d'établir des hypothèses sur la localisation du colmatage.

Tel que discuté à la section 3.1.3, il a été démontré que des particules de 5.1 mm à 15 mm de diamètre pouvaient s'accumuler près des crépines et dans le matériel de la tranchée de captage. Cette fraction granulométrique, bien que peu problématique pour la performance de captage du système, agit comme un filtre qui peut éventuellement se colmater.

Également les particules de diamètre inférieur à 5.1 mm pénétrant dans les crépines peuvent obstruer les conduites. En utilisant un débit moyen de captage de 3000 m³/j et une température moyenne de l'eau à 8°C, il est montré dans le calcul de l'annexe 3 que les particules de diamètre inférieur à 450 µm seront transportées tandis que celles dont le diamètre est compris entre 450 µm et 5.1 mm, c'est-à-dire les sables moyen et grossier et le gravier fin, se déposeront dans les crépines. Toutefois, ce processus d'encombrement dans les crépines devrait s'atténuer avec le temps puisque les graviers et petits cailloux qui s'accumuleront en surface des crépines limiteront l'entrée des sables dans les crépines par des processus de retenu. Cette hypothèse devrait être validée par une inspection des crépines à l'aide d'une caméra submersible. L'encombrement dans les crépines peut réduire significativement la performance de captage du système à moyen et long termes en diminuant l'air d'écoulement disponible dans la conduite. L'injection d'air dans les crépines dont l'action est localisée principalement dans les premiers mètres des conduites et l'injection d'eau à un débit insuffisant pour être uniformément distribué ne permettent pas de déloger l'accumulation de sédiments dans les crépines.

Dans une volonté d'optimiser et d'améliorer les capacités de captage de la prise d'eau sous-fluviale de la ville de Beaupré, la confirmation de l'existence d'une telle accumulation permettrait d'établir des stratégies de mitigation. Entre autres, d'augmenter et maintenir un débit de captage élevé à plus de 6500 m³/j lors d'une période de basse turbidité de la rivière Sainte-Anne, afin d'augmenter les vitesses d'écoulement dans les crépines et d'accroître possiblement le transport des sédiments jusqu'au puits de pompage. Cette opération pourrait inclure l'essai de captage à un débit de 6500 m³/j sur une durée de 2 semaines discuté précédemment.

Le suivi des opérations de la prise d'eau et l'analyse des données a permis de démontrer l'existence de zones préférentielles d'écoulement (voir section 3.2). Ces zones pourraient s'être formées pour plusieurs raisons dont;

- L'effet d'un rétrolavage inefficace dû à une mauvaise distribution des fluides, et
- L'effet de l'encombrement préférentiel des crépines par l'accumulation de sédiments limitant le captage et l'injection des fluides en rétrolavage.

Également, le peu de différence entre les paramètres physico-chimiques de l'eau brute et de l'eau de la rivière Sainte-Anne suggère que l'eau captée n'est pas affectée significativement par des processus de filtration et de dilution et donc renforcerait l'hypothèse de l'existence de chemins préférentiels d'écoulement. L'effet de ces zones sur la performance de captage du système est à suivre étroitement via le paramètre de la conductivité hydraulique équivalente et le niveau d'eau de la rivière. Un effet atténué, ex. une $K_{\text{éq}}$ stable pour un niveau de rivière supérieur à 7.3 m, pourrait indiquer une amélioration de la condition de captage du système, tandis qu'un effet amplifié par rapport à ce qui a été observé jusqu'à maintenant, ex. $K_{\text{éq}}$ croissant pour un niveau de rivière supérieur à 7 m, pourrait montrer une détérioration de la performance de la prise d'eau.

En 2013, les données de suivi et leur interprétation ont pu montrer un gain dans la capacité de captage du système. Cette amélioration est due entre autre à l'optimisation des opérations de rétrolavage.

4.2 Optimisation des opérations de rétrolavage

Depuis l'utilisation d'une soufflante dans les opérations de nettoyage de la prise d'eau sous-fluviale en octobre 2012, il a été démontré par le suivi des données journalières (section 3.2) que la performance du système de captage se maintient élevée à une $K_{\text{éq}} > 1 \times 10^{-3}$ m/s sur une plus grande période de temps. Également, la mise en place d'un plan séquentiel d'opération de nettoyage emprunté de la théorie des filtres (Crittenden et al., 2012) a possiblement permis de contribuer à l'amélioration de la performance de captage observée en 2013. Ce plan d'opération de rétrolavage est présenté à l'annexe 4.

