

ICAR – PACC 26 Impacts et adaptation - Ressources hydriques

Développement d'un prototype de système d'alerte aux faibles débits et aux prélèvements excessifs dans le bassin versant pilote de la rivière Yamaska



Pr Bertrand Côté, ing., M.Sc.A., Département de génie civil (chercheur principal)
Pr Robert Leconte, ing., Ph.D., Département de génie civil (chercheur associé)
Mélanie Trudel, Ph.D., stagiaire postdoctorale, Département de génie civil

Collaboration : Pierre-André Côté, D.Sc., chimiste, CUFE



Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres.



TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	7
1. Introduction	8
2. Contexte / objectifs	8
3. Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature	11
3.1 Les systèmes existants	11
3.1.1 Exemple de l'EPIDOR	11
3.1.2 Exemple du SMEAG	12
3.2 Vulnérabilité	13
3.2.1 Quantité d'eau prélevable dans un cours d'eau	15
3.2.2 Les indices d'étiage couramment utilisés en Amérique du Nord	16
Méthode du Montana (méthode de Tennant)	17
NEFM (New England Flow Method)	17
Méthode « 0.25 QMA »	18
3.3 Impact des changements climatiques sur les étiages	18
3.4 Projections climatiques	18
4. Méthodologie / données	19
4.1 Indices éco-hydrologiques retenus et niveaux d'alerte	19
4.2 Prélèvements d'eau brute aux prises d'eau municipales	20
4.3 Prévision des débits d'étiage	20
4.3.1 Tarrissement en l'absence de précipitation	20
4.3.2 Méthode des « k plus proches voisins »	22
4.3.3 Approche par modélisation hydrologique	24
4.3.3.1 Calage du modèle HYDROTEL©	24
4.3.3.2 Descriptions des projections climatiques	25
4.4 Application de mesures de restriction	26
5. Résultats	27
5.1 Quantification des indices éco-hydrologiques et niveaux d'alerte	27
5.2 Viabilité des niveaux d'alerte	29
5.3 Évaluation de la vulnérabilité	31
5.4 Prévision selon les trois méthodes	34
5.4.1 Méthode du tarissement et prévision	34
5.4.2 Méthode des k les plus proches voisins et prévision	35
5.4.3 Méthode hydrologique et prévision	35
5.5 Effets des CC sur les débits d'étiage	38
5.5.1 Projections climatiques sur le bassin versant de la rivière Yamaska	38
5.5.2 Simulations hydrologiques en changements climatiques	40
5.5.2.1 Évolution des indicateurs éco-hydrologiques	40
5.5.2.2 Évolution du nombre de jours sous chacun des indices éco-hydrologiques	42
5.6 Plan d'intervention	43
6. Analyse et discussion	43
6.1 Impact des changements climatiques	43
6.1.1 Effet des précipitations et des températures	43
6.1.2 Diminution du 7Q2 et aggravation des indices de vulnérabilité	44
6.1.3 Diminution du 7Q10 à Cowansville	44
6.2 Effet anticipé des mesures de restriction	44
7. Conclusions et recommandations	48

7.1 Approche ARMPC/HACCP	48
7.2 Prélèvements excessifs	49
7.3 Adaptation	49
7.3.1 Réduction de la consommation d'eau potable	49
7.3.2 Modification d'ouvrages existants	52
7.3.2.1 Seuil en enrochement à Bromont	52
7.3.2.2 Barrage Davignon à Cowansville	52
7.3.3 Détermination du volume maximum prélevable et soutien d'étiage	53
7.3.4 Maintien en opération du portail de prévision	53
7.4 PDE de l'OBVY	54
Références	56
Annexe A - Caractéristiques des stations hydrométriques et des réserves d'eau	60
Annexe B - Les indices d'étiage pour les différentes stations	61
Annexe C - Les niveaux d'alerte proposés pour les différentes stations	65
Annexe D - Les mesures de restriction proposées pour chacun des niveaux d'alerte	68
Annexe E – Portail	71
Annexe F – Exemple de bulletin périodique sur l'hydraulicité	72
Supplément ARMPC/HACCP	1
1. Introduction	2
2. Contexte/Objectifs	3
3. Cadre théorique/Compte-rendu de la revue de littérature	4
3.1 Contexte	4
3.2 Approche ARMPC et exemples pertinents	5
4. Méthodologie/données	8
4.1 Toile de support pour les points de contrôle – Google Earth©	8
4.2 Maîtrise des risques au moyen des points de contrôle	11
4.3 Mesures correctives associées aux prélèvements excessifs en cas d'étiages sévères	13
4.4 Caractéristiques de qualité des eaux de surface	15
5. Résultats	19
5.1 Phosphore total	19
5.2 Azote ammoniacal	19
5.3 Nitrates/nitrites	19
5.4 Oxygène dissous et température	19
5.5 Conductivité	20
6. Analyse et discussion	20
7. Conclusion, limites et recommandations	23
Références	25
ANNEXES DU SUPPLÉMENT	26

LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Les sept étapes de l’approche ARMPC	10
Figure 2 - EPIDOR.....	12
Figure 3 - SMEAG	13
Figure 4 - Précipitations annuelles	14
Figure 5 - Débits moyens annuels spécifiques.....	14
Figure 6 - Proposition de hiérarchisation des mesures de restriction	27
Figure 7 - Les indices d'étiage calculés pour la station 030314.....	28
Figure 8 - Les niveaux d'alerte proposés pour la station 030314.....	29
Figure 9 - Débit estival à la station 030314 en 2001	30
Figure 10 - Débit estival à la station 030314 en 2010	31
Figure 11 - Vulnérabilité pour la protection de l'habitat aquatique	33
Figure 12 – Résultats de prévision.....	35
Figure 13a - Prévision réalisée lors de l’été 2012 pour la station 030302.....	36
Figure 13b - Prévision réalisée lors de l’été 2012 pour la station 030304.....	36
Figure 13c - Prévision réalisée lors de l’été 2012 pour la station 030314	37
Figure 13d - Prévision réalisée lors de l’été 2012 pour la station 030345	37
Figure 14 - Augmentation des températures maximales (a) et minimales (b) dans le futur (2041-2070) par rapport à la période référentielle (1971-2000).....	38
Figure 15 - Variations dans les précipitations dans le futur (2041-2070) par rapport à la période référentielle (1971-2000).....	39
Figure 16 - Augmentation de l'évapotranspiration potentielle dans le futur (2041-2070) par rapport à la période référentielle (1971-2000).....	40
Figure 17 - Moyenne des débits minimums mensuels pour les périodes référentielle (bleu) et future (rouge) pour la station a) 030302, b) 030304, c) 030314 et d) 030345.....	41
Figure 18 - Évolution des indices éco-hydrologiques entre les périodes référentielle (bleu) et future (rouge) pour la station a) 030302, b) 030304, c) 030314 et d) 030345	42
Figure 19 – Bief « urbain » de Cowansville	45
Figure 20 - Barrage du lac Davignon (Cowansville).....	53
Figure B.21 Les indices d'étiage à la station 030301	61
Figure B.22 Les indices d'étiage à la station 030302	61
Figure B.23 Les indices d'étiage à la station 030304	62
Figure B.24 Les indices d'étiage à la station 030309	62
Figure B.25 Les indices d'étiage à la station 030314	63
Figure B.26 Les indices d'étiage aux stations 030341 et 030345.....	63
Figure B.27 Les indices d'étiage à la station 030351	64
Figure C.28 Les niveaux d'alerte proposés à la station 030302.....	65
Figure C.29 Les niveaux d'alerte proposés à la station 030304	65
Figure C.30 Les niveaux d'alerte proposés à la station 030314	66
Figure C.31 Les niveaux d'alerte proposés aux stations 030341 et 030345.....	66
Figure C.32 Les niveaux d'alerte proposés à Granby (prise d'eau)	67
Figure C.33 Les niveaux d'alerte proposés à Bromont (prise d'eau)	67

SUPPLÉMENT ARMPC/HACCP

Figure 34 – Tableau de bord sur Google Earth®	8
---	---

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Indices et usages des différents débits d'étiage ou débits réservés	16
Tableau 2 - Prélèvements d'eau brute aux prises d'eau municipales	20
Tableau 3 - Exemple d'historique des débits	23
Tableau 4 - Ajustement des débits pour la méthode des k plus proches voisins.....	23
Tableau 5 - Sous-modèles utilisés dans le modèle HYDROTEL	24
Tableau 6 - Résultats du calage et validation du modèle HYDROTEL	25
Tableau 7 - Projections climatiques du projet NARCCAP	26
Tableau 8 - Vulnérabilité selon le prélèvement moyen annuel.....	32
Tableau 9 - Vulnérabilité selon le prélèvement moyen annuel (Bromont et Granby)	32
Tableau 10 - Vulnérabilité selon la pointe journalière.....	33
Tableau 11 - Vulnérabilité selon la pointe journalière (Bromont et Granby)	33
Tableau 12 - Coefficients de tarissement.....	34
Tableau 13 - Pourcentage d'augmentation du nombre de jours en dessous de chacun des niveaux d'alerte pour chaque station	43
Tableau 14 – Scénario de réduction des prélèvements	44
Tableau 15 - Effet du système d'alerte pour Cowansville.....	46
Tableau 16 - Effet du système d'alerte pour St-Hyacinthe	47
Tableau 17 - Effet du système d'alerte pour Farnham	47

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier sincèrement les personnes suivantes pour leur contribution au projet et leur support :

Catherine Laurence-Ouellet, organisme de bassin versant de la rivière Yamaska (OBV Yamaska)

Nicolas Audet, comité de suivi (OURANOS)

Jean Painchaud, comité de suivi (OURANOS)

Jean-François Cyr, Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ)

Richard Turcotte, Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ)

Sylvain Primeau, Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP)

Les élu(e)s de La Conférence des élus de la Montérégie Ouest (CRÉ)

Les représentant(e)s des diverses municipalités touchées par le projet (St-Hyacinthe, Farnham, Granby, Bromont et Cowansville)

Nous tenons aussi à remercier les personnes suivantes pour leur professionnalisme dans la réalisation de leur projet :

Chantal Zeestraten, étudiante à la maîtrise en génie civil

Pierre-Louis Doucet-Généreux, étudiant à la maîtrise en génie civil

Mebarek Bouadam, étudiant à la maîtrise en génie civil

1. Introduction

Les projections en regard des changements climatiques indiquent que la majorité des rivières du sud du Québec seront affectées par une diminution des débits d'étiage en été. Cette situation deviendra particulièrement préoccupante dans le bassin versant de la rivière Yamaska, en raison de son débit estival déjà faible et d'un diagnostic de vulnérabilité posé par des recherches antérieures. Déjà en 2001 et 2002, les faibles précipitations conjuguées aux températures élevées ont entraîné une baisse importante des débits dans la rivière Yamaska et ses principaux tributaires. De tels épisodes augmenteront en sévérité dans le futur. La quantité d'eau disponible risque donc de diminuer jusqu'à devenir problématique pour l'approvisionnement en eau potable de plusieurs municipalités, ainsi que des industries qui dépendent des réseaux de distribution municipaux. Également, la biodiversité environnementale en subira des impacts significatifs. Ce projet concerne les rivières Yamaska Sud-Est (Cowansville), Yamaska Nord (Granby) et Yamaska (Bromont, Farnham et Saint-Hyacinthe). Il vise à amener ces villes du bassin versant à maintenir en opération le système d'alerte aux faibles débits et aux prélèvements excessifs qui est proposé, ainsi que le SIG qui résulte de la démarche ARMP (Analyse des Risques et Maitrise des Points de Contrôle).

2. Contexte / objectifs

Plusieurs de nos rivières localisées en région méridionale québécoise sont caractérisées par des débits relativement élevés lors des périodes de crues, ainsi que par des étiages estivaux pouvant être particulièrement sévères. La rivière Yamaska en est un bon exemple. Ainsi, le débit à la hauteur de la station de mesure de Cowansville peut dépasser les 100 m³/s en période de fonte printanière et même lors du passage de grands systèmes dépressionnaires d'été. Il peut aussi tomber sous la barre des 150 l/s (0.15 m³/s) en étiage sévère. Ce débit se compare à la production moyenne d'eau potable de la ville, qui s'établit à environ 100 l/s. La pression exercée par la consommation d'eau municipale est donc préoccupante en regard de la disponibilité de la ressource. Les répercussions sur d'autres usages de l'eau (ex. : les activités récréotouristiques) et sur la santé de l'écosystème, sont aussi une réalité incontournable. En effet, la faible capacité de dilution de la rivière Yamaska durant l'été, combinée à des pratiques agricoles où l'on fait un usage important de fertilisants, a pour conséquence d'accélérer le phénomène d'eutrophisation du cours d'eau. Enfin, les faibles débits enregistrés à plusieurs endroits du bassin versant pourraient éventuellement entraîner des conflits d'usages. Ces problèmes seront exacerbés dans le futur en raison des changements climatiques anticipés et de leurs répercussions sur le cycle hydrologique (Mailhot et al., 2008). Il est par conséquent impératif que les communautés vivant dans le bassin versant de la Yamaska, ou dans tout autre bassin caractérisé par des débits extrêmes (en étiage comme en crue), puissent s'adapter adéquatement aux changements climatiques en ce qui a trait aux usages de l'eau.

En effet, durant les 30 à 50 dernières années, le débit moyen des cours d'eau a diminué dans plusieurs régions du Canada, surtout au sud et particulièrement durant les mois d'août et septembre (Mailhot et al. 2008). De plus, une étude réalisée par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) sur les bassins versants du Québec habité expose aussi ce genre de constat en démontrant que les débits d'étiage estivaux moyens (Q2,7) des récentes 15 années (1993-2007) ont été environ 11% plus faibles que ceux des 15 années précédentes. Les projections climatiques sous conditions de changements climatiques, de même que les observations du régime hydrique des quinze plus récentes années des rivières des bassins versants du sud du Québec, tendent à prédire une diminution des débits d'étiage estivaux. Cette perspective laisse

donc clairement entrevoir que les problèmes d'approvisionnement en eau pour les différents usages continueront d'empirer, tant par leur fréquence que par leur intensité. En ce qui a trait au cas de la rivière Yamaska, il est donc important et urgent de définir des plans d'intervention hiérarchisés pour faire face, tout en s'adaptant, à la tendance annoncée d'une fréquence et d'une intensité de plus en plus élevées de telles situations de crise.

L'approvisionnement en eau potable de même que sa gestion globale à l'échelle d'un bassin versant constituent des enjeux qui n'avaient pas encore été très préoccupants au Québec jusqu'à il y a un peu plus de dix ans. Depuis, toutefois, des épisodes de sécheresse et d'étiage sévères ont fait surgir des questionnements à la fois environnementaux, sociaux et économiques, tant au Québec qu'ailleurs en Amérique du Nord (Alberta, par exemple) ainsi que sur d'autres continents (Australie, par exemple). En effet, ils ont démontré la nécessité et l'urgence de recourir à une planification (1) de mesures rigoureuses de conservation et (2) de prélèvements optimaux et hiérarchisés de la ressource en cas de conditions critiques (voir le site web du syndicat du bassin versant de la Reyssouze en France à titre d'exemple ; [Reyssouze, 2012]). Au Québec, parmi les bassins versants où la problématique se présente avec le plus d'acuité et en tenant compte des observations consignées par la direction régionale Estrie-Montérégie du MDDEFP, le bassin versant de la rivière Yamaska (BVRV) est de ceux qui soulèvent le plus de préoccupations, tant en terme des enjeux de quantité que de qualité de l'eau. Des conditions d'étiage plus sévères risquent non seulement d'avoir des impacts sur la quantité disponible d'eau pour satisfaire les usages et sur l'équilibre écologique dans les plans d'eau, mais également sur la qualité de celle-ci en regard des usages anthropiques et de la protection de la biodiversité. De plus, la croissance actuelle de certains centres urbains du bassin versant pourrait même être freinée si la disponibilité de la ressource devenait insuffisante pour combler les besoins des activités supplémentaires qui y seraient éventuellement implantées.

Le système développé de surveillance et d'alerte en cas de faibles débits à l'échelle du BVRV permet de sensibiliser la classe politique et le grand public. Le contexte environnemental, économique et social est maintenant jugé propice au maintien en opération d'un tel système. Pour garantir une adhésion solide de la communauté au projet, l'ensemble de la démarche est axé sur une eau qui est considérée comme « Richesse à conserver » en plus d'être une « Ressource à protéger », ce qui milite en faveur du « Respect » pour celle-ci. En effet, à partir du moment où une communauté devient consciente qu'un de ses éléments constitutifs essentiels - l'eau - est sa « Richesse à conserver » tant pour le présent que pour le futur, elle envisagera nécessairement son utilisation comme « Ressource » de façon plus proactive et plus durable.

Le système a été développé en respectant tout en adaptant les 7 grands principes de l'approche ARMPC (Analyse des Risques et Maitrise des Points de Contrôle), qui est traité plus en détails dans un supplément au présent rapport.

Ces principes sont :

1. **analyse et identification des dangers/risques ainsi que des mesures de contrôle disponibles** : ce point trouve essentiellement écho dans la partie sur les indices éco-hydrologiques du rapport, dont plusieurs concernent les impacts sur le milieu aquatique, par exemple.
2. **identification des points critiques de contrôle** : ce point trouve essentiellement écho dans l'utilisation des données disponibles en temps réel aux stations hydrométriques et aux prises d'eau (sujet couvert dans le rapport), ainsi qu'aux points de contrôle visuels (sujet couvert dans le supplément au rapport).

3. **établissement des limites de contrôle** : ce point trouve essentiellement écho dans la partie sur les niveaux d'alerte proposés dans le rapport.
4. **établissement d'un système de surveillance** : ce point trouve essentiellement écho dans la partie sur la prévision des débits du rapport principal et dans l'application Yamaska.kmz décrite en détails dans le supplément.
5. **établissement des actions correctives à appliquer** : ce point trouve essentiellement écho dans la partie sur le plan d'intervention suggéré dans le rapport.
6. **vérification et validation du processus de contrôle** : à venir avec l'usage, dans le futur. Il s'agit d'un jugement qui sera porté avec le temps (rétroaction).
7. **documentation de l'ensemble du processus** : ce point trouve essentiellement écho dans le rapport et son supplément, dans les bulletins périodiques sur l'hydraulicité qui ont été produits dès l'été 2012, ainsi que sur la documentation des mesures correctives.



Figure 1 – Les sept étapes de l'approche ARMPC

La méthodologie ARMPC a vu le jour dans l'industrie agro-alimentaire, pour gérer les risques d'une chaîne de production. Elle a toutefois déjà été adaptée par certaines municipalités pour la sécurisation de la production d'eau potable, dans une approche parfois dite « de la source au robinet ». La présente approche retenue pour le BVRV pourrait être dite « de la pluie à la prise d'eau brute ».

Sur la base d'un suivi d'indices et de prévisions, le système développé indique le moment où des mesures restrictives de prélèvement et de consommation doivent être appliquées. Ce rapport démontre que les étapes suivantes ont été réalisées, tel que prévu initialement dans la proposition de projet : bonification du plan directeur de l'eau de l'OBV Yamaska en terme d'objectifs; implantation d'un prototype de système d'alerte aux faibles débits et aux prélèvements excessifs; identification des seuils critiques d'alerte qui enclenchent un plan de restrictions de prélèvement et de consommation d'eau; identification d'avenues d'adaptation aux effets prédits des changements climatiques sur la sévérité des étiages et les problématiques d'approvisionnement en eau pour les utilisateurs.

3. Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature

Zeestraten (2012) couvre la revue de littérature sur le sujet des systèmes d'alerte existants. Ne seront repris ici-bas que deux exemples, pour fin de brièveté, puisqu'ils ont servi de modèle pour le système proposé.

3.1 Les systèmes existants

Aux États-Unis mais principalement en Europe, certains systèmes d'alerte aux étiages ont été développés et sont appliqués à des bassins versants sujets à des étiages sévères. Ces systèmes reposent sur des valeurs seuils de débits à partir desquelles des consignes de restriction des prélèvements d'eau sont imposées.

En France, le tout est réglementé par la loi sur l'eau de 1992 qui a institué le concept du SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) qui se veut un instrument de planification qui fixe pour chaque bassin hydrographique les orientations fondamentales d'une gestion équilibrée de la ressource en eau.

3.1.1 Exemple de l'EPIDOR

A titre d'exemple, mentionnons le SDAGE Adour-Garonne 2010-2015 piloté par l'Établissement Public Territorial du bassin de la Dordogne (EPIDOR). Celui-ci est l'institution interdépartementale responsable de la mise en valeur de la Vallée de la Dordogne. Il a pour mission de favoriser un développement harmonieux de la vallée de la Dordogne selon les aspects suivants [EPIDOR, 2012] : 1) protection et restauration de son environnement; 2) amélioration de la ressource en eau sur les plans de la qualité, de la quantité et de la gestion de la Dordogne et de ses affluents; 3) assurer un développement cohérent des activités économiques liées à la rivière Dordogne; 4) dans le domaine du tourisme, assurer la promotion et développer le label "Dordogne".

Pour arriver aux objectifs qui ont été mis de l'avant, des mesures progressives et significativement efficaces s'appliquent à 3 niveaux de débit [EPIDOR, 2008] :

Débit Objectif d'Étiage (DOE) : débit permettant l'atteinte du bon état des eaux et la satisfaction de l'ensemble des usages. Mesures de vigilance;

Débit d'Alerte (Qa) : débit correspondant au tiers inférieur entre le DOE et le DCR. Lorsque le débit moyen journalier est inférieur à ce débit d'alerte durant 3 jours consécutifs, au moins 50 % des prélèvements sont suspendus (interdiction de prélever 4 jours sur 7 ou réduction du débit de prélèvement de 50 %);

Débit de Crise (DCR) : débit moyen journalier inférieur aux valeurs du DCR durant 2 jours consécutifs. Tous les prélèvements sont interdits (sauf les usages prioritaires tels que l'eau potable).

Un bulletin est diffusé hebdomadairement pour communiquer la situation courante aux usagers de l'eau. La figure 2 présente un exemple de situation observée pour la semaine du 6 au 11 septembre 2010 [EPIDOR, 2010].

OBSERVATION DES COURS D'EAU AU COURS DE L'ETIAGE 2010

Semaine du 6 au 11 septembre

Dernières observations

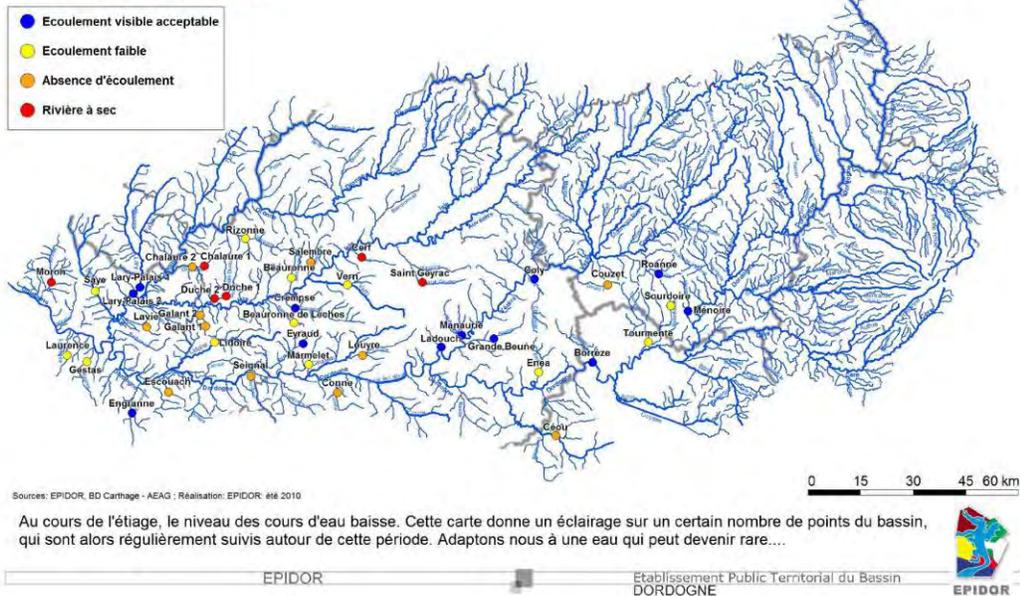


Figure 2 - EPIDOR

Cette communication permet aux usagers de suivre l'état de la rivière et d'adapter les prélèvements en conséquence. Cette information est facilement disponible sur le site web de l'EPIDOR et accessible à toute la population.

3.1.2 Exemple du SMEAG

Pour plusieurs de ces systèmes, un portail informatique est mis en place pour permettre à la population concernée de visualiser la situation en temps réel et de prendre connaissance des prédictions à court terme. La figure 3 présente un exemple de prédiction tiré du portail du SMEAG (Syndicat Mixte d'Étude et d'Aménagement de la Garonne [SMEAG EPTB-Garonne, 2011]). Celui-ci est constitué de 6 collectivités membres. On retrouve aussi, sur la majorité de ces portails, de l'information sur la qualité de l'eau, les prévisions des débits pour les 3 à 7 prochains jours ainsi que les mesures qui doivent être apportées à chacun des niveaux d'alerte (restrictions et interdictions). Ces niveaux sont déterminés à partir de l'historique de la rivière à l'aide d'outils de modélisation simples. Habituellement, en Europe, le débit mensuel minimal d'une année (QMNA) est la référence pour déterminer les niveaux d'alerte [Lang *et al.*, 2006]. Ce débit se calcule à partir d'un mois calendaire et des récurrences de 2 ans, 5 ans et 10 ans sont habituellement considérées.

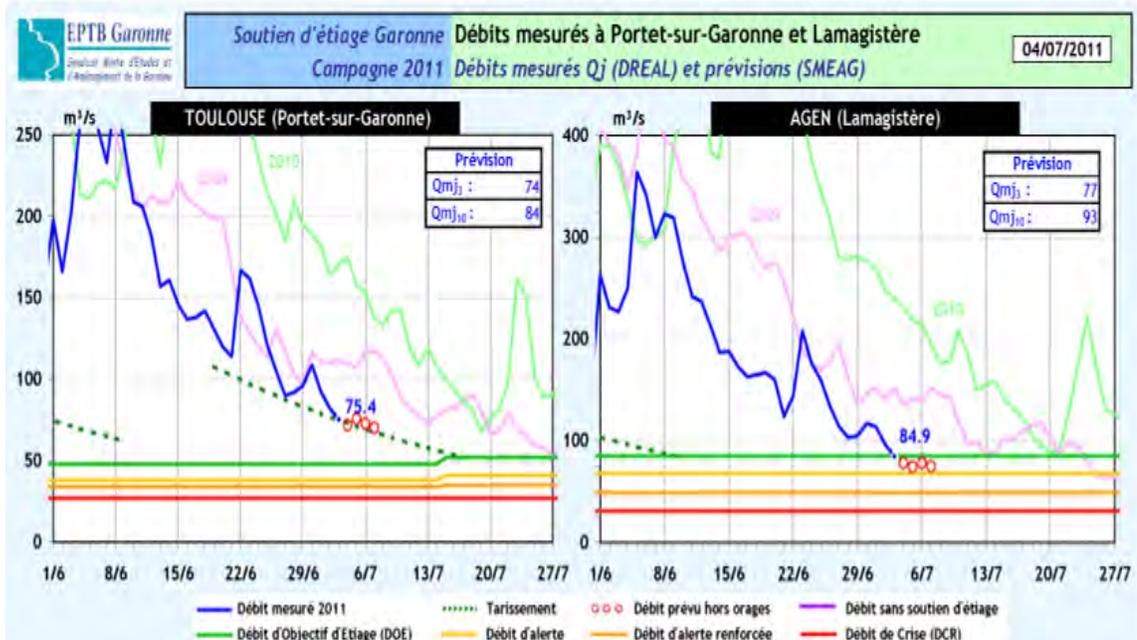


Figure 3 - SMEAG

Notons que le SMEAG a choisi de fonctionner avec un système à 4 niveaux, en ajoutant un niveau d'alerte renforcée aux 3 niveaux de l'EPIDOR. Les 4 niveaux sont donc : 1) débit d'objectif d'étiage; 2) débit d'alerte; 3) débit d'alerte renforcée; 4) débit de crise.

Le présent projet s'est inspiré de ce dernier système en adoptant sa nomenclature et en adaptant les valeurs correspondant aux différents débits seuils, en fixant a priori le débit de crise à la valeur du 7Q10.

3.2 Vulnérabilité

Des études antérieures ont été faites pour évaluer la vulnérabilité des prises d'eau de différentes municipalités au Québec [Bérubé, 2007 et Nantel, 2006]. Certaines villes sur le bassin versant de la rivière Yamaska ont fait partie de ces études qui s'appuient sur deux indices différents. Le premier indice de vulnérabilité proposé correspond au rapport du débit 7Q2 sur le volume quotidien moyen d'eau brute prélevée (vulnérabilité de la demande en eau) et le second correspond au rapport entre 15 % du 7Q2 et le volume quotidien moyen prélevé (vulnérabilité selon les directives du gouvernement pour la protection de l'habitat aquatique) [Nantel, 2006]. Un site est considéré vulnérable lorsque la valeur de l'indice est inférieure à 1. Bien que toutes les municipalités du bassin versant à l'étude ayant des prises d'eau en rivière n'aient pas été évaluées au niveau de leur vulnérabilité dans les études antérieures, les résultats de celles-ci indiquent que certaines municipalités pourraient devenir vulnérables dans un contexte de changements climatiques.

Pour le BVRY, cette variation spatiale de la vulnérabilité ne proviendrait pas d'une variation spatiale significative des précipitations sur le bassin versant, comme en témoigne la figure 4 [Zeestraten, 2012] qui montre les précipitations annuelles moyennes aux différentes stations climatologiques du bassin.



Figure 4 - Précipitations annuelles

Celle vulnérabilité ne proviendrait pas non plus d'une variation spatiale significative des débits moyens annuels spécifiques, comme le démontre la figure 5 [Zeestraten, 2012].

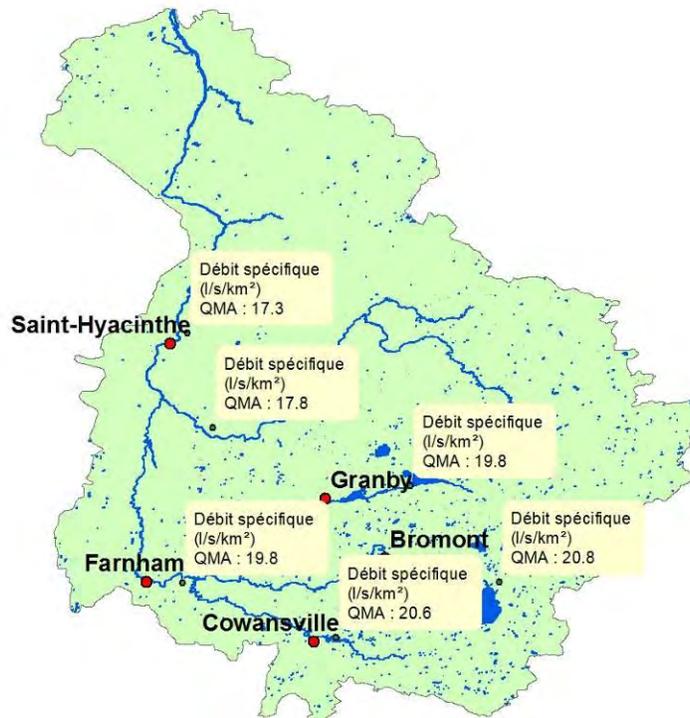


Figure 5 - Débits moyens annuels spécifiques

La différence entre les vulnérabilités de chaque municipalité dépendrait donc de facteurs comme le volume des réserves disponibles en amont des prises d'eau, qui permet de régulariser les apports, ainsi que (comme il fallait s'y attendre) la valeur relative du prélèvement d'eau brute à la prise d'eau.

3.2.1 Quantité d'eau prélevable dans un cours d'eau

Pour établir la quantité d'eau qui peut être prélevée d'un cours d'eau, différentes lois ont été mises en place par le gouvernement du Québec afin d'imposer des limites sur les prélèvements. L'article 17 du *Règlement sur les habitats fauniques* et de la *Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune* précise :

« 17. Dans un habitat du poisson, une personne ne peut effectuer du pompage d'eau que conformément à l'une ou l'autre des conditions suivantes :

1° dans le cas d'un cours d'eau, le prélèvement ne peut excéder 15 % du débit du cours d'eau à l'endroit où le prélèvement est effectué;

2° dans le cas d'une plaine d'inondations, le prélèvement ne peut excéder 45 000 litres par jour;

3° dans le cas d'un lac, le prélèvement ne peut abaisser le niveau de plus de 15 cm; un avis écrit doit être transmis par courrier recommandé au ministre des Ressources naturelles et de la Faune au moins 15 jours avant la date prévue pour le début du pompage d'eau; cet avis doit indiquer le nom et la localisation du lac où le pompage d'eau est projeté, sa durée prévue ainsi que la date du début de cette activité.

D. 905-93, a. 17. » [Québec, 2012]

Le débit du cours d'eau du point 17-1° n'est cependant pas spécifié (en période d'étiage, période de crue, débit moyen annuel ?). Le Guide de conception des installations de production d'eau potable du Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs précise que pour les prises d'eau, un pourcentage du débit d'étiage doit être considéré :

« Le débit maximum qu'il est permis de prélever est établi à 15 % du Q2-7 originel, débit duquel il faut soustraire les prélèvements en amont. La valeur ainsi obtenue est, par définition, la capacité de la source d'approvisionnement au point de prélèvement. Cette base de calcul est issue de l'article 17 du *Règlement sur les habitats fauniques* (*Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune*) qui stipule que "le prélèvement ne peut excéder 15 % du débit du cours d'eau à l'endroit où le prélèvement est effectué". Il est possible d'excéder le 15 % du Q2-7 originel en effectuant la démonstration prévue au cinquième alinéa. Par contre, si cette démonstration s'avère négative, le 15 % du Q2-7 originel demeure la valeur de référence. » [Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 2006].

Le guide stipule aussi que « Lorsqu'il existe des points de prélèvement en aval de l'éventuelle prise d'eau, il faut démontrer que la capacité de prélèvement de la source ne sera pas excédée suite à l'implantation de la nouvelle prise d'eau. » Même si ce n'est pas explicité, cela implique qu'on doit considérer le 15% du Q2-7 sur une base cumulative sur le cours d'eau sur lequel se trouve le prélèvement projeté. D'ailleurs, la Loi sur l'eau parle d'analyse des impacts cumulatifs des prélèvements concernés.

D'autres sources avancent des valeurs différentes pour les prélèvements, dont la « fiche technique no 14 : Prise d'eau » qui stipule que « La quantité d'eau prélevée dans un cours d'eau ne doit pas dépasser 20 % du débit d'étiage de récurrence 2 ans calculé sur 7 jours consécutifs (Q-2-7), afin de préserver la vie dans le cours d'eau ainsi que les autres usages de l'eau susceptibles d'être affectés par le prélèvement d'une quantité d'eau » [Développement durable de l'industrie des gaz de schiste au Québec, 1999]. Par contre, ce règlement ne s'applique pas aux prises d'eau aux fins d'eau potable, mais plutôt aux autres types de prises d'eau.

En tenant compte de ces lois et règlements, pour les prises d'eau municipales, la quantité maximale d'eau qui peut être prélevée est donc 15 % du Q2-7 (ou 7Q2 avec la nomenclature utilisée dans ce projet).

3.2.2 Les indices d'étiage couramment utilisés en Amérique du Nord

Plusieurs contraintes sont à prendre en considération lors de l'analyse des débits d'étiage et des débits réservés, ces derniers étant particulièrement utilisés à des fins écologiques. Le débit réservé représente le débit nécessaire dans un cours d'eau pour permettre la protection de l'habitat des espèces de poissons présents. La dilution des rejets contaminés, la protection de l'habitat aquatique, la protection des prises d'eau, le maintien des activités nautiques sont quelques exemples de contraintes qui doivent être analysées. Pour déterminer la valeur des faibles débits dans les rivières, il existe plusieurs méthodes qui ont été développées dans différents pays, dont au Canada et aux États-Unis [Belzile et al., 1997]. Toutes ces méthodes présentent des indices de débit d'étiages qui s'appliquent à différentes régions et pour des critères distincts. Le tableau 1 [Zeestraten, 2012] présente les usages correspondant à quelques indices présentés par les différentes méthodes. L'analyse de ces différentes méthodes fait aussi ressortir les différents indices d'étiage qui sont les plus appropriés à la situation des rivières du Sud du Québec, en considérant les usages détaillés dans le rapport de l'Ontario [Pyrce, 2004] et le rapport du Ministère du développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) [Cloutier et al., 2007].

Tableau 1 - Indices et usages des différents débits d'étiage ou débits réservés

Indices	Usages	Références
7Q2	Critère de protection de la vie aquatique chronique (MES, DBO5) Critère de protection de la vie aquatique chronique (phosphore), eutrophisation en lac, en réservoir ou en baie fermée	[Cloutier et al., 2007]
7Q2	Utilisé comme un débit réservé	[Belzile et al., 1997]
7Q2 estival	Critère d'activités récréatives et d'esthétique (Coliformes fécaux) Critère de protection de la vie aquatique chronique (phosphore), eutrophisation en rivière	[Cloutier et al., 2007]
7Q2	Débit pour la maintenance de l'habitat (représente une période de stress sur le système qui provoque une certaine réduction des populations)	[Pyrce, 2004]
0.25QMA	Débit minimal à conserver dans la rivière pour la protection de la vie aquatique	[D. Caissie et El-Jabi, 1995]
7Q10	L'un des indices les plus utilisés pour déterminer les débits d'étiage et les débits réservés	[Tharme, 2003; Abi-Zeid et Bobée, 1999; Caissie et al., 1998]
7Q10	Critère de protection de la vie aquatique chronique (contaminants toxiques)	[Cloutier et al., 2007]
7Q10 estival	Critère de protection de la vie aquatique chronique (azote ammoniacal)	[Cloutier et al., 2007]
7Q10	Critère de protection de la vie aquatique chronique (à l'exception de l'azote ammoniacal) Critères de qualité de l'eau pour la toxicité NH3-N: mai-novembre : pour la protection de la vie aquatique aiguë en été; décembre-février : pour la protection de la vie aquatique aiguë en hiver	[Ohio Environmental Protection Agency Division of Surface Water, 1997]
7Q20	Utilisé comme un indicateur du débit minimal nécessaire pour	[Pyrce, 2004]

	le maintien de l'écosystème	
30Q5	Critère de prévention de la contamination de l'eau et des organismes aquatiques Critère de protection de la faune terrestre piscivore	[Cloutier <i>et al.</i> , 2007]
30Q10	Critère de qualité de l'eau pour la toxicité NH ₃ -N : mai-novembre : pour la protection de la vie aquatique chronique en été ;décembre-février : pour la protection de la vie aquatique chronique en hiver	[Ohio Environmental Protection Agency Division of Surface Water, 1997; Ohio Environmental Protection Agency Division of Surface Water, 2008]
30Q10	Critère de protection de la vie aquatique chronique en ce qui concerne l'ammoniac ou des charges d'azote ammoniacal	[United States Environmental Protection Agency, 1995; United States Environmental Protection Agency, 1999]
Q ₅₀ août	Débit réservé de base (Aquatic Base Flow ou ABF) Protège l'habitat aquatique autant que sous un régime naturel	[Belzile <i>et al.</i> , 1997]
Q ₉₀	Débit mensuel offrant des conditions d'écoulement stables et moyennes	[Caissie et El-Jabi, 1995]
Q ₉₀	Avertissement aux gestionnaires de l'eau indiquant que des débits critiques sont à prévoir dans les prochains jours	[Rivera-Ramirez <i>et al.</i> , 2002]
Q ₉₅	Indicateur de conditions extrêmes de faible débit couramment utilisé	[Tharme, 2003]
Q ₉₅	Débit minimum pour protéger la rivière	[Petts <i>et al.</i> , 1999]

* La période estivale se situe entre le 1^{er} juin et le 31 octobre selon le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). Par contre, la période du 1^{er} mai au 31 octobre sera considérée dans le cadre de cette étude.

