

MISE À JOUR DES NORMES ET PROCÉDURES DE CONCEPTION DES OUVRAGES HYDRO-AGRIQUES DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

RAPPORT FINAL

Par

Aubert Michaud, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement
inc. (IRDA)

Ariane Drouin, IRDA

Alain Mailhot, INRS-ETE

Guillaume Talbot, INRS-ETE

David Huard, Ouranos

Sébastien Biner, Ouranos

Robert Lagacé, Université Laval

Nestor-Raul Rocha, Université Laval

Gilles Gagné, IRDA

Juillet 2013

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



Préparé par :

Aubert Michaud, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)
 Ariane Drouin, IRDA
 Alain Mailhot, Institut national de la recherche scientifique – Eau-Terre-Environnement (INRS-ETE)
 Guillaume Talbot, INRS-ETE
 David Huard, Ouranos
 Sébastien Biner, Ouranos
 Robert Lagacé, Université Laval
 Nestor-Raul Rocha, Université Laval
 Gilles Gagné, IRDA

Collaborations scientifiques :

René Audet, Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC)
 Alexandre Aourousseau, IRDA et Institut universitaire de technologie de Vannes (IUT)
 Isabelle Beaudin, IRDA
 Jean-Daniel Sylvain, ministère des Ressources naturelles (MRN)
 Anne Blondlot, Ouranos
 François Chrétien, AAC
 Julie Drapeau, ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP)
 Anne Frigon, Ouranos
 Alain Gagnon, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ)
 Luc Lamontagne, AAC
 Mikael Guillou, MAPAQ
 Richard Laroche, MAPAQ
 Olivier Le Bourgeois, IRDA et École nationale supérieure agronomique de Toulouse (ENSAT)
 Christian Poirier, ministère des Transports du Québec (MTQ)
 Catherine Savard, MDDEFP
 Richard Turcotte, Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ)

Le rapport peut être cité comme suit :

Michaud, A.R., A. Drouin, A. Mailhot, G. Talbot, D. Huard, S. Biner, R. Lagacé, N-R. Rocha et G. Gagné. 2012. Mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydro-agricoles dans un contexte de changements climatiques. Projet réalisé dans le cadre de la mise en œuvre du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec et en collaboration avec Ressources naturelles Canada. Consortium de recherche OURANOS. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Québec, Canada. 168 pages et annexes.



Institut de recherche
 et de développement
 en agroenvironnement

www.irda.qc.ca

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) est une corporation de recherche à but non lucratif, constituée en mars 1998 par quatre membres fondateurs, soit le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) et le ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation (MDEIE).

Remerciements

Les coûts relatifs aux travaux réalisés dans le cadre du présent projet ont été assumés par Ouranos grâce au Fonds vert dans le cadre de la mise en œuvre du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec. Les travaux sont également réalisés en collaboration avec Ressources naturelles Canada. Les auteurs remercient le gouvernement du Québec, le gouvernement du Canada et Ouranos pour cet appui.

Les auteurs tiennent également à remercier de façon particulière les personnes suivantes qui ont rendu possible la réalisation de cette étude :

- M. Richard Turcotte, de la Division de l'hydrologie et de l'hydraulique, Direction de l'expertise hydrique au Centre d'expertise hydrique du Québec pour son généreux soutien et son apport d'expertise en hydrologie et processus de fonte de la neige;
- M. Thomas-Charles Fortier-Filion, de la Division de l'hydrologie et de l'hydraulique, Direction de l'expertise hydrique au Centre d'expertise hydrique du Québec pour son temps, son aide et ses conseils dans l'utilisation du modèle hydrologique MOHYSE;
- M. Guy Morin, de l'INRS-Eau, Terre et Environnement, pour son accord et son soutien dans l'utilisation et l'adaptation du code du modèle hydrologique CEQUEAU;
- Mme Catherine Savard, du Service de l'information sur le milieu atmosphérique du ministère du Développement durable de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) qui nous a transmis les séries aux stations et a gentiment répondu à nos nombreuses questions, ainsi que pour la transmission et son soutien dans l'analyse des données des stations nivométriques du MDDEFP;
- Mme Julie Drapeau, du Service de l'information sur le milieu atmosphérique du MDDEFP pour la transmission de données météorologiques journalières des stations du MDDEFP;
- M. Philip Jarrett, du Service météorologique du Canada à Environnement Canada qui nous a également transmis plusieurs données et a fourni des précisions sur la méthode utilisée par Environnement Canada dans sa construction des courbes IDF;
- Mme Valérie Garant qui a procédé à la mise en forme et à la révision des rapports complets de l'INRS;
- M. Alain Mailhot (INRS-ETE) et son équipe pour l'analyse des extrêmes annuels tirés des séries de stations utilisées dans l'étude sur les courbes IDF en climat futur;
- M. Georges Desrochers pour le partage de son expertise au sujet des données météorologiques;
- M. Michel Nolin et M. Luc Lamontagne, d'Agriculture et Agroalimentaire Canada;
- M. Jacques Gallichand, professeur à L'Université Laval, pour ses données du bassin Bélair;

- Les auteurs des rapports complets des divers volets réalisés dans le cadre du présent projet qui ont accepté que leurs écrits soient utilisés pour le rapport final;
- Tous les collaborateurs du projet *Mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydro-agricoles dans un contexte de changements climatiques* pour leur temps, leur soutien et leur expertise.

Les auteurs tiennent également à remercier les organismes suivants pour leur collaboration :

- Les organismes ayant collecté et traité les données météorologiques nécessaires à la validation de l'étude sur les courbes IDF en climat futur, soit Environnement Canada (EC) et le MDDEFP pour les données de station et Agriculture et Agroalimentaire Canada pour les données SNITE;
- L'European Centre for Medium-Range Weather Forecasts pour les données de la réanalyse ERA-40C;
- Les groupes de modélisation, le Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI) et le Working Group on Coupled Modelling (WGCM) du World Climate Research Programme (WCRP) pour l'accès aux données de l'ensemble Coupled Model Intercomparison Project phase 3 (CMIP3) (Meehl et al., 2007). L'accès aux données est possible grâce au support du Bureau des sciences du Département de l'énergie des États-Unis;
- Le CNRM de Météo-France pour leur précieuse collaboration dans la génération et la provision à Ouranos des données CNRM-CM3;

Les données du MRCC ont été générées et fournies par Ouranos.

Résumé exécutif

Les critères et méthodes utilisés actuellement en milieu agricole au Québec dans la prédiction de débits de pointe et le dimensionnement des ouvrages hydrauliques datent des années 1980 et n'ont pas profité d'une mise-à-jour depuis cette période. Constatant un urgent besoin d'actualisation, les ingénieurs en poste au MAPAQ ont ainsi adressé une demande de révision des critères de conception des ouvrages hydro-agricoles. Rappelons qu'un grand nombre de chantiers d'aménagement hydro-agricole ont cours actuellement dans le milieu rural québécois. Ces derniers s'inscrivent dans le cadre d'actions agroenvironnementales concertées et ciblées sur la protection des cours d'eau, la prévention de la pollution diffuse et le maintien de la biodiversité en milieu agricole. En parallèle au besoin d'actualisation des critères hydrologiques de conception de ces ouvrages, sur la base d'observations colligées au Québec, il importait aussi de prendre en considération les tendances dans l'évolution du climat et d'assurer que les aménagements hydro-agricoles mis en place aujourd'hui répondent aux régimes hydrologiques de demain.

Le principal objectif du projet *Mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydro-agricoles dans un contexte de changements climatiques* était de proposer à la communauté d'intervenants en aménagement des terres et des cours d'eau en milieu rural au Québec, un ensemble d'outils conviviaux et de banques de données destinés à supporter le dimensionnement des ouvrages hydro-agricoles. La réalisation du projet s'est appuyée sur un partenariat regroupant des équipes de recherche de divers domaines (météorologie, changements climatiques, hydrologie, génie, pédologie, géomatique) alliant leurs compétences respectives afin de répondre aux objectifs opérationnels suivants, soit 1) d'actualiser les courbes de distribution des intensités des précipitations (IDF/HDF), 2) de prendre en compte l'occurrence de la fonte et des pluies hivernales dans la conception d'ouvrages, 3) de prendre en compte l'influence des changements climatiques sur les distributions IDF des précipitations 4) de proposer et valider de nouvelles méthodes d'estimation des paramètres hydrologiques en support au dimensionnement des ouvrages hydrauliques, et enfin 5) d'intégrer ces banques de données et outils dans un utilitaire convivial destiné milieu de pratique.

Distribution des intensités de précipitation

L'équipe de l'INRS-ETE a procédé à une mise à jour des courbes de distribution des intensités/hauteurs de précipitation (IDF et HDF) en climat récent. Les courbes IDF, maintenant en ligne sur le site agrometeo.org, renseignent sur les quantités de précipitations extrêmes pouvant s'abattre en un endroit. Ces quantités varient dans l'espace, mais également en fonction de la durée des événements et demeurent des intrants essentiels dans le dimensionnement des ouvrages hydro-agricoles. En climat récent, 98 séries d'observations récentes colligées aux stations opérées par Environnement Canada (EC) et le Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) comportant plus de 15 années de données ont été colligées et analysées suivant des méthodes innovatrices. La méthode d'Analyse Fréquentielle Régionale (AFR) utilisée pour construire les estimateurs IDF et HDF a par exemple permis de regrouper les observations de plusieurs stations météorologiques, améliorant la qualité des estimateurs par rapport à une analyse limitée aux stations individuelles. Le recours à la distribution du type *Generalized*

Extreme Value (GEV) a aussi amélioré la justesse des estimateurs IDF/HDF proposés et en a réduit l'incertitude, comparativement à la distribution Gumbel utilisée antérieurement.

En ce qui a trait aux implications du climat futur sur l'intensité de précipitations, l'équipe scientifique d'OURANOS a procédé à une évaluation des extrêmes annuels de précipitations modélisés par le Modèle régional du climat canadien (MRCC) suivant un découpage du Québec rural en quatre régions, soit l'Abitibi, la Gaspésie, le Saguenay – Lac-Saint-Jean et la Vallée du Saint-Laurent. La distribution des extrêmes annuels de précipitations modélisés est comparable à celle des extrêmes observés à la même échelle spatiale pour les événements d'une durée de 24 heures. Pour les durées de précipitations de une à douze heures, la résolution spatiale des observations disponibles ne convenait malheureusement pas à ce type d'évaluation. Rappelons ici que les orages de courtes durées sont généralement localisés et donc plus difficiles à reproduire avec un modèle (MRCC) dont chaque tuile correspond à une moyenne sur une aire de 45 X 45 km. La comparaison des extrêmes en climat futur (2041–2070) et en climat de référence indique néanmoins que les extrêmes annuels sont appelés à augmenter. Pour les précipitations de 24h ayant un temps de retour de deux ans, on estime par exemple l'augmentation à $7 \pm 5\%$ dans la vallée du St-Laurent. Considérant que cette incertitude inclut la variabilité régionale et l'incertitude sur les paramètres de la distribution GEV, le signal paraît robuste.

Bien qu'il soit essentiel de considérer et de s'adapter dès maintenant aux changements climatiques, notons que la majorité des structures hydrauliques en milieu agricole ont une durée de vie inférieure à 25 ans, limitant ainsi la pertinence de considérer des gradients temporels dans l'évolution des intensités de précipitation dont la période se situe à plus de 30 ans. Leur conception peut ainsi se référer qu'aux courbes IDF en climat récent. Pour les ouvrages majeurs de retenu d'eau, ou pour le dimensionnement des ponts routiers dont la durée de vie excède 25 ans, il devient cependant pertinent de considérer les effets anticipés des changements climatiques sur les courbes IDF afin de d'assurer la vie utile de l'ouvrage.

Indices de fonte et pluie hivernale

La conception des ouvrages hydrauliques est basée sur la distribution des précipitations de haute intensité (courbes IDF/HDF) couvrant la période de mai à octobre. Or environ la moitié des maxima annuels de débits journaliers observés en bassins versants ruraux surviennent en période hivernale ou printanière hâtive, entre les mois de novembre à avril. Alors que les crues estivales en réponse à de fortes intensités de précipitations se démarquent par des débits de pointe très élevés, les crues découlant de redoux hivernaux tendent à se prolonger dans le temps, cumulant d'importants volumes de ruissellement en réponse aux actions combinées, voire cycliques, de la saturation du sol, de précipitations liquides sur sol gelé, de rétention et de fonte du couvert neigeux. Compte tenu des importants volumes de ruissellement associés aux redoux hivernaux, les conditions météorologiques à l'origine de ce type d'évènement constituent un important critère à intégrer dans la conception des ouvrages hydro-agricoles.

Répondant à cet objectif, le développement et la validation d'indices de fonte et pluie hivernale s'est d'abord appuyé sur la mise en relation de jeux de données météorologiques et hydrométriques disponibles pour un ensemble de six petits bassins versants à vocation agricole instrumentés et opérés par l'IRDA en Beauce et Montérégie. La démarche visait à proposer des indices climatiques développés sur la seule base d'observations journalières de

température et de précipitations, compte tenu que les observations météorologiques hivernales disponibles pour l'ensemble du territoire rural se limitaient au pas de temps journalier. Aussi, bien que la fonte de neige ait tôt démontré au cours de l'étude un pouvoir explicatif des crues, le recours aux observations de hauteur de neige des stations météorologiques a été exclu, compte tenu de la qualité variable de cette observation. Les prédictions des apports verticaux, traduisant le cumul des eaux de fonte et de précipitations, se sont plutôt appuyées sur une approche simplifiée de modélisation, adaptée du modèle CEQUeau (Morin, 1997). La comparaison des prédictions du modèle CEQUeau_modIRDA avec les observations de stations nivométriques (MDDEFP) a démontré un bon ajustement du modèle. Celui-ci a permis de reproduire de façon satisfaisante l'évolution du couvert de neige dans les deux régions agricoles à l'étude, sur la seule base des données de température et de précipitations journalières. Par extension, il a été estimé que les apports verticaux résultants de la transformation du couvert neigeux étaient aussi raisonnablement bien prédits.

La validation du pouvoir des apports verticaux prédits à expliquer les crues observées de fonte et de pluies hivernales des bassins à l'étude a été supportée par une approche de modélisation hydrologique simplifiée. Dans l'ensemble, les résultats de ce volet d'étude témoignent d'une performance acceptable des apports verticaux modélisés à prédire l'occurrence et l'intensité des crues de fonte et pluie hivernale observées aux exutoires de petits bassins versants de la Montérégie et de la Beauce. Suivant ce constat, le modèle CEQUeau-modIRDA a été mis à contribution par l'équipe de l'INRS-ETE dans la l'estimation des distributions hauteur-durée-fréquence (HDF) des apports verticaux modélisés sur la base des observations journalières de précipitation et de température pour une centaine de stations météorologiques québécoises. Les courbes HDF illustrent la distribution des cumuls d'apports verticaux pour une durée de un à cinq jours, selon des périodes de récurrence de 2 à 50 ans. À l'échelle de la province, les résultats témoignent d'un fort gradient spatial dans les hauteurs d'eau prédites. Pour la durée de cinq jours et une période de récurrence de deux ans, les hauteurs prédites varient par exemple de 80 mm dans le sud-ouest du Québec à plus de 180 mm dans l'est de la province. Étant donné que les événements d'une durée de cinq jours sont très dépendants de l'accumulation de neige, ce gradient s'explique par le fait que les secteurs au sud, plus chauds, accumulent moins de neige au cours de l'hiver.

Dans le contexte actuel où les critères hydrologiques de conception des aménagements hydrauliques en milieu rural ne prennent pas en compte les événements de fonte et de pluie hivernale, les indices proposés pour l'ensemble des stations météorologiques à l'étude constituent un premier jalon dans la considération éventuelle de ces processus dans le dimensionnement des ouvrages hydrauliques en milieu rural. L'augmentation anticipée des redoux hivernaux en climat futur et leurs conséquences, notamment au plan des inondations, militent pour un développement scientifique plus en aval dans la compréhension et la prédiction de ces phénomènes. Le recours à une approche de modélisation hydrologique plus complexe, intégrant entre autres les influences du gel, de l'utilisation du sol, du paysage et des propriétés des sols sur l'hydrologie du cours d'eau, permettront à terme d'améliorer le pouvoir prédictif des indices de fonte et pluie hivernale.

Banque de données hydropédologiques

En préalable au dimensionnement des infrastructures hydro-agricoles, les concepteurs doivent connaître les propriétés des sols quant à leur capacité à évacuer l'eau. Ils se réfèrent dès lors aux cartes pédologiques disponibles pour identifier les séries de sol du territoire ciblé

et pour leur associer les groupes hydrologiques des sols appropriés (GHS). Ce concept développé en milieu de pratique aux États-Unis (USDA-NCRS) permet de classer les séries de sols minéraux en fonction de leur potentiel de ruissellement. Selon les règles utilisées pour ce classement, l'attribution d'une série de sols à un groupe hydrologique donné est basée sur des mesures d'infiltration et de transmission de l'eau réalisées sur le terrain. La couche de sol présentant la conductivité hydraulique la plus faible (la moins perméable) ou la profondeur de la nappe orientent le classement des séries de sols vers un groupe hydrologique donné.

Les données de conductivité hydraulique saturée nécessaires à la classification des séries de sols du Québec selon les groupes hydrologiques n'étant pas disponibles, une méthode de classification-expert a été développée à l'IRDA. Pour ce faire, les données de conductivité hydraulique saturée moyennes obtenues pour 157 séries de sols québécoises documentées dans l'*Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec* ont été mises à profit dans la classification selon leur groupe hydrologique, suivant les règles de classement de la méthodologie du USDA-NCRS. Ce premier classement a ensuite été mis en relation avec les propriétés descriptives des 650 séries de sols minéraux compilées par une équipe d'Agriculture et agroalimentaire Canada (AAC). Les variables les plus corrélées ou associées aux groupes hydrologiques des séries de sols de l'*Inventaire* ont été sélectionnées afin d'établir des règles générales de classification pour l'ensemble des 650 séries de sols minéraux du Québec. Le mode de dépôt (marin, fluviatile, morainique, etc.), la classe de drainage, la classe de profondeur du sol, la nature calcaire ou non du substratum (horizon C ou matériau parental), le sous-groupe taxonomique et la classe granulométrique ont été les descripteurs utilisés. Le mode de déposition (marin, glacio-marin, estuarien, fluviatile, lacustre, glacio-lacustre, fluvio-lacustre, morainique, fluvio-glaciaire, éolien et alluvion récente) s'est avéré le meilleur descripteur qualitatif permettant de discriminer dans un premier temps les séries de sols vers des groupes hydrologiques. Par exemple, il s'avère que les dépôts de surface d'origine morainique, mis en place sous un glacier d'un grand poids, sont naturellement plus compacts et ainsi moins perméables que ceux déposés par l'eau provenant de la fonte d'un glacier (dépôts fluvio-glaciaires).

L'indexation et la validation du groupe hydrologique de l'ensemble des séries de sols du Québec en milieu rural réalisées dans le cadre du projet par l'équipe de l'IRDA constitue un important actif en support à la conception des ouvrages hydro-agricoles. Alors que la géomatique fait maintenant partie du quotidien en milieu de pratique, la base de données applicable à toutes les unités cartographiques de l'ensemble des rapports pédologiques du Québec, disponibles en ligne, facilitera la préparation des projets en aménagement hydro-agricole.

Développement et validation de méthodes de prédiction hydrologique

Le développement et la validation de méthodes d'estimation des paramètres hydrologiques propres au dimensionnement des ouvrages hydro-agricoles (temps de montée, hauteur de ruissellement, débit de crue) se sont appuyés sur les observations hydrologiques colligées par l'IRDA et l'Université Laval aux exutoires de onze petits bassins versants en milieu rural québécois (3 à 30 km²). L'analyse hydrologique de plus de 700 hydrogrammes individuels a été supportée par le logiciel VisuHydro, spécialement développé à cette fin dans le cadre du projet. Le logiciel a permis de modéliser les principales propriétés des hydrogrammes à l'étude, incluant leur forme, les temps de montée, les hauteurs de ruissellement et les débits

de pointe. Les résultats de ces analyses hydrologiques détaillées (observations) ont servi de bases de développement et de validation des diverses méthodes de prédiction de ces paramètres. Au terme du présent projet, toutes les méthodes proposées d'estimation des paramètres hydrologiques (ruissellement, temps de concentration, forme et débits de pointe) se distinguent de celles couramment utilisées en milieu de pratique au Québec.

Les temps de montée observés pour 193 hydrogrammes de type simple ont été comparés aux temps de concentration estimés par les méthodes couramment utilisées au Québec sur la base des propriétés des bassins (pente du cours d'eau, longueur de parcours de l'eau, CN moyen). Aucune de ces méthodes de prédiction (Kirpich, Mockus, SCS-lag et Bransby-Williams) n'a cependant permis d'estimer correctement les temps de montée observés. Devant ce constat, une approche de régression a été retenue dans le développement d'une méthode alternative de prédiction du temps de montée/concentration sur la base des descripteurs physiques des bassins versants à l'étude. Il est toutefois reconnu que le nombre de bassins versants mis à profit dans la présente étude demeure relativement faible et milite pour la contribution d'un plus grand nombre d'observations colligées aux exutoires de micro-bassins expérimentaux.

En ce qui a trait aux paramètres de forme des hydrogrammes, un coefficient de forme moyen de l'ordre de 0,73 a été estimé pour l'ensemble des sites et des événements de ruissellement, avec un écart type de 0,11. Bien que le petit nombre de bassins étudiés appelle à la prudence, l'évaluation relativement homogène du coefficient de forme pour l'ensemble des bassins à l'étude, présentant pourtant des caractéristiques physiographiques très contrastées, milite en faveur de retenir la valeur moyenne 0.73 comme coefficient de forme d'hydrogramme pour les prédictions hydrologiques applicables à l'ensemble de petits bassins versants ruraux au Québec. Rappelons que cette valeur se rapproche de celle inhérente à la méthode de l'hydrogramme triangulaire ou unitaire du SCS, qui correspond à un coefficient de forme de 0,75. La méthode rationnelle utilise pour sa part à un coefficient de forme de 1,00.

L'étude des relations entre les précipitations (Ppt) et les hauteurs de ruissellement (Hru) générées aux exutoires des onze bassins versants a permis de générer des modèles de régression linéaire distinctifs pour les différents sites à l'étude. De façon systématique, les analyses statistiques réalisées sur les différents jeux de données transformées (log) ont démontré l'absence d'interaction entre les facteurs « Bassin » et la covariable (précipitations). Ainsi, la variabilité dans les réponses hydrologiques entre les bassins versants a été expliquée par des modèles réduits de régression linéaire. Les différents bassins se partagent alors la même pente dans le modèle statistique (l'exposant de la précipitation dans le modèle physique), mais se distinguent par leurs ordonnées à l'origine respectives (le coefficient de ruissellement dans le modèle physique). Suivant une première analyse globale de l'ensemble des observations (N=463) ciblée sur la détection des effets individuels des bassins versants (modèles locaux), le jeu de données a été scindé en deux groupes, représentatifs des régions physiographiques de la plaine du Saint-Laurent (modèle régional montérégien) et de reliefs plus accentués (modèle régional appalachien).

En Montérégie, les estimateurs du coefficient de ruissellement se sont avérés corrélés avec les numéros de courbe (CN) respectifs des bassins versants à l'étude. Il a dès lors été postulé que cette corrélation traduisait l'influence des propriétés du sol et des systèmes cultureux, compte tenu du relief relativement homogène de ces bassins versants. Les CN ont donc pu être intégrés aux modèles de prédictions de hauteur du ruissellement (modèle montérégien).

Pour les autres bassins à l'étude, représentatifs des régions de l'Estrie, du Témiscouata et de la Beauce, les CN moyens des bassins à l'étude ne pouvaient expliquer les coefficients de ruissellement des différents bassins versants. Il a plutôt été estimé que des facteurs autres que ceux retenus par la méthode courante d'indexation des CN (groupe hydrologique et occupation du sol), expliquaient la variabilité des hauteurs de ruissellement observées dans les bassins au relief accentué. L'effet des formes du paysage sur la saturation des sols et l'influence hydrodynamique des milieux humides sont les deux principales pistes suggérées par les résultats de la présente étude. Une équation générale applicable aux six bassins versants a été proposée en guise de modèle régional appalachien, prédisant les hauteurs moyennes de ruissellement sur la seule base des précipitations (non hivernales) comme variable explicative.

La méthode de prédiction de débit de crue développée s'est appuyée sur les différents paramètres hydrologiques (IDF des précipitations, groupes hydrologique des sols, hauteur de ruissellement, temps de montée, facteur de forme $\varphi(\alpha)$, tels que déterminés au moyen de méthodes indépendantes développées dans le cadre de l'étude. Dans ce contexte, la comparaison des débits de crue prédits par le modèle avec les débits de crue observés, constituait un exercice de validation globale de la cohérence entre les méthodes d'estimation des différents paramètres hydrologiques. Une validation objective aurait cependant exigé l'utilisation de bassins versants n'ayant pas été utilisés lors de l'étude des différents facteurs. Compte tenu du nombre limité de bassins versants mis à contribution dans le cadre de la présente étude, cette avenue n'était pas possible. La validation de la méthode proposée de prédiction des débits de crue a donc reposé sur l'hypothèse que pour un bassin versant donné, le recours à la précipitation de récurrence associée au temps de montée prédit du bassin versant, de même que de la hauteur de ruissellement prédite pour cette même précipitation, devrait prédire le débit observé pour cette récurrence. En utilisant les courbes enveloppes associées aux prédictions des hauteurs de ruissellement des deux modèles régionaux, l'approche proposée de prédiction des débits de pointe est estimée valide. Cette validité demeure cependant conditionnelle à une bonne prédiction de la hauteur de ruissellement. La présente étude a mis en relief que l'approche du numéro de courbe (CN) ne permettait pas de caractériser le ruissellement des bassins appalachiens et s'est montré peu performant avec un bassin en Montérégie. Le CN ne semble donc pas un indicateur d'application générale permettant de caractériser le ruissellement des bassins versants au Québec. Ce constat doit cependant être modéré par le nombre limité de bassins versants utilisés. Les données d'autres bassins versants devront être analysées pour raffiner l'approche proposée.

L'ensemble des équations prédictives des différents paramètres hydrologiques évaluées ou validées dans le cadre de la présente étude ont été intégrées à un utilitaire informatique *QmaxPBV* (pour *Qmax* des petits bassins versants), destiné à supporter le milieu de pratique dans le dimensionnement des ouvrages hydro-agricoles. L'utilitaire est également interfacé avec les banques de données hydro-pédologiques et les courbes de distribution IDF des précipitations, aussi mises à jour dans le cadre du présent projet.

Les banques de données pertinentes aux précipitations et aux propriétés des sols, conjuguées au développement et à la validation de nouvelles méthodes de prédictions hydrologiques dans le cadre du présent constituent un ensemble d'outils fonctionnels, développées à 100% sur la base d'observations hydrométriques et météorologiques québécoises. À ce titre, la présente étude constitue un important jalon dans le

développement d'outils de prédiction hydrologique reflétant les particularités agroclimatiques et géophysiques québécoises. Le nombre et la durée des suivis hydrométriques en petits bassins versants mis à profit dans le cadre de l'étude appelle cependant à la poursuite des efforts de monitoring en bassins et parcelles agricoles, de même qu'en développement de méthodes alternatives de prédiction hydrologique, particulièrement en ce qui a trait aux hauteurs de ruissellement. Rappelons qu'à l'instar des pratiques courantes en milieu de pratique, les méthodes de prédictions hydrologiques proposées ont été développées sur la base des observations de précipitations et de débits restreinte à la période non influencée par des événements de fonte et de pluie hivernale (mai à novembre). Le développement de méthodes de prédiction hydrologique adaptées au contexte très particulier, et complexe, des crues de fonte et de pluie hivernale demeure un important objectif de recherche. D'importants actifs nécessaires à cette démarche ont cependant été réalisés, dont une méthode simplifiée de prédiction d'apports verticaux, leur projection en climat actuel au réseau de stations météorologiques de la province, et enfin le développement d'une méthode de simulation de ces indicateurs en climat futur en mettant à profit le MRCC. Une suite logique à la présente étude s'inscrit dès lors dans l'examen des relations entre les crues observées et les indices de fonte et de pluie hivernale en micro-bassins versants agricoles, et la projection de ces relations en climat futur, alors que l'occurrence des redoux hivernaux est appelée à augmenter.

Table des matières

Remerciements.....	3
Résumé exécutif	5
Table des matières	12
Liste des figures.....	14
Liste des tableaux.....	17
Liste des acronymes	20
1 Introduction	21
2 Contexte / objectifs	21
3 Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature.....	27
3.1 La mise à jour des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF).....	27
3.2 Les courbes IDF en climat futur.....	28
3.3 Les redoux hivernaux.....	29
3.4 Procéder à l'adaptation et à la validation d'une méthode de prédiction hydrologique.....	30
3.5 La classification hydrologique des séries de sols du Québec.....	36
4 Méthodologie / données.....	40
4.1 La mise à jour des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF).....	40
4.1.1 Données utilisées.....	40
4.1.2 Séries des maxima annuels.....	41
4.1.3 Traitement des données manquantes.....	42
4.2 Courbes IDF en climat futur.....	42
4.2.1 Région d'étude.....	42
4.2.2 Sélection et validation des simulations.....	43
4.2.3 Analyse fréquentielle régionale.....	44
4.2.4 Estimation de l'incertitude.....	45
4.3 Les indices de fonte et de pluie hivernale.....	46
4.3.1 Identification des indices de fonte et fonte hivernale.....	47
4.3.2 La caractérisation de la période actuelle en fonction des indices de fonte et de pluie hivernale.....	52
4.4 Procéder à l'adaptation et à la validation d'une méthode de prédiction hydrologique.....	55
4.4.1 Caractérisation des bassins versants à l'étude.....	55
4.4.2 Analyses hydrologiques.....	65
4.4.3 Volumes de ruissellement.....	70
4.4.4 Temps de montée et temps de concentration.....	70
4.4.5 Coefficient de forme des hydrogrammes.....	71
4.4.6 Validation des débits de pointe.....	71
4.5 La classification hydrologique des séries de sols du Québec.....	73
4.5.1 Données et méthode.....	73
4.5.2 Les données de l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec.....	74
4.5.3 Base de données des noms de sol du Québec.....	76
4.5.4 Les règles de classification et le classement obtenu.....	76
5 Résultats.....	78
5.1 La mise à jour des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF).....	78
5.1.1 Analyse des tendances.....	78

5.1.2	Analyse fréquentielle régionale et homogénéité de la région	79
5.1.3	Répartition régionale.....	80
5.1.4	Estimation des valeurs de paramètres de la GEV	80
5.1.5	Fréquences mensuelles d'occurrences des maxima annuels	83
5.1.6	Comparaison des estimateurs IDF d'EC et de l'AFR	85
5.1.7	Les incertitudes.....	85
5.2	Les courbes IDF en climat futur.....	85
5.2.1	Évaluation des simulations de référence.....	85
5.2.2	Projections climatiques.....	88
5.3	Identification des indices de redoux hivernaux	94
5.3.1	Étape 1 : Développement des indices de pluie et fonte hivernale.....	94
5.3.2	Étape 2 : La caractérisation de la période actuelle en fonction des indicateurs de redoux hivernaux 106	
5.4	Procéder à l'adaptation et à la validation d'une méthode de prédiction hydrologique.....	108
5.4.1	Temps de montée et temps de concentration	108
5.4.2	Coefficient de forme des hydrogrammes	115
5.4.3	Estimation et prédiction des hauteurs de ruissellement	118
5.4.4	Validation des débits de pointe	135
5.4.5	Description de l'utilitaire.....	144
6	Analyse et discussion	147
7	Conclusion et recommandations	155
8	Références	159
9	Annexes.....	168
9.1	Annexe 1. Méthodologie développée pour l'estimation des apports verticaux extrêmes en climat futur 168	
9.2	ANNEXE 2. Compte-rendu de l'atelier sur la conception d'ouvrages hydrauliques en milieu agricole 172	
9.3	ANNEXE 3. Tableaux de données et résultats complémentaires.....	177

Liste des figures

Figure 1. Schéma explicatif de la démarche et des tâches associées au projet.....	24
Figure 2. Maxima annuels de débits journaliers observés pour les périodes de novembre à avril et de mai à octobre aux exutoires des bassins versants expérimentaux du ruisseau Fourchette en Beauce et Walbridge en Montérégie (période 2002-2006).....	25
Figure 3. Exemple d'un hydrogramme de crue (tiré de Rocha, 2013).....	31
Figure 4. Séparation de l'hydrogramme de crue, selon une méthode linéaire telle que supportée dans le logiciel VisuHydro (Lagacé, 2012b).	32
Figure 5. Évolution de la distribution gamma en fonction de la variation des paramètres (α), (β) et (γ) (Tiré de Rocha, 2013).	35
Figure 6. Localisation des stations météorologique situées dans la partie sud du Québec	40
Figure 7. Nombre de stations (sud du 49° parallèle) en fonction des durées des séries disponibles (les années classées manquantes ne sont pas considérées; seules les stations avec plus de 15 ans de données ont été retenues).....	41
Figure 8. Carte des régions à l'étude, telles que vues par le MRCC sur la grille AMNO (45 km de résolution) : la vallée du St-Laurent (noir), l'Abitibi-Témiscamingue (bleu), le Saguenay – Lac St-Jean (orange) et la Gaspésie (rouge).....	43
Figure 9. Schéma du fonctionnement de MOHYSE	51
Figure 10. Carte localisant les stations utilisées dans le cadre de la présente étude	52
Figure 11. Nombre d'années de données de précipitations (pluie et neige) et de température (minimale et maximale) à chaque station.	53
Figure 12. Schéma méthodologique du volet hydrologique	56
Figure 13. Localisation des bassins versants utilisés dans l'analyse hydrologique des crues	57
Figure 14. Formation des URH pour le bassin du ruisseau Cass avec l'utilisation du territoire et les groupes hydrologiques.....	64
Figure 15. Spatialisation des numéros de courbe du bassin du ruisseau Cass.....	65
Figure 16. Interface visuelle du logiciel VisuHydro permettant la séparation des hydrogrammes	67
Figure 17. Schéma simplifié de la méthodologie utilisée pour la classification des séries des sols minéraux du Québec dans un des groupes hydrologiques USDA-NRCS	74
Figure 18. Carte des sous-régions considérées pour les durées 10 minutes et 24 heures (les stations comportant des séries aux 10 minutes et/ou des séries aux 24 heures sont représentées)	79
Figure 19. Courbes IDF pour la station Deschambault (7011982).....	82
Figure 20. Fréquences mensuelles d'occurrence des maxima annuels pour les régions du Bas-St-Laurent, du Saguenay-Lac-St-Jean, de la Capitale-Nationale, de la Mauricie, de l'Estrie et de Montréal pour les durées de 15 minutes, 1 heure, 6 heures et 24 heures.	83
Figure 21. Fréquences mensuelles d'occurrence des maxima annuels pour les régions de l'Outaouais, de l'Abitibi-Témiscamingue, de la Côte-Nord, de la Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine, de Chaudières-Appalaches et de Lanaudière pour les durées 15 minutes, 1 heure, 6 heures et 24 heures.	84
Figure 22. Fréquences mensuelles d'occurrence des maxima annuels pour les régions des Laurentides, de la Montérégie et du Centre-du-Québec pour les durées 15 minutes, 1 heure, 6 heures et 24 heures.....	84
Figure 23. Carte identifiant les stations météorologiques appartenant à chacune des quatre régions d'étude : la vallée du St-Laurent (vide), l'Abitibi-Témiscamingue (bleu), le Saguenay – Lac St-Jean (orange) et la Gaspésie (rouge).....	86
Figure 24. Comparaison des distributions empiriques des précipitations maximales annuelles (mai à octobre) observées et simulées par le MRCC pour des événements de durée 1, 2, 6, 12 et 24 heures. Pour les événements de 24h, la ligne pointillée montre la distribution des précipitations de la base de données SNITE agrégées à l'échelle du MRCC.	87
Figure 25. Moyennes des précipitations maximales annuelles lors d'évènements de durée 24 heures pour les simulations du MRCC en climat de référence.	88

Figure 26. Différences entre les moyennes des précipitations maximales annuelles des simulations en climat de référence et futur pour les simulations du MRCC.	88
Figure 27. Courbes IDF sur un graphique log-log pour les temps de retour 2, 5, 10 et 25 ans tracées à partir des paramètres régionaux moyens de la vallée du St-Laurent.	90
Figure 28. Courbes IDF pour la vallée du St-Laurent simulée en climat présent (aet) et futur (aeu) par le MRCC piloté par CGCM3 #4. Les lignes indiquent les intensités de temps de retour 25 ans estimées à partir des paramètres GEV moyens de la région. Les distributions quant à elles sont construites à partir des intensités calculées avec les paramètres de chaque point de grille dans la même région.	91
Figure 29. Comparaison entre les résultats de l'analyse fréquentielle régionale (cercle), la distribution de la précipitation accumulée calculée de manière classique (ligne pleine) et bayésienne (ligne pointillée) pour les événements de durée 1h de la simulation aet du MRCC pour le climat de référence.	92
Figure 30. Pourcentage d'augmentation des précipitations maximales annuelles de durée a) 1 h et b) 24h pour un temps de retour de 25 ans entre le climat de référence et futur.	93
Figure 31. Localisation des bassins versants et stations hydrométriques, météorologiques et nivométriques du secteur beauceron à l'étude.	96
Figure 32. Localisation des bassins versants et stations hydrométriques, météorologiques et nivométriques du secteur montérégien à l'étude.	96
Figure 33. Représentation de l'évolution des équivalents en eau mesurés et simulés par le modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin Castor à partir des valeurs interpolées de densité de la neige.	98
Figure 34. Représentation de l'évolution des équivalents en eau mesurés et simulés par le modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin Ewing à partir des valeurs interpolées de densité de la neige.	98
Figure 35. Représentation de l'évolution des équivalents en eau mesurés et simulés par le modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin Walbridge Intervention à partir des valeurs interpolées de densité de la neige.	99
Figure 36. Représentation de l'évolution des équivalents en eau mesurés et simulés par le modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin Walbridge Témoin à partir des valeurs interpolées de densité de la neige.	99
Figure 37. Représentation de l'évolution des équivalents en eau mesurés et simulés par le modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin Fourchette Intervention à partir des valeurs interpolées de densité de la neige.	100
Figure 38. Représentation de l'évolution des équivalents en eau mesurés et simulés par le modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin Fourchette Témoin à partir des valeurs interpolées de densité de la neige.	100
Figure 39. Séries temporelles des débits mesurés et simulés par MOHYSE à partir des apports verticaux du modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin versant Castor en période de validation.	103
Figure 40. Séries temporelles des débits mesurés et simulés par MOHYSE à partir des apports verticaux du modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin versant Ewing en période de validation.	103
Figure 41. Séries temporelles des débits mesurés et simulés par MOHYSE à partir des apports verticaux du modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin versant Walbridge Intervention en période de validation.	104
Figure 42. Séries temporelles des débits mesurés et simulés par MOHYSE à partir des apports verticaux du modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin versant Walbridge Témoin en période de validation.	104
Figure 43. Séries temporelles des débits mesurés et simulés par MOHYSE à partir des apports verticaux du modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin versant Fourchette Intervention en période de validation.	105

Figure 44. Séries temporelles des débits mesurés et simulés par MOHYSE à partir des apports verticaux du modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin versant Fourchette Témoin en période de validation.....	105
Figure 45. Courbes HDF des apports verticaux pour la station 7056067 à Pointe-au-Père	107
Figure 46. Cartographie des valeurs des estimateurs HDF pour la durée de 5 jours et le temps de retour de 2 ans pour l'ensemble des stations à l'étude.....	108
Figure 47. Hauteurs de ruissellement estimées à l'exutoire du bassin versant du ruisseau au Castor en Montérégie en fonction de la précipitation et selon la saison hivernale (décembre à avril) ou la saison de croissance (mai à novembre).....	120
Figure 48. Hauteurs de ruissellement estimées à l'exutoire du bassin versant du ruisseau Brook en Estrie en fonction de la précipitation selon différents types d'hydrogrammes.....	120
Figure 49. Distribution des hauteurs de précipitation (N = 463 évènements) en fonction des précipitations pour les données originales (a) et pour les données transformées (log) (b), de même que la distribution des résidus de l'ANCOVA des hauteurs de ruissellement pour l'effet « Bassin » utilisant la hauteur de précipitation en covariable pour les données transformées (c).....	121
Figure 50. Modèle réduit (pente unique) d'analyse de covariance des hauteurs de ruissellement (Hru) considérant l'effet « Bassin », utilisant la hauteur de précipitation en covariable et appliqué aux observations transformées (log).....	124
Figure 51. Prédictions et intervalles de confiance associés (10 %) du modèle réduit (pente unique) d'analyse de covariance des hauteurs de ruissellement (Hru) pour le modèle régional appalachien combinant les observations des six bassins, utilisant la hauteur de précipitation en covariable et appliqué aux observations transformées (log).....	125
Figures 52 a à e. Prédictions des hauteurs de ruissellement en Montérégie selon les modèles locaux de régression comparées aux prédictions des modèles de Monfet (1979) et SCS.....	128
Figures 53 a à e. Prédictions des hauteurs de ruissellement pour les bassins appalachiens selon les modèles locaux de régression comparées aux prédictions des modèles de Monfet (1979) et SCS.....	131
Figure 54. Estimateur "b" associé aux effets « Bassins » du modèle ANCOVA réduit (pente unique) des hauteurs de ruissellement (N = 460) considérant la précipitation en covariable, exprimé en fonction des onze CN moyens des bassins versants à l'étude.....	132
Figure 55a à f. Observations et prédictions des hauteurs moyennes de ruissellement et des courbes enveloppes de récurrence 2 ans et 5 ans dérivées des modèles locaux ANCOVA pour les six bassins versants mis à contribution dans la validation des projections des débits de pointe.....	140