Toutefois, basées sur la littérature connue des prises d'eau sous-fluviales (Sterrett, 2007) et de la théorie des filtres citée plus haut, les opérations de nettoyage et la capacité du rétrolavage à l'eau de la prise d'eau pourraient être modifiées afin d'améliorer significativement l'efficacité du nettoyage et conséquemment le rendement de production du système.

L'analyse des équipements de rétrolavage à l'air et l'observation visuelle de l'injection d'air dans les diffuseurs montrent une conception adéquate. Selon la littérature, la capacité d'injection d'air requise se situe entre 18,3 et 36,6 m³/h/m² de surface à nettoyer, donc 3295 à 6590 m³/h pour une surface de 180 m². La capacité de la soufflante de l'usine est de 5097 m³/h. Toutefois, il est nécessaire de mentionner que l'unique injection d'air ne peut effectuer un nettoyage efficace. L'air n'est pas un fluide transporteur. Par son déplacement dans le média, il permet la friction des grains et donc actionne le détachement des particules à l'origine du colmatage, mais ne permet pas de véhiculer les particules jusque dans le courant d'eau de la rivière à l'exception de la surface de la tranchée de captage qui subit une agitation prononcée. L'injection d'eau de manière adéquatement distribuée dans le média doit être appliquée simultanément et postérieurement à l'injection d'air dans les diffuseurs afin de transporter les particules détachées par le mouvement de l'air.

Actuellement, la capacité et par conséquent la distribution de l'eau dans les opérations de rétrolavage est insuffisante, tel que présenté aux sections 3.1.4, 3.2 et 3.4. Éventuellement, ce manque de capacité pourrait induire un colmatage irréversible de certaines zones de captage et donc réduire significativement la surface active de captage pour se limiter qu'aux zones balayées par le nettoyage à l'eau qui se localisent plus près de la conduite collectrice et des points initiaux d'injection.

Tel que mentionné à la section 3.1.4, un débit d'injection d'eau entre 1755 à 4375 m³/h devrait être appliqué pour effectuer un nettoyage efficace de la surface de captage du système. Actuellement, la prise d'eau n'est pas pourvue d'équipements possédant la capacité de pompe et le volume d'eau nécessaire pour produire le débit minimal requis. Un essai de rétrolavage à l'eau gravitaire (sans les pompes) du puits d'eau brute jusqu'aux conduites crépinées a été

mené le 1 août 2013 afin d'évaluer le débit initial de rétrolavage pouvant être généré. De cet exercice, un débit d'environ 1450 m³/h a été observé à une hauteur d'eau de 11 m dans le puits d'eau brute et à un niveau d'eau de rivière de 5.8 m. Advenant que le niveau d'eau dans le puits d'eau brute aurait été maintenu par une venue d'eau additionnelle, il aurait été possible de tripler le débit de rétrolavage à l'eau actuellement généré par les pompes de l'usine. Également, le niveau d'eau dans le puits pourrait être légèrement supérieur à ce qui a été testé puisque l'élévation du trop-plein se situe à 21.17 m et qu'une hauteur d'eau maximale de 11.92 m serait atteignable pour l'opération. Ceci pourrait augmenter le débit à plus de 1 500 m³/h et être près du critère de débit minimal pour effectuer un rétrolavage à l'eau efficace et donc une opération de nettoyage optimale de la prise d'eau sous-fluviale.

Pour effectuer un tel essai et surtout pour permettre d'évaluer l'impact d'une telle opération sur la performance et la durée de la séquence de captage résultante, la ville de Beaupré devrait mobiliser un équipement permettant de soutenir le débit requis pour l'essai, soit environ 1750 à 2000 m³/h. La source d'eau pour l'essai aurait pu provenir de la conduite d'urgence de la prise d'eau sous-fluviale qui est connectée à la conduite de l'ancienne papetière prenant sa source en amont du barrage. Cependant, une analyse préliminaire du débit pouvant être transité par la conduite d'urgence, 550 à 700 m³/h selon les conditions de niveau d'eau en amont du barrage, a indiqué qu'il était impossible de soutenir le débit nécessaire. Le détail de l'analyse présenté à l'annexe 5 ne tient pas compte de tous les éléments pouvant générer des pertes de charges singulières et donc constitue une surestimation du volume d'eau pouvant être transmis par le réseau de la conduite d'urgence. Pour la réalisation de l'essai, la ville devra donc se munir de pompes et de conduites temporaires pour amener l'eau de la rivière Sainte-Anne jusqu'au puits d'eau brute afin de soutenir le débit d'eau requis.