Trois méthodes jugées pertinentes dans le contexte du bassin de la Yamaska sont présentées plus en détails ci-après [Zeestraten, 2012] :

Méthode du Montana (méthode de Tennant)

La méthode du Montana, qui est communément appelée Méthode de Tennant, est la méthode de détermination des débits écologiques la plus fréquemment utilisée aux États-Unis, au Canada et même à travers le monde [Tharme, 2003]. Elle a été principalement développée pour les cours d'eau du centre-nord américain. La seule donnée requise est le débit moyen annuel (QMA), ce qui en fait une méthode très simple. Un pourcentage du QMA est utilisé pour classer la condition générale de la rivière. Huit classes de débit correspondant à des % du QMA sont établies pour chacune des deux grandes périodes de l'année (octobre à mars et avril à septembre). Un débit réservé équivalent à 30% du débit moyen annuel semble généralement convenable pour la période estivale et est habituellement la valeur utilisée pour la protection de l'habitat des poissons [Belzile *et al.*, 1997].

NEFM (New England Flow Method)

Cette méthode a été développée pour les rivières du nord-est des États-Unis et a été adaptée à des cours d'eau de la Caroline du Nord et de la Virginie. La valeur qui sert de débit critique est la médiane du mois où se produisent le plus souvent les débits d'étiage et où les températures sont les plus élevées. Ce mois correspond habituellement au mois d'août, et parfois au mois de septembre, dépendamment des régions, et le débit est représenté par l'indice « Q₅₀ août » ou « Q₅₀ septembre ». Défini comme le débit réservé de base (Aquatic Base Flow ou ABF), ce débit

protège les habitats aquatiques [Belzile *et al.*, 1997]. Cette méthode s'applique toutefois aux bassins versants ayant une superficie de plus de 130 km².

Méthode « 0.25 QMA »

Cette méthode, qui est une adaptation de la méthode de Tennant, est fréquemment utilisée dans les provinces maritimes du Canada [D. Caissie et El-Jabi, 1995]. Le quart du débit moyen annuel (0.25 QMA) est la valeur qui est préconisée comme débit réservé par cette méthode et est très semblable à celle obtenue avec Tennant 30 % du QMA. Elle représente le débit minimal à conserver dans la rivière pour la protection de la vie aquatique, sans prendre en considération le moment de l'année, ni les types d'espèces qui s'y retrouvent.

3.3 Impact des changements climatiques sur les étiages

Les effets des changements climatiques sur les conditions d'étiage ont été étudiés pour quelques cours d'eau dans le monde. Les résultats de ces études indiquent que les conditions d'étiages pourraient changer significativement en raison des changements climatiques à venir. En Europe, une diminution du débit moyen de la rivière Meuse pendant la saison d'étiage a été simulée par de Wit *et al.*, (2007). Mauser *et al.* (2008) prédisent que le débit moyen minimum sur 7 jours sera réduit de moitié entre aujourd'hui et 2060. Rahman *et al.* (2010) concluent à une augmentation des faibles débits au printemps ainsi qu'à une diminution des faibles débits pour l'été et l'automne pour un bassin versant en Ontario. Ils ont également constaté que la période de retour de deux ans des faibles débits sera réduite d'environ 38%. Ryu *et al.* (2011) ont également constaté une diminution du 7Q10 de 1.54 m³/s à 0.03 m³/s pour le bassin du fleuve Geum en Corée.

Plusieurs études au Québec ont déjà conclu que les changements climatiques auront un impact sur les débits dans le futur. Initialement, ces études ont évalué l'impact des changements climatiques sur les débits hivernaux et les crues printanières [Fortin *et al.*, 2007; Minville *et al.*, 2009; Quilbé *et al.*, 2008; Boyer *et al.*, 2010]. L'Atlas de l'impact des changements climatiques sur le régime hydrique du Québec méridional à l'horizon 2050 (actuellement en production) prévoit une diminution « très probable » du 7Q2 pour les rivières du sud du Québec, et ce avec une ampleur de -12 % [Ricard *et al.*, 2012].

3.4 Projections climatiques

Les modèles de circulation générale (MCG) sont généralement utilisés pour simuler le climat présent et futur, mais présentent des limitations dans la simulation du climat à l'échelle locale [Chiew *et al.*, 2009]. Les modèles régionaux de climats (RCM) sont des modèles à région-limitée qui sont pilotés à leurs conditions frontières par des données générées à l'aide d'un MCG. La résolution plus fine des RCM en comparaison avec les MCG permet de les utiliser pour des études à l'échelle locale comme dans le cas des études hydrologiques. Malgré que les RCM permettent de bien représenter le climat à l'échelle locale, ils présentent tout de même des erreurs systématiques [Sennikovs and Bethers, 2009; Minville *et al.*, 2009] et une méthode de correction du biais doit être appliquée.

4. Méthodologie / données

4.1 Indices éco-hydrologiques retenus et niveaux d'alerte

La communauté de chercheurs s'entend sur le fait qu'il est très difficile de définir scientifiquement et avec certitude un débit minimum nécessaire à la vie aquatique et qu'il est nécessaire de fixer collectivement ce niveau, à la lumière d'arguments scientifiques. Pour le bassin de la Yamaska, Zeestraten et al. (2011) ont retenu un certain nombre d'indices sur la base d'une utilisation antérieure documentée dans le nord-est de l'Amérique du Nord.

La méthode du Montana (communément appelé méthode de Tennant), la méthode NEFM (New England Flow Method), la méthode « 0.25 QMA », les fréquences de dépassement de 90% et 95% (Q_{90} et Q_{95}) et les indices statistiques de débit d'étiage, tel que le débit d'étiage de récurrence 2 ans sur 7 jours consécutifs (7Q2) ainsi que, de façon analogue, les 7Q10 et 30Q5 sont les méthodes qui ont été retenues dans le cadre de ce projet.

Ces indices seront utilisés pour établir un système d'alerte à plusieurs niveaux et structuré comme suit :

- **Vigilance** : pas vraiment un niveau d'alerte mais plutôt une valeur seuil pour le début d'une veille qui assure un suivi serré de l'évolution des débits
- **Débit d'objectif d'étiage (DOE)** : débit seuil en bas duquel des pertes de services écologiques sont déplorées
- **Alerte** : premier niveau
- **Alerte renforcée** : deuxième niveau
- **Crise** : débit de crise

Le système d'alerte proposé comporte donc essentiellement 4 niveaux: DOE (Débit Objectif d'Étiage), alerte, alerte renforcée et crise. Il ressemble en ce sens au système français du SMEAG. Seul le niveau Vigilance a été ajouté de notre cru. Il a été décidé que le niveau de crise doit correspondre au débit 7Q10, indice très utilisé pour représenter des conditions d'étiage sévère, auquel sont aussi habituellement associées des conditions écologiques pauvres (pertes d'usages et de services importantes).

Il est important de souligner qu'un système à 3 niveaux (DOE, alerte et crise) aurait tout aussi bien pu être proposé, mais il aurait logiquement maintenu le niveau d'alerte le plus sévère au même niveau (crise), soit le débit 7Q10. Le premier niveau serait vraisemblablement aussi le même dans un système à 3 niveaux. La valeur retenue pour le DOE correspond au débit $Q_{50août}$. Ce débit correspond à l'indice de la méthode NEFM (New England Flow Method) qui se définit comme le débit réservé de base qui protège les habitats aquatiques. Une fois franchi ce premier niveau, un système comportant 4 niveaux plutôt que trois permet simplement un plan d'intervention plus modulé au niveau des mesures imposées, la cible demeurant de tenter d'éviter d'atteindre le niveau de crise. Dans ce contexte, la signification (ou l'adéquation avec la réalité) du ou des niveaux d'alerte intermédiaires devient moins importante dans le début du cycle de vie du projet, l'essentiel demeurant d'informer les gestionnaires (et la population) des conditions de débit et de demeurer proactif. Le sixième point de l'approche ARMPC (« vérification du processus de contrôle ») servira à ajuster les niveaux, au besoin.

NOTE IMPORTANTE : Cette structure continuera d'être utilisée dans ce rapport. Nous avons cependant convenu avec le Ministère de la Sécurité Publique d'ajuster la nomenclature : le terme **Vigilance** sera remplacé par **Veille** sur le portail pour ne pas semer de confusion avec le projet « Vigilance » que le MSP est à mettre en place au Québec. De même, les appellations **Alerte** et **Alerte renforcée** seront remplacées respectivement par **Intervention générale** et **Alerte**.

Pour déterminer les indices statistiques de faibles débits, les plus faibles valeurs des débits moyens de 7 ou 30 jours consécutifs sont calculées pour chacune des années de l'historique disponible à une station hydrométrique. L'ajustement de cet échantillon est ensuite effectué à l'aide d'une distribution statistique. Il est toutefois primordial de vérifier si les données sont homogènes, indépendantes et stationnaires avant d'effectuer l'ajustement. Cette vérification a été faite à l'aide du logiciel Hyfran[®].

L'ajustement des échantillons a ensuite été fait avec différentes lois de distribution (Gumbel, GEV, LP3 et Weibull) et le critère d'information bayésien (BIC) permet de déterminer la loi de distribution qui s'ajuste le mieux aux données étudiées.

4.2 Prélèvements d'eau brute aux prises d'eau municipales

Les valeurs de prélèvements d'eau brute utilisées pour établir la vulnérabilité sont présentées au tableau 2 [Zeestraten, 2012]. Ces valeurs ont servi dans les calculs de vulnérabilité aux différents sites. Précisons que la municipalité de St-Damase a aussi une prise d'eau en rivière, en amont du barrage de St-Hyacinthe, et que le rejet de la station d'épuration des eaux usées se fait dans le même bief.

Tableau 2 - Prélèvements d'eau brute aux prises d'eau municipales

Municipalité	Volume prélevé annuellement (m³)	Production moyenne journalière (l/s)	Production maximale journalière (l/s)
Bromont	2 071 915	65.7	121.3
Cowansville	2 969 430	94.2	121.4
Farnham	2 492 268	79.0	105.8
Granby	12 524 910	377.9	508.6
St-Hyacinthe	10 682 094	366.0	545.0

4.3 Prévision des débits d'étiage

4.3.1 Tarrissement en l'absence de précipitation

Le système d'alerte doit permettre d'obtenir une prévision des débits des jours à venir. Une première approche a consisté à faire une prévision en hypothèse d'absence de précipitation à venir [SMEAG EPTB-Garonne, 2011], ce qui constitue un scénario « sécuritaire » du point de vue des seuils d'alertes. Elle repose sur l'analyse du tarissement de la rivière Yamaska. Cette analyse a été faite en se basant sur la méthode de détermination du tarissement proposée par Lang et al. (2006).

La diminution du débit en tarissement est supposée exponentielle et est représentée par l'équation suivante, dans laquelle t représente le nombre de jours suivant la valeur initiale (Q_0) de l'épisode considéré et α un coefficient de tarissement :

$$Q(t) = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (\text{équ. 1})$$

Les épisodes de tarissement sont définis comme une période au cours de laquelle les contraintes suivantes sont respectées :

- Les précipitations journalières sont inférieures à 1 mm
- Les débits vont en décroissant
- Le débit initial de la séquence est inférieur au débit moyen historique
- Les valeurs des débits ne s'éloignent pas de plus de 5 % d'une droite de tendance des 3 derniers points de la séquence
- Les premiers jours de chacune des séquences doivent être supprimés car il s'agit du temps de ressuyage dont la valeur en jour correspond à $Tr = A^{0,2}$, avec A représentant l'aire en km^2 .

En plus des différentes opérations statistiques qui sont effectuées sur les coefficients de tarissement de ces séquences dans le but d'en déterminer le coefficient α maître, le coefficient de tarissement de chacune des séquences est déterminé. Le coefficient α moyen peut donc être déterminé, ainsi que l'intervalle de confiance 25 % - 75 %. Les coefficients de tarissement ainsi obtenus ont ensuite été comparés aux situations réelles qui ont été observées dans la rivière au cours des dernières années. Les résultats obtenus n'étaient pas satisfaisants et n'ont pas permis de présenter une bonne prévision des débits, particulièrement en périodes chaudes et en périodes de très faibles débits, donc en périodes d'étiages sévères. L'utilisation de toutes les séquences de tarissement sans égard à la période a été remise en question. Les températures plus chaudes et les heures d'ensoleillement plus longues font en sorte que l'évaporation est plus importante en été qu'en hiver. Le coefficient de tarissement devrait donc être plus élevé en été qu'en hiver. Pour corriger la situation, seules les séquences de tarissement de la période estivale (considérée du 1^{er} mai au 31 octobre) ont été retenues. Les résultats obtenus avec cette nouvelle contrainte sont plus justes mais encore imprécis lors d'étiages très sévères. Pour pallier cette situation, différents coefficients de tarissement ont été déterminés, en fonction de différents facteurs :

- Le débit initial de chacune des séquences (Q_0)
- La température maximale des 7 jours précédant le jour 0
- La température maximale des 7 jours suivant le jour 0
- Le débit initial et la température maximale des 7 jours précédant le jour 0

Pour comparer les valeurs des débits mesurés aux différentes stations avec les valeurs prédites selon les différents coefficients de tarissement, la méthode des erreurs quadratiques moyennes (RMSE pour *root mean square error*) a été utilisée. Cette méthode permet de déterminer le coefficient de tarissement qui présente le meilleur ajustement. Pour chacune des séquences, la valeur RMSE est calculée pour les différents coefficients de tarissement et la plus petite valeur RMSE indique le coefficient de tarissement qui s'applique le mieux à la séquence.

Il a été retenu d'utiliser un coefficient de tarissement établi seulement en fonction du débit initial de chacune des séquences (Q_0) puisque cette méthode est celle qui primait le plus fréquemment. De plus, dans la plupart des cas où elle n'est pas celle offrant le meilleur ajustement, elle présente des valeurs de débits inférieures à celles observées. Elle correspond donc à un scénario « pessimiste » et de ce fait sécuritaire eu égard à une prévision qui sert d'alerte. Il y a donc très peu de chance d'observer des débits inférieurs à ceux qu'une prévision faite à l'aide de cette méthode présente.

4.3.2 Méthode des « k plus proches voisins »

La méthode dite des « k plus proches voisins » est une méthode stochastique de prévision des débits. Elle requiert de disposer d'une base de données d'apprentissage qui correspond, dans notre cas, à l'historique des débits observés. Cette base de données est constituée d'un nombre élevé de couples « entrée-sortie », qui sont représentés par le débit d'une journée en entrée et les débits des 7 jours suivants en sortie. Pour estimer la sortie associée à une nouvelle entrée, on calcule sa distance à tous les éléments de la base, selon des paramètres prédéterminés. La valeur de k représente le nombre de sorties qu'on veut prendre en compte pour effectuer la prévision.

Si l'on cherche à prévoir les débits journaliers des prochains jours, il faut donc trouver, dans l'historique des débits, des situations présentant un point de départ semblable au débit ainsi que des conditions météorologiques semblables ou encore des conditions d'humidité semblables. Ces données peuvent ensuite être utilisées pour prédire les débits des prochains jours, ou encore pour en déterminer un intervalle de confiance modélisé [Fortin *et al.*, 1997]. Différentes techniques sont proposées dans la littérature pour déterminer la quantité (k) de situations à retenir pour cette prévision.

Dans cette étude, pour la prévision des débits d'étiage, les deux paramètres qui ont été pris en compte sont la journée de l'année et le débit. Le nombre de situations (k) à retenir a été fixé arbitrairement à 8 pour permettre une bonne représentation graphique. Une plage de journées correspondant à la date des observations ± 5 jours a été retenue comme paramètre invariable. Les débits les plus semblables à celui de la journée de prévision des débits sont donc recherchés dans l'historique des débits.

Le tableau 3 [Zeestraten, 2012] présente un exemple pour un débit de $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ observé le 4 août 2011. Une recherche est effectuée dans l'historique disponible pour les journées du 30 juillet au 9 août pour déterminer l'occurrence de débits près de $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Les huit valeurs retenues dans le passé sont représentées en gras. Pour la prévision 7 jours, les débits correspondant aux 7 jours suivant ceux ayant une situation semblable dans l'historique sont utilisés.

Tableau 3 - Exemple d'historique des débits (m³/s)

Année	30 juil.	31 juil.	1 août	2 août	3 août	4 août	5 août	6 août	7 août	8 août	9 août
2000	0.32	0.30	0.28	0.27	0.28	0.41	0.55	0.50	0.46	0.44	0.54
2001	0.29	0.26	0.25	0.22	0.20	0.17	0.15	0.12	0.09	0.08	0.08
2002	1.38	1.77	1.50	2.31	3.22	1.97	1.49	1.21	1.05	0.94	0.82
2003	0.33	0.30	0.27	0.24	0.22	0.21	0.33	1.63	2.16	1.86	7.28
2004	1.86	1.88	18.27	7.32	3.53	3.42	2.65	2.18	1.98	3.30	4.83
2005	1.66	1.30	1.04	0.85	0.74	0.65	0.57	0.52	0.46	0.40	0.34
2006	1.13	1.17	1.19	2.03	31.19	7.59	3.21	2.03	1.55	1.28	1.06
2007	0.71	0.64	0.58	0.51	0.48	0.96	1.33	1.83	2.76	2.44	1.87
2008	2.46	2.40	4.04	3.91	13.80	17.84	8.53	14.25	39.44	15.42	19.95
2009	1.69	1.42	1.36	1.42	3.15	2.50	2.09	2.13	2.26	2.15	1.75
2010	0.75	0.67	0.60	0.55	2.43	46.01	18.86	5.70	3.17	2.46	4.94

Un ajustement comprenant deux opérations doit être apporté, car le débit n'est pas exactement le même que celui observé. Il y a tout d'abord une translation dans le temps des débits vers la date de la prévision voulue et ensuite un ajustement des valeurs de débits pour que le débit initial de la séquence de prévision corresponde au débit observé le jour même. Le tableau 4 [Zeestraten, 2012] présente un exemple d'ajustement effectué sur une série de débits pour obtenir une prévision 7 jours. L'algorithme développé sur le portail du site fonctionne tel que décrit ci-avant.

Tableau 4 - Ajustement des débits pour la méthode des k plus proches voisins (m³/s)

Jour	Débit observé en 2011	Débit en 2000	Translation des débits vers la date voulue	Différence (2011 et 2000)	Prévision avec ajustement
4 août	0.5		0.55	-0.05	0.50
5 août		0.55	0.50		0.45
6 août		0.50	0.46		0.41
7 août		0.46	0.44		0.39
8 août		0.44	0.54		0.49
9 août		0.54	0.64		0.59
10 août		0.64	0.69		0.64
11 août		0.69	0.97		0.92
12 août		0.97			

4.3.3 Approche par modélisation hydrologique

4.3.3.1 Calage du modèle HYDROTEL©

Le modèle HYDROTEL [Fortin et al., 2001] est utilisé pour simuler les débits sur le bassin versant de la rivière Yamaska. HYDROTEL est utilisé par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) pour la simulation des crues printanières au Québec. Il a aussi été utilisé dans plusieurs études sur les changements climatiques [Quilbé, et al., 2008; Minville et al., 2009; Aissia, 2012]. HYDROTEL est un modèle distribué incluant cinq sous-modèles simulant différents processus hydrologiques : l'accumulation et la fonte de neige, l'évapotranspiration potentielle, le bilan hydrique vertical, l'écoulement dans la zone non saturée, et l'écoulement en rivière. HYDROTEL permet de choisir différentes méthodes pour simuler ces différents processus. Le tableau 5 présente les options choisies dans cette étude.

Tableau 5 - Sous-modèles utilisés dans le modèle HYDROTEL

Sous-modèle	Option choisie
Accumulation et fonte de neige	Approche mixte de degrés-jours et bilan d'énergie (Turcotte, 2007)
Évapotranspiration potentielle	Hydro-Québec (Fortin et al, 2001)
Bilan hydrique vertical	BV3C (Fortin et al., 2001)
Écoulement dans la zone non saturée	Onde cinématique
Écoulement en rivière	Onde cinématique

Le modèle HYDROTEL a été calibré et validé afin de bien représenter les débits d'étiage. Une calibration automatique utilisant l'algorithme SCE-UA [Duan et al., 1993] est utilisée. Typiquement, un coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE) [Nash et Sutcliffe, 1970] est utilisé pour le calage des modèles hydrologiques. Par contre, le NSE met l'accent sur les forts débits (crues) dans le processus de calage. Ainsi, le calage a d'abord été effectué avec une fonction objective caractérisant les faibles débits. Un 7Q2 relatif a d'abord été utilisé. Le 7Q2 correspond au débit minimum de récurrence 2 ans calculé sur la moyenne des débits sur 7 jours :

$$7Q2 \text{ relatif} = |7Q2 \text{ simulé} - 7Q2 \text{ observé}| / 7Q2 \text{ observé}$$

Par contre, lors du calage avec un 7Q2 relatif uniquement, il s'est avéré que la crue printanière n'était souvent pas simulée par le modèle (aucune accumulation et fonte du couvert de neige). Ainsi, une fonction objective incluant le NSE et le 7Q2 relatif a été utilisée afin d'une part, de bien simuler les débits d'étiage, et d'autre part, de s'assurer que la crue printanière était simulée. Le bassin versant de la rivière Yamaska comporte des réservoirs régularisant le débit, en particulier le réservoir Choinière. Lors du processus de calage, les débits à la sortie des réservoirs ont été imposés avec l'historique des débits. Les résultats du calage et de la validation sont présentés dans le tableau 6.

Tableau 6 - Résultats du calage et validation du modèle HYDROTEL

	Calage (1996-2006)	Validation (1990-1996 et 2006-2010)
030302		
Nash-Sutcliffe	0.63	0.62
7Q2 observé	2.11	2.41
7Q2 simulé	2.45	2.84
030304		
Nash-Sutcliffe	0.48	0.49
7Q2 observé	0.88	0.99
7Q2 simulé	1.02	1.21
030314		
Nash-Sutcliffe	0.51	0.57
7Q2 observé	0.15	0.18
7Q2 simulé	0.14	0.24
030345 (validation 2006-2010 uniquement)		
Nash-Sutcliffe	0.46	0.53
7Q2 observé	2.50	5.18
7Q2 simulé	2.91	6.21

Pour les modélisations en climat futur, il a été choisi de faire les simulations sans la régulation aux réservoirs puisque cette régulation pourrait changer dans le futur, les conditions de crue étant modifiées dans le futur. Les paramètres de calage restent les mêmes. Les simulations en périodes référentielle et future sont donc faites en état naturel, sans considérer la gestion aux réservoirs. Les simulations en période référentielle peuvent également être réalisées sur une plus grande période, puisque les débits historiques aux réservoirs ne couvrent pas toute la période de 1971 à 2000.

4.3.3.2 Descriptions des projections climatiques

Pour cette étude, un total de 12 projections climatiques a été utilisé, soit 7 projections provenant du projet NARCCAP [Mearns, et al., 2007] auxquelles s'ajoutent 5 membres du Modèle Régional de Climat Canadien (MRCC) piloté par le Modèle Climatique Global Canadien - version 3 (CGCM3). Quatre modèles globaux (GCMs) fournissent les conditions frontières aux modèles régionaux (RCMs): Canadian Global Climate Model version 3 (CGCM3) [Flato, 2005]; le Community Climate Model version 3 (CCSM3) [Collins, et al. 2006]; le Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) Climate Model, version 2.1 [GFDL, 2004]; et le Hadley Centre Climate Model version 3 (HadCM3) [Gordon et al., 2000; Pope et al., 2000]. Les caractéristiques de ces modèles et leur évaluation peuvent également être trouvées dans Randal et al., (2007), en plus des références citées pour chacun des modèles. Quatre modèles régionaux (RCMs) sont utilisés pour faire des simulations à plus petite échelle : le Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC) [Ouranos, 2012]; le Hadley regional Model 3 (HRM3) [PRECIS, 2012]; le Regional Climate Model version 3 (RCM3) [Pal et al., 2007] et le Weather Research and Forecasting model (WRF) (Skamarock et al., 2008).

Le tableau 7 présente un résumé des différentes projections climatiques du projet NARCCAP utilisées dans cette recherche.

Tableau 7 - Projections climatiques du projet NARCCAP

Modèles régionaux	Modèles globaux			
	CCSM	CGCM3	GFDL	HadCM3
MRCC	X	X		
HRM3				X
RCM3		X	X	
WRF	X	X		

Une correction de biais sur les températures et précipitations est effectuée afin d'ajuster les périodes référentielle et future avec les observations de la période référentielle. Cette méthode suppose donc que le biais relatif des modèles climatiques sera le même pour la période future que pour la période référentielle.

Pour les températures, une correction basée sur les moyennes mensuelles est réalisée [Minville et al., 2009]. La différence entre la moyenne mensuelle des températures observées et la moyenne mensuelle des températures simulées en période référentielle est appliquée aux données journalières en périodes référentielle et future. Les précipitations sont débiaisées autant pour la fréquence moyenne mensuelle de précipitations (ratio du nombre de jours au-dessus d'un seuil de précipitation sur le nombre de jours dans le mois) que l'intensité moyenne mensuelle de précipitations (précipitation moyenne journalière) avec la méthode Local Intensity (LOCI) selon Schmidli et al. (2006).

4.4 Application de mesures de restriction

Pour obtenir une réduction des prélèvements lors de la mise en application du système d'alerte aux étiages, des mesures de restriction doivent être identifiées et associées aux différents niveaux d'alerte. Différents niveaux d'intervention sont proposés pour les différents types d'utilisateurs de la ressource : usage domestique privé, usage domestique public, usage industriel et usage agricole. Les mesures de restriction ne sont cependant pas applicables si l'eau provient de réserves pluviales (barils d'eau de pluie).

La figure 6 [Zeestraten, 2012] montre comment les mesures deviendraient de plus en plus restrictives en fonction des niveaux d'alerte.

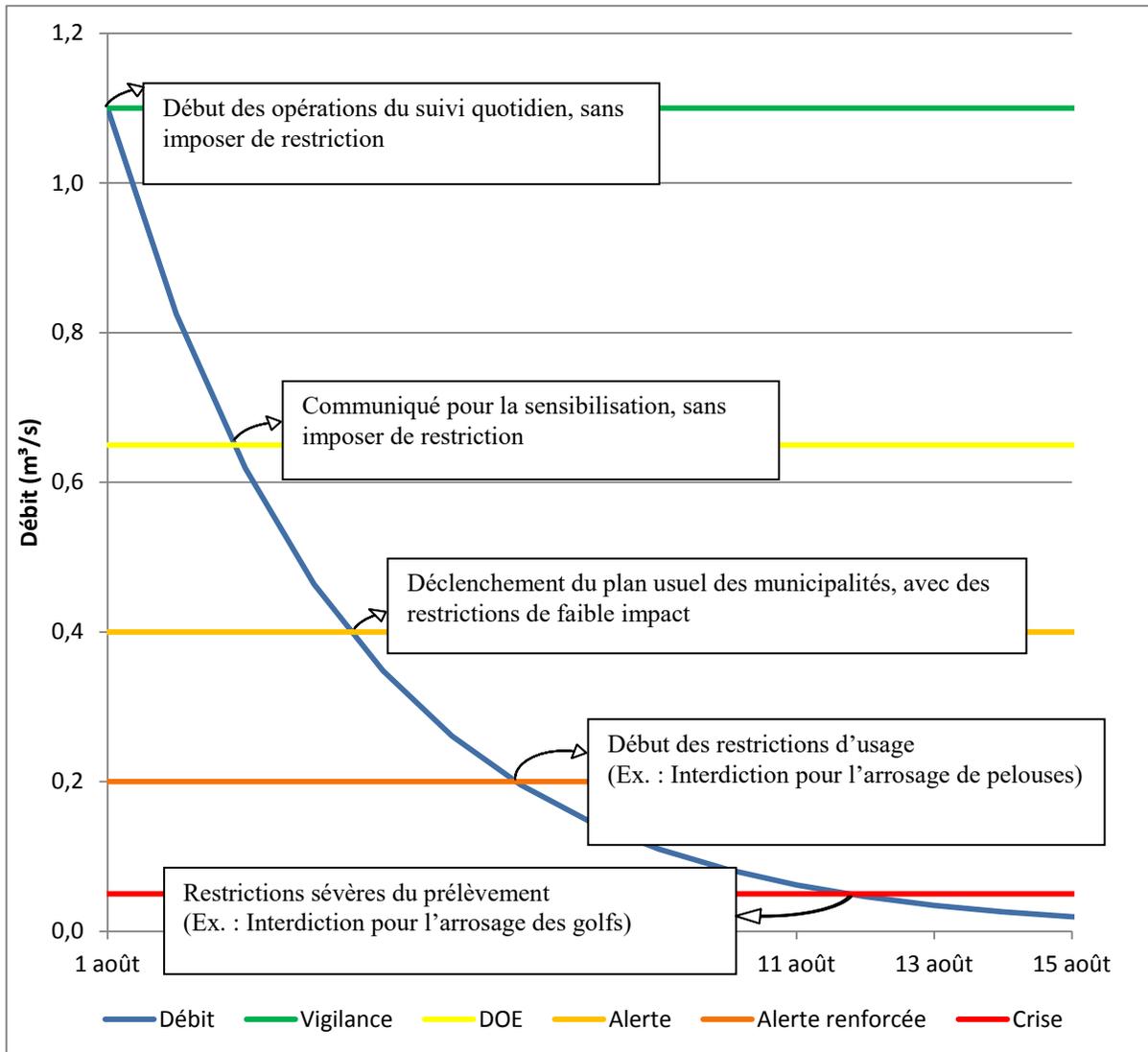


Figure 6 - Proposition de hiérarchisation des mesures de restriction

5. Résultats

5.1 Quantification des indices éco-hydrologiques et niveaux d'alerte

Les résultats d'analyse montrent que la distribution de Weibull s'applique le mieux à 6 échantillons sur le total des 15 échantillons, la distribution de Gumbel à 5 échantillons, la distribution LP3 à 3 échantillons et finalement, la distribution GEV à 1 seul échantillon (le critère de forme correspondant à un Weibull inverse). On peut donc conclure que pour les périodes d'étiage sur le BVRY, les lois de distribution de Weibull et Gumbel sont les plus appropriées. Chacune des stations a toutefois été traitée avec la loi de distribution offrant le meilleur ajustement.

Située à Cowansville, la station hydrométrique 030314 mesure les débits depuis plus de 30 ans. Le bassin versant de cette branche sud-est de la rivière Yamaska a une superficie de 210 km². L'historique des débits moyens journaliers depuis 1979 a été analysé pour faire ressortir les différences et les ressemblances entre les différents indices permettant de déterminer les débits d'étiage.

Les différents indices présentés précédemment ont été analysés pour déterminer ceux qui devraient s'appliquer à un futur système d'alerte aux étiages à la station 030314. Pour mieux visualiser l'arrangement des différents indices, ceux-ci sont représentés graphiquement à la figure 7 [Zeestraten, 2012].

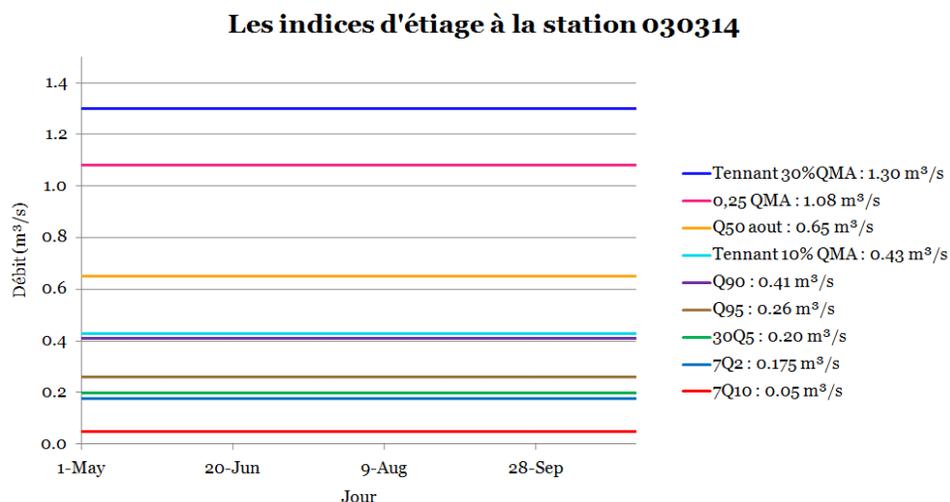


Figure 7 - Les indices d'étiage calculés pour la station 030314

L'annexe B présente les résultats obtenus pour les autres stations du bassin.

La figure 8 [Zeestraten, 2012] montre les niveaux d'alerte qui ont été retenus pour la station 030314, située à Cowansville, après regroupement de certains indices dont les valeurs calculées se retrouvent très près les uns des autres [Zeestraten, 2011].

- **Vigilance** : débit correspondant approximativement à 0.25QMA
- **Débit d'objectif d'étiage (DOE)** : débit correspondant approximativement à Q₅₀ août
- **Alerte** : débit correspondant approximativement à Tennant 10% et Q₉₀
- **Alerte renforcée** : débit correspondant approximativement à Q₉₅, 30Q5 et 7Q2
- **Crise** : débit correspondant approximativement à 7Q10

L'ordre des indices les uns par rapport aux autres pourra toutefois différer légèrement d'une station à l'autre. Cela s'explique en partie parce que certaines sections de la rivière sont régularisées par des barrages, ce qui crée certaines différences entre les degrés de sévérité des différents indices. Rappelons que le but de l'exercice est d'en arriver à deux niveaux d'alerte intermédiaires entre le **DOE** et le niveau de **crise**.

Les niveaux d'alerte proposés à la station 030314

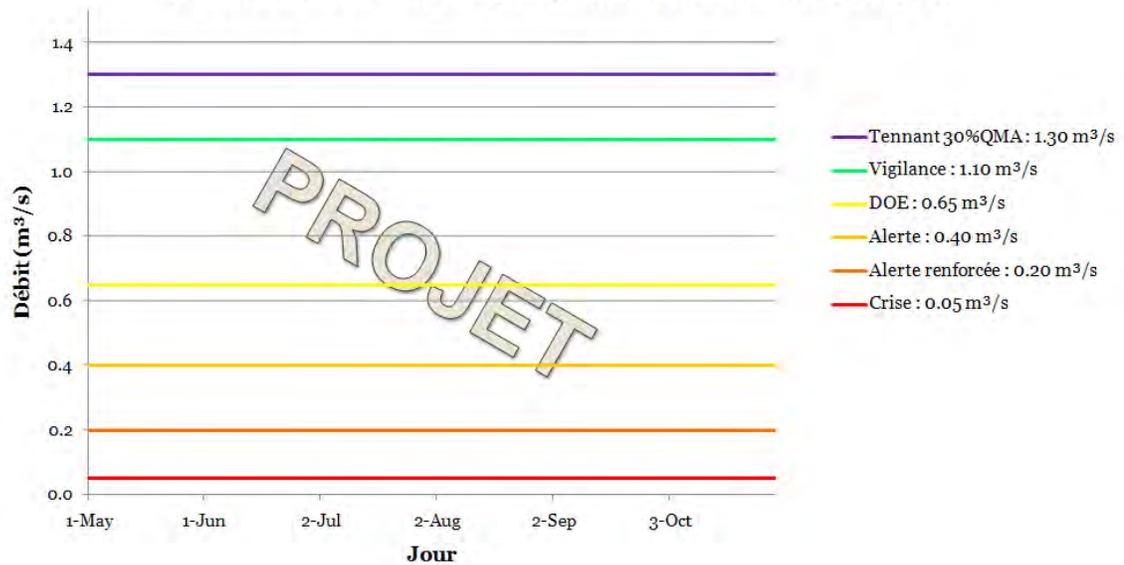


Figure 8 - Les niveaux d'alerte proposés pour la station 030314

L'annexe C présente les niveaux d'alerte retenus et proposés pour les autres stations du bassin versant.

5.2 Viabilité des niveaux d'alerte

Une façon de vérifier la viabilité politico-économique de l'ensemble des niveaux d'alerte proposés est de l'appliquer à la série de données disponibles (1979 – 2010 dans le cas de la station de Cowansville). A titre d'exemple, pour l'année 2001, reconnue comme une année ayant connu des étiages historiques, le débit est descendu plusieurs jours sous le niveau de crise proposé. La figure 9 [Zeestraten, 2012] illustre bien la situation rencontrée en 2001.