Liste des tableaux

Tableau 1. Critères pour la désignation des groupes hydrologiques des sols quand une couche imperméable est présente entre 50 et 100 cm de profondeur ⁽¹⁾	39
Tableau 2. Critères pour la désignation des groupes hydrologiques des sols quand la couche imperméable est présente à plus de 100 cm de profondeur ⁽¹⁾	39
Tableau 3. Nombre de stations/séries disponibles pour chaque durée pour les stations du sud-Québec	42
Tableau 4. Détails des simulations régionales choisies.....	43
Tableau 5. Description des bassins versants utilisés dans l'identification de l'indice de fonte et pluie hivernale.....	47
Tableau 6. Sommaire des résultats des modèles de régression linéaire expliquant les apex de crue observée aux exutoires des six bassins versants expérimentaux au moyen des cumuls hebdomadaires de la fonte et des précipitations liquides.	48
Tableau 7. Localisation, étendue et période d'étude des bassins versants.....	58
Tableau 8. Occupation du sol des bassins versants à l'étude (en pourcentage).....	58
Tableau 9. Distribution des groupes hydrologiques du sol des bassins versants à l'étude (en pourcentage).....	59
Tableau 10. Classes de cultures de la Banque de données des cultures assurées (BDCA) de la Financière agricole	61
Tableau 11. Classes d'utilisation du territoire de la carte écoforestière	62
Tableau 12. CN utilisés dans l'indexation des unités de réponse hydrologique (URH) en fonction de l'utilisation du territoire et des groupes hydrologiques du sol pour l'ensemble des onze bassins versants à l'étude.....	64
Tableau 13. Nombre d'URH et les numéros de courbe moyens pondérés pour les superficies des onze bassins versants à l'étude	65
Tableau 14. Stations et bases de données hydrométriques utilisées au volet hydrologique du projet. ..	68
Tableau 15. Stations et bases de données météorologiques utilisées au volet hydrologique du projet. ..	68
Tableau 16. Distance (km) entre les stations hydrométriques et météorologiques utilisées au volet hydrologique du projet.....	69
Tableau 17. Pourcentage de stations avec tendances significatives (seuil de 95 %) selon le test de Mann-Kendall (stations du sud-Québec).....	78
Tableau 18. Valeurs régionales des paramètres et nombre de stations considéré.....	80
Tableau 19. Moyenne des précipitations maximales annuelles du MRCC sur la région de la Vallée du St-Laurent en climat de référence.	89
Tableau 20. Pourcentage d'augmentation des précipitations extrêmes estimée par analyse fréquentielle régionale des données du MRCC dans la région de la vallée du St-Laurent entre le climat de référence et futur.	90
Tableau 21. Moyenne et écart-type de la distribution d'ensemble du pourcentage d'augmentation projetée des précipitations extrêmes estimée par analyse bayésienne régionale des données du MRCC sur la région de la vallée du St-Laurent.....	93
Tableau 22. Constantes ajustables du modèle de fonte de neige CEQUeau-modIRDA.....	95
Tableau 23. Indices d'ajustement des prédictions du modèle hydrologique simplifié pour les six bassins versants à l'étude en périodes de calage et de validation.....	102
Tableau 24. Périodes de calage et de validation retenues dans l'exercice de modélisation hydrologique simplifiée.	102
Tableau 25. Apports verticaux extrêmes (mm) d'une durée de un à cinq jours estimés pour la station 7056067 à Pointe-au-Père selon des temps de retour de deux, cinq, dix, vingt et cinquante ans.	107
Tableau 26. Sommaire des temps de montée observés et calculés pour les différents bassins versants du réseau d'étude.	110
Tableau 27. Sommaire des temps de montée observés et des temps de concentration modélisés pour les différents bassins.....	111

Tableau 28. Ratio des temps de concentration modélisés par rapport au temps de montée observés pour les différents bassins versants du réseau d'étude.	112
Tableau 29. Matrice des coefficients de corrélation des temps de montée (tp) observés avec les paramètres descriptifs des bassins versants.	113
Tableau 30. Prédiction du temps de montée par les différents modèles de régression proposés.	114
Tableau 31. Distribution des coefficients de forme d'hydrogrammes $\varphi(\alpha)$ observés pour les dix bassins versants à l'étude et calculés en lissant la fonction de probabilité gamma par les méthodes des moments et des moindres carrés.	116
Tableau 32. Différences entre les moyennes des coefficients de forme d'hydrogrammes $\varphi(\alpha)$ observés pour les dix bassins versants à l'étude et probabilités associées suivant une analyse de variance.	117
Tableau 33. Distributions des volumes, hauteurs et coefficients de ruissellement associés aux 709 hydrogrammes analysés individuellement.	119
Tableau 34. Distribution mensuelle du nombre d'hydrogrammes analysés par bassin versant et utilisés dans les analyses statistiques des relations entre les hauteurs de ruissellement et de précipitation. ...	122
Tableau 35. Résultats de l'analyse de covariance (ANCOVA) des hauteurs de ruissellement (log Ru) selon des modèles réduits (pente unique) considérant l'effet « Bassin » et utilisant la hauteur de précipitation (log Ppt) en covariable pour l'ensemble des onze bassins versants (a), les cinq bassins montérégiens (b) et les six bassins appalachiens (c).	123
Tableau 36. Estimateurs des paramètres de régression des modèles ANCOVA ¹ prédictifs des hauteurs de ruissellement utilisant les hauteurs de précipitation en covariable et écarts-types associés.	134
Tableau 37. Séries annuelles des événements de ruissellement retenus dans la validation du modèle de prédiction des débits de pointe.	142
Tableau 38. Paramètres observés et débits de pointe estimés pour les bassins versants mis à contribution dans la validation de la méthode de prédiction des débits de pointe.	143
Tableau 39. Débits de crue prédits utilisant les courbes enveloppes et les modèles locaux de prédiction de la hauteur du ruissellement.	143
Tableau 40. Débits de crue prédits utilisant les courbes enveloppes et les modèles régionaux de prédiction de la hauteur du ruissellement.	144
Tableau 41. Code de statut des valeurs quotidiennes des stations météorologiques du MDDEFP.	169
Tableau 42. Stations utilisées pour le post-traitement des données du MRCC.	170
Tableau 43. Informations sur les stations météorologiques utilisées dans le volet redoux hivernaux (Partie 1).	177
Tableau 44. Informations sur les stations météorologiques utilisées dans le volet redoux hivernaux (Partie 2).	178
Tableau 45. Informations sur l'homogénéité des séries de données les stations météorologiques utilisées dans le volet redoux hivernaux (Partie 1).	179
Tableau 46. Informations sur l'homogénéité des séries de données les stations météorologiques utilisées dans le volet redoux hivernaux (Partie 2).	180
Tableau 47. Informations sur la stationnarité des séries de données les stations météorologiques utilisées dans le volet redoux hivernaux (Partie 1).	181
Tableau 48. Informations sur la stationnarité des séries de données les stations météorologiques utilisées dans le volet redoux hivernaux (Partie 2).	182
Tableau 49. Hauteur des événements extrêmes de redoux, en fonction de la durée et du temps de retour (mm) – Durée 1 jour (Partie 1).	183
Tableau 50. Hauteur des événements extrêmes de redoux, en fonction de la durée et du temps de retour (mm) – Durée 1 jour (Partie 2).	184
Tableau 51. Hauteur des événements extrêmes de redoux, en fonction de la durée et du temps de retour (mm) – Durée 5 jour (Partie 1).	185
Tableau 52. Hauteur des événements extrêmes de redoux, en fonction de la durée et du temps de retour (mm) – Durée 5 jour (Partie 2).	186
Tableau 53. Intensité des événements extrêmes de redoux, en fonction de la durée et du temps de retour (mm/h) – Durée 1 jour (Partie 1).	187

Tableau 54. Intensité des événements extrêmes de redoux, en fonction de la durée et du temps de retour (mm/h) – Durée 1 jour (Partie 2)	188
Tableau 55. Intensité des événements extrêmes de redoux, en fonction de la durée et du temps de retour (mm/h) – Durée 5 jour (Partie 1)	189
Tableau 56. Intensité des événements extrêmes de redoux, en fonction de la durée et du temps de retour (mm/h) – Durée 5 jour (Partie 2)	190
Tableau 57. Prédiction de hauteur de ruissellement (anti-log) pour différentes hauteurs de précipitation (mm) (60 mm et moins).....	191
Tableau 58. Prédiction de hauteur de ruissellement (anti-log) pour différentes hauteurs de précipitation (mm) (65 mm et plus).....	192

Liste des acronymes

AFR	Analyse fréquentielle régionale
BDCA	Banque de données des cultures assurées
BDTQ	Base de données topographiques du Québec
CCSM3	Community Climate System Model
CEHQ	Centre d'expertise hydrique du Québec
CGCM3	Modèle couplé climatique global du Canada
CMIP3	Coupled Model Intercomparison Project phase 3
CN	Curve Number (Numéro de courbe en français)
CNRM CM3	Modèle global couplé du Centre national de recherches météorologiques
EC	Environnement Canada
EEN	Équivalents en eau de la neige
ECHAM5	Modèle global couplé du Max-Planck-Institut
Fdp	Fonction de distribution de probabilité
GEV	Generalized Extreme Value
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GPS	Global Positioning System
HUS	Hydrogramme unitaire synthétique
ICAR	Initiatives de collaboration pour l'adaptation régionale
IDF	Intensité-Durée-Fréquence
INRS-ÉTÉ	Institut national de la recherche scientifique – Eau, Terre et Environnement
MA	Maxima annuels
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
MCG	Modèle de climat global
MDDEFP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs
MJ	Maxima journaliers
MNE	Modèle numérique d'élévation
MRC	Modèle régional de climat
MRCC	Modèle régional canadien du climat
MRN	Ministère des Ressources naturelles du Québec
NRCS	Natural Resources Conservation Service
PACC	Plan d'action sur les changements climatiques
PCMDI	Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison
SIG	Système d'information géographique
SNITE	Service national d'information sur les terres et les eaux d'Agriculture et Agroalimentaire Canada
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
USDA	United States Department of Agriculture
USDA-SCS	United States Department of Agriculture – Soil Conservation Service
WCRP	World Climate Research Programme
WGCM	Working Group on Coupled Modelling

1 Introduction

Ce rapport porte sur le projet *Mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydro-agricoles dans un contexte de changements climatiques*, réalisé dans le cadre de la mise en œuvre du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec, en collaboration avec Ressources naturelles Canada. La réalisation de ce projet découle d'une démarche multidisciplinaire regroupant des équipes de recherche de divers domaines (météorologie, changements climatiques, hydrologie, pédologie, géomatique) alliant leurs compétences respectives afin de développer un ensemble d'outils conviviaux et de banques de données destinés à supporter le dimensionnement des ouvrages hydro-agricoles. Compte tenu de la portée du projet, sa réalisation s'est organisée autour de cinq volets, incluant les volets météorologiques, scénarios climatiques, redoux hivernaux, hydrologique et opérationnel. Plusieurs rapports scientifiques distincts découlent de la réalisation de ces différents volets. Le présent rapport en expose une version intégrée et se réfère fréquemment aux rapports scientifiques complets. Le lecteur désireux d'obtenir davantage de détails sur la méthodologie employée et les résultats obtenus est invité à s'y référer.

2 Contexte / objectifs

Les critères et méthodes utilisés actuellement en milieu agricole au Québec dans la prédiction de débits de pointe datent des années 1980 et n'ont pas profité d'une mise-à-jour depuis cette période. Traditionnellement, les ouvrages hydro-agricoles sont conçus pour assurer l'évacuation des eaux excédentaires à l'intérieur d'une récurrence donnée. Ils répondent à un débit de crue selon une récurrence généralement déterminée avec la méthode rationnelle, en utilisant les temps de concentration dérivés de méthodes américaines développées dans les années 1960-1980 et les estimateurs Intensité-Durée-Fréquence (IDF) développés au Québec dans les années 1970. Constatant un urgent besoin d'actualisation, les ingénieurs en poste au MAPAQ ont ainsi adressé une demande de révision des critères de conception des ouvrages hydro-agricoles. Ainsi, ce renouvellement des critères de conception répond à des besoins immédiats et généralisés à l'ensemble du milieu rural. En effet, un grand nombre de chantiers d'aménagement hydro-agricole ont cours actuellement dans le milieu rural québécois. Ces derniers s'inscrivent dans le cadre d'actions agroenvironnementales concertées et ciblées sur la protection des cours d'eau, la prévention de la pollution diffuse et le maintien de la biodiversité en milieu agricole. La réalisation de ces travaux d'aménagement des terres à des fins environnementales est notamment encouragée par un soutien financier couvrant jusqu'à 90 % des coûts de réalisation. En parallèle au besoin d'actualisation de ces méthodes et critères sur la base de données historiques, il importe aussi de prendre en considération les tendances dans l'évolution du climat et d'assurer que les aménagements hydro-agricoles mis en place aujourd'hui répondent aux régimes hydriques de demain.

L'augmentation anticipée des intensités de précipitations estivales, de même que l'occurrence plus fréquente de redoux hivernaux en réponse aux changements climatiques, appellent par ailleurs à une prise en compte de ces changements dans la mise à jour des critères de conception des ouvrages hydro-agricoles. Au plan de l'acquisition de connaissances sur les changements climatiques, ce développement interpelle particulièrement deux thématiques de recherche appliquée, soit l'étude des scénarios futurs des courbes IDF en réponse aux changements climatiques, de même que l'évaluation de tendances dans l'occurrence de

redoux hivernaux. Ces thèmes de recherche sont tous deux tributaires, au plan méthodologique, du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC).

À la base, l'objectif général du projet est ainsi de produire un outil de prédiction hydrologique adapté à la conception d'aménagement hydro-agricole du parcellaire et des cours d'eau en milieu rural prenant en considération l'évolution récente, en lien avec les changements climatiques, des intensités, des durées et des fréquences des précipitations et des redoux hivernaux.

Au plan opérationnel, la mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydro-agricoles répond ainsi à quatre impératifs, soit : 1) d'actualiser les distributions actuelles des IDF de précipitations; 2) de prendre en compte l'occurrence des redoux hivernaux dans les critères de conception d'ouvrages; 3) de prendre en compte l'influence des changements climatiques sur les distributions IDF des précipitations et l'occurrence des redoux hivernaux, et enfin; 4) de proposer et valider une nouvelle méthode d'estimation des critères hydrologiques en support à la conception des ouvrages hydrauliques en milieu rural.

La réalisation du projet fait ainsi appel à un large partenariat de réalisation interdisciplinaire, dont les activités scientifiques répondent aux objectifs spécifiques suivants :

Volets météorologique et scénarios climatiques

1. Procéder à une mise à jour des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) à l'échelle des stations pour les régions agricoles du Québec.
 - A. construction des courbes IDF pour les stations des régions agricoles du Québec;
 - B. estimation du patron saisonnier des extrêmes annuels à ces stations;
 - C. construction des courbes IDF régionalisées (basées sur l'analyse fréquentielle régionale) pour le territoire agricole du Québec;
 - D. mise en forme de ces informations en vue d'une éventuelle intégration des résultats dans l'Atlas agroclimatique.
2. Développer des scénarios de courbes IDF à l'horizon 2050 à partir des résultats de projections du Modèle régional canadien du climat (MRCC).
3. Intégrer l'ensemble des résultats (courbes IDF, patron saisonnier et mensuel d'occurrence des maxima annuels et indicateurs de redoux) à l'Atlas agroclimatique Agrométéo Québec.

Volet redoux hivernaux

4. Développer des indicateurs pertinents pour la caractérisation de redoux hivernaux en lien avec les ouvrages hydro-agricoles.
5. Caractériser la période actuelle en fonction des indicateurs de redoux hivernaux par l'analyse des séries historiques de stations météorologiques québécoises.

6. Évaluer la performance du MRCC dans la simulation des indicateurs de redoux et développer des scénarios de changement climatique projeté à l'horizon 2050 de ces indicateurs.

Volet hydrologique

7. Générer une banque de données hydro-pédologiques adaptées aux calculs de prédiction hydrologique et pertinentes à l'ensemble des séries de sols minéraux caractérisées dans les rapports pédologiques officielles du Québec.
8. Caractériser les réponses hydrologiques (volumes de ruissellement, temps de concentration) de bassins versants à vocation agricole en fonction des hydrogrammes de ruissellement et des profils de précipitations.
9. Procéder à l'adaptation et à la validation pour le Québec d'une méthode de prédiction hydrologique à partir d'observations hydrométriques, météorologiques et de données géospatiales descriptives des propriétés biophysiques et de l'utilisation du sol de petits bassins versants à vocation agricole.
10. Développer une méthodologie de calcul des coefficients de ruissellement hivernal sur la base d'observations de précipitations et de débits en conditions de gel au sol.

Volet opérationnel

11. Développer un utilitaire informatique convivial destiné à supporter la conception d'aménagements hydro-agricoles du parcellaire et des cours d'eau en milieu agricole.
12. Valider les fonctionnalités de l'utilitaire informatique et des banques de données associées auprès d'un panel d'utilisateurs dans le cadre d'études de cas.
13. Offrir deux sessions de formation auprès des utilisateurs ciblés par le projet.

La figure 1 illustre la démarche de réalisation du projet de même que la répartition des tâches selon ses différents volets. Conceptuellement, la production des courbes IDF et des indices de fonte et pluie hivernale, en climat présent et futur, de même que la caractérisation hydro-pédologique des séries de sols sont des intrants aux outils de prédiction hydrologique développés sur la base de données 100 % québécoises.

Les estimateurs Intensité-Durée-Fréquence (IDF), ou encore Hauteur-Durée-Fréquence (HDF), généralement présentés sous la forme de courbes IDF ou HDF, sont des données d'utilisation courante utilisées pour la conception d'ouvrages hydrauliques tant en secteurs urbains (par exemple les composantes des systèmes de gestion des eaux pluviales et les ponceaux) qu'en secteurs agricoles (aménagements hydro-agricoles). L'établissement d'un lien statistique entre les intensités (ou les hauteurs) des pluies intenses et la récurrence de ces événements permet de déterminer la dimension des ouvrages en fonction d'un niveau de risque (ou de service) préalablement défini (Mailhot et Talbot, 2011a). L'utilisation de données météorologiques couvrant la période 1940 à 2010 permet ainsi de tracer un portrait des précipitations extrêmes du climat québécois actuel tandis que la détermination de scénarios de courbes IDF à partir du MRCC permet de se projeter dans le futur (2041-2070) afin d'intégrer les perspectives de changements climatiques dans la conception des ouvrages.

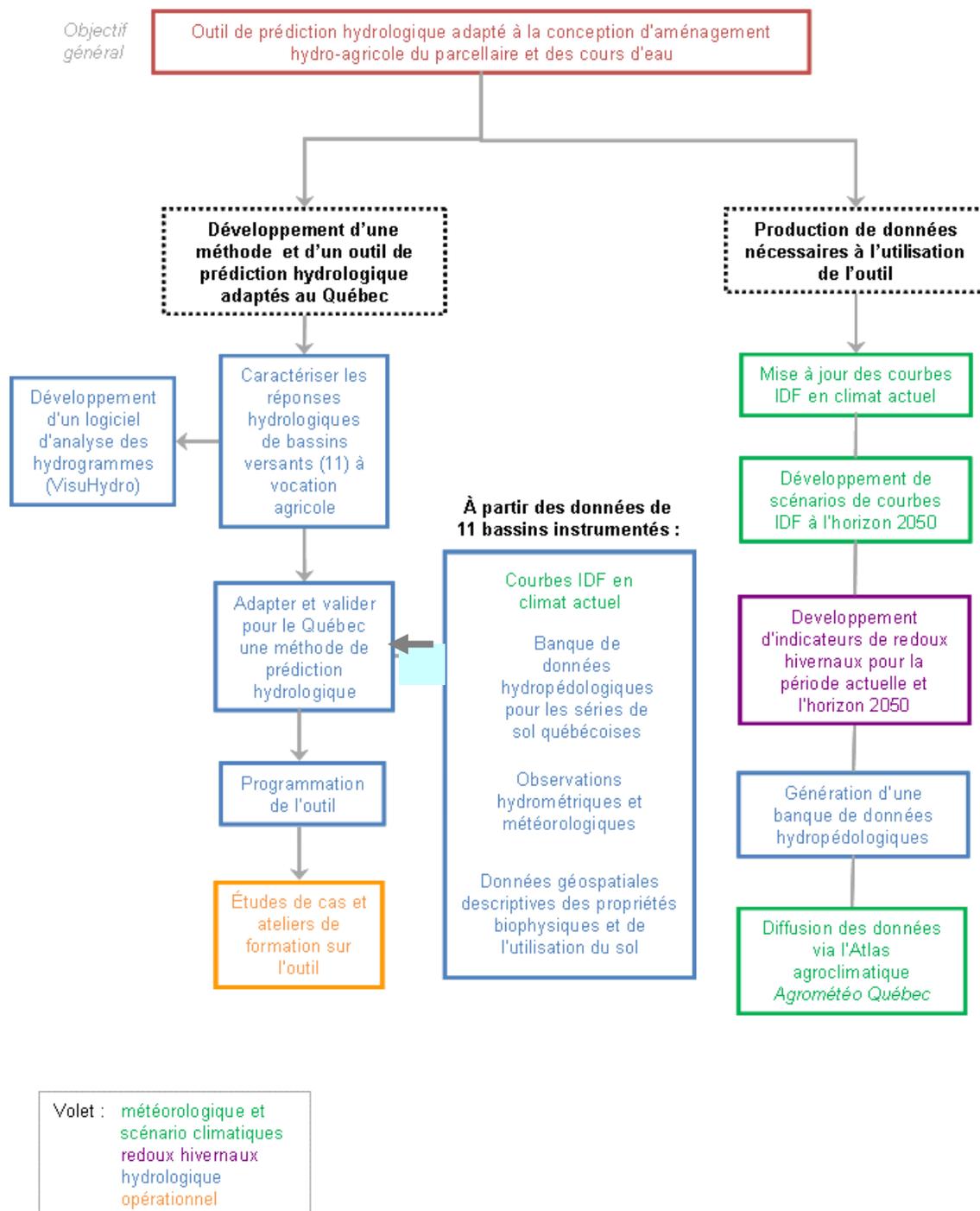


Figure 1. Schéma explicatif de la démarche et des tâches associées au projet

L'occurrence accrue de redoux hivernaux en climat futur interpelle également le dimensionnement d'ouvrages hydro-agricoles. Rappelons que les courbes IDF (développées à partir des données couvrant la période de mai à octobre) sont mises à contribution dans la prédiction des crues estivales, en réponse à de fortes intensités de précipitations qui

dépassent la capacité d'infiltration des sols. Elles ne traduisent cependant pas l'influence de la fonte ou des pluies en période hivernale. Or environ la moitié des maxima annuels de débits de pointe journaliers observés en bassins versants ruraux surviennent en période hivernale ou printanière hâtive (figure 2), entre les mois de novembre à avril.

Alors que les crues estivales en réponse à de fortes intensités de précipitations se démarquent par des débits de pointe très élevés, les crues découlant de redoux hivernaux tendent à se prolonger dans le temps, cumulant d'importants volumes de ruissellement en réponse aux actions combinées, voire cycliques, de la saturation du sol, de précipitations liquides sur sol gelé, de rétention et de fonte du couvert neigeux. Compte tenu des importants volumes de ruissellement associés aux redoux hivernaux, les propriétés des conditions météorologiques à l'origine de ce type d'évènement constituent un important critère à intégrer dans la conception des ouvrages hydro-agricoles.

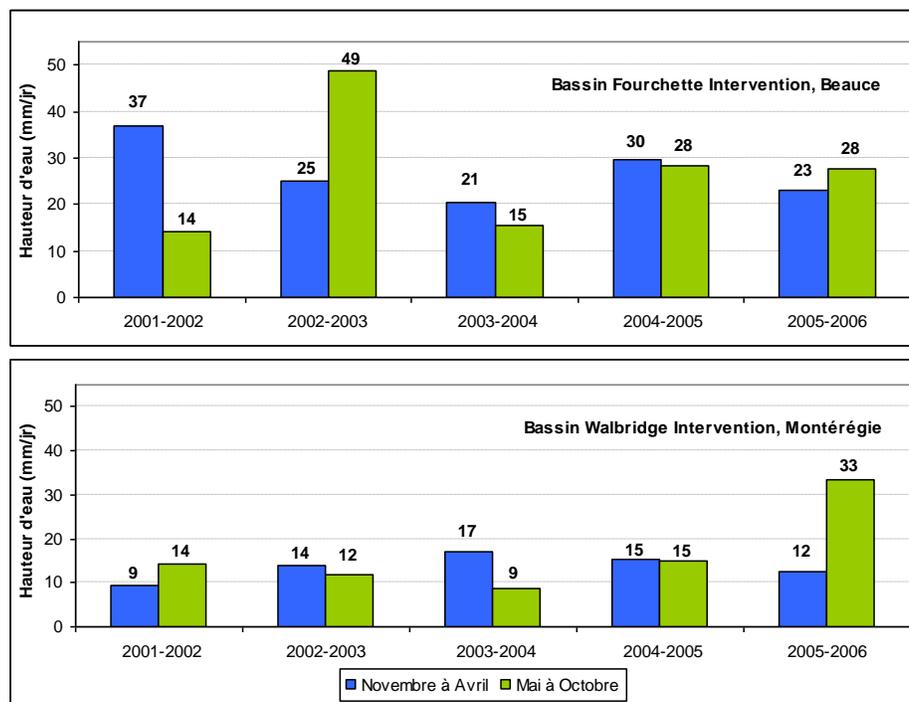


Figure 2. Maxima annuels de débits journaliers observés pour les périodes de novembre à avril et de mai à octobre aux exutoires des bassins versants expérimentaux du ruisseau Fourchette en Beauce et Walbridge en Montérégie (période 2002-2006)

La base de données hydro-pédologiques développée dans le cadre du projet permet pour sa part la prise en compte des propriétés du sol dans la conception des ouvrages hydrauliques. La classification des séries de sols minéraux du Québec en groupes hydrologiques permet une caractérisation générale de la susceptibilité des sols au ruissellement sur la base de leurs propriétés biophysiques intrinsèques. Le groupe hydrologique du sol est utilisé dans la prédiction des débits de pointe et le dimensionnement des ouvrages hydro-agricoles (Stampfli et al., 2007). Le concept de groupes hydrologiques des sols (GHS) a été développé aux États-Unis par le département de l'agriculture (USDA : United States Department of Agriculture) et appliqué à l'ensemble des séries de sols et des unités cartographiques des États-Unis. Les séries de sols du Québec requièrent une classification du groupe

hydrologique qui leur est propre. Le travail d'indexation des groupes hydrologiques a été complété dans le cadre de la présente pour l'ensemble des 650 séries de sols minéraux du Québec, résultant en une base de données fonctionnelle et disponible auprès des intervenants du milieu.

Enfin, le développement et la validation des méthodes d'estimation des critères hydrologiques propres au dimensionnement des ouvrages hydro-agricoles se sont appuyés sur la caractérisation des réponses hydrologiques de onze petits bassins versants en milieu rural québécois (3 à 30 km²). L'analyse de plus de 700 hydrogrammes individuels a été réalisée à l'aide du logiciel *VisuHydro*, spécialement développé à cette fin dans le cadre du projet. Le logiciel permet de modéliser les principales propriétés des hydrogrammes analysés, incluant leur forme, les temps de concentration, les hauteurs de ruissellement et les débits de pointe. Les résultats de ces analyses hydrologiques détaillées ont servi de balise de développement et de validation dans la conception de l'utilitaire de prédiction hydrologique. Les méthodes validées d'estimation des critères hydrologiques de conception des ouvrages hydrauliques s'ajoutent aux banques de données météorologiques (99 courbes IDF) et pédologiques (651 séries de sols) développées dans le cadre du projet pour offrir à la communauté d'agronomes et d'ingénieurs un coffre à outil pertinent au dimensionnement d'ouvrages hydro-agricoles.

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

3.1 La mise à jour des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF)

Les courbes de distribution Intensité-Durée-Fréquence (IDF) des précipitations décrivent les probabilités de l'occurrence de diverses intensités de pluie pour une durée et un lieu donnés. Ces estimations des récurrences des pluies d'intensité extrême s'avèrent un intrant essentiel à la conception des d'infrastructures urbaines, routières et agricoles.

Environnement Canada (EC, 2012) a produit un premier ensemble de courbes IDF au cours de la décennie 80 (Hogg et Carr, 1985). Une mise à jour de ces dernières a été effectuée en 1991 et une autre plus récemment (Jarrett, 2010). Les courbes ainsi produites ont été mises à la disposition des usagers par voie électronique¹. Cette mise à jour a permis d'intégrer les plus récentes données aux séries historiques et d'ainsi obtenir, en principe, de meilleurs estimateurs des intensités des maxima annuels (MA).

Les mises à jour successives effectuées par Environnement Canada utilisent une approche similaire à celle de Hogg et Carr (1985), basée sur l'utilisation de la distribution Gumbel pour décrire les séries de maxima annuels et la méthode des moments pour l'estimation des paramètres. D'autres approches ont été proposées depuis, qui permettraient de mieux tirer parti des informations contenues dans les séries des maxima annuels disponibles (CSA, 2010). Ainsi, plusieurs travaux ont montré que la distribution *Generalized extreme values* (GEV) pouvait mieux représenter les séries de précipitations à condition de disposer de séries suffisamment longues et a été mise à profit dans le cadre de la présente étude.

La théorie des valeurs extrêmes montre que la distribution des valeurs extrêmes peut être décrite, sous sa forme la plus générale, par la distribution *Generalized Extreme Values* (GEV) (Coles, 2001; Katz *et al.*, 2002). La fonction cumulative de la distribution GEV de paramètres $\{\xi, \alpha, \kappa\}$ s'écrit comme suit :

$$F(x) = \begin{cases} \exp \left\{ - \left[1 - \kappa \frac{(x - \xi)}{\alpha} \right]^{1/\kappa} \right\} & \text{si } \kappa \neq 0 \\ \exp \left\{ - \exp \left[- \frac{(x - \xi)}{\alpha} \right] \right\} & \text{si } \kappa = 0 \end{cases}$$

[1]

avec ξ le paramètre de position ($-\infty < \xi < +\infty$), α le paramètre d'échelle ($\alpha > 0$) et le paramètre de forme ($-\infty < \kappa < +\infty$). Le domaine de définition de la GEV est donné par $\xi + \alpha/\kappa \leq x < \infty$ pour $\kappa < 0$ (dans ce cas on parle de comportement *heavy tail*), $-\infty < x < \infty$ pour $\kappa = 0$ et $-\infty < x \leq \xi + \alpha/\kappa$ pour $\kappa > 0$. Le cas $\kappa = 0$ correspond à la distribution Gumbel. La densité de probabilité de la distribution GEV s'écrit :

¹ http://www.climate.weatheroffice.gc.ca/prods_servs/index_e.html?&&

$$f(x) = \begin{cases} \left(\frac{1}{\alpha} \right) \left[1 - k \frac{(x - \xi)}{\alpha} \right]^{(1/k-1)} \exp \left\{ - \left[1 - k \frac{(x - \xi)}{\alpha} \right]^{1/k} \right\} & \text{si } k \neq 0 \\ \exp \left[- \frac{(x - \xi)}{\alpha} \right] \exp \left\{ - \exp \left[- \frac{(x - \xi)}{\alpha} \right] \right\} & \text{si } k = 0 \end{cases}$$

[2]

L'analyse fréquentielle régionale (AFR) a aussi été mise à profit dans le cadre de la présente étude. L'approche consiste à regrouper les données de différentes stations afin d'augmenter la durée totale des séries disponibles (Kingumbi et Mailhot, 2010). Considérant que les séries de mesures sont souvent courtes et que les précipitations intenses sont, de par leur nature même, peu fréquentes, l'approche de l'AFR permet d'utiliser au mieux l'information disponible afin d'obtenir les estimateurs les plus fiables. Le regroupement des observations de différentes stations est possible si ces séries possèdent certaines caractéristiques statistiques communes. L'AFR propose une procédure qui permet de vérifier si les conditions d'homogénéité des séries sous étude sont respectées, d'identifier la distribution « régionale » et d'en estimer les paramètres (Hosking et Wallis, 1997). L'AFR comporte trois étapes principales (Alila, 1999) : (a) la vérification du caractère homogène des régions et éventuellement la subdivision de la région en sous-régions homogènes; (b) la sélection, pour chaque région, de la distribution de probabilité régionale parente (aussi appelée distribution régionale); et (c) l'estimation des paramètres et des quantiles correspondant à différentes périodes de retour. Pour obtenir davantage de détails sur les étapes de mise en place de l'AFR se référer à l'annexe D du rapport complet de Mailhot et Talbot (2011a) sur la mise à jour des estimateurs IDF du sud du Québec.

3.2 Les courbes IDF en climat futur

L'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère modifie l'équilibre énergétique de la Terre (Forster et *al.*, 2007), et par conséquent, son climat. Des tendances claires sur les températures de l'air (Trenberth et *al.*, 2007), de l'océan (Bindoff et *al.*, 2007), sur la taille des glaciers et les concentrations de glace de mer sont observées (Lemke et *al.*, 2007). À ce jour, les modèles numériques de climat constituent le meilleur outil dont nous disposons pour comprendre ces changements au climat et anticiper ce que le futur nous réserve. Le modèle climatique est un outil de représentation du climat englobant l'ensemble du système climatique terrestre soit l'atmosphère, l'hydrosphère, la cryosphère, la surface terrestre, la biosphère et toutes les interactions entre eux. L'utilisation du modèle climatique permet de réaliser des simulations climatiques couvrant un certain territoire, allant d'une couverture globale avec les Modèles de climat global (MCG) à une couverture plus restreinte avec les Modèles régionaux de climat (MRC). La résolution des MCG varie entre 100 et 500 km tandis que celle des MRC se situe autour de 50 km. Cette plus haute résolution des MRC permet de mieux représenter certains éléments physiques de plus petite échelle comme la topographie ou la présence de certains cours d'eau. Le MCG est tout de même utilisé pour simuler les données aux frontières du MRC. Le Modèle régional canadien du

climat (MRCC) est le modèle utilisé à Ouranos pour produire des simulations climatiques régionales (Caya et Laprise, 1999; Laprise, 2008), généralement à une résolution de 45 km (de Elia et al. 2010; Music et al. 2007).

Les modèles climatiques prédisent une intensification du cycle hydrologique global en réponse à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Au Québec, un réchauffement des températures est projeté, et ce davantage en saison hivernale qu'en saison estivale (Ouranos, 2010). Cela se traduirait, entre autre, par une hausse des précipitations, notamment des événements de précipitations extrêmes.

Le calcul des IDF en climat futur repose sur la simulation numérique du climat. L'étude des extrêmes pose des défis importants notamment compte tenu de la résolution spatiale du MRCC qui est de 45 km. Les orages intenses et très localisés qui génèrent les extrêmes de précipitations de courtes durées durant l'été sont donc difficiles à représenter par les modèles climatiques, d'autant plus que la résolution temporelle du modèle, 15 minutes, ne permet pas de résoudre adéquatement les événements très courts. Le modèle aura en contrepartie plus de facilité à reproduire les extrêmes sur 24 heures, habituellement générés par des systèmes météorologiques s'étendant sur plusieurs centaines de km.

3.3 Les redoux hivernaux

Dans plusieurs régions du Québec méridional, on a noté un réchauffement du climat entre 1960 et 2003, notamment pour les températures moyennes annuelles, avec un gradient décroissant d'ouest en est. L'hiver et l'été sont les saisons avec un réchauffement plus marqué. Si l'on se projette dans le futur, les différents scénarios de changements climatiques prévoient une augmentation pour le sud du Québec de 1 à 2,5°C en hiver à l'horizon 2050 (Lemmen et al., 2008; Ouranos, 2010). En lien avec ces augmentations de température hivernale, on prévoit également une tendance à la hausse des pluies hivernales (Brown et Chaumont, 2009). Il devient donc pertinent de mieux appréhender ce phénomène dans la prévision des débits de crue et le dimensionnement des ouvrages hydrauliques. La réponse hydrologique d'un bassin versant donné est cependant bien différente selon l'origine des précipitations (neige versus pluie) et l'influence d'un couvert de neige. En effet, le stockage et la fonte de la neige complexifie le processus, d'autant plus que ceux-ci sont variables dans le temps et l'espace (Nicolle, 2010). La réponse hydrologique d'un bassin versant est donc déphasée par rapport aux précipitations car celles-ci s'accumulent au sol avant d'être remobilisées en période de fonte (Valéry, 2010). Plusieurs études ont été réalisées afin de mieux comprendre les phénomènes hydrologiques complexes liés au cycle de fonte. La variabilité spatiale du manteau neigeux est un des facteurs qui contribue à la complexité de la prédiction des crues de fonte et de pluie hivernale. Celui-ci est en effet influencé par divers processus et caractéristiques du territoire, dont les conditions météorologiques, l'exposition, la végétation, la topographie et le vent. Ces facteurs influent également sur les mesures de la neige aux stations pluviométriques qui sont généralement sous-estimées. Au Québec, afin de mieux connaître notre couvert de neige, le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) a mis en place des stations nivométriques. Bien que les données sur la neige ne soient pas obtenues quotidiennement, puisqu'elles relèvent de protocoles de mesures manuels, elles permettent néanmoins de documenter l'évolution du couvert de neige et sa densité au fil de la saison.

Il existe aussi plusieurs modèles permettant de traiter l'évolution du manteau neigeux. Certains de ces modèles sont inclus dans des modèles hydrologiques plus ou moins complexes, qui permettent de prédire des débits en tenant compte de l'effet particulier de la neige. Les différents modèles hydrologiques intégrant la dynamique de la neige diffèrent les uns des autres par leur précision, leur complexité, la nature et le nombre de paramètres d'entrée qu'ils utilisent, leur territoire d'application ainsi que par leurs objectifs de développement. Citons quelques modèles de neige présentés dans la thèse de doctorat d'Audrey Valéry (2010), dont CEQUeau (Morin, 1997), HBV (Bergström, 1995; Lindström et al., 1997), MOHYSE (Fortin et Turcotte, 2006), MORDOR (Garçon, 1996; Paquet, 2004), NAM (DHI, 2009). Ces modèles gèrent de façon plus ou moins différente les processus d'états internes de la neige (la quantité de neige dans le stock, sa température, la surface enneigée du bassin, etc.), le type d'accumulation de la neige, le facteur de fonte, le mûrissement du stock de neige (rétention et regel de l'eau liquide), l'absorption de la pluie par le stock de neige, la fonte à la base du stock de neige, etc. (Valéry, 2010).

3.4 Procéder à l'adaptation et à la validation d'une méthode de prédiction hydrologique

Le développement et la validation de méthodes de prédiction hydrologique procèdent généralement de façon empirique et s'appuient d'abord sur l'analyse de séries de données de débits pour un ensemble de stations hydrométriques données. L'hydrogramme est la représentation graphique du débit instantané d'un cours d'eau en fonction du temps tel que mesuré à l'exutoire du bassin versant considéré. L'analyse (hydrologique) des hydrogrammes (débits) en fonction des précipitations (hyétogrammes) permet d'en décrire les principales caractéristiques, qui serviront de balises dans le développement et la validation des outils de prédiction des crues. L'analyse hydrologique des séries de données hydrométriques colligées aux exutoires de bassins versants instrumentés est donc à la base de la définition des critères de conception des ouvrages hydrauliques.

Les trois paramètres fondamentaux qui définissent entièrement l'hydrogramme (Bhunya et al., 2011) sont respectivement :

- t_p : **Temps de montée** : correspond à la durée de la partie montante (courbe de crue), ou temps que prend le débit depuis le début du ruissellement de surface pour devenir maximum
- t_b : **Temps de base** : correspond à la durée totale de la courbe de montée (t_p) et de la partie à décroissance rapide, dite courbe de décrue. Intervalle de temps que dure les contributions du ruissellement de surface et de l'écoulement hypodermique
- q_p : **Débit de pointe** : Débit maximal instantané d'un hydrogramme donné

La figure 3 illustre ces trois paramètres fondamentaux en lien avec les principales composantes de l'hydrogramme, incluant :

- **La courbe de concentration**, qui s'étend du point où débute le ruissellement jusqu'au débit maximum, correspondant au premier point d'inflexion de l'hydrogramme.

- **La courbe de décrue**, qui représente l'apport des zones d'emmagasinement suivant la fin de la pluie excédentaire. Cette partie de l'hydrogramme décrit la diminution naturelle du débit, produite par le drainage de surface.
- **La courbe de tarissement**, qui représente la décroissance plus lente. Le débit est alors associé au vidage des nappes d'eau souterraines. La phase de tarissement résulte d'une absence de précipitations, elle intervient après une phase de décrue. La décroissance du débit se fait de manière exponentielle, de plus en plus lentement.

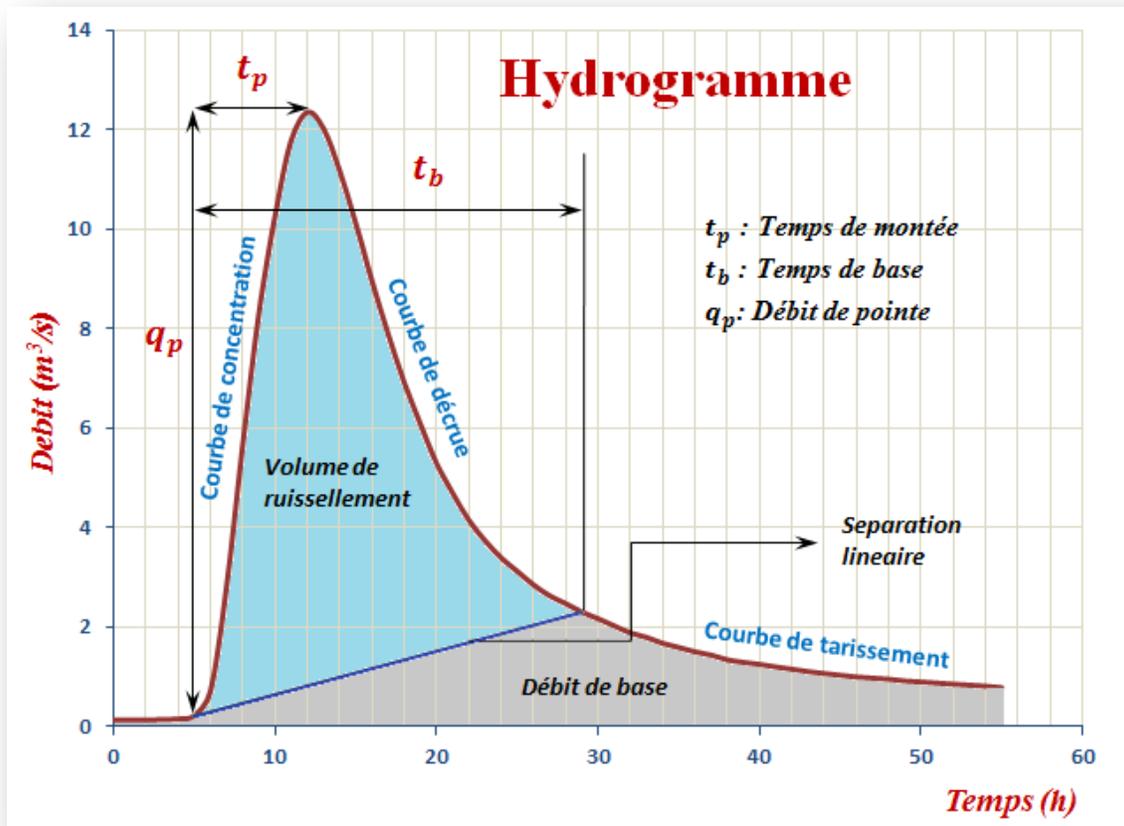


Figure 3. Exemple d'un hydrogramme de crue (tiré de Rocha, 2013).