Néanmoins, l'existence du barrage en amont de la prise d'eau sous-fluviale de la ville de Beaupré et d'une conduite d'urgence pourrait éventuellement servir à l'opération de la prise d'eau en captage et à son rétrolavage. Afin de rendre le système versatile dans ses sources d'approvisionnement et le rendre robuste à toutes éventualités d'opération, il serait sécuritaire de rendre fonctionnelle l'entrée d'eau provenant de la conduite d'urgence. Également, en augmentant le diamètre de cette conduite de 508 mm, il serait possible d'obtenir un plus grand volume d'eau pour réaliser les opérations de rétrolavage à l'eau en mode gravitaire, avec environ 2115 m³/h selon le calcul montré à l'annexe 5.

4.3 Amélioration du suivi des données d'opérations journalières

Dans une perspective de développement de la ville, le débit de captage de la prise d'eau sous-fluviale pourrait être augmenté afin de répondre à une demande d'eau potable accrue. En effectuant ce changement dans la demande, un plus grand volume d'eau sera transité dans la tranchée de captage et aura comme conséquence directe d'accélérer le processus de colmatage qui induira une perte de performance de captage nécessitant une action de nettoyage plus fréquente. En périodes critiques d'opération, conditions de crues et d'étiages, le taux de décroissance de la performance de captage ($K_{\text{éq}}$) sera plus important et devra être suivi de

manière serrée afin de permettre aux utilisateurs de la prise d'eau de planifier les opérations de rétrolavages pour soutenir le rendement d'eau potable visé par la ville de Beaupré.

Afin d'assurer un suivi efficace des opérations de la prise d'eau sous-fluviale, une sonde de niveau d'eau et de température serait requise dans la rivière Sainte-Anne. Régulièrement, la prise d'eau sous-fluviale est opérée en continu, ce qui ne permet pas d'établir le niveau d'eau de la rivière qui est nécessaire à l'évaluation de la conductivité hydraulique équivalente, indicateur de la performance de captage. Le suivi des valeurs journalières de la conductivité hydraulique équivalente permettra d'établir, au-delà de la capacité de captage du système, s'il y a amélioration ou dégradation de la performance du système et d'identifier certains facteurs d'opération qui pourraient contribuer à ces tendances.

Également, dans une perspective de gestion et d'optimisation des opérations de rétrolavage, le niveau d'eau de la rivière Sainte-Anne ainsi que la température de l'eau présentent un impact non-négligeable sur la performance des opérations de nettoyage. Connaître les variations et les tendances de ces paramètres permettront aux utilisateurs de déterminer les moments opportuns et la méthodologie appropriée pour réaliser des rétrolavages efficaces.

5 Conclusions et recommandations

L'existence de chemins préférentiels d'écoulement dans la tranchée de captage de la prise d'eau sous-fluviale indique que le système possède également des zones de conductivité hydraulique moindre, voire colmatées. Cette observation implique que la surface active de captage de la prise d'eau est possiblement réduite et que la performance de captage est diminuée par rapport à sa conception initiale de 2008. Par contre, les essais réalisés en 2013 ont démontré que le système pouvait maintenir un débit d'opération d'environ $6500 \text{ m}^3/\text{j}$, sans perte de performance enregistrée, lorsque l'eau de la rivière Sainte-Anne est peu turbide. L'opération de la prise d'eau à ce débit de captage pourrait être conduite sur une plus grande période de temps. Ceci permettrait d'évaluer la faisabilité de ce débit de production sur le long terme afin d'alimenter de nouveaux développements domiciliaires. Dans notre étude, il a été démontré que le système est régulièrement affecté par des processus de colmatage qui limitent sa performance. Ces processus peuvent survenir entre autres, près de la surface des crépines et dans le média de captage. Des sables et graviers peuvent également s'accumuler dans les crépines. L'augmentation du débit journalier de captage de la prise d'eau va augmenter la vitesse du colmatage et la décroissance de la performance. Pour contrer ce processus, l'efficacité des opérations de rétrolavage est la clé du maintien et éventuellement de l'amélioration des performances de captage du système. Cependant, il a été mentionné précédemment que l'opération du rétrolavage à l'eau possède une capacité insuffisante. Afin de limiter le rétrécissement de voies d'écoulement préférentielles dans le média qui pourraient éventuellement menacer le débit d'opération journalier de la prise d'eau, il est recommandé de:

- Suivre les opérations journalières de captage à l'aide des instruments de l'usine et d'une sonde à niveau d'eau dans la rivière Sainte-Anne, dont les données seraient traduites en conductivité hydraulique équivalente. Ceci permettrait de déceler les tendances d'amélioration ou de détérioration de performance du captage de la prise d'eau et de lier ces tendances à des facteurs d'opération;
- D'améliorer les capacités de rétrolavage à l'eau, dont le débit d'injection devrait être compris entre 1755 à 4375 m³/h grâce à l'acquisition de nouveaux équipements;
- Développer un plan d'opération stratégique de rétrolavage intégrant ces nouvelles capacités d'équipement. Améliorer la nature du plan en fonction des résultats obtenus du suivi et en fonction des conditions naturelles de mise en œuvre des opérations de rétrolavage, température de l'eau et niveau d'eau de la rivière Sainte-Anne;
- Poursuivre l'échantillonnage ponctuel de l'eau de la rivière Sainte-Anne et de l'eau brute captée dans le puits de l'usine pour évaluer si de nouveaux processus mécaniques ou chimiques agissent dans le système changeant ainsi la nature de l'eau captée. Ce suivi constitue un indicateur de l'évolution du comportement hydraulique de la prise d'eau; et
- Réaliser une inspection visuelle de la condition d'encombrement des crépines et de la conduite collectrice à l'aide d'une caméra submersible.

De nouveaux essais de captage et de rétrolavage pourraient être réalisés afin de guider les choix futurs d'opérations de la prise d'eau sous-fluviale de la ville de Beaupré. Dans un contexte de développements domiciliaires, il serait nécessaire d'effectuer les essais suivants :

- Essais de pompage au débit de production projeté sur plus de deux semaines d'opération dans deux contextes d'exploitation différents, soit en condition d'étiage avec une eau de rivière peu turbide et en condition de crue lors d'une période de turbidité élevée de la rivière. Le but de ces essais est de démontrer la capacité du système à produire quotidiennement ce débit sur une période de temps raisonnable qui ne nécessitera pas d'opérations de rétrolavage. Une meilleure connaissance du comportement de la prise d'eau au débit projeté permettra une gestion adéquate du système. Également, un essai de pompage à un débit supérieur à 6500 m³/j lors d'une période de basse turbidité de la rivière permettrait d'augmenter la vitesse d'écoulement de l'eau dans les crépines et possiblement d'entraîner des particules accumulées dans les conduites vers le puits d'eau brute.
- L'augmentation de la capacité des opérations de rétrolavage à l'eau est déterminante pour le maintien et possiblement l'amélioration des capacités de captage du système. Un essai de rétrolavage à l'eau avec un débit d'injection près de la valeur limite requise, de 1755 m³/h (décrit à la section 4.2) pourrait être conduit afin de confirmer la performance de cette opération, combinée aux autres étapes du rétrolavage avec injection d'air.
- Essais de rétrolavage en omettant l'opération d'injection d'air et d'eau simultanément dans les conduites crépinées. L'observation visuelle de cette opération montre que

l'action de nettoyage s'effectue sur une faible surface environ 16 m². Ceci a pour effet de favoriser la création et le maintien de chemins préférentiels d'écoulement dans la tranchée de captage qui pourraient limiter à moyen et long termes la surface de captage et le rendement du système. De cette hypothèse, les opérateurs pourraient essayer de délaissier cette pratique dans les séquences de nettoyage et suivre l'impact de cette décision d'opération sur la performance de captage du système.

6 Bibliographies

Crittenden, J. C., R. R. Trussell, D. W. Hand, K. J. Howe, et G. Tchobanoglous, (2012). Water treatment principles and design third edition. Par MWH. 1901 (p). TD430.W375 2012.

Freeze, A., et J.A. Cherry, (1979). Groundwater. Par Prentice-Hall. 604 (p). ISBN 0-13-365312-9

Sterrett, R. J., (2007). Groundwater and Wells, Third Edition. Par la compagnie Johnson screens. 812 (p). TD405.S74 2007.

ANNEXE 1

Données de conception et d'opération
de la prise d'eau sous-fluviale de la ville de Beupré

Composantes du système de captage sous-fluvial de la ville de Beaupré

Crépines en acier inoxydable

Nombre : 2

Longueur totale: 23,2 m

Longueur crépinée : 22 m

Diamètre : 300 mm

Inclinaison : 0 degré

Largeur des ouvertures : 5.1 mm

Espacement entre les crépines : 5 m centre à centre

Élévation du radier : 11.460 m (n.m.m)

Connectée en leur centre à la conduite collectrice de 500 mm de diamètre

Diffuseurs d'air, conduite de polyéthylène haute densité

Nombre : 12

Longueur : 23.2 m

Diamètre: 75 mm

Largeur des ouvertures: 6 mm

Largeur entre les ouvertures: 100 mm centre à centre

Espacement moyen entre les diffuseurs : 590 mm

Élévation du radier : 11.900 m (n.m.m)