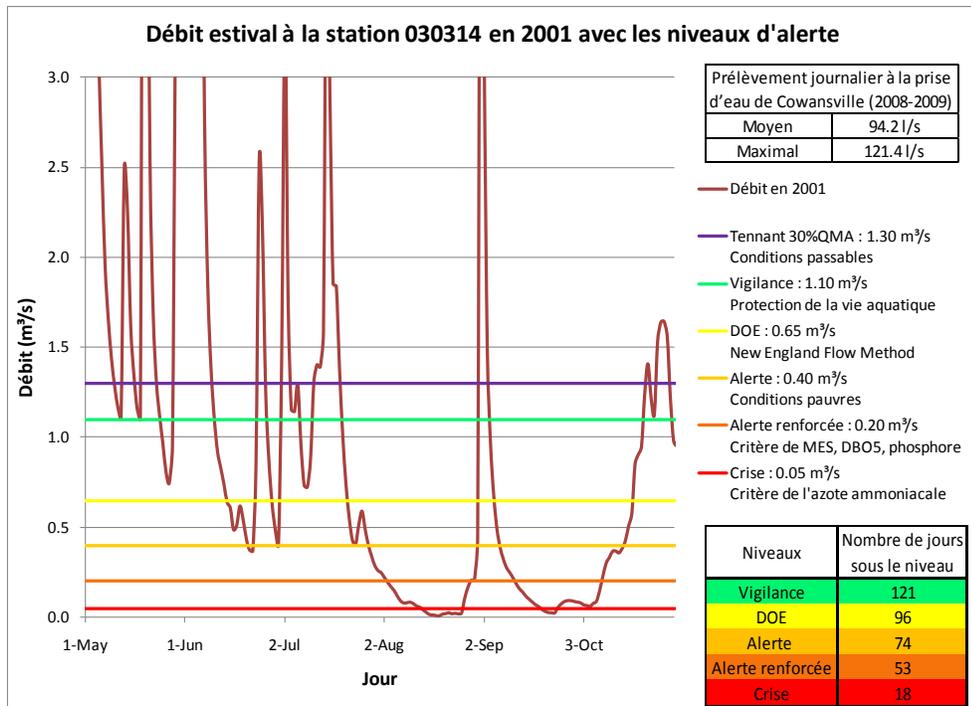


Figure 9 - Débit estival à la station 030314 en 2001

Selon les niveaux d'alerte proposés, la ville de Cowansville aurait été 18 jours sous le niveau de crise et 53 jours en alerte renforcée en 2001. Heureusement, toutes les années ne donnent pas lieu à des débits aussi critiques qu'en 2001. Par exemple, les débits de l'année 2010 sont présentés à la figure 10 [Zeestraten, 2012].

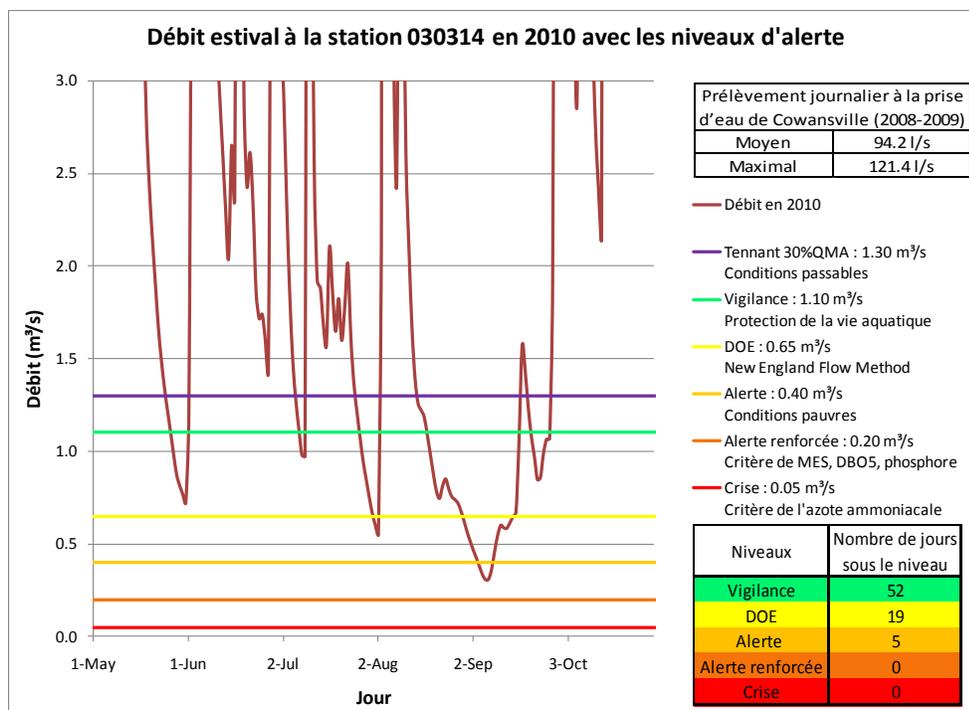


Figure 10 - Débit estival à la station 030314 en 2010

La viabilité de toute autre proposition de niveaux d'alerte pourrait être établie de la même manière.

5.3 Évaluation de la vulnérabilité

Une analyse des deux indices de vulnérabilité [Bérubé, 2007 et Nantel, 2006] a été effectuée pour les principales municipalités du bassin versant qui ont une prise d'eau brute en rivière et les résultats sont présentés au tableau 8 [Zeestraten, 2012].

- Vulnérabilité de la demande en eau = $7Q2 / \text{Prélèvement moyen annuel}$
- Vulnérabilité de l'habitat aquatique = $15\% \text{ du } 7Q2 / \text{Prélèvement moyen annuel}$

Pour déterminer la vulnérabilité, les prélèvements effectués à la prise d'eau, lorsque celle-ci est située en amont de la station de mesure hydrométrique, ont été ajoutés aux débits observés pour obtenir l'indice 7Q2 en débit naturel. Cette modification s'applique aux différentes villes où la station de mesure hydrométrique est située entre la prise d'eau et le rejet de la station d'épuration. Il n'est toutefois pas possible de déterminer la vulnérabilité de cette façon à Bromont et Granby puisqu'une gestion des réserves est effectuée en amont.

Tableau 8 - Vulnérabilité selon le prélèvement moyen annuel

Ville	Station	7Q2 naturel (l/s)	15 % du 7Q2 (l/s)	Prélèvement moyen annuel (l/s)	Vulnérabilité : demande en eau	Vulnérabilité : habitat aquatique
Cowansville	030314	288.0	43.2	94.2	3.06	0.46
Farnham	030302	2970.0	445.5	79.0	37.59	5.64
St-Hyacinthe	030345	4890.0	733.5	366.0	13.36	2.00

Il ressort du tableau 8 que la municipalité de Cowansville serait vulnérable pour la protection de l'habitat aquatique, mais pas pour la demande en eau, en se basant sur les indices utilisés. Il faut cependant éviter de conclure trop rapidement, ces indices ayant été développés pour établir une analyse comparative.

Pour évaluer la vulnérabilité de Bromont et Granby (sites fortement régularisés), les débits garantis selon les conventions de gestion des réserves amont ont été utilisés. Ces conventions précisent le débit minimal qui doit être relâché au barrage. Une fraction de 15% de ce débit devrait donc être la valeur du prélèvement maximal [Québec, 2012].

La convention en vigueur entre Bromont et Lac Brome fait en sorte que celle-ci doit assurer en tout temps un débit minimum à la sortie du barrage équivalant à 0.88 m³/s (880 l/s) avec possibilité de réduire ce débit à 0.60 m³/s dans certaines circonstances et à certains moments de l'année et une possibilité d'augmenter ce débit à 1 m³/s [Renaissance Lac Brome, 2011]. Il est considéré dans cette analyse de la vulnérabilité que le débit à la sortie du barrage demeure supérieur ou égal à 0.88 m³/s. Il en découle que le débit à la prise d'eau de Bromont ne descend théoriquement pas sous la valeur de 0.88 m³/s puisqu'aucun prélèvement n'est effectué entre la station de mesure à Lac Brome et la prise d'eau de Bromont en période estivale.

De même pour Granby, le débit minimum au lac Boivin est de 1.4m³/s (1400 l/s), ce qui est supérieur à la valeur du 7Q2 calculée à l'aide du débit naturel [Centre d'expertise hydrique du Québec, 2004].

En utilisant les valeurs des débits qui sont garantis presque en tout temps (tableau 9 - [Zeestraten, 2012]), on observe que Bromont est loin de cette limite de la vulnérabilité, mais que Granby serait vulnérable pour l'habitat aquatique. La gestion des différents lacs et réservoirs permettrait toutefois d'assurer un débit minimum suffisant à la conservation de l'habitat aquatique à Granby.

Tableau 9 - Vulnérabilité selon le prélèvement moyen annuel (Bromont et Granby)

Ville	Débit garanti (l/s)	15 % du débit (l/s)	Prélèvement moyen annuel (l/s)	Vulnérabilité : demande en eau	Vulnérabilité : habitat aquatique
Bromont	880.0	132.0	65.7	13.39	2.01
Granby	1400.0	210.0	377.9	3.70	0.56

La vulnérabilité a aussi été analysée en considérant la pointe journalière plutôt que le prélèvement moyen annuel, tout en conservant les valeurs des débits garantis à Bromont et

Granby. Encore une fois, ces calculs indiquent une vulnérabilité à Cowansville et Granby. Les tableaux 10 et 11 [Zeestraten, 2012] présentent les résultats obtenus.

Tableau 10 - Vulnérabilité selon la pointe journalière

Ville	Station	7Q2 (l/s)	15 % du 7Q2 (l/s)	Pointe journalière (l/s)	Vulnérabilité : demande en eau	Vulnérabilité : habitat aquatique
Cowansville	030314	288.0	43.2	121.4	2.37	0.36
Farnham	030302	2970.0	445.5	105.8	28.07	4.21
St-Hyacinthe	030345	489.00	733.5	545.0	8.97	1.35

Tableau 11 - Vulnérabilité selon la pointe journalière (Bromont et Granby)

Ville	Débit garanti (l/s)	15 % du débit (l/s)	Pointe journalière (l/s)	Vulnérabilité : demande en eau	Vulnérabilité : habitat aquatique
Bromont	880.0	132.0	121.4	7.25	1.09
Granby	1400.0	210.0	508.6	2.75	0.41

La figure 11 [Zeestraten, 2012] représente graphiquement la vulnérabilité selon la protection de l'habitat aquatique pour le prélèvement moyen annuel et la pointe journalière.

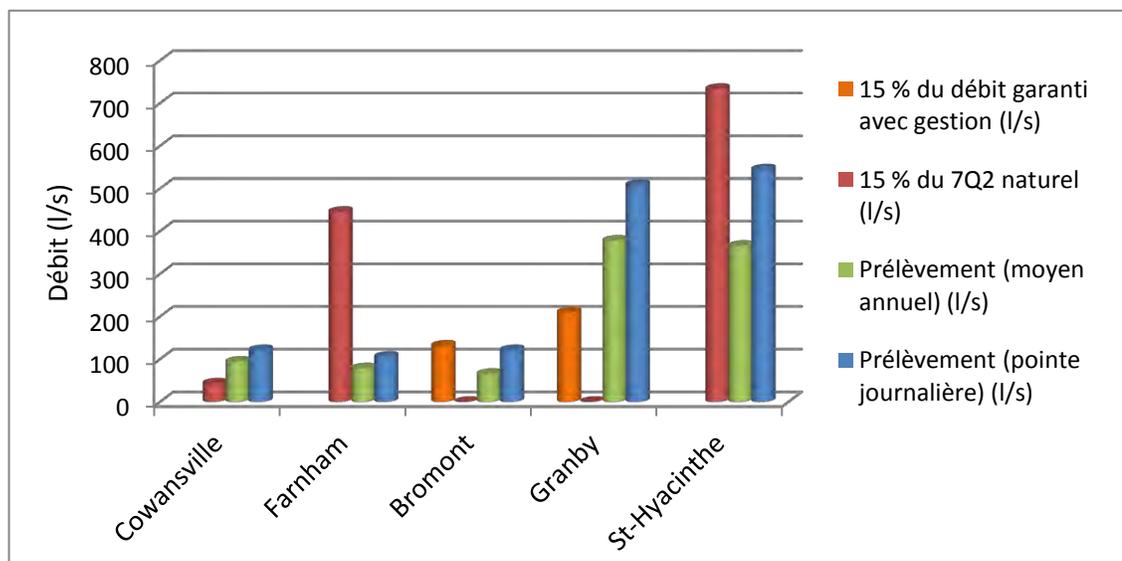


Figure 11 - Vulnérabilité pour la protection de l'habitat aquatique

Bien que la situation à Granby semble critique, la gestion des réservoirs et lacs en amont de la ville permet une gestion de la ressource en eau assez serrée pour permettre de soutenir un débit suffisant en période estivale, et ce, même en période de sécheresse. Le réservoir Choinière retient un volume d'eau équivalent à plus de deux fois la consommation totale annuelle de la ville de Granby [Centre d'expertise hydrique du Québec, 2004].

L'état de la situation à Cowansville est plus critique puisque la réserve d'eau du réservoir Davignon est plus modeste. C'est pour cette raison que cette municipalité sert d'exemple dans ce rapport pour décrire les étapes ayant servi à l'élaboration du système d'alerte.

Cette étape visait surtout, à l'aide des données disponibles, à faire, et ce de façon intérimaire, une sélection préliminaire appropriée et fonctionnelle de niveaux d'alerte avec une préoccupation de « pragmatisme opérationnel » permettant de poursuivre l'exercice visé, soit le développement d'un prototype de système d'alerte. Il importe de commencer à valider les niveaux d'alerte proposés par des observations et des mesures de terrains faites à des points de contrôle jugés critiques et répartis sur l'ensemble du réseau hydrographique. L'approche ARMPC (Analyse de Risques et Maîtrise des Points de Contrôle) décrite plus loin permettra d'aller dans ce sens et pourrait mener à une adaptation des niveaux d'alerte aux réalités locales de vulnérabilité environnementale et d'approvisionnement en eau.

5.4 Prévission selon les trois méthodes

Le portail du système d'alerte permet de visualiser les prévisions faites à chaque journée.

5.4.1 Méthode du tarissement et prévision

Les différents coefficients de tarissement calculés aux différents sites sont présentés au tableau 12. Les sites de Granby et Bromont étant régularisés par des réservoirs en amont, ils sont absents du tableau.

Tableau 12 - Coefficients de tarissement

	Débit (m ³ /s)	Coefficient α
St-Hyacinthe	$Q_o < 4.4$	0.0725
	$4.4 \leq Q_o \leq 7.27$	0.145
	$7.27 \leq Q_o \leq 10.30$	0.154
	$10.30 \leq Q_o \leq 14.35$	0.082
Rivière Noire	$Q_o \leq 1.45$	0.0637
	$1.45 \leq Q_o \leq 2.5$	0.0781
	$2.5 \leq Q_o \leq 4.0$	0.0993
	$4.0 \leq Q_o \leq 6.63$	0.1209
	$Q_o > 6.63$	0.1216
Farnham	$Q_o \leq 3$	0.009
	$3 \leq Q_o \leq 4.1$	0.047
	$4.1 \leq Q_o \leq 5.54$	0.068
	$5.54 \leq Q_o \leq 6.1$	0.045
	$Q_o > 6.1$	0.084
Cowansville	$Q_o \leq 0.2$	0.1606
	$Q_o > 0.2$	0.1124

Un exemple de prévision sur 7 jours effectuée au cours de l'été 2011 pour Cowansville est présenté à la figure 12 [Zeestraten, 2012]. On voit une bonne concordance entre les prévisions

effectuées et ce qui s'est passé en réalité, jusqu'à ce qu'une précipitation vienne faire augmenter le débit.

5.4.2 Méthode des k les plus proches voisins et prévision

Cette méthode stochastique de prévision des débits permet d'obtenir des résultats très diversifiés. La figure 12 [Zeestraten, 2012] montre un exemple de prévision obtenue pour la station de Cowansville le 15 juillet 2011. Puisque cette méthode de prévision ne tient pas compte comme tel des précipitations (à part celle implicitement présentes dans les séquences utilisées), on observe dans certaines situations des débits qui augmentent dû à la présence de précipitations. L'enveloppe inférieure des courbes générées apporte tout de même un aperçu des débits qui ont été observés dans le passé en l'absence de précipitations. Il est enfin intéressant de noter que la courbe de tarissement et la courbe des k plus proches voisins sont en concordance.

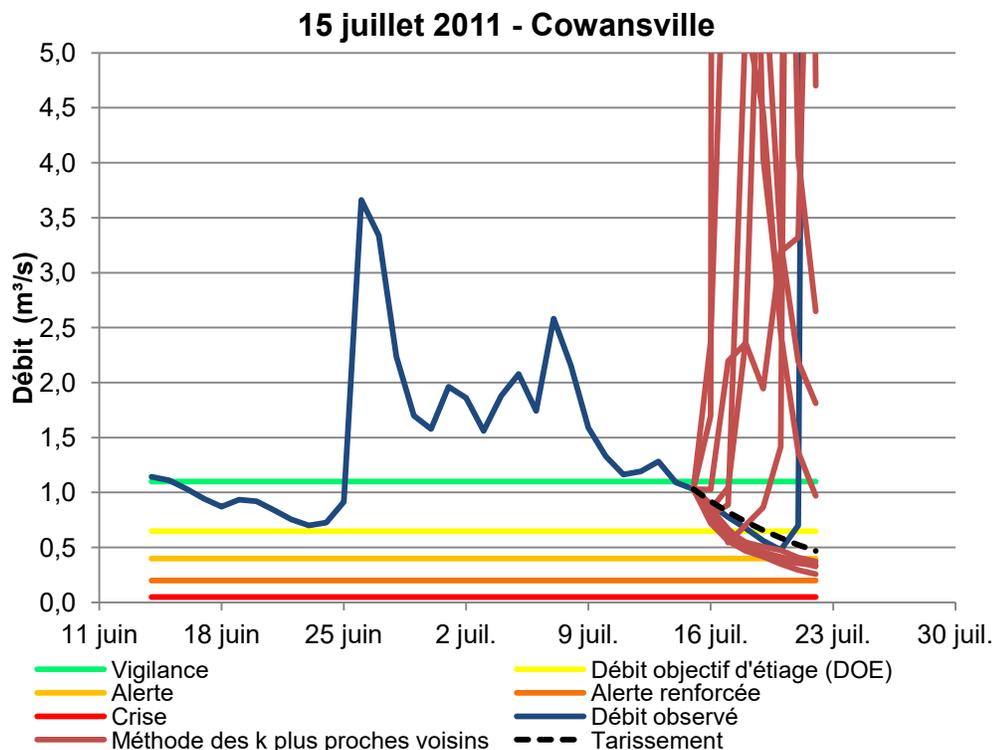


Figure 12 – Résultats de prévision

5.4.3 Méthode hydrologique et prévision

Le modèle HYDROTEL[®] est utilisé de manière opérationnelle pour la prévision des débits à différents endroits sur le bassin versant de la rivière Yamaska. L'état initial du bassin versant est établi à l'aide des observations de précipitations et de températures d'Environnement Canada. Les données GRIB2 d'Environnement Canada sont ensuite utilisées pour faire une prévision sur 4 jours. Pour effectuer la prévision, les débits à la sortie des réservoirs sur le bassin sont fixés

dans HYDROTEL[®] en utilisant la moyenne pour la journée de l'ensemble des données de débits disponibles.

Des prévisions sont donc réalisées depuis la mi-juillet 2012. La figure 13 en présente des exemples. Rappelons qu'il s'agit d'un projet pilote : des améliorations aux prévisions ont eu lieu au cours de la période et continueront d'avoir lieu. Aussi, la précision de la prévision est fortement dépendante de la prévision météorologique d'Environnement Canada. Enfin, durant cette période, des épisodes d'étiage sévère ont eu lieu, ce qui a permis de tester le modèle dans ces conditions.

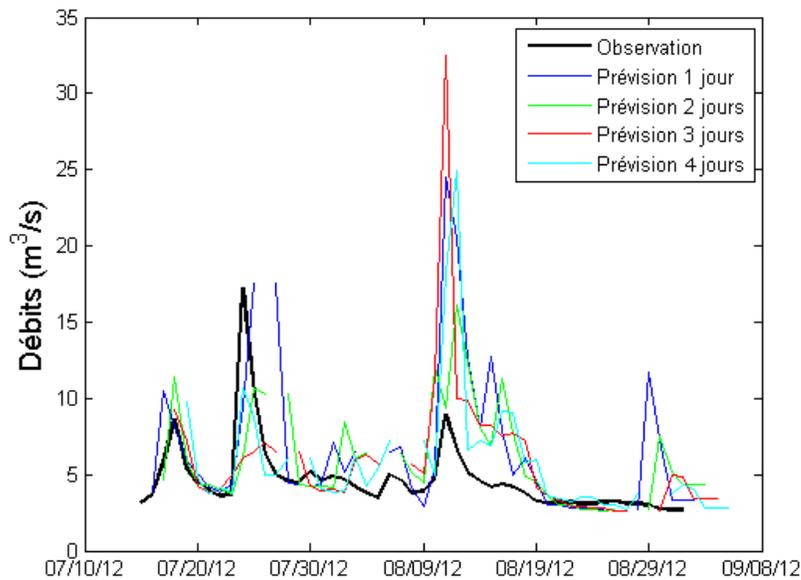


Figure 13a - Prévision réalisée lors de l'été 2012 pour la station 030302

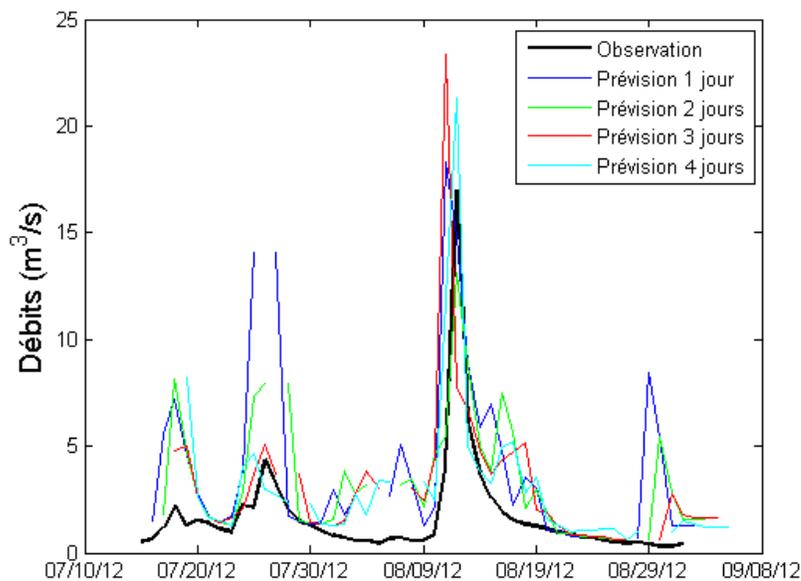


Figure 13b - Prévision réalisée lors de l'été 2012 pour la station 030304

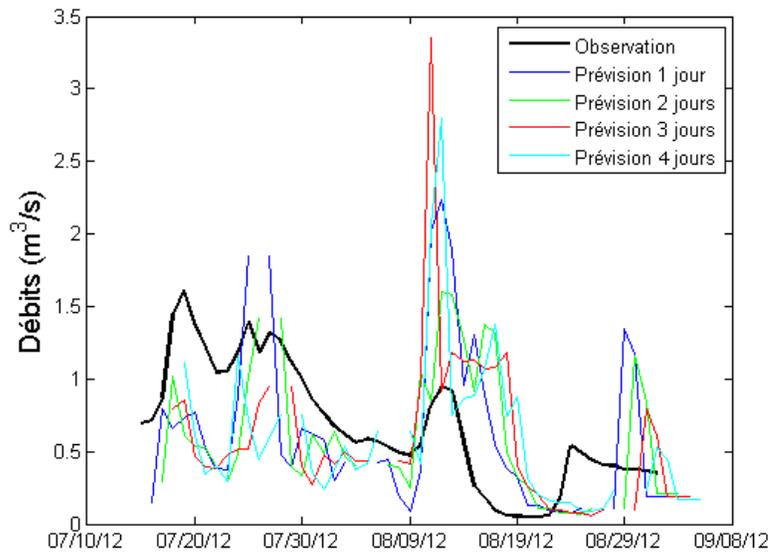


Figure 13c - Prévion réalisée lors de l'été 2012 pour la station 030314

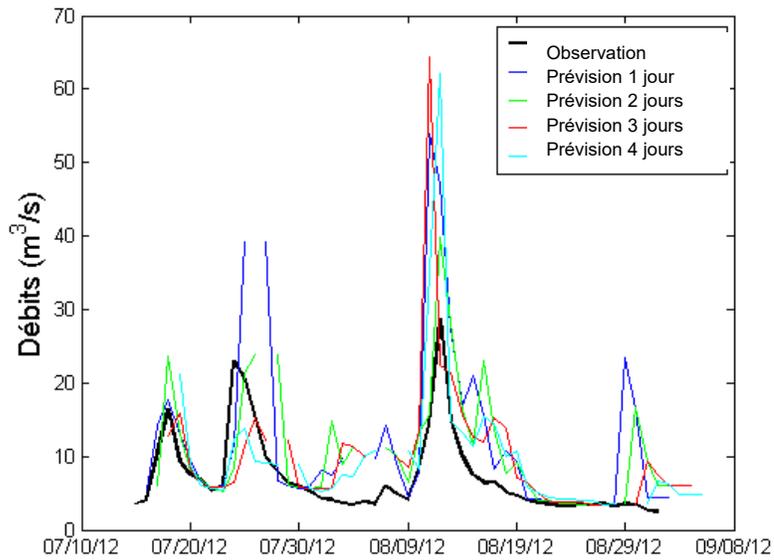


Figure 13d - Prévion réalisée lors de l'été 2012 pour la station 030345

5.5 Effets des CC sur les débits d'été

Les résultats obtenus indiquent une dégradation des conditions de faibles débits dans le futur, particulièrement pour les mois de juin et d'août. De plus, les débits de récurrence 7Q2 et 7Q10 diminuent respectivement de 16 à 64 % et de 18 à 45 % selon l'endroit sur le bassin versant. L'analyse des températures et des précipitations semble indiquer que la dégradation des conditions en étiage provient principalement de la hausse des températures et non pas d'un changement dans le régime des précipitations. En effet, l'évapotranspiration potentielle augmente de 22 à 34 % dans le futur alors que le nombre maximum de jours secs consécutifs de récurrence 30 ans demeure similaire.

5.5.1 Projections climatiques sur le bassin versant de la rivière Yamaska

Dans un premier temps, une analyse des variations de température et de précipitation entre la période référentielle (1971-2000) et la période future (2041-2070) pour l'ensemble de 12 projections climatiques est faite.

L'écart entre les températures minimale et maximale pour les mois de mai à octobre entre la période référentielle (1971-2000) et la période future (2041-2070) est présenté à la figure 14. On observe un écart significatif (p values < 0.05) entre les deux périodes. Selon ces projections climatiques, la température maximale augmentera de 2.3°C à 3.1°C selon le mois, et la température minimale augmentera de 2.4°C à 2.8°C selon le mois.

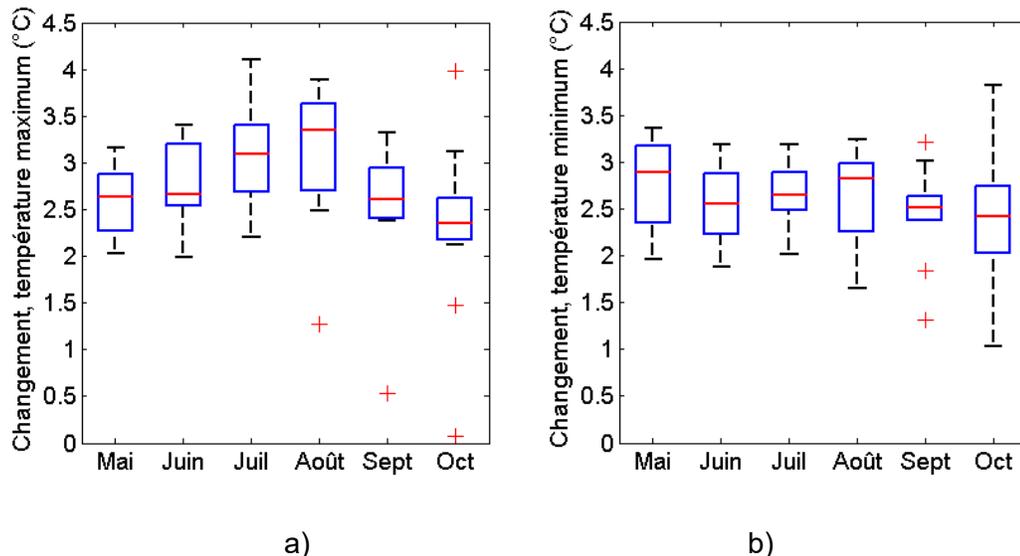


Figure 14 - Augmentation des températures maximales (a) et minimales (b) dans le futur (2041-2070) par rapport à la période référentielle (1971-2000)

L'écart de précipitations entre la période référentielle et la période future ne présente pas de différence significative pour les mois de juin, juillet, août et septembre. Certaines projections climatiques prévoient une augmentation des précipitations alors que d'autres prévoient une diminution. Pour les mois de mai et octobre, les projections climatiques prévoient cependant une augmentation des précipitations avec un écart significatif (figure 15).

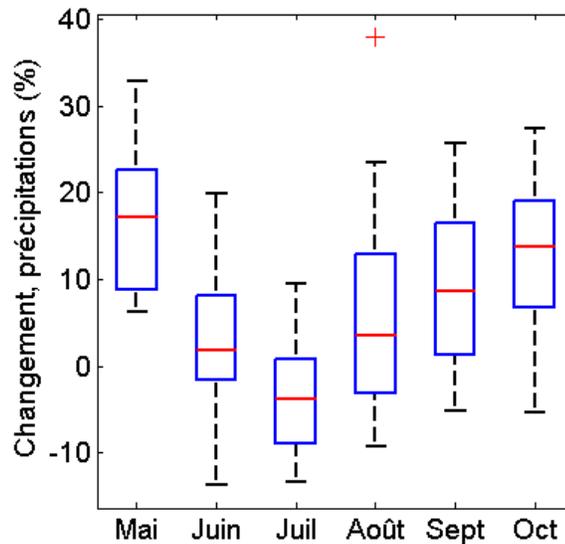


Figure 15 - Variations dans les précipitations dans le futur (2041-2070) par rapport à la période référentielle (1971-2000)

Les faibles débits peuvent être influencés autant par l'évaporation que les périodes de sécheresse. Ainsi, l'évapotranspiration potentielle mensuelle moyenne future a été calculée avec l'équation d'Hydro-Québec, utilisée dans le modèle Hydrotel (équation 2). Elle a été comparée avec celle de la période de référence.

$$ETP = 0.029718 \cdot (T_{max} - T_{min}) \cdot \exp(0.019 \cdot (9/5 \cdot (T_{max} + T_{min}) + 64)) \quad (\text{équ. 2})$$

De même, le nombre de jours secs (précipitation inférieure à 1 mm) ainsi que le nombre maximum de jours secs consécutifs de récurrence de 30 ans sont calculés. On observe une augmentation de l'évapotranspiration potentielle entre 22% et 34 % selon le mois (figure 16). L'augmentation est plus élevée pour les mois de juillet et août. Une analyse plus approfondie de l'évapotranspiration réelle devra être faite afin de confirmer que les diminutions des indices éco-hydrologiques en climat futur proviennent bien d'une augmentation de l'évapotranspiration. En effet, même si l'évapotranspiration potentielle augmente, il faut que les quantités d'eau dans le sol soient suffisantes pour que l'évapotranspiration se matérialise.

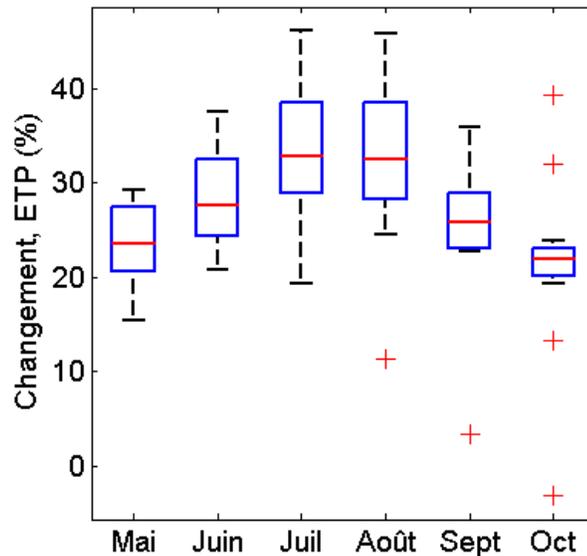


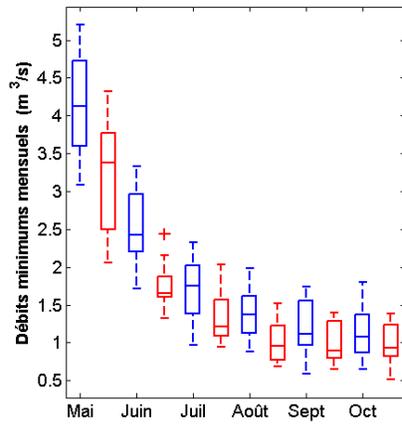
Figure 16 - Augmentation de l'évapotranspiration potentielle dans le futur (2041-2070) par rapport à la période référentielle (1971-2000)

L'analyse des précipitations montre aucune différence significative entre la période référentielle et la période future pour le nombre de jours secs (p -values = 0.35) et le nombre maximum de jours secs consécutifs de récurrence de 30 ans (p -values = 0.23). Ainsi, il ne semble pas y avoir d'augmentation des conditions de sécheresse dans le futur, ce qui porte à croire que les diminutions des indices éco-hydrologiques en climat futur sont liées à l'augmentation de la température.

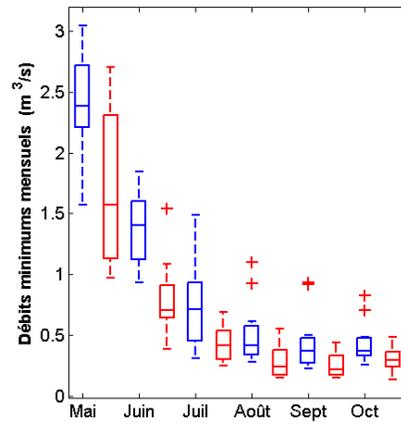
5.5.2 Simulations hydrologiques en changements climatiques

5.5.2.1 Évolution des indicateurs éco-hydrologiques

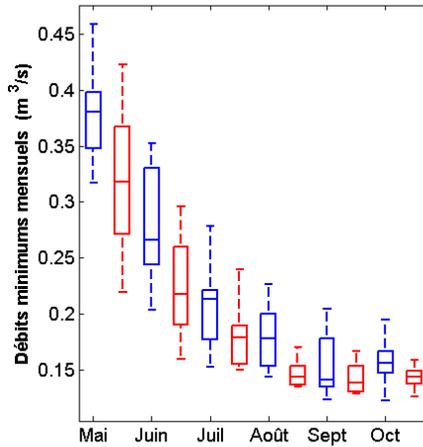
Le modèle Hydrotel combiné aux différentes projections climatiques est utilisé pour simuler des séries chronologiques de débits pour la période référentielle (1971-2000) et future (2041-2070). Les débits minimums mensuels sont calculés pour chaque année. Les moyennes de ces débits minimums mensuels pour les périodes référentielle et future sont présentées à la figure 17 pour chaque station.



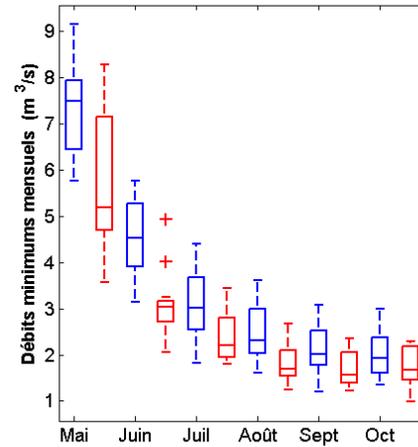
a)



b)



c)



d)

Figure 17 - Moyenne des débits minimums mensuels pour les périodes référentielle (bleu) et future (rouge) pour la station a) 030302, b) 030304, c) 030314 et d) 030345

La majorité des écarts entre les conditions d'étiages de la période référentielle et la période future sont significatifs (p -values < 0.05). Seuls les écarts des mois d'octobre de la station 030345 et septembre de la station 030314 ne sont pas significatifs. La station 030304 (rivière Noire) présente la plus grande diminution des débits minimums mensuels, soit de 31% à 45%. Viennent ensuite les stations 030302 (Farnham) et 030345 (St-Hyacinthe) avec une diminution de 13% à 31% et 14% à 31% respectivement. La station 030314 (Cowansville) présente la plus faible diminution du débit minimum mensuel avec tout de même une diminution de 7% à 21%. En général, les mois d'août et juin présentent les plus fortes diminutions du débit minimum mensuel. Les différents indices éco-hydrologiques sont calculés pour chaque station pour les deux périodes (Figure 18).