L'hydrogramme de crue d'un cours d'eau, pour un événement donné, est le résultat de trois composantes principales qui sont : le ruissellement direct (fraction de la pluie nette qui s'écoule en surface), le ruissellement hypodermique ou retardé (portion des précipitations infiltrées dans le sol se rendant au cours d'eau mais n'atteignant pas la nappe), et l'écoulement souterrain (partie de l'écoulement total provenant des aquifères).

L'objectif de la séparation des écoulements est d'identifier les différentes composantes de l'écoulement total observé. Généralement, cela consiste en la séparation des écoulements souterrains aussi appelés écoulements de base (écoulements lents), observés de façon plus ou moins continue dans les cours d'eau, des écoulements directs de surface (écoulements rapides) observés irrégulièrement à l'occasion des précipitations. Conceptuellement,

l'hydrogramme de ruissellement est obtenu en soustrayant l'écoulement de base de l'hydrogramme global (figure 4). Il existe plusieurs méthodes de séparation des hydrogrammes. Le lecteur est invité à se référer au mémoire de Rocha (2013), pour davantage d'information à ce sujet. Le volume de ruissellement et le débit de crue représentent les éléments les plus importants pour le dimensionnement d'ouvrages (Lagacé, 2012).

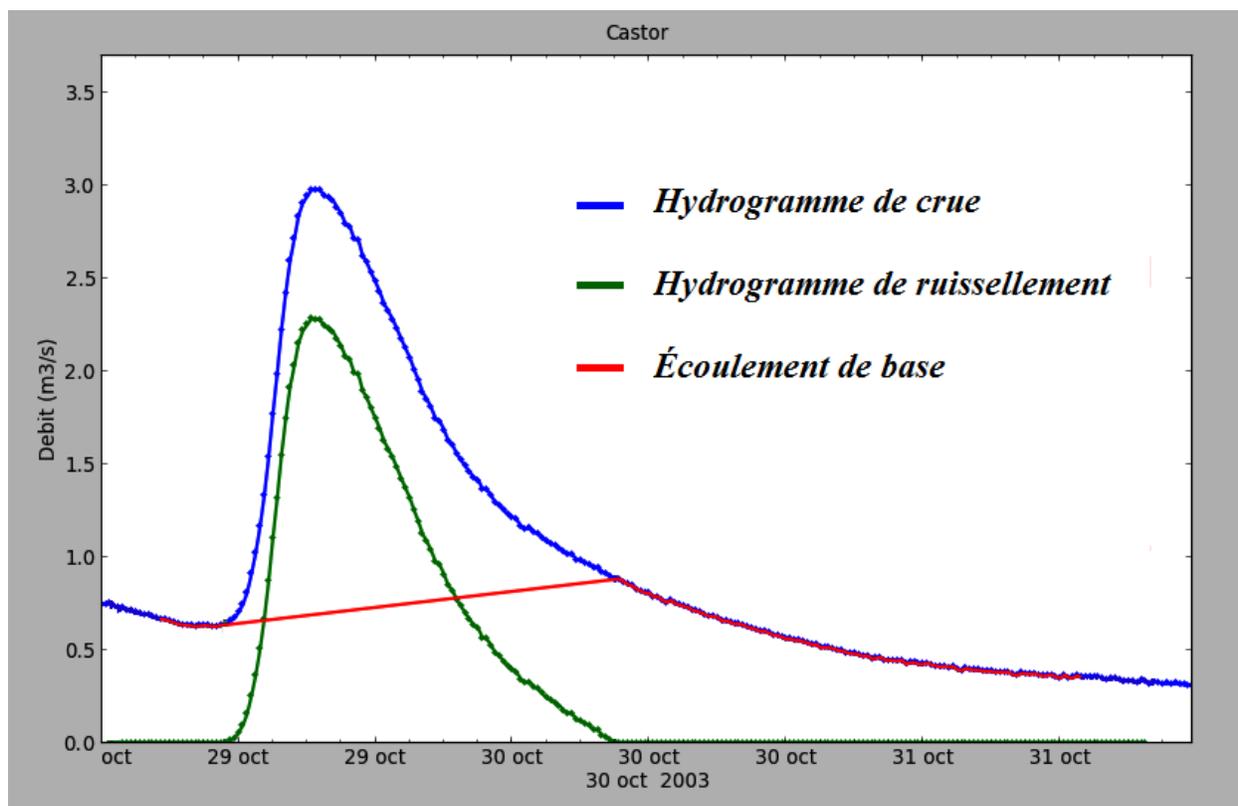


Figure 4. Séparation de l'hydrogramme de crue, selon une méthode linéaire telle que supportée dans le logiciel VisuHydro (Lagacé, 2012b).

Les hydrogrammes et leurs composantes peuvent être représentés et décrits notamment au moyen de l'hydrogramme unitaire. Ce modèle théorique suppose que le débit à tout moment est proportionnel au volume de ruissellement et que les facteurs de temps qui affecte la forme de l'hydrogramme sont constants. Les méthodes traditionnelles de représentation des hydrogrammes unitaires synthétiques (HUS) ont d'abord été basées sur des formules empiriques. Les méthodes traditionnelles les plus connues sont celles de Snyder et du SCS (hydrogramme unitaire triangulaire). Par la suite, des fonctions de distribution de probabilité (fdp) ont été développées. Celles-ci ont été développées en s'inspirant de la similitude entre la forme des distributions statistiques et celles des hydrogrammes observés. Les différentes fonctions de distribution utilisées pour la dérivation des HUS sont, entre autres, les fonctions Beta, Gamma, Weibull, Chi-Square, et Lognormal.

Les fonctions Gamma et Beta sont les plus utilisées pour représenter la forme des HUS (Koutsoyiannis et Xanthopoulos, 1989; Haktanir et Sezen, 1990; Bhunya et al., 2003, 2004;

Rai et *al.*, 2009). De plus, la flexibilité de la fdp permet de produire différentes formes d'hydrogrammes en changeant les valeurs de paramètres (Rai et *al.*, 2009; Pramanik et *al.*, 2010). La fonction de densité de probabilité Gamma à trois paramètres a été retenue dans le cadre méthodologique de la présente étude. Une description des autres fonctions est présentée dans le mémoire Rocha (2013).

La fonction Gamma est une distribution appropriée pour modéliser le comportement de variables aléatoires continues avec une asymétrie positive, c'est-à-dire des variables qui présentent une plus grande densité d'événements à gauche de la moyenne qu'à la droite de celle-ci. Dans son expression se trouvent trois paramètres, toujours positifs, (γ), (α) et (β) dont dépend sa forme et sa portée à la droite, et la fonction Gamma (α), responsable de la convergence de la distribution. En pratique, la fonction de distribution gamma a été communément employée pour dériver l'hydrogramme unitaire.

La fonction de densité de probabilité de la distribution gamma à trois paramètres est représentée par l'équation (3) pour $t > \gamma$, α et $\beta > 0$. (Basak et Balakrishnan, 2011).

fdp Gamma à trois paramétrés
$$f(t; \alpha, \beta, t_0) = \frac{(t-t_0)^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} e^{\left(\frac{-(t-t_0)}{\beta}\right)}$$
 [3]

Où,

- t : temps,
- α : paramètre de forme,
- β : paramètre d'échelle,
- t_0 : paramètre de position, moment au débute le ruissellement
- $\Gamma(\alpha)$: Fonction gamma complète.

Les fonctions de temps de montée et débit de pointe sont représentées par les équations (2) et (3) (Rai et *al.*, 2009).

Temps de montée
$$t_p = t_m - t_0$$
 [4]

Où,

- t_m : temps au débit de pointe,
- t_0 : paramètre de position, moment au débute le ruissellement

Débit de pointe
$$q_p = \frac{(\alpha - 1)^{\alpha-1} e^{(-\beta(\alpha-1))}}{\Gamma(\alpha) \beta^{2-\alpha}}$$
 [5]

Coefficient de forme
$$\phi_{(\alpha)} = \frac{(\alpha - 1)^\alpha e^{-(\alpha-1)}}{\Gamma(\alpha)}$$
 [6]

Où,

- t : temps
- α : paramètre de forme,
- β : paramètre d'échelle,
- t_0 : paramètre de position, moment au débute le ruissellement
- $\Gamma(\alpha)$: Fonction gamma complète

Comme q_p et t_p peuvent être mesurés par l'hydrogramme, α peut être déterminé par une méthode itérative après avoir déterminé $\phi_{(\alpha)}$. Cette dernière expression est identique à celle déterminé par (Bhunya et *al.*, 2003).

L'hydrogramme de ruissellement peut ainsi être représenté par la fonction de densité de probabilité Gamma à trois paramètres (Équation (3) et figure 5), où le paramètre de forme de la distribution (α), situe l'intensité maximale de probabilité. Les valeurs de (α) près de zéro correspondent alors à une représentation graphique très similaire à la distribution exponentielle. Pour les valeurs de (α) plus grandes, le centre de la distribution se déplace vers la droite, s'apparentant à la forme d'une distribution de Gauss avec asymétrie positive.

Le paramètre (β) appelé paramètre d'échelle, détermine la portée de cette asymétrie positive, déplaçant la densité de probabilité dans la queue de droite. Pour les valeurs élevées de (β), la distribution a une plus forte densité de probabilité à l'extrémité droite de la queue, allongeant ainsi beaucoup sa représentation et dispersant la probabilité tout au long de l'axe. Après avoir dispersé la probabilité, la hauteur maximale de densité de probabilité (q_n) est réduite; ainsi des valeurs plus petites de (β) conduisent à une figure plus symétrique et concentrée, avec un pic de densité de probabilité plus élevé.

Le paramètre de localisation (ou de position) (Y ou t_0) est un paramètre qui régit la position de la fonction de densité de probabilité. En d'autres termes, lorsque la densité est tracée, le paramètre de localisation détermine la position de l'origine : si (Y) est positif, alors l'origine est décalée à droite.

La fonction gamma à trois paramètres permet de ne pas centrer le débit de l'hydrogramme à $t = 0$, ce qui est utile avec les données de débits qui sont toujours bruitées. La figure 5 permet d'évaluer l'évolution de la distribution gamma lorsque les paramètres (α), (β) et (Y) varient : (A) montre comment se modifie la forme de l'hydrogramme lors de l'augmentation des valeurs du paramètre (α); (B) renseigne sur la variation de l'échelle de l'axe vertical à mesure que les valeurs du paramètre (β) augmentent; et (C) montre comment se déplace la position de l'origine (vers la droite) avec l'augmentation du paramètre (Y). (Chico, 2010).

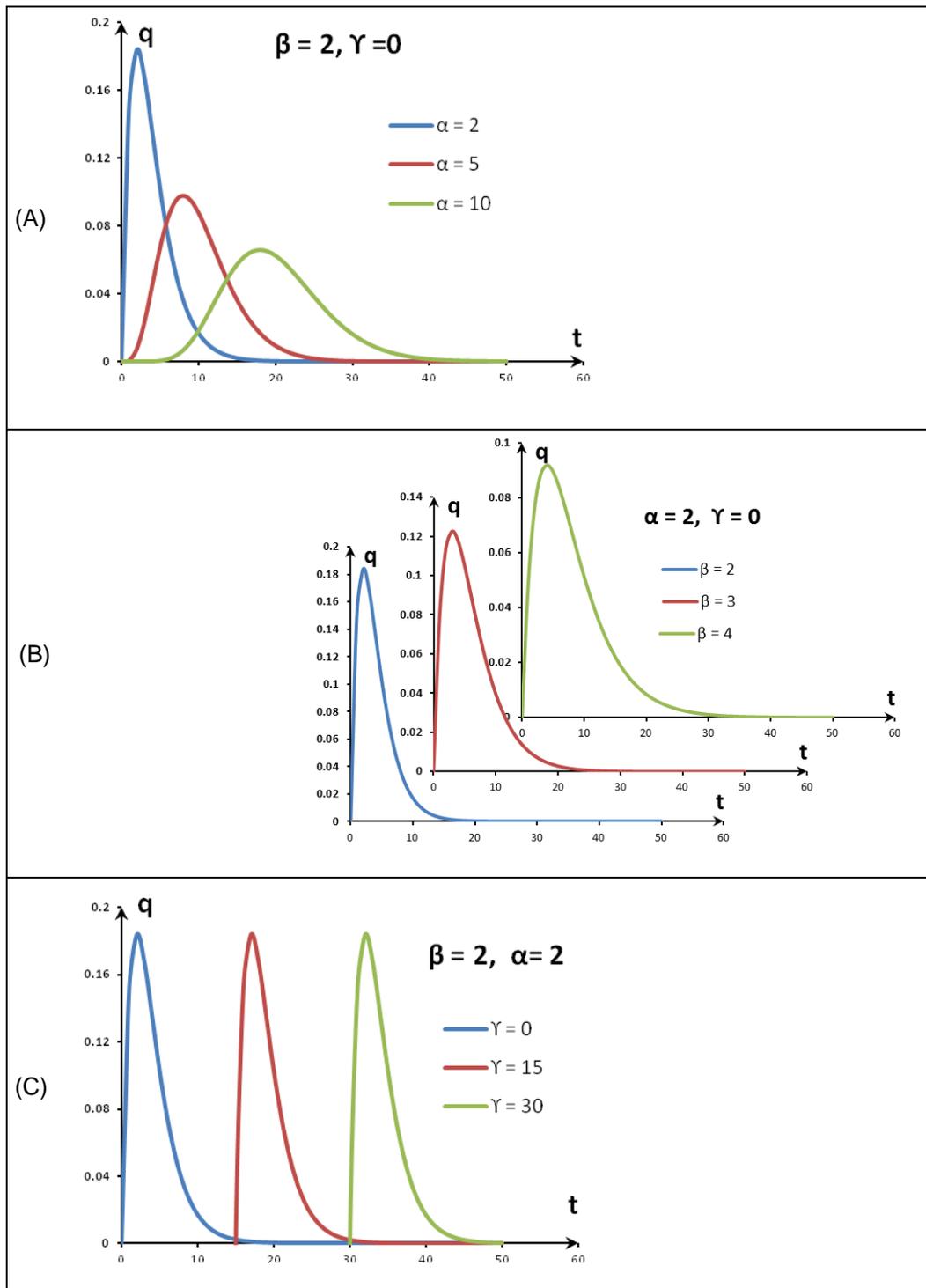


Figure 5. Évolution de la distribution gamma en fonction de la variation des paramètres (α), (β) et (γ) (Tiré de Rocha, 2013).

Il existe plusieurs méthodes d'estimation ponctuelle qui permettent d'estimer les valeurs de α , β et γ pour une distribution gamma, répondant à différentes théories d'inférence statistique, incluant la méthode des moments, la méthode des moments modifiée, la méthode de maximum de vraisemblance et la simple estimation efficace pour la distribution gamma développée par Balakrishnan et Wang (2000), que nous avons appelé q_{p,t_p} . Pour la description de ces méthodes, le lecteur est invité à se référer au mémoire Rocha (2013).

3.5 La classification hydrologique des séries de sols du Québec

En préalable au dimensionnement des infrastructures hydro-agricoles, les concepteurs doivent connaître la capacité des sols à infiltrer l'eau, soit la perméabilité en regard des liquides, afin notamment de déterminer l'indice de ruissellement (le CN, *runoff curve number*) à utiliser. Pour ce faire, le United States Department of Agriculture (USDA-NRCS, 2007) a développé le concept des groupes hydrologiques des sols (GHS) qui permet de classer les séries de sols minéraux en fonction de leur potentiel de ruissellement.

Le classement des sols naturels dans un groupe hydrologique regroupe les séries de sols ayant des potentiels similaires de ruissellement lorsqu'ils sont soumis à des climats semblables. Selon les règles de l'USDA-NRCS utilisées pour ce classement, l'attribution d'une série de sols à un groupe hydrologique donné est normalement basée sur des mesures d'infiltration et de transmission de l'eau réalisées sur le terrain, sous des conditions maximales d'humidité, sans tenir compte de la végétation et de la pente, lorsque le sol est non gelé et en condition d'expansion maximale pour certaines argiles.

Pour une utilisation dans le cadre d'un bassin versant, il est ainsi possible d'attribuer un groupe hydrologique aux unités cartographiques d'une carte pédologique². Dans les cas où plus d'une série de sols est indiquée dans une unité cartographique (unité cartographique composée), un groupe hydrologique pondéré en fonction du pourcentage de chacune des séries de sols (ou d'autres appellations cartographiques s'il y a lieu) peut être calculé.

Les tableaux 1 et 2 illustrent les critères qui sont utilisés pour la détermination des **groupes hydrologiques des sols**. Ils se définissent de manière détaillée comme suit (USDA-NRCS (2007) :

Groupe A : Les sols de ce groupe ont un faible potentiel de ruissellement quand ils sont complètement humides. L'eau circule librement à travers le sol. Typiquement, les sols du groupe A ont moins de 10 % d'argile et plus de 90 % de sable ou de fragments grossiers et ont des textures sableuse ou graveleuses. *Certains sols* avec des textures de sable loameux, loam sableux, loam ou loam limoneux peuvent être placés dans ce groupe s'ils sont bien structurés, avec une faible masse volumique apparente, ou s'ils contiennent plus de 35 % de fragments grossiers.

Les limites des caractéristiques physiques sont les suivantes :

² Voir <http://www.irda.gc.ca/fr/outils-et-services/informations-sur-les-sols/etudes-pedologiques/> pour les cartes pédologiques du Québec

1- Les sols ayant **une épaisseur de plus de 100 cm** avant une couche imperméable sont dans le groupe A si la conductivité hydraulique saturée de toutes les couches de sol à l'intérieur de ce 100 cm à partir de la surface **excède 3,6 cm/h**. Également, la profondeur de la nappe est à plus de 100 cm.

2- Les sols sont également classés dans le groupe A si la profondeur de toute **couche imperméable est supérieure à 50 cm mais inférieure à 100 cm** et que la conductivité hydraulique saturée de toutes les couches entre la surface et 100 cm **excède 14,4 cm/h**. Également, la profondeur de la nappe est supérieure à 60 cm.

Groupe B : Les sols de ce groupe ont un potentiel de ruissellement modérément faible quand ils sont complètement humides. La circulation de l'eau à travers le sol n'est pas entravée. Typiquement, les sols du groupe B ont entre 10 et 20 % d'argile et entre 50 et 90 % de sable et ont des textures de sable loameux ou de loam sableux. Certains *sols* avec des textures de loam, de loam limoneux, de limon ou de loam sablo-argileux peuvent être placés dans ce groupe s'ils sont bien structurés, avec une faible masse volumique apparente, ou s'ils contiennent plus de 35 % de fragments grossiers.

Les limites des caractéristiques physiques sont les suivantes :

1- Les sols ayant **une épaisseur de plus de 100 cm** avant une couche imperméable sont dans le groupe B si la conductivité hydraulique saturée de toutes les couches de sol à l'intérieur de ce 100 cm à partir de la surface **excède 1,44 cm/h mais est inférieure à 3.6 cm/h**. Également, la profondeur de la nappe est supérieure à 100 cm.

2- Les sols sont également classés dans le groupe B si, la profondeur de toute **couche imperméable est supérieure à 50 cm mais inférieure à 100 cm** et que la conductivité hydraulique saturée de la couche la moins perméable entre la surface et 100 cm de profondeur est comprise **entre 3,6 cm/h et 14,4 cm/h**. La profondeur de la nappe est supérieure à 60 cm.

Groupe C : Les sols de ce groupe ont un potentiel de ruissellement modérément élevé quand ils sont complètement humides. La circulation de l'eau à travers le sol est quelque peu restreinte. Typiquement, les sols du groupe C ont entre 20 et 40 % d'argile et moins de 50 % de sable et ont des textures de loam, de loam limoneux, de loam sablo-argileux, de loam argileux et de loam limono-argileux. Certains sols avec des textures d'argile, d'argile limoneuse et d'argile sableuse peuvent être placés dans ce groupe s'ils sont bien structurés, avec une faible masse volumique apparente, ou s'ils contiennent plus de 35 % de fragments grossiers.

Les limites des caractéristiques physiques sont les suivantes :

1- Les sols, ayant **une épaisseur de plus de 100 cm** avant une couche imperméable sont dans le groupe C si la conductivité hydraulique saturée de toutes les couches de sol à l'intérieur de ce 100 cm à partir de la surface **excède 0,144 cm/h mais est inférieure à 1,44 cm/h**. Également, la profondeur de la nappe est supérieure à 100 cm.

2- Les sols sont également classés dans le groupe C si la profondeur de toute **couche imperméable est supérieure à 50 cm mais inférieure à 100 cm** et que la conductivité hydraulique saturée de la couche la moins perméable entre la surface et 100 cm de profondeur est comprise **entre 0,36 cm/h et 3,6 cm/h**. La profondeur de la nappe est supérieure à 60 cm.

Groupe D : Les sols de ce groupe ont un potentiel de ruissellement élevé quand ils sont complètement humides. La circulation de l'eau à travers le sol est restreinte ou très restreinte. Typiquement, les sols du groupe D ont plus de 40 % d'argile, moins de 50 % de sable et ont des textures argileuses. Dans quelques régions, ils ont aussi un potentiel élevé de retrait-gonflement.

Les limites des caractéristiques physiques sont les suivantes :

1- Tous les sols avec une **couche imperméable située à moins de 50 cm de profondeur** et tous les sols avec **une nappe située à moins de 60 cm** de profondeur sont dans ce groupe, bien que certains puissent avoir une classification double (voir prochaine section) s'ils sont drainés adéquatement.

2- Les sols ayant **une épaisseur de plus de 100 cm** avant une couche restrictive sont dans le groupe D si la conductivité hydraulique saturée de toutes les couches de sol à l'intérieur de ce 100 cm à partir de la surface **est inférieure ou égale à 0,144 cm/h**. Également, la profondeur de la nappe est supérieure à 100 cm.

3- Les sols sont également classés dans le groupe D si la profondeur de toute **couche imperméable est supérieure à 50 cm mais inférieure à 100 cm** et que si la conductivité hydraulique saturée de la couche la moins perméable entre la surface et 100 cm de profondeur est **égale ou inférieure à 0,36 cm/h**.

Groupe hydrologique de sol double : Certains sols sont classés dans le groupe D uniquement à cause de la présence d'une nappe à l'intérieur des 60 premiers centimètres de la surface, même si la conductivité hydraulique saturée peut être favorable à la transmission de l'eau. Si ces sols peuvent être adéquatement drainés souterrainement, alors ils peuvent être assignés à un groupe hydrologique de sol double (A/D, B/D ou C/D) à partir de leur conductivité hydraulique saturée et la profondeur de la nappe une fois drainé. La première lettre s'applique au sol drainé tandis que la deuxième lettre s'applique au sol non drainé. Pour ces cas, un drainage adéquat signifie que la hauteur de la nappe saisonnière est maintenue à au moins 60 cm sous la surface du sol alors qu'elle peut être plus haute dans des conditions naturelles.

Tableau 1. Critères pour la désignation des groupes hydrologiques des sols quand une couche imperméable est présente entre 50 et 100 cm de profondeur ⁽¹⁾

4 Paramètres	5 Groupe A	6 Groupe B	7 Groupe C	8 Groupe D
9 Potentiel de ruissellement	10 Faible	11 Modérément faible	12 Modérément élevé	13 Élevé
Conductivité hydraulique saturée (cm/h)	14 > 14,4	15 > 3,6 à ≤ 14,4	16 > 0,35 à ≤ 3,6	17 ≤ 0,35

⁽¹⁾ USDA-NCRS 2007

Tableau 2. Critères pour la désignation des groupes hydrologiques des sols quand la couche imperméable est présente à plus de 100 cm de profondeur ⁽¹⁾

18 Paramètres	19 Groupe A	20 Groupe B	21 Groupe C	22 Groupe D
23 Potentiel de ruissellement	24 Faible	25 Modérément faible	26 Modérément élevé	27 Élevé
Conductivité hydraulique saturée (cm/h)	28 > 3,6	29 > 1,44 à ≤ 3,6	30 > 0,144 à ≤ 1,44	31 ≤ 0,144

⁽¹⁾ USDA-NCRS 2007

32 Méthodologie / données

Les méthodologies associées aux différents volets du projet sont présentées successivement en trois étapes. Les méthodes retenues dans l'estimation des courbes de distribution IDF des précipitations en climat récent et futur sont d'abord présentées, suivies des méthodes retenues dans le développement des indices de fonte et de pluie hivernale. La présentation des méthodes retenues au volet hydrologique du projet complète la section.

32.1 La mise à jour des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF)

32.1.1 *Données utilisées*

Les données répertoriées se présentent sous deux formes : 1) les séries des maxima journaliers (MJ), et 2) les séries des données horaires. Les premières correspondent aux maxima enregistrés à chaque jour pour les durées (5 min., 10 min., 15 min., 30 min., 1h., 2 h., 6 h., 12 h.). Les MJ sont obtenus à partir des données recueillies à l'aide d'un pluviomètre à auget dont les données sont recueillies à toutes les minutes.

Les données de 113 stations, 19 stations opérées par Environnement Canada (EC) et 94 stations opérées par le MDDEFP (2012), ont été utilisées (à noter que seules les stations avec 15 années ou plus de données ont été retenues). La figure 6 montre une carte localisant ces diverses stations situées dans le sud du Québec, c'est-à-dire sous le 49e parallèle (99 stations), alors que la figure 7 montre l'histogramme des durées des séries disponibles.

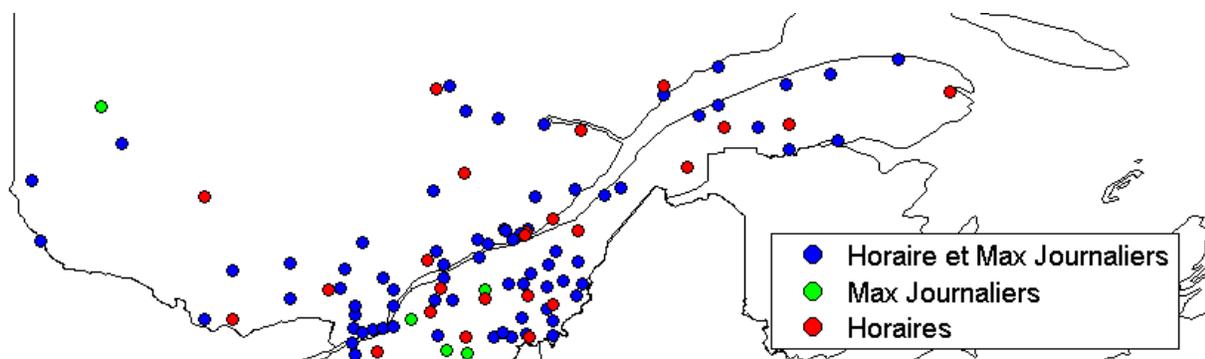


Figure 6. Localisation des stations météorologique situées dans la partie sud du Québec

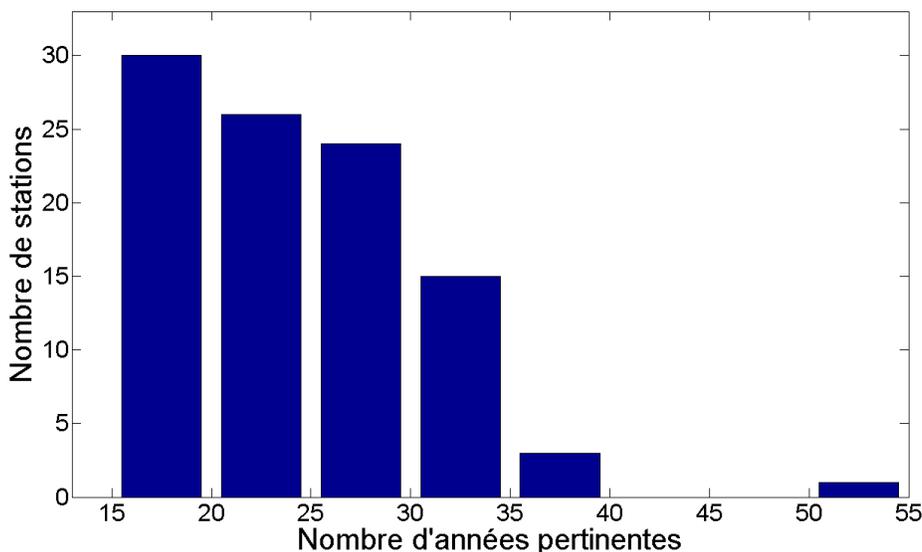


Figure 7. Nombre de stations (sud du 49^e parallèle) en fonction des durées des séries disponibles (les années classées manquantes ne sont pas considérées; seules les stations avec plus de 15 ans de données ont été retenues)

La période d'opération des stations avec pluviomètre à auget basculeur dépend essentiellement de la durée de la saison hivernale, les pluviomètres de ce type n'étant pas en opération durant l'hiver. Pour la plupart des stations, la période commune d'opération couvre la période allant de mai jusqu'à la fin octobre. Pour les stations plus au nord, la période d'opération est encore plus courte en raison de l'hiver plus long, faisant en sorte que ces stations sont en opération de juin à la fin septembre. Dans la présente étude, une période commune a été fixée pour l'extraction des maxima annuels (MA). Cette période s'étale du 1^{er} mai au 31 octobre, pour un total de 184 jours. Pour les stations situées au nord de la latitude 49° N, la période commune d'opération va du 1^{er} juin au 30 septembre, pour un total de 122 jours.

32.1.2 Séries des maximas annuels

La construction des séries des maxima annuels (MA) à partir des séries des maxima journaliers (MJ) et des séries horaires pose certains défis, lesquels sont présentés plus en détails dans le rapport intégral sur les courbes IDF (Mailhot et Talbot, 2011a et 2011b). En résumé, compte tenu des particularités des jeux de données, la stratégie finalement adoptée a été la suivante :

- Dans le cas des séries pour les durées inférieures à 1 heure, le MA est estimé en prenant le maximum des valeurs des MJ à chaque année;
- Dans le cas des durées de 1 heure à 12 heures, le MA issu de la série des valeurs horaires est estimé et comparé au MA estimé à partir des MJ. Ces deux valeurs sont ensuite comparées pour une année donnée et la plus grande valeur est retenue. Cette

procédure ne peut évidemment être appliquée qu'aux stations pour lesquelles nous disposons simultanément de séries horaires et de séries de maxima journaliers.

- Dans le cas de la durée 24 h, le MA est estimé à partir de la série horaire.

Le tableau 3 présente le nombre de séries considéré pour chaque durée selon le type de séries disponibles. De nouveau, pour obtenir davantage d'informations sur les séries considérées, se référer au rapport détaillé sur les courbes IDF (Mailhot et Talbot, 2011a).

Tableau 3. Nombre de stations/séries disponibles pour chaque durée pour les stations du sud-Québec

Durée	MJ	Horaires	Horaires/MJ	Total
5, 10, 15, 30 min, 1, 2 heures	5	0	70	75
6 heures	5	24	70	99
12 et 24 heures	0	24	70	94

32.1.3 Traitement des données manquantes

Certaines séries peuvent comporter de nombreuses données manquantes. Il est préférable d'ignorer une année qui présente trop de données manquantes plutôt que d'incorporer un résultat sous-estimé dans la série temporelle des MA. Dans le cadre de la présente étude, un seuil maximum de 17 % de données manquantes au cours de la période commune d'opération des stations a été toléré pour chaque année. Si plus de 17 % des valeurs sont manquantes, le MA correspondant est défini manquant. Pour les séries de MJ, cette règle signifie qu'il faut disposer d'au moins 153 jours de données valides sur les 184 jours de la période de mai à octobre. Dans le cas des séries horaires, cette même règle implique que (153 x 24) données horaires doivent être valides parmi les (184 x 24) données horaires de la période de mai à octobre.

32.2 Courbes IDF en climat futur

32.2.1 Région d'étude

Les Modèles de climat globaux (MCG) traduisent de manière numérique les composantes principales du climat à des résolutions spatiales variant de 100 à 500 km. À ces échelles, certains processus ne peuvent être représentés adéquatement, notamment les précipitations convectives (orages d'été) et la pluie orographique. Afin d'améliorer la description de ces processus, des Modèles régionaux de climat (MRC) dont la résolution spatiale est de l'ordre de 50 km ont été développés. Ces modèles concentrent leurs calculs sur une région plutôt que sur l'ensemble du globe et requièrent, en contrepartie, des conditions aux frontières fournies par les simulations d'un MCG. Le Modèle régional canadien du climat (MRCC) est le modèle utilisé par le consortium Ouranos pour produire des simulations climatiques régionales (Caya et Laprise, 1999; Laprise, 2008).

Dans cette étude, nous avons utilisé les données provenant de la version 4.2.3 du MRCC (de Elia et al. 2010; Music et al. 2007), produite à une résolution de 45 km et, bien que le domaine

du MRCC s'étend sur tout l'Amérique du Nord, l'analyse des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) se limite au territoire agricole du Québec. Ce territoire est divisé en quatre régions, illustrées à la figure 8 : la vallée du St-Laurent, l'Abitibi-Témiscamingue, le Saguenay-Lac St-Jean et la Gaspésie. Projetées sur la grille AMNO du MRCC, ces régions comptent respectivement 52, 15, 12 et 18 points de grille.

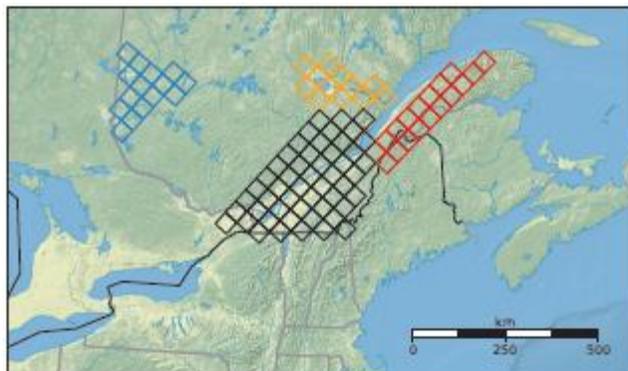


Figure 8. Carte des régions à l'étude, telles que vues par le MRCC sur la grille AMNO (45 km de résolution) : la vallée du St-Laurent (noir), l'Abitibi-Témiscamingue (bleu), le Saguenay – Lac St-Jean (orange) et la Gaspésie (rouge)

32.2.2 Sélection et validation des simulations

Dans le cadre de cette étude, cinq simulations pilotées par quatre MCG différents (tableau 4) sont analysées afin d'évaluer les changements dans les extrêmes annuels de précipitations.

Tableau 4. Détails des simulations régionales choisies

Pilote	Scénario d'émission de GES	Résolution	Alias MRCC		Domaine MRCC
			1971-2000	2041-2070	
ERA40C	-	2.5 x 2.5°	ago	-	AMNO
CGCM3 #4	A2	3.75 x 3.71°	aet	aeu	AMNO
CGCM3 #5	A2	3.75 x 3.71	aev	aew	AMNO
CNRM_CM3.3	A1B	2.81 x 2.79°	agw	ahb	AMNO
ECHAM5	A2	1.88 x 1.87°	agx	agz	AMNO
CCSM3	A2	1.41 x 1.4°	ahs	aht	NARCCAP

La réanalyse³ ERA40C (Uppala et al., 2005) et cinq simulations climatiques pilotées par le Modèle couplé climatique global du Canada (CGCM3) (McFarlane et al., 2005; Scinocca et al., 2008), le Modèle global couplé du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM CM3) (Déqué and Piedelievre, 1995), le Modèle global couplé du Max-Planck-Institut (ECHAM5) (Roeckner et al., 2004) et le Community Climate System Model (CCSM3) (Collins et al., 2006) ont été choisies dans la banque de simulations d'Ouranos et sont identifiées dans le tableau 4. Bien qu'Ouranos dispose de près d'une vingtaine de simulations différentes, ces cinq simulations sont choisies afin d'explorer la variabilité due au choix du MCG tout en

³ Une réanalyse est une sorte de modèle climatique qui incorpore les données d'observations afin de reproduire le plus fidèlement possible le climat observé.

limitant le nombre de simulations à traiter. Le pilote constitue, en règle générale, la principale source d'incertitude en modélisation régionale. Notons toutefois qu'il existe des exceptions telles que la précipitation convective estivale, dont les valeurs sont très influencées par le MRC (de Elía et *al.*, 2008). La taille restreinte de l'ensemble permet toutefois d'expérimenter avec des approches originales d'analyse d'incertitude exigeant un effort de calcul considérable.

Avant de procéder à l'interprétation des projections de précipitations en climat futur, les simulations en climat de référence⁴ sont comparées avec les observations aux stations climatiques. Les séries temporelles d'extrêmes aux stations ont été extraites des données d'Environnement Canada et du MDDEFP par l'équipe d'Alain Mailhot de l'Institut National de la Recherche Scientifique – Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE). La validation des simulations recourt également aux précipitations journalières sur grille du Service national d'information sur les terres et les eaux d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (SNITE). Ces précipitations sont interpolées des données de stations sur une grille de 10 km de résolution couvrant le Canada (Hutchinson et *al.*, 2009). Notez qu'en raison du peu de stations enregistrant les précipitations hivernales, les maxima annuels sont définis comme la valeur maximale de mai à octobre. Cette même période est utilisée pour la comparaison avec les simulations, alors que pour la comparaison présent/futur, les maxima annuels de janvier à décembre sont utilisés.

32.2.3 Analyse fréquentielle régionale

La première étape de l'analyse fréquentielle régionale est l'identification des valeurs extrêmes, dans ce cas les maxima annuels de précipitations. Pour les simulations du climat de référence, 40 années de données (1961–2000) sont disponibles (30 ans pour la simulation ahs : alias du MRCC pour la simulation avec le pilote CCSM3 en climat de référence), alors que les séries en climat futur comptent 30 valeurs (2041–2070). L'analyse statistique des extrêmes annuels se fait via la distribution des valeurs extrêmes, dénotée par Generalized Extreme Value (GEV) (voir l'appendice A.2 du rapport détaillé de Huard (2011) pour plus de détails). Les paramètres de la GEV (position, échelle, forme) sont estimés par la méthode des L-moments (Hosking et Wallis, 1997). Ces paramètres sont ensuite utilisés afin de calculer l'intensité de la pluie ayant lieu, en moyenne, toutes les T années. On se limitera toutefois pour cette analyse aux temps de retour de 2, 5, 10 et 25 ans.

Compte tenu de la petite taille des séries de maxima annuels, il est difficile d'estimer avec précision les paramètres de la GEV. Une solution populaire consiste donc à régionaliser les séries d'extrêmes annuels (Hosking and Wallis, 1993), c'est-à-dire de mettre en commun les séries d'une même région. En effet, si l'on peut supposer que les séries de précipitations d'une région proviennent toutes de la même distribution, on peut combiner l'information de ces séries afin de mieux estimer les paramètres de cette distribution sous-jacente. La procédure de régionalisation est expliquée plus en détails dans le rapport détaillé de Huard (2011).

⁴ Les simulations en climat de référence sont des simulations de modèles climatiques où les concentrations de gaz à effet de serre correspondent aux conditions au cours du 20^e siècle.

Les courbes IDF, quant à elles, résument le comportement des extrêmes pour plusieurs durées d'événements et différents temps de retour. On retrouve en abscisse la durée de l'événement, et en ordonnée l'intensité ou la hauteur de pluie. Les différentes courbes d'intensité correspondent à des périodes de retour de 2, 5, 10 et 25 ans. Il est à noter que dans un contexte de changement climatique, la définition même du temps de retour pose problème. En effet, le temps de retour est défini comme le temps moyen entre des événements excédant un seuil de précipitations. Or, si la distribution des extrêmes change dans le temps, le temps de retour pour un seuil de précipitations donné n'est plus constant, mais devient une fonction du temps. Compte tenu des courtes périodes considérées (30 ans) dans le cadre de ce projet, l'hypothèse d'un temps de retour constant est estimée raisonnable.

32.2.4 Estimation de l'incertitude

Plusieurs sources d'incertitudes peuvent être identifiées dans l'analyse des extrêmes simulés par un modèle climatique. Le pilote ainsi que le modèle régional sont deux sources d'incertitudes importantes. Le choix des algorithmes, des schémas numériques et des paramétrages font en sorte que différents modèles climatiques génèrent des climats différents. La variabilité naturelle du système climatique est également une source d'incertitude importante. Deux simulations du même modèle vont générer des climats qui, sur 30 ans, peuvent être sensiblement différents, d'où l'importance de générer et analyser des ensembles de plusieurs simulations. Pour ce qui est de l'analyse statistique des extrêmes, il est difficile d'estimer avec précision les trois paramètres de la GEV à partir d'une série de 30 valeurs. L'estimation des paramètres de la GEV est donc une source d'incertitude à ne pas négliger.

Afin de quantifier les incertitudes associées aux extrêmes de précipitations, deux approches sont employées. La première consiste à calculer la distribution empirique des quantiles pour tous les points de grille. Cette distribution illustre la variabilité spatiale à l'intérieur de la région. La deuxième méthode utilise l'analyse bayésienne pour estimer la densité de probabilité des intensités de pluie correspondant à différents temps de retour (Huard et *al.*, 2010). Au lieu d'estimer les paramètres optimaux de la GEV puis de calculer l'intensité à partir de ces paramètres, on calcule la probabilité de chaque combinaison de paramètres et l'on pèse l'intensité de pluie associée à ces paramètres pour un temps de retour donné. En intégrant sur tout l'espace des paramètres, on obtient une distribution des intensités de pluie. La dispersion de cette distribution quantifie l'incertitude associée à l'estimation des paramètres de la GEV en plus de la variabilité spatiale.

Afin de fournir des résultats clairs et facilement utilisables, il est important de synthétiser les résultats provenant des différentes simulations. Pour ce faire, l'approche utilisée ici est une moyenne pondérée «par pilote», c'est-à-dire que les résultats des simulations pilotées par CNRM CM3, ECHAM5 et CCSM3 ont des poids respectifs de 1/4, alors que les deux simulations CGCM3 ont des poids de 1/8. Cela permet de réduire l'influence du CGCM3 sur les résultats finaux. Cette approche se justifie du fait qu'à l'horizon 2050, le pilote constitue, *a priori*, la source principale d'incertitude (Solomon et *al.*, 2007).

32.3 Les indices de fonte et de pluie hivernale

Rappelons que la démarche de ce volet d'étude répondait aux trois objectifs suivants :

- 1- Proposer et valider des indices de redoux hivernaux (fonte et pluie hivernale) pertinents à la démarche de dimensionnement d'ouvrages hydrauliques en milieu rural;
- 2- Caractériser la période actuelle en fonction des indices de fonte et pluie hivernale par l'analyse des séries historiques de stations météorologiques québécoises;
- 3- Évaluer la performance du MRCC dans la simulation des indices de fonte et pluie hivernale et le développement des scénarios de changement climatique projeté à l'horizon 2050 de ces indicateurs.