Composantes de la tranchée de captage

Élévation de la base de la tranchée d'excavation : 11.160 m

Épaisseur totale de matériel au-dessus des couronnes des crépines : 1.94 m environ

Matériaux

Pierres de 100 mm de diamètre : de la base à 11.960 m d'élévation

Pierres de 100 à 200 mm de diamètre : de 11.960 m à 13.40 m d'élévation

Gabion rempli de pierres de 80 à 140 mm de diamètre : épaisseur de 300 mm, de 13.40 m à 13.70 m d'élévation

Géométrie de la tranchée de captage

Largeur (mesure parallèle à la longueur des crépines) : 26 m

Longueur (mesure perpendiculaire à la longueur des crépines): 10 m

Aire de la tranchée de captage : 260 m²

Distance séparant les diffuseurs placés aux extrémités : 7866 mm

Aire efficace de captage (Basée sur les limites physiques du positionnement des diffuseurs) : 182,5 m² approximation 180 m²

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

Débit d'opération et de conception

Débit de conception : 12 000 m³/j

Débit nominal d'opération de l'usine (traitement) : 6 000 m³/j

Débit journalier moyen : 2 500 m³/j

Équipements de rétrolavage

Rétrolavage à l'eau

Nombre de pompe : 2

Capacité par pompe : 222,5 m³/h pour 22,5 m/tête

Volume du réservoir d'eau non-chlorée : 135 m³

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 : environ 10 à 15 minutes

Rétrolavage à l'air

Capacité de la soufflante : 5097 m³/h

Types d'injection : 1) Injection dans les crépines

2) Injection dans les groupes de diffuseurs 1 ou 2 à la fois

Nombre de diffuseurs : 12 au total, 1 groupe par crépine, 6 diffuseurs par groupe

Durée du nettoyage : illimité

ANNEXE 2

Interprétation et récapitulatif des données d'opération
des périodes de drainage

Période de drainage	Durée et périodes	K initial (m/s)	K final (m/s)	Types de rétrolavage	Commentaires	Données disponibles
Juillet 2008 - 6 mai 2009	309 jours	n.d	n.d			Aucune donnée disponible pour cette période de drainage
6 mai 2009 – 25 novembre 2009	203 jours	n.d début 5×10^{-4}	6.7×10^{-4}	Air + eau (6 mai 2009)	Turbidité élevée de la rivière (12 NTU eau brute) – 31 oct. Diminution de K et essai de performance de l'usine 6000 m ³ /j du 4 au 11 nov. Faible gain de K après l'essai	Données seulement pour la période de drainage affectée par du colmatage
25 novembre 2009 – 5 avril 2010	131 jours	4.3×10^{-3}	1.4×10^{-4}	Air + eau (25 nov. 2009)	Turbidité élevée de la rivière (42 NTU eau brute) – 3 déc. 2009 Turbidité élevée de la rivière (14 NTU eau brute) – 26 janv. 2010 Turbidité élevée de la rivière (16 NTU eau brute) – 3 avril 2010 À chaque épisode, diminution de K	Données pour l'ensemble de la période de drainage
5 avril 2010 – 21 mai 2010	46 jours	2.8×10^{-4}	n.d fin 1×10^{-3}	Eau (5 avril 2010) Air + eau (6 avril 2010)	Les deux opérations de rétrolavage n'ont pas permis de prendre un gain de K Niveau élevé de rivière (8 m) 3 mai – Gain de K dans cette période – ensuite chute de K	Données manquantes pour la fin de période de drainage
21 mai 2010 – 10 novembre 2010	172 jours	n.d début 1×10^{-3}	1.8×10^{-4}	Eau - conduite d'urgence barrage (21 mai 2010)	Le rétrolavage à l'eau par gravité a permis de prendre un gain en K possiblement supérieur à 1×10^{-3} m/s	Deux ensembles de données, milieu et fin de la période de drainage
10 novembre 2010 – 3 mai 2011	174 jours	5.3×10^{-3}	n.d fin 1×10^{-3}	Air + eau (10 nov. 2010)	Turbidité élevée de la rivière (10.5 NTU eau brute) – 17 nov. Légère diminution de K	Deux ensembles de données, début et milieu de la période de drainage
3 mai 2011 – 22 octobre 2011	172 jours	5.6×10^{-4}	n.d fin 2×10^{-4}	Air + eau (3 mai 2011) Eau (4 mai 2011) Air (6 mai 2011)	Les trois opérations de rétrolavage n'ont pas permis de prendre un gain significatif de K Niveau élevé de rivière (7.95 m) – 29 mai Niveau élevé de rivière (8.15 m) – Gain de K dans ces périodes – ensuite chute de K	Deux ensembles de données, début et fin de la période de drainage
22 octobre 2011 – 9 novembre 2011	18 jours	n.d	n.d	Eau (22 oct. 2011)	Le rétrolavage à l'eau ne semble pas avoir été efficace, puisque cette séquence de drainage à durée que 18 jours	Aucune donnée disponible pour cette période de drainage
9 novembre 2011 – 15 mars 2012	127 jours	n.d	n.d	Air + eau (9 nov. 2011)	Le rétrolavage air et eau semble être plus performant, durée de la séquence de drainage de 127 jours	Aucune donnée disponible pour cette période de drainage
15 mars 2012 – 21 mars 2012	6 jours	n.d	n.d	Eau (15 mars 2012)	Le rétrolavage à l'eau ne semble pas avoir été efficace, puisque cette séquence de drainage à durée que 6 jours	Aucune donnée disponible pour cette période de drainage