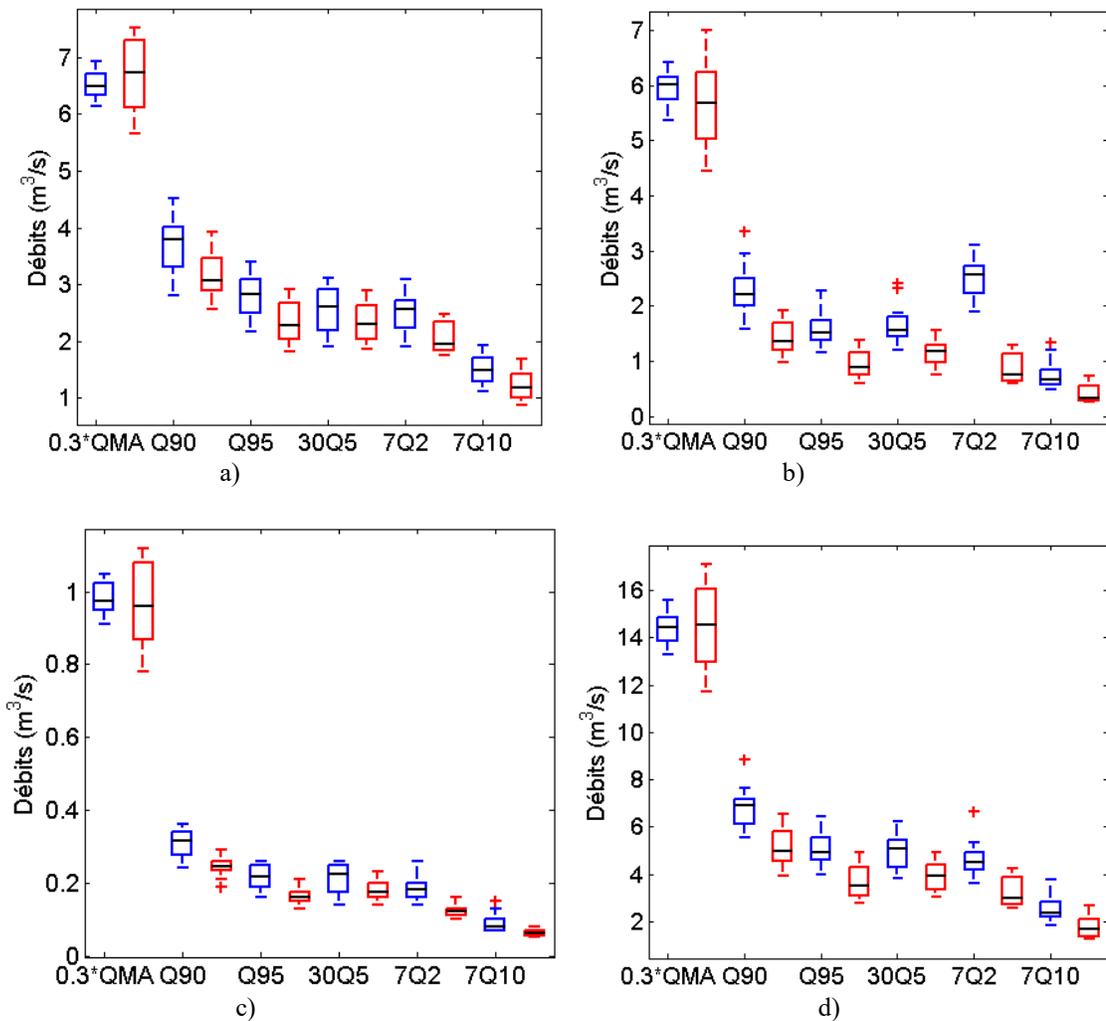


Figure 18 - Évolution des indices éco-hydrologiques entre les périodes référentielle (bleu) et future (rouge) pour la station a) 030302, b) 030304, c) 030314 et d) 030345

L'évolution de l'indice éco-hydrologique 0.3*QMA entre la période référentielle et la période future ne présente pas un écart significatif. Cet indice est relié au débit moyen annuel. Les autres indices éco-hydrologiques, soit Q90, Q95, 30Q5, 7Q2 et 7Q10 présentent tous un écart significatif entre la période référentielle et la période future. La station 030304 présente toujours la plus grande diminution des différents indices éco-hydrologiques. Les indices 7Q2 et 7Q10 diminuent de 16% à 64% et de 18 à 45% respectivement.

5.5.2.2 Évolution du nombre de jours sous chacun des indices éco-hydrologiques

Les différents indices sont regroupés selon 5 niveaux d'alertes. Les niveaux d'alerte pour la période référentielle sont calculés pour chaque projection climatique. Le nombre de jours où les débits sont en dessous de chacun des niveaux d'alerte calculés sur la période référentielle est calculé pour chaque station et pour les deux périodes (référence et future).

L'ensemble des résultats présente un écart significatif entre la période référentielle et la période future. On observe une augmentation marquée du nombre de jours au-dessous de chacun des niveaux d'alerte. Le tableau 13 présente le pourcentage d'augmentation du nombre de jours en dessous de chacun des niveaux d'alerte pour chaque station.

Tableau 13 - Pourcentage d'augmentation du nombre de jours en dessous de chacun des niveaux d'alerte pour chaque station

Station	Vigilance	DOE	Intervention générale	Alerte	Crise
030345 (St-Hyacinthe)	40	41	106	138	296
030304 (Noire)	39	47	113	163	394
030302 (Farnham)	54	39	122	137	261
030314 (Cowansville)	28	35	74	121	260

Le nombre de jours où le niveau de crise actuel est atteint dans le futur est beaucoup plus élevé qu'actuellement, allant jusqu'à près de 400 % d'augmentation pour la station 030304. De plus, alors que le niveau de crise est atteint environ une année sur 5 en référence aux stations 030345 et 030304, il est atteint une année sur 2 dans le futur. L'écart pour les stations 030302 et 030314 est moins important, passant d'une année sur 6 à une année sur 3. Donc, non seulement le nombre de jours en dessous de chaque niveau d'alerte augmente, le nombre d'années où le niveau de crise est atteint augmente aussi.

5.6 Plan d'intervention

Les mesures de restriction de la consommation qui ont été retenues sont présentées à l'annexe D. Elles sont classées en 5 catégories : usage domestique privé – usage domestique collectif – usage agricole – usage industriel – autres usages. Ces mesures reflètent les mesures usuelles répertoriées dans la littérature. Il appartient à chacune des municipalités concernées de les adapter à leur propre situation. Cependant, la question de la cohérence des mesures de chaque niveau d'alerte entre les municipalités se pose.

6. Analyse et discussion

6.1 Impact des changements climatiques

6.1.1 Effet des précipitations et des températures

L'été 2012 nous a probablement donné un avant-goût de ce que les CC nous réservent. En effet, il a fait beau et chaud sur une période soutenue. A quelques reprises, il a été constaté que le débit de la rivière Noire était inférieur au débit de la Yamaska Sud-Est à Cowansville. Pourtant, les superficies des bassins versants sont respectivement 1 490 km² et 210 km². Y a-t-il un lien à faire avec le fait que nos résultats de simulation en CC ont révélé que la station de la Noire (030304) présentait la plus grande diminution des débits minimums mensuels ? Ultérieurement,

une analyse du changement hydrologique par composantes du cycle de l'eau simulées par le modèle pourrait peut-être fournir des éléments d'explication : ruissellement, infiltration, évapotranspiration, etc. Aussi, existe-t-il des différences significatives dans les caractéristiques physiologiques des 2 bassins versants qui pourraient entrer en jeu : pente, type de sol, couvert végétal?

La pauvre « performance » de la rivière Noire en CC aura (et a déjà?) des répercussions à St-Hyacinthe, qui en subira les contrecoups. Il en résultera à St-Hyacinthe une qualité d'eau dégradée mais peu d'impact sur la vulnérabilité pour l'approvisionnement en eau potable, à moins d'un développement fulgurant de la ville.

6.1.2 Diminution du 7Q2 et aggravation des indices de vulnérabilité

Il est facile de conclure qu'une municipalité déjà vulnérable (Cowansville au niveau de l'habitat aquatique) le sera encore davantage dans le futur. Les indices de vulnérabilité se posent toujours comme un quotient qui met en relation un pourcentage du 7Q2 au numérateur et le prélèvement effectué en rivière au dénominateur. Les indices s'aggraveront inexorablement dans le futur puisque la tendance est une diminution du numérateur et une augmentation vraisemblable du dénominateur.

6.1.3 Diminution du 7Q10 à Cowansville

On enregistre déjà des débits inférieurs à 50 l/s (0.050 m³/s) à la station de mesure 030314, située en aval du réservoir Davignon. C'est donc que le débit d'apport naturel net entrant dans le réservoir Davignon tomberait parfois sous la barre des 150 l/s puisque que le prélèvement moyen à la prise d'eau municipale est actuellement d'environ 100 l/s. Cette situation empirera dans le futur, advenant une augmentation du prélèvement à la prise d'eau.

6.2 Effet anticipé des mesures de restriction

Pour déterminer l'effet anticipé du système d'alerte sur les débits dans la rivière, un bilan de masse est réalisé à partir de l'historique des débits journaliers enregistrés. Pour y arriver, un pourcentage de diminution du prélèvement d'eau brute est fixé pour chacun des niveaux d'alerte, en se basant sur les mesures de restriction proposées pour chacun des niveaux, tel que présenté au tableau 14 [Zeestraten, 2012]. Les pourcentages de réduction ont été établis à partir de discussions tenues avec différents intervenants, mais n'ont toutefois pas été validés avec l'application desdites mesures de restriction.

Tableau 14 – Scénario de réduction des prélèvements

Niveau	Diminution
Vigilance	0%
DOE	5%
Alerte	10%
Alerte renforcée	20%
Crise	30%

Par la suite, les débits en rivière sont recalculés pour les années passées en supposant l'application d'un système comprenant de telles diminutions.

Il importe ici de mentionner qu'environ 85 % de l'eau prélevée aux prises d'eau municipales est retournée à la rivière après traitement à la station d'épuration. En aval de cette dernière, l'impact des réductions devient donc négligeable. Cependant, la longueur du bief situé entre la prise d'eau et la station d'épuration est parfois assez grande, privant ces biefs « urbains » assez longs du débit de prélèvement. Cette longueur est de plus de 5 km pour St-Hyacinthe, d'environ 2.5 km pour Farnham et d'environ 7 km pour Cowansville. Précisons que dans ces trois cas, la station hydrométrique de mesure des débits est située entre la prise d'eau et l'émissaire de la station d'épuration. A titre d'exemple, la figure 19 montre en rouge le tracé du bief « urbain » compris entre la prise d'eau de Cowansville et la station d'épuration.

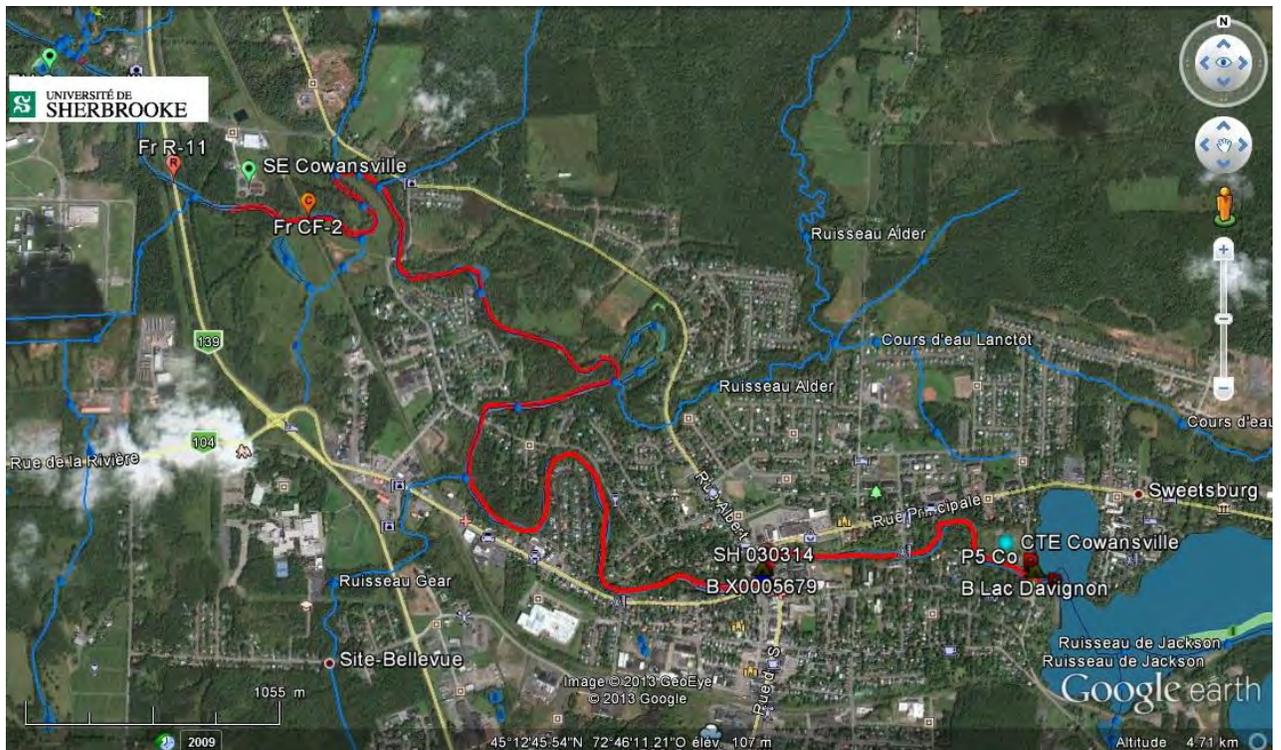


Figure 19 – Bief « urbain » de Cowansville

Les résultats suivants sont donc valables pour les biefs « urbains », avant la réinjection de débit attribuée au rejet de l'émissaire de la station d'épuration. L'analyse a été effectuée seulement pour les années ayant connu des débits sous le niveau de crise. Les résultats obtenus sont une diminution du nombre de jours sous les niveaux les plus critiques, principalement pour la municipalité de Cowansville, où la situation est plus problématique. Le tableau 15 [Zeestraten, 2012] présente quelques-unes des années les plus critiques pour Cowansville.

On observe que le nombre de jours sous le niveau de crise diminue beaucoup (entre 50% et 100% pour les années présentées) et le nombre de jours sous le niveau d'alerte renforcée diminue aussi (entre 2% et 22%). La diminution du nombre de jours sous chacun des autres niveaux est négligeable. C'est donc pour ces deux niveaux les plus critiques que le système d'alerte est le plus efficace. La raison est que plus les mesures sont appliquées dans des conditions de faible débit, plus elles sont d'un ordre de grandeur semblable à ce débit et plus elles ont donc un effet plus significatif sur ce dernier. Les mesures ont aussi plus de chances de faire une différence dans les sous-bassins de tête que sur les portions aval du cours d'eau.

Tableau 15 - Effet du système d'alerte pour Cowansville

Année	Nombre de jours sous les niveaux				
	Vigilance	DOE	Alerte	Alerte renforcée	Crise
1988 sans système	117	86	69	38	6
1988 avec système	117	86	64	36	3
1989 sans système	117	95	67	23	3
1989 avec système	117	95	66	18	0
1995 sans système	109	91	76	48	15
1995 avec système	109	91	76	44	8
1999 sans système	106	89	72	48	4
1999 avec système	106	89	72	41	1
2001 sans système	117	96	74	53	18
2001 avec système	117	96	74	52	6
2002 sans système	65	48	30	19	5
2002 avec système	65	48	30	18	0

Par contre, pour les villes de St-Hyacinthe et Farnham, l'effet du système d'alerte n'est pas aussi concluant. Le nombre de jours sous chacun des différents niveaux diminue peu pour St-Hyacinthe et le système n'a pratiquement aucun effet pour Farnham. Les tableaux 16 et 17 [Zeestraten, 2012] présentent quelques-unes des années les plus critiques pour St-Hyacinthe et Farnham. Cette analyse n'a pas été effectuée pour les villes de Granby et Bromont car le débit à Granby ne descend pas sous le niveau de crise, ni même sous le niveau d'alerte. À Bromont, l'historique disponible n'est pas assez complet pour faire cette analyse (2006 à 2010).

On observe pour St-Hyacinthe une légère diminution du nombre de jours sous les niveaux d'alerte, d'alerte renforcée et de crise. Cette diminution est seulement de quelques jours, ce qui est moins que pour Cowansville. Pour Farnham, l'application d'un tel système d'alerte a très peu d'effet sur le nombre de jours sous chacun des niveaux. Un effet est observable seulement pour l'année 1988, mais ce n'est qu'une diminution d'une journée sous le niveau d'alerte renforcée. Les municipalités de Farnham et St-Hyacinthe sont les exutoires de gros sous-bassins et l'effet d'une restriction du prélèvement en eau est faible sur les débits en rivière.

Tableau 16 - Effet du système d'alerte pour St-Hyacinthe

Année	Nombre de jours sous les niveaux				
	Vigilance	DOE	Alerte	Alerte renforcée	Crise
1987 sans système	119	95	65	36	8
1987 avec système	119	95	65	36	6
1988 sans système	108	94	71	43	6
1988 avec système	108	94	71	41	5
1989 sans système	125	115	106	63	0
1989 avec système	125	115	106	63	0
2002 sans système	89	70	47	32	6
2002 avec système	89	70	47	31	3
2003 sans système	87	70	55	23	1
2003 avec système	87	70	54	22	1

Tableau 17 - Effet du système d'alerte pour Farnham

Année	Nombre de jours sous les niveaux				
	Vigilance	DOE	Alerte	Alerte renforcée	Crise
1988 sans système	102	91	60	33	2
1988 avec système	102	91	60	32	2
1989 sans système	99	91	55	16	1
1989 avec système	98	91	55	16	1
1991 sans système	92	85	67	47	12
1991 avec système	92	85	67	47	12
1995 sans système	92	84	58	31	1
1995 avec système	92	84	58	31	1
1999 sans système	103	97	69	44	2
1999 avec système	103	97	69	44	2

Pour les années n'ayant pas connu des périodes d'étiage sévères (sous le niveau de crise), l'effet du système d'alerte est parfois la diminution d'une ou quelques journées sous les différents niveaux d'alerte, mais de façon peu significative.

Cette analyse permet donc de conclure qu'un tel système d'alerte aux étiages permet de prévenir des débits d'étiage sévère dans la rivière, entre la prise d'eau et l'émissaire de la station d'épuration, mais a moins d'effet sur les débits plus élevés que ceux correspondant au niveau de crise ou d'alerte renforcée. On observe aussi que le système d'alerte a un effet plus important pour les endroits où la situation est la plus problématique, plus vulnérable et où les débits moyens sont plus faibles.

Tel que mentionné antérieurement, cette analyse a été faite avec l'historique des débits journaliers enregistrés. Elle n'a pas été reprise en conditions de CC puisqu'il aurait fallu refaire,

par souci de cohérence, le bilan de masse avec les conditions de référence ainsi qu'avec les conditions futures, compte tenu de la méthodologie retenue pour évaluer ces dernières. Toutefois, il est permis de déduire des résultats obtenus que la conclusion demeurerait la même, soit que le système demeure davantage pertinent pour les débits inférieurs au seuil d'alerte et au seuil de crise, et ceci pour les raisons suivantes :

- Les prélèvements excessifs appréhendés lors de la formulation initiale du projet n'existent pas (exception faite du Club de golf de St-Hyacinthe et de la prise d'eau de Ski Bromont). Le plan d'intervention ne peut donc faire appel qu'à des économies d'eau potable dans les réseaux d'aqueduc municipaux (où l'eau consommée est quand même retournée à 80-90% à la rivière par les réseaux d'égouts sanitaires).
- En cours de projet, le gouvernement du Québec a lancé sa Stratégie québécoise d'économie d'eau potable. Ce programme vise :
 - Une réduction d'au moins 20 % de la quantité d'eau moyenne distribuée par personne pour l'ensemble du Québec par rapport à l'année 2001;
 - Une réduction du taux de fuites pour l'ensemble des réseaux d'aqueduc à un maximum de 20 % du volume d'eau distribué et à un maximum de 15 mètres cubes par jour par kilomètre de conduite.

La mise en application de cette dernière mesure fera en sorte qu'il sera difficile de demander un effort supplémentaire de réduction que les 20 et 30 % supposés respectivement pour les niveaux d'alerte renforcée et de crise, puisque les économies les plus facilement réalisables auront déjà été réalisées avec l'application du programme.

- Il serait par ailleurs difficile de chiffrer les pourcentages d'augmentation des prélèvements municipaux en conditions futures. Tout scénario serait teinté d'un degré d'incertitude qui rendrait le résultat de l'exercice non concluant, pour des causes telles : implantation ou fermeture d'usines, rythme du développement immobilier, etc.

7. Conclusions et recommandations

Le portail de prévision a été mis en ligne au cours de l'été 2012 et a rallié l'enthousiasme des municipalités participantes. Il a permis une prise de conscience de la cohabitation des préleveurs municipaux qui se partagent une ressource finie. La capacité de suivre l'évolution du débit des différentes branches a certainement contribué à une plus grande conscientisation des usagers, leur permettant une meilleure préparation à une période d'étiage appréhendée. L'application Yamaska.kmz qui a été développée dans le cadre d'une adaptation de la méthode ARMPC a aussi suscité beaucoup d'intérêt en raison de sa transférabilité, notamment du côté du Ministère de la sécurité publique. Des commentaires reçus de partout au Canada suite à différentes présentations faites dans des colloques scientifiques démontrent aussi que l'approche préconisée peut être généralisée à la surveillance d'autres situations que les étiages.

7.1 Approche ARMPC/HACCP

Les différents niveaux d'alerte proposés doivent être considérés comme un moyen de freiner une tendance observée, soit une descente vers le niveau d'alerte de **crise**, qui a été fixé au débit d'étiage 7Q10. Le premier niveau d'alerte a été nommé **DOE** (Débit Objectif d'Etiage) et correspond au débit Q50août. Ce dernier correspond à l'indice de la méthode NEFM (New England Flow Method) qui est défini comme le débit réservé de base qui protège les habitats aquatiques. Deux niveaux d'alerte intermédiaires ont été insérés (Alerte, qui a été renommée **Intervention générale** pour tenir compte de la démarche du MSP et Alerte renforcée, qui a été

renommée **Alerte**). Bien que ces niveaux intermédiaires soient rattachés à des indices éco-hydrologiques, force est d'admettre que ces niveaux auraient tout aussi bien pu être fixés de manière à séparer en trois tiers égaux la gamme de débit située entre le **DOE** et le niveau d'alerte de **crise**. La proposition actuelle correspond à peu de choses près à cette approche, de toute façon.

Un système comportant seulement un niveau d'alerte intermédiaire aurait tout aussi bien pu être choisi, soit à mi-chemin entre le **DOE** et le niveau d'alerte de **crise**. Il s'agit là d'une décision d'ingénierie qui a été prise, mais qui pourrait éventuellement être renversée dans le futur, si un allègement du plan d'intervention (**actions correctives à appliquer**) était souhaité par une ou des municipalités, compte tenu des conclusions de l'étude d'EcoRessource et du contexte particulier prévalant dans celles-ci. Cela correspondrait à une modification des **limites de contrôle** de l'approche ARMPC et pourrait découler du suivi qui sera réalisé dans la phase de vérification et d'adaptation du processus de contrôle, ce qui respecterait ainsi le sixième principe de l'approche ARMPC (référer à la section 2). Cette vérification se fera progressivement avec l'usage dans le futur, et correspond à une **rétroaction** dans l'approche ARMPC.

L'utilisation et l'entretien en fonction du temps du tableau de bord développé avec la plateforme Google Earth© doivent être assurés par l'OBV et ses partenaires, notamment en ce qui a trait aux divers points de contrôle visuels actuels et nouveaux qui pourront être ajoutés dans le futur. De plus, des projets de caractérisation sur le terrain en environnement, en biologie, etc. pourraient se greffer à ce volet et contribuer à bonifier l'adéquation entre les niveaux d'alerte d'une part et la réalité de terrain d'autre part.

7.2 Prélèvements excessifs

L'existence de plusieurs prises d'eau non municipales d'où auraient pu découler des prélèvements excessifs (hypothèse supposée dans l'énoncé de départ du projet) n'a pas pu être confirmée. Signalons qu'une seule prise d'eau, celle du Club de golf de St-Hyacinthe, a été recensée dans la rivière, dans le bief amont du barrage de la Penman's. Il serait opportun que ce golf se dote d'étangs artificiels à partir desquels l'irrigation du terrain au complet puisse être assurée en tout temps. De cette façon, le Club s'affranchirait des restrictions et des interdictions d'arrosage qui pourront éventuellement être mises en application dans le cadre des mesures d'adaptation aux CC.

7.3 Adaptation

Différentes stratégies d'adaptation doivent être envisagées pour faire face aux effets anticipés des changements climatiques.

7.3.1 Réduction de la consommation d'eau potable

Dans le contexte très particulier du bassin de la rivière Yamaska qui présente une tendance vers des étiages de plus en plus sévères, l'extraction d'eau brute en vue de la production d'eau potable constitue un facteur significatif dont il faut tenir compte pour protéger les fonctions essentielles d'un tel système tout en ayant une préoccupation pour la biodiversité. En effet, plus les conditions d'étiage deviennent sévères, plus le prélèvement « excessif » d'eau brute en raison d'une demande accrue peut se traduire par un RISQUE significatif qu'il faut gérer de façon proactive pour éviter divers impacts. Ceux-ci pourront être ressentis tant en milieu municipal alimenté par les plans d'eau présents que dans le système hydrique qui approvisionne ces

municipalités du bassin versant et où la biodiversité peut subir des impacts déplorables lorsque les débits deviennent très faibles (réchauffement excessif des plans d'eau, surcroissance d'algues microscopiques, interférence avec des activités récréatives, par exemple). Pour compléter cette image, il y a lieu de rappeler qu'il a été démontré dans l'étude d'EcoRessources [Olar et al., 2013] que le prélèvement d'eau brute par les municipalités constitue le facteur principal qui contribue à diminuer le débit de cette ressource, lorsqu'on le compare avec celui du milieu agricole ou encore à celui d'éventuelles installations industrielles qui ne seraient pas alimentées par un réseau municipal.

Par conséquent, il est impératif pour les municipalités du bassin versant de la rivière Yamaska de tendre vers une diminution de la production d'eau potable tant pour tenir compte de la probabilité plus importante d'étiages sévères dans ce bassin versant qui a été démontrée clairement que pour minimiser l'impact des prélèvements d'eau brute tout au cours de l'année sur le milieu hydrique. Ainsi, il sera possible de contribuer à la protection de la biodiversité intrinsèque de ce milieu qui est le gage d'un équilibre essentiel. De plus, cette dégradation évitée ne risquera pas de se traduire par une interférence majeure avec la production d'eau potable, ressource essentielle pour les communautés du bassin versant. Les gestionnaires de l'eau de ce bassin versant témoignent que la dégradation de la qualité de l'eau brute en période d'étiage se traduit concrètement par des accroissements importants de coûts d'exploitation. De plus, cette dégradation pourrait éventuellement se traduire par un RISQUE pour la santé des communautés alimentées si des substances toxiques présentes dans l'eau brute en raison de la dégradation de cette eau et non interceptées lors de son traitement influençaient la potabilité de l'eau traitée dirigée vers les réseaux de distribution au point d'en rendre la consommation interdite pendant une période plus ou moins longue.

À n'en pas douter, la Stratégie québécoise d'économie d'eau potable constituera un outil qui mènera les municipalités québécoises, dont celles du bassin versant de la rivière Yamaska, vers un meilleur équilibre entre la ressource-eau de ce milieu et les besoins de ces communautés en eau potable. Les gestes posés par les municipalités et par le gouvernement pour interdire, sinon diminuer le gaspillage et faire la promotion d'équipements utilisant moins d'eau potable iront dans la bonne direction. C'est d'ailleurs en ayant un tel objectif que des propositions de mesures visant à diminuer l'utilisation d'eau potable dans les municipalités du bassin versant sont proposées dans le déroulement de ce projet de recherche. Elles s'inscrivent dans une démarche en vue d'inciter les municipalités à adopter, si elles ne l'ont pas déjà fait, des plans d'intervention définis à l'avance, tel que le propose l'approche ARMPC/ HACCP. Ainsi, elles pourront les mettre en œuvre dans les meilleurs délais pour faire en sorte que les conditions d'étiages sévères redoutées soient retardées et même évitées jusqu'à l'arrivée souhaitée de précipitations qui rétabliront des conditions hydriques/hydrologiques propices au maintien de la biodiversité locale, ce tout en rétablissant une réserve suffisante d'eau brute pour les prises d'eau municipales.

De même, la mise en œuvre de programmes incitatifs pour l'installation d'équipements « économes » d'eau potable pourrait contribuer à la diminution de la demande en eau potable (toilettes à double chasse, pommes de douches à faible débit, par exemple). Si l'on pousse encore plus loin cette logique qui est en train de se répandre ailleurs en Occident et un peu partout dans le monde, pourquoi ne pas envisager la récupération de l'eau de pluie pour des usages domestiques et même institutionnels pour remplacer l'eau potable qui sert au jardinage, à l'entretien paysager, au lavage des véhicules, à l'arrosage des gazons des terrains de golf, par exemple. Finalement, que penser de la réutilisation éventuelle des eaux grises pour des fonctions qui utilisent actuellement de l'eau potable comme en fait la promotion la ville de Guelph, par exemple, dans son programme Blue Built Home [Blue Built Home].

Bien entendu, l'installation de compteurs d'eau associés à une tarification appropriée est incontournable dans le contexte où un gestionnaire de service d'eau potable veut mesurer avec précision l'ensemble des débits et volumes d'un tel système et prendre des décisions adéquates pour en optimiser la gestion dans une communauté. D'ailleurs, la Stratégie québécoise propose à juste titre l'installation généralisée de compteurs d'eau dans les ICI accompagnée d'une tarification appropriée pour en venir à diminuer le gaspillage d'eau [Stratégie québécoise d'économie d'eau potable].

Même si l'installation de compteurs d'eau en milieu résidentiel n'est pas encore inscrite dans les objectifs actuels de la Stratégie, il n'en demeure pas moins que nous proposons qu'une ou des municipalités du bassin de la rivière Yamaska pourraient éventuellement être sélectionnées en priorité pour devenir un laboratoire extrêmement utile pour les gestionnaires de la Stratégie, puisque ceux-ci proposent de choisir un « organisme municipal » pour mener une étude-pilote sur l'opportunité et les bénéfices associés aux compteurs d'eau résidentiels, tel que précisé dans la Stratégie.

Ainsi, une telle approche permettrait, au moyen d'un « échantillonnage représentatif de secteur résidentiel », d'identifier les bénéfices découlant de l'installation des compteurs d'eau pour différents types d'usagers résidentiels, dont la connaissance précise de fuites de réseaux de distribution d'eau potable. Notons à ce sujet que la Stratégie indique que le taux de fuites au Québec (qui, à 19.1% pourrait être sous-évalué en raison du petit nombre de compteurs d'eau) est pratiquement le double de celui de sept des provinces canadiennes sélectionnées ($\cong 10\%$), alors que la moyenne canadienne serait de 12.8% [Stratégie québécoise d'économie d'eau potable].

Notre suggestion d'utiliser une ou des municipalités du bassin de la rivière Yamaska pour évaluer la pertinence d'installer des compteurs d'eau résidentiels découle non seulement, tel que précisé plus haut, de la Stratégie provinciale en matière d'économie d'eau potable, mais également de la vulnérabilité plus grande de celles-ci en regard des changements climatiques et du contexte québécois dont il a été question d'entrée de jeu pour justifier de tenir la présente recherche.

Finalement, on ne peut ignorer diverses expertises locales et internationales sur le sujet de l'usage de l'eau et les compteurs d'eau. À titre d'exemple, citons le cas d'Environnement Canada qui a publié dans son relevé récent (2011) sur les municipalités canadiennes l'affirmation suivante :

« Communities with full residential metering have lower water use than those without metering ».

À titre d'exemple, Environnement Canada précise que trois provinces canadiennes (Ontario, Saskatchewan et Manitoba), où les compteurs d'eau sont présents dans plus de 95% des résidences, l'usage de l'eau exprimé en litres/personne/jour (l/p/j) est de l'ordre de 200-225 l/p/j, alors qu'au Québec où les compteurs d'eau sont présents dans 13.8% des résidences, l'usage de l'eau est évaluée à 386 l/p/j [Environnement Canada].

Ce rapport présente d'ailleurs des valeurs d'usage d'eau pour les diverses provinces canadiennes pour appuyer sa conclusion. Il est à noter qu'il y est également mentionné que, même si les données accumulées semblent indiquer clairement une corrélation entre la présence compteurs d'eau et un plus faible usage d'eau, ces données peuvent également être influencées par d'autres facteurs que les compteurs d'eau, dont les des variables socio-économiques.

D'autres juridictions, telles que le Royaume-Uni [Royaume-Uni], vont également dans le même sens et appuient l'installation de compteurs d'eau, tout en mentionnant qu'il faut tenir compte de facteurs tels que les coûts associés au comptage de l'eau et divers facteurs socio-économiques, comme le mentionne Environnement Canada.

Dans le même ordre d'idée, il faut noter l'initiative de la France qui annonce son intention d'aller de l'avant avec des compteurs d'eau intelligents en soulignant que des pénuries d'eau sont à l'horizon et que les réseaux de distribution sont des « passoires » avec des pertes de l'ordre de 20%. Il est intéressant de lire que « la détection plus rapide et plus précise des fuites d'eau est le principal intérêt pour l'environnement », énoncé qui met en perspective « fuites d'eau » et « protection de l'environnement » [France].

Notons en terminant l'affirmation de l'agence américaine EPA [EPA] au sujet des stratégies pour l'efficacité de l'eau et de la protection du milieu aquatique face à des prélèvements dans des approvisionnements « limités » :

*“Drinking water systems can implement water efficiency measures and still deliver an unchanged or improved level of service to consumers while reducing overhead costs. Improving water efficiency reduces operating costs (e.g., pumping and treatment) and reduces the need to develop new supplies and expand our water infrastructure. **It also reduces withdrawals from limited freshwater supplies, leaving more water for future use and improving the ambient water quality and aquatic habitat** ».*

Finalement, notons que toute stratégie qui permettra de protéger la ressource-eau tant en quantité qu'en qualité pourra se traduire par un facteur déterminant dans les plans de développement des municipalités du bassin versant de la rivière Yamaska, à la manière de la ville de Calgary qui a pratiquement doublé sa population depuis une décennie sans vraiment augmenter sa production d'eau potable.

7.3.2 Modification d'ouvrages existants

7.3.2.1 Seuil en enrochement à Bromont

Les prises d'eau brute des municipalités du BVRY sont toutes situées en amont d'un barrage en béton, qui assure une submergence adéquate des prises d'eau, à l'exception de Bromont et du cas marginal de la (petite) municipalité de St-Damase. Le niveau d'eau à la prise d'eau brute de Bromont est actuellement assuré par un seuil en enrochement. La construction d'un seuil en béton avec une vanne de contrôle permettrait une gestion plus fine de l'eau en périodes d'étiage sur ce tronçon de la rivière.

7.3.2.2 Barrage Davignon à Cowansville

La superficie du réservoir Davignon à Cowansville est modeste (comparativement au lac Brome et au réservoir Choinière) mais une surélévation de 15 cm de la cote des seuils du barrage Davignon (figure 20) résulterait en une augmentation de stockage d'environ 167 000 m³, soit environ 19 jours de production moyenne d'eau potable (sans tenir compte de l'évaporation). Ceci permettrait de continuer d'alimenter le tronçon de rivière en aval du barrage (réduction de la vulnérabilité de l'habitat) lors des étiages sévères du futur, alors que la production d'eau potable se rapprochera du débit d'apport naturel au réservoir. La topométrie en pente du périmètre du lac et l'occupation du sol semblent permettre d'accommoder cette surélévation sans créer trop de problèmes (voir photo de la page couverture du rapport).



Figure 20 - Barrage du lac Davignon (Cowansville)

7.3.3 Détermination du volume maximum prélevable et soutien d'étiage

En France, depuis 2006, les bassins versants considérés en déséquilibre quantitatif doivent se doter de mesures de gestion pour les prélèvements d'eau brute. Cette démarche est encadrée par la loi sur l'eau et les milieux aquatiques, le décret no 2007-1381 et la circulaire ministérielle relative à la résorption des déficits quantitatifs en matière de prélèvement d'eau et à la gestion collective des prélèvements d'irrigation. Ainsi, les bassins versants doivent se doter d'organismes de gestion et effectuer une étude de volume maximal *prélevable*. L'objectif est de respecter 8 années sur 10 les débits fixés sur les différents territoires [Eaucea, 2007].

La possibilité d'utiliser le réservoir Davignon, le lac Brome et le réservoir Choinière à des fins de soutien d'étiage (soit en ayant recours à une tranche de volume réservée, accessible 2 années sur 10), devrait être étudiée à court/moyen termes. Le soutien d'étiage serait une mesure d'adaptation qui permettrait le développement des municipalités qui pourraient se retrouver dans une situation où le MDDEFP ne serait plus en mesure d'émettre des certificats d'autorisation pour l'extension du réseau de distribution d'eau potable. A titre d'exemple, une tranche de 5 cm *réservée* dans le lac Brome représente environ 9.5 jours de débit d'évacuation à une valeur de 0.88 m³/s au barrage Foster (sans tenir compte de l'évaporation).

7.3.4 Maintien en opération du portail de prévision

Il a été conclu précédemment que le système d'alerte aux étiages permet d'effectuer une veille proactive en vue de prédire et de prévenir l'occurrence de débits d'étiage sévères dans le bassin versant de la rivière Yamaska, mais qu'il a moins d'effet sur les débits plus élevés que ceux correspondant au niveau de crise ou d'alerte renforcée. De plus, il est à noter que le système a un effet plus important aux sites situés en amont du bassin versant où la vulnérabilité est plus grande et où les débits moyens sont plus faibles, ce qui constitue en soi une valeur ajoutée pour

les utilisateurs de l'eau situés plus en aval. En effet, tout gain en un endroit donné du bassin versant constitue notamment un gain qui se répercute vers l'aval, que ce soit en terme de débit ou en terme de qualité, par exemple, sans ignorer la protection de la biodiversité.

Par ailleurs, la firme Éco Ressources a mené une étude sur les impacts économiques des étiages sur le BVRY. Basée sur les résultats du présent projet, cette étude conclut que le système d'alerte proposé est justifié dans les cas les plus problématiques comme celui de Cowansville mais que les coûts infligés par les mesures de restriction dépassent largement la valeur monétaire des améliorations de l'écosystème aquatique et des activités récréatives, tant dans le présent que dans le futur. Cependant et tel que précisé plus haut, les résultats de l'analyse de la qualité de l'eau en fonction du débit réalisée à la hauteur de St-Hyacinthe (référer au supplément ARMPC/HACCP en annexe du rapport) indiquent que la qualité de l'eau de la rivière diminue, comme il était permis d'anticiper, au fur et à mesure de la diminution du débit. Autrement dit, éviter d'atteindre les niveaux d'alerte renforcée et de crise contribue à diminuer la tendance de dégradation additionnelle de la qualité de l'eau ainsi que des coûts supplémentaires pour le traitement de l'eau brute. Dans le pire des cas, un avis de non consommation de l'eau produite pourrait être requis, avec les conséquences économiques qui en découlent pour la communauté touchée. Dans l'étude d'EcoRessources [Olar et al., 2013], « seulement l'aspect de la quantité d'eau a pu être considéré lors de l'estimation des impacts des étiages sur les usages de l'eau car la qualité de l'eau, également affectée par les étiages, n'est pas suffisamment documentée et évaluée pour le moment. La seule exception est l'impact des cyanobactéries sur les coûts des usines de traitement de l'eau potable, qui a pu être évalué grâce aux informations obtenues. »

On ne peut donc ignorer que la mise en œuvre éventuelle du système d'alerte dans l'ensemble du bassin versant pourrait permettre de mettre en lumière diverses opportunités de coûts évités et/ou économisés qui, une fois réalisées, pourraient se traduire par une valeur ajoutée supplémentaire du système d'alerte et ainsi améliorer les perspectives concernant les coûts globaux.