Répondant au premier objectif, le développement et la validation d'indices de fonte et pluie hivernale s'est d'abord appuyé sur la mise en relation de jeux de données météorologiques et hydrométriques disponibles pour un ensemble de six petits bassins versants à vocation agricole instrumentés et opérés par l'IRDA. Une première étape exploratoire a permis d'évaluer la sensibilité des crues hivernales et printanières aux conditions météorologiques au moyen d'analyses de régression multiple, expliquant les hauteurs d'eau sur la base des observations météorologiques journalières. Cette première étude a mis en relief que la fonte de neige présentait le meilleur pouvoir explicatif des apex de crue hivernale observés aux exutoires des bassins à l'étude.

En seconde étape, la composante de fonte de neige du modèle hydrologique CEQUeau (Morin, 1997) a été adaptée afin de simuler l'évolution du couvert neigeux et la génération d'apports verticaux (cumul de la fonte et des précipitations disponible à l'exportation) sur l'ensemble des bassins versants de la Montérégie et de la Beauce à l'étude. L'évaluation du pouvoir des apports verticaux à expliquer l'intensité des crues hivernales et printanières des bassins à l'étude a par la suite été supportée par une approche de modélisation hydrologique simplifiée, mettant à profit le modèle hydrologique simplifié à l'extrême MOHYSE (Fortin et Turcotte, 2006),.

Suivant la validation du modèle CEQUeau-modIRDA à exprimer les apports verticaux des bassins à l'étude, le modèle a été mis à contribution dans l'estimation des indices de pluie et fonte hivernale sur un grand nombre de stations météorologiques québécoises.

Des travaux ont également été entrepris afin d'évaluer la performance du MRCC dans la simulation des indices de fonte et pluie hivernale. Cette évaluation préliminaire des impacts des changements climatiques sur les extrêmes des apports verticaux s'est apparentée à la démarche d'analyse des extrêmes de précipitations en climat futur réalisée dans le cadre de ce projet. L'approche retenue s'est d'abord appuyée sur un post-traitement des séries de données de précipitations et de température du MRCC selon les méthodes des deltas et de correction des biais. Les séries de données ont enfin été fournies au modèle CEQUEAU-modIRDA, afin de générer les apports verticaux pour les différentes régions agricoles à l'étude en climat récent et futur. Au terme du projet, il a cependant été établi qu'une erreur de programmation était à l'origine de certaines aberrations dans la séparation des précipitations liquides et solides des séries journalières utilisées en intrants initial à l'étude, invalidant ainsi les résultats de l'ensemble des démarches subséquentes de génération et d'analyse des

apports verticaux en climat récent et futur. Les résultats du volet d'étude sur les redoux en climat futur ont donc été exclus du présent rapport final de projet. La méthodologie utilisée est cependant présentée de façon détaillée en annexe 9.1 au présent rapport. Puisque la méthode a cependant été éprouvée, il est proposé de reconduire l'exercice dans le cadre d'une prochaine étude. Le développement et la validation d'une méthode de prédiction hydrologique intégrant les apports verticaux en période de fonte et de pluie hivernale demeure cependant un préalable à une éventuelle diffusion d'indices de fonte et pluie hivernale en climat récent et futur. Bien que cette tâche n'ait pu être réalisée dans le cadre du projet, elle demeure en tête de liste des propositions de développements futurs.

32.3.1 Identification des indices de pluie et fonte hivernale

Les données hydrométriques de six bassins versants situés en milieu agricole (Michaud et al. 2009a; Michaud et al. 2009b) ont été mis à profit dans le cadre de la présente étude. Ces bassins versants sont localisés dans deux régions agroclimatiques distinctes, soit en Beauce et en Montérégie. Le tableau 5 dresse le portrait des bassins versants à l'étude, notamment leur localisation générale, leur superficie, de même que les périodes de suivi hydrométrique utilisées.

Tableau 5. Description des bassins versants utilisés dans l'identification de l'indice de fonte et pluie hivernale

Bassin	Localisation	Superficie (km ²)	Années de suivi hydrométrique
Fourchette amont	Beauce (Bassin versant de la rivière Le Bras)	2,5	2002 à 2009
Fourchette aval	Beauce (Bassin versant de la rivière Le Bras)	1,9	2001 à 2009
Castor	Montérégie (Baie Missisquoi)	11,4	2001 à 2008
Ewing	Montérégie (Baie Missisquoi)	27,9	2001 à 2008
Walbridge amont	Montérégie (Baie Missisquoi)	6,3	2001 à 2006
Walbridge aval	Montérégie (Baie Missisquoi)	8	2001 à 2006

Une banque de données hydrométéorologiques a d'abord été créée pour l'ensemble des six bassins versants expérimentaux rassemblant les observations hydrométriques (intervalle de 15 minutes et cumul journalier) de même que les observations météorologiques journalières correspondantes. L'analyse de régression multivariée utilisant des variables explicatives telles que la présence ou l'absence de couvert de neige, la différence de hauteur du couvert de neige entre deux journées, les précipitations liquides et solides, les températures minimales, moyennes et maximales, etc. ont démontré que seule la fonte de neige, estimée à partir des hauteurs de neige observées aux stations météorologiques, détenait un pouvoir explicatif significatif, bien que limité, des apex de crue journalière dans tous les bassins versants expérimentaux. Le cumul hebdomadaire des précipitations liquides a aussi contribué de façon significative, dans certains bassins, à expliquer les crues, mais avec un pouvoir explicatif nettement inférieur à celui de la fonte. Les autres variables explicatives générées à partir des observations de température ou de précipitations n'ont démontré qu'un pouvoir explicatif marginal, voire nul, quelle que soit la période de référence. Le tableau 6 résume les résultats de l'analyse de covariance des crues en fonction des paramètres de température, de précipitations et de fonte de neige utilisés dans les modèles de régression linéaire multiple.

Tableau 6. Sommaire des résultats des modèles de régression linéaire expliquant les apex de crue observée aux exutoires des six bassins versants expérimentaux au moyen des cumuls hebdomadaires de la fonte et des précipitations liquides.

Bassin à l'étude	N	Variables explicatives ¹	Valeur F	Pr > F	R ²
Cinq bassins	107	Fonte, Pluie	10.67	<0.0001	0.17
Région - Montérégie	53	Fonte	7.24	0.0096	0.12
Ewing	15	Fonte	2.61	0.1300	0.17
Walbridge	19	Fonte			
Castor	19	Fonte, Pluie	3.66	0.0726	0.18
Région - Beauce	54	Fonte, Pluie	6.53	0.003	0.20
Fourchette amont	23	Fonte, Pluie	4.12	0.0316	0.29
Fourchette aval	31	Fonte, Pluie	3.30	0.0518	0.19

¹ Cumul hebdomadaire de la fonte ou de la pluie

Deux constats découlaient de cette étude exploratoire. D'une part, les processus hydrologiques sous influence hivernale sont complexes et la seule contribution des observations de précipitations et de température journalières n'arrive pas à les expliquer. D'autre part, les processus de fonte, qui découlent d'interactions multiples et cycliques entre les facteurs de température, de précipitations et de couvert de neige, offrent le meilleur pouvoir explicatif des crues hivernales et printanières. L'utilisation d'observations d'hauteurs de neige colligées en station météorologique, telles qu'utilisées dans la présente étude exploratoire, se bute cependant à de nombreux désavantages notamment au plan de l'incertitude et de la variabilité de la donnée. Aussi, a-t-il été convenu au sein du groupe de travail de procéder au développement d'un indice de fonte et pluie hivernale, applicable à l'ensemble des régions agricoles québécoises ciblé sur la détermination des apports verticaux (précipitation liquide et fonte de neige) sur la base des seules observations journalières de température et de précipitations.

Plusieurs modèles de fonte de neige ont été étudiés afin d'adapter un modèle répondant aux particularités du projet quant aux types de données disponibles (données météorologiques journalières simples seulement) (Le Bourgeois, 2010). Ainsi, les modèles de fonte de neige plus complexes intégrant des paramètres reliés aux radiations ondes courtes et longues, aux vents, à l'humidité de l'air, etc. ont été éliminés dès le départ. Pour la facilité d'adaptation de son code et son applicabilité aux conditions climatiques et météorologiques du Québec, le modèle CEQUeau développé par Guy Morin de l'INRS a été sélectionné (Morin, 1997). Toutefois seule la section sur la fonte de neige de ce modèle hydrologique a été adaptée et programmée dans le logiciel MatLab.

CEQUeau (Morin, 1997) est un modèle hydrologique déterministe, où le module de fonte de neige s'appuie sur une approche de calcul des degrés-jour et intègre la notion de maturité de la neige de même que l'effet de la pluie sur le couvert neigeux. Les publications de Morin (1997) et Morin et Paquet (2007) offrent des explications détaillées sur le code original.

Le module de fonte du modèle CEQUeau utilise des données d'entrée simple, telles que le jour, le mois et l'année des différents débits de crue retenus (afin d'identifier des événements précis); les débits journaliers de crue (mm/jr); les températures moyennes journalières (°C); les chutes de pluie journalières (mm); les chutes de neige journalières (cm); et les hauteurs

de neige mesurées au sol (cm). Le modèle de fonte utilisé intègre néanmoins la simulation de processus physiques complexes influençant la fonte de neige, tel que l'effet des radiations solaires potentielles reçues par le couvert de neige, l'accumulation de la neige lors de précipitations solides, l'absorption de l'eau de pluie par le couvert neigeux, le mûrissement et la température du couvert de neige et la fonte de ce couvert lorsque la température le permet (fonte potentielle versus réelle). Les étapes de calcul sont présentées dans le rapport complet sur les indices de pluie et fonte hivernales (Drouin et *al.*, 2013).

Le modèle de fonte de neige codé dans le logiciel MatLab (CEQUeau-modIRDA) diffère du code original CEQUeau en quelques points :

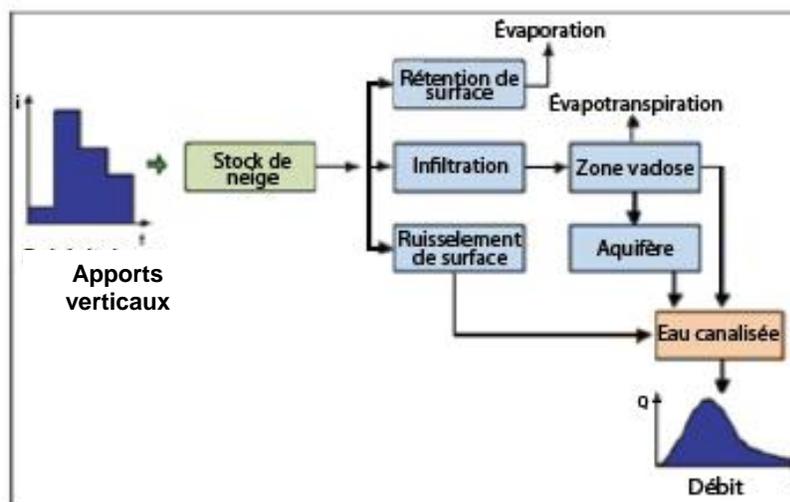
- Le modèle modifié n'intègre pas les caractéristiques physiographiques des bassins versants tels que la superficie, l'élévation, le pourcentage de forêt, le pourcentage de lacs et rivières, le pourcentage de marais, lesquels sont considérés dans modèle CEQUeau original. Rappelons que le modèle CEQUeau original propose des équations différentes en fonction de la localisation en forêt ou en clairière des secteurs à l'étude. Puisque le présent volet du projet cible le développement d'indicateurs climatiques, indépendants de l'influence des propriétés physiques et de l'utilisation du territoire, et que l'étude a trait à des bassins versants à vocation agricole, seules les équations pour les clairières ont été utilisées. Retenons cependant que le modèle de fonte de neige CEQUeau-modIRDA tient compte de la latitude moyenne du bassin versant à l'étude. La superficie du bassin et son temps de montée, à l'instar de sa latitude, ont subséquemment été pris en considération à l'étape de la validation du pouvoir explicatif des indices.
- Dans le cadre de l'étude ici présentée, la simulation des apports verticaux à été réalisée au seul pas de temps journalier, compte tenu de la disponibilité limitée de données météorologiques intra-journalières en période hivernale pour les stations météorologiques québécoises. Le modèle de fonte CEQUeau-modIRDA tient cependant compte de la phase (liquide ou solide) des précipitations utilisées en intrants aux équations.
- Les équations de calcul de la fonte réelle ont été modifiées dans le code CEQUeau-modIRDA suite à une revue de littérature sur les modèles de fonte de neige. Rappelons que dans le code CEQUeau original, la fonte est calculée à taux potentiel si l'index de mûrissement a atteint le seuil désiré. S'inspirant des observations de Valéry (2010), la fonte a plutôt été calculée au taux réel (diminution de la fonte potentielle) dans le modèle modifié. En contrepartie, si le seuil de mûrissement de la neige n'est pas atteint, la fonte est nulle dans le modèle CEQUeau-modIRDA. Au contraire, dans CEQUeau original, la fonte est calculée à taux réel (diminution de la fonte potentielle) si le seuil de mûrissement n'est pas atteint.

Les résultats du modèle de fonte de neige sont contenus dans trois fichiers différents, soit un fichier principal et deux fichiers secondaires. Le fichier principal contient l'ensemble des variables explicatives, telles que la pluie et la température, ainsi que les prédictions du modèle, telles que la fonte de la neige et les apports verticaux. Celles-ci sont utilisées en intrants dans les analyses statistiques ultérieures destinées à valider le pouvoir explicatif des indices en fonction des débits observés dans les bassins versants à l'étude. Les deux autres fichiers de sortie servent principalement à la validation du modèle de fonte. Le premier fichier

de validation comprend les valeurs de neige simulée et de neige mesurée. Ces données supporte la validation de la capacité du modèle à bien représenter le couvert de neige au moyen des précipitations solides et liquides et de la fonte de neige. Le second fichier de validation inclut les données de débit, de fonte, d'apports verticaux, de neige simulée et de hauteur journalière maximale du couvert de neige avant la fonte. Ce dernier fichier sert à valider la cohérence de l'ensemble des données de sortie, notamment afin qu'il n'y ait pas davantage de neige qui fonde, que de neige au sol.

Une approche de modélisation hydrologique simplifiée a été retenue dans la validation du pouvoir des indices de fonte et pluie hivernale à expliquer les crues en période hivernale et printanière aux exutoires de bassins versants à l'étude. Cette avenue s'est imposée dans la mesure où il est difficile de lier les apports verticaux aux débits des cours d'eau, sans considérer les propriétés physiographiques des bassins à l'étude. Un grand nombre de facteurs, autres que climatiques, entrent en jeu dans la réponse hydrologique des bassins versants. Musy et Higgy (2004) mentionnent que les caractéristiques physiographiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage. Les principaux facteurs qui influencent la réponse hydrologique des bassins versants sont d'une part les caractéristiques morphométriques telles que la superficie du bassin, sa forme, son élévation, sa pente et son orientation; les caractéristiques liées au réseau hydrographique; de même que les propriétés du sol et son occupation. Ainsi, de manière à considérer davantage de facteurs influençant la réponse hydrologique des bassins versants à l'étude, tout en minimisant le temps accordé au calage d'un modèle hydrologique complexe, l'utilisation du modèle MOHYSE (Fortin et Turcotte, 2006) a été mise de l'avant dans le processus de validation des indices de fonte et de pluie hivernale. En clair, le recours à MOHYSE a permis de comparer des débits observés avec les débits simulés plutôt que les débits observés par rapports aux apports verticaux simulés.

MOHYSE est l'acronyme de MOdèle HYdrologique Simplifié à l'Extrême, lequel a été développé dans le cadre d'un cours gradué à l'Université du Québec à Montréal. Il a ensuite été adapté pour répondre aux besoins opérationnels du Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ) (Fortier-Filion, 2011). MOHYSE est un modèle hydrologique simple, mais qui prend tout de même en compte plusieurs paramètres importants liés à la modélisation de bassins versants nordiques. Les paramètres utilisés dans le modèle MOHYSE sont le taux de fonte, la température seuil pour la fonte, le coefficient d'ajustement de l'évaporation potentielle, le coefficient d'ajustement de la transpiration, le niveau maximum de la zone vadose, le coefficient de vidange de la zone vadose vers l'aquifère, le coefficient de vidange de la zone vadose vers le cours d'eau, le coefficient de vidange de l'aquifère vers le cours d'eau, le paramètre de forme de l'hydrogramme unitaire, et le paramètre d'échelle de l'hydrogramme unitaire. La figure 9 présente le schéma de fonctionnement de MOHYSE. Pour obtenir davantage de détails sur le modèle MOHYSE de même que sur la procédure de calage, le lecteur est invité à se référer au mémoire de Fortier-Filion (2011).



Adapté de Fortier-Filion (2011).

Figure 9. Schéma du fonctionnement de MOHYSE

Les apports verticaux estimés par le module de fonte de neige CEQUeau-modIRDA ont été utilisés en intrants au modèle MOHYSE. L'exécutable de MOHYSE transmis par le CEHQ peut en effet fonctionner à partir de données de précipitations (pluie et neige) ou d'apports verticaux. Le recours à MOHYSE a permis de caler le modèle pour chaque bassin versant jaugé à l'étude sur la base de séries chronologiques d'apports verticaux et de température moyenne journalière, de même que de quelques informations sur les caractéristiques des bassins à l'étude, incluant la superficie, la latitude et le temps de montée. Les simulations de débits générées par MOHYSE, sur la base des apports verticaux modélisés par CEQUeau-modIRDA, ont enfin été comparées aux débits observés pour l'ensemble des bassins versants et des périodes à l'étude. Afin d'évaluer l'ajustement des prédictions aux observations, quatre indices statistiques ont été utilisés, soit les coefficients de corrélation de Pearson (r), de détermination (R^2), de Nash-Sutcliffe (NS) (ASCE, 1993) ainsi que le pourcentage de déviation des valeurs prédites par rapport aux valeurs mesurées (D_v). Beaudin et al. (2006) résume les implications de chacun de ces indices en modélisation hydrologique. Les coefficients de corrélation et de détermination représentent la force et la direction de la relation linéaire entre les valeurs observées et les valeurs simulées, dans ce cas-ci entre les débits mesurés aux stations hydrométriques et les débits simulés par le modèle MOHYSE. Un r ou R^2 de valeur « 0 » représente une corrélation nulle, alors qu'un r ou R^2 de 1 équivaut à une corrélation parfaite. Ainsi, si les débits mesurés et simulés ne sont pas similaires mais qu'ils suivent une tendance parallèle (montée et descente en cadence), la corrélation peut tout de même être élevée. Le coefficient de Nash-Sutcliffe indique l'efficacité prédictive du modèle et est communément utilisé en hydrologie. Ce coefficient est fort sensible aux événements de pointe. Si le modèle a de la difficulté à modéliser les événements extrêmes, il devient difficile d'obtenir des NS élevés. Les valeurs de NS varient entre l'infini négatif et la valeur de « 1 ». : Cette dernière indique un ajustement parfait, alors que la valeur de « 0 » que la prédiction du modèle n'est pas mieux que lors de l'utilisation de la moyenne des données observées (Beaudin et al., 2006). Enfin, le D_v démontre la capacité du modèle hydrologique à reproduire les volumes d'eau transigeant par le réseau hydrographique pour une période donnée. Le D_v permet de comparer les volumes d'eau simulés par le modèle par rapport aux volumes d'eau mesurés à la station hydrométrique.

Dans le cas présent, le D_v a été calculé sur l'ensemble de la période d'étude pour chacun des bassins versants, mais il est également possible de le calculer pour une année seulement. Concrètement, lors de la modélisation hydrologique un D_v inférieur à 10 % est ciblé.

32.3.2 *La caractérisation de la période actuelle en fonction des indices de fonte et de pluie hivernale*

Dans une perspective opérationnelle, la prise en compte des événements de fonte et de pluie hivernale dans le dimensionnement des ouvrages hydro-agricoles requiert une estimation de la distribution des hauteurs, des durées et des fréquences des apports verticaux associés à ces événements. Dans un premier temps, les valeurs historiques des estimateurs HDF (hauteur-durée-fréquence) des apports verticaux pour le sud du Québec ont été évaluées à l'aide du modèle de fonte CEQUeau-modIRDA. Suivant ces estimations en climat récent, les simulations de température et de précipitations en climat futur du modèle climatique MRCC ont été utilisées en intrants au modèle CEQUeau-modIRDA afin d'évaluer l'impact des changements climatiques sur ces estimateurs HDF.

Les observations quotidiennes de pluie, de neige, de même que les températures minimales et maximales pour 100 stations du sud du Québec ont été fournies par le MDDEFP. Ces stations ont été retenues en vertu de la qualité de leurs données (nombre d'années, données manquantes, etc.) parmi environ 500 stations québécoises. La figure 10 présente une carte localisant ces stations. Les tableaux 44 et 45 en annexes décrivent la localisation, l'altitude et les périodes de saisies de données de chacune des stations à l'étude. Bien que les stations retenues ne correspondent pas nécessairement aux stations mises à profit dans le volet d'étude des intensités de précipitations (mai-octobre), les séries journalières utilisées dans le calcul des apports verticaux reflètent bien la variabilité du climat à l'échelle du territoire agricole québécois.

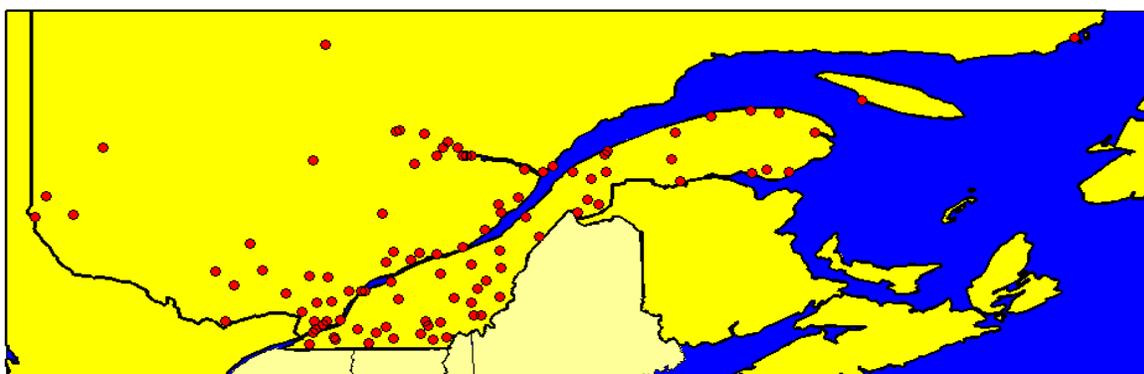


Figure 10. Carte localisant les stations utilisées dans le cadre de la présente étude

Toutes les stations utilisées ont au moins 50 ans de données pour les quatre variables considérées avec, pour certaines, des historiques de près de 110 ans. La figure 11 présente le nombre d'années de données de précipitations (pluie et neige) et de température (minimale et maximale) pour chacune des stations.

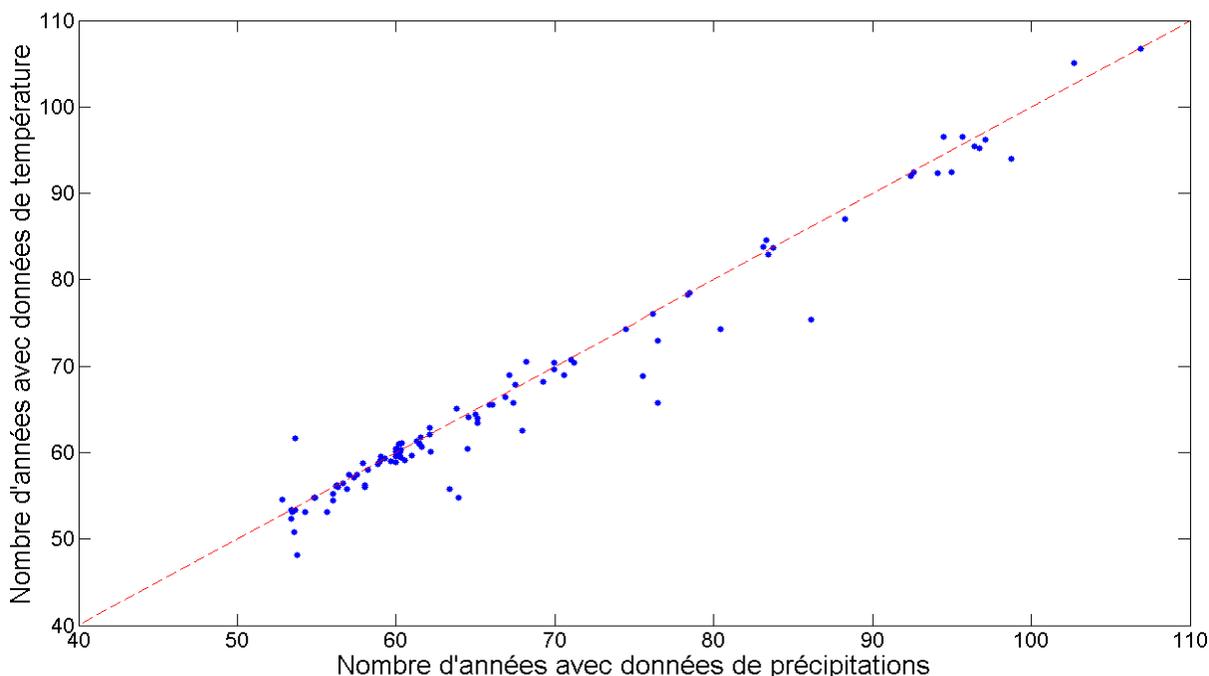


Figure 11. Nombre d'années de données de précipitations (pluie et neige) et de température (minimale et maximale) à chaque station.

Estimation des apports verticaux extrêmes historiques

L'estimation des caractéristiques des événements extrêmes de redoux dans le cadre du présent projet s'apparente à celle des événements de pluie extrêmes. En effet, la méthode consiste à identifier les intensités maximales annuelles des événements de redoux pour différentes durées, puis à les classer selon leur fréquence.

Pour une station donnée, la première étape consiste donc à calculer pour chaque année le maximum d'apport vertical généré par un redoux. Comme la période de gel s'étire sur deux années (novembre et décembre pour la première année, janvier à avril pour la deuxième), l'année de référence a été définie comme s'étendant du 15 juillet de l'année en cours au 14 juillet de l'année suivante. Pour qu'une année soit considérée valide, il faut qu'il y ait des données simultanément (à la même date) pour les quatre variables pour au moins 80 % des journées de l'année. De plus, ce seuil de 80 % des jours doit également être respecté pour la période « critique » allant de novembre à avril. S'il y a quelques données manquantes et que ce nombre est tolérable, les correctifs suivants sont appliqués afin d'éviter les discontinuités dans les séries d'accumulation de neige :

- 1) Les totaux de neige et de pluie pour les journées manquantes sont remplacés par zéro.
- 2) Les températures minimales et maximales pour les journées manquantes sont remplacées par la moyenne des températures (minimale ou maximale) de la dernière journée disponible avant la valeur manquante et de la prochaine journée disponible.

Suivant la création des séries annuelles complètes pour les quatre indices, les apports verticaux (eau résultante de la pluie de et la fonte de neige) et la hauteur de neige accumulée

ont été modélisés sur une base quotidienne à l'aide du modèle CEQUeau-modIRDA. Des paramètres de calage communs (température de fonte, taux de fonte, température de mûrissement de la neige et déficit calorique), ont été retenus pour l'ensemble des bassins dans la phase de développement et de validation des indices (tableau 3).

Suivant le calcul des séries quotidiennes d'apports verticaux, les maxima annuels ont été estimés selon les durées de 1, 2, 3, 4 et 5 jours. Une méthode de fenêtre mobile de longueur égale à la durée a été utilisée pour construire ces cumuls d'apports verticaux. La présence (prédite) de neige au sol lors de ces événements a été validée, afin d'éviter par exemple, qu'un orage violent à la fin d'avril, après que toute la neige soit fondue, soit retenu comme l'événement de « redoux hivernal » le plus important de l'année.

Suivant la construction des séries de maxima annuels d'apports verticaux pour l'ensemble des stations, leurs distributions HDF ont été estimées. Après s'être assuré de leur stationnarité et de leur homogénéité, la distribution cumulative empirique a été utilisée pour calculer les hauteurs correspondantes aux temps de retour désirés. Par exemple, pour obtenir la hauteur atteinte en moyenne à tous les deux ans, il suffit de trouver la valeur pour avoir le rang percentile correspondant à $1-(1/T)$, où $T = 2$, soit le 50^e percentile.

32.4 Procéder à l'adaptation et à la validation d'une méthode de prédiction hydrologique

Le volet hydrologique du projet a pour objectif principal le développement, la validation et la diffusion d'un outil de prédiction hydrologique adapté aux conditions agroclimatiques québécoises. Le développement des modèles de prédiction hydrologique s'appuie sur une méthode semi-empirique mettant à profit les observations hydrométriques de onze petits bassins versants répartis sur le territoire agricole du Québec, du Témiscouata jusqu'à l'ouest de la Montérégie. La figure 12 résume l'approche de développement retenue. La principale et première étape consiste à caractériser les réponses hydrologiques de bassins versants par l'analyse détaillée de leurs hydrogrammes de crue. L'analyse de plus de 700 hydrogrammes distincts a été supportée par le logiciel VisuHydro développé spécifiquement pour les besoins du projet (Lagacé, 2012). En deuxième étape, les propriétés propres à chacun des hydrogrammes, extraites par VisuHydro, tels la hauteur de ruissellement, les paramètres de forme, le temps de montée ou les débits de pointe, ont été comparées aux diverses méthodes de prédiction couramment utilisées en milieu de pratique ou dans la littérature. Cet exercice a permis de valider et proposer une méthode appropriée de prédiction hydrologique, adaptée à l'estimation des critères de conception des ouvrages hydro-agricoles et interfacée avec les banques de données météorologiques (IDF) et pédologiques (banque de données hydro-pédologiques) aussi générées dans le cadre du présent projet.

32.4.1 Caractérisation des bassins versants à l'étude

Onze bassins versants instrumentés, situés dans diverses régions agricoles ont été retenus pour l'analyse de leurs hydrogrammes de crue. Cette sélection s'est appuyée sur les critères de taille (3 à 30 km²), d'occupation du sol (vocation agricole) et de la disponibilité concordante des données de débits et de précipitations. La figure 13 localise les bassins versants retenus pour l'étude, alors que les tableaux 7 à 10 en résument les principales propriétés physiographiques et l'occupation du territoire. Conceptuellement, les onze bassins sont associés à deux classes physiographiques. Les cinq bassins versants de la Montérégie ont un relief plat, une occupation du sol presque exclusivement agricole et des systèmes culturaux dominés par les cultures annuelles. Les six autres bassins localisés en Estrie (2), en Beauce (3) et dans le Bas-Saint-Laurent (1) sont associés à des paysages appalachiens, présentant un relief plus accentué qu'en Montérégie. De façon générale, un plus grand pourcentage de la superficie des bassins appalachiens est occupé par la forêt. En ce qui a trait aux propriétés des sols, les bassins versants témoignent aussi d'une grande diversité. Le bassin Fourchette aval en Beauce, par exemple, possède un fort pourcentage de sols dans le groupe hydrologique A, alors que le bassin de la Petite rivière Savane est plutôt associé aux sols du groupe hydrologique D (tableau 9). Les autres bassins se situent à mi-chemin avec des proportions variables de groupes hydrologiques B et C. La méthodologie inhérente à cette classification est présentée à la section 4.5 de la présente étude.

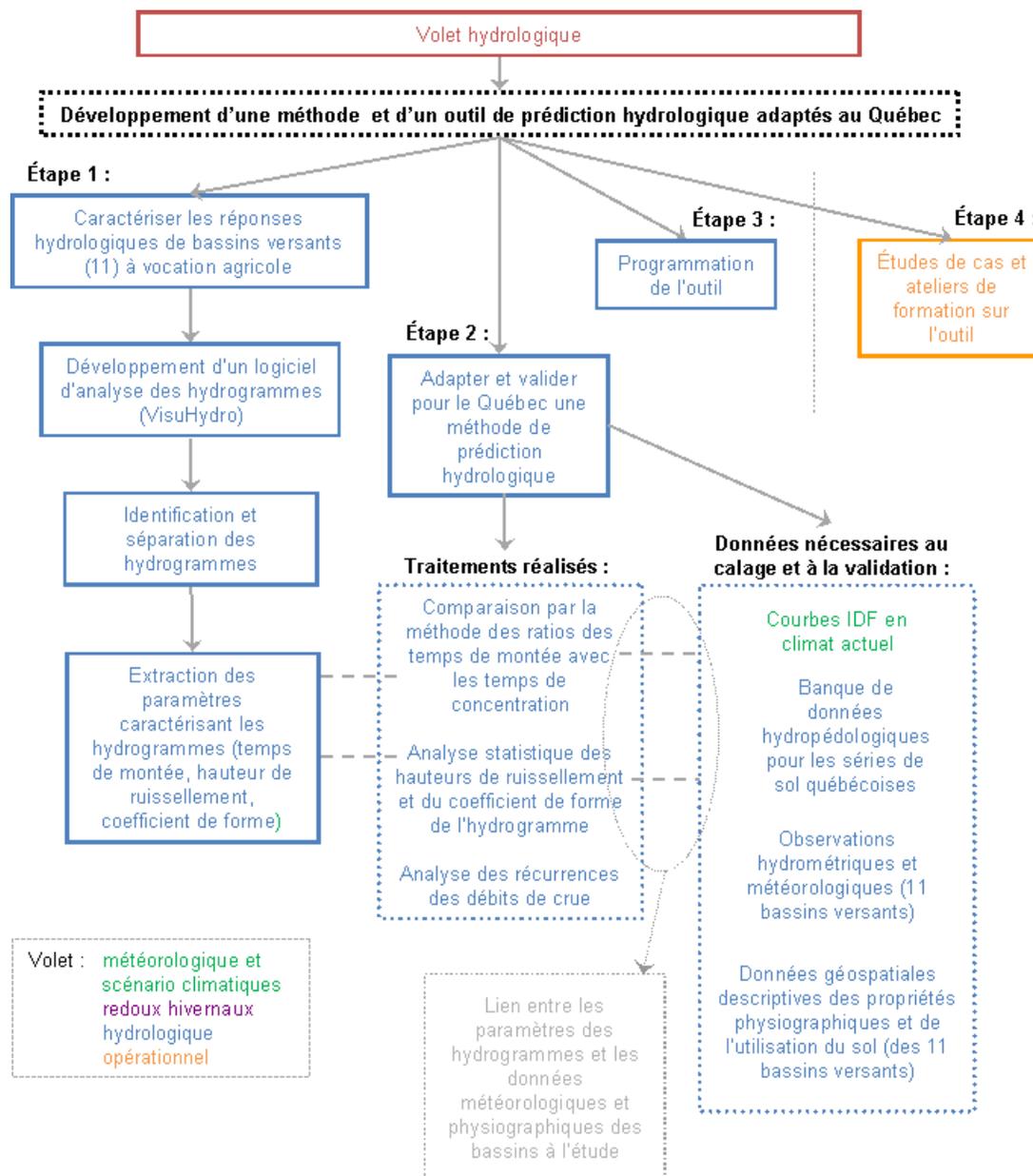


Figure 12. Schéma méthodologique du volet hydrologique

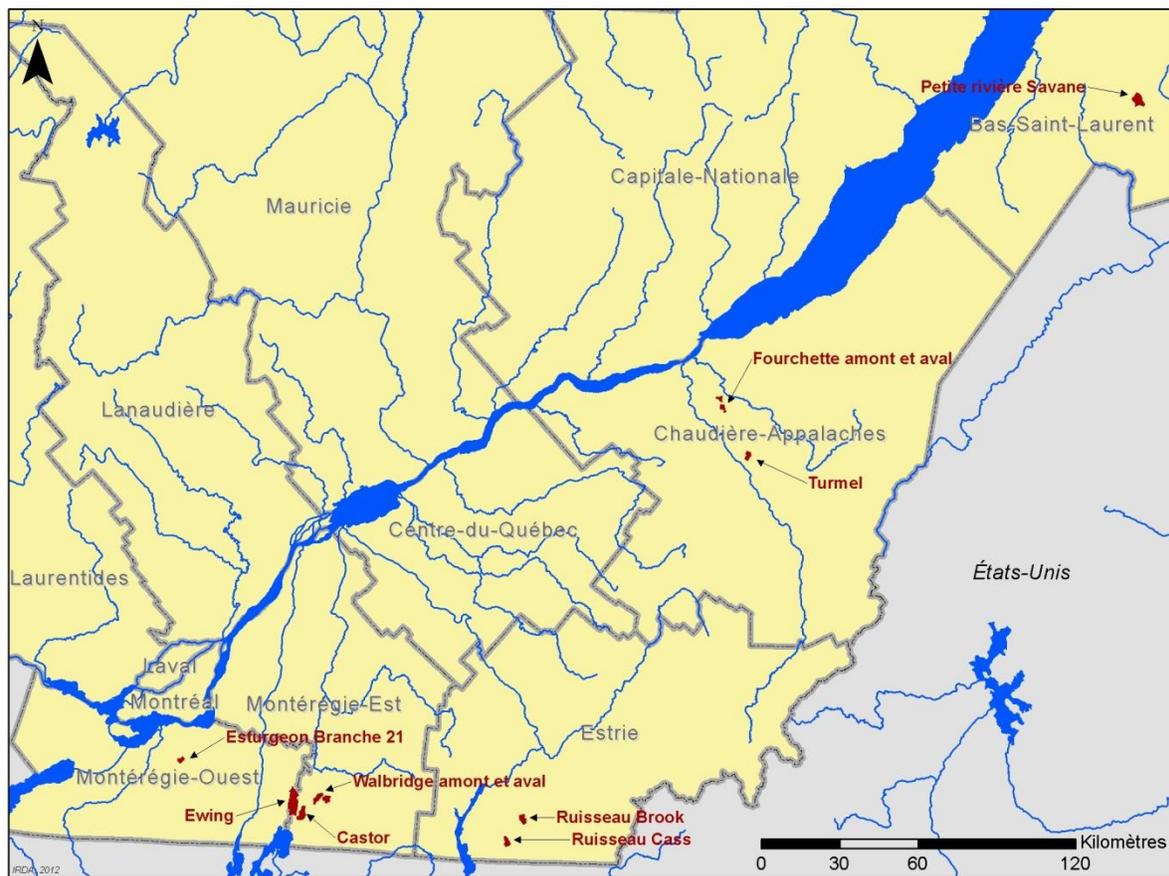


Figure 13. Localisation des bassins versants utilisés dans l'analyse hydrologique des crues

Tableau 7. Localisation, étendue et période d'étude des bassins versants

Caractéristiques	Castor	Ewing	Est. Br. 21	Wal. amont	Wal. aval	Cass	Brook	Fou. amont	Fou. aval	Turmel (Bélaïr)	Petite riv. Savane
Latitude (degrés décimaux)	45,13	45,17	45,29	45,19	45,19	45,13	45,07	46,59	46,63	46,43	47,68
Longitude (degrés décimaux)	-73,05	-73,09	-73,64	-72,93	-72,97	-69,01	-72,04	-71,08	-71,09	-70,94	-73,64
Superficie (ha)	1227,8	249,8	2782,4	794,3	1227,8	713,8	529,8	192,3	1518,9	529,84	618,2
Nombre d'unités de réponse hydrologique	342	1987	1266	249	263	113	209	433	464	154	393
Début de la période d'étude	2001/09 /22	2001/11 /02	2009/12 /31	2001/11 /01	2001/11 /01	2010/06 /16	2010/06 /16	2004/01 /01	2004/01 /01	1994/02 /19	2009/10 /29
Fin de la période d'étude	2006/06 /20	2006/06 /20	2011/11 /24	2006/06 /20	2006/06 /20	2011/10 /03	2011/10 /03	2009/12 /31	2009/12 /31	1996/11 /22	2011/09 /28

Tableau 8. Occupation du sol des bassins versants à l'étude (en pourcentage)

Utilisation du sol	Castor	Ewing	Est. Br. 21	Wal. amont	Wal. aval	Cass	Brook	Fou. amont	Fou. aval	Turmel (Bélaïr)	Petite riv. Savane
Maïs	48,2	43,9	8,2	40,2	29,1	7,2	1,6	15,4	11,6		
Soya	6,0	12,1	20,5	4,1	7	0,7		13,3	1,6		0,3
Maraîcher		0,7	47,9		0,6						
Céréales	6,5	5,7	2,9	5,7	5,7	0,6	0,2	14,5	3,8	1,5	2,1
Foin/Pâturage	36,4	27,1	15,4	19,5	25,2	33,8	46,2	47,3	34,7	58,6	17,7
Petits fruits					0,7						
Friche		0,03				1,7	2,2			2,8	13
Forêt	0,8	8,4	0,3	29,2	27,1	54,1	44,8	2,6	42,3	34,8	60
Eau	0,01	0,01	0,03		0,01	0,4	0,3	0,03		0,2	3,9
Carrière		0,2									0,2
Route	2,0	1,6	0,3	1,1	1,3	1,6	1,9	2,5	3,1	2,1	1,5
Urbain résidentiel		0,2	4,5	0,2	0,1		2,9	4,4	3		
Autre		0,01			3,3						1,4

Tableau 9. Distribution des groupes hydrologiques du sol des bassins versants à l'étude (en pourcentage)

Groupe hydrologique	Castor	Ewing	Est. Br. 21	Wal. amont	Wal. aval	Cass	Brook	Fou. amont	Fou. aval	Turmel (Bélaïr)	Petite riv. Savane
A		1,5	0,1 1	1,7	0,2		5,2	11,1	61,2		
B	24,3	29,7	3,8	16,1	10,7	92	59,4	34,6	3,6	10,2	11,5
C	75,7	60	96, 1	82,2	68,1	7,6	35,2	54,3	24,2	89,6	24,3
D		8,9	0,0 3		21			0,1	11	0,2	60,3
Eau		0,01			0,01	0,4	0,25	0,03		0,1	3,9

La validation des méthodes prédictives des réponses hydrologiques dans le cadre de la présente étude a nécessité la caractérisation spatiale de plusieurs propriétés des bassins versants à l'étude, incluant la division et la caractérisation des segments de cours d'eau en fonction des confluences, du relief, du parcours d'écoulement et des nœuds d'entrée et de sortie du chevelu hydrographique. L'intersection spatiale des polygones représentatifs de l'utilisation du sol et des groupes hydrologiques de sol a permis la division des territoires des bassins versants en unités de réponses hydrologiques (URH) distinctes. Un numéro de courbe (CN pour Curve Number) a par la suite été attribué à chacune des URH, témoignant conceptuellement de leur capacité d'infiltration de l'eau dans le sol. Ce concept permet ainsi de lier les propriétés des bassins versants à leurs réponses hydrologiques, notamment lors de la modélisation des temps de montée des hydrogrammes ou des hauteurs de ruissellement.