21 mars 2012 – 26 avril 2012	36 jours	n.d début 1.6×10^{-4}	9×10^{-5}	Eau (21 mars 2012) Air + eau (23 mars 2012)	Les deux opérations de rétrolavage n'ont pas permis de prendre un gain significatif de K – manque de données pour confirmation Niveau élevé de rivière (7.15 m) 17 avril – faible gain de K dans cette période – ensuite chute de K	Données pour le milieu et la fin de la période de drainage
26 avril 2012 – 18 mai 2012	22 jours	6.1×10^{-3}	1.2×10^{-4}	Air + eau (26 avril 2012)	L'opération de rétrolavage a permis d'améliorer K, mais pas de le maintenir en période de crue printanière	Données pour l'ensemble de la période de drainage
18 mai 2012 – 21 octobre 2012	156 jours	2.5×10^{-3}	n.d fin 1.5×10^{-4}	Eau (18 mai 2012)	Le rétrolavage à l'eau a permis de prendre un gain en K, mais il a rapidement chuté sous la valeur de 1×10^{-3} m/s Un été faiblement turbide a permis de maintenir une faible performance	Données seulement pour le début de la période de drainage
21 octobre 2012 – 31 octobre 2012	10 jours	n.d	n.d	Eau (21 oct. 2012)	Le rétrolavage à l'eau ne semble pas avoir été efficace, puisque cette séquence de drainage à durée que 10 jours	Aucune donnée disponible pour cette période de drainage
31 octobre 2012 – 13 décembre 2012	43 jours	n.d début 5.4×10^{-4}	1.5×10^{-4}	Air – soufflante (31 oct. 2012)	Le rétrolavage à l'air n'a pas permis de prendre un gain significatif de K – manque de données pour confirmation	Données pour le milieu et la fin de la période de drainage
13 décembre 2012 – 28 février 2013	77 jours	5×10^{-3}	1.6×10^{-4}	Air + eau (13 déc. 2012)	Turbidité élevée de la rivière (10.2 NTU eau brute) – 31 janvier 2013 Légère diminution de K	Données pour l'ensemble de la période de drainage
28 février 2013 – 9 mai 2013	70 jours	4×10^{-3}	8.2×10^{-4}	Air + eau (28 fév. 2013)	Turbidité élevée de la rivière (27 NTU eau brute) – 12 mars Turbidité élevée de la rivière (11 NTU eau brute) – 13 mars Turbidité élevée de la rivière (17 NTU eau brute) – 1 avril Turbidité élevée de la rivière (13 NTU eau brute) – 17 avril Après l'épisode du 12 et 13 mars, diminution de K également celui du 17 avril Niveau élevé de rivière (7.35 m) 1 mai – faible gain de K dans cette période, ensuite chute de K	Données pour l'ensemble de la période de drainage
9 mai 2013 – 21 mai 2013	12 jours	3×10^{-3}	2.2×10^{-4}	Air + eau (9 mai 2013) Rétrolavage devancé pour nettoyer la prise avant le test de performance	Rétrolavage avant l'essai de performance par palliers 14 au 17 Turbidité élevée de la rivière (11.6 NTU eau brute) – avant l'essai – 11 mai Niveau élevé de rivière (7.76 m) 11 mai Suite au test de 6500 m ³ /j, K trop bas pour conduire le test à 9280 m ³ /j	Données pour l'ensemble de la période de drainage