Finalement, devant l'imminence des impacts des changements climatiques et de la nécessité de rechercher des mesures d'adaptation, la présente démarche permet de conclure qu'il faut non seulement rechercher des technologies innovantes pour tenir compte des impacts des changements climatiques, mais également de penser de façon innovante, quitte à remettre en question à très court terme les approches traditionnelles actuelles pour se donner de nouveaux paradigmes.

7.4 PDE de l'OBVY

Le portail mis sur pied pour le système pilote d'alerte aux débits d'étiage a fonctionné au cours de l'été 2012 (annexe E). De même, le SIG élaboré sur la plateforme Google Earth[®] a été diffusé auprès d'un cercle restreint d'intervenants. Au terme de cette période de rodage, l'OBVY a exprimé sa satisfaction quant aux outils développés et a convenu que l'objectif suivant sera ajouté à son PDE (Plan Directeur de l'Eau) :

Objectif 2.1.3

« Identifier les sous-bassins les plus vulnérables au niveau de l'alimentation en eau potable et rechercher les mesures d'adaptation les plus appropriées pour faire face aux changements climatiques. »

Cet objectif sera accompagné du plan d'action suivant :

Plan d'action

- Maintenir en opération le portail mis en place par l'UdS et poursuivre la publication des bulletins périodiques sur l'hydraulicité (annexe F)
- Mettre en place/entretenir un réseau d'observateurs chargés de la mise à jour des points de contrôle visuels (débuté à l'été 2012)
- Créer un comité technique de suivi chargé d'étudier/implanter des mesures d'adaptation
- Voir à la mise en application de mesures de restriction convenues en périodes critiques
- Une fois les rapports déposés, faire un lien entre l'étude réalisée par l'UdS et celle réalisée par l'INRS Eau sur les eaux souterraines

Références

Abi-Zeid, I. et Bobée, B. (1999). The stochastic modeling of low-flows: A literature review. *Revue des Sciences de l'Eau*, volume 12, numéro 3, p. 459-484.

Belzile, L., Bérubé, P., Hoang, V. D. et Leclerc, M. (1997). Méthode écohydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec (Rapport annuel 1996-1997), INRS-Eau, Québec, 136 p.

Bérubé, J. (2007). Évaluation d'un indice de pression sur les approvisionnements municipaux en eau potable au Québec à l'aide d'une méthode de régionalisation des débits d'étiage, *Maître ès sciences*, INRS-ETE, Québec, 100 p.

Blue Built Home. <http://guelph.ca/living.cfm?smocid=2820>

Boyer, C., Chaumont, D., Chartier, I., Roy, A.G. (2010). Impact of climate change on the hydrology of St. Lawrence tributaries. *Journal of Hydrology* 384, p. 65-83

Caissie, D., El-Jabi, N. et Bourgeois, G. (1998). Instream flow evaluation by hydrologically-based and habitat preference (hydrobiological) techniques; Évaluation du débit réservé par méthodes hydrologiques et hydrobiologiques. *Revue des Sciences de l'Eau*, volume 11, numéro 3, p. 347-363.

Centre d'Expertise Hydrique du Québec (2004). Sommaire du plan de gestion des eaux retenues - Barrage Choinière. Québec, 4 p.

Cloutier, S., Gélinau, M., Guay, I. et Québec (2007). Calcul et interprétation des objectifs environnementaux de rejet pour les contaminants du milieu aquatique, 2e éd édition. Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs, Développement durable, environnement et parcs Québec, Québec.

Collins, W. D., et al., (2006). The Community Climate System Model: CCSM3. *J. Climate* 19:2122-2143.

Cyr, J-F. (2012). Impacts potentiels des changements climatiques sur les événements hydrologiques extrêmes : sévérité des étiages et risques de crues, Colloque en agroclimatologie, Drummondville, mars 2012.

de Wit M.J.M., van den Hurk, B., Warmerdam, P.M.M., Torfs, P.J.J.F., Roulin, E., van Deursen, W.P.A. (2007). Impact of climate change on low-flows in the river Meuse, *Climatic Change*, 82, 351-372

Développement durable de l'industrie des gaz de schiste au Québec (1999). Fiche technique 14 : Prise d'eau, Québec.

Duan, Q. Y., Gupta, V. K., Sorooshian, S. (1993). Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization, *Journal of Optimization Theory and Applications*, 76(3), pp. 501-521

Eaucea (2007). Détermination des volumes prélevables sur le périmètre du Sage Cher-amont (Scientifique). Eaucea, Toulouse, France, 1-63 p.

Environnement Canada. <http://www.ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=En&n=ED7C2D33-1>, document Municipal water use data 2009, summary report, p.7

EPA. http://water.epa.gov/infrastructure/sustain/wec_wp.cfm

- EPIDOR (2008). Plan de gestion d'étiage du bassin Dordogne Vézère (Études et rapports). Établissement Public Territorial de Bassin Dordogne, France, 56 p.
- EPIDOR (2010), Observation des cours d'eau au cours de l'étiage 2010 - Semaine du 6 au 11 septembre, BD Carthage - AEAG, France.
- EPIDOR (2012). Statuts d'EPIDOR. France.
- Flato, G. M. (2005). The third generation coupled global climate model (CGCM3). <http://www.ec.gc.ca/ccmac-cccma/default.asp?n=1299529F-1>
- Fortin, V., Ouarda, T. B. M. J., Rasmussen, P. F. et Bobée, B. (1997). A review of streamflow forecasting methods. *Revue des Sciences de l'Eau*, volume 10, numéro 4, p. 461-487.
- Fortin, J.P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J., Villeneuve, J.P. (2001). Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. I: Description of model, *Journal of Hydrologic Engineering*, volume 6, numéro 2, p. 91-99
- Fortin, L.-G., Turcotte, R., Pugin, S., Cyr, J.-F., Picard, F. (2007). Impact des changements climatiques sur les plans de gestion des lacs Saint-François et Aylmer au sud du Québec. *Canadian Journal of civil Engineering* 34, 934-945
- France. <http://www.services.eaufrance.fr/actualite/france-commence-d-ployer-des-compteurs-d-eau-intelligents>
- Gordon et al. (2000). The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, volume 16, p.147-168.
- Lang, C. et Gille, E. (2006), Une méthode d'analyse du tarissement des cours d'eau pour la prévision des débits d'étiage, *Norois*, volume 201, p. 31-43.
- Mailhot, A., Duchesne, S., Talbot, G., Rousseau, A. et Chaumont, D. (2008), Approvisionnement en eau potable et santé publique : projections climatiques en matière de précipitations et d'écoulement pour le sud du Québec (Rapport de recherche), INRS-Eau, Québec, 164 p.
- Mausser, W., Marke, T., Stoeber, S. 2008. *Climate Change and Water Resources : Scenarios of low-flow conditions in the Upper Danube River Basin*, IOP Conf. Earth and Environmental Science, volume 4, p. 1-11
- Mearns, L.O., et al. (2007, updated 2012). The North American Regional Climate Change Assessment Program dataset, National Center for Atmospheric Research Earth System Grid data portal, Boulder, CO, doi:10.5065/D6RN35ST
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (2006). Guide de conception des installations de production d'eau potable. Québec, 544 p.
- Minville, M., Brissette., F., Krau, S., Leconte, R. 2009. Adaptation to climate change in the management of a Canadian water-resources system exploited for hydropower, *Water resources management*, 23(14) 2965-2986
- Nantel, È. (2006), Élaboration d'une méthode d'estimation des vulnérabilités historiques des approvisionnements en eau potable au Québec, Maître ès sciences, INRS-ETE, Québec, 134 p.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. 1. A discussion of principles. *J Hydrol* 10(3), p.282-290
- Ohio Environmental Protection Agency Division of Surface Water (1997). Wasteload allocation for ammonia-nitrogen toxicity. Ohio.

- Ohio Environmental Protection Agency Division of Surface Water (2008). National Pollutant Discharge Elimination System (NPDES) Permit Program, Regarding an NPDES Permit To Discharge to Waters of the State of Ohio for MMK Americas. Ohio.
- Olar, M., Lessard, C. et Sauvé C. (2013). Analyse économique des impacts des changements climatiques sur les étiages et leurs conséquences sur divers usages de l'eau dans le bassin versant de la rivière Yamaska. Étude réalisée pour Ouranos par EcoRessources Inc.
- Pal J. S., Giorgi F., Bi X. et al. (2007). Regional climate modeling for the developing world: the ICTP RegCM3 and RegCNET. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 88, no. 9, pp. 1395–1409
- Petts, G. E., Bickerton, M. A., Crawford, C., Lerner, D. N. et Evans, D. (1999). Flow management to sustain groundwater-dominated stream ecosystems. *Hydrological Processes*, volume 13, numéro 3, p. 497-513.
- Pope et al. (2000). The impact of new physical parameterizations in the Hadley Centre climate model: HadAM3. *Climate Dynamics* 16:123-146.
- PRECIS (2012)., The PRECIS Regional Climate Modelling System. <http://www.metoffice.gov.uk/precis/>
- Pyrce, R. (2004). Hydrological Low Flow Indices and their Uses (WSC Report). Watershed Science Centre, Ontario, 33 p.
- Québec (2012). Règlement sur les habitats fauniques - Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune. Québec, Article 17
- Quilbé, R., Rousseau, A.N., Moquet, J.-S., Trinh, N.B., Dibike, Y., Gachon, P., Chaumont, D. (2008). Assessing the Effect of climate change on a river flow using general circulation models and hydrological modelling – Application to the Chaudière River, Québec, Canada. *Canadian Water Resources Journal* 33, 73-94
- Rahman, M., Bolisetti, T., Balachandar, R. (2010). Effect of climate change on Low-flow conditions in the Ruscom river watershed, Ontario, *ASABE*, 53(5), 1521-1532
- Renaissance Lac Brome (2011). La gestion du barrage Foster et la convention avec la ville de Bromont (Note technique), Québec, Canada, 17 p.
- Reysouzze, site web du Syndicat du bassin versant de la Reysouzze, <http://www.syndicat-reyssouze.fr/>
- Ricard, S., Lachance-Cloutier, S., Turcotte, R., Projection des régimes de crues et d'étiages sur le Québec méridional à l'horizon 2050, Symposium OURANOS, Montréal, novembre 2012.
- Rivera-Ramirez, H., Warner, G. S. et Scatena, F. N. (2002). Prediction of master recession curves and baseflow recessions in the Luquillo mountains of Puerto Rico. *Journal of the American Water Resources Association*, volume 38, numéro 3, p. 693-704.
- Royaume-Uni. <http://www.water.org.uk/home/news/comment/utility-week---metering>
- Ryu, J.H., Lee, J.H., Jeong, S., Park, S.K., Han, K. (2011). The impacts of climate change on local hydrology and low flow frequency in the Geum River Basin, Korea, *Hydrological Processes*, 25, 3437-3447
- Schmidli, L., Frei, C., and Vldale, P.L. (2006). Downscaling from GCM precipitation : a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods, *International Journal of Climatology*, 26, p. 679-689

Sennikovs, J , Bethers, U. (2009). Statistical downscaling method of regional climate model results for hydrological modelling, 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation: Interfacing Modelling and Simulation with Mathematical and Computational Sciences, Proceedings, p. 3962-3968

Skamarock, W.C., J.B. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, M. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, Powers, J.G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Technical Note

SMEAG EPTB-Garonne (2011). Prévision du jour, SMEAG EPTB-Garonne, Syndicat Mixte d'Étude et d'Aménagement de la Garonne, http://www.eptb-garonne.fr/partenaires/previsions_jour.php (page consultée le 10/29 2010).

Stratégie québécoise d'économie d'eau potable. <http://www.mamrot.gouv.qc.ca/grands-dossiers/strategie-quebecoise-deconomie-deau-potable/documentation-et-liens/>, tableau 4 (p.18) et section 4.1.3 (p.24)

Tharme, R. E. (2003). A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications*, volume 19, numéro 5-6, p. 397-441.

Turcotte, R., Fortin, L. G., Fortin, V., Fortin, J. P. & Villeneuve, J. P. (2007). Operational analysis of the spatial distribution and the temporal evolution of the snowpack water equivalent in southern Québec, Canada. *Nordic Hydrology* 38(3), p. 211–234

United States Environmental Protection Agency (1995). Water Quality Guidance for the Great Lakes System: Supplementary Information Document (SID).

United States Environmental Protection Agency (Décembre 1999). Aquatic Life Ambient Water Quality Criteria for Ammonia Update. Dans EPA, EPA United States Environmental Protection Agency. <http://water.epa.gov/scitech/swguidance/standards/criteria/aqlife/pollutants/ammonia/technical.cfm> (page consultée le 06/13 2011).

Zeestraten, C., Côté B., Leconte R., 2011. Les indices de sévérité d'étiage : des outils d'aide à la décision, 79e Congrès de l'ACFAS, Sherbrooke.

Zeestraten, C. (2012). Élaboration d'un système d'alerte aux étiages à l'échelle du bassin versant de la rivière Yamaska au Québec (mémoire de maîtrise en génie civil), Département de génie civil, Université de Sherbrooke, 110 p.

Annexe A - Caractéristiques des stations hydrométriques et des réserves d'eau

Tableau A.1 - Caractéristiques des stations hydrométriques du bassin

Station	Localisation	Années étudiées	Superficie (km ²)
030301	Lac Brome	1935 - 1960	188
030302	Farnham	1966 - 2010	1230
030304	Rivière Noire	1966 - 2010	1490
030309	Granby	1975 - 2010	139
030314	Cowansville	1979 - 2010	210
030340	Aval de Granby	1984 - 2010	248
030341	St-Hyacinthe	1984 - 1993	3310
030345	St-Hyacinthe	2001 - 2010	3330
030351	Lac Brome	2006 - 2010	190

Tableau A.2 - Caractéristiques des réserves d'eau

Lac / Réservoir	Localisation	Rivière	Superficie (km ²)
Lac Brome	Lac Brome	Yamaska principale	14.53
Bromont	Bromont	Yamaska principale	0.41
Lac Davignon	Cowansville	Yamaska Sud-est	1.20
Lac Boivin	Granby	Yamaska Nord	1.61
Lac Coupland	Granby	Prise d'eau potable complémentaire à Granby	0.12
Réservoir Lemieux	Granby	Yamaska Nord	Dans le lac Boivin
Réservoir Choinière	Roxton Pond	Yamaska Nord	4.70
Lac Waterloo	Waterloo	Yamaska Nord	1.50

Annexe B - Les indices d'étiage pour les différentes stations

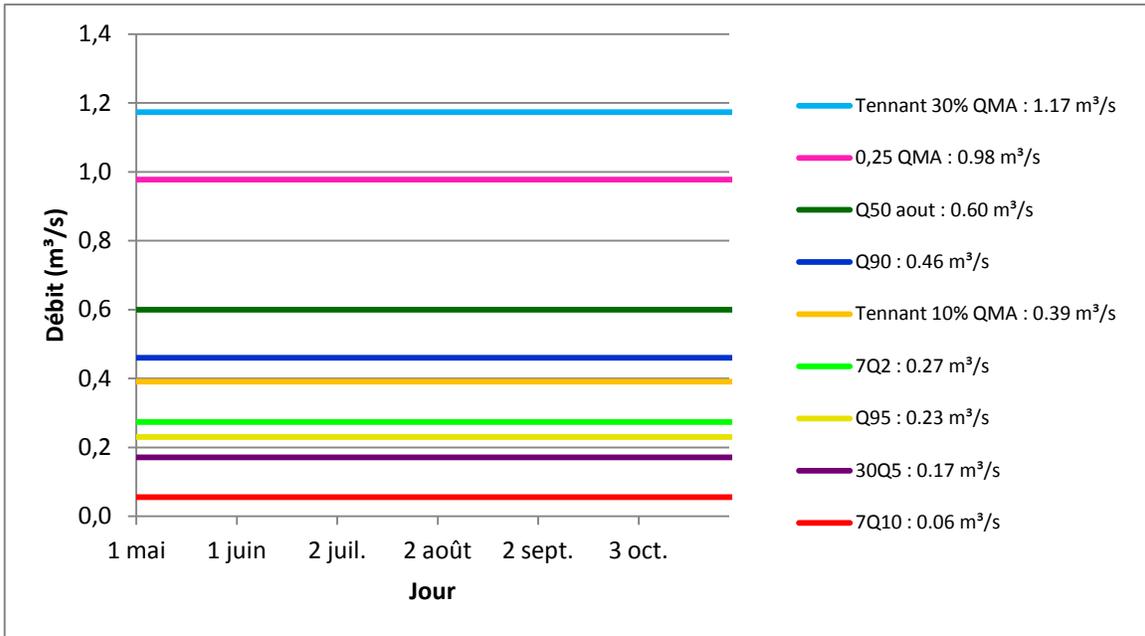


Figure B.21 Les indices d'étiage à la station 030301

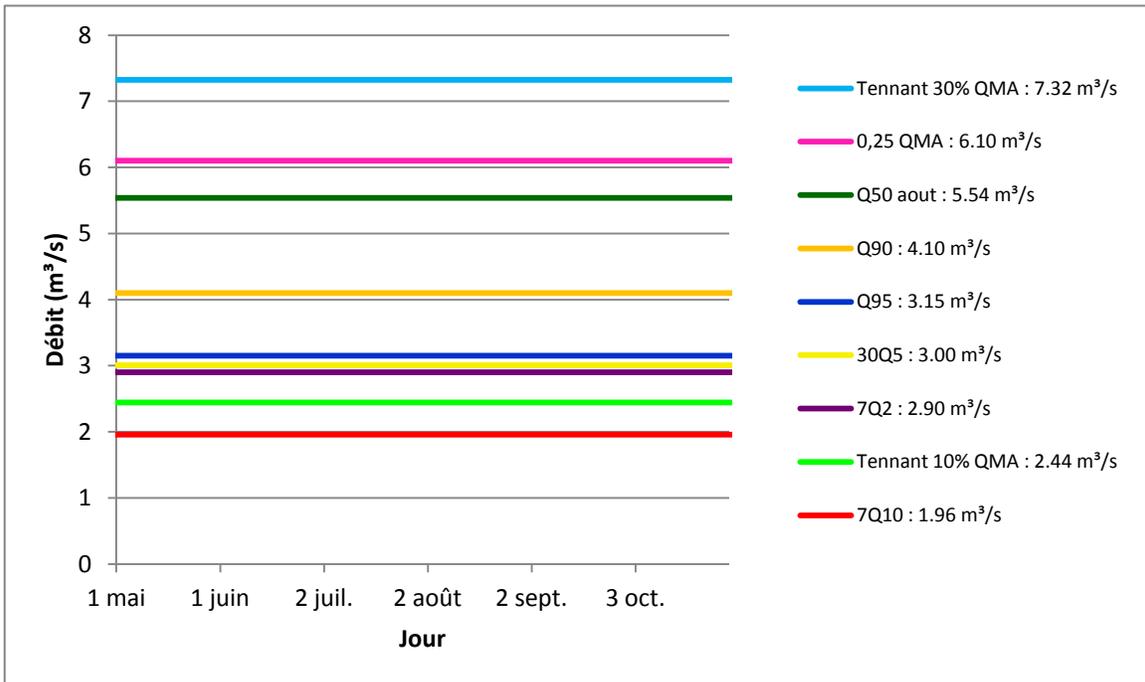


Figure B.22 Les indices d'étiage à la station 030302

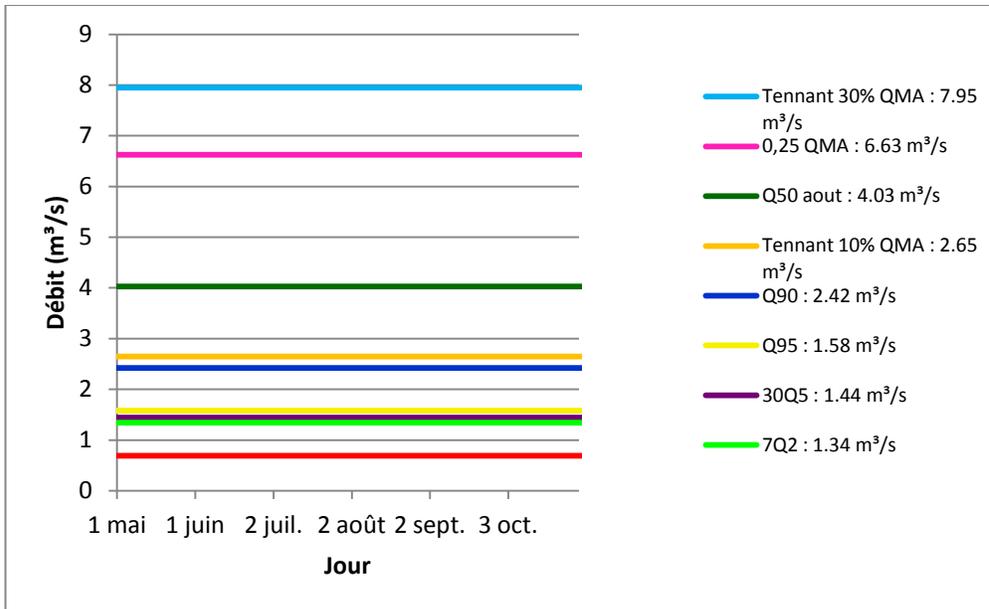


Figure B.23 Les indices d'étiage à la station 030304

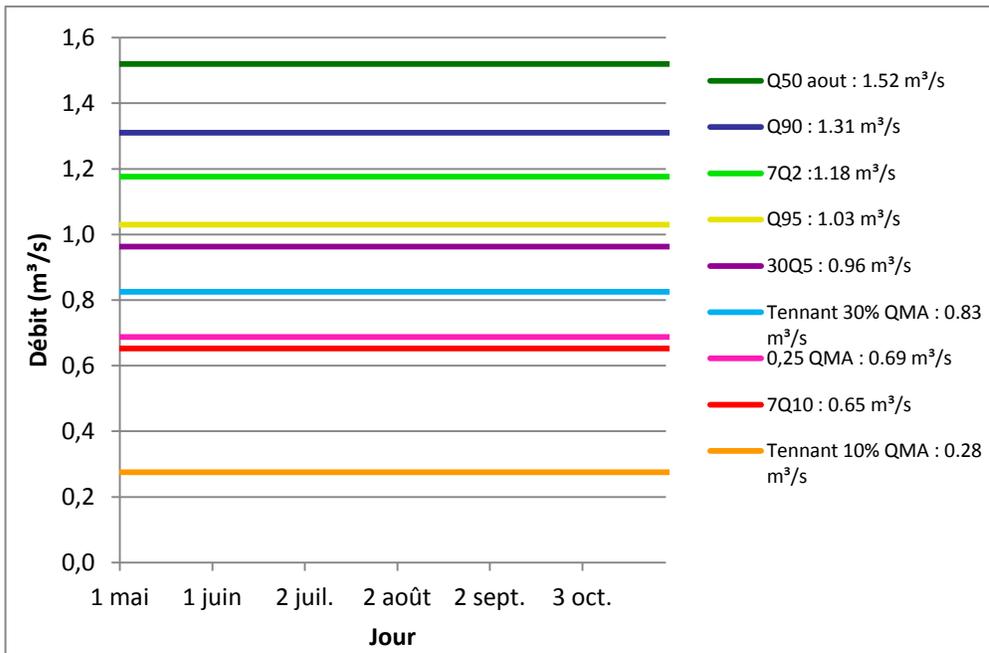


Figure B.24 Les indices d'étiage à la station 030309

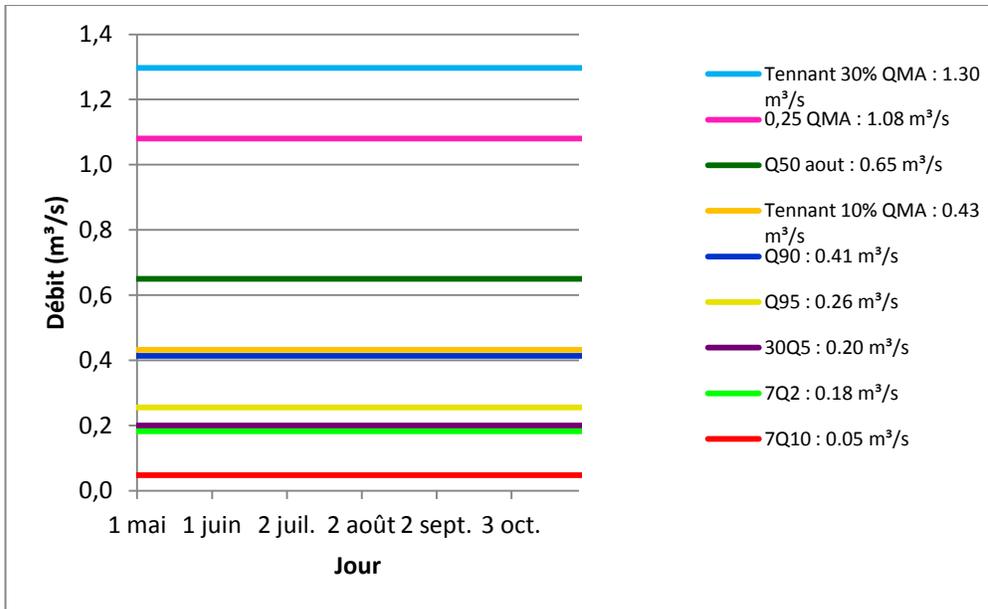


Figure B.25 Les indices d'étiage à la station 030314

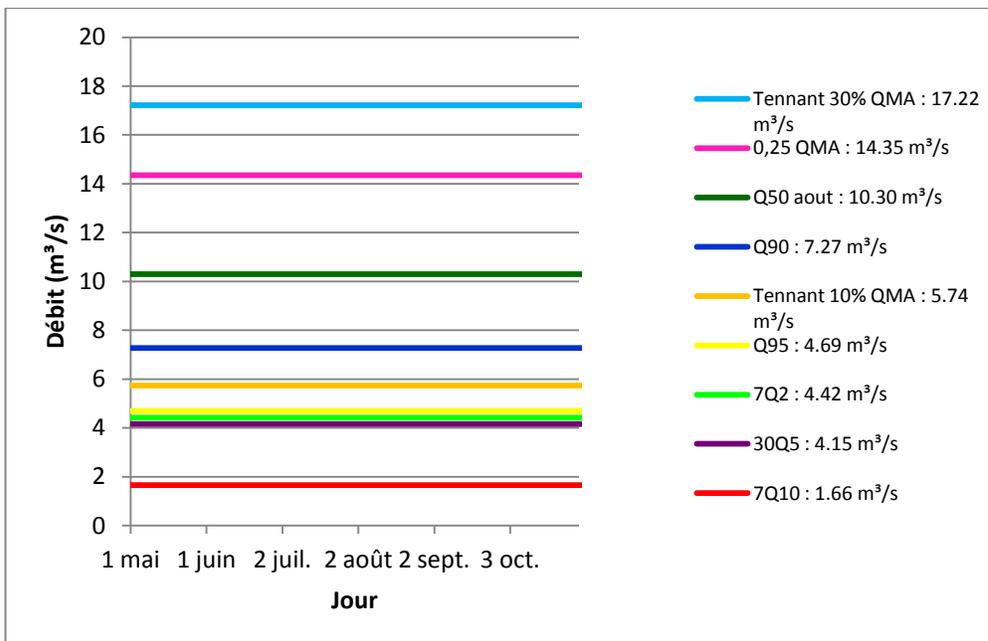


Figure B.26 Les indices d'étiage aux stations 030341 et 030345

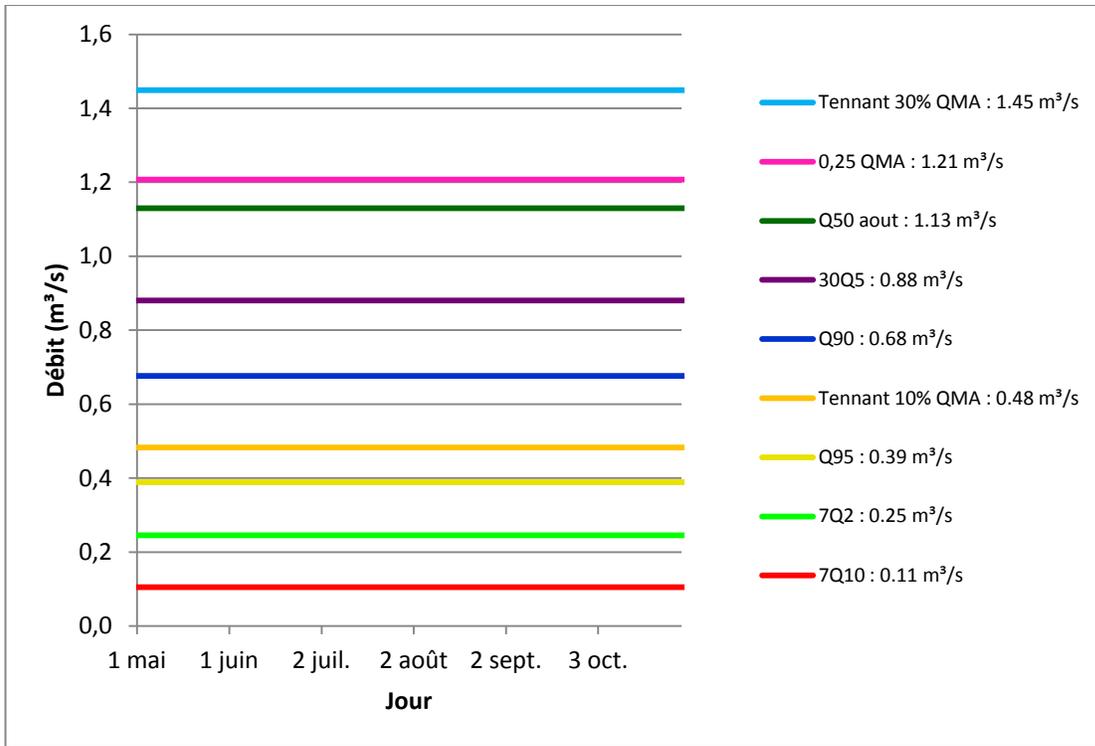


Figure B.27 Les indices d'étiage à la station 030351

Annexe C - Les niveaux d'alerte proposés pour les différentes stations

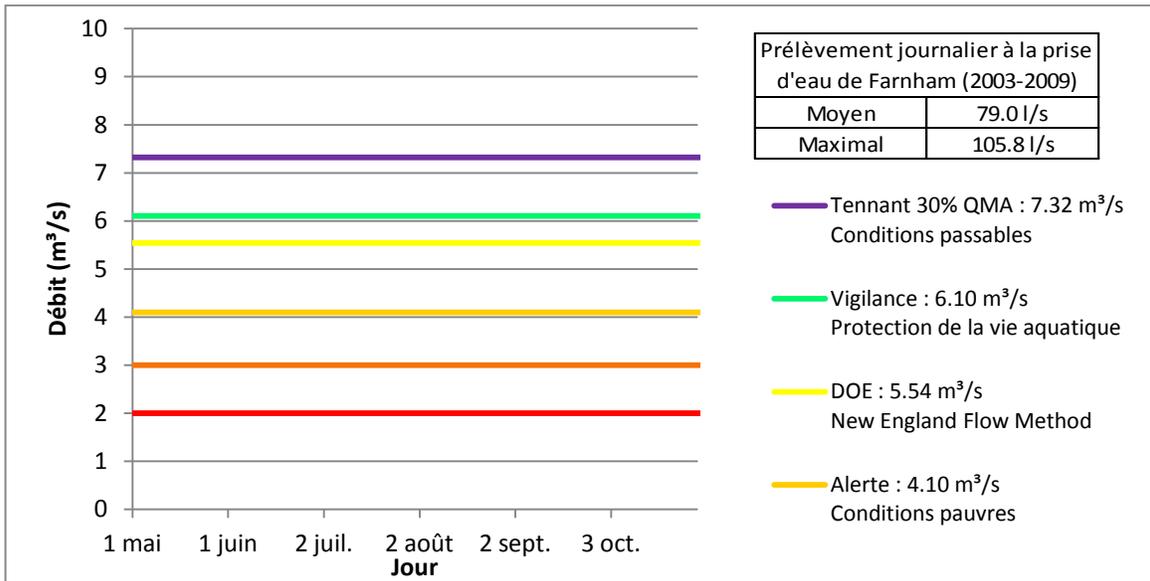


Figure C.28 Les niveaux d'alerte proposés à la station 030302

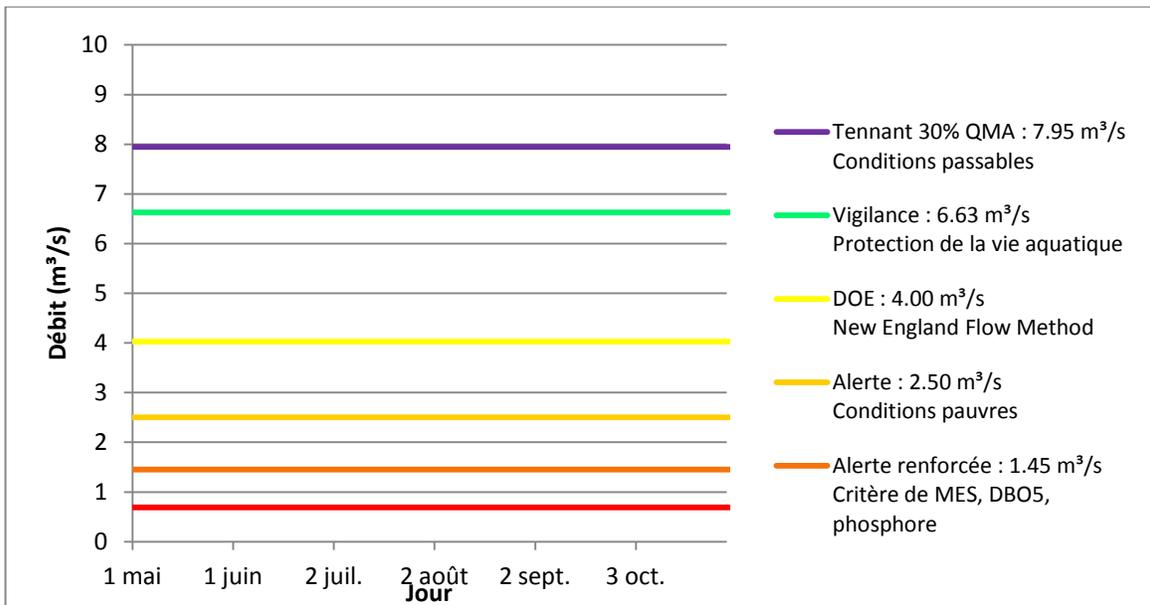


Figure C.29 Les niveaux d'alerte proposés à la station 030304

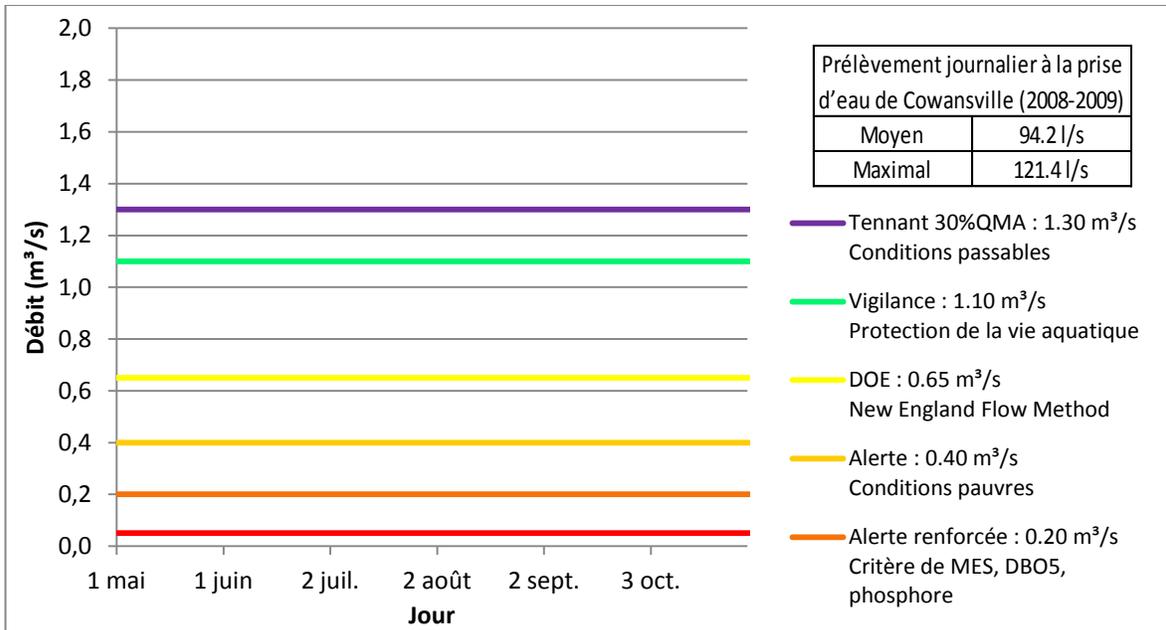


Figure C.30 Les niveaux d'alerte proposés à la station 030314

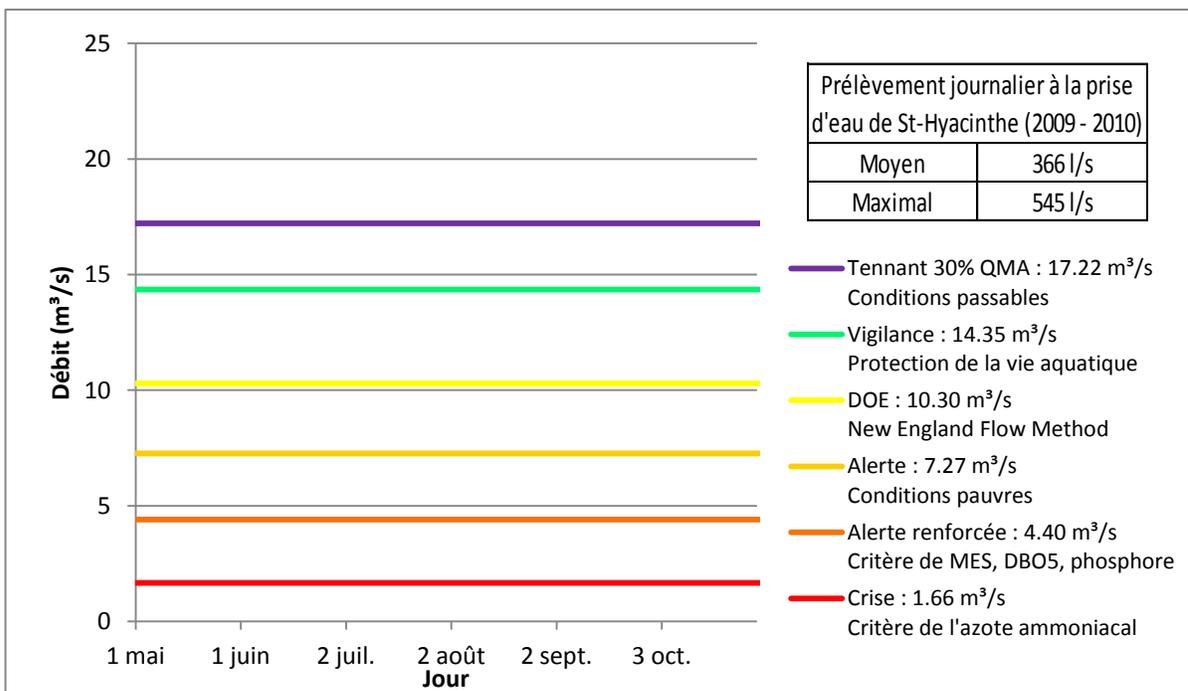


Figure C.31 Les niveaux d'alerte proposés aux stations 030341 et 030345

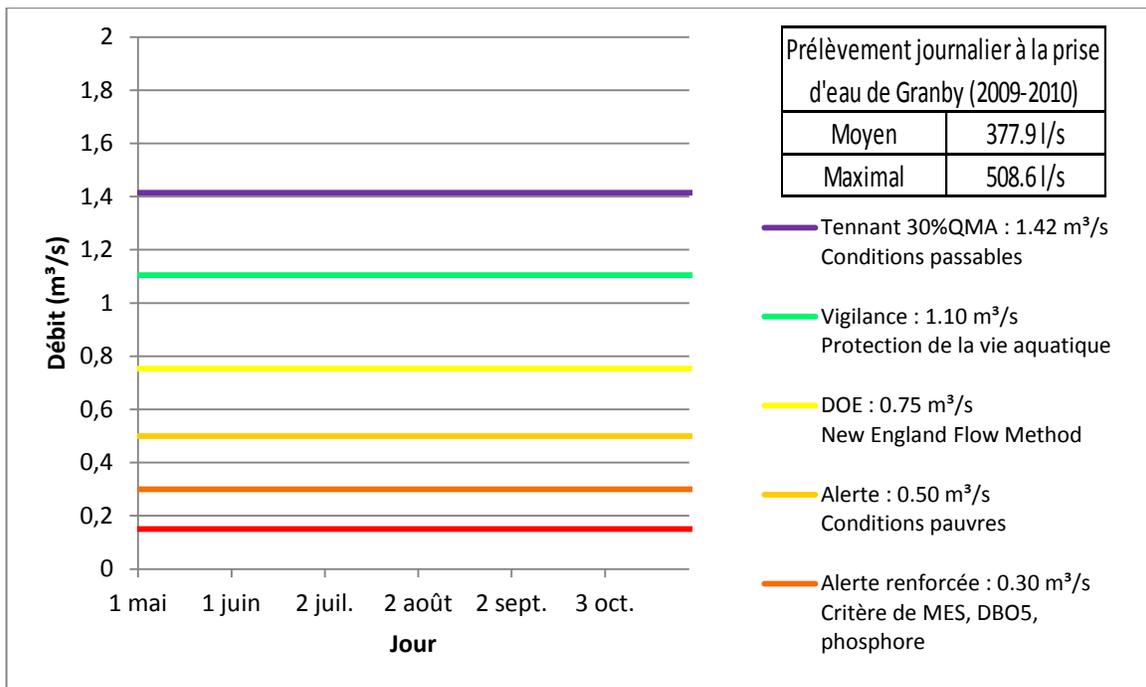


Figure C.32 Les niveaux d'alerte proposés à Granby (prise d'eau)