La génération des données géospatiales pour l'ensemble des onze bassins versants a été réalisée à l'aide d'un système d'information géographique (SIG). Les traitements ont tous été réalisés selon les mêmes modalités pour tous les bassins versants. Les données utilisées pour identifier les nœuds et segments des cours d'eau incluent :

- la couche vectorielle linéaire des cours d'eau verbalisés modifiée manuellement dans certains cas, à l'aide d'orthophotos récentes, afin qu'elle soit plus représentative de la réalité de terrain;
- les plans profils de cours d'eau du MAPAQ, qui nous renseignent sur les élévations du fond et des talus des ruisseaux;
- un modèle numérique d'élévation (MNE) représentant la topographie du bassin versant à l'étude. La précision et la résolution des MNE générés dans le cadre du projet varient en fonction des sources de données disponibles. Les MNE représentant avec la plus grande justesse la topographie sont ceux réalisés à partir de données GPS (Global Positioning System) et de données LiDAR (Esturgeon Branche 21, Fourchette amont, Ewing). Ceux-ci ont une précision de 2 à 15 cm et une résolution d'environ 1 ou 2 m. Ils permettent ainsi de percevoir des formes de paysage de plus petites dimensions. Ces données n'étant pas toujours disponibles, des MNE provenant du gouvernement fédéral canadien au 1 : 50 000 (taille du pixel de 20 m par 20 m) ont également été utilisés en support à l'analyse du relief des autres bassins versants. (<http://www.geobase.ca/geobase/fr/data/cded/description.html>).

Afin d'identifier les nœuds et les segments des cours d'eau et de leur attribuer certaines statistiques, le modèle hydrologique SWAT (Soil and Water Assessment Tool : Neitsch et *al.*, 2011; <http://swat.tamu.edu/>) a été utilisé car il permet d'identifier manuellement la localisation des nœuds désirés suivant l'approche suivante :

- les données d'entrée du modèle sont identifiées (MNE et cours d'eau verbalisés);
- les cours d'eau sont encavés (creusés) dans le MNE afin de faciliter l'écoulement de l'eau au bon endroit;
- à partir de ces deux données, SWAT établit le parcours de l'eau en fonction d'un nombre seuil de pixels nécessaires pour former un cours d'eau. À ce moment, SWAT identifie automatiquement certains nœuds tels que les confluences entre les branches des cours d'eau. Toutefois, ces nœuds ne sont pas toujours placés aux endroits désirés et il est parfois nécessaire d'en ajouter ou d'en supprimer;
- SWAT identifie ensuite le sous-bassin correspondant à chaque nœud en fonction notamment de l'élévation;
- enfin, des statistiques sont calculées pour les nœuds, les segments et les sous-bassins, telles que l'élévation des nœuds, la longueur et la pente des segments, la superficie des sous-bassins, etc.

Lorsque les plans profils du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) sont disponibles, il est possible ensuite de substituer les valeurs calculées par SWAT par les valeurs plus précises de profondeur et de largeur des cours d'eau, et d'élévation des nœuds.

La délimitation des unités de réponse hydrologique a été déterminée par le croisement spatial des polygones pertinents à l'utilisation du territoire et aux séries de sol cartographiées dans les rapports pédologiques. La couche d'utilisation du territoire est créée à partir de quatre sources de données :

- la BDCA (Banque de données des cultures assurées) de la Financière agricole du Québec (2010). Dans cette base de données, on retrouve le contour des champs assurés à la Financière ainsi que la culture selon l'année. Le tableau 10 présente les types de culture présents dans la base de données. Une proportion variable du parcellaire assuré n'est cependant pas décrite, correspondant en général aux programmes d'assurances collectives;
- la carte écoforestière du Québec du ministère des Ressources naturelles (MRN) (2003). Cette carte représente les peuplements végétaux du Québec, mais également plusieurs autres utilisations du territoire. Le tableau 11 présente l'ensemble des utilisations du sol possibles. On y retrouve notamment les secteurs urbain et agricole;
- la base de données des milieux humides de Canards Illimités a également été utilisée pour les bassins de la Montérégie. Cette base de données localise les milieux humides et les classe selon leur type : marais, marécage, tourbière bug, tourbière boisée, tourbière fen;
- Le réseau routier provenant de la BDTQ (Base de données topographique du Québec) (MRN, 2006).

Tableau 10. Classes de cultures de la Banque de données des cultures assurées (BDCA) de la Financière agricole

Code de culture de la BDCA	Définition
AUC	Autres céréales
AVO	Avoine
BLE	Blé de printemps ou blé d'automne
FOIN	Foin, tourbe, pâturage, engrais vert ou sorgho
MAI	Maïs grain, sucré ou fourrager
MAR	Légumes
MIX	Parcelles partagées entre plusieurs cultures sans que l'une ne soit majoritaire
NON	Pas de culture déclarée ou surface non assurée
ORG	Orge
PTF	Fraises, framboises, bleuets
SOY	Soya ou soya fourrager
* No data	Aucune valeur

Les bases de données originales ont été re-classifiées afin d'ajuster le nombre de classes en fonction des besoins du projet. Les données vectorielles ont par la suite été transformées en données matricielles (résolution de 5 m), puis superposées l'une à l'autre. L'ordre de superposition permettant de conserver le plus de précision possible dans la donnée d'utilisation du sol est le suivant : BDCA > milieux humides de Canards Illimités > carte écoforestière. Les routes ont par la suite été superposées aux autres couches. Toutefois, certaines manipulations ont préalablement été réalisées à la couche du réseau routier. Une zone tampon de 4 m a été créée autour du réseau routier afin de transformer l'information linéaire en information polygonale plus représentative de la réalité. Cette nouvelle couche a ensuite été transformée en couche matricielle pour être finalement superposée aux couches précédemment mentionnées.

Un groupe hydrologique a été attribué à chaque unité cartographique (polygone) de la couche d'information pédologique (séries de sols) des bassins versants à l'étude. Rappelons que la méthodologie propre à l'indexation du groupe hydrologique est présentée à la section 4.5 du présent rapport.

Tableau 11. Classes d'utilisation du territoire de la carte écoforestière

Code de la couche écoforestière	Catégorie
A	Terre agricole
AER	Aéroport
AL	Aulnaie
BAS	Bassin de filtration, de décontamination, pisciculture
BHE	Barrage hydro-électrique
BLE	Bleuetière
CAM	Camp forestier
CAR	Carrière
CEX	Centre experimental
CHE	Centrale hydro-électrique
CIM	Cimetière d'automobiles
CNE	Jardin botanique
CS	Piste de ski
CU	Centre urbain
DEF	Terrain défriché
DEM	Déchets de mines
DEP	Dépotoir
DH	Dénudé et semi-dénudé humide
DS	Dénudé et semi-dénudé sec
EAU	Eau, lac, rivière
F	Peuplement dont plus de 75 % de la surface terrière totale sont occupés par les essences feuillues
GOL	Golf (partie déboisée)
GR	Gravière
HAB	Habitation permanente
ILE	Île boisée de 1 ha et moins
INC	Nature inconnue
INO	Site inondé
LTE	Ligne de transport d'énergie
M	Peuplement dont les essences feuillues et résineuses occupent individuellement plus de 25 % et moins de 75 % de la surface terrière totale
MI	Mine
PIC	Piste de course
PPN	Pépinière
QUA	Quai
R	Peuplement dont plus de 75 % de la surface terrière totale sont occupés par les essences résineuses
RO	Route et autoroute (emprise)
US	Usine
VIL	Villégiature (partie boisée)
VFG	Identification des vergers
--	

À l'instar de presque toutes les régions agricoles, les bassins versants à l'étude profitent d'une cartographie de leurs sols (IRDA, 2008). Les polygones de sols sont généralement composés de plusieurs séries de sols, selon des proportions variables. Un polygone de sols peut ainsi regrouper jusqu'à quatre séries de sol différentes. Lors de l'attribution d'un groupe hydrologique à un polygone de sols donné, il est donc important de tenir compte de la variabilité des séries de sols qui y sont représentées. Dans le cadre de ce projet, une base de données associant les séries de sols à un groupe hydrologique donné a été créée et utilisée pour documenter le groupe hydrologique des polygones de sols représentés dans les SIG des onze bassins versants à l'étude. D'abord, la couche pédologique vectorielle a été coupée aux limites de chacun des bassins à l'étude. Ensuite, lorsqu'une seule série de sols représentait un polygone, le groupe hydrologique correspondant à cette série de sols était automatiquement identifié. Lorsque deux sols étaient présents dans un polygone de sols, deux options étaient possibles : a) si les groupes hydrologiques ne variaient que de 1 entre les séries de sols (ex : Sol 1 = B et Sol 2 = C), le groupe hydrologique du Sol 1 était attribué au polygone puisque le sol 1 représente généralement 60 % du territoire et le sol 2, 40 %; b) si les deux séries de sols avaient des groupes hydrologiques espacés de plus d'un groupe (ex : Sol 1 = A et Sol 2 = C), une moyenne a été faite entre les deux groupes. Ainsi, dans le cas du présent exemple le groupe hydrologique attribué au polygone de sol fut B. Dans le cas où trois séries de sol composaient un polygone, une méthodologie semblable a été utilisée. Toutefois, notons que les proportions des sols sont les suivantes lorsqu'il y a présence de trois séries par polygone de sol : Sol 1 = 50 %, Sol 2 = 30 % et Sol 3 = 20 % selon la normalisation utilisée lors de la numérisation vectorielle des cartes de sols originales. Ainsi, une combinaison des sols 2 et 3 équivaut à 50 % du polygone. Toutefois, dans ce cas, le groupe hydrologique du sol 1 avait tout de même préséance.

L'étape suivante a consisté en la création des unités de réponse hydrologique (URH). Les couches d'information matricielles pertinentes à l'utilisation du sol et au groupe hydrologique ont été superposées, générant ainsi des polygones présentant une combinaison unique de ces deux catégories d'information géospatiale.

La combinaison de l'utilisation du sol et du groupe hydrologique a par la suite permis d'associer un numéro de courbe (CN) à chacune des URH des onze bassins versants à l'étude. Le numéro de courbe témoigne, conceptuellement, du coefficient de ruissellement de l'URH, soit la proportion de l'eau précipitée qui sera ruisselée. Cette réponse hydrologique sera plus ou moins rapide et abondante selon le taux d'infiltration de l'eau dans le sol au cours de la précipitation. Le tableau 12 présente les numéros de courbe utilisés dans le cadre de la présente étude. Ils sont similaires à ceux proposés dans les guides techniques du Natural Resources Conservation Service (NRCS) états-uniens (USDA-SCS, 1986) et actuellement utilisés en milieu de pratique au Québec. Suivant l'association des CN aux URH comprises dans les onze bassins à l'étude, une moyenne pondérée de la valeur de CN en fonction des superficies des URH a été calculée afin d'identifier un numéro de courbe moyen par bassin versant. À titre d'illustration de la méthode, la figure 14 témoigne de la création des URH d'un bassin (Ruisseau Cass) à partir de la couche d'utilisation du territoire (A) et de la couche des groupes hydrologiques des sols (B). La figure 15 illustre la distribution spatiale des valeurs de CN résultantes pour l'ensemble des URH du même bassin versant. Le tableau 13 présente le nombre d'URH de même que les numéros de courbe moyens pondérés pour les superficies des onze bassins versants à l'étude.

Tableau 12. CN utilisés dans l'indexation des unités de réponse hydrologique (URH) en fonction de l'utilisation du territoire et des groupes hydrologiques du sol pour l'ensemble des onze bassins versants à l'étude.

Utilisation du sol	Groupe hydrologique				Commentaires
	A	B	C	D	
Foin/Pâturage	39	61	74	80	Pâturages + bonne condition d'infiltration. Valeur « moyenne » des classes Pâturage et Prairies permanentes
Céréales	63	74	83	87	Céréales / Interligne étroit + bonne condition d'infiltration
Soya	67	78	85	89	Cultures / Interligne étroit + bonne condition d'infiltration
Maïs	67	78	85	89	Cultures en rangées + bonne condition d'infiltration
Maraîcher	67	78	85	89	Cultures en rangées + bonne condition d'infiltration
Petits fruits	39	61	74	80	Pâturages + bonne condition d'infiltration
Friche	35	56	70	77	Friche + condition d'infiltration moyenne
Forêt	36	60	73	79	Boisés + condition d'infiltration moyenne
Milieu humide	45	66	77	83	Boisés + condition d'infiltration pauvre
Eau	92	92	92	92	Table de SWAT
Route	83	89	92	93	Route asphaltée avec fosses
Urbain industriel	81	88	91	93	Urbain : industriel
Urbain résidentiel	54	70	80	85	Urbain : résidentiel avec taille des lots de ½ acre
Carrière	77	86	91	94	Jachère : sol nu
Autre	62	75	83	87	Moyenne des autres CN

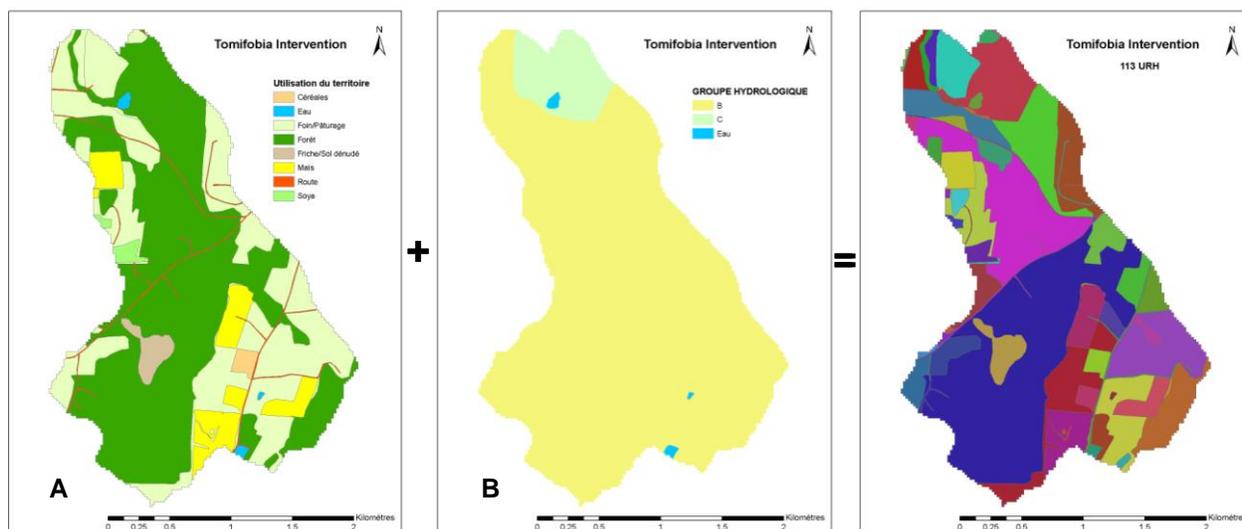


Figure 14. Formation des URH pour le bassin du ruisseau Cass avec l'utilisation du territoire et les groupes hydrologiques.

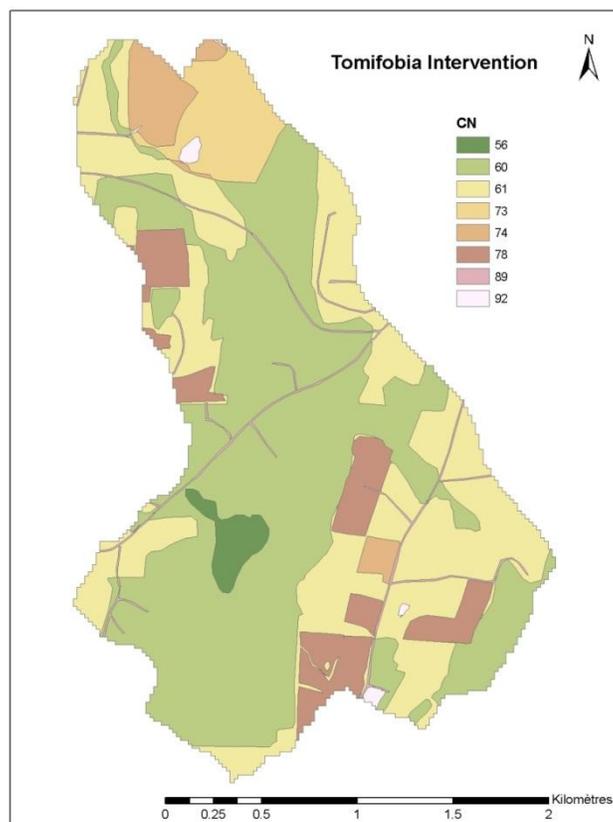


Figure 15. Spatialisation des numéros de courbe du bassin du ruisseau Cass

Tableau 13. Nombre d'URH et les numéros de courbe moyens pondérés pour les superficies des onze bassins versants à l'étude

Bassin versant	Nombre d'URH	CN moyen
Castor	342	78
Esturgeon Branche 21	1266	82
Ewing	1987	78
Fourchette amont	433	73
Fourchette aval	464	56
Petite rivière Savane	393	76
Ruisseau Cass	113	63
Ruisseau Brook	209	65
Turmel	154	73
Walbridge amont	249	77
Walbridge aval	263	79

32.4.2 Analyses hydrologiques

Les banques de données hydrométriques et météorologiques mises à profit dans les analyses hydrologiques des hydrogrammes de crue des onze bassins versants à l'étude sont

sommairement décrites aux tableaux 14 à 16. Dix de ces dispositifs et banques de données hydrologiques ont été colligés par l'équipe de l'IRDA dans le cadre d'accompagnements scientifiques d'actions concertées sur la qualité de l'eau en milieu agricole (Michaud et *al.*, 2009a; Michaud et *al.*, 2009b; Michaud et *al.*, 2012). Les observations du bassin versant du ruisseau Turmel ont été gracieusement mises à la disposition de l'équipe de projet par M. Gallichand (2012), professeur à l'Université Laval.

Suivant la mise en forme des données hydrométriques et météorologiques pertinentes aux onze bassins versants à l'étude, l'analyse hydrologique des crues a été réalisée à l'aide du logiciel VisuHydro, développé spécifiquement dans le cadre du projet (Lagacé, 2012). Encodé en langage *Python*, le logiciel dispose d'une interface visuelle permettant le marquage, la séparation manuelle et le calcul des propriétés individuelles des hydrogrammes. La figure 16 illustre l'interface visuelle de VisuHydro, en lien avec la réalisation des tâches suivantes :

- Marquer le début et la fin de chacun des évènements qui ont produit un ruissellement significatif;
- Classifier chacun des évènements en fonction du type d'hydrogramme (simple, unitaire, multi pic, complexe ou non identifié) et du type de montée (régulier ou irrégulier);
- Déterminer la hauteur de précipitation (Ppt), la durée de précipitation et le débit maximum (q_m) de chaque évènement sélectionné;
- Séparer chaque hydrogramme en sa composante d'écoulement de base et d'hydrogramme de ruissellement;
- Déterminer à partir des hydrogrammes de ruissellement classés simple ou unitaire avec montée régulière, les paramètres de temps de montée (t_p), de débit de pointe (q_p), de temps de base (t_b), le coefficient de forme de l'hydrogramme ($\Phi\alpha$) et la hauteur de ruissellement (R_u), ;
- Déterminer la hauteur de ruissellement pour tous les autres types d'hydrogrammes;
- Réaliser des analyses statistiques (moyenne, écart-type, minimum, maximum, coefficient de variation) des paramètres hydrologiques générés par le logiciel pour l'ensemble des hydrogrammes d'un bassin versant donné, incluant le coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (E), l'erreur quadratique moyenne (EQM) et le coefficient de détermination (R^2), pour évaluer la puissance prédictive des modèles hydrologiques.

Le logiciel VisuHydro utilise la méthode linéaire de séparation du ruissellement de l'écoulement de base (figure 16). Pour une présentation détaillée des fonctionnalités du logiciel, le lecteur est invité à se référer au mémoire de maîtrise de Rocha (2013), de même qu'aux autres sections de ce présent rapport pertinentes à la revue de littérature (3.4) et aux résultats du volet hydrologique (5.4).

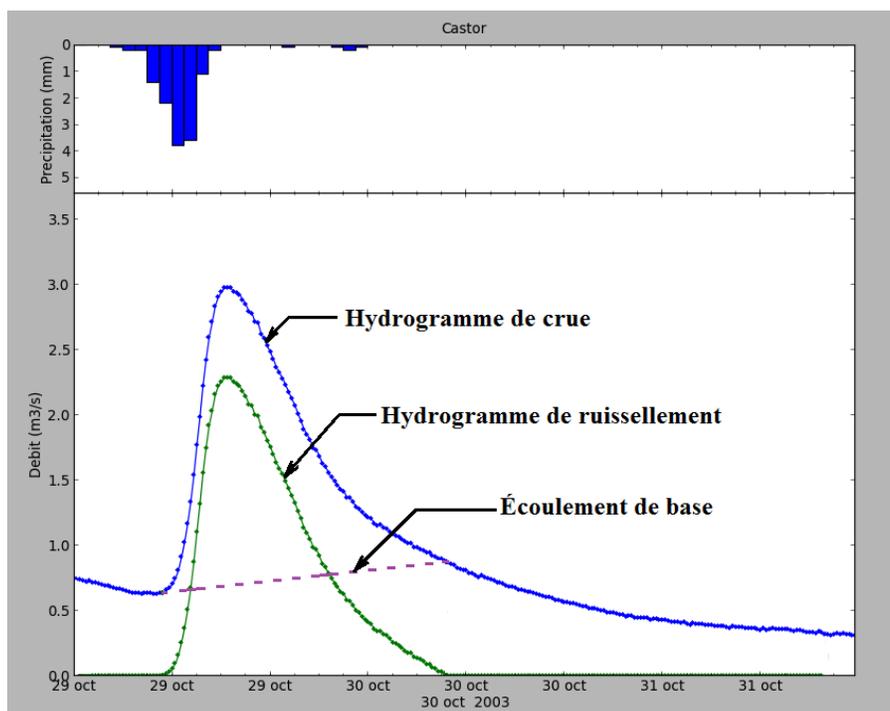


Figure 16. Interface visuelle du logiciel VisuHydro permettant la séparation des hydrogrammes

Suivant la séparation des hydrogrammes en leurs composantes d'écoulement de base et de ruissellement, différents paramètres sont analysés statistiquement (moyenne, écart-type, coefficient de variation). Selon le type d'hydrogramme, les paramètres incluent :

- le temps de montée (pour les hydrogrammes simples et complexes avec montée simple);
- la hauteur de ruissellement (pour tous les hydrogrammes sélectionnés);
- le débit de pointe, le temps de base et le coefficient de forme de l'hydrogramme (pour les hydrogrammes simples);
- la fonction gamma, utilisée pour déterminer les coefficients de forme.

Seules les périodes sans fonte de neige ont été étudiées en raison de la complexité des hydrogrammes de crue associée aux fontes et pluies hivernales.

Les différents paramètres hydrologiques estimés par VisuHydro à partir des observations réelles (hydrogrammes) ont été comparés aux estimations des modèles théoriques couramment utilisés en milieu de pratique au Québec, de façon à évaluer la performance des méthodes courantes. Les sections suivantes décrivent plus en détail ces modèles et les méthodes utilisées dans les prédictions des volumes de ruissellement, des temps de concentration, des paramètres de forme des hydrogrammes et des débits de pointe. À cette étape et sauf pour l'analyse des hauteurs de ruissellement, dix bassins versants ont été retenus. Le bassin du ruisseau Turmel n'a pas été retenu ici car seulement 10 % des données avaient été analysées.

Tableau 14. Stations et bases de données hydrométriques utilisées au volet hydrologique du projet.

#	Station de jaugeage	Localisation (degrés décimaux)		Dates hydrométrie		Pas des données
		Latitude	Longitude	Début	Fin	
1	Castor	45,11	-73,07	2001/04/03	2008/12/31	15 min
2	Esturgeon Branche 21	45,28	-73,65	2009/09/25	2011/11/24	15 min
3	Ewing	45,13	-73,08	2001/11/02	2009/01/13	15 min
4	Fourchette amont	46,60	-71,09	2002/02/13	2009/12/31	15 min
5	Fourchette aval	46,63	-71,10	2001/10/15	2006/12/31	15 min
6	Petite rivière Savane	47,66	-68,98	2009/11/03	2011/09/28	15 min
7	Ruisseau Cass	45,09	-72,06	2009/09/22	2011/10/03	15 min
8	Ruisseau Brook	45,17	-71,99	2009/09/23	2011/10/03	15 min
9	Walbridge amont	45,19	-72,94	2001/11/01	2006/11/05	15 min
10	Walbridge aval	45,17	-72,98	2001/11/01	2002/02/04	30 min
				2002/02/04	2006/11/02	15 min
11	Turmel	46,42	-70,94	1994/02/19	1996/11/22	15 min

Tableau 15. Stations et bases de données météorologiques utilisées au volet hydrologique du projet.

#	Station météorologique	Localisation (degrés décimaux)		Dates Météo		Pas des données
		Latitude	Longitude	Début	Fin	
1	Meteo Esturgeon	45,26	-73,70	2009/12/31	2010/08/11	15 min
				2010/08/22	2010/09/28	5 min
				2010/09/28	2011/12/31	30 min
2	Meteo Gagnon	45,13	-73,06	2001/09/22	2006/06/20	15 min
3	Meteo Madawaska	47,65	- 68,98	2009/10/29	2011/09/28	15 min
				2011/09/28	2011/12/31	30 min
4	Meteo StLambert	46,61	-71,18	2004/01/01	2009/12/31	10 min
5	Meteo Tomifobia	45,09	-72,06	2010/06/16	2011/10/03	15 min
				2011/10/03	2011/12/07	30 min
6	Turmel	46,42	-70,94	1994/02/19	1996/11/22	10 min

Tableau 16. Distance (km) entre les stations hydrométriques et météorologiques utilisées au volet hydrologique du projet.

Station hydrométrique	Station météorologique	Distance (km) entre les stations hydrométriques et météorologiques
Castor	Meteo_Gagnon	1,43
Esturgeon_Temoin	Meteo_Esturgeon	4,78
Ewing	Meteo_Gagnon	1,14
Fourchette_Intervention	Meteo_StLambert	6,77
Fourchette_Temoin	Meteo_StLambert	5,97
Petite rivière Savane	Meteo_Madawaska	1,27
Ruisseau Brook	Meteo_Tomifobia	10,07
Ruisseau Cass	Meteo_Tomifobia	Quelques mètres
Walbridge_Amont	Meteo_Gagnon	11,79
Walbridge_Aval	Meteo_Gagnon	7,73

32.4.3 Volumes de ruissellement

Les hauteurs de ruissellement (Hru) et de précipitation (Ppt) déterminées pour 667 événements individuels à l'aide du logiciel VisuHydro ont été mises à profit dans l'étude de la relation Hru : Ppt suivant une approche de régression s'inspirant de Monfet (1979). Cette dernière est couramment utilisée en milieu de pratique au Québec dans le dimensionnement des ouvrages hydrauliques en milieu rural. Dans le cadre de la présente étude, l'analyse de la relation entre les hauteurs de ruissellement (Hru) et les précipitations observées (Ppt) pour l'ensemble des onze bassins versants à l'étude a été supportée par une analyse de covariance (ANCOVA) de la hauteur de ruissellement (Hru) utilisant la hauteur de précipitation (Ppt) en covariable et considérant les effets « Bassin », destinés à détecter les différences significatives entre les réponses hydrologiques des onze bassins versants à l'étude. Les résultats ont aussi été comparés aux méthodes de Monfet (1979) et du SCS.

32.4.4 Temps de montée et temps de concentration

Le temps de montée (tp) représente le temps que prend le débit pour atteindre le débit de pointe depuis le début du ruissellement. Ce temps, qui représente une caractéristique de l'hydrogramme, peut être mesuré lors de précipitations de relativement courte durée provoquant un hydrogramme simple typique. Dans cette étude, 193 hydrogrammes classifiés de type simple ont été étudiés et leur temps de montée a été estimé avec le support de *VisuHydro*. Un hydrogramme a été classifié simple, si et uniquement si, sa forme est régulière, sa montée régulière et que la fin de la précipitation se produit avant le débit de pointe. Un hydrogramme est classifié d'unitaire si la durée de la précipitation est inférieure à 25 % du temps de montée.

Le temps de concentration (tc) est le temps que prend la goutte la plus éloignée pour rejoindre l'exutoire du bassin versant. Le temps de montée et le temps de concentration sont intimement reliés au même concept hydrologique de base. Les hydrologues utilisent le terme « temps de montée », alors que les ingénieurs utilisent principalement « temps de concentration ». Russel et *al.* (2006) présentent une revue de littérature des différents paramètres de temps associés aux hydrogrammes et ils montrent les difficultés car les différents termes présentent souvent différentes définitions et parfois des concepts forts différents. Le temps de concentration est un de ces paramètres ayant plusieurs définitions. Il a une définition hydraulique très largement utilisée (celle retenue dans ce projet) et des définitions liées à l'hydrogramme et n'ayant pas nécessairement de lien avec la définition hydraulique. Le lien entre le temps de montée (tp) et le temps de concentration n'est pas défini explicitement et lorsqu'il l'est, il est défini par un lien avec un autre paramètre de temps comme le « lagtime » dont la définition varie aussi. Avec les définitions utilisées par le USDA-NRCS (2007) et selon Russel et *al.* (2006), la relation est influencée par la forme de l'hydrogramme $tc = [1,15-1,82] tp$. Le USDA-NRCS (2007) suggère $tp = 0,6 tp$ ou $tc = 1,67 tp$. Avec certaines autres définitions du « lagtime », les temps de concentration (tc) et temps de montée sont très semblables. Ce projet ne peut résoudre les contradictions et a dû s'en tenir à certaines définitions dans une perspective de détermination des débits de crue. Comme tous les hydrogrammes unitaires, incluant celui du NRCS (2007), sont construits en fonction du temps de montée et que le débit de pointe ou de crue est fonction de l'hydrogramme, c'est le terme « temps de montée (tp) » qui a été retenu comme référence. Différentes méthodes

sont proposées pour mesurer le temps de concentration, certaines plus complexes que d'autres mais toutes reliées à l'hydrogramme et/ou au temps de montée. De plus, le concept de temps de montée est facilement observable sur les hydrogrammes typiques et est représentatif de la signature d'un bassin versant. Cette étude a aussi retenu l'hypothèse que les temps de montée et de concentration convergent. Il faut souligner que cette hypothèse est contestée par certains.

Les principales méthodes utilisées au Québec par les intervenants du milieu agricole pour l'estimation des temps de concentration (t_c) ont été utilisées sur les jeux de données des 10 bassins versants à l'étude, incluant :

- Kirpich;
- Mockus;
- SCS-lag;
- Bransby-Williams.

La méthode « Aéroport », aussi utilisée, n'a pas été retenue dans le cadre de la présente étude, car elle requiert en intrant le coefficient de ruissellement qui est déterminé subjectivement. La démarche retenue dans le cadre de la présente étude s'appuie plutôt sur des méthodes de prédiction du ruissellement et des temps de montée indépendants. Pour le design des ponceaux, le MTQ utilise les méthodes de Bransby-Williams et « Aéroport ». Dans cette étude, les temps de concentration déterminés par les différentes méthodes ont été évalués quant à leur capacité à prédire les temps de montée observés.

32.4.5 Coefficient de forme des hydrogrammes

La fonction de densité de probabilité Gamma à trois paramètres, telle que présentée au cadre théorique de l'étude (section 3.4), a été retenue afin de caractériser les paramètres des hydrogrammes et intégrée au logiciel d'analyse hydrologique VisuHydro. Quatre méthodes ont été utilisées pour déterminer le coefficient de forme et les paramètres de la fonction de densité de probabilité Gamma : méthode directe ou $q_p t_p$ ($\phi(\alpha) = q_p t_p$), la méthode des moments et la méthode des moindres carrés. Ces coefficients ont été déterminés pour 195 hydrogrammes de type simple pour dix bassins versants à l'étude.

32.4.6 Validation des débits de pointe

Dans le cadre de la présente étude, les débits annuels de crue (Q_{max}) observés pour les récurrences de 2 et 5 ans ont été comparés aux débits de crue prédits par l'équation suivante :

$$Q_{max} = Ru * A * \Phi / 360 * t_p$$

[7]

où :

- Q_{max} : le débit de crue (m^3/s);
- Ru : hauteur de ruissellement (mm)
- A : superficie du bassin versant (ha)
- t_p : temps de montée ou de concentration du bassin versant (h)
- Φ : coefficient de forme de l'hydrogramme
- 360 : facteur d'unité

La forme de l'équation précédente permet de représenter la très grande majorité des méthodes d'estimation des débits de crue sauf certains modèles de régression. Les différences se trouvent dans le coefficient de forme ($\phi(\alpha)$), la façon d'estimer la hauteur de ruissellement (R_u) et le temps de montée ou de concentration. La méthode rationnelle correspond à un coefficient de forme de 1,0, alors que la méthode de l'hydrogramme triangulaire ou unitaire du SCS correspond à un coefficient de forme de 0,75. La méthode rationnelle s'accommode de différentes méthodes d'estimation du temps de concentration et utilise une hauteur de ruissellement (H_{ru}) proportionnelle à la précipitation avec un coefficient de ruissellement. La méthode du SCS propose des méthodes pour la hauteur de ruissellement et le temps de concentration. Toutes les méthodes reposent sur l'hypothèse qu'une bonne estimation de la hauteur de ruissellement et le temps de concentration produiront une bonne estimation du débit de crue. Les prédictions de débits de crue font appel aux paramètres hydrologiques (H_{ru} , t_p , Φ) déterminés par les méthodes décrites précédemment. Rappelons que la méthode de prédiction du ruissellement a utilisé un grand nombre d'évènements ($N = 463$) alors que les estimations des temps de montée ($N = 193$) et le facteur de forme ($N = 195$) ont utilisé un nombre plus restreint d'évènements, répondant à certaines caractéristiques des hydrogrammes. Fondamentalement, la combinaison de ces facteurs validés individuellement devrait donner un résultat valable. Une validation objective exigerait normalement l'utilisation de bassins versants n'ayant pas été utilisés lors de l'étude des différents facteurs. Cette condition n'étant pas possible, la validation doit être réalisée par une approche plus faible. La validation repose donc sur l'hypothèse que pour un bassin versant donné, la précipitation de récurrence associée à la durée prédite du temps de montée associé au bassin versant, de même que la hauteur prédite de ruissellement proposé sur la base des résultats de cette étude, devraient prédire le débit de pointe observé pour cette récurrence.

Pour cette validation, les bassins versants ayant plus de deux ans de données (six bassins) ont été retenus. Pour chaque bassin versant, les débits maximums observés (Q_{max}) de ruissellement de chaque année ont été identifiés pour générer des séries annuelles. Pour chaque série, les données ont été ordonnées, et les fréquences de dépassement de même que les récurrences ont été calculées. Par la suite, les débits maximums de deux ans et cinq ans de récurrence ont été déterminés, en recourant au besoin à l'interpolation des débits maximum pour des récurrences autres que 2 et 5 ans. Les temps de montée ont été déterminés à l'aide du modèle de régression linéaire développé dans le cadre de ce projet et mettant à profit l'ensemble des observations des bassins versants à l'étude.

En support aux prédictions des débits de pointe, les courbes de distribution IDF des précipitations générées dans le cadre du volet météorologique du présent projet pour les stations Vallée-Jonction (Fourchette) et de Granby (Castor, Ewing et Walbridge) ont été utilisées pour générer les précipitations de récurrence de 2 ans et 5 ans pour les durées prédites du temps de montée de chacun des bassins versants à l'étude. La hauteur de ruissellement a été estimée suivant les équations de régression, développées dans le cadre de la présente étude et décrites à la section 5.4. De façon à mieux refléter les valeurs extrêmes de débits, les courbes enveloppes de la hauteur de ruissellement ont été utilisées à la place des courbes moyennes dans le modèle de prédiction de la hauteur de ruissellement. Pour les bassins du ruisseau Fourchette, l'équation du modèle appalachien a été utilisée, alors que les estimations de H_{ru} des quatre autres bassins sont basées sur le modèle montérégien. Finalement, le coefficient de forme moyen déterminé expérimentalement sur les

dix bassins versants a été utilisé. Le ratio entre les débits prédits et observés a été identifié afin d'établir les comparaisons.

L'ensemble des méthodes de calcul des prédictions hydrologiques proposées, développées et validées dans le volet hydrologique du projet ont été intégrées à l'utilitaire *QmaxPBV* (pour Q_{max} des petits bassins versants) conçu spécifiquement dans le cadre de ce projet de recherche. Une description plus détaillée des fonctions de l'utilitaire *QmaxPBV* est présentée à la section « *Résultats* ». Deux rencontres avec un groupe de futurs usagers (Table sectorielle des conseillers en génie du MAPAQ) ont eu lieu respectivement le 17 mars 2010 et le 3 février 2011 afin de préciser les besoins et les interfaces.

32.5 La classification hydrologique des séries de sols minéraux du Québec

32.5.1 *Données et méthode*

Une première classification des séries de sols minéraux du Québec par groupe hydrologique avait été effectuée par l'IRDA dans le cadre du projet ODEP (Outil de Diagnostic des Exportations de Phosphore; Michaud et *al.*, 2008). Les données moyennes de conductivité hydraulique saturée mesurée de chacune des 157 séries de sols minéraux cultivés en prairies retrouvées dans l'étude *Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec* (Tabi et *al.*, 1990) ont été utilisées pour attribuer un groupe hydrologique à chacune des séries. La classification de ces séries de sols selon les groupes hydrologiques a été effectuée selon la méthodologie définie dans le document du USDA-NRCS (2007). Ce classement a ensuite été utilisé pour servir d'assise et à des fins comparatives afin d'attribuer à l'ensemble des 650 séries de sols minéraux du Québec un des groupes hydrologiques. Des règles de classification utilisant des descripteurs retrouvés dans la base de données du *Dossier des noms de sols du Québec* de Lamontagne et Nolin (1997) ont été graduellement produites, ce puisque des données de conductivité hydraulique saturée ne sont pas disponibles pour l'ensemble des séries de sols minéraux du Québec. Par la suite, les résultats de ces deux classifications ont été comparés statistiquement et analysés par sous-groupes afin d'améliorer et d'ajuster la classification selon les règles. La figure 17 présente un schéma de la méthodologie utilisée.

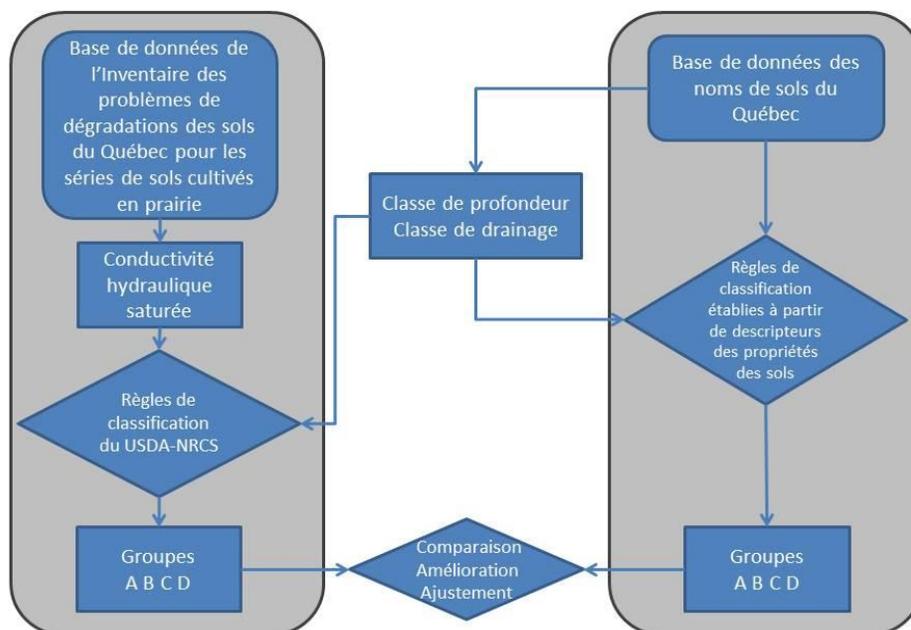


Figure 17. Schéma simplifié de la méthodologie utilisée pour la classification des séries des sols minéraux du Québec dans un des groupes hydrologiques USDA-NRCS

32.5.2 Les données de l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec

Cet inventaire a été réalisé dans le cadre de l'Entente auxiliaire Canada-Québec sur le développement agroalimentaire 1987-1990 par le Service des sols, direction de la recherche et du développement, du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation⁵. Les travaux ont été réalisés sur une période de plus de trois ans et une vingtaine de personnes par année ont contribué à ceux-ci (coordination, terrain, laboratoire, traitement, rédaction).

L'objectif principal était d'identifier les facteurs responsables de la dégradation de la qualité du sol agricole et de préciser la nature et l'envergure des phénomènes dans chaque région agricole du Québec afin de tenir compte des risques et de guider la recherche et l'application de solutions pertinentes aux problèmes de compactage, de diminution de la matière organique, de détérioration de la structure, d'acidification, d'érosion et de contamination ou de pollution (Tabi et *al.*, 1990).

L'étude a porté sur les sols minéraux en culture. Les sols organiques n'ont pas été considérés étant donné leur faible superficie en culture et leurs particularités. Les séries de sols

⁵ <http://www.irda.qc.ca/fr/outils-et-services/informations-sur-les-sols/inventaire-des-problemes-de-degradations-des-sols-agricoles-du-quebec/>

identifiées, caractérisées et cartographiées dans les études pédologiques précédemment réalisées ont servi de base à cette étude. La série de sols, groupant des sols essentiellement de même type et de propriétés semblables, a permis d'atteindre l'objectif par échantillonnage d'un nombre limité de champs, choisis selon les cultures. Les sols sous prairie depuis plusieurs années étant considérés comme étant non dégradés, puisque les productions herbagères sont moins susceptibles de dégrader les sols, ces couples sols-prairies ont donc été considérés comme les témoins. Les résultats analytiques physico-chimiques obtenus avec ces couples sols-prairies ont été comparés avec ceux provenant de séries de sols en monoculture annuelle (principalement maïs, céréales et pommes de terre) afin d'évaluer la dégradation causée par la monoculture.