21 mai 2013 – 11 juin 2013	21 jours	3.6×10^{-3}	1.6×10^{-4}	Air + eau (21 mai 2013)	Essai de performance à 9280 m ³ /j (24 mai) et essai continu à 6500 m ³ /j (27 au 30 mai) Turbidité élevée de la rivière (40 NTU eau brute) – avant l’essai à 9280 m ³ /j – 23 mai – chute importante de K sous 1×10^{-3} m/s Essai 9280 m ³ /j : décroissance constante du niveau dans le puits d’eau brute Essai continu à 6500 m ³ /j : décroissance de K lors du test et après l’essai	Données pour l’ensemble de la période de drainage
11 juin 2013 – 1 août 2013	51 jours	4×10^{-3}	3.5×10^{-3}	Air + eau (11 juin 2013)	Turbidité élevée de la rivière (30 NTU eau brute) – 28 juin Diminution légère de K	Données pour l’ensemble de la période de drainage
1 août 2013 – 5 septembre 2013 (Test de soufflante le 5 septembre)	35 jours	5×10^{-3}	n.d fin 3.6×10^{-3}	Eau – transfert du puits hauteur max. (1 août 2013) L’opération de nettoyage était non requise	Maintien de la performance de la prise d’eau - K moyen de 4×10^{-3} m/s	Données pour le début de la période de drainage

ANNEXE 3

Calcul des fractions granulométriques
sédimentées dans les crépines par rapport aux vitesses d'écoulement

Évaluation de la fraction granulométrique pouvant encombrer les crépines de la prise d'eau sous-fluviale de la ville de Beaupré

Données

Débit moyen de captage	3000 m ³ /j
Débit de contribution par crépine	750 m ³ /j
Débit de contribution par crépine	0,008680556 m ³ /s
Diamètre des crépines	0,3 m
Rayon des crépines	0,15 m

Calcul

Aire d'écoulement	0,070685835 m ²
Vitesse moyenne	0,12280474 m/s

Loi de sédimentation de Stokes

Données

	masse vol. kg/m ³	viscosité dyn. kg/m.s
T eau		
1 C	999,89	0,001731
8 C	999,91	0,001386
20 C	998,29	0,001003

masse volumique de particules	2680 kg/m ³
accélération gravitationnelle	9,81 m/s ²

Loi de Stokes
$$v = \frac{2r^2 g \Delta \rho}{9\mu}$$

Diamètre critique des particules pouvant se déposer en fonction de la vitesse
Les particules de taille supérieure au diamètre critique pourraient se déposer

	rayon		diamètre	
	m	mm	um	um
T 1C	0,00024091	0,240912311	240,912311	481,8246221
T 8C	0,00021557	0,215573146	215,573146	431,1462922
T 20 C	0,0001833	0,183296525	183,296525	366,5930499

ANNEXE 4

Plan d'opération de rétrolavage

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. 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 5