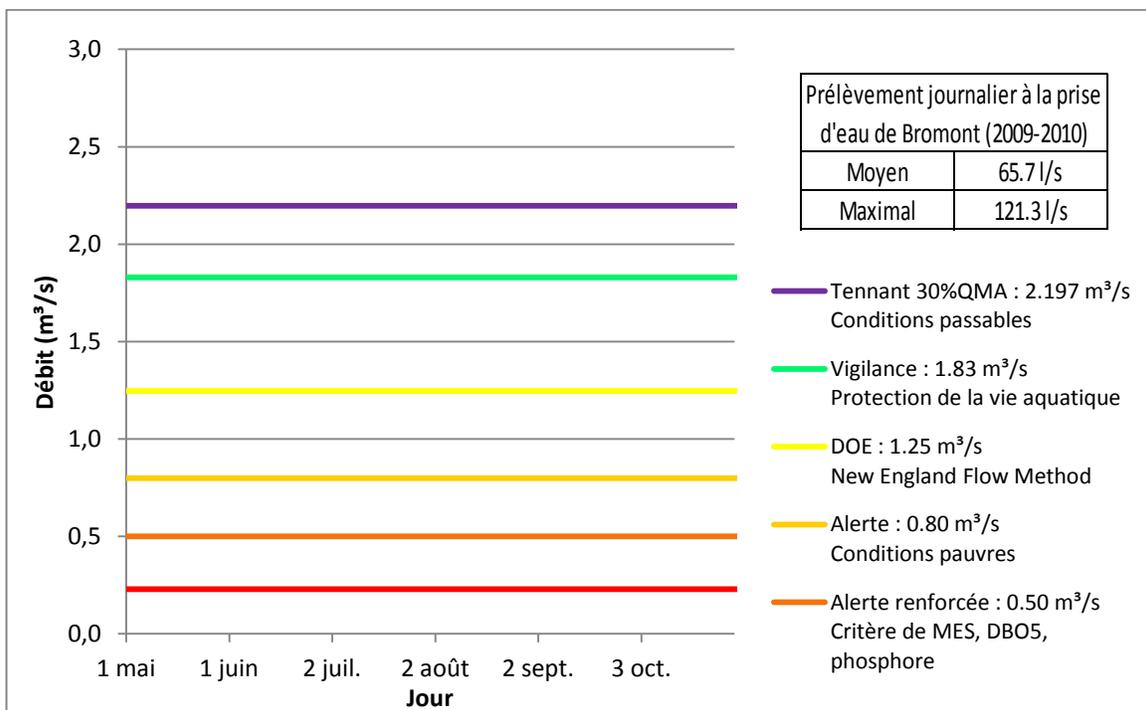


Figure C.33 Les niveaux d'alerte proposés à Bromont (prise d'eau)

Annexe D - Les mesures de restriction proposées pour chacun des niveaux d'alerte

Tableau D.1 Mesures pour l'usage domestique privé

Usage	Vigilance	DOE	Alerte	Alerte renforcée	Crise
DOMESTIQUE PRIVÉ	Sensibilisation (communiqué)				
Lavage des voitures (sauf dans les stations munies d'un système de recyclage)		Jours pairs / impairs	Jours pairs / impairs et interdit de 8h à 20h	Interdit	Interdit
Arrosage des pelouses		Jours pairs / impairs	Jours pairs / impairs et interdit de 8h à 20h	Interdit	Interdit
Arrosage des potagers		Jours pairs / impairs	Jours pairs / impairs et interdit de 8h à 20h	Jours pairs / impairs et interdit de 8h à 20h	Interdit
Remplissage des piscines		Jours pairs / impairs	Jours pairs / impairs et interdit de 8h à 20h	Interdit	Interdit
Remplissage des plans d'eau		Jours pairs / impairs	Jours pairs / impairs et interdit de 8h à 20h	Interdit	Interdit
Nettoyage (à l'eau) des entrées privées		Interdit	Interdit	Interdit	Interdit
Nettoyage des façades et terrasses		Interdit (sauf en cas de travaux)	Interdit (sauf en cas de travaux)	Interdit	Interdit
*** Les mesures de restriction ne sont pas applicables si l'eau provient de réserves pluviales (barils d'eau de pluie)					

Tableau D.2 Mesures pour l'usage domestique collectif

Usage	Vigilance	DOE	Alerte	Alerte renforcée	Crise
DOMESTIQUE COLLECTIVE	Sensibilisation (communiqué)				
Arrosage des espaces verts publics et privée		Interdit de 8h à 20h	Interdit de 8h à 20h	Interdit de 8h à 20h	Interdit
Arrosage des espaces sportifs		Interdit de 8h à 20h	Interdit de 8h à 20h	Interdit de 8h à 20h	Interdit
Arrosage des terrains de golfs		Interdit de 8h à 20h	Interdit (sauf pour les départs et les verts qui est permis de 20h à 8h)	Interdit (sauf pour les greens qui est permis de 20h à 8h)	Interdit
Alimentation des fontaines publiques (en circuit ouvert)		Interdit	Interdit	Interdit	Interdit

Lavage des rues et des trottoirs		Interdit (sauf en cas de travaux)	Interdit (sauf en cas de travaux)	Interdit	Interdit
Rinçage du réseau d'aqueduc		Interdit	Interdit	Interdit	Interdit
Remplissage des piscines publiques		Interdit de 8h à 20h	Interdit de 8h à 20h	Interdit de 8h à 20h	Interdit

Tableau D.3 Mesures pour l'usage agricole

Usage	Vigilance	DOE	Alerte	Alerte renforcée	Crise
AGRICOLE	Sensibilisation (communiqué)				
Contrôle		Renforcer le contrôle du respect des autorisations de prélèvement	Renforcer le contrôle du respect des autorisations de prélèvement	Renforcer le contrôle du respect des autorisations de prélèvement	Renforcer le contrôle du respect des autorisations de prélèvement
Grandes cultures :					
- Prélèvement dans les cours d'eau et dans leurs nappes d'accompagnement		Mise en place de tours d'eau (1 journée sur 2)	Mise en place de tours d'eau (1 journée sur 2) et interdiction de 8h à 20h	Mise en place de tours d'eau (1 journée sur 3) et interdiction de 8h à 20h	Interdit
- Prélèvement dans les nappes souterraines		Limitation de 15 %	Limitation de 30 %	Limitation de 50 %	Interdit
Irrigation par submersion		Interdit	Interdit	Interdit	Interdit
Arrosage des cultures légumières et maraîchères en plein champ				Interdit de 10h à 17h	Interdit de 8h à 20h
Arrosage des cultures sous serres				Interdit de 10h à 17h	Interdit de 8h à 20h
Arrosage des cultures spécialisées				Interdit de 10h à 17h	Interdit de 8h à 20h
Bassinage des semis				Interdit de 10h à 17h	Interdit de 8h à 20h

Tableau D.4 Mesures pour l'usage industriel

Usage	Vigilance	DOE	Alerte	Alerte renforcée	Crise
INDUSTRIEL	Sensibilisation (communiqué)				

Contrôle		Renforcer le contrôle du respect des autorisations de prélèvement	Renforcer le contrôle du respect des autorisations de prélèvement	Renforcer le contrôle du respect des autorisations de prélèvement	Renforcer le contrôle du respect des autorisations de prélèvement
Limitation		Limitation de la consommation au strict minimum	Limitation de 10 % au compteur	Limitation de 20 % au compteur	Limitation de 30 % au compteur

Tableau D.5 Mesures pour d'autres usages

Usage	Vigilance	DOE	Alerte	Alerte renforcée	Crise
AUTRES					
Stations d'épuration		Surveillance accrue des rejets	Surveillance accrue des rejets	Certains rejets pourront être décalés jusqu'au retour d'un débit plus élevé	Certains rejets pourront être décalés jusqu'au retour d'un débit plus élevé
Activités récréatives		Inciter les acteurs à avoir des pratiques respectueuses vis à vis du milieu aquatique particulièrement vulnérable.		Interdiction : Parcourir le lit des cours d'eau à pied ou en véhicule à moteur	Interdiction : Parcourir le lit des cours d'eau à pied ou en véhicule à moteur
Protection contre les risques d'incendie				Interdiction de mises à feu d'herbes, de broussailles, de talus, d'ordures, etc.	Interdiction de mises à feu d'herbes, de broussailles, de talus, d'ordures, etc.

Annexe E – Portail

Firefox Proj et Yamaska

67.205.74.208/~groupe6_2011/Accueil.html

Développement d'un prototype de système d'alerte aux faibles débits et aux prélèvements excessifs dans le bassin versant pilote de la rivière RIVIÈRE YAMASKA

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

■ Accueil

■ Covansville

■ Farnham

■ Rivière Noire

■ St-Hippolyte

■ Prévisions météo

■ Trucs et astuces

■ Liens utiles

■ Cartes

Accueil

Choisir une ville sur la carte pour obtenir les prévisions des débits

OURANOS

Ressources naturelles Canada / Natural Resources Canada

Canada

Réalisé en partenariat avec Ressources naturelles Canada

Fondsvert Québec

Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques (PACC)

Centre d'expertise hydrique Québec

Annexe F – Exemple de bulletin périodique sur l’hydraulicité



Rapport périodique sur l'hydraulicité
Mardi 4 septembre 2012

Fait saillant :

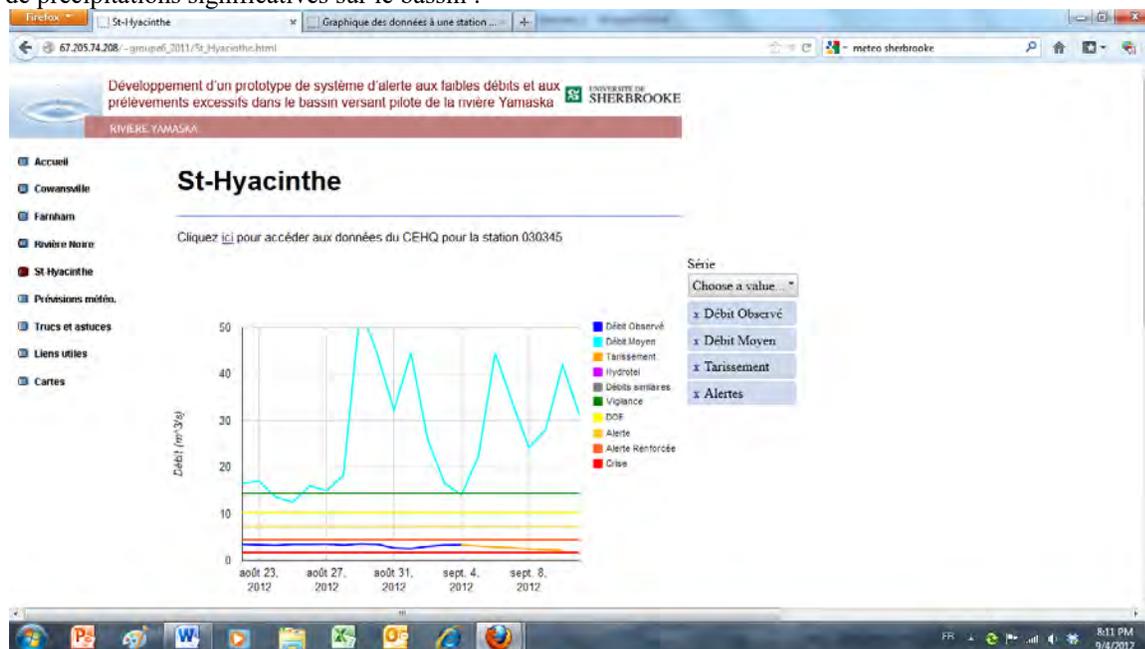
- le débit de la Noire (0.21 m³/s) est encore inférieur au débit à Cowansville (0.29 m³/s), alors que les superficies des bassins versants sont respectivement de 1 490 km² et de 210 km².

St-Hyacinthe

Le débit à St-Hyacinthe est au-dessus du minimum historique pour la période :

<http://www.cehq.gouv.qc.ca/suivihydro/graphique.asp?NoStation=030345>

Les prévisions du tarissement indiquent que le débit se maintiendra sous le niveau d'alerte renforcée s'il n'y a pas de précipitations significatives sur le bassin :



(lien : http://67.205.74.208/~groupe6_2011/St_Hyacinthe.html)

Le débit sur la rivière Noire est à un **minimum historique** :

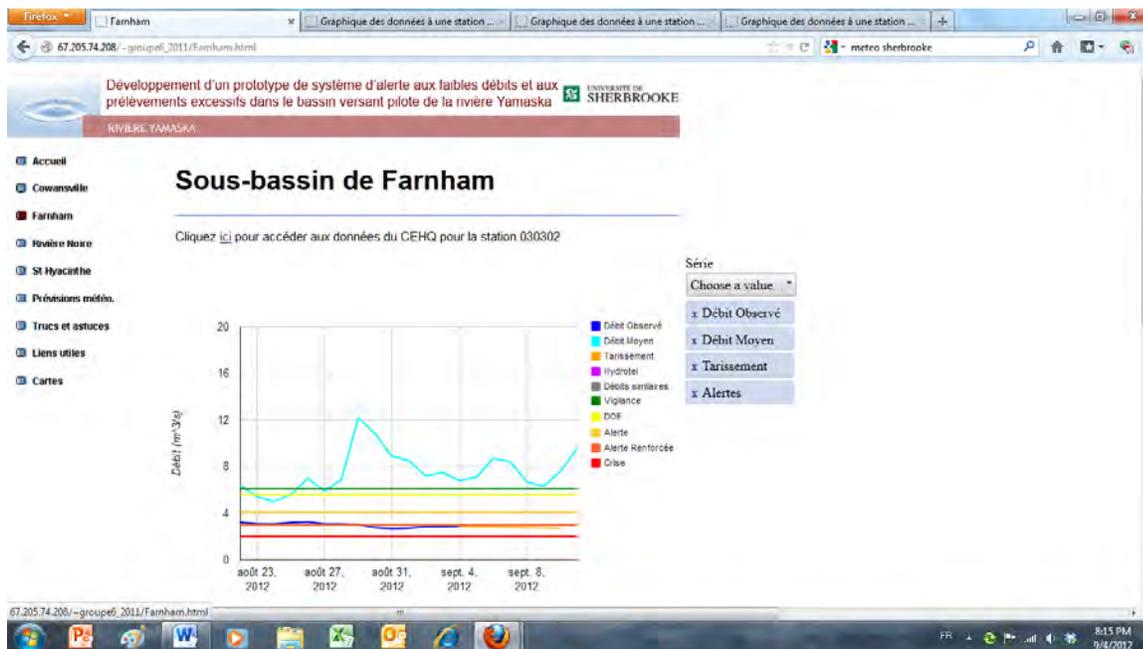
<http://www.cehq.gouv.qc.ca/suivihydro/graphique.asp?NoStation=030304>

Farnham

Le débit à Farnham se maintient entre la médiane et le minimum historique de la période :

<http://www.cehq.gouv.qc.ca/suivihydro/graphique.asp?NoStation=030302>

Les prévisions du tarissement indiquent que le débit se maintiendra légèrement sous le niveau d'alerte renforcée s'il n'y a pas de précipitations significatives sur le bassin :



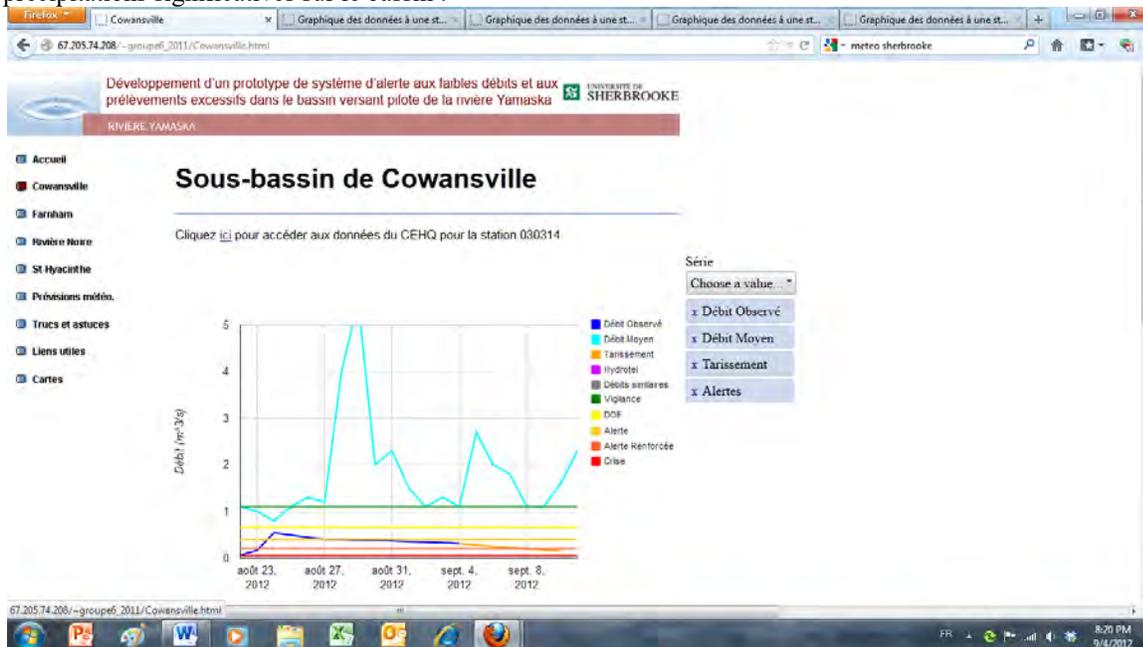
(lien : http://67.205.74.208/~groupe6_2011/Farnham.html)

Cowansville

La situation se maintient assez bien à Cowansville et le débit est légèrement sous la médiane de la période :

<http://www.cehq.gouv.qc.ca/suivihydro/graphique.asp?NoStation=030314>

Les prévisions du tarissement indiquent que le débit descendra sous le niveau d'alerte renforcée s'il n'y a pas de précipitations significatives sur le bassin :



(lien : http://67.205.74.208/~groupe6_2011/Cowansville.html)

Bromont

Les débits relâchés à la sortie du barrage Foster ne sont pas disponibles, la station étant en panne :

<http://www.cehq.gouv.qc.ca/suivihydro/graphique.asp?NoStation=030351>

Le niveau du lac Brome se situe à sa valeur la plus faible de la période estivale depuis 2005, date du début des enregistrements :

<http://www.cehq.gouv.qc.ca/suivihydro/graphique.asp?NoStation=030350>

Granby

Les débits relâchés au barrage Choinière se situent à la valeur médiane de la période :

<http://www.cehq.gouv.qc.ca/suivihydro/graphique.asp?NoStation=030309>

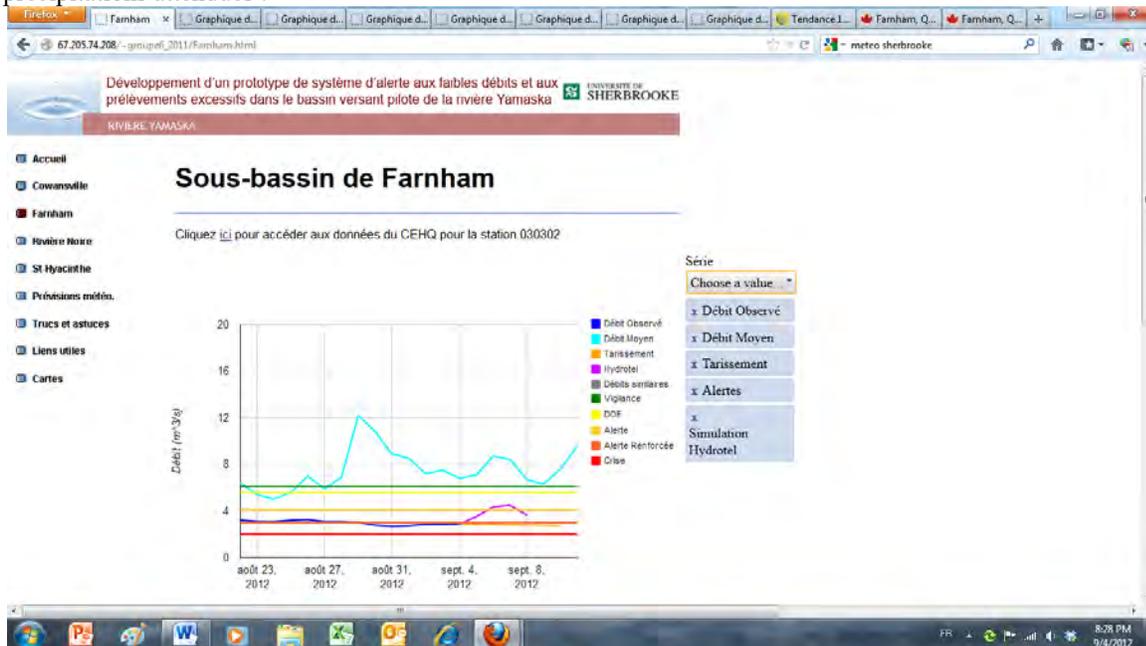
Conclusion

L'évolution de la situation à court terme dépendra des précipitations qu'apportera le restant de l'ouragan Isaac :

http://www.weatheroffice.gc.ca/forecast/city_f.html?qc-140&unit=i

<http://www.meteoimedia.com/fourteenday/caqc0161>

À titre d'exemple, voici la prévision faite avec le modèle de simulation Hydrotel à Farnham, qui tient compte des précipitations attendues :



Nous continuerons de suivre la situation avec vous.

Salutations cordiales

Pr Bertrand Côté, ing.
Département de génie civil
Université de Sherbrooke

Supplément ARMPC/HACCP

**PROPOSITION D'UNE APPROCHE D'ANALYSE DE RISQUES APPLIQUÉE À
L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE DE MUNICIPALITÉS DU BASSIN VERSANT
DE LA RIVIÈRE YAMASKA ET À LA PROTECTION DU MILIEU AQUATIQUE
DANS UN CONTEXTE D'ÉTIAGES SÉVÈRES ET DE PRÉLÈVEMENTS
EXCESSIFS**

1. Introduction

Les prévisions disponibles en ce qui a trait aux changements climatiques et à leurs impacts sur le territoire de la province de Québec indiquent que les conditions d'étiage qui s'installeront progressivement dans les divers bassins versants québécois auront pour conséquence de diminuer de façon drastique les débits d'étiage des cours d'eau qui s'écoulent dans les bassins versants situés dans le territoire situé au sud du fleuve Saint-Laurent. Or, en tenant compte des relevés effectués par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) au cours des dernières années et des données accumulées par la Direction régionale de l'analyse et de l'expertise de l'Estrie et de la Montérégie du Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP), il y a tout lieu de prévoir que le bassin versant de la rivière Yamaska sera le site d'étiages sévères qui pourraient (1) compromettre l'alimentation en eau potable de municipalités qui y puisent leur eau brute et (2) détériorer le milieu aquatique des divers plans d'eau.¹

Cette prévision est d'autant plus significative que la sévérité des étiages futurs pourra également affecter de façon importante la qualité des eaux de surface en divers points du bassin versant et ainsi influencer les usages et usagers de ces eaux, dont les centrales de traitement de l'eau (CTE).

Devant ces constats et les risques qui guettent les diverses communautés du bassin versant de la rivière Yamaska, il y a lieu de rechercher et d'appliquer une approche d'analyse des risques qui permettra de minimiser ceux-ci tout en diminuant leurs conséquences en cas d'étiages sévères découlant des changements climatiques prévisibles pour ce bassin versant. D'ailleurs, cette démarche est d'autant plus urgente que ce bassin versant est déjà aux prises avec des conditions sévères d'étiages lorsqu'il est comparé à d'autres bassins versants de la province de Québec et comme ce fut le cas au cours de l'été 2012 où des débits de l'ordre des faibles niveaux historiques ont été observés.

Le présent rapport a été préparé pour rendre compte d'une recherche en vue de l'application d'une approche d'analyse des risques fondée sur l'identification de points de contrôle qui seront mis à profit pour surveiller l'évolution des débits dans le bassin versant de la rivière Yamaska et pour alerter au besoin les municipalités dont les approvisionnements en eau brute sont conditionnés par les débits et la qualité des cours d'eau de ce même bassin versant. Alors, il sera possible de mettre en œuvre des plans d'intervention appropriés pour protéger à la fois la distribution d'eau potable sur les territoires des municipalités ainsi que la qualité du milieu aquatique qui conditionne à sa manière les caractéristiques de qualité des eaux de surface.

Le rapport décrira d'abord le contexte et les objectifs de la recherche (chapitre 2) pour ensuite présenter le cadre théorique et le résultat de la revue de littérature (chapitre 3), la méthodologie et les données (chapitre 4), chapitres qui seront suivis par les résultats (chapitre 5) et par l'analyse et la discussion (chapitre 6). Enfin, le chapitre 7 présentera la conclusion ainsi que des recommandations découlant de la recherche. Pour sa part, le chapitre 8 décrira les références pertinentes à cette démarche scientifique et des annexes viendront compléter la présentation du rapport.

2. Contexte/Objectifs

La perspective des changements climatiques permet de considérer que des répercussions significatives seront perceptibles en ce qui a trait au régime hydrologique des divers bassins versants du Québec ainsi qu'ailleurs au Canada et dans le monde. L'Australie est, depuis un certain temps déjà, en alerte face aux pénuries d'eau, tout comme l'est l'Alberta au Canada, par exemple. Au Québec, il est prévisible que les étiages estivaux de certaines rivières risquent d'augmenter en sévérité, en durée et en fréquence. Or, c'est le bassin versant de la rivière Yamaska qui risque de subir l'impact des changements climatiques de façon plus aigüe qu'ailleurs au Québec, si l'on s'en tient aux données collectées par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), notamment.

Dans le contexte où l'eau se doit d'être considérée par l'ensemble des intervenants à la fois comme une « RICHESSE à conserver » et une « RESSOURCE à protéger », ce avec tout le RESPECT qui s'impose, il va de soi que les communautés qui comptent sur cette eau dans le bassin versant de la rivière Yamaska se doivent de se préparer immédiatement, sans attendre que les conditions empirent, afin de mettre en place des plans qui auront pour objectif ultime de conserver et de protéger l'eau de même que tous les usages qui s'y rattachent et qui en dépendent.

Récemment, soit en 2010, le gouvernement du Québec a lancé sa **Stratégie québécoise d'économie d'eau potable** ² qui découle de la démarche globale décrite dans la **Politique nationale de l'eau (2002)** ³. Comme l'indique son titre, cette stratégie vise tout particulièrement l'économie de l'eau potable lors de sa consommation. Or, sans négliger les bénéfices qui découleront nécessairement de la mise en œuvre progressive de cette stratégie, il y a également lieu de considérer un élément essentiel et incontournable du portrait global de l'approvisionnement en eau potable, soit la disponibilité et la qualité de l'eau brute alimentant les systèmes de distribution d'eau potable des communautés.

En effet, les succès et bénéfices découlant de la diminution de la consommation d'eau potable – l'économie – contribueront de toute évidence à diminuer, de façon plus ou moins importante selon les contextes, les débits d'eau brute puisés dans les cours d'eau sur une base annuelle. Cependant, il est tout à fait prévisible que cette diminution ne compensera pas que partiellement les diminutions progressives et prévisibles des étiages estivaux selon les modèles en vigueur. Il est donc impératif que les communautés vivant dans le bassin versant puissent s'adapter aux changements climatiques en ce qui a trait aux usages de l'eau de celui-ci en développant des outils de gestion appropriés qui seront à la fois spécifiques et opérationnels.

C'est dans ce contexte que les objectifs suivants ont été définis pour le projet de recherche portant sur le bassin versant de la rivière Yamaska :

- Définition de seuils critiques de contrôle en regard de l'approvisionnement en eau brute et des impacts sur le milieu aquatique en cas d'étiages sévères et de prélèvements excessifs selon le modèle d'analyse de risques et de maîtrise des points critiques

- Proposition de plans d'intervention devant être mis en œuvre dans les communautés en cas de dépassement des seuils convenus

L'outil de gestion proposé constituera un moyen de surveillance et de vigilance – une veille préventive en quelque sorte - dont les communautés pourront profiter pour conserver leurs approvisionnements en eau brute – la RESSOURCE - tout en protégeant le milieu aquatique – la RICHESSE – milieu qui est caractérisé par divers usages dont bénéficient ces mêmes communautés (loisirs, tourisme, etc.).

3. Cadre théorique/Compte-rendu de la revue de littérature

3.1 Contexte

Au cours des dernières décennies, l'analyse de risques est devenue progressivement une activité des plus répandues dans divers domaines d'intervention en raison des nombreux bénéfices qui en découlent en terme (1) d'optimisation des opérations en cours et (2) de moyen de favoriser l'adaptation de nos communautés en ce qui a trait aux dangers qui les entourent et qui peuvent les frapper à tout moment.

À titre d'exemple, notons la démarche contemporaine de Sécurité civile Québec ⁴ qui vise à développer un « *outil complémentaire pour anticiper et communiquer les risques* ». La première phase de cette démarche s'intéresse plus particulièrement à la surveillance des crues. D'ailleurs, on n'a qu'à penser à la crue très récente de la rivière Richelieu au printemps 2011 pour réaliser l'urgence et la nécessité d'un tel outil et pour anticiper les bénéfices qui pourraient en découler en termes de protection des collectivités (vies, biens, infrastructures, etc.), notamment, si des événements semblables devaient se produire à nouveau dans le futur.

Sommairement, la démarche de Sécurité civile Québec vise à permettre l'anticipation des phénomènes naturels dangereux en vue d'alerter, en cas de crues prévisibles, la population, les municipalités ainsi que les ministères et organisations faisant partie de l'Organisation de la sécurité civile du Québec en tenant compte d'un ensemble de paramètres pertinents :

- Des sources d'information disponibles
- Des données historiques
- De niveaux d'alerte liés à des indicateurs de vigilance
- Des vulnérabilités des régions du Québec

Au moyen de cet outil, une surveillance sera donc exercée afin d'alerter les intervenants et de communiquer efficacement et le plus rapidement possible. L'outil comportera un portail – du type *tableau de bord* – qui permettra de diffuser de l'information sur les conséquences de phénomènes tels que les crues au moyen de diverses technologies de communication.

De façon semblable, la présente démarche de recherche s'intéresse au phénomène des étiages sévères plutôt qu'aux crues majeures dont il est question plus haut. Il est toutefois possible d'y voir une similitude puisque l'approche d'analyse de risques utilisée dans la présente recherche tient compte également des vulnérabilités/risques et vise à développer un

portail – du type *tableau de bord* – qui tiendra compte notamment de données historiques de diverses sources pour alerter les communautés en utilisant des indicateurs particuliers, sinon originaux, ce afin de mettre en œuvre le plus rapidement possible des plans d'intervention prédéfinis pour minimiser les conséquences des étiages sévères sur les communautés, tout en cherchant à protéger l'intégrité du milieu aquatique.

3.2 Approche ARMPC et exemples pertinents

L'approche d'analyse des risques et de maîtrise des points de contrôle (ARMPC)⁵ constitue l'outil fondamental à l'aide duquel le système d'alerte aux faibles débits et aux prélèvements excessifs sera développé par l'ensemble de l'équipe. L'ARMPC est la terminologie utilisée pour identifier une approche équivalente, l'HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points)⁶, dont l'utilisation a débuté, il y a environ une cinquantaine d'années, pour fournir aux astronautes américains une alimentation sécuritaire durant leurs premiers périple dans l'espace.

Depuis lors, cette approche a notamment été mise à profit par le domaine de l'alimentation dans plusieurs pays et elle sert actuellement de référence à l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA) dans ses activités en lien avec le domaine alimentaire à travers le pays.

Il est intéressant de prendre connaissance des bénéfices que l'ACIA rattache à cette stratégie de surveillance en temps réel de la qualité de la production alimentaire dans un procédé industriel fonctionnant en continu et de les reformuler selon des termes qui tiennent compte du contexte de la présente recherche qui vise à développer une stratégie de surveillance en temps réel de l'évolution des débits dans le bassin versant de la rivière Yamaska. Cet exercice est présenté dans le tableau 1.

Tableau 1 - Bénéfices associables à l'approche HACCP selon l'ACIA et reformulés dans le cadre de la présente recherche

Domaine de l'alimentation	Étiages sévères et prélèvements excessifs
Intégration officielle des principes de salubrité des aliments au processus de production	Intégration des principes de protection de l'environnement/biodiversité au processus de gestion de l'eau
Responsabilisation accrue des employés envers la production d'aliments sains	Responsabilisation accrue des intervenants envers la gestion de l'eau et la protection de l'environnement/biodiversité
Confiance accrue des acheteurs et des consommateurs des aliments	Confiance accrue des utilisateurs et consommateurs de l'eau
Maintien ou accroissement de l'accès aux marchés	Maintien ou accroissement de la disponibilité de la RESSOURCE eau pour ses utilisateurs/consommateurs et pour la protection de l'environnement/biodiversité
Réduction des pertes	Diminution des prélèvements, de production d'eaux usées et des rejets/impacts dans le milieu récepteur et protection de l'eau en tant que RICHESSE et RESSOURCE

Sommairement, l'approche HACCP/ARMPC est une méthode structurée d'identification de sites de problèmes potentiels ainsi que de surveillance en temps réel et d'identification des mesures correctrices applicables en cas de tels problèmes. La mise en œuvre de cette approche s'appuie donc sur une **analyse en vue d'identifier les risques présents** qui sont par la suite l'objet d'une évaluation et d'une caractérisation par l'équipe de travail en tenant compte (1) de la vraisemblance d'un événement et (2) des conséquences de ce même événement, ceci en vue de prioriser les interventions à effectuer. Au cours de cette analyse, des **points de contrôle** sont identifiés, de même que des moyens de surveillance et des valeurs cibles à ne pas dépasser. Ce faisant, il est également possible d'identifier des **points de contrôle critiques**, soit des sites en aval desquels aucun contrôle n'est plus possible. La démarche se poursuit alors par la définition à l'avance de plans d'intervention en cas de dépassements des divers seuils convenus afin (1) d'informer adéquatement les intervenants et (2) de procéder aux correctifs appropriés.