Cent-soixante-quatre des principaux types de sols du Québec, principalement des séries de sols pour un nombre total de 189 en incluant les phases et variantes, ont été étudiés et les résultats ont été présentés dans 12 rapports régionaux et un rapport synthèse. Ces séries de sols représentaient environ 80 % des superficies en culture du Québec. Pour chaque série de sols à l'étude, au moins deux champs pour chacune des cultures comparées ont été sélectionnés chez deux producteurs agricoles différents par les agronomes-pédologues responsables de l'identification des séries de sols sur le terrain. Dans chacun de ces champs, sept sites espacés d'au moins 80 mètres ont fait l'objet d'une caractérisation de propriétés physiques et chimiques. À chaque site, de deux à trois couches de sols ont été définies et ont fait l'objet de mesures directement sur le terrain et de prélèvements (échantillons en vrac et non perturbés prélevés par cylindre) afin d'effectuer des analyses au laboratoire. La première fut la couche de surface (ou de labour) jusqu'à une profondeur maximale de 30 cm. Ensuite, la deuxième couche fût constituée de la couche sous la couche de surface jusqu'à 40 cm. Enfin, la troisième couche considérée a été celle située entre 40 et 60 cm de profondeur, sauf pour les sols à texture grossière et ceux issus de tills.

Il y a eu 978 champs étudiés avec 7 sites par champ, soit 6 846 sites. De 2 à 3 couches ont été caractérisées, soit plus de 17 000 couches. Jusqu'à 38 variables ont été mesurées par couche, pour un total de plus de 540 000 données. Les propriétés des sols mesurées ou évaluées pour chacune de ces couches furent nombreuses, mentionnons la granulométrie (% de sable, limon et argile), le pourcentage de carbone organique, la teneur en eau, la masse volumique apparente (densité apparente), la porosité, la conductivité hydraulique saturée, le diamètre moyen des particules (DMP), la stabilité des agrégats selon leur dimension, le pH, la capacité d'échange cationique (CEC), le pourcentage de saturation en bases, et la quantification de plusieurs éléments, incluant des métaux lourds (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Al, Mn, Cu, B, Zn, Mo, Co, Cr, Pb et Cd). En regard de la classification des séries de sols par groupe hydrologique selon la méthodologie de l'USDA, nous avons retenu spécifiquement les mesures de la conductivité hydraulique saturée de chacune des couches avec un infiltromètre à charge constante (Côté, 1977) pour les sols en prairie. La plus faible conductivité hydraulique saturée moyenne mesurée des couches d'une série de sols donnée a été utilisée pour ce classement. Des données sur les trois couches étaient disponibles pour 81 des 159 séries de sols, soit jusqu'à 60 cm, tandis que des données étaient disponibles pour les 2 premières couches pour 155 des 159 séries de sols et pour les 159 dans le cas de la première couche.

32.5.3 Base de données des noms de sol du Québec

La compilation et la description de l'ensemble des noms de sols (séries, complexes, terrains) retrouvés dans les études pédologiques officielles du Québec est un travail essentiel afin de les documenter, de les maintenir à jour et de structurer les informations et les descripteurs associés à chacun de ceux-ci. Pour le Québec, ce travail a été sous la responsabilité de Luc Lamontagne jusqu'à 2011, pédologue maintenant retraité d'AAC. Il a été secondé dans cette tâche notamment par son collègue pédologue Michel Nolin d'AAC et par le pédologue Gérard Laflamme du MAPAQ et en continuité à l'IRDA.

Inspiré du Système d'information des sols du Canada (SISCan), cette base de données a fait l'objet d'une publication papier en 1997, soit le *Dossier des noms de sols du Québec 1997* (Lamontagne et Nolin, 1997). Des informations semblables sont aussi disponibles gratuitement sur le site Web de l'IRDA (banque de données sur les sols). Ce fichier permet notamment de faire des liens informatiques avec les fichiers cartographiques numériques vectoriels 1 : 20 000 et ainsi d'effectuer des traitements et des analyses afin d'obtenir des représentations cartographiques sur la base des cartes pédologiques d'origine.

La base de données du *Dossier des noms de sols du Québec 1997* regroupe actuellement 689 noms de sols, soit 665 séries de sols (650 minéraux et 15 organiques), 5 complexes et 19 types de terrain. À chacun de ces noms de sols, un code SISCan (ou CanSIS en anglais) unique est associé et celui-ci permet la jonction entre différentes bases de données et les cartes numériques en format vectoriel. Les séries de sols sont la catégorie la plus détaillée du *Système canadien de classification des sols* (GTCS, 2002), les complexes de sols sont des caténas (même matériau parental pour des sols différents selon le drainage naturel, mais impossible à cartographier distinctement selon l'échelle utilisée) tandis que les types de terrain (aussi désigné comme étant un groupe cartographique) sont des associations de sols (avec parfois des non-sols comme les affleurements rocheux) reposants sur des matériaux parentaux parfois différents et impossibles à cartographier distinctement selon l'échelle utilisée. Les autres appellations retrouvées sur les cartes de sols font référence à une désignation générique comme les affleurements rocheux, les alluvions non différenciées, des sols non différenciés par série comme des appellations de sols organiques (terres noires, tourbes, marécages, etc.), des zones anthropiques ou urbanisées, des ravins, des carrières, gravières et sablières, etc.

32.5.4 Les règles de classification et le classement obtenu

Le classement par groupe hydrologique des 157 séries de sols minéraux de l'Inventaire a été obtenu notamment avec la plus petite valeur moyenne des mesures de conductivité hydraulique saturée de chacune des couches disponibles selon la profondeur du sol. Les résultats de ce classement (A, B, C, D) a été mis en relation avec les variables de différenciation qualitatives compilées par Lamontagne et Nolin (1997). À l'aide de ce fichier, les variables qualitatives les plus corrélées ou associées aux différents groupes hydrologiques des séries de sols minéraux de l'Inventaire ont été sélectionnées par jugement et essais-erreurs afin d'établir des règles générales de classification pour l'ensemble des 650 séries de sols minéraux à classer dans un des groupes hydrologiques. Puisque la granulométrie fine ($\leq 2\text{mm}$), soit les pourcentages d'argile, de limon et de sable et par le fait même les classes

texturales, n'est pas une donnée corrélée à la conductivité hydraulique saturée, donc à la perméabilité, il a ainsi fallu établir d'autres relations afin de classer le plus adéquatement possible l'ensemble des séries de sols minéraux du Québec. Le mode de déposition (marin, fluvio-marin, glacio-marin, estuarien, fluvatile, fluvio-lacustre, lacustre, glacio-lacustre, morainique, fluvio-glaciaire, éolien, glacié, colluvion, résiduel et alluvion récente, soit 15 modes) s'est avéré le meilleur descripteur qualitatif permettant de discriminer dans un premier temps les séries de sols minéraux par groupe hydrologique. La classe de profondeur du sol, la classe granulométrique du premier dépôt, la classe de drainage, la classe calcaire et le sous-groupe taxonomique ont été les autres variables retenues.

Selon chacun des groupes hydrologiques, les résultats par nombre de séries sont les suivants : A = 76, B = 158, B/D = 1, C = 297, C/D = 11 et D = 43. Les 64 séries de sols issues de dépôts glacio-lacustres n'ont pas pu être discriminées dans un groupe hydrologique spécifique, ils ont été classés C ou D, le choix étant laissé à l'utilisateur selon son expertise. Les 22 séries de sols non classées selon des règles préétablies (sols résiduels, etc.) ont été classées individuellement selon les classements obtenues pour des sols semblables. Une description détaillée de la méthode de classification développée ainsi que les nombreux résultats obtenus sont présentés dans un rapport spécifique (Gagné et al., 2013).

33 Résultats

33.1 La mise à jour des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF)

33.1.1 *Analyse des tendances*

En préalable au calcul des estimateurs IDF, il est important de s'assurer que les séries disponibles satisfont à certaines hypothèses statistiques de base, dont la stationnarité des séries. L'analyse des tendances vise essentiellement à déterminer si les séries sont stationnaires, c'est-à-dire si les caractéristiques statistiques de ces séries (moyenne, variance, moments d'ordre supérieur) dépendent du temps (Meylan *et al.* 2008). Il est important de vérifier cette hypothèse dans un contexte où les changements climatiques pourraient modifier les probabilités d'occurrence des pluies intenses. Plusieurs tests sont disponibles permettant de vérifier cette hypothèse. Le test non paramétrique de Mann-Kendal a été retenu. Ce dernier est un test non paramétrique très simple qui permet de détecter des tendances dans la moyenne (Meylan *et al.* 2008). Les résultats montrent que, globalement, 7 % des séries présentent une tendance significative à un seuil de confiance de 95 %. Toutefois, un examen des tendances pour chaque durée (Tableau 17) suggère qu'il n'existe pas de tendance significative globale pour la plupart des durées, sauf la durée 5 minutes pour laquelle le nombre de tendances détectées dépasse largement le seuil attendu; le nombre de tendances positives et négatives est cependant égal.

Tableau 17. Pourcentage de stations avec tendances significatives (seuil de 95 %) selon le test de Mann-Kendall (stations du sud-Québec)

Durée	Nombre (%) de stations avec tendance	Nombre de stations avec tendances positives	Nombre de stations avec tendances négatives
5 minutes	14 (18.6)	7	7
10 minutes	7 (9.3)	4	3
15 minutes	6 (8.0)	2	4
30 minutes	7 (9.3)	5	2
1 heure	2 (2.7)	1	1
2 heures	4 (5.3)	2	2
6 heures	7 (7.1)	6	1
12 heures	6 (6.1)	5	1
24 heures	5 (5.3)	3	2

La liste des stations avec tendances significatives est rapportée dans le rapport détaillé de Mailhot et Talbot (2011a et b). Un examen plus attentif des séries de durée 5 minutes suggère l'existence de ruptures dans plusieurs séries. Compte tenu du caractère très particulier des séries aux 5 minutes qui montrent une tendance, il a été décidé de ne pas considérer la durée 5 minutes dans la suite des travaux. Par ailleurs, pour les autres durées, les séries présentant des tendances ont été exclues des analyses.

33.1.2 Analyse fréquentielle régionale et homogénéité de la région

Les valeurs des estimateurs IDF de cette étude ont été calculés à partir de l'analyse fréquentielle régionale (AFR; pour une description détaillée de cette approche voir Hosking et Wallis, 1997). Le principal avantage de cette approche est qu'elle permet de regrouper les séries de plusieurs stations dans l'estimation de certains paramètres et d'ainsi réduire les incertitudes sur ces valeurs de paramètres, permettant du coup une estimation plus fiable des intensités notamment celles associées aux périodes de retour plus élevées. L'utilisation de l'AFR justifie l'utilisation de la distribution GEV, l'estimation du paramètre de forme étant facilitée par le regroupement des données de séries à plusieurs stations. La mise en place d'une telle approche exige toutefois qu'un certain nombre d'hypothèses soit vérifiées.

L'homogénéité de la région a été évaluée en utilisant la statistique de Hosking et Wallis (1997). Les critères révisés par Wallis *et al.* (2007) pour les cas des maxima annuels sont les suivants : 1) si, la région est *acceptablement homogène*; 2) si, la région est *possiblement hétérogène*; et 3) si, la région est *définitivement hétérogène*. On a donc les résultats suivants pour le territoire du sud du Québec : 1) les durées 15, 30 minutes, 1, 2, 6 et 12 heures sont *acceptablement homogènes*; 2) les durées 10 minutes et 24 heures sont *possiblement hétérogènes*; 3) la durée 5 minutes est *définitivement hétérogène*.

La région initialement considérée pour les durées 10 minutes et 24 heures a été subdivisée en deux sous-régions afin d'améliorer le critère d'homogénéité pour chacune. Trois critères ont été considérés pour le découpage : 1) que les sous-régions soient les mêmes pour les durées 10 minutes et 24 heures; 2) que le nombre de stations dans chaque sous-région soit comparable (afin d'éviter une sous-région avec beaucoup de stations et l'autre avec très peu de stations); 3) et que les deux sous-régions soit *acceptablement homogènes*. Différents axes ont été considérés pour découper le territoire (axe nord-sud, est-ouest, etc.) mais un découpage selon un axe sud-ouest nord-est (le long de l'axe du fleuve St-Laurent) a été retenu puisqu'il nous semblait correspondre à un découpage « naturel » à plusieurs égards. La figure 18 montre la carte du territoire ainsi subdivisé. Pour plus de détails sur l'homogénéité de la région, le lecteur est invité à se référer au rapport détaillé de Mailhot et Talbot (2011a et b).

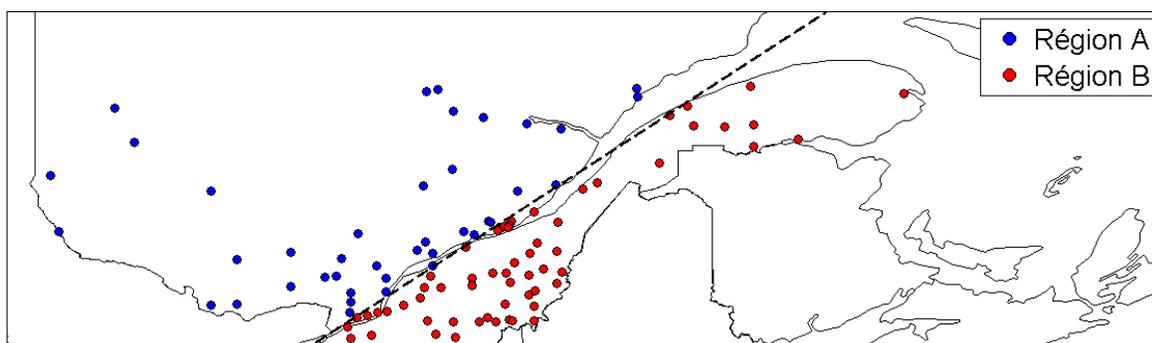


Figure 18. Carte des sous-régions considérées pour les durées 10 minutes et 24 heures (les stations comportant des séries aux 10 minutes et/ou des séries aux 24 heures sont représentées)

33.1.3 Répartition régionale

L'étape suivante consiste à sélectionner la répartition régionale. Dans le cas présent, puisque nous considérons des MA de précipitations, et compte tenu des assises théoriques qui militent en faveur de cette distribution, l'analyse a consisté à vérifier que la distribution GEV pouvait raisonnablement représenter les séries à l'échelle régionale. Le test Z est utilisé pour vérifier cette hypothèse (voir Hosking et Wallis, 1997). Rappelons que selon Hosking et Wallis (1997), une valeur de $Z \geq 1.64$ indique que la distribution considérée peut être utilisée pour représenter les séries à l'échelle régionale. À la lumière de ce critère, il appert que la distribution GEV peut être retenue pour toutes les durées. Dans le cas de la durée 2 heures, le critère n'est pas satisfait de façon stricte, mais la distribution GEV a tout de même été considérée. Une fois qu'il est établi que la région est homogène et que la distribution GEV peut être utilisée dans la répartition régionale, les valeurs régionales des paramètres de la distribution GEV peuvent être estimées à l'aide de la méthode des *L-moments* (Hosking et Wallis, 1997; voir Annexe D du rapport détaillé). Le tableau 18 présente ces valeurs pour les différentes durées et sous-régions.

Tableau 18. Valeurs régionales des paramètres et nombre de stations considéré.

Durée	Sous-régions	ξ_R	α_R	K_R	Nombre de stations
10 minutes	A	0.848	0.270	0.013	39
	B	0.827	0.261	-0.080	29
15 minutes	A+B	0.841	0.266	-0.021	69
30 minutes	A+B	0.836	0.274	-0.021	68
1 heure	A+B	0.831	0.272	-0.041	73
2 heures	A+B	0.837	0.251	-0.069	71
6 heures	A+B	0.840	0.247	-0.066	92
12 heures	A+B	0.844	0.247	-0.052	88
24 heures	A	0.855	0.253	0.003	55
	B	0.844	0.245	-0.056	34

33.1.4 Estimation des valeurs de paramètres de la GEV

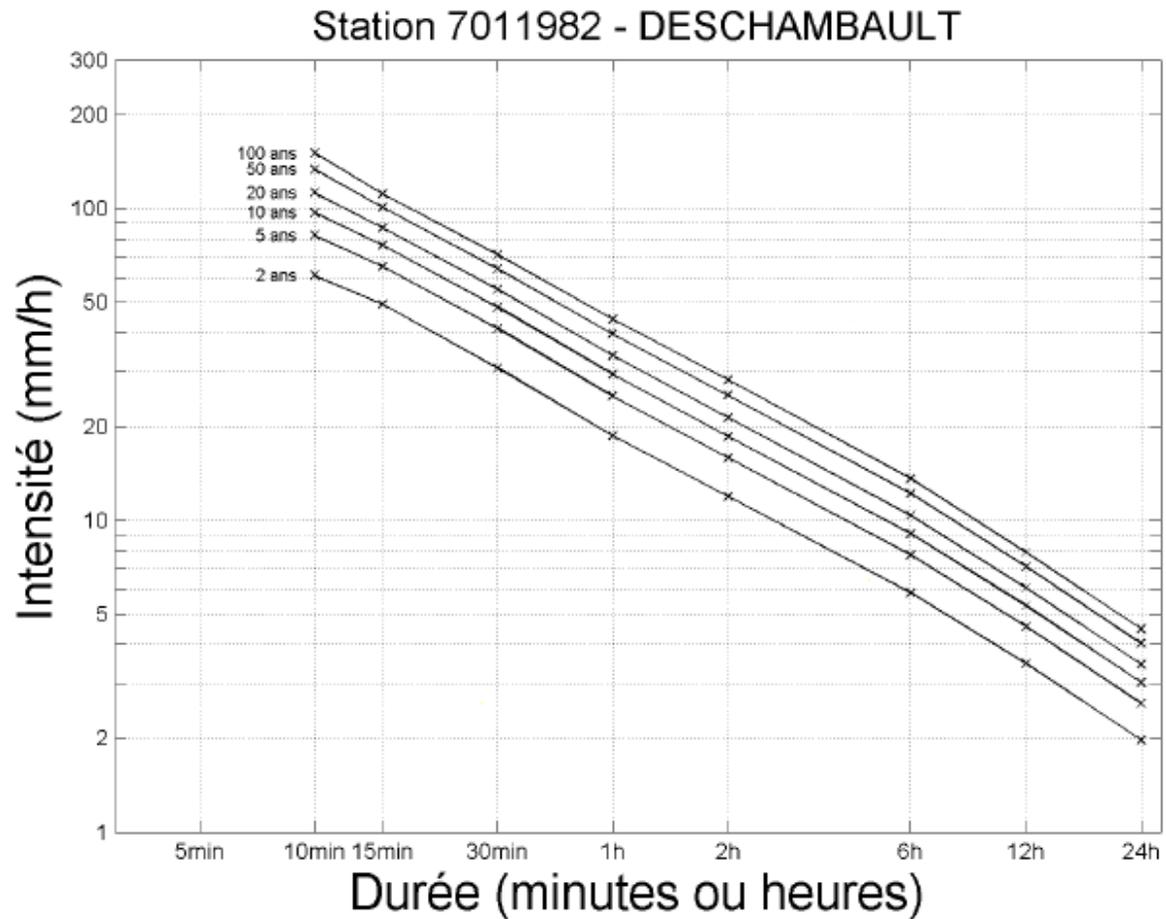
Les estimateurs IDF sont calculés à partir de l'expression suivante :

$$x_i(T) = I_{1i} \left\{ \xi_R + \frac{\alpha_R}{K_R} \left\{ 1 - \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]^{K_R} \right\} \right\}$$

[9]

où $\{\xi_R, \alpha_R, K_R\}$ sont les valeurs régionales des paramètres (Tableau 18) et la moyenne à la station et la période de retour en années (voir Annexe E de Mailhot et Talbot, 2011b). Ces valeurs ont été utilisées pour calculer les estimateurs IDF et HDF à chaque station. Ces résultats sont regroupés aux chapitres 3 et 4 du Tome II du rapport détaillé de Mailhot et Talbot (2011b). La figure 19 et le tableau 20 présente un exemple de résultats obtenus pour la station de Deschambault (7011982) L'ensemble des résultats de la mise à jour des courbes

IDF sont présentés dans le Tome II du rapport de Mailhot et Talbot (2011b) de même que sur le site de l'Atlas agroclimatique du Québec : <http://agrometeo.org/>.



Numéro de la station : 7011982

Nombre d'années disponibles :22

Nom de la station : DESCHAMBAULT

Quantité de pluie par période de retour (mm) avec intervalle de confiance de 95% (entre crochets)

Durée	Temps de retour					
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
10 minutes	10.2	13.7	16.2	18.7	22.3	25.1
	[8.8,11.9]	[11.7,16.1]	[13.8,19.0]	[15.9,22.0]	[18.5,26.2]	[20.6,29.6]
15 minutes	12.3	16.3	19.1	21.7	25.2	27.9
	[10.6,14.3]	[14.1,18.9]	[16.4,22.0]	[18.6,25.0]	[21.4,29.1]	[23.5,32.2]
30 minutes	15.4	20.6	24.2	27.6	32.1	35.5
	[13.3,17.9]	[17.7,23.9]	[20.7,28.0]	[23.5,31.9]	[27.2,37.1]	[29.9,41.0]
1 heure	18.6	25.0	29.5	33.8	39.7	44.2
	[16.0,21.7]	[21.5,29.2]	[25.2,34.3]	[28.8,39.3]	[33.5,46.0]	[37.1,51.1]
2 heures	23.9	31.7	37.2	42.8	50.4	56.4
	[20.8,27.8]	[27.5,36.9]	[32.1,43.2]	[36.7,49.6]	[42.9,58.3]	[47.6,65.2]
6 heures	35.2	46.4	54.3	62.3	73.2	81.8
	[30.7,40.8]	[40.3,53.9]	[47.0,63.0]	[53.5,72.0]	[62.3,84.5]	[69.0,94.4]
12 heures	41.7	54.8	63.9	72.9	85.2	94.8
	[36.4,48.0]	[47.7,63.1]	[55.4,73.4]	[62.9,83.8]	[72.8,97.7]	[80.2,108.6]
24 heures	47.3	62.1	72.4	82.7	96.7	107.6
	[41.3,54.7]	[54.0,71.9]	[62.5,83.8]	[70.8,96.0]	[81.4,112.7]	[89.5,126.4]

Intensité de pluie par période de retour (mm/heure) avec intervalle de confiance de 95% (entre crochets)

Durée	Temps de retour					
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
10 minutes	61.0	82.1	97.2	112.5	133.6	150.5
	[52.5,71.7]	[70.5,96.5]	[82.9,114.0]	[95.1,132.1]	[111.3,157.2]	[123.5,177.6]
15 minutes	49.3	65.4	76.3	86.9	100.9	111.5
	[42.6,57.1]	[56.5,75.7]	[65.6,88.2]	[74.4,100.2]	[85.7,116.3]	[94.0,128.6]
30 minutes	30.9	41.3	48.3	55.2	64.2	71.1
	[26.6,35.8]	[35.5,47.9]	[41.4,56.0]	[47.1,63.9]	[54.4,74.2]	[59.8,82.0]
1 heure	18.6	25.0	29.5	33.8	39.7	44.2
	[16.0,21.7]	[21.5,29.2]	[25.2,34.3]	[28.8,39.3]	[33.5,46.0]	[37.1,51.1]
2 heures	11.9	15.8	18.6	21.4	25.2	28.2
	[10.4,13.9]	[13.7,18.4]	[16.1,21.6]	[18.4,24.8]	[21.4,29.2]	[23.8,32.6]
6 heures	5.9	7.7	9.1	10.4	12.2	13.6
	[5.1,6.8]	[6.7,9.0]	[7.8,10.5]	[8.9,12.0]	[10.4,14.1]	[11.5,15.7]
12 heures	3.5	4.6	5.3	6.1	7.1	7.9
	[3.0,4.0]	[4.0,5.3]	[4.6,6.1]	[5.2,7.0]	[6.1,8.1]	[6.7,9.1]
24 heures	2.0	2.6	3.0	3.4	4.0	4.5
	[1.7,2.3]	[2.2,3.0]	[2.6,3.5]	[3.0,4.0]	[3.4,4.7]	[3.7,5.3]

Note : -99.9 indique que les séries de données pour cette durée ne rencontrent pas les standards

Figure 19. Courbes IDF et estimateurs IDF et HDF pour la station Deschambault (7011982)

33.1.5 Fréquences mensuelles d'occurrences des maxima annuels.

Les patrons mensuels d'occurrence des maxima annuels ont été évalués pour les régions administratives du Québec. Le nombre de fois où les maxima annuels aux diverses stations appartenant à une région donnée sont survenus à chacun des mois de la période mai à octobre est estimé. Les résultats de ces analyses pour chacune des régions administratives sont présentés dans le Tome II du rapport complet sur la mise à jour des courbes IDF (Mailhot et Talbot, 2011b). Les figures 20, 21 et 22 reprennent certains de ces résultats et permettent une comparaison rapide des patrons mensuels d'apparition des maxima annuels pour chaque région. Ces graphiques montrent que les maxima annuels de courtes durées (15 minutes et 1 heure) surviennent plus fréquemment pendant les mois d'été. Pour les durées plus longues (6 et 24 heures), on observe une diminution des probabilités d'occurrence au mois de juin et juillet au profit des mois de septembre et octobre. Ce type d'information est important lorsque l'on sait que, pour certaines applications hydrologiques, une pluie d'intensité donnée pourra avoir des impacts différents selon la saison où elle survient.

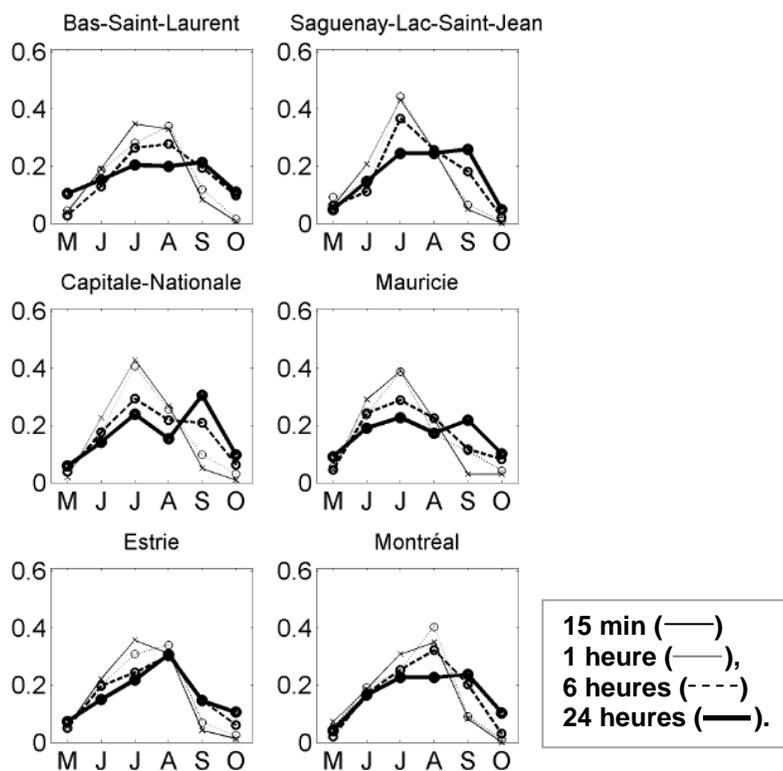


Figure 20. Fréquences mensuelles d'occurrence des maxima annuels pour les régions du Bas-St-Laurent, du Saguenay-Lac-St-Jean, de la Capitale-Nationale, de la Mauricie, de l'Estrie et de Montréal pour les durées de 15 minutes, 1 heure, 6 heures et 24 heures.

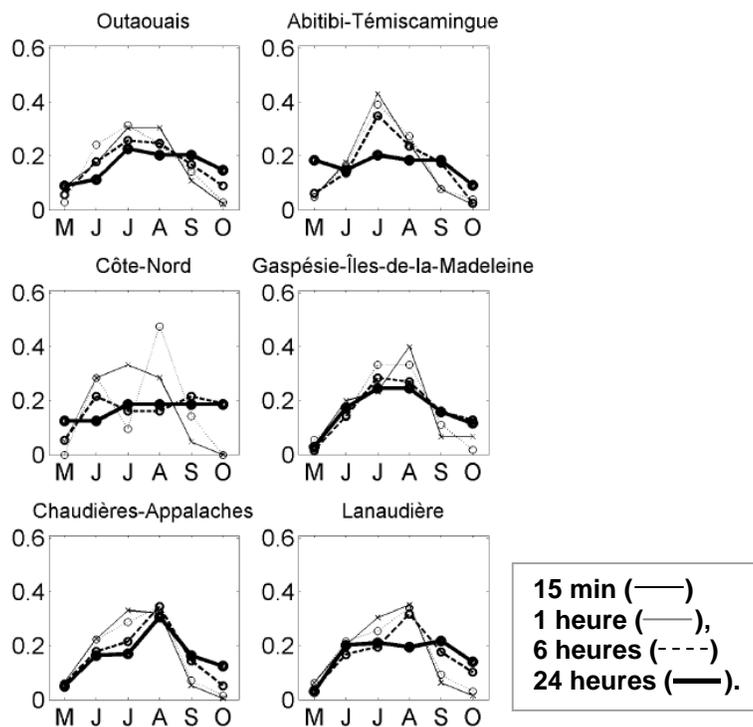


Figure 21. Fréquences mensuelles d'occurrence des maxima annuels pour les régions de l'Outaouais, de l'Abitibi-Témiscamingue, de la Côte-Nord, de la Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine, de Chaudières-Appalaches et de Lanaudière pour les durées 15 minutes, 1 heure, 6 heures et 24 heures.

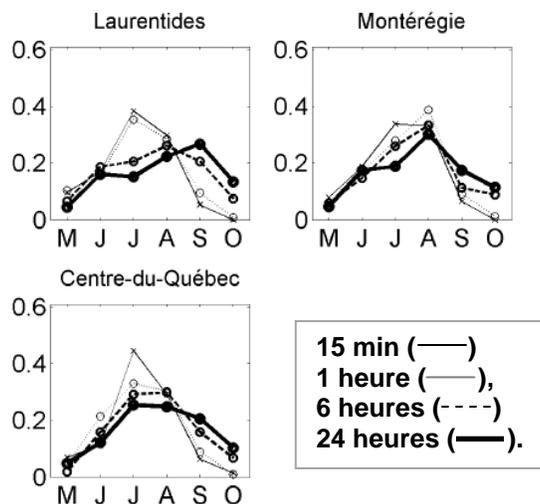


Figure 22. Fréquences mensuelles d'occurrence des maxima annuels pour les régions des Laurentides, de la Montérégie et du Centre-du-Québec pour les durées 15 minutes, 1 heure, 6 heures et 24 heures.

33.1.6 Comparaison des estimateurs IDF d'EC et de l'AFR

Une comparaison (globale) entre estimateurs d'EC et AFR a été réalisée puisqu'une telle comparaison pourra revêtir une certaine importance aux yeux de nombreux usagers habitués à utiliser les estimateurs d'EC. La comparaison des intervalles de confiance des estimateurs EC et AFR, également présentée au chapitre 4 du Tome II de Mailhot et Talbot (2011b), confirme que ces derniers sont inférieurs à ceux d'EC.

33.1.7 Les incertitudes

L'évaluation des incertitudes demeurent un aspect important lors de l'utilisation des estimateurs IDF en conception et l'analyse de risque qui en découle. Plusieurs sources d'incertitudes doivent être considérées à savoir : 1) les incertitudes sur la mesure; 2) les incertitudes liées à la construction des séries IDF; et 3) les incertitudes d'échantillonnage. Les incertitudes sur la mesure n'ont pas été directement abordées dans la présente étude bien qu'elles puissent parfois être importantes (Habib *et al.*, 2007). Les incertitudes liées à la construction des séries des MA trouvent leur origine dans le format des séries disponibles. Quant aux incertitudes statistiques d'échantillonnage, elles sont attribuables au fait que nous disposons d'une série (un échantillon) de longueur finie. Ces incertitudes sont d'autant plus importantes que nous tentons d'estimer les intensités associées aux grandes périodes de retour, peu (ou pas du tout) représentées dans la série disponible. Ces incertitudes sont présentées aux tableaux du chapitre 3 du Tome II du rapport de Mailhot et Talbot (2011b). Afin d'avoir une appréciation des incertitudes pour un point à distance des stations répertoriées dans le présent document, nous suggérons de localiser les stations les plus près de ce point et de se référer aux valeurs des intervalles de confiance pour ces stations. Une moyenne des valeurs relatives de ces intervalles de confiance donnera une bonne estimation des incertitudes à considérer.

33.2 Les courbes IDF en climat futur

33.2.1 Évaluation des simulations de référence

Les simulations du MRCC ont été comparées aux observations des stations météorologiques dans les différentes régions agricoles. En raison du peu d'observations de précipitations pendant l'hiver, les extrêmes annuels sont définis dans ce chapitre comme étant les valeurs maximales durant la période de mai à octobre. La position géographique des stations est illustrée à la figure 23.

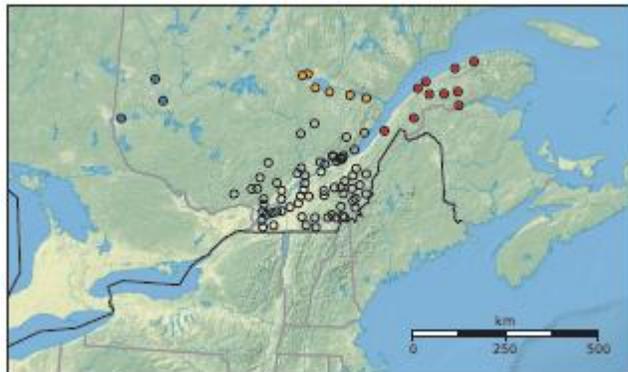


Figure 23. Carte identifiant les stations météorologiques appartenant à chacune des quatre régions d'étude : la vallée du St-Laurent (vide), l'Abitibi-Témiscamingue (bleu), le Saguenay – Lac St-Jean (orange) et la Gaspésie (rouge)

Une évaluation de la répartition des extrêmes simulés est présentée à la figure 25 pour la région de la vallée du St-Laurent. Les figures concernant les autres régions sont incluses en annexe du rapport détaillé de Huard (2011). La figure montre les distributions empiriques des maxima annuels observés et simulés. On observe d'abord la sous-estimation systématique des précipitations extrêmes par le modèle par rapport aux observations. Les précipitations sont non seulement sous-estimées, mais la variabilité est également inférieure à ce qui est observé. Cette sous-estimation est convenue. En effet, il faut rappeler ici que les stations mesurent la précipitation sur quelques centimètres carrés, alors que le modèle simule la pluie moyenne sur une surface de 45 par 45 km. Une moyenne présentant moins de variabilité qu'une valeur ponctuelle, il est normal que les extrêmes annuels simulés soient inférieurs aux extrêmes observés. Cet effet est particulièrement important en été, lorsque les extrêmes sont générés par des orages localisés de courte durée. On voit donc qu'il est difficile d'évaluer la performance du modèle en l'absence de précipitations extrêmes à la même échelle que les simulations.

Cette question d'échelle est extrêmement importante. Selon Chen and Knutson (2008), la moitié des modèles globaux participants au rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) représentent bien les extrêmes de précipitations sur les États-Unis lorsqu'on les compare avec des observations à la même échelle que les modèles. En contrepartie, tous les modèles sous-estiment les extrêmes lorsque comparés avec des observations à haute résolution. Afin de tenir compte de ces différences d'échelle, les données quotidiennes de précipitations de la banque de données SNITE ont été agrégées à 45 km puis leur distribution estimée sur le territoire de chaque région. Les résultats sont présentés dans le graphique du bas (24h) de la figure 24 qui montre bien l'excellente correspondance entre la distribution des extrêmes observés et simulés. Toutefois, il est probable que les champs de précipitations SNITE sous-estiment les précipitations extrêmes (Hutchinson et al., 2009) et il faut donc interpréter cette comparaison avec circonspection.

La comparaison des simulations avec les observations agrégées à la même échelle spatiale indique que le MRCC reproduit raisonnablement bien les maxima annuels de précipitations en climat de référence. L'utilisation de ces simulations pour étudier les précipitations en climat futur apparaît donc justifiée.

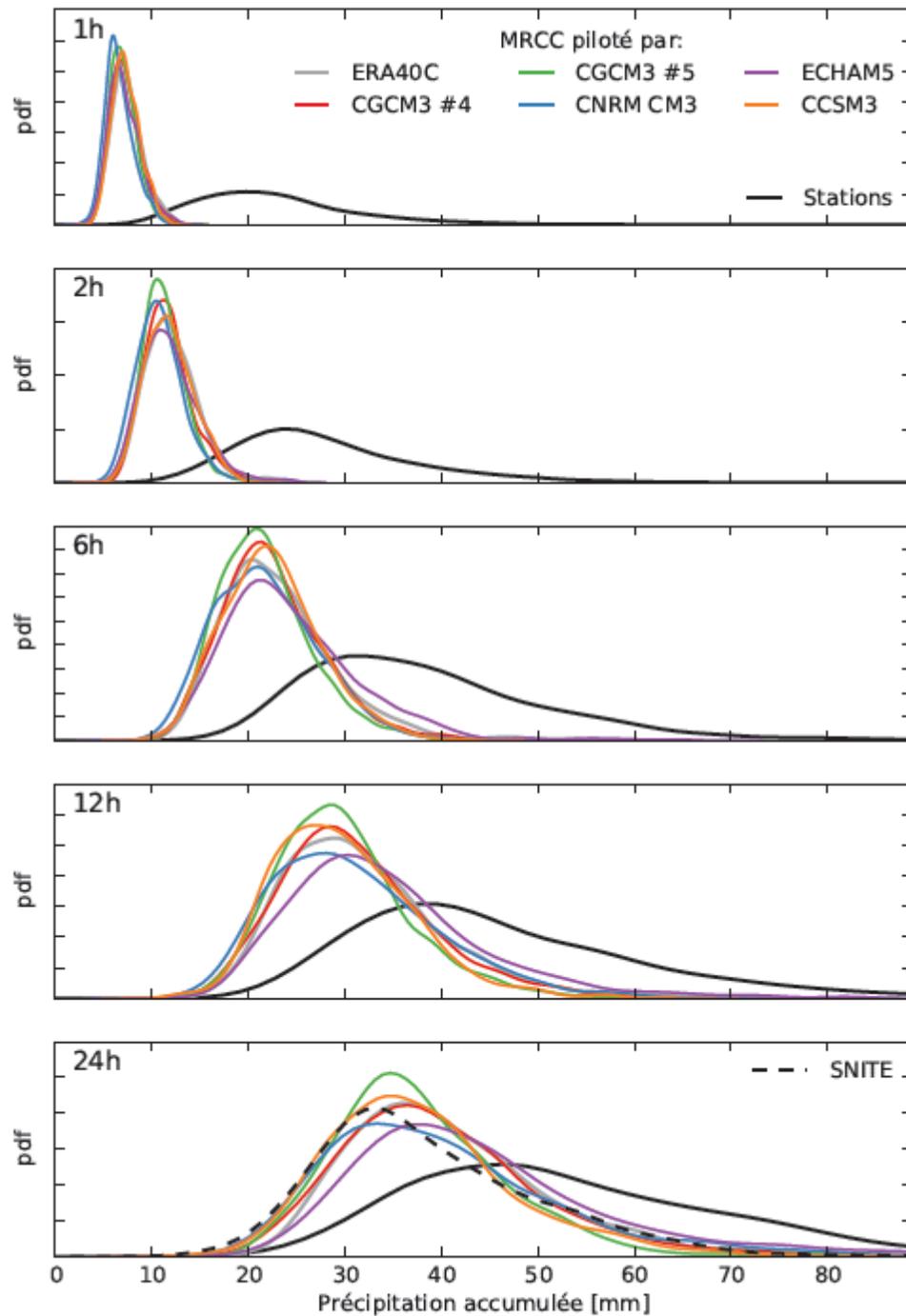


Figure 24. Comparaison des distributions empiriques des précipitations maximales annuelles (mai à octobre) observées et simulées par le MRCC pour des événements de durée 1, 2, 6, 12 et 24 heures. Pour les événements de 24h, la ligne pointillée montre la distribution des précipitations de la base de données SNITE agrégées à l'échelle du MRCC.

33.2.2 Projections climatiques

Moyenne des extrêmes annuels

Afin de donner une vue d'ensemble des changements attendus aux extrêmes de précipitations sur l'Amérique du Nord, les figures 25 et 26 montrent les cartes des moyennes des extrêmes annuels (sur 24h) ainsi que des différences entre les moyennes en climat présent et futur pour les cinq simulations de changements climatiques. Toutes s'entendent sur une augmentation des maxima annuels de précipitations de quelques millimètres pour le Québec. Les moyennes de ces extrêmes annuels sur la vallée du St-Laurent sont présentées au tableau 19. Des tableaux similaires pour les autres régions sont inclus en annexe du rapport détaillé de Huard (2011). Une synthèse est également disponible dans l'atlas agroclimatique du Québec (www.agrometeo.org).

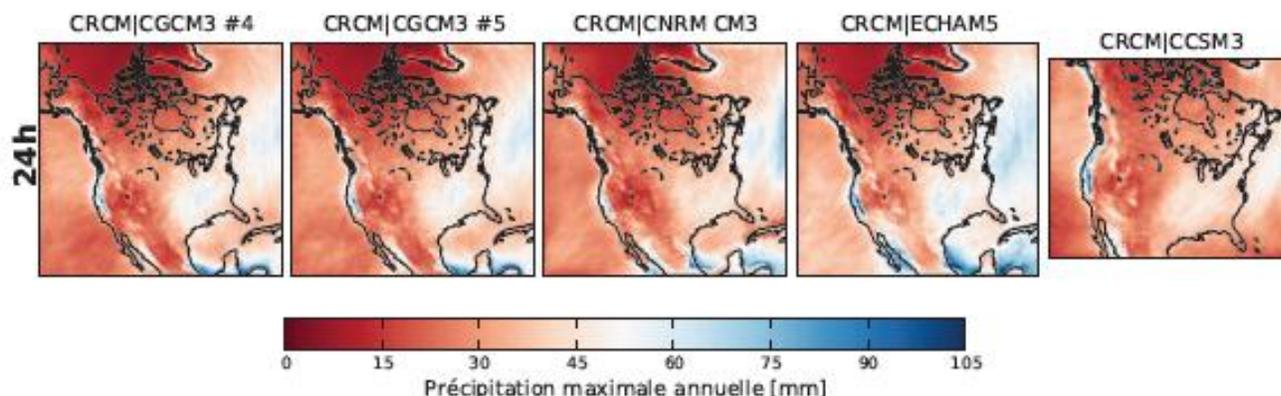


Figure 25. Moyennes des précipitations maximales annuelles lors d'évènements de durée 24 heures pour les simulations du MRCC en climat de référence.