Analyse préliminaire du débit pouvant être transité
par la conduite d'urgence

Formules									
Formule de Colebrook									
$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{f}} + \frac{D \cdot k_n}{3,7 D} \right)$ (mm)								
$\Delta H = \frac{f L v^2}{D \cdot 2g} + Cl \frac{v^2}{2g}$	$(H_a - (z_b + \frac{v^2}{2g})) = \frac{f L v^2}{D \cdot 2g} + Cl \frac{v^2}{2g}$								
$v^2 = \frac{Q^2}{A^2}$	$A = D^2 \frac{\pi}{4}$	$A^2 = D^4 \frac{\pi^2}{16}$	$v^2 = \frac{16 Q^2}{D^4 \pi^2}$						
Formule du débit									
$Q = \pi D^2 \sqrt{\frac{g(H_a - z_b)}{8(1 + \frac{fL}{D} + Cl)}}$					$v = \chi \sqrt{\frac{g}{2z}}$				
Information sur les niveaux d'eau d'entrée et de sortie de la conduite									
niveau d'eau actuel derrière le barrage		20,206 m							
41543									
niveau d'eau actuel sur le seuil		20,72 m							
41543									
entrée dans le puits d'eau brute de la conduite d'urgence		18,5 m							
Informations pour calcul de pertes de charges singulières									
		Cl par item	Cl tot item						
nombre de coude 45 degré de la conduite 300 mm d		6	0,208	1,248					
nombre de valve papillon de la conduite 300 mm de		1	0,455	0,455					
				1,703					
Chute gravitaire de l'eau dans le puits									
Paramètres du problème									
				Différence de niveau		1,706 m			
Longueur totale de la conduite (L)		100 m		Débit d'écoulement possible		550 m3/h			
Diamètre intérieur de la conduite (D)		0,3 m		Vitesse d'écoulement		2,16136342 m/s			
Rayon intérieur de la conduite		0,15 m							
Aire d'écoulement (r2*pi)		0,07068583 m2							
k (paramètre de rugosité PVC)		0,0015 mm							
Diamètre intérieur de conduite		300 mm							
adimensionnel									
T Celsius	M. Vol. (Kg/n	Viscosité. dy	Re	1/racine f	2 term équa	friction f	fL/D	8 * terme (1 Q	
1	999,89	0,001731	374545,178	8,4788399	8,47057248	0,01391	4,63666667	58,7173333	543,42015
3	999,98	0,00162	400244,481	8,52492924	8,52223909	0,01376	4,58666667	58,3173333	545,280631
5	1000	0,00152	426584,886	8,57177845	8,57155541	0,01361	4,53666667	57,9173333	547,160353
7	999,96	0,001429	453732,044	8,61940863	8,61902214	0,01346	4,48666667	57,5173333	549,05965
9	999,85	0,001346	481658,073	8,66784172	8,66470359	0,01331	4,43666667	57,1173333	550,978863
11	999,68	0,001271	509993,341	8,71710055	8,70810043	0,01316	4,38666667	56,7173333	552,918344
13	999,46	0,001202	539150,488	8,75376219	8,75134821	0,01305	4,35	56,424	554,353718
15	999,19	0,001139	568818,1	8,79428908	8,79246568	0,01293	4,31	56,104	555,932402

		Si différence de niveau est 2,706 m			Débit d'écoulement possible 700 m3/h		vitesse d'écoulement 2,75082618 m/s		
T Celsius	M.Vol. (Kg/n	Viscosité.dyn	Re	1/racine f	2 term équ	friction f	fL/D	8 * terme (1/Q	
1	999,89	0,001731	476693,862	8,65808979	8,65691475	0,01334	4,44666667	57,1973333	693,434415
3	999,98	0,00162	509402,067	8,7071816	8,7080823	0,01319	4,39666667	56,7973333	695,871916
5	1000	0,00152	542926,219	8,75711805	8,75689246	0,01304	4,34666667	56,3973333	698,335304
7	999,96	0,001429	577477,147	8,80792365	8,80384394	0,01289	4,29666667	55,9973333	700,825039
9	999,85	0,001346	613019,365	8,84990407	8,84992072	0,012768	4,256	55,672	702,86978
11	999,68	0,001271	649082,434	8,89988319	8,89303071	0,012625	4,20833333	55,2906667	705,289421
13	999,46	0,001202	686191,53	8,93355806	8,93629772	0,01253	4,17666667	55,0373333	706,910758
15	999,19	0,001139	723950,309	8,97664622	8,97692359	0,01241	4,13666667	54,7173333	708,974836
Diamètre intérieur de la conduite (20		0,508 m			Différence de niveau		1,706 m		
Rayon intérieur de la conduite		0,254 m							
Aire d'écoulement (r ² *pi)		0,20268299 m ²			Débit d'écoulement possible		2115 m ³ /h		
k (paramètre de rugosité)		0,0015 mm			Vitesse d'écoulement		2,8986152 m/s		
Diamètre intérieur de conduite		508 mm							
						adimensionnel			
T Celsius	M.Vol. (Kg/n	Viscosité.dyn	Re	1/racine f	2 term équ	friction f	fL/D	8 * terme (fL/Q	
1	999,89	0,001731	850568,773	9,10597275	9,10975805	0,01206	2,37401575	32,616126	2090,6803
3	999,98	0,00162	908930,291	9,16313572	9,16004091	0,01191	2,34448819	32,3799055	2098,29249
5	1000	0,00152	968747,711	9,2096494	9,20901475	0,01179	2,32086614	32,1909291	2104,44248
7	999,96	0,001429	1030397,22	9,25291513	9,25648943	0,01168	2,2992126	32,0177008	2110,12773
9	999,85	0,001346	1093815,49	9,30001218	9,30189298	0,011562	2,27598425	31,831874	2116,27797
11	999,68	0,001271	1158163,12	9,3494699	9,34487523	0,01144	2,2519685	31,639748	2122,69358
13	999,46	0,001202	1224377,18	9,38977484	9,38728737	0,011342	2,23267717	31,4854173	2127,88958
15	999,19	0,001139	1291750,48	9,42934775	9,42799854	0,011247	2,21397638	31,335811	2132,96312