De façon séquentielle, il est possible de décrire une démarche HACCP/ARMPC au moyen des étapes suivantes :

1. Former une équipe HACCP/ARMPC
2. Décrire le système à surveiller
3. Identifier les usages et les usagers du système
4. Construire un diagramme du système
5. Confirmer le diagramme du système
6. Mener une analyse de risques
7. Identifier les points de contrôle critiques
8. Installer un système de surveillance de l'état des points de contrôle
9. Identifier des mesures correctrices en cas de dépassement des seuils
10. Valider/vérifier le plan HACCP/ARMPC

11. Documenter et entretenir le plan HACCP/ARMPC

Dans le cas présent, il est à noter que les étapes 1 à 5 ont déjà été réalisées de façon globale par l'ensemble de l'équipe de recherche sous la direction des professeurs Bertrand Côté et Robert Leconte, ce avec la collaboration de l'Organisme de bassin versant (OBV) dirigé par Catherine Laurence-Ouellet, qui a piloté la rédaction du Plan directeur de l'eau (PDE) de son organisme.

Dans le cas qui concerne plus particulièrement l'application de l'approche HACCP/ARMPC en tenant compte des conséquences des étiages sévères sur la disponibilité et la qualité des eaux de surface, les étapes 6 à 9 feront l'objet des prochaines sections du présent rapport, alors que les étapes 10 et 11 seront réalisées de façon récurrente, une fois que l'approche entière aura été implantée et mise à l'épreuve.

Notons en terminant que l'approche HACCP/ARMPC a fait ses preuves dans divers domaines de notre société ⁷. Depuis son utilisation première pour la protection de la santé des astronautes, cette approche a permis, en outre, de développer des outils pour la fourniture d'eau potable dans des pays tels que l'Australie, l'Islande et la Suisse. Plus près de nous, l'Association canadienne des eaux potables et usées (ACPEPU/CWWA) s'est servie de cette même approche pour développer un outil nommé **Plan de sécurité pour l'eau des systèmes municipaux d'eau potable** tout en mettant à profit l'approche des barrières multiples préconisée par Santé Canada pour la protection de l'eau potable. Toujours au Canada, la province de l'Ontario s'est inspirée de cette même approche pour la protection de l'eau de son territoire à la suite de la tragédie de Walkerton qui a coûté la vie à 7 personnes en 2000. D'autres organisations telles que l'AWWA, l'OMS et la USEPA ont également profité de cette approche pour développer des outils de surveillance et de vigilance du domaine de l'eau.

Devant ce constat sur les bénéfices tirés de l'application de l'approche HACCP/ARMPC, cette recherche a été menée selon ce même modèle que l'on a appliqué de façon originale à la surveillance et à la vigilance en cas d'étiages sévères et de prélèvements excessifs dans le bassin versant de la rivière Yamaska. Dans le contexte actuel de développement de stratégies pour protéger les communautés en regard des changements climatiques appréhendés, quoi de mieux que d'utiliser une approche qui vise à identifier des DANGERS, leurs CONSÉQUENCES et des PLANS D'INTERVENTION, alors que le langage de la grande majorité des intervenants en matière de changements climatiques contient les termes équivalents : RISQUES, IMPACTS et OPTIONS D'ADAPTATION.

Notons en terminant une manchette parue très récemment dans le journal *Le Soleil* (14 septembre 2012) ⁸ et qui met en lumière l'impact des étiages sur la qualité des eaux de surface : **La santé du fleuve inquiète**. Ce titre était suivi de deux autres titres : **Le fleuve manque d'eau** et **Impact possible sur la santé humaine**. En effet, des records de bas niveau ont été constatés à la suite de l'été que nous venons de connaître. Or, selon cet article, divers impacts sont maintenant prévisibles sur la distribution, l'abondance et la survie de plusieurs espèces, alors que l'on rappelle que les polluants agricoles sont plus concentrés lorsque les précipitations sont faibles, ce qui peut avoir un impact sur les stations de traitement d'eau.

4. Méthodologie/données

4.1 Toile de support pour les points de contrôle – Google Earth®

Le logiciel Google Earth®, logiciel gratuit et disponible universellement, a été utilisé comme toile de support pour les divers points de contrôle disponibles. Ce logiciel permet l'utilisation de fichiers *.kmz à l'intérieur desquels des données pertinentes au système d'alerte peuvent être inscrites en vue de les visualiser par la suite sur l'ensemble du territoire du bassin versant de la rivière Yamaska. Ces données peuvent alors servir à la définition de divers ensembles de points de contrôle qui seront mis à profit dans le cadre du système d'alerte aux étiages sévères et aux prélèvements excessifs. L'annexe 5 présente le mode d'emploi pour l'ouverture des fichiers dans l'environnement Google Earth® et la figure 37 présente une saisie d'écran montrant l'application développée.

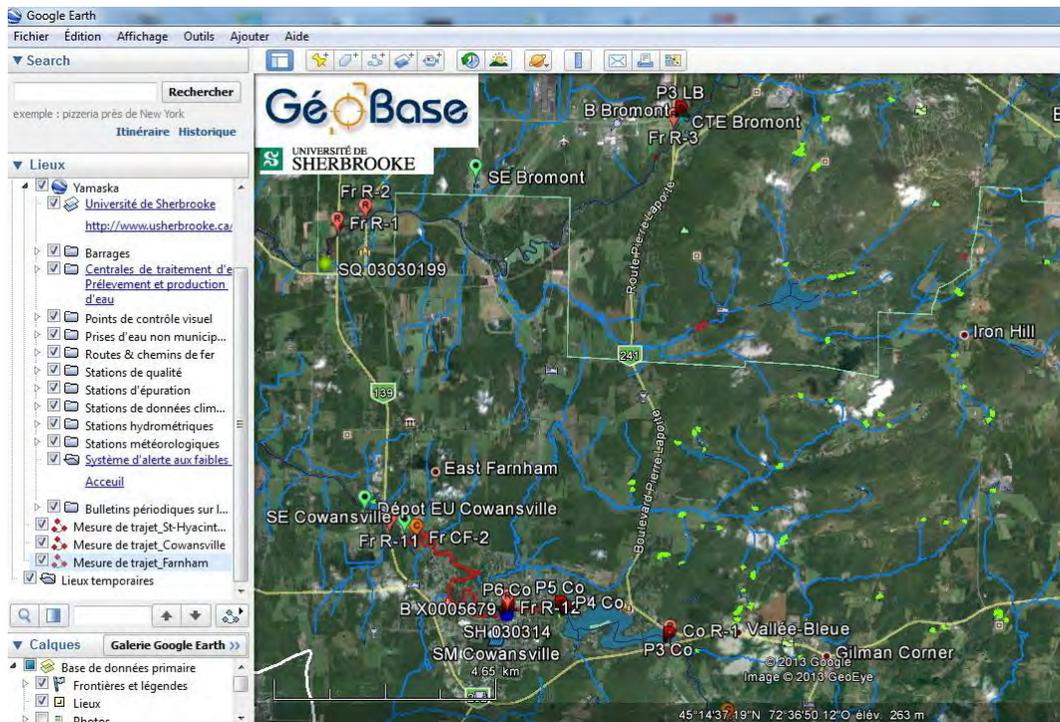


Figure S.34 – Tableau de bord sur Google Earth®

Les divers points de contrôle identifiés dans une première phase de la présente démarche peuvent être décrits de la façon suivante :

4.1.1 Les stations hydrométriques (SH)

Des stations hydrométriques, sous la responsabilité du CEHQ⁹, sont installées sur le territoire du bassin versant de la rivière Yamaska et permettent de connaître en temps quasi réel les débits et les niveaux d'eau dans la rivière Yamaska et ses affluents. Les données de telles

stations sont stratégiques pour le suivi en continu des débits d'eau sur le territoire et la prise de décision éclairée en ce qui a trait aux contextes météorologiques pouvant mener à des étiages sévères.

En terme de RISQUE, il pourrait arriver que de telles stations subissent une avarie qui conduirait à une absence temporaire de données jusqu'au moment de la réparation de la station. Par exemple, un bris d'équipement peut survenir et ainsi mettre un terme à l'acquisition des données temporairement. Certains événements hydrologiques ou anthropiques peuvent aussi influencer la qualité des résultats d'une station hydrométrique (niveau ou débit), et ce jusqu'à ce que de nouveaux relevés soit effectués.

4.1.2 Les centrales de traitement de l'eau (CTE)

Généralement, les centrales de traitement de l'eau disposent de moyens de mesure en temps réel des débits d'eau brute prélevés à même les cours d'eau et plans d'eau qui les alimentent. De façon complémentaire, ces équipements municipaux mesurent, également en temps réel, les volumes d'eau potable qu'ils dirigent après traitement vers les systèmes de distribution. Dans la mesure où ces appareils fonctionnent normalement et sont fiables, ils renseignent sur les débits d'eau brute prélevés de même que, par extension, sur les coûts normaux de traitement ou les coûts plus élevés lors de la dégradation de la qualité de l'eau brute, ce qui peut conduire à un besoin accru de produits chimiques pour le traitement et à des livraisons anticipées de ceux-ci afin de maintenir des inventaires suffisants.

Les RISQUES typiques de tels équipements peuvent être associés à des bris occasionnels qui nécessiteront des réparations par le personnel compétent. Par contre, leur fonctionnement optimal peut être très bénéfique en cas de consommation excessive d'eau potable, de bris majeur de conduite du réseau de distribution ou d'étiage sévère appréhendé. Dans de telles circonstances, des plans d'intervention en vue de restreindre divers usages de l'eau peuvent être mis en application rapidement par les municipalités ou tout simplement pour colmater dans les meilleurs délais une fuite survenue dans le réseau de distribution. Finalement, on ne doit pas négliger que des débitmètres doivent être opérés dans des conditions fiables découlant d'étalonnages périodiques pour éviter les biais. Il en est de même pour les mesures de qualité des échantillons d'eau qui doivent être effectuées au moyen de techniques fiables.

4.1.3 Les points de contrôle visuels (PV)

Des portraits découlant de photographies prises périodiquement par des bénévoles supervisés par l'OBV servent à décrire à un moment donné les situations rattachées à différentes conditions de débit et de niveau d'eau en divers points d'observation situés sur la rivière Yamaska et ses affluents. Ces portraits peuvent renseigner sur les conditions normales et prévisibles de ces milieux en tenant compte des photographies archivées dans le système.

De plus, dans le domaine des RISQUES à gérer, les portraits peuvent évidemment fournir de l'information pertinente concernant des dommages causés au milieu (pertes d'habitats, pertes de milieu humides, réchauffement excessif de l'eau causant la mort de poissons, apparition de fleurs d'eau) lors de la diminution plus ou moins significative de débits. De même, les portraits peuvent renseigner sur des événements et/ou des gestes posés pour restreindre, sinon arrêter, l'écoulement libre de l'eau (arbre affaissé dans le cours d'eau, barrage bloqué artificiellement, par exemple). Finalement, ce type de contrôle pourrait être affecté par

l'absence temporaire de photographie périodique en raison de difficultés techniques ou de manque de personnel. L'annexe 4 présente la liste des PV dressée par l'OBVY, avec un exemple d'une séquence de photographies prises au cours de l'été 2012.

4.1.4 Les stations d'épuration des eaux usées (SE)

Les effluents des stations d'épuration des eaux usées contiennent des contaminants en concentrations variables qui sont l'objet de mesures périodiques pour en connaître le débit et pour vérifier la conformité aux normes et aux objectifs de performance de ces équipements.

Néanmoins, en terme de RISQUE, ces installations peuvent occasionnellement être le site de débordements, de contournements d'épuration, etc. qui peuvent affecter la qualité du milieu récepteur à la suite du rejet. La connaissance des débits mesurés au moyen d'appareils fiables pour les eaux épurées, débordées ou contournées est donc un élément stratégique face à des étiages sévères. Des mécanismes de communication en de tels cas sont essentiels pour protéger à la fois le milieu récepteur ainsi que des prises d'eau et des lieux de loisirs en plein air situés en aval.

4.1.5. Les routes et chemins de fer (R & CF)

Les routes qui serpentent un bassin versant de même que les chemins de fer présents sont empruntés pour le transport en vrac de diverses matières dont des produits chimiques ayant un potentiel de contamination de l'environnement en cas de déversements accidentels, notamment.

En terme de RISQUE, il y a donc lieu de tenir compte des contaminants de toutes sortes qui peuvent aboutir dans l'environnement et s'écouler vers des plans d'eau aux usages multiples à la suite d'un déversement accidentel. Même s'il va de soi que de tels accidents se doivent d'être gérés de façon proactive pour protéger en tout temps les prises d'eau notamment, les périodes d'étiages sévères doivent être considérées en priorité, étant donné que ces accidents pourraient avoir pour conséquence la fermeture plus ou moins longue d'une prise d'eau brute tant que les contaminants sont présents en concentration suffisante pour constituer un risque pour la santé humaine. Une telle circonstance nécessite un plan d'intervention approprié, en particulier si un centre de traitement de l'eau situé en aval ne dispose pas d'un procédé efficace pour arrêter ces contaminants lors de leur passage dans l'installation de traitement.

4.1.6 Les stations de qualité (SQ)

Diverses stations de mesure de la qualité de l'eau sont réparties dans le bassin versant et opérées par le MDDEFP (Réseau-Rivières)¹⁰. Ces stations permettent de connaître de façon périodique l'évolution de la qualité de l'eau des plans d'eau et de prendre des décisions quant à la gestion de ceux-ci et des sources de contamination qui y sont présentes ou y aboutissent. Il est à noter que les municipalités qui opèrent des centres de traitement de l'eau peuvent entretenir pour leurs propres besoins un système de mesure périodique de la qualité de l'eau à leur prise d'eau brute. Les données de ces systèmes constituent également un élément de contrôle qui peut être mis à profit par un système d'alerte.

Le RISQUE qui caractérise les stations du MDDEFP est l'absence de prélèvement périodique qui pourrait être compensé temporairement par les données de stations voisines, avant la reprise des prélèvements. Quant aux données des centres de traitement de l'eau, il pourrait arriver que les mesures soient suspendues temporairement. Par contre, elles demeurent une source disponible d'information pouvant être utilisée pour la prise de décision.

4.1.7 Les barrages (B)

Divers barrages ont été érigés dans le bassin versant de la rivière Yamaska au cours des années, tant pour la production d'énergie hydro-électrique que pour créer des réserves en vue d'approvisionner des centrales de traitement de l'eau ou aménager des plans d'eau pouvant servir à des activités de loisir. La gestion proactive de tels équipements peut permettre d'atténuer la sévérité d'étiages, en particulier en emmagasinant de l'eau en vue de périodes de sécheresse anticipées.

Le RISQUE majeur qui caractérise ces équipements est l'absence d'écoulement d'eau vers l'aval en raison d'un débit d'eau trop faible en provenance de l'amont ou d'une erreur de gestion de la part des responsables de l'équipement.

4.2 Maîtrise des risques au moyen des points de contrôle

Les divers points de contrôle identifiés ci-haut et introduits dans le logiciel Google Earth[®] serviront à la surveillance et à la vigilance en ce qui a trait aux risques identifiés pour le bassin versant de la rivière Yamaska. Tel qu'il est possible de le constater, ces points de contrôle peuvent être associés à un nombre significatif de RISQUES qui sont en lien avec la double nature de l'eau – RESSOURCE et RICHESSE. Il y a également lieu de considérer ces points de contrôle en fonction de l'information qu'ils peuvent fournir en temps réel tant sur la quantité que sur la qualité de l'eau dans le bassin versant de la rivière Yamaska.

Considérant ce qui précède sur les divers points de contrôle et les RISQUES que l'on peut associer à ceux-ci, le tableau 2 qui suit présente le portrait global de ceux-ci en lien avec les mesures effectuées à ces endroits, les renseignements concernant la quantité et la qualité de l'eau, les risques prévisibles et les actions/interventions qui en découlent.

Tableau 2 - Nomenclature des points de contrôle identifiés

POINT DE CONTRÔLE	MESURE	LIEN	RISQUE	ACTION/INTERVENTION
Station hydrométrique (SH)	Débit Niveau	Quantité	Bris d'appareil Biais d'appareil	Réparation Étalonnage
Centrale de traitement de l'eau (CTE)	Débits entrée et sortie Paramètres de qualité de l'eau brute	Quantité Qualité	Bris d'appareil Bris de réseau Prélèvement excessif Biais d'appareil Impact sur les coûts de traitement de l'eau Biais dans les mesures	Réparation Réparation Application de restrictions sur le territoire Étalonnage Optimisation du procédé Commande de produits chimiques supplémentaires Étalonnage
Portraits (PV)	Observation de sites particuliers	Quantité Qualité	Étiage local confirmé Dégradation visuelle et mortalités	Inspection locale et en amont Correction d'anomalies/interférences à l'écoulement
Stations d'épuration des eaux usées (SE)	Débits de l'effluent Paramètres de qualité des eaux épurées et autres	Quantité Qualité	Bris d'appareil Biais dans les mesures Rejets non épurés Qualité non conforme aux normes et objectifs	Réparation Étalonnage Correction de l'anomalie Information transmise en aval des rejets Optimisation du procédé
Routes et chemins de fer (R & CF)	Information sur l'événement	Qualité	Contamination excessive de la prise d'eau brute	Information pertinente transmise en aval du point de déversement Fermeture temporaire de la prise d'eau Optimisation du procédé
Stations de mesures de la qualité (SQ)	Paramètres de qualité de l'eau	Qualité	Absence de prélèvement Valeur anormale de qualité de l'eau	Reprise du prélèvement Prise en compte temporaire des stations de mesures voisines Inspection de l'amont de la station, correction de cause, information aux intervenants (CTE, SÉEU, etc.)
Barrages (B)	Gestion de l'écoulement	Quantité	Écoulement insuffisant	Contact avec le gestionnaire du barrage Inspection sur les lieux et en amont et mesures correctives

4.3 Mesures correctives associées aux prélèvements excessifs en cas d'étiages sévères

Dans tout bassin versant, le prélèvement excessif d'eau brute est un risque incontournable en cas d'étiages estivaux sévères puisque les communautés alimentées par un réseau de distribution d'eau potable auront tendance, en de telles circonstances, à utiliser des volumes d'eau plus élevés que la normale pour diverses fonctions plus ou moins essentielles. Pour s'en convaincre, on n'a qu'à penser aux usages à l'extérieur des résidences où l'eau est un élément essentiel: entretien des pelouses résidentielles, activités de jardinage, par exemple. On ne peut non plus négliger d'autres usages qui seront amplifiés par des conditions météorologiques estivales qui présentent des températures au-dessus des valeurs habituelles pour des périodes plus ou moins longues : piscines résidentielles, systèmes de climatisation, à titre d'exemples.

Dans un tel contexte où une communauté se doit de conserver son alimentation en eau pour protéger la santé de ses citoyens ainsi que leur sécurité en cas de feu, il est absolument essentiel de maintenir l'opération d'un réseau de distribution d'eau potable, même si les conditions climatiques sont exceptionnellement chaudes. Dans un tel cas, des niveaux croissants d'alerte s'imposent ainsi que des restrictions concernant l'ensemble des usages de l'eau du réseau de distribution d'eau potable.

D'ailleurs devant un risque imminent de pénurie d'eau, il va de soi que toute municipalité se doit d'adhérer dès aujourd'hui à la *Stratégie* provinciale qui vise l'économie d'eau, car elle permettra de diminuer tout au long de l'année les volumes d'eau prélevés à même les eaux de surface disponibles, ce tout en protégeant les approvisionnements des municipalités situées en aval qui profiteront alors d'un débit résiduel accru dans ce même cours d'eau. Toutefois, lorsque des conditions extrêmes commencent à s'installer et laissent prévoir des étiages sévères qui risquent d'être empirés progressivement avec le phénomène des changements climatiques, il est essentiel que les communautés d'un même bassin versant fassent équipe pour protéger et conserver l'eau disponible et se donnent des plans d'intervention efficaces et cohérents pour protéger ultimement leurs alimentations en eau potable ainsi que l'intégrité du milieu où elles s'approvisionnent. Ce faisant, les communautés conserveront l'usage des fonctions fondamentales de leurs réseaux, ce tout en protégeant, dans la mesure du possible, les fonctions du milieu aquatique.

C'est dans ce contexte que des mesures de restriction progressives du type de celles qui apparaissent aux tableaux 3 et 4 et qui sont généralement mises en œuvre par les municipalités, sont proposées ci-après à titre d'illustrations selon le domaine d'utilisation (résidentiel et communautaire) et selon la sévérité des étiages observés. Tel que précisé plus haut, de telles mesures visent essentiellement à ralentir la progression d'un étiage tout en protégeant les fonctions fondamentales de tout réseau de distribution d'eau potable ainsi que le milieu aquatique, dans la mesure du possible. Il est à noter que les domaines industriels et agricoles ne sont pas été considérés pour le moment étant donné que les industries du bassin versant sont alimentées à partir des réseaux municipaux et ne puisent pas directement dans les eaux de surface, alors que le domaine agricole, pour sa part, ne puise pas d'eau de surface de façon significative dans le bassin versant de la rivière Yamaska, sauf possiblement pour l'alimentation du bétail et d'autres animaux d'élevage.

Il y a tout lieu de retenir que les mesures proposées dans les tableaux 3 et 4 peuvent varier dans leur application selon le contexte municipal où elles pourraient être introduites. Par contre, pour éviter des conditions de crise pouvant comporter des conséquences malheureuses, il va de soi que toute communauté se doit (1) d'analyser les RISQUES pouvant la confronter en cas de pénurie d'eau et (2) d'identifier les CONSÉQUENCES pouvant en découler tout en évaluant la PROBABILITÉ de les subir. Ainsi, sa démarche la mènera nécessairement vers un ou des plans d'intervention adaptés au contexte local qui pourront être mis en œuvre dans les meilleurs délais pour corriger, dans la mesure du possible, des conditions jugées inacceptables.

Tableau 3 - Mesures de restrictions progressives pour les usages résidentiels selon la sévérité des étiages

Usage	Niveau				
	Vigilance	DOE ¹	Alerte ¹	Alerte renforcée ¹	Crise ¹
Lavage de voitures privées	Sensibilisation des clientèles à l'économie de l'eau potable et à la collecte de l'eau de pluie pour les usages extérieurs nécessitant de l'eau (arrosage des fleurs, lavage des voitures, par exemple)	Jours pairs/impairs	Jours pairs/impairs entre 20h et 8h	I ²	I
Arrosage de pelouses résidentielles		Jours pairs/impairs	Jours pairs/impairs entre 20h et 8h	I	I
Arrosage de potagers résidentiels		Jours pairs/impairs	Jours pairs/impairs entre 20h et 8h	Jours pairs/impairs entre 20h et 8h	I
Remplissage de piscines privées		Jours pairs/impairs	Jours pairs/impairs entre 20h et 8h	I	I
Remplissage de plans d'eau		Jours pairs/impairs	Jours pairs/impairs entre 20h et 8h	I	I
Nettoyage à l'eau d'entrées privées		I	I	I	I
Nettoyage à l'eau de façades et terrasses		I sauf en cas de travaux	I sauf en cas de travaux	I	I
Note 1 : Mesures applicables en cas d'usage d'eau potable du réseau de distribution					
Note 2 : I remplace Interdit					

Tableau 4 - Mesures de restrictions progressives pour les usages communautaires selon la sévérité des étiages

Usage	Niveau				
	Vigilance	DOE ¹	Alerte ¹	Alerte renforcée ¹	Crise ¹
Arrosage des espaces verts	Sensibilisation des clientèles à l'économie de l'eau potable et à la collecte de l'eau de pluie pour les usages extérieurs nécessitant de l'eau (lavage des rues et trottoirs, arrosage des terrains de golf, par exemple)	Entre 20h et 8h	Entre 20h et 8h	Entre 20h et 8h	I ²
Arrosage des espaces sportifs		Entre 20h et 8h	Entre 20h et 8h	Entre 20h et 8h	I
Arrosage des terrains de golf		Entre 20h et 8h	I sauf pour les verts et les départs entre 20h et 8h	I sauf pour les verts entre 20h et 8h	I
Alimentation des fontaines décoratives		I (sauf celles qui recyclent l'eau) (???)	I	I	I
Lavage des rues et trottoirs		I sauf en cas de travaux	I sauf en cas de travaux	I	I
Rinçage des réseaux de distribution		I sauf en cas de contamination	I sauf en cas de contamination	I	I
Remplissage des piscines publiques		Entre 20h et 8h	Entre 20h et 8h	Entre 20h et 8h	I
Remplissage des pataugeoires		A déterminer	A.D.	A.D.	A.D.
Entretien des surfaces de patinoires intérieures		Entre 20h et 8h	Entre 20h et 8h	I	I

Note 1 : Mesures applicables en cas d'usage d'eau potable du réseau de distribution
 Note 2 : I remplace Interdit

Les mesures présentées aux tableaux 3 et 4 constituent une proposition de départ qui doit faire l'objet d'une analyse critique de la part des municipalités. A l'usage, le choix des mesures devrait reposer sur la possibilité de démontrer que le bénéfice (pas seulement économique) lié à l'application d'une mesure restrictive est supérieur à ses inconvénients et que la balance de ceux-ci est préférable à celle du statu quo. Pour le moment, le niveau actuel des connaissances et des données disponibles ne permet pas de fournir un niveau de précision plus élevé.

4.4 Caractéristiques de qualité des eaux de surface

La recherche présente vise, entre autres, à mettre en lumière les corrélations possibles entre les valeurs de débit de la rivière Yamaska et de ses affluents et certaines caractéristiques de qualité de ces cours d'eau. En effet, il est d'un grand intérêt de vérifier cet aspect, car les données préliminaires recueillies à date et les témoignages recueillis tendent à démontrer clairement que les gestionnaires de centres de traitement de l'eau observent que les coûts de production d'eau potable ont tendance à augmenter de façon importante lorsque la qualité de l'eau brute se détériore, ce qui est tout à fait prévisible en soi. De plus, étant donné que des conditions d'étiages sévères peuvent être l'occasion d'une détérioration de la qualité de l'eau

brute - le volume d'eau disponible pour « diluer » les contaminants qui y aboutissent est de plus en plus faible au fur et à mesure que l'étiage progresse - il semble opportun de vérifier si de telles corrélations existent réellement entre les débits d'eau brute d'une part et la qualité de cette même eau d'autre part et si elles peuvent être extraites de données concrètes de suivi de la qualité de l'eau du bassin de la rivière Yamaska. Si tel était le cas, il y aurait possiblement lieu d'envisager d'utiliser une ou plusieurs telles corrélations sur la qualité de l'eau pour étoffer encore plus le système d'alerte en développement. Une telle contribution pourrait alors conduire à une forme de système-expert supplémentaire qui pourrait guider dans la prise de décision lors de l'apparition d'une condition d'étiage sévère doublée d'une détérioration de la qualité de l'eau approvisionnant une CTE qui pourrait éventuellement mettre en péril la potabilité de l'eau produite par cette même installation.

Pour ce faire, des données de qualité pour l'eau brute de la ville de St-Hyacinthe pour la période 2001-2011¹⁰ ont été rendues accessibles pour analyse subséquente et démonstration éventuelle de corrélations. Il est donc prévu de rechercher des corrélations pour certaines des données caractéristiques de qualité de l'eau brute de la rivière Yamaska à la prise d'eau de cette municipalité, étant donné qu'elles ont un lien privilégié avec la détérioration du milieu aquatique, en plus de pouvoir influencer la performance et les coûts de production d'eau potable, tel que mentionné précédemment.

Il est à remarquer que la position de la municipalité de St-Hyacinthe à l'extrémité aval du bassin versant pourrait rendre les corrélations plus difficiles en raison du grand nombre de facteurs qui peuvent influencer la qualité de l'eau et qui s'additionnent au fur et à mesure que l'eau s'écoule de l'amont vers l'aval. De plus, il est remarquable de constater que la fréquence des mesures est variable en raison, selon toutes probabilités, des objectifs d'opération de la municipalité et de la complexité des techniques de laboratoire pour effectuer ces mêmes mesures. Néanmoins, le présent exercice devrait permettre de démontrer si cette piste a le potentiel de contribuer à la prise de décision lors de la mise en œuvre du système d'alerte.

Les paramètres examinés parmi les paramètres présents dans la banque de données disponibles sont, (1) en ce qui concerne les éléments nutritifs, le phosphore total, l'azote ammoniacal ainsi que les nitrates/nitrites, (2) en ce qui concerne les gaz dissous, l'oxygène dissous et la température, et (3) en ce qui concerne la teneur en sels dissous, la conductivité. Tel que précisé plus haut, cet exercice est partiel, vu la dimension importante de la banque de données. Par contre, la présente recherche a néanmoins pour objectif premier d'identifier s'il existe une opportunité pour introduire dans le système d'alerte aux étiages sévères des considérations supplémentaires sur l'évaluation de tendances concernant la qualité de l'eau brute d'une seule des prises d'eau du bassin de la rivière Yamaska, tout en étant tout à fait conscient que des gestionnaires ont fort probablement identifié des corrélations du même genre pour les strictes fins de l'opération optimale des installations dont ils sont responsables.

4.4.1 Phosphore total

La présence de phosphore dans le milieu aquatique est stratégique en raison de son lien direct avec l'activité photosynthétique qui y règne et qui mène à la production de l'oxygène requis pour l'équilibre du milieu, car il a été démontré que le phosphore est le paramètre limitant de ce domaine. Toutefois, il est également connu qu'en cas de concentrations relativement élevées de phosphore, des algues microscopiques peuvent se développer de

façon excessive et nuire à la qualité de ce milieu. Étant donné que le phosphore des plans d'eau provient essentiellement des activités humaines, il y a donc lieu d'en connaître la concentration en vue de prendre des mesures correctives lorsque les teneurs dépassent les critères en vigueur.

Il est à noter que le MDDEFP ¹² suggère une concentration maximale de 0.03 mg/L P pour le phosphore dans le milieu aquatique pour éviter que l'eutrophisation ne s'y installe rapidement et en détériore la qualité tout en interférant avec les usages, dont la production d'eau potable.

4.4.2 Azote ammoniacal

L'azote ammoniacal regroupe tant l'ion ammonium (NH_4^+) que l'ammoniaque (NH_3) qui résultent tant de la décomposition de la matière organique azotée que de rejets en provenance des activités agricoles et des stations d'épuration des eaux usées, par exemple. L'azote ammoniacal contribue, en outre, à la toxicité des plans d'eau envers les poissons de même qu'à la consommation d'oxygène dissous lors de sa transformation en nitrites et en nitrates par le processus de nitrification. L'ammoniac présent dans l'eau d'approvisionnement peut également contribuer à l'augmentation de la consommation d'un oxydant tel que le chlore en raison de sa réaction avec cet oxydant essentiel qui peut entrer en compétition avec le procédé essentiel de désinfection de l'eau avant sa distribution en réseau.

Il est reconnu que des concentrations d'azote ammoniacal inférieures à 0.6 mg/L N sont acceptables pour l'eau d'un lac ¹², par exemple.

4.4.3 Nitrates/nitrites

Les nitrates et les nitrites proviennent essentiellement de la décomposition de la matière organique azotée par les micro-organismes lors de la nitrification. On ne doit pas négliger que les activités agricoles peuvent contribuer directement à l'augmentation des concentrations de nitrates dans l'environnement en raison de l'utilisation d'engrais à base de nitrates. Dans les eaux de surface, les concentrations de nitrites sont généralement faibles, soit de l'ordre de 0.001 mg/L N.

Il existe une norme ¹³ concernant la concentration de nitrates dans l'eau potable – 10 mg/L N – qui doit être respectée scrupuleusement pour éviter la méthémoglobinémie - maladie du bébé bleu – chez les nourrissons. Il est à noter que cette problématique est souvent liée à la mauvaise qualité d'une eau souterraine où des nitrates aboutissent en raison d'activités agricoles qui ont lieu en surface.

4.4.4 Oxygène dissous et température

Les eaux de surface contiennent une concentration d'oxygène dissous résultant à la fois de la dissolution de l'oxygène atmosphérique ainsi que de l'activité photosynthétique. L'oxygène est stratégique pour la qualité du milieu aquatique puisqu'il contribue à la transformation des contaminants qui s'y retrouvent en raison de déversements d'eaux épurées dans le milieu récepteur, notamment, en minimisant l'ampleur des zones d'anoxie qui résultent de tels déversements.

La concentration d'oxygène dissous dans les eaux de surface est directement fonction de la température qui y règne selon la relation inverse qui existe pour l'ensemble des gaz entre la concentration du gaz dissous et la température de l'eau. Il est à noter que la teneur en oxygène dissous est soumise à un cycle diurne en raison de l'activité photosynthétique qui est elle-même cyclique – production d'oxygène en présence de lumière durant le jour et consommation d'oxygène en absence de lumière durant la nuit.

Les eaux de surface présentent une température variable selon la période de l'année. En période hivernale, leur température peut être voisine de 0 °C, alors qu'en période estivale, elles peuvent atteindre des valeurs de l'ordre de 25 °C. Tel que mentionné plus haut, la température de l'eau influe sur la concentration des gaz qui y sont dissous en expulsant une partie de ceux-ci en cas d'augmentation de la température et en favorisant leur dissolution lors de diminutions de la température. Il est à noter que la température du milieu influence également la cinétique des transformations qui se produisent dans le milieu aquatique.

4.4.5 Conductivité

La conductivité de l'eau est une mesure de la concentration d'espèces en solution comportant une charge positive (cations) ou négative (anions) et qui permettent le transport électrique dans un milieu donné. Ce paramètre peut être extrêmement utile dans un système d'alerte si sa corrélation avec les étiages peut être démontrée. En effet, il est plutôt facile d'installer un appareil pour mesurer en continu la conductivité d'une eau brute, par exemple, et d'orienter la prise de décision préventive en ce qui a trait à la gestion d'un procédé de traitement d'eau potable, d'une part, et à la protection du milieu aquatique, d'autre part.

5. Résultats

5.1 Phosphore total

L'examen des résultats des mesures de phosphore total à la prise d'eau de St-Hyacinthe permet de constater que ce paramètre montre de façon générale des valeurs qui dépassent nettement le critère de 0.03 mg/L P du MDDEFP en raison de la présence de plusieurs sources de phosphore en amont de la prise d'eau. Les rejets d'eaux usées épurées en provenance d'installations municipales contribuent à la présence de phosphore dans les eaux de surface, de même que les activités agricoles d'où des engrais et des solides contenant du phosphore peuvent provenir, en particulier lors de lessivages par les eaux de ruissellement. D'ailleurs, des pics de concentration élevée sont souvent observés lors d'événements pluvieux dans le bassin versant.

Quant aux périodes de plus faibles débits, il est notable de constater que les concentrations totales de phosphore ont souvent tendance à se situer au-dessus de la moyenne annuelle pour la période 2001-2011, ce qui tend à démontrer qu'il existe une corrélation entre les plus faibles débits à la prise d'eau de St-Hyacinthe et la concentration totale de phosphore à ce même endroit. Les données estivales de 2001 à 2003 illustrent cette tendance (Annexe 1).

5.2 Azote ammoniacal

L'examen des résultats pour l'azote ammoniacal à la prise d'eau de St-Hyacinthe n'a pas permis de constater que ce paramètre évolue en fonction du débit à la prise d'eau de cette municipalité en période estivale. Au contraire, il a plutôt été possible de faire le constat que les concentrations d'azote ammoniacal ont tendance à augmenter en période d'étiage hivernal, sous le couvert de glace. Ce phénomène est connu et il est explicable tant par les plus faibles débits des cours d'eau en période froide qui ont un pouvoir de « dilution » moins grand face aux charges de contaminants que par le faible rendement de transformation de l'azote ammoniacal en nitrites et en nitrates dans de telles conditions.

5.3 Nitrates/nitrites

L'examen des résultats pour les nitrates et nitrites à la prise d'eau de St-Hyacinthe n'a pas permis, tout comme dans le cas de l'azote ammoniacal, de constater que ce paramètre évolue en fonction du débit à la prise d'eau de cette municipalité en période estivale. Étant donné que ce paramètre peut être influencé directement par les pratiques agricoles dans le bassin versant et que celles-ci évoluent avec le temps selon les sources consultées, il n'est pas surprenant d'en arriver à un tel constat pour un paramètre de qualité dont les concentrations sont fonction de plusieurs facteurs.

5.4 Oxygène dissous et température

L'examen des résultats pour l'oxygène dissous et la température à la prise d'eau de St-Hyacinthe a permis de confirmer la relation étroite entre ces deux paramètres. On y note également que les concentrations d'oxygène dissous sont généralement inférieures aux valeurs de saturation en période estivale, en particulier lorsque de faibles débits d'eau

s'écoulent à la prise d'eau de St-Hyacinthe, par exemple lors des étés 2001, 2006 et 2007 (Annexe 2).

5.5 Conductivité

L'examen des résultats pour la conductivité de l'eau à la prise d'eau de St-Hyacinthe a permis de confirmer une relation très étroite entre ce paramètre et le débit de l'eau à la prise d'eau. L'année 2008 illustre très clairement cette relation (Annexe 3).

6. Analyse et discussion

Si l'on considère que la composante « eau en écoulement libre » d'un bassin versant est le seul et unique véhicule dont il faut tenir compte en ce qui a trait au transport des contaminants générés dans ce territoire, il est tout à fait prévisible que les concentrations de ces contaminants augmenteront au fur et à mesure que les débits d'eau diminueront. En effet, un tel pronostic serait valide si le modèle de transport des contaminants était fondé sur une prémisse de « stabilité sans transformations » des contaminants en fonction du temps ainsi que sur le « transport total » de ces contaminants vers l'aval sans aucun phénomène de décantation ou même d'érosion ayant un impact sur les solides transportés par les eaux. Or, la réalité est toute autre, comme le démontrent les résultats de la base de données de la ville de St-Hyacinthe sur la qualité de l'eau brute du centre de traitement de l'eau.

En effet, la qualité de l'eau d'un bassin versant est influencée de façon évidente lorsque les débits varient, comme le démontrent les données de conductivité de l'eau brute. Tel que mentionné précédemment, la conductivité d'une eau est une caractéristique qui ne tient compte que des espèces chargées solubles présentes en un moment donné. Par conséquent, selon la disponibilité plus ou moins grande d'eau pour dissoudre les contaminants, il est tout à fait prévisible que la conductivité d'une eau variera à la hausse lors de la progression d'un étiage alors qu'elle aura tendance à diminuer si le débit du cours d'eau augmente lors d'un événement pluvieux, par exemple. Le traitement des données de conductivité de la ville de St-Hyacinthe illustre clairement cette relation entre ce paramètre et les valeurs de débits. Les données de l'année 2008 sont remarquables à ce sujet.