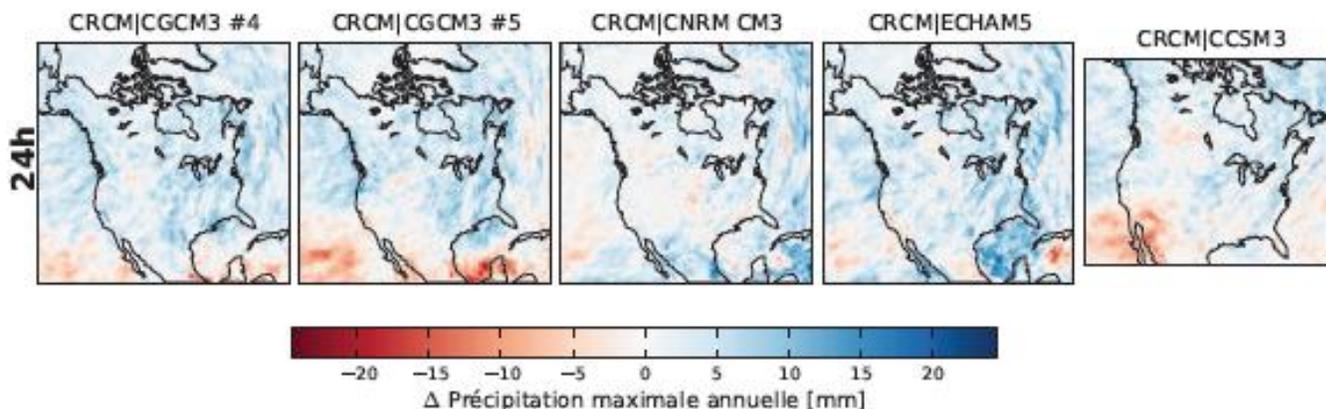


Figure 26. Différences entre les moyennes des précipitations maximales annuelles des simulations en climat de référence et futur pour les simulations du MRCC.

Tableau 19. Moyenne des précipitations maximales annuelles du MRCC sur la région de la Vallée du St-Laurent en climat de référence.

Pilote	Alias	1h	2h	6h	12h	24h
CGCM3 #4	aet	7.33	11.9	23.5	33.3	43.3
	aeu	8.09	13.0	25.3	36.0	45.7
CGCM3 #5	aev	7.04	11.3	22.5	31.7	40.7
	aew	8.04	13.1	26.0	36.3	47.3
CNRM CM3	agw	6.64	10.9	22.4	32.1	41.6
	ahb	7.65	12.4	24.5	33.3	42.1
ECHAM5	agx	7.22	12.1	25.3	36.3	47.8
	agz	8.07	13.1	25.7	36.5	48.3
CCSM3	ahs	7.38	12.1	23.9	32.8	42.3
	aht	7.92	13.0	25.3	35.8	46.7

Estimation des paramètres régionaux

Une analyse quantitative de l'homogénéité régionale est menée afin de s'assurer de la validité de la régionalisation. Selon les résultats, toutes les simulations sont suffisamment homogènes pour procéder à l'analyse régionale. Se référer au rapport détaillé de Huard (2011) pour davantage de détails et résultats sur la régionalisation.

Les courbes IDF régionales sont construites utilisant les paramètres régionaux. Ces paramètres moyens permettent d'estimer l'intensité des précipitations maximales annuelles correspondant à différentes périodes de retour. La figure 28 montre les courbes IDF calculées à partir des paramètres d'une simulation en temps de référence en futur pour les simulations aet/aeu pilotées par CGCM3 #4. Les figures pour les autres simulations et les autres régions sont présentées en annexe du rapport détaillé de Huard (2011). Afin de synthétiser les résultats, le tableau 20 présente le ratio de l'intensité future sur l'intensité en climat de référence pour toutes les simulations, durées et temps de retour (les tableaux A.8, A.9 et A.10 en annexe du rapport détaillé présentent les résultats pour les autres régions). Pour les faibles temps de retour (5 et 10 ans), presque toutes les simulations projettent une augmentation des précipitations maximales annuelles, et ce, pour toutes les durées considérées. Pour les temps de retour 10 et 25 ans, le consensus est moins fort. En effet, la simulation pilotée par ECHAM5 suggère une réduction de l'intensité des pluies maximales annuelles pour les durées de 6 à 24 heures. Ceci dit, les moyennes pondérées des simulations sont toutes positives, variant de 4 à 12 %.

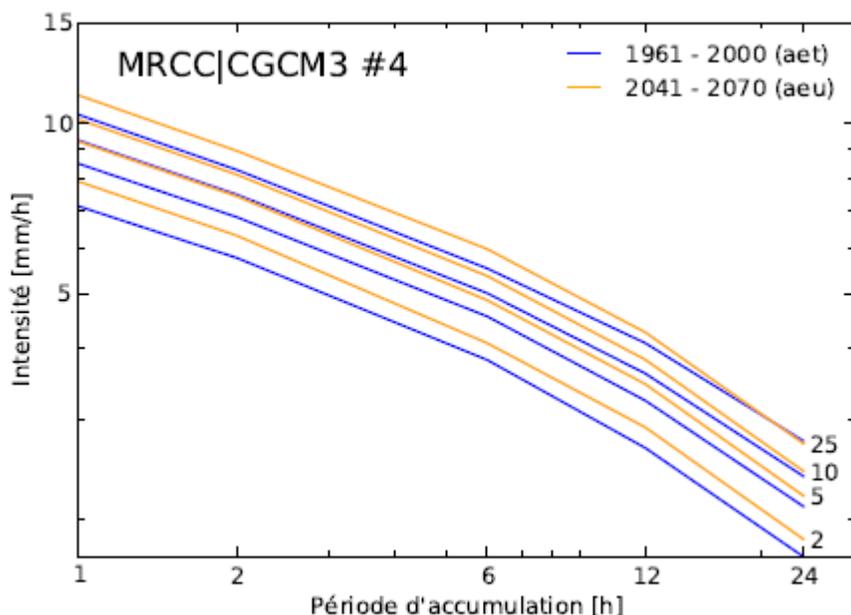


Figure 27. Courbes IDF sur un graphique log-log pour les temps de retour 2, 5, 10 et 25 ans tracées à partir des paramètres régionaux moyens de la vallée du St-Laurent.

Tableau 20. Pourcentage d'augmentation des précipitations extrêmes estimée par analyse fréquentielle régionale des données du MRCC dans la région de la vallée du St-Laurent entre le climat de référence et futur.

T	Durée	CGCM3 #4	CGCM3 #5	CNRM CM3	ECHAM5	CCSM3	Moy.
2	1h	10.6	13.9	15.6	12.6	6.5	11.7
	2h	9.5	15.3	14.4	10.4	5.9	10.8
	6h	7.1	16.0	8.9	4.3	6.1	7.7
	12h	8.7	15.2	4.0	3.1	7.5	6.6
	24h	7.4	15.1	2.2	4.2	8.3	6.5
5	1h	9.4	13.1	14.4	10.6	7.5	11.0
	2h	8.8	14.9	13.7	7.1	6.4	9.8
	6h	6.8	15.4	8.5	-0.0	5.9	6.4
	12h	6.9	15.7	2.6	-0.5	9.6	5.7
	24h	4.4	18.1	-0.5	0.9	12.4	6.0
10	1h	8.8	13.0	13.8	9.3	8.4	10.6
	2h	8.4	14.8	13.2	4.7	7.5	9.3
	6h	7.2	14.8	8.6	-3.3	5.9	5.6
	12h	5.8	15.5	2.0	-3.5	11.5	5.2
	24h	2.1	19.9	-2.0	-2.3	15.5	5.6
25	1h	8.2	13.1	13.2	7.8	9.7	10.3
	2h	8.0	14.7	12.5	1.7	9.4	8.7
	6h	8.2	13.9	8.8	-7.8	6.0	4.5
	12h	4.5	15.0	1.4	-7.5	14.4	4.5
	24h	-1.1	22.1	-3.6	-6.9	19.5	4.9

Estimation de l'incertitude

Afin d'obtenir un premier estimé de l'incertitude associée aux courbes IDF régionales, les intensités correspondantes à un temps de retour T sont calculées pour chaque tuile d'une région. Puisque toutes les tuiles de la région ont les mêmes paramètres, et que donc les intensités ne diffèrent que par la moyenne des séries, on peut assumer que les différences entre tuiles sont essentiellement dues à la variabilité spatiale et l'erreur d'échantillonnage (les séries étant relativement courtes). La figure 28 présente les distributions empiriques de la précipitation accumulée de temps de retour 25 ans pour les simulations pilotées par CGCM3 #4, superposées aux estimés régionaux. On constate qu'il existe une dispersion importante autour de l'estimé régional. Notez que dans cette figure, l'échelle est linéaire plutôt que logarithmique, et que c'est la précipitation accumulée (la hauteur de pluie) qui est présentée, plutôt que l'intensité, afin de mettre en évidence les résultats pour les pluies de 24h. Cette première approximation de l'incertitude due à la variabilité spatiale, bien qu'utile, assume qu'on identifie catégoriquement un jeu de paramètre optimal pour la région.

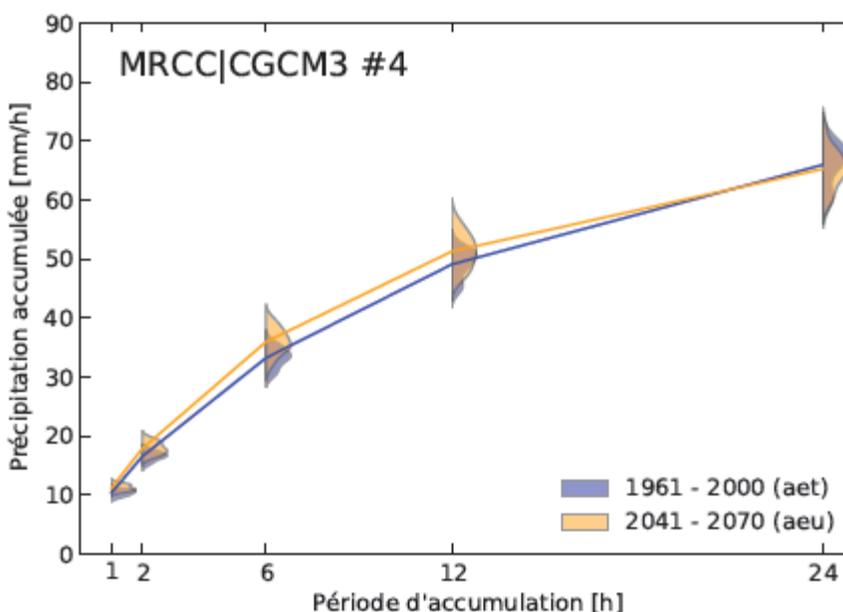


Figure 28. Courbes IDF pour la vallée du St-Laurent simulée en climat présent (aet) et futur (aeu) par le MRCC piloté par CGCM3 #4. Les lignes indiquent les intensités de temps de retour 25 ans estimées à partir des paramètres GEV moyens de la région. Les distributions quant à elles sont construites à partir des intensités calculées avec les paramètres de chaque point de grille dans la même région.

Or, pour de courtes séries, il existe toute une plage de paramètres qui sont, *grosso modo*, équiprobables. Afin de cerner l'incertitude due au choix d'un seul jeu de paramètre, on utilise les outils de l'analyse bayésienne. Au lieu d'estimer les paramètres optimaux de la GEV, on calcule plutôt la distribution de probabilité des paramètres. Cette densité de probabilité est ensuite utilisée pour calculer la probabilité de la hauteur de pluie pour différents temps de retour. Ces densités de probabilités pour chaque tuile de la région sont sommées afin d'obtenir une distribution des hauteurs de pluie incluant à la fois la variabilité spatiale et

l'incertitude sur les paramètres. Cette somme des distributions équivaut à un « OU » logique, doublé de l'hypothèse que les séries temporelles des différents points de grille sont indépendantes les unes des autres. Bien que cette dernière hypothèse ne soit pas parfaitement justifiée, elle constitue un point de départ plus raisonnable que l'hypothèse inverse, soit que les différents points de grille sont parfaitement dépendants. Les résultats d'une telle analyse sont présentés à la figure 29 pour la simulation aet et les événements d'une durée de 1h. Les marqueurs noirs indiquent la valeur régionale, les traits pleins la distribution empirique estimée à partir des tuiles et les lignes tiretées la probabilité bayésienne, qui inclue à la fois la variabilité spatiale et l'incertitude sur les paramètres. On remarque que pour les temps de retour de deux et cinq ans, les deux distributions sont presque identiques, alors que pour les temps de retour 10 et 25 ans, des différences considérables émergent, particulièrement dans la queue de la distribution. On en déduit que pour les faibles temps de retour, l'incertitude sur les paramètres est marginale comparée à la variabilité régionale (incluant la variabilité spatiale et l'erreur d'échantillonnage). Par contre, pour les temps de retour plus élevés, l'incertitude due à l'estimation des paramètres devient significative et a pour effet d'épaissir la queue de la distribution. Autrement dit, l'analyse fréquentielle régionale sous-estime la probabilité des événements rares.

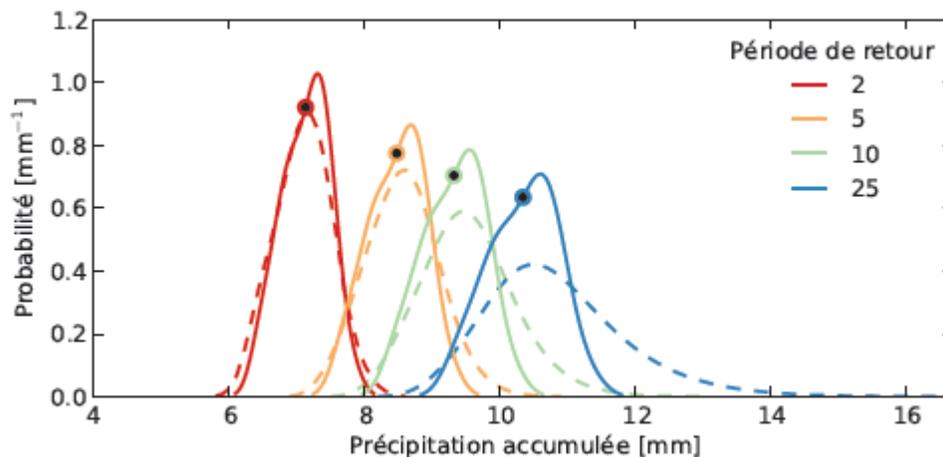


Figure 29. Comparaison entre les résultats de l'analyse fréquentielle régionale (cercle), la distribution de la précipitation accumulée calculée de manière classique (ligne pleine) et bayésienne (ligne pointillée) pour les événements de durée 1h de la simulation aet du MRCC pour le climat de référence.

La figure 30 présente la probabilité de ce facteur relatif entre les précipitations extrêmes du climat présent et du climat futur pour des durées de 1 et 24 heures et des temps de retour de 25 ans. La moyenne d'ensemble est calculée en prenant le produit pondéré des distributions de chaque simulation. On remarque que les modèles ne s'entendent pas sur le sort des précipitations de 24h, alors que l'accord entre modèles est plus convaincant pour les pluies d'une heure.

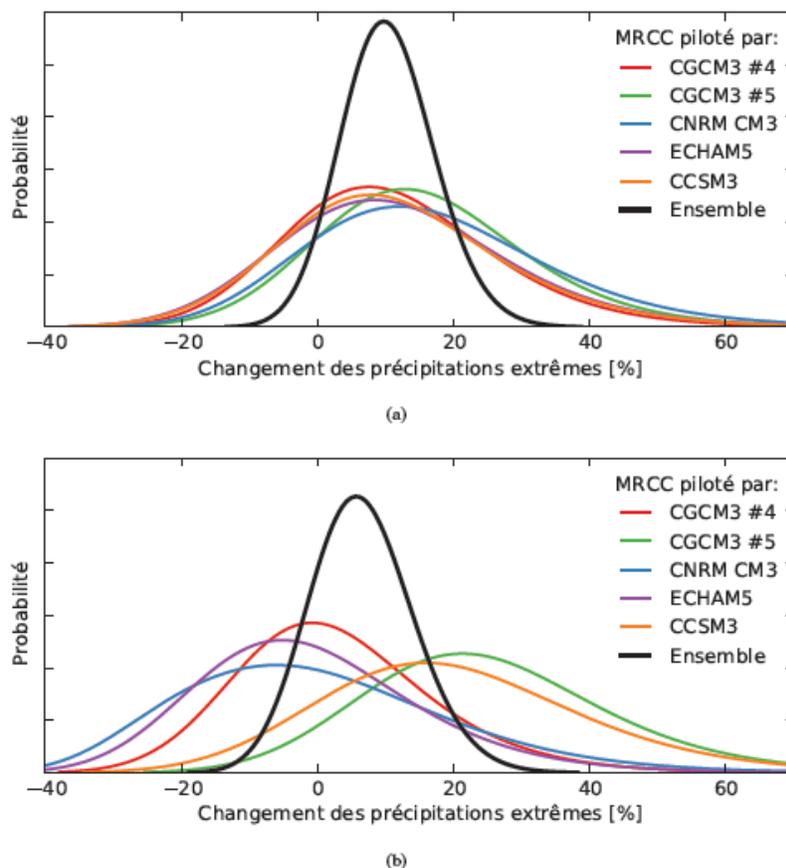


Figure 30. Pourcentage d'augmentation des précipitations maximales annuelles de durée a) 1 h et b) 24h pour un temps de retour de 25 ans entre le climat de référence et futur.

Le tableau 21 présente la moyenne et l'écart-type de ces distributions bayésiennes d'ensemble pour les différents temps de retour et durées considérées. Pour les événements d'une et deux heures, le signal de changement climatique est clair, avec des augmentations de l'ordre de 10 %. Pour les durées plus longues, la moyenne d'ensemble reste positive, mais l'incertitude est comparable au signal. L'incertitude augmente avec le temps de retour, un résultat attendu puisque les intensités de temps de retour élevés sont sensibles aux petites variations du paramètre de forme de la GEV.

Tableau 21. Moyenne et écart-type de la distribution d'ensemble du pourcentage d'augmentation projetée des précipitations extrêmes estimée par analyse bayésienne régionale des données du MRCC sur la région de la vallée du St-Laurent.

T	1h	2h	6h	12h	24h
2	11 ± 5	11 ± 5	8 ± 5	8 ± 5	7 ± 5
5	10 ± 5	10 ± 5	7 ± 5	8 ± 5	7 ± 6
10	10 ± 6	10 ± 6	7 ± 6	7 ± 6	7 ± 6
25	10 ± 7	9 ± 7	6 ± 7	6 ± 7	7 ± 8

Le fait que les simulations s'entendent mieux pour les précipitations de courtes durées que les longues durées peut possiblement s'expliquer par le choix des simulations. En effet, bien que l'ensemble ait une bonne diversité pour ce qui est des MCG, un seul modèle régional est utilisé. Or, on peut supposer que les événements de précipitations extrêmes d'une et deux heures sont largement déterminés par la physique du MRCC, plutôt que celle des MCG. En effet, la résolution temporelle des champs de pilotage est de six heures, alors que le modèle régional simule l'état de l'atmosphère aux 15 minutes. Les événements ayant lieu à l'échelle horaire, et *a fortiori* les événements extrêmes, sont donc fort probablement générés par le modèle régional. L'ensemble étant composé de plusieurs modèles globaux mais d'un seul modèle régional, cela peut expliquer le peu de variabilité des précipitations extrêmes d'une heure comparé aux extrêmes pour 24 heures.

En résumé, l'évaluation des extrêmes annuels de précipitations modélisés par le MRCC révèle que leur distribution est comparable à celle des extrêmes observés à la même échelle spatiale pour les événements d'une durée de 24 heures. Pour les durées de 1, 2, 6 et 12 heures, il n'existe pas d'observations sur grille ayant la résolution spatiale nécessaire à ce type d'évaluation. Ceci dit, il est peu probable que la correspondance soit aussi bonne car les événements de courtes durées sont aussi plus localisés et donc plus difficile à reproduire avec un modèle dont chaque tuile correspond à une moyenne sur une aire de 45 X 45 km. Basée sur un ensemble de cinq simulations régionales pilotées par quatre MCG différents, une comparaison des extrêmes en climat futur (2041–2070) et en climat de référence indique que les extrêmes annuels sont appelés à augmenter. Par exemple, pour les précipitations de 24h ayant un temps de retour de deux ans, on estime l'augmentation à $7 \pm 5 \%$ dans la vallée du Saint-Laurent. Considérant que cette incertitude inclut la variabilité régionale et l'incertitude sur les paramètres de la GEV, le signal paraît robuste. On remarque toutefois que l'incertitude augmente avec le temps de retour considéré et la durée de l'événement. Cela s'explique d'une part par la sensibilité des précipitations extrêmes à la valeur des paramètres GEV qui augmente avec le temps de retour, et la diversité des modèles, qui s'exprime plus fortement pour les événements de longues durées.

33.3 Identification des indices de redoux hivernaux

33.3.1 *Étape 1 : Développement des indices de pluie et fonte hivernale*

Le développement et le calage du modèle de fonte de neige CEQUeau-modIRDA ont été réalisés sur l'ensemble des bassins versants à l'étude provenant des deux régions climatiques distinctes (Montérégie et Beauce). Ainsi, les bassins versants n'ont pas été calés individuellement, mais des valeurs communes de paramètres de calage ont été utilisées, de façon à permettre une application généralisée du modèle à l'ensemble du territoire du Québec. Les valeurs des paramètres de calage retenus dans la présente étude sont présentées au tableau 22.

Compte tenu de l'impossibilité de caler directement les apports verticaux modélisés sur la base d'observations (inexistantes), la comparaison des stocks de neige simulés par le modèle CEQUeau-modIRDA avec les stocks de neige mesurés ont guidé le calage du modèle de fonte de neige pour l'ensemble des bassins à l'étude. Les stocks de neige modélisés ont

d'abord été calés sur la base des données de hauteur de neige des stations météorologiques d'Environnement Canada (EC), c'est-à-dire les mêmes stations que les données météorologiques d'entrée du modèle. Toutefois, la comparaison s'est avérée difficile puisque le modèle de fonte de neige simule des équivalents en eau (mm) tandis que les données des stations météorologiques d'Environnement Canada nous renseignent sur les hauteurs de neige mesurées au sol (en cm) et ne tiennent pas compte de l'équivalent en eau de la neige (EEN). Ce dernier se définit comme la hauteur d'eau (en mm) résultant de la fonte du manteau nival sur une superficie donnée. L'EEN peut ainsi être calculé en multipliant l'épaisseur de la neige par sa densité⁶. Pour pallier la disparité dans l'expression des couverts de neige prédits et observés, les données de hauteur et de densité du stock de neige des stations nivométriques du MDDEFP ont été mises à profit dans la conversion des observations de hauteur de couverts de neige en EEN. Les stations fournissent des observations ponctuelles (à des dates précises) à raison de une à deux observations par mois en période hivernale. Les figures 31 et 32 présentent la localisation des bassins versants à l'étude de même que celle des différentes stations hydrométriques, météorologiques et nivométriques mentionnées précédemment.

Tableau 22. Constantes ajustables du modèle de fonte de neige CEQUeau-modIRDA

Constante	Description de la constante	Valeur utilisée
JONEI	Paramètre permettant de décaler la date d'illumination maximale pour le calcul de la fonte de neige	80
TSD	Seuil de température de fonte (°C)	-2
TTS	Température de mûrissement du stock de neige (°C)	1
TFD	Taux potentiel de fonte	4,7
TTD	Coefficient de déficit calorifique	1
XLA	Latitude moyenne du bassin versant en degrés et minutes sexagésimales	4572

⁶Ressources Naturelles Canada. L'Atlas du Canada - Couverture de neige, (page consultée le 27 juillet 2011), [En ligne]. Adresse URL : <http://atlas.nrcan.gc.ca/auth/francais/maps/environment/climate/snowcover/1>

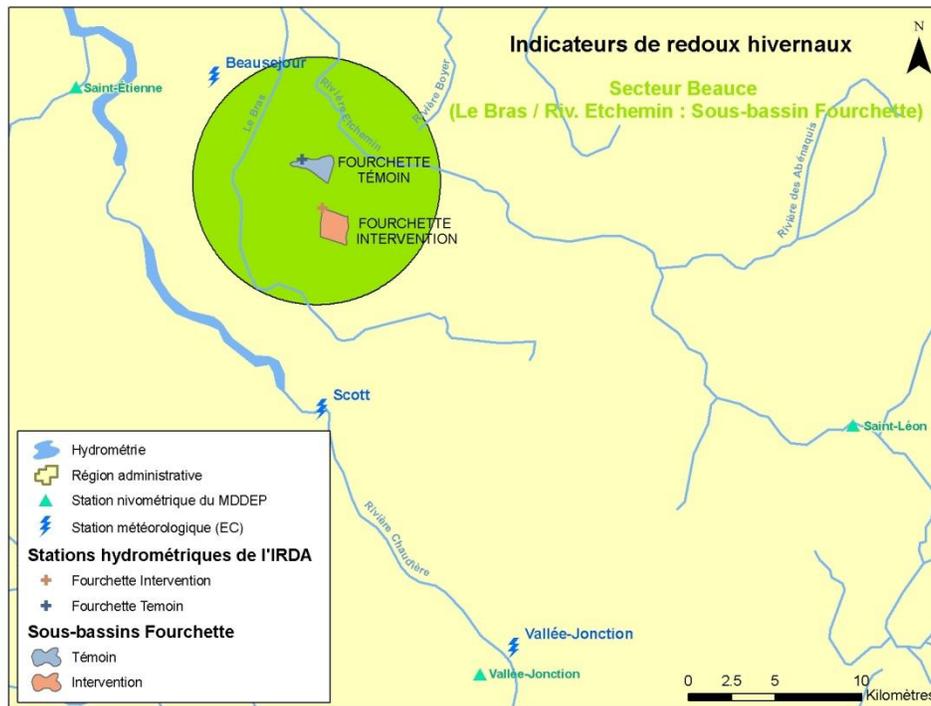


Figure 31. Localisation des bassins versants et stations hydrométriques, météorologiques et nivométriques du secteur beauceron à l'étude.

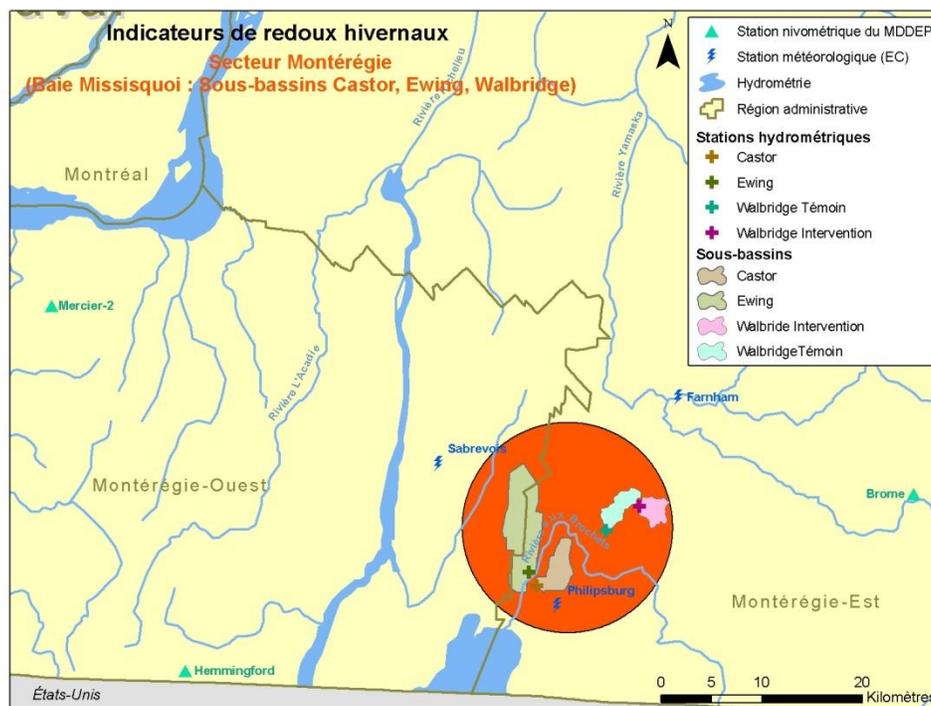


Figure 32. Localisation des bassins versants et stations hydrométriques, météorologiques et nivométriques du secteur montérégien à l'étude.

Afin de s'assurer d'identifier les stations nivométriques les plus cohérentes avec les stations météorologiques d'Environnement Canada, les hauteurs de neige des stations nivométriques ont été comparées aux hauteurs de neige des stations météorologiques. Les épaisseurs de neige mesurées aux stations météorologiques d'Environnement Canada (Archives nationales d'information et de données climatologiques : http://www.climat.meteo.gc.ca/Welcome_f.html) de la Montérégie correspondent davantage aux épaisseurs de neige de la station nivométrique du MDDEFP de Brome (R^2 de 0.56 plutôt que 0.27 pour Mercier-2 et 0.51 pour Hemmingford). Pour la Beauce, la station nivométrique correspondant davantage à la station météorologique d'Environnement Canada est celle de Saint-Étienne (R^2 de 0.97 plutôt que 0.95 pour Vallée-Jonction et 0.77 pour Saint-Léon). Ainsi, ce sont les densités de neige des stations nivométriques de Brome (pour la Montérégie) et de Saint-Étienne (pour la Beauce) qui ont été utilisées pour caler le modèle de fonte de neige.

Par ailleurs, il a été statué qu'il était préférable de caler le modèle à partir de données ponctuelles, c'est-à-dire lors de la présence de données réelles de densité de neige correspondant à quelques valeurs par hiver plutôt qu'à partir de valeurs interpolées. Conséquemment, les épaisseurs de neige mesurées aux stations météorologiques d'Environnement Canada ont été multipliées par les densités de neige des stations nivométriques aux mêmes dates puis exprimées en équivalents en eau de la neige en mm. Ces équivalents en eau ont été comparés aux équivalents en eau simulés par le modèle CEQUeau-modIRDA.

Le nombre de données ponctuelles de densité de neige pour la Beauce est de 86 pour les deux bassins versants à l'étude et le R^2 obtenu est de 0,86 entre les EEN mesurés et simulés. Le nombre de données est de 118 pour les 4 bassins en Montérégie avec un R^2 de 0.79. Cela équivaut à 204 données de calage pour l'ensemble des bassins à l'étude et des années de suivi hydrométrique pour lesquelles on obtient un R^2 de 0.91. La comparaison en fonction des équivalents en eau ponctuels nous permet donc de conclure que le modèle de fonte de neige CEQUeau-modIRDA, suivant un calage unique pour l'ensemble des bassins versants à l'étude, y simule adéquatement les processus d'accumulation et de fonte de neige. Le modèle affiche cependant une meilleure performance pour les bassins beaucerons que montérégiens. Cette différence régionale dans l'ajustement du modèle reflète les écarts relevés entre les bases de données d'Environnement Canada et des stations nivométriques du MDDEFP relevés précédemment.

À titre indicatif, les figures 33 à 38 illustrent, pour les six bassins à l'étude, les comparaisons journalières des valeurs de EEN estimées sur la base des épaisseurs de neige mesurées aux stations d'Environnement Canada et traduites par interpolation en équivalents en eau (sur la base des densités rapportées par le MDDEFP) avec les EEN quotidiens simulés par le modèle CEQUeau-modIRDA des EEN. Cette comparaison en continu permet de valider que la fonte se produit au bon moment lorsqu'elle est simulée par le modèle de fonte de neige. L'ajustement du modèle pour l'ensemble des bassins avec les densités de neige interpolées demeure élevé ($R^2 = 0,89$), malgré une tendance à la surestimation des valeurs simulées. Les profils des deux illustrent le synchronisme des accumulations et des fontes.

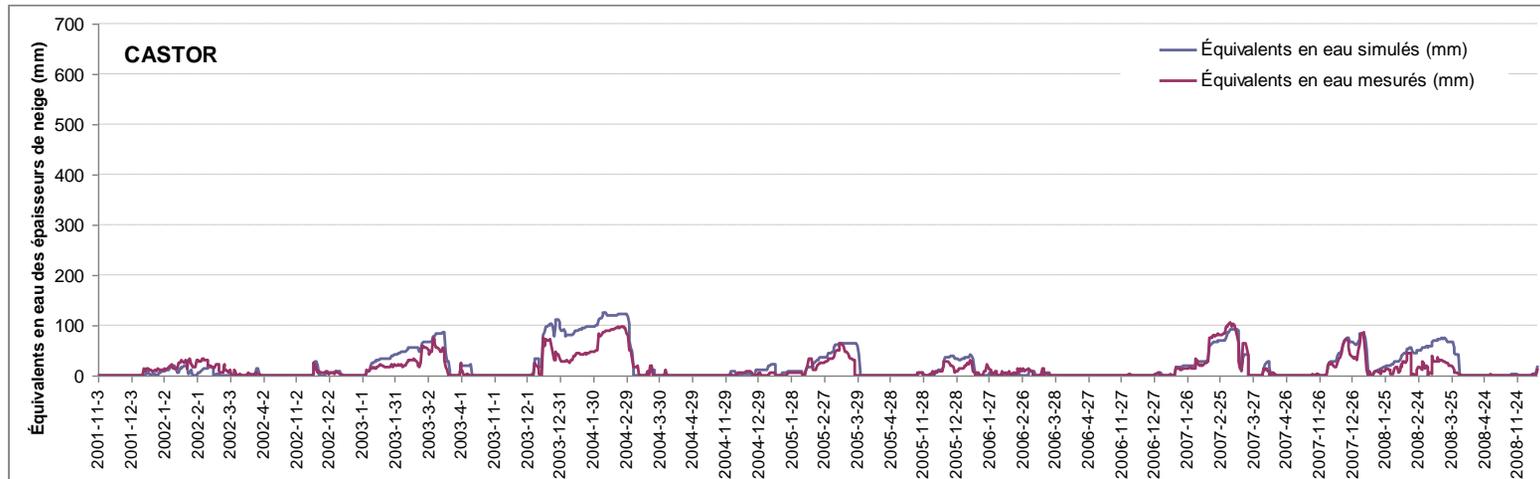


Figure 33. Représentation de l'évolution des équivalents en eau mesurés et simulés par le modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin Castor à partir des valeurs interpolées de densité de la neige.

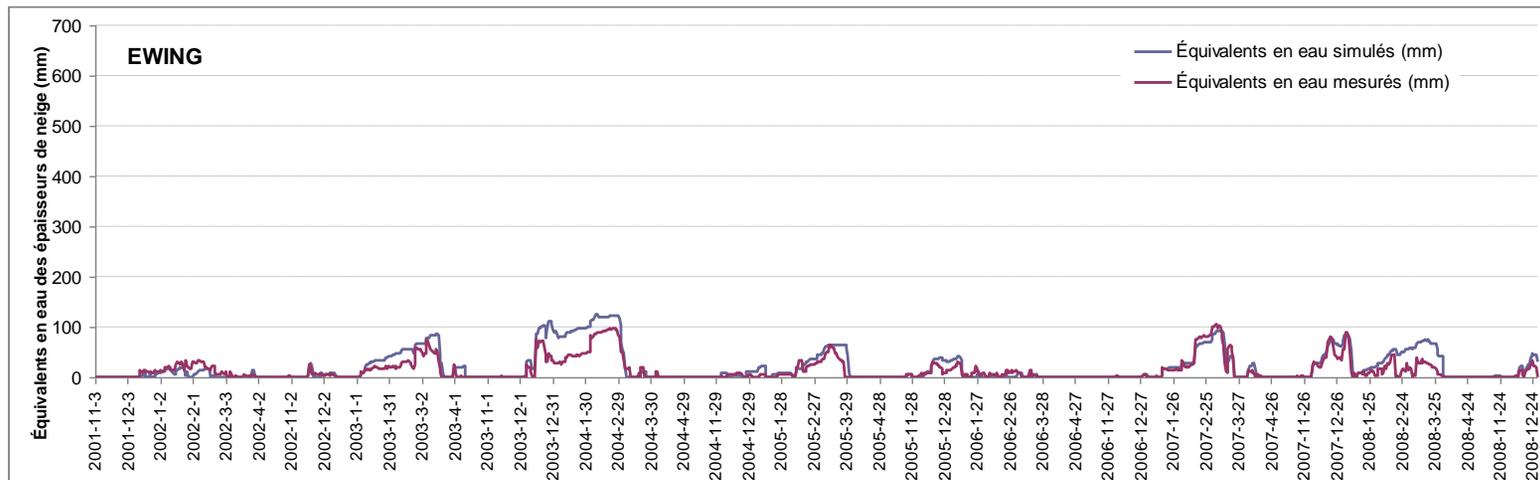


Figure 34. Représentation de l'évolution des équivalents en eau mesurés et simulés par le modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin Ewing à partir des valeurs interpolées de densité de la neige.

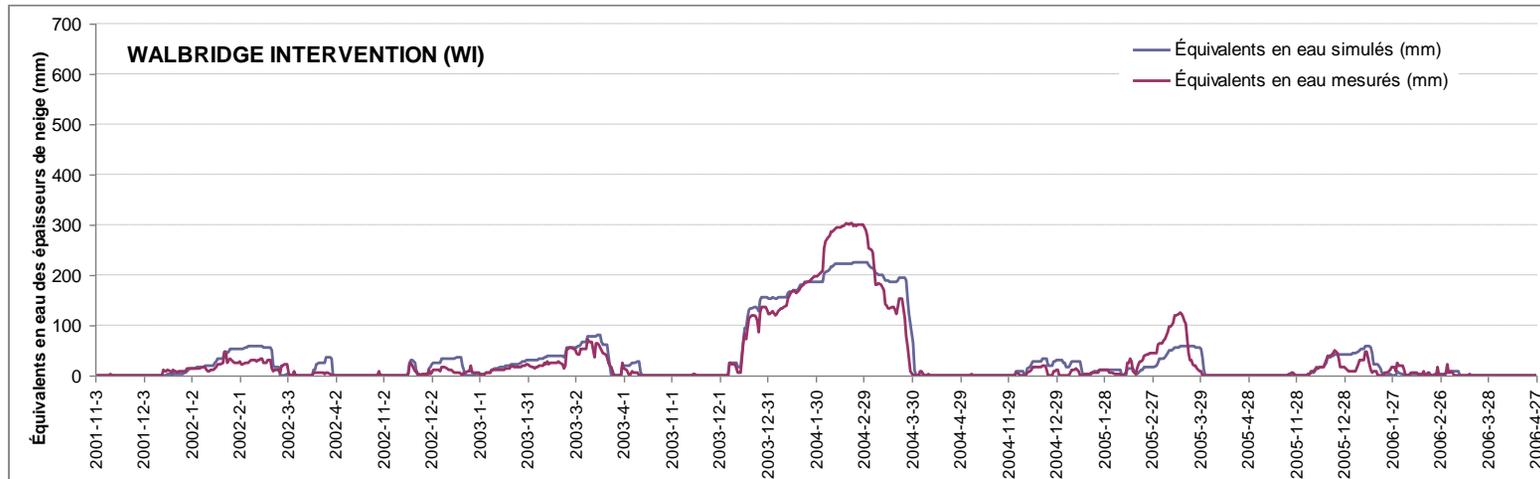


Figure 35. Représentation de l'évolution des équivalents en eau mesurés et simulés par le modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin Walbridge Intervention à partir des valeurs interpolées de densité de la neige.

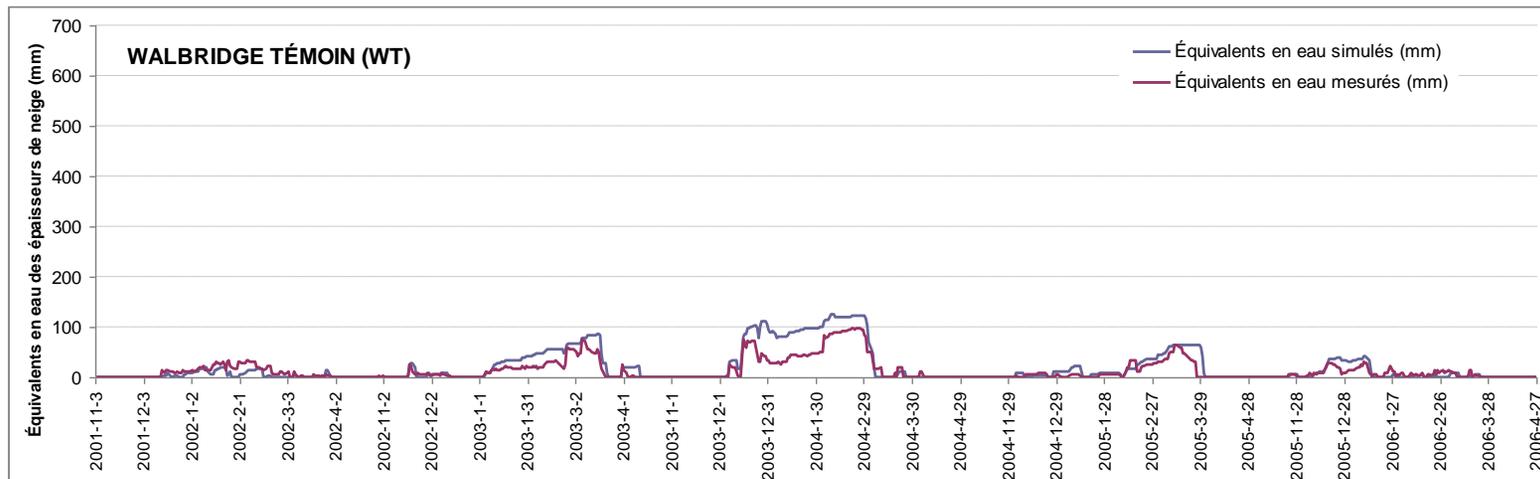


Figure 36. Représentation de l'évolution des équivalents en eau mesurés et simulés par le modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin Walbridge Témoin à partir des valeurs interpolées de densité de la neige.