Par contre, en ce qui a trait aux paramètres qui décrivent les concentrations des éléments nutritifs (phosphore et azote), la corrélation est beaucoup plus difficile à mettre en évidence. En effet, les concentrations de ces éléments peuvent être influencées non seulement par les débits en cause, mais également par des apports externes qui augmentent les concentrations ainsi que par des phénomènes d'enlèvement qui diminuent les concentrations, sans négliger des transformations impliquant des microorganismes.

Ainsi, dans le cas du phosphore, cet élément peut être dissous dans l'eau sous forme d'orthophosphate. Par contre, il peut également être présent sous forme particulaire lors du transport de solides en provenance de surfaces agricoles ou à la suite de phénomènes d'érosion de berges d'un cours d'eau. Or, étant donné que les données disponibles ont trait à la concentration totale de phosphore – somme du phosphore soluble et particulaire – il est prévisible que la corrélation entre les concentrations totales de phosphore et les périodes de faibles débits soit plutôt faible, même si l'on note que les concentrations ont tendance à être

plus élevées lors d'étiages prolongés. Les années 2001 et 2002 illustrent ce phénomène, quoique l'on note également qu'à la suite d'événements pluvieux, les concentrations totales de phosphore peuvent atteindre des valeurs très élevées en raison du transport de solides contenant du phosphore (Annexe 1). D'ailleurs, les résultats élevés de turbidité du début de septembre 2001 tendent à confirmer cette interprétation. En effet, des valeurs de phosphore total supérieures à 0.4 mg/L P ont été mesurées au cours de cette période, alors que la turbidité de l'eau montrait des valeurs généralement supérieures à 20 UNT. À l'opposé, pour les périodes voisines sans précipitations, les valeurs de turbidité étaient plutôt de l'ordre de 15 UNT et les valeurs de phosphore total, inférieures à 0.3 mg/l P. Il est à noter qu'un tel contexte a pu être causé par la prolifération locale d'algues microscopiques pouvant libérer des toxines en concentrations nuisibles pour la santé humaine. Il y a lieu de noter au passage l'intérêt et le bénéfice d'effectuer un suivi en temps réel de la turbidité d'une eau d'approvisionnement, comme le font généralement les CTE, pour y rechercher et y identifier en temps réel des indices de détérioration de la qualité d'une eau au cours de périodes sans pluie pouvant conduire à des étiages excessifs.

En ce qui a trait aux concentrations des espèces azotées, la mise en évidence de corrélations est encore plus complexe que dans le cas du phosphore. En effet, tel que présenté plus haut, l'azote ammoniacal et les nitrates/nitrites s'inscrivent dans un cycle de transformations impliquant diverses réactions où des microorganismes participent aux transformations. Par conséquent, les concentrations observées peuvent non seulement être influencées par les débits des cours d'eau, mais également par les processus de transformation qui y prennent place et dont l'efficacité peut être influencée par les conditions d'oxygène dissous et de température, par exemple. De plus, les pratiques agricoles peuvent avoir une influence majeure sur la présence d'espèces azotées dans l'environnement.

Il découle donc de l'analyse des données disponibles à la prise d'eau de St-Hyacinthe que le suivi en continu de la conductivité de l'eau pourrait s'avérer un outil de choix supplémentaire à inscrire dans le système d'alerte. En effet, cette mesure est relativement simple à effectuer à l'aide d'un conductivimètre fiable installé dès l'admission de l'eau dans un centre de traitement. De plus, contrairement aux mesures de paramètres liés à l'eutrophisation et aux éléments nutritifs qui requièrent des manipulations délicates en laboratoire, la fréquence élevée des mesures de conductivité peut permettre de construire une base de données qui confirme l'évolution de la qualité en temps réel et ce, de jour en jour.

Cette précision sur l'intérêt de la conductivité comme paramètre supplémentaire dans le contexte du système d'alerte est justifiée par le fait que ce paramètre peut renseigner en temps réel sur les tendances concernant la qualité de l'eau, tout comme nous le mentionnions plus haut au sujet de la turbidité. Or, cette caractéristique est recherchée pour tout paramètre dans les processus de surveillance typiques de l'approche HACCP/ARMPC. Il est à remarquer que même si l'exercice n'a pas porté sur l'évolution du pH de l'eau en fonction du temps, une conclusion similaire aurait pu être obtenue pour ce paramètre puisqu'il est connu que le pH est influencé sur un cycle de 24 heures par l'activité photosynthétique en raison de la consommation de l'anhydride carbonique (CO₂) durant le jour et de la production de celui-ci durant la nuit. En conclusion, ce qui est recherché dans la présente démarche est un paramètre facile à mesurer et dont le résultat sera disponible rapidement afin de guider une prise de décision en regard de limites de contrôle à ne pas dépasser. À titre d'exemple, l'industrie alimentaire utilise abondamment les résultats de la mesure de la température tout

au long d'une chaîne de production pour la prise de décisions concernant la qualité de divers produits destinés à la consommation, par exemple.

Loin de rejeter l'importance et la pertinence des mesures de paramètres de qualité tels que ceux qui sont en lien avec les éléments nutritifs, par exemple, et qui sont habituellement mesurés périodiquement, l'identification de la conductivité comme paramètre à inclure dans le système d'alerte en développement se veut une proposition qu'il faudra certes valider éventuellement en situation réelle pour mesurer la valeur ajoutée que ce suivi pourrait conférer au système d'alerte. Néanmoins, pour les responsables d'une CTE qui ne l'utiliseraient pas encore dans un tel contexte, ce paramètre pourrait devenir un outil supplémentaire de prise de décision face à une détérioration éventuelle de la qualité de l'eau de leur communauté et à une recommandation de modification de stratégie de traitement à court terme pour éviter, entre autres, des conditions qui pourraient conduire à des avis restrictifs en regard avec la consommation de l'eau en période d'étiage sévère.

L'examen des données de la ville de St-Hyacinthe permet donc de faire le constat et la démonstration qu'il pourrait être opportun de compter sur la mesure régulière et fréquente de paramètres de qualité tels que la conductivité dans le développement d'un outil en vue de la prise de décision en cas d'étiages sévères qui porterait en particulier sur la détérioration inacceptable de la qualité de l'eau à une prise d'eau. D'ailleurs et à titre d'exemple, le début du mois de septembre 2009 présente des augmentations soudaines et significatives de turbidité de l'eau brute en absence de précipitations et alors que le débit de la rivière est relativement faible. Or, ces augmentations sont corroborées par des augmentations de valeurs de conductivité de cette même eau brute que l'on sait déjà indicatrices de faibles débits. Il y aurait donc là une piste supplémentaire à explorer dans le développement et la mise en application du système d'alerte.

Finalement, il faut retenir que le suivi en temps réel de la qualité de l'eau brute à la prise d'eau d'une municipalité peut révéler des conditions de surcroissance d'algues microscopiques susceptibles de libérer des toxines nuisibles pour la santé humaine. Or, puisque les procédés de traitement de toutes les municipalités du bassin versant de la rivière Yamaska n'ont pas nécessairement une chaîne de traitement appropriée pour retenir ces contaminants, il y a lieu de considérer que la prise d'eau d'une CTE peut devenir un point de contrôle critique (PCC) dans le contexte de l'approche HACCP/ARMPC et qu'une valeur seuil pourrait y être associée. En cas de dépassement de cette valeur, un plan d'intervention prédéfini serait mis en œuvre afin d'apporter des correctifs appropriés et d'informer, au besoin, la clientèle du centre de traitement de l'eau.

7. Conclusion, limites et recommandations

La présente démarche de recherche a permis de vérifier l'hypothèse qu'il est possible d'effectuer un suivi de l'évolution de la qualité de l'eau d'un bassin versant dans le contexte de développement d'un système d'alerte aux étiages sévères et aux prélèvements excessifs en utilisant la base de données sur l'eau brute de la ville de St-Hyacinthe qui, malgré tout, n'a pas été structurée dans ce but spécifique. En effet, il découle de l'analyse réalisée que la conductivité de l'eau est une caractéristique qui pourrait renseigner directement sur la dégradation éventuelle d'une eau puisqu'elle mesure la vitesse avec laquelle des contaminants s'y concentrent. Il pourrait éventuellement être utile de procéder, dans une phase ultérieure, à une analyse plus approfondie des données disponibles ou de procéder à une caractérisation particulière pour vérifier la corrélation éventuelle entre la conductivité et d'autres paramètres tels que la concentration des éléments nutritifs à base de phosphore et d'azote. Ainsi, il pourrait être possible de démontrer de façon encore plus évidente, s'il y a lieu, la portée et les bénéfices découlant du suivi en temps réel d'un paramètre tel que la conductivité de l'eau dans un système d'alerte aux étiages sévères et aux prélèvements excessifs. Déjà, l'analyse des données de la ville de St-Hyacinthe semble démontrer qu'il est possible de formuler l'hypothèse que le suivi des valeurs de turbidité pourrait s'avérer une addition souhaitable pour le système d'alerte. C'est cette limite qui nous amène d'ailleurs à formuler la recommandation 2 sur l'approfondissement de la recherche de corrélations dans la base de données de la ville de St-Hyacinthe, puisque notre analyse des données disponibles n'a été que partielle dans le contexte de la présente étude. Bien entendu, la mise en œuvre de la recommandation 3 permettrait de pousser encore plus loin l'analyse et d'optimiser, le cas échéant, le système d'alerte.

Sachant que la ville de St-Hyacinthe entretient et maintient une base de données sur la qualité de l'eau de la rivière Yamaska à sa prise d'eau qui renferme des enseignements utiles, il y aurait donc lieu de vérifier si d'autres banques de données similaires existent dans d'autres municipalités du bassin versant. Cette limite dans notre étude est stratégique, car elle peut conditionner la poursuite du développement du système d'alerte dans le bassin versant. Par contre, si d'autres banques de données similaires existent, il pourrait alors être envisagé, tel que nous le proposons dans la recommandation 4, de réunir éventuellement l'ensemble des données disponibles dans une base de données commune et partagée dont le suivi permettrait d'exercer une vigilance et une surveillance encore meilleures concernant la qualité de l'eau dans le bassin versant de la rivière Yamaska dans le contexte particulier du présent système d'alerte aux étiages sévères et aux prélèvements excessifs, ce sans remettre en question le bien-fondé et la pertinence des bases de données actuelles qui répondent déjà à divers besoins de suivis périodiques dictés par la réglementation en vigueur, notamment.

Finalement, la présente recherche tend à confirmer que le point de contrôle qu'est une centrale de traitement de l'eau (CTE) peut remplir un rôle extrêmement utile dans le cadre d'un système d'alerte aux étiages sévères et aux prélèvements excessifs. Elle peut même devenir un point de contrôle critique (PCC) en ce qui a trait à la présence de concentrations excessives de toxines nuisibles pour la santé humaine si le procédé en place n'est pas efficace pour retenir de telles toxines. D'ailleurs, même si l'information découlant du suivi de la qualité de l'eau dans une CTE n'est pas la seule à considérer pour la prise de décision en cas de crise appréhendée, il n'en demeure pas moins que cette information peut contribuer à la prise de décision des autorités municipales pour enclencher la mise en application d'un plan

de restrictions préventives pour minimiser les prélèvements dans le bassin versant qui sert à l'approvisionnement de la communauté.

Il est d'ailleurs possible de confirmer l'ensemble de ces conclusions en tenant compte des propos tenus dans un article publié très récemment dans Water Canada (septembre/octobre 2012) ¹⁴ par les auteurs qui y font les affirmations suivantes :

« Monitoring the watershed is paramount, since collected data provides the scientific basis for watershed management decisions.....Case studies are an excellent way for different communities to learn what others are doing with regard to climate change adaptation. However, adaptation and the process of planning for climate change impacts needs to recognize local environmental and community characteristics and harness strengths and assets.....Successful adaptation does not mean that negative impacts will not occur, only that they will be less severe than if no adaptation were considered. Overall, adapting to climate change must be thoughtful and proactive as climate change does not necessarily create new problems, but rather exacerbates existing ones. »

En tenant compte des résultats de la présente recherche et des affirmations ci-haut qui, à leur façon, tendent à appuyer les démarches effectuées dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques pour minimiser les impacts d'étiages déjà sévères, il est maintenant possible de formuler diverses recommandations :

1. Confirmer l'introduction des points de contrôle au moyen du logiciel Google Earth[®] dans le système d'alerte aux étiages sévères et aux prélèvements excessifs en raison de l'influence et de l'impact de ceux-ci sur la qualité de l'eau du bassin versant et de l'information qui les caractérise et qui peut améliorer la prise de décision face à une crise appréhendée
2. Approfondir la recherche de corrélations entre les paramètres de qualité de l'eau de la base de données de la ville de St-Hyacinthe et le débit de la rivière Yamaska à cette prise d'eau afin d'améliorer la performance éventuelle de ce point de contrôle à fournir de l'information stratégique en cas de crise appréhendée
3. Informer les autorités compétentes de la ville de St-Hyacinthe au sujet des résultats de la présente recherche pour que soit évaluée l'opportunité d'optimiser la structure de la base de données municipale afin de la rendre encore plus performante pour détecter des détériorations en lien avec les étiages sévères et participer à la prise de décisions locales tant pour la gestion du procédé de traitement que pour la mise en œuvre de restrictions concernant les usages d'eau potable
4. Rechercher l'existence d'autres bases de données sur la qualité de l'eau dans le bassin de la rivière Yamaska afin d'évaluer l'opportunité de les intégrer dans le système d'alerte en développement en tenant compte des résultats et conclusions de la présente recherche.

Références

1. Entente entre Ouranos Inc. et l'Université de Sherbrooke concernant le projet : Développement d'un prototype de système d'alerte aux faibles débits et aux prélèvements excessifs dans le bassin versant pilote de la rivière Yamaska, de façon à pouvoir prédire et prévenir les impacts des CC sur les étiages et leurs conséquences sur les divers approvisionnements en eau, tout en protégeant la biodiversité, novembre 2010
2. Stratégie québécoise d'économie d'eau potable, Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs, 2010, <http://www.mamrot.gouv.qc.ca/grands-dossiers/strategie-quebecoise-deconomie-deau-potable/a-propos-de-la-strategie/>
3. Politique nationale de l'eau, Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs, 2002, <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/politique/>
4. Sécurité civile du Québec, Outil complémentaire pour anticiper et communiquer les risques, http://www.securitepublique.gouv.qc.ca/fileadmin/Documents/securite_civile/colloques/2010/p_roj_vigilance.pdf
5. ARMP, <http://www.qualitonnaire.eu/index.php?title=ARMP>
6. HACCP, <http://www.inspection.gc.ca/au-sujet-de-l-acia/salle-de-nouvelles/systeme-de-salubrite-des-aliments/haccp/fra/1346306502207/1346306685922>
7. Plan de sécurité pour l'eau des systèmes municipaux d'eau potable, ACEPU/CWWA, http://www.cwwa.ca/publicationorder_f.asp
8. La santé du fleuve inquiète, Le fleuve manque d'eau et Impact possible sur la santé humaine, Le Soleil, 14 septembre 2012
9. Réseau de stations hydrométriques du CEHQ, <http://www.cehq.gouv.qc.ca/suivihydro/index.asp>
10. Réseau-rivières, MDDEFP, <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/reseau-riv/index.htm>
11. Ville de St-Hyacinthe, Usine de traitement d'eau, analyses de laboratoire : eau brute 2001-2011
12. Critères de qualité de l'eau, MDDEFP, http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/criteres_eau/index.asp
13. Règlement sur la qualité de l'eau potable, MDDEFP, <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/potable/brochure/index.htm>
14. Watershed Response, Water Canada, septembre/octobre 2012

ANNEXES DU SUPPLÉMENT

Annexe 1 : Évolution typique du phosphore total pour les étés 2001 à 2003 (St-Hyacinthe)

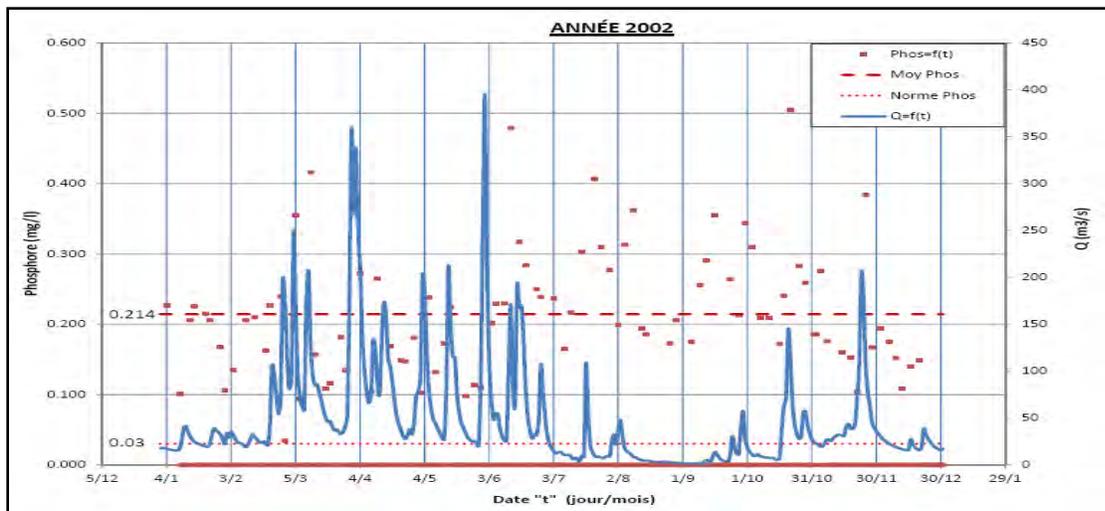
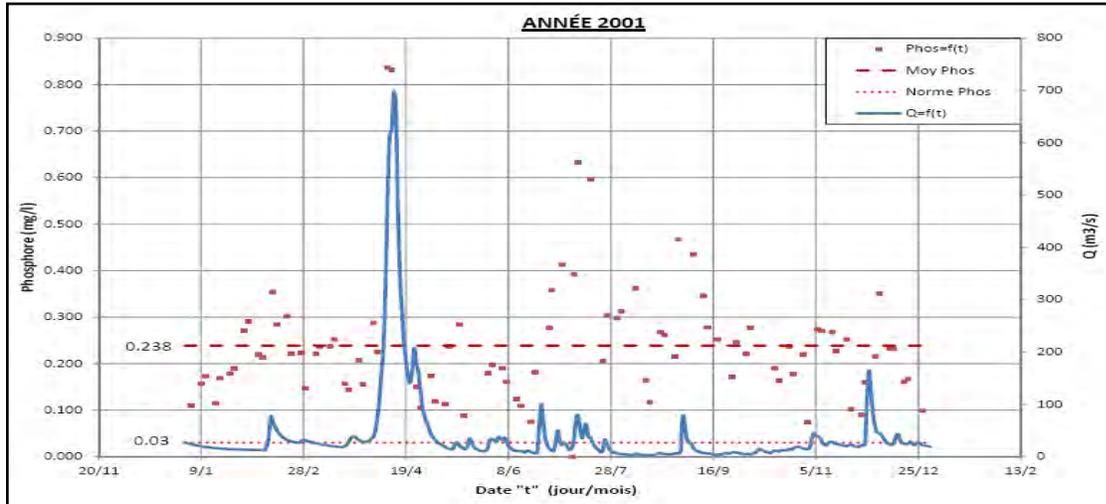
Annexe 2 : Évolution typique de l'oxygène dissous pour les étés 2001, 2006 et 2007 (St-Hyacinthe)

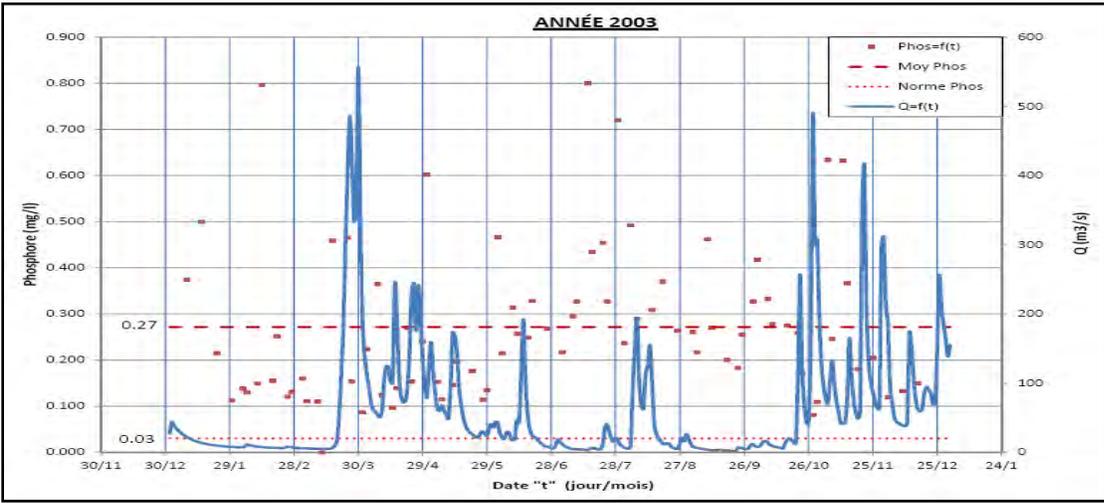
Annexe 3 : Évolution typique de la conductivité pour l'été 2008 (St-Hyacinthe)

Annexe 4 : Liste des points de contrôle visuels

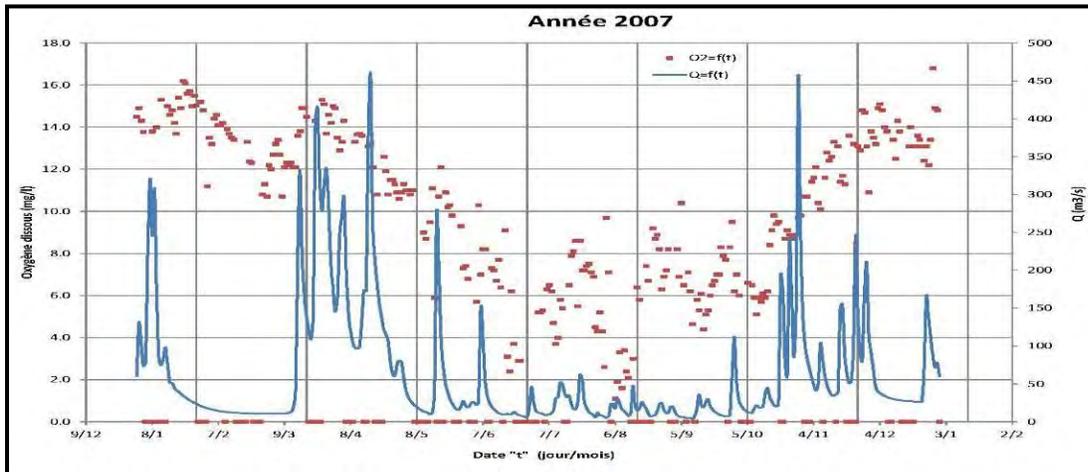
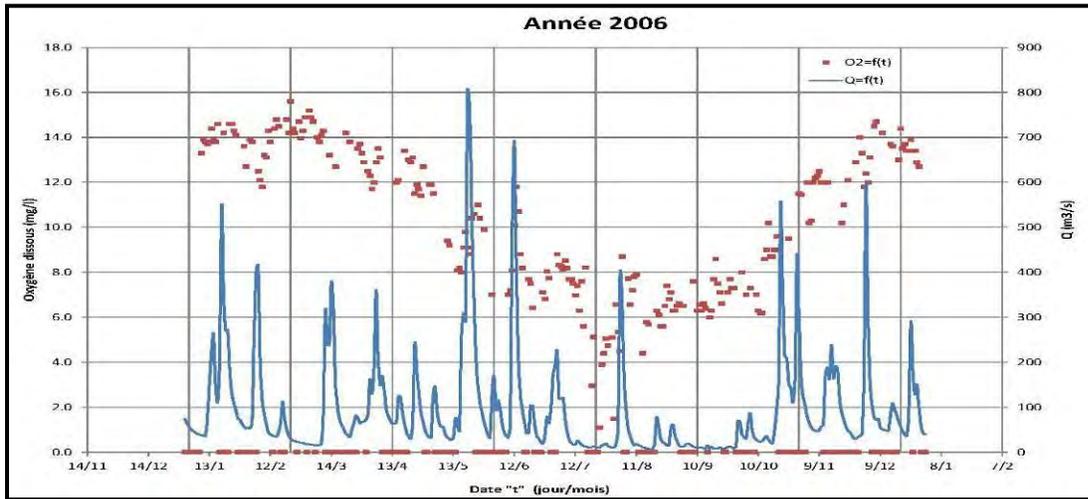
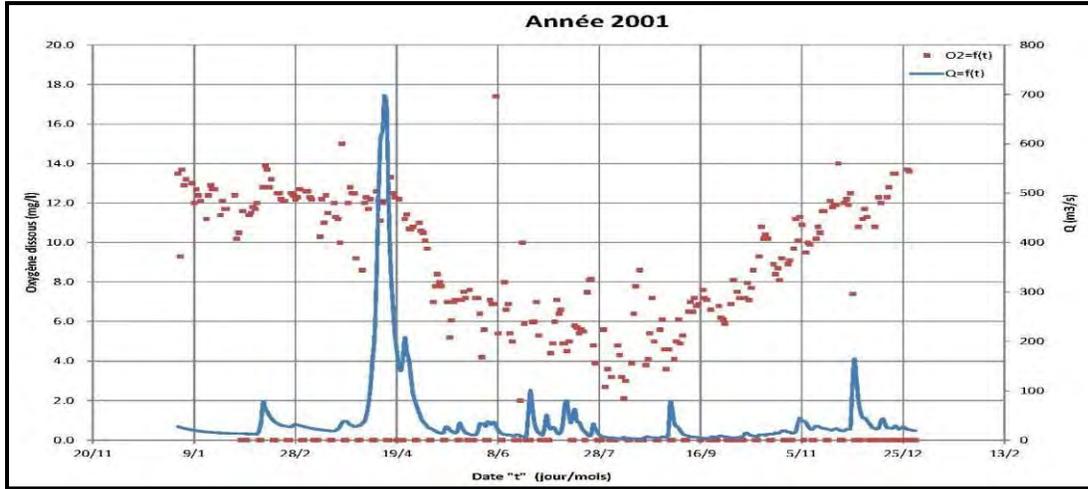
Annexe 5 : Mode d'utilisation du fichier Yamaska.kmz

Annexe 1 : Évolution typique du phosphore total pour les étés 2001 à 2003 (St-Hyacinthe)

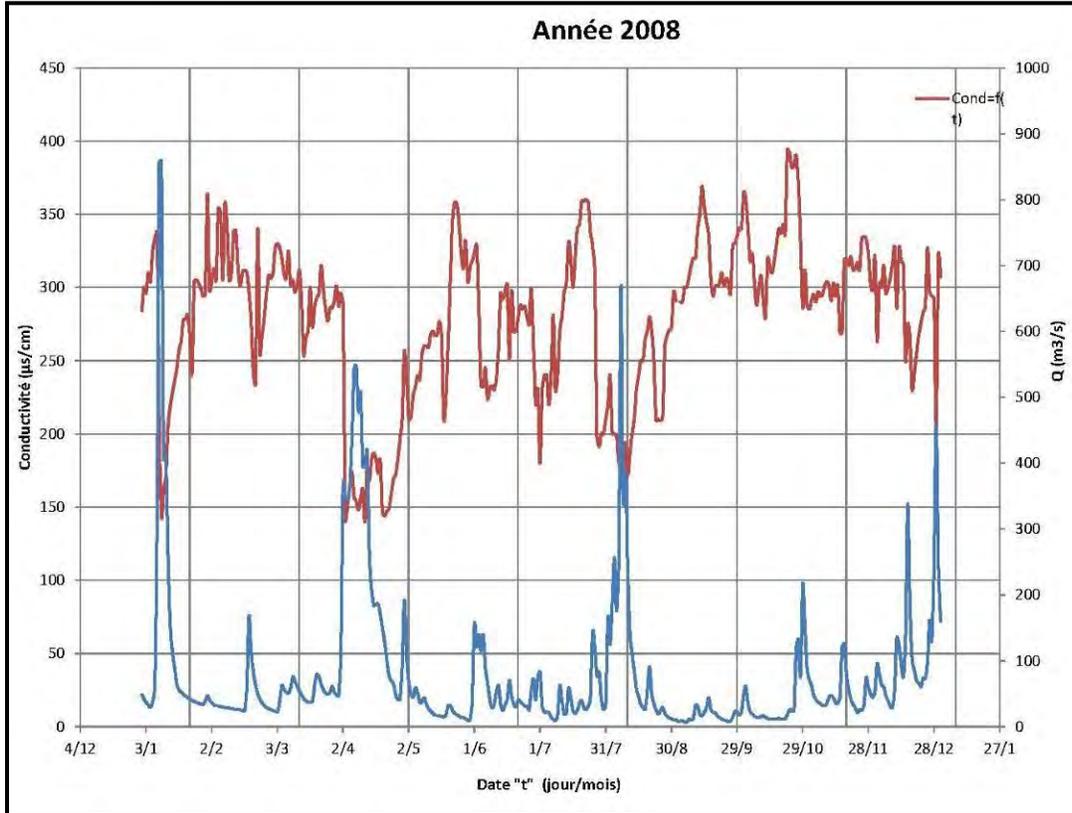




Annexe 2 : Évolution typique de l'oxygène dissous pour les étés 2001, 2006 et 2007 (St-Hyacinthe)



Annexe 3 : Évolution typique de la conductivité pour l'été 2008 (St-Hyacinthe)



Annexe 4 : Liste des points de contrôle visuels

Rivière Yamaska (10)

- Saint-Hugues

- **Y1-SHu 1**: Pont de la rue Yamaska

- Saint-Hyacinthe

- **Y2-SH1** : Barrage Penman, prise de vue amont, aval et passe à poissons
- **Y3-SH 2**: Station de débit 030345, promenade Gérard Côté

- Saint-Damase

- **Y4-SD1** : Pont du chemin de la rivière

- Saint-Césaire

- **Y5-SC 1**: Rang de la rivière Nord, en amont du pont de l'autoroute 10

- Farhnam

- **Y6-F1** : Sur le pont de la 235, vue secteur des rapides
- **Y7-F2** : Station de débit 030302, face à la prise d'eau potable

- Bromont

- **Y8-B1** : Prise d'eau potable, pont de la rue des Soulages

- Lac Brome

- **Y9-LB1** : Sortie du barrage Foster, au bout de la rue Phelps
- **Y10-LB2** : Plage municipale Douglas (niveau du lac Brome)

Rivière Chibouet (1)

- Saint-Hugues

- **C1-SHu1** : Au pont de la 224, station Réseau-Rivières 03030038

Rivière Noire (2)

- Saint-Pie

- **N1-SP1** : Au sud-est du pont de la route 235, station débit 030304

- Sainte-Cécile-de-Milton

- **N2-SC1** : Au pont de la route 137, dans la courbe

Rivière Yamaska Nord (3)

- Granby

- **YN1-G1** : Sortie du réservoir Choinière, 8^e rang Ouest
- **YN2-G2** : Barrage à la sortie du lac Boivin
- **YN3-G3** : Au croisement avec l'autoroute 10

Yamaska Sud-Est (4)

- Cowansville

- YSE1-C1 : Île aux mouettes, à l'entrée du lac au croisement de la route 139
- YSE2-C2 : Prise d'eau potable, rue Désourdy (niveau du lac Davignon)
- YSE3-C3 : Chutes après le barrage
- YSE4 -C4 : Station de débit 030314, rue du Sud

Total : 20

CLO, OBV Yamaska, 1^{er} août 2012

Exemple de suivi d'un point de contrôle visuel (Chemin Mansville, Sutton Jonction, affluent de la Yamaska sud-est)



Mai 2012



Juin 2012



Juillet 2012



Août 2012

Annexe 5 : Mode d'utilisation du fichier Yamaska.kmz

Le fichier Yamaska.kmz représente un système d'information géographique du bassin (SIG) versant de la rivière Yamaska, conçu pour déterminer, géolocaliser et documenter les risques en lien aux faibles débits d'étiage ainsi que les données en lien avec l'état de l'environnement aquatique.

Pour lire et exploiter le fichier, il suffit de suivre les étapes suivantes :

1- Télécharger et installer la plate-forme Google Earth[®] à partir du lien;

<http://www.google.com/earth/download/ge/>

2- Télécharger le dossier Yamaska.rar en cliquant sur le lien suivant :

<http://www.civil.usherbrooke.ca/Yamaska/Yamaska.rar>

Décompresser les deux fichiers qui s'y trouvent avec le logiciel winrar et les enregistrer sur votre ordinateur.

3- Ouvrir le fichier du réseau hydrographique national « nhn_rhn_02og000_kml_fr.kmz ». Google Earth[®] démarre automatiquement et montre la délimitation du bassin versant de la Yamaska délimité par un contour blanc ainsi que le chevelu hydrique (réseau hydrographique) à l'intérieur en bleu. La rivière Yamaska et ses principaux tributaires sont en bleu foncé et le réseau secondaire en bleu clair.

4- Ouvrir le fichier « Yamaska.kmz » : des repères de formes et de couleurs différentes apparaissent à l'intérieur du périmètre du bassin versant.

La barre latérale gauche de l'écran montre les différentes couches du SIG :

L'icône de Google Earth[®] apparaissant en haut et nommé « Mes lieux préférés » représente le fichier principal. Il contient deux sous-fichiers précédés par le même icône Google Earth[®] et nommés « RHN_02OG000_1_0 » et « Yamaska », ainsi qu'un fichier représenté par un icône Windows appelé « Visite touristique ».

Chacun des trois fichiers est précédé à gauche d'un triangle blanc. En cliquant sur ces triangles, les différentes couches d'information du SIG apparaissent.

Pour faciliter la navigation dans le fichier Yamaska.kmz, il est préférable de garder les deux autres fichiers fermés.

Description du fichier Yamaska.kmz

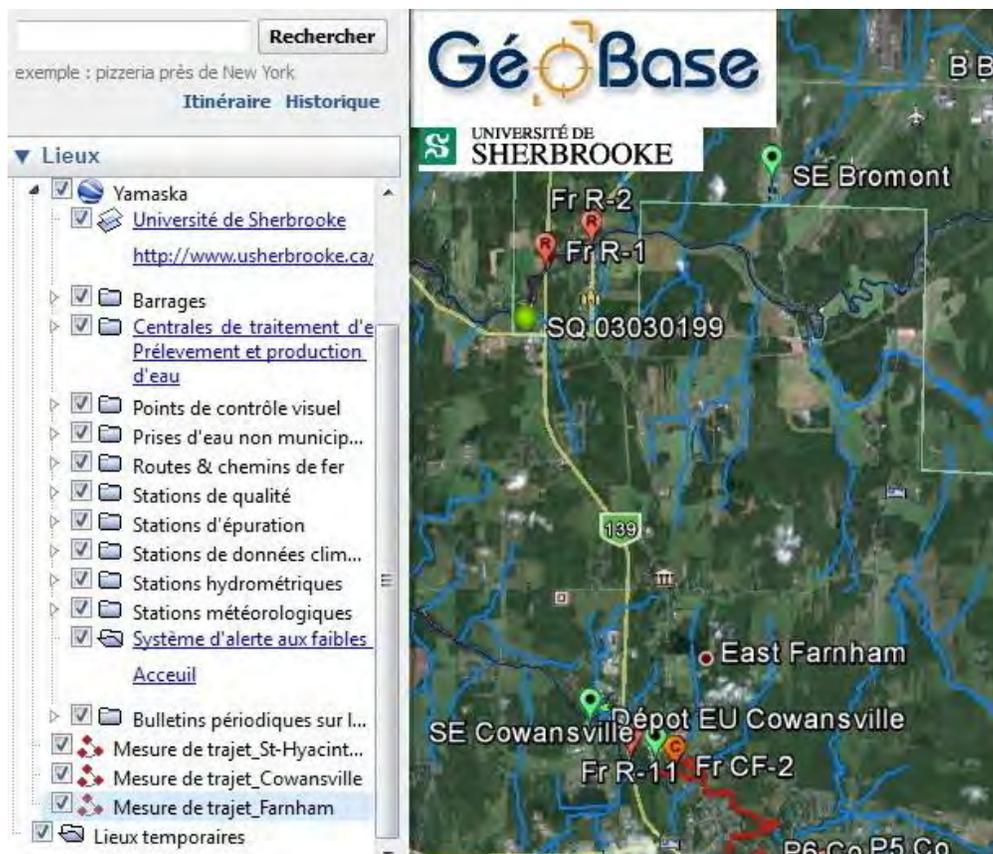
Le fichier Yamaska contient les 11 couches d'information suivantes :

N°	Désignation	Nomenclature
1	Barrages	B
2	Centrales de traitement d'eau	CTE
3	Prises d'eau non municipales	PENM
4	Points de contrôle visuels	PV
5	Routes & chemins de fer	R & CF
6	Stations de qualité	SQ
7	Station d'épuration	SE
8	Station de données climatiques	SDC
9	Stations hydrométriques	SH
10	Stations météorologiques	SM
11	Système d'alerte aux faibles débits	SAFD

- Chaque couche (ou calque) contient un nombre d'icônes généralement semblables, qui représentent et localisent sur le bassin versant des ouvrages, des équipements ou

des points d'intérêt en relation avec l'eau de la rivière, des points de vue quantitatif et qualitatif. La différence entre les icônes des fichiers constitue la légende (exemple : Centrale de traitement d'eau = Bleu Cyan; Barrages = triangle marron en forme de digue; etc.

- Chacune des couches peut être activée ou désactivée, en cochant ou décochant la case correspondante à gauche. Similairement, on peut activer ou désactiver chaque icône, ou tout le répertoire Yamaska ou encore celui du réseau hydrographique.
- Pour localiser les ouvrages et les équipements, il suffit de double-cliquer sur l'icône ou son nom et régler ensuite le zoom au besoin.
- La plupart des icônes pointent vers des sites internet ou vers des pages (exemples : les stations hydrométriques pointent vers des liens de mesure de débits ou de niveau du CEHQ; les points de contrôle visuels sont liés à des images de l'évolution des conditions environnementales reliées aux étiages).
- Pour avoir accès aux images comprises dans le fichier, il faut être titulaire d'un compte Gmail, et demander accès à : Bertrand.Cote@Usherbrooke.ca
- La couche « Système d'alerte aux faibles débits » pointe vers le site « Développement d'un prototype de système d'alerte aux faibles débits et aux prélèvements excessifs dans le bassin versant pilote de la rivière Yamaska ».



Note : Le fichier est en actualisation et peut subir des modifications.