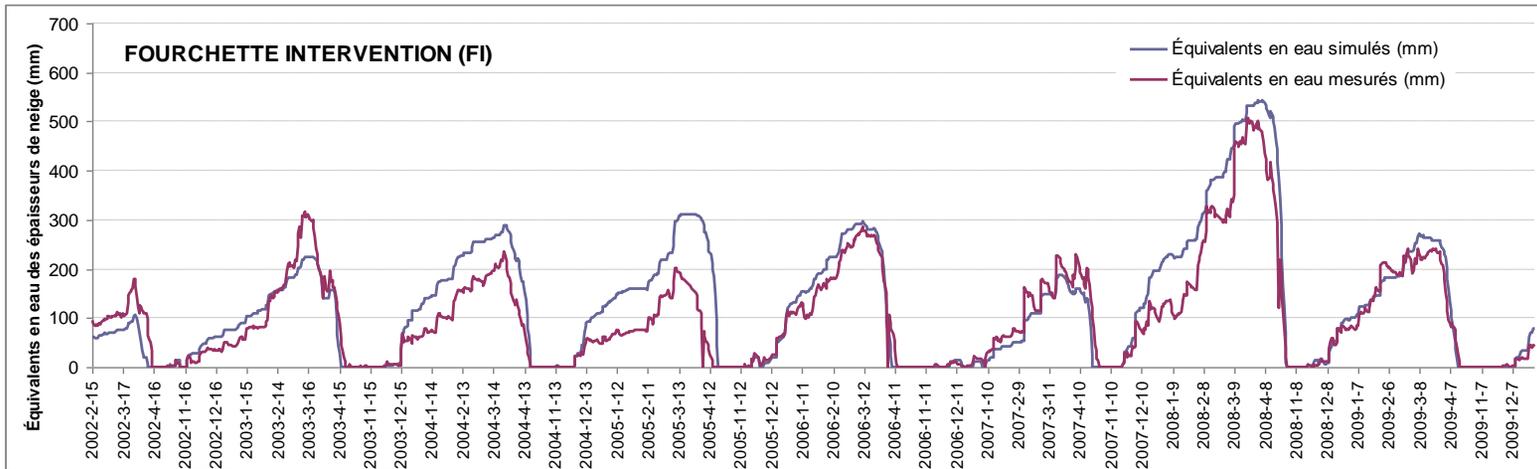


Figure 37. Représentation de l'évolution des équivalents en eau mesurés et simulés par le modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin Fourchette Intervention à partir des valeurs interpolées de densité de la neige.

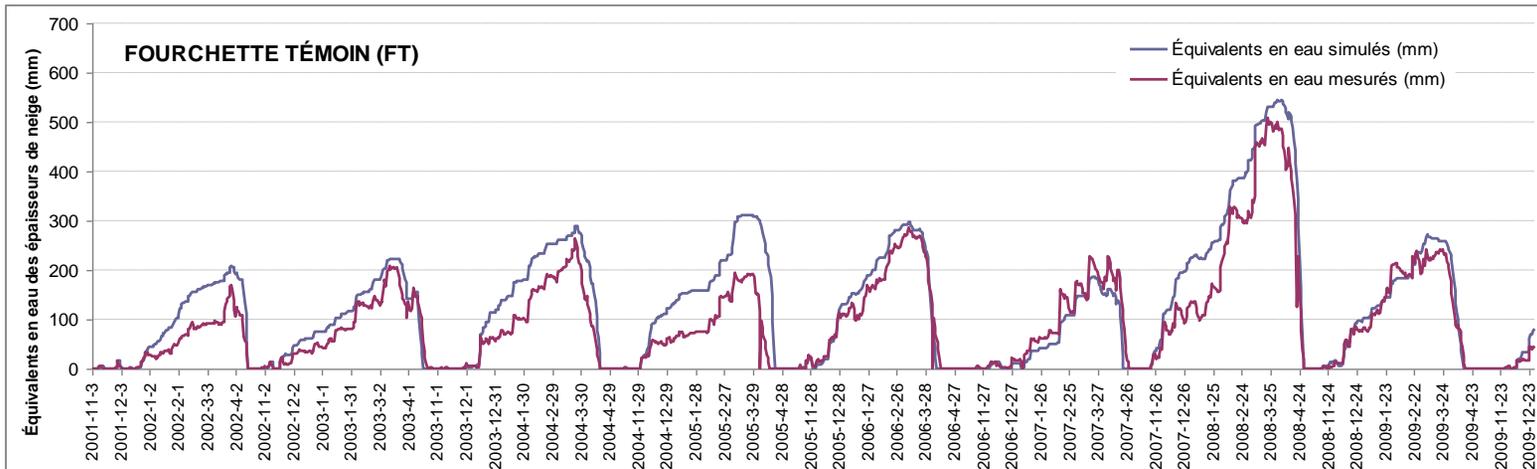


Figure 38. Représentation de l'évolution des équivalents en eau mesurés et simulés par le modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin Fourchette Témoin à partir des valeurs interpolées de densité de la neige.

Afin de confirmer la valeur prédictive des apports verticaux modélisés sur la réponse hydrologique des ruisseaux à l'étude, les apports verticaux produits par le modèle de fonte de neige CEQUeau-modIRDA ont été introduits dans le modèle hydrologique simplifié MOHYSE. Les prédictions résultantes des débits ont ensuite été comparées aux débits mesurés à chacune des stations hydrométriques (mm/jr) au pas de temps journalier.

Le tableau 23 présente les résultats de MOHYSE dans sa version locale, c'est-à-dire avec calage par bassin versant en fonction des débits mesurés. Pour utiliser cette version de MOHYSE, le jeu de données de chaque bassin versant a été divisé en deux : une première partie pour le calage et la seconde pour la validation. Le tableau 24 présente les années utilisées pour le calage et la validation pour chacun des bassins versants à l'étude. Les résultats obtenus lors du calage sont concluants pour l'ensemble des bassins versants avec des R^2 variant entre 0.38 et 0.56 et des coefficients de Nash-Shutcliffe (NS entre 0.37 et 0.56). Par contre, lorsqu'appliqué aux jeux de données de validation, le modèle performe moins bien surtout au niveau de la déviation par rapport au volume où toutes les valeurs sont au-dessus de 10 %. De plus, le NS est particulièrement faible pour le bassin Fourchette amont. Les résultats moins probants pour ce bassin s'expliquent en partie par des transferts de volumes indéterminés et ponctuels d'eau en provenance du micro-bassin voisin en raison des effets de glace sur ce territoire relativement plat (Michaud et *al.*, 2009a). La comparaison des débits simulés par MOHYSE aux débits mesurés aux stations à l'étude (figures 39 à 44) met par ailleurs en relief les limites du modèle à bien représenter les pics de crue, d'où les coefficients de Nash-Shutcliffe en-dessous de 0.50. La disparité entre les superficies des bassins versants à l'étude et ceux utilisés dans le développement du modèle MOHYSE par (Fortier-Fillion, 2011) pourrait expliquer en partie ces différences.

Dans l'ensemble, l'ajustement du modèle hydrologique pour l'ensemble des bassins à l'étude (Tableau 23) est néanmoins jugé satisfaisant, considérant les objectifs de ce volet d'étude et ses choix méthodologiques. Rappelons que l'exercice de modélisation hydrologique simplifiée avait pour but de valider le pouvoir des apports verticaux, générés sur la seule base des observations de température et de précipitations, à expliquer les réponses hydrologiques d'un ensemble de petits bassins versants aux propriétés et en climat contrastés. L'excellent ajustement du modèle de fonte avec les couverts de neige observés pour les territoires à l'étude témoigne *a priori* d'un excellent potentiel des apports verticaux modélisés à prédire les réponses hydrologiques hivernales. Les résultats de la démarche de modélisation simplifiée, expliquant les débits par les apports verticaux, témoignent cependant d'un ajustement mitigé du modèle, avec des R^2 compris entre 0,38 et 0,56 en période de calage pour les différents bassins (Tableau 23). Cette performance n'est en soi pas décevante, considérant le contexte méthodologique, notamment le nombre restreint de facteurs considérés dans la modélisation hydrologique, le recours à un calage commun du modèle de fonte de neige pour l'ensemble des sites à l'étude, et enfin l'influence du couvert de glace qui n'est pas prise en compte dans l'explication des réponses hydrologiques hivernales de ces petits bassins versants. Rappelons enfin que l'influence de l'utilisation du sol et des propriétés des sols n'a pas été prise en compte dans la modélisation hydrologique simplifiée, lesquels facteurs sont bien connus pour influencer les processus d'infiltration et de ruissellement de l'eau. Cette omission volontaire s'est inscrit dans l'objectif d'évaluer la robustesse de l'indice de redoux proposé dans un contexte d'application au territoire agricole du Québec, présentant une grande variabilité dans sa vocation et ses paysages. En soi, les observations météorologiques de température et de précipitations ne sauraient donc prétendre, à elles seules, expliquer la

complexité des réponses hydrologiques de petits bassins versants ruraux. Les résultats des exercices de modélisation de la fonte de neige et des crues de fonte et de pluie hivernale dans le cadre de ce volet d'étude témoignent cependant de la robustesse et de la pertinence de l'indice de fonte et de pluie hivernale proposé dans la prédiction des volumes de ruissellement et des débits de pointe

Tableau 23. Indices d'ajustement des prédictions du modèle hydrologique simplifié pour les six bassins versants à l'étude en périodes de calage et de validation.

Bassin	Calage (2001 à 2004 ±)				Validation (2004 à 2009 ±)			
	r	R ²	NS	D _v	r	R ²	NS	D _v
Castor	0.73	0.53	0.53	0.02	0.70	0.48	0.43	0.26
Ewing	0.67	0.46	0.45	-0.03	0.70	0.48	0.43	0.24
WI	0.74	0.55	0.55	-0.05	0.63	0.40	0.32	-0.22
WT	0.61	0.38	0.37	-0.03	0.68	0.46	0.41	-0.11
F amontl	0.72	0.52	0.52	-0.05	0.60	0.37	0.07	-0.22
F aval	0.75	0.56	0.56	-0.04	0.73	0.53	0.34	-0.15
Moyenne absolue	0.70	0.50	0.50	-0.04	0.67	0.45	0.33	0.20

Tableau 24. Périodes de calage et de validation retenues dans l'exercice de modélisation hydrologique simplifiée.

Bassin	Années de calage	Années de validation
Castor	2001 à 2004	2005 à 2008
Ewing	2001 à 2004	2005 à 2008
WI	2001 à 2003	2004 à 2006
WT	2001 à 2003	2004 à 2006
FI	2002 à 2004	2005 à 2009
FT	2001 à 2004	2005 à 2009

Figure 39. Séries temporelles des débits mesurés et simulés par MOHYSE à partir des apports verticaux du modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin versant Castor en période de validation.

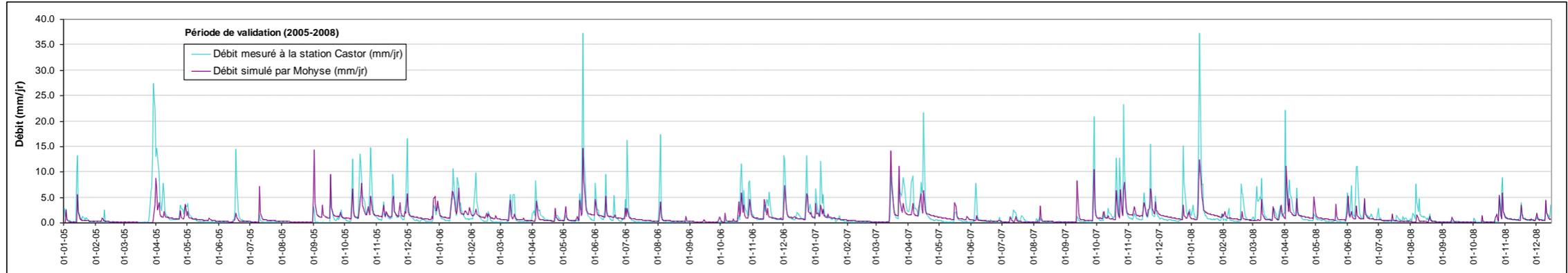


Figure 40. Séries temporelles des débits mesurés et simulés par MOHYSE à partir des apports verticaux du modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin versant Ewing en période de validation.

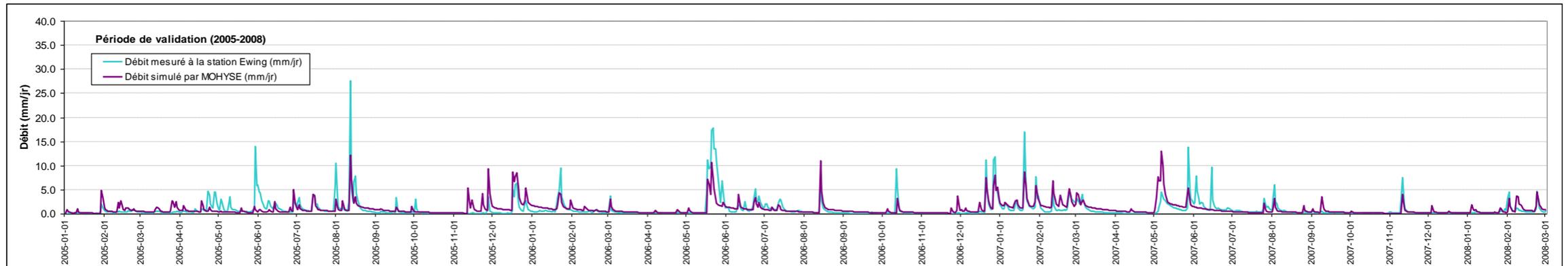


Figure 41. Séries temporelles des débits mesurés et simulés par MOHYSE à partir des apports verticaux du modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin versant Walbridge Intervention en période de validation.

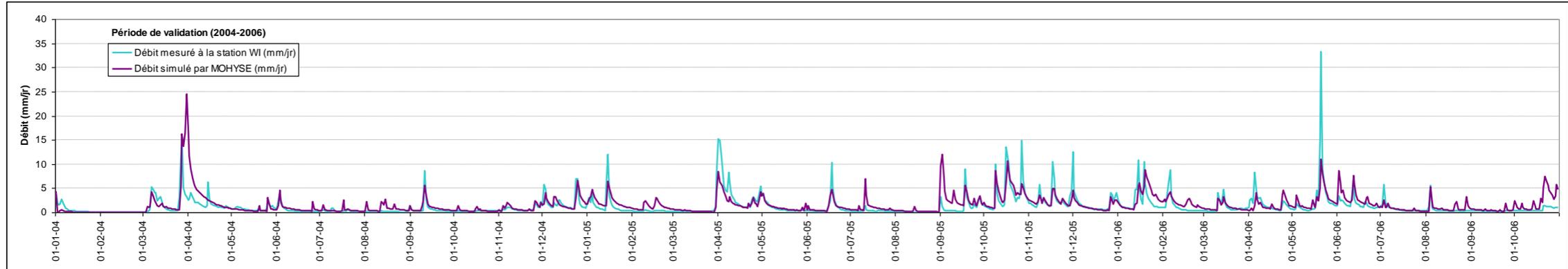


Figure 42. Séries temporelles des débits mesurés et simulés par MOHYSE à partir des apports verticaux du modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin versant Walbridge Témoin en période de validation.

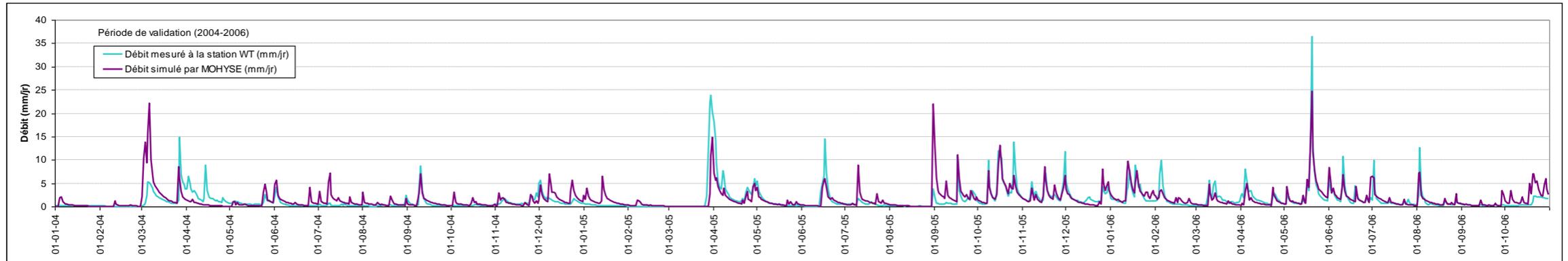


Figure 43. Séries temporelles des débits mesurés et simulés par MOHYSE à partir des apports verticaux du modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin versant Fourchette Intervention en période de validation.

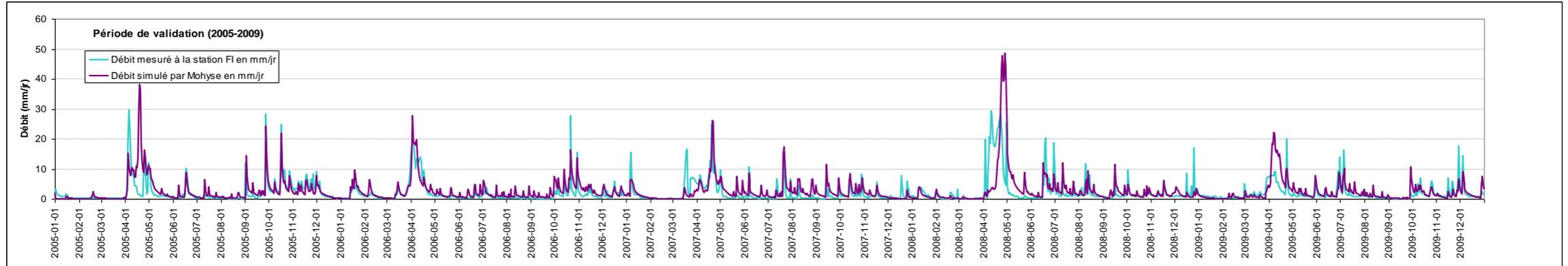
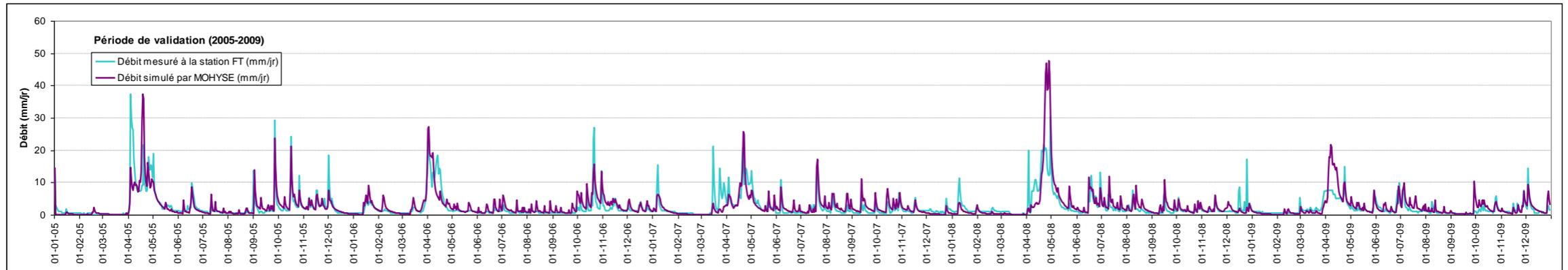


Figure 44. Séries temporelles des débits mesurés et simulés par MOHYSE à partir des apports verticaux du modèle de fonte de neige CEQUEAU-modIRDA pour le bassin versant Fourchette Témoin en période de validation.



33.3.2 *Étape 2 : La caractérisation de la période actuelle en fonction des indicateurs de redoux hivernaux*

Estimation des apports verticaux extrêmes historiques

Les distributions des intensités des apports verticaux ont été calculées pour 100 stations météorologiques du Sud du Québec. La plus courte durée considérée est d'une journée, compte tenu de la limitation imposée par la disponibilité de données hivernales journalières (novembre-avril). Des prédictions d'apports verticaux extrêmes d'une durée jusqu'à cinq jours ont été estimées, considérant que les événements de fonte peuvent se prolonger sur une relativement longue période. Contrairement aux épisodes de crue estivale dont les débits de pointe constituent généralement la principale préoccupation, c'est plus souvent le cumul des volumes de ruissellement qui est préoccupant lors des crues de fonte et pluie hivernale, notamment dans la perspective des inondations. D'où la pertinence de considérer des durées d'événements plus longs pour les fontes et pluies hivernales, que pour les événements de pluie de forte intensité.

L'ensemble des informations a été colligé dans une banque de données des apports verticaux extrêmes comprenant notamment :

- l'information générale sur la station, telle que le nom, le numéro d'identification, l'altitude et les coordonnées géographiques;
- les séries de maximums annuels d'apports verticaux pour les durées de un à cinq jours.
- les dates où se sont produits les maximums annuels. Les années n'ayant pas suffisamment de données acceptables sont signifiées par des blancs dans les tableaux.
- les résultats des tests de stationnarité et d'homogénéité sur les séries de maximums annuels. Dans les cas où la série originale n'était pas homogène/stationnaire, les tests ont ré-effectués en ne conservant que les 30 dernières années.
- les estimateurs des distributions Hauteur-durée-fréquence (HDF) et Intensité-durée-fréquence (IDF) pour chaque durée (1 à 5 jours) et chaque temps de retour (2, 5, 10, 20 et 50 ans). Les paramètres de la distribution GEV ayant servi à calculer les estimateurs HDF sont également présentés et peuvent ainsi être utilisés dans le calcul de distributions HDF selon des temps de retour particuliers.

Le tableau 25 et la figure 45 présentent un exemple de résultats des distributions (HDF) des apports verticaux de redoux hivernaux pour la station de Pointe-au-Père (no 7056067), sous les formes respectives de tableau des données et de courbes HDF. Soulignons ici que ces distributions peuvent également être présentées sous la forme Intensité-durée-fréquence (IDF).

Tableau 25. Apports verticaux extrêmes (mm) d'une durée de un à cinq jours estimés pour la station 7056067 à Pointe-au-Père selon des temps de retour de deux, cinq, dix, vingt et cinquante ans.

Durée	Temps de retour				
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans
1 jour	42,0	52,8	59,2	65,0	71,7
2 jours	69,3	86,9	97,9	108,0	120,5
3 jours	93,3	117,1	131,8	145,0	161,0
4 jours	113,1	142,6	160,7	177,0	196,8
5 jours	131,8	167,2	189,1	209,2	233,9

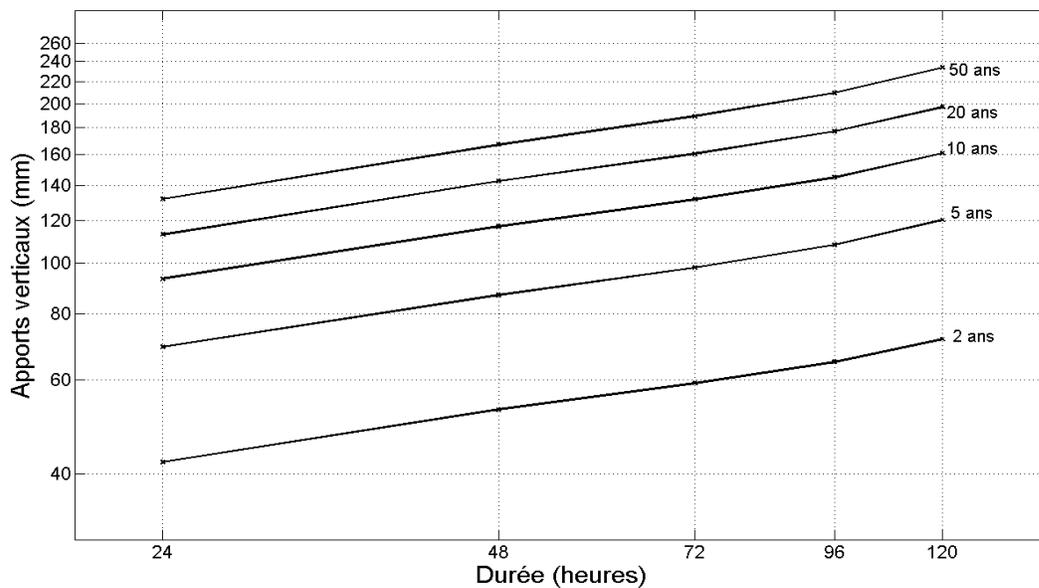


Figure 45. Courbes HDF des apports verticaux pour la station 7056067 à Pointe-au-Père

Par ailleurs, la figure 46 illustre la distribution spatiale des apports verticaux extrêmes estimés pour une durée de cinq jours et le temps de retour de deux ans pour l'ensemble des stations du sud du Québec considérés dans le cadre de la présente étude. Les résultats témoignent d'un fort gradient spatial dans les hauteurs d'eau prédites, variant de moins de 80 mm dans le sud-ouest du Québec à plus de 180 mm dans l'est de la province. Étant donné que les événements d'une durée de cinq jours sont très dépendants de l'accumulation de neige, ce gradient s'explique par le fait que les secteurs au sud, plus chauds, accumulent moins de neige au cours de l'hiver. L'ensemble des résultats de ce volet d'étude pour l'ensemble des stations météorologiques retenues est présenté en annexe au présent rapport, incluant les informations générales sur les stations, les résultats des tests de stationnarité et d'homogénéité des données, le nombre d'années valides et enfin les apports verticaux extrêmes dérivés des distributions IDF/HDF pour les durées de un à cinq jours et des temps de retour de deux à cinquante ans.

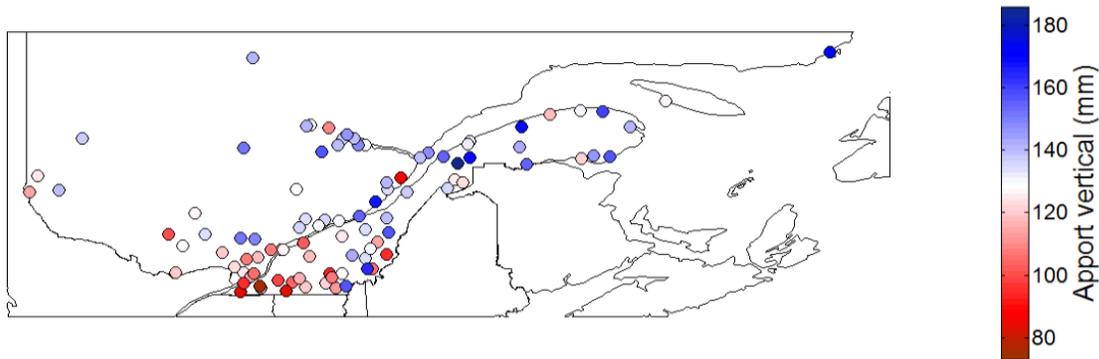


Figure 46. Cartographie des valeurs des estimateurs HDF pour la durée de 5 jours et le temps de retour de 2 ans pour l'ensemble des stations à l'étude.

33.4 Procéder à l'adaptation et à la validation d'une méthode de prédiction hydrologique

Cette section traite successivement des résultats des analyses hydrologiques réalisées sur les observations hydrométriques colligées aux exutoires des onze bassins versants à l'étude de même que de la performance des différents modèles et approches retenus dans la prédiction des hauteurs de ruissellement, des temps de montée, des paramètres de forme des hydrogrammes et des débits de pointe. Les méthodes les mieux adaptées aux prédictions hydrologiques pour l'ensemble des bassins à l'étude sont intégrées à un outil informatique (QmaxPBV), interfacé avec les banques de données hydro-pédologiques ainsi que les courbes de distribution IDF des précipitations générées dans le cadre du présent projet. L'ensemble est destiné à appuyer le dimensionnement des ouvrages hydro-agricoles auprès du milieu de pratique.

33.4.1 *Temps de montée et temps de concentration*

L'étude des temps de montée (observés) et des temps de concentration (modélisés) s'est appuyée sur l'analyse hydrologique de 193 hydrogrammes de type simple colligés aux exutoires de 10 bassins versants du réseau d'étude. Un hydrogramme a été classifié comme simple lorsque sa forme correspondait à celle de l'hydrogramme typique (pic unique) et que la durée de la précipitation est inférieure au temps de montée. Les temps de montée observés (t_p), représentent le temps que prend le débit pour atteindre le débit de pointe depuis le début du ruissellement. Cette caractéristique de l'hydrogramme est généralement mesurée lors de précipitations de relativement courte durée provoquant un hydrogramme simple typique.

Le Tableau 26 présente un sommaire des résultats des temps de montée observés, tels que déduits directement des hydrogrammes, de même que les valeurs calculées en lissant la fonction de probabilité gamma par les méthodes des moments et des moindres carrés, telles que supportées dans le logiciel VisuHydro.

Les valeurs moyennes du temps de montée observé varient de 3,14 heures à 9,8 heures avec un coefficient de variation (C_v) variant de 0,25 à 0,88 (moyenne de 0,54). Compte tenu que le temps de montée peut être influencé par de nombreux facteurs, un coefficient de variation de l'ordre de 50 % est jugé très acceptable. Il est par ailleurs observé que le calcul des temps de montée par la méthode des moments est généralement peu valide, produisant des valeurs excessivement élevées de temps de montée. La méthode des moindres carrés (LSQ) présente en moyenne des valeurs 10 % inférieures aux temps de montée observés. Pour les besoins de cette étude, les observations directes de temps de montée observées ont donc été retenues en support aux calculs de prédiction hydrologique abordés subséquentement.

Pour chacun des bassins versants à l'étude, le tableau 26 présente les différents paramètres requis (longueur d'écoulement, pente moyenne, CN moyens de type II et III) dans l'estimation des temps de concentration (t_c). Les longueurs d'écoulement et les pentes ont été déterminées pour chacun des parcours possibles de l'eau à partir des données à référence spatiale décrivant les nœuds et les segments des cours d'eau, de même qu'avec les utilitaires du modèle hydrologique SWAT (section 4.4.1). Le parcours produisant le plus grand temps de concentration est retenu. Les CN moyens de type II et III ont été utilisés. Le tableau 28 présente les résultats des calculs des différents temps de concentration selon les diverses méthodes retenues dans l'étude, soit Kirpich, Mockus, SCS-lag et Bransby-Williams. Les prédictions résultantes de temps de concentration y sont aussi comparées aux temps de montée observés. Puisque les temps de montée et de concentration sont différents d'un bassin versant à l'autre, le tableau 30 présente le ratio t_c/t_p pour les différentes méthodes et chacun des bassins versants. Un ratio se rapprochant de 1,0 signifie une bonne prédiction. La méthode de Mockus avec un CN de type III présente le ratio le plus près de l'unité (0,83), mais montre un très faible coefficient de corrélation ($R^2 = 0,11$). La méthode de Bransby-Williams présente le meilleur coefficient de corrélation ($R^2 = 0,48$), mais un ratio de 0,54. Il faudrait dès lors multiplier le résultat de Bransby-Williams par 1,85 pour obtenir une bonne estimation du temps de montée. Globalement, aucune des méthodes de détermination du temps de concentration à l'étude ne permet d'estimer correctement le temps de montée. Les corrélations (R^2) entre les temps de montée observés et les temps de concentration prédits par les différentes méthodes demeurent relativement faibles. Les méthodes de Mockus et SCS Lag qui incluent un facteur d'utilisation du sol offrent une moins bonne performance que les méthodes plus simples comme Kirpich et Bransby-Williams, ce qui décevra plusieurs utilisateurs. Il faut signaler que les calculs ont été effectués avec les données à référence spatiale disponibles et qu'aucun relevé sur le terrain n'a été effectué en ce qui concerne les longueurs d'écoulement et des pentes. Les résultats sont donc tributaires de la précision des données à référence spatiale disponibles.

Tableau 26. Sommaire des temps de montée observés et calculés pour les différents bassins versants du réseau d'étude.

Estimation de t_p (h) ¹																		
#	Bassin	N	Observé				Moments				LSQ_1_tp				LSQ_2_tp			
			μ	σ	C_v	Nash	μ	σ	C_v	Nash	μ	σ	C_v	Nash	μ	σ	C_v	Nash
1	Castors	29	7,14	3,18	0,45	0,93	10,63	3,64	0,34	0,95	5,74	2,01	0,35	0,99	5,58	1,99	0,36	0,99
2	Esturgeon Br. 21	14	7,66	4,29	0,56	0,95	11,23	4,94	0,44	0,95	7,34	5,61	0,76	0,99	6,97	4,80	0,69	0,99
3	Ewing	30	9,80	6,13	0,62	0,93	13,20	9,29	0,70	0,96	9,61	9,43	0,98	0,99	9,06	8,60	0,95	0,99
4	Fourchette amont	37	5,29	2,68	0,51	0,90	7,83	4,75	0,61	0,94	4,89	5,63	1,15	0,98	4,51	4,74	1,05	0,98
5	Fourchette aval	14	3,14	2,08	0,66	0,88	4,93	5,24	1,06	0,95	3,11	3,76	1,21	0,98	2,85	3,28	1,15	0,98
6	Petite Savane	5	9,05	7,92	0,88	0,91	11,78	9,61	0,82	0,92	7,90	7,21	0,91	0,98	7,45	6,55	0,88	0,98
7	Cass	7	9,14	2,29	0,25	0,90	12,00	2,17	0,18	0,95	8,44	2,00	0,24	0,97	7,87	1,42	0,18	0,97
8	Brook	8	3,84	2,78	0,72	0,88	5,79	3,07	0,53	0,91	2,81	2,32	0,82	0,99	2,84	2,25	0,79	0,99
9	Walbridge amont	29	7,65	2,82	0,37	0,88	12,27	7,45	0,61	0,92	6,57	4,16	0,63	0,97	6,04	3,24	0,54	0,97
10	Walbridge aval	20	9,65	3,20	0,33	0,92	16,76	6,41	0,38	0,91	8,22	2,11	0,26	0,97	7,93	1,99	0,25	0,97
Valeur minimum		5	3,1	2,1	0,3	0,9	4,9	2,2	0,2	0,9	2,8	2,0	0,2	1,0	2,8	1,4	0,2	1,0
Valeur maximale		37	9,8	7,9	0,9	1,0	16,8	9,6	1,1	1,0	9,6	9,4	1,2	1,0	9,1	8,6	1,1	1,0
Moyenne			7,24		0,54	0,91	10,64		0,57	0,94	6,47		0,73	0,98	6,11		0,68	0,98

N = nombre d'événements

μ = moyenne

σ = écart Type

C_v = coefficient de variation

Nash = coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe

¹ Observé : valeurs mesurées directement sur l'hydrogramme.

Moment : valeurs obtenues en lissant la fonction de probabilité gamma par la méthode des moments.

LSQ_1tp : valeurs obtenues en lissant la fonction de probabilité gamma par la méthode des moindres carrés du début du ruissellement à 1 tp après le débit de pointe.

LSQ_2tp : valeurs obtenues en lissant la fonction de probabilité gamma par la méthode des moindres carrés du début du ruissellement à 2 tp après le débit de pointe.

Tableau 27. Sommaire des temps de montée observés et des temps de concentration modélisés pour les différents bassins.

#	Bassin	N	Tp Obs (h)	CN_2	CN_3	Aire (ha)	L (m)	Pente (m/m)	Tc estimés (h)					
									BW	Kirp	Lag2	Lag3	Mo2	Mo3
1	Au_Castor	31	7,14	78	90	1228	7418	0,0013	5,20	4,01	20,07	13,25	15,58	5,79
2	Esturgeon_Branche21	18	7,66	82	92	231	3977	0,0012	3,35	2,56	11,20	7,69	7,31	2,99
3	Ewing	31	9,80	78	90	2782	12957	0,0014	8,25	5,99	30,22	19,95	23,46	8,71
4	Fourchette_Amont	32	5,29	73	87	250	3973	0,0052	2,48	1,45	7,04	4,52	6,68	2,32
5	Fourchette_Aval	16	3,14	56	75	192	2241	0,0066	1,37	0,85	6,16	3,73	10,81	3,28
6	Petite_Riviere_Savane	4	9,05	76	89	1519	8133	0,0162	3,37	1,63	6,49	4,27	5,47	2,02
7	Ruisseau_Cass	8	9,14	63	80	618	5072	0,0187	2,24	1,07	5,89	3,63	8,08	2,54
8	Ruisseau_Brook	11	3,84	65	82	714	4328	0,0139	2,00	1,06	5,71	3,52	7,30	2,30
9	Walbridge_Amont	23	7,65	77	89	631	3361	0,0037	2,04	1,46	6,51	4,34	5,26	2,00
10	Walbridge_Aval	19	9,65	79	90	794	6504	0,0026	4,15	2,78	12,39	8,43	9,22	3,68
Moyenne			7.24	73	86	896	5796	0,0071	3,44	2,29	11,17	7,33	9,92	3,56
Valeur minimum			3.14	56	75	192	2241	0,0012	1,37	0,85	5,71	3,52	5,26	2,00
Valeur maximum			9.80	82	92	2782	12957	0,0187	8,25	5,99	30,22	19,95	23,46	8,71

N = nombre d'événements

 μ = moyenne σ = écart Type

Cv = coefficient de variation

L = longueur d'écoulement

CN_2 et CN_3 = numéro de courbe type II et III

BW = méthode de Bransby-Williams

Kirp = méthode de Kirpich

Lag2 et Lag3 = méthode SCS Lag avec CN type II et III

Moc2 et Moc3 = méthode de Mockus avec CN type II et III

Tableau 28. Ratio des temps de concentration modélisés par rapport au temps de montée observés pour les différents bassins versants du réseau d'étude.

#	Bassin	Ratio Tc / Tp					
		BW	Kirp	Lag2	Lag3	Mo2	Mo3
1	Aux_Castors	0,73	0,56	2,81	1,86	2,18	0,81
2	Esturgeon Branche21	0,44	0,33	1,46	1,00	0,95	0,39
3	Ewing	0,84	0,61	3,08	2,04	2,39	0,89
4	Fourchette Amont	0,47	0,27	1,33	0,85	1,26	0,44
5	Fourchette Aval	0,44	0,27	1,96	1,19	3,44	1,04
6	Petite Riviere Savane	0,37	0,18	0,72	0,47	0,60	0,22
7	Ruisseau Cass	0,24	0,12	0,64	0,40	0,88	0,28
8	Ruisseau Brook	0,52	0,28	1,49	0,92	1,90	0,60
9	Walbridge Amont	0,27	0,19	0,85	0,57	0,69	0,26
10	Walbridge Aval	0,43	0,29	1,28	0,87	0,96	0,38
Moyenne		0,47	0,31	1,56	1,02	1,53	0,53
Écart type		0,19	0,16	0,83	0,55	0,92	0,29
Valeur maximum		0,84	0,61	3,08	2,04	3,44	1,04
Valeur minimum		0,24	0,12	0,64	0,40	0,60	0,22
Coefficient de variation		0,39	0,51	0,53	0,54	0,61	0,55
Coefficient de détermination R ²		0,35	0,28	0,20	0,21	0,06	0,11

BW = méthode de Bransby-Williams

Kirp = méthode de Kirpich

Lag2 et Lag3 = méthode SCS Lag avec CN type II et III

Mo2 et Mo3 = méthode de Mockus avec CN type II et III

Devant ce constat, l'analyse aurait pu se terminer ici. Dans un souci d'analyser les relations possibles et d'explorer le potentiel de méthodes alternatives, une approche de régression a été retenue dans la recherche d'une méthode alternative de prédiction pour estimer le temps de montée, sur la base des descripteurs physiques des bassins versants à l'étude. L'exercice s'est d'abord appuyé sur l'étude des corrélations entre les temps de montée et les différents paramètres généralement considérés dans les méthodes courantes, dont la longueur d'écoulement « L », le numéro de courbe « CN », la pente « S » et l'aire du bassin versant. Les paramètres de longueur d'écoulement et les CN démontrent une bonne corrélation avec le temps de montée (tableau 29), alors que la corrélation avec la pente demeure plutôt faible. Les CN type II et III sont fortement corrélés entre eux, tout comme l'aire du bassin et sa longueur. Les CN de type II ont été retenus de préférence aux CN de type III, tout comme la longueur d'écoulement a été retenue de préférence à la superficie du bassin versant.

Considérant que les différents modèles de détermination du temps de concentration sont généralement exprimés dans la forme suivante :

$$tc = Cte L^b CN^c S^d$$

Trois modèles de régression expliquant les temps de montée observés sur la base des descripteurs physiques des bassins versants ont été comparés, nommément : [10]

Modèle 1 : $tp = Cte L^b$ [11]

Modèle 2 : $tp = Cte L^b CN^c$ [12]

Modèle 3 : $tp = Cte L^b CN^c S^d$ [13]

tp : temps de montée (h)
L : longueur d'écoulement (m)
S : pente de l'écoulement (m/m)
CN : numéro de courbe

Dans l'ensemble, la longueur d'écoulement a démontré le meilleur pouvoir explicatif du temps de montée (prob < 0,05), alors que les contributions du CN et de la pente des bassins sont associées respectivement à des taux de probabilité de 15 et 25 %. Les corrélations des modèles avec les temps de montée sont toutes trois fois supérieures à celles établies avec les méthodes de prédiction initialement évaluées. Les temps de montée prédits par les trois nouveaux modèles de régression et les ratios tp prédit/tp observés sont présentés au tableau 30. Le modèle de régression no 3 est retenu et proposé dans l'estimation du temps de montée en alternative aux méthodes « traditionnelles », compte tenu de sa meilleure corrélation avec les temps de montée observés.

$$Tp = 0,0000716 L^{0,453} Cn^{2,01} S^{0,166}$$

[14]

Tableau 29. Matrice des coefficients de corrélation des temps de montée (tp) observés avec les paramètres descriptifs des bassins versants.

Corrélations	tp	CN type II	CN type III	Long.	Pente
tp	1,00				
CN type II	0,63	1,00			
CN type III	0,63	1,00	1,00		
Longueur	0,66	0,47	0,49	1,00	
Pente	-0,11	-0,63	-0,62	-0,40	1,00
Aire	0,56	0,36	0,38	0,98	-0,39

Tableau 30. Prédications du temps de montée par les différents modèles de régression proposés.

#	Bassin	Paramètres						Prédiction de par les modèles ¹			Ratio Tp prédit/Tp observé		
		tp	CN_2	CN_3	Long	Pente	Aire	M1	M2	M3	M1	M2	M3
1	Castors	7,14	78	90	7418	0,0013	1228	8,4	8,6	8,6	1,17	1,21	1,21
2	Esturgeon Br. 21	7,66	82	92	3977	7E-04	231	5,7	7,2	6,5	0,75	0,94	0,84
3	Ewing	9,80	78	90	12957	0,001	2782	11,7	10,8	11,1	1,19	1,10	1,13
4	Fourchette Amont	5,29	73	87	3973	0,005	250	5,7	6,2	7,0	1,08	1,16	1,32
5	Fourchette Aval	3,14	56	75	2312	0,004	192	4,1	3,4	3,2	1,32	1,10	1,01
6	Petite Savane	9,05	76	89	8133	6E-04	1519	8,8	8,7	7,5	0,98	0,96	0,83
7	Cass	9,14	63	80	5072	0,009	618	6,6	5,5	6,5	0,73	0,61	0,71
8	Brook	3,84	65	82	4461	0,002	714	6,1	5,5	5,0	1,60	1,43	1,30
9	Walbridge Amont	7,65	77	89	4016	0,004	631	5,8	6,6	7,5	0,75	0,87	0,98
10	Walbridge Aval	9,65	79	90	6504	0,001	794	7,7	8,3	8,4	0,80	0,87	0,87
¹ Modèle 1 : $t_p = Cte L^b$ Modèle 2 : $t_p = Cte L^b Cn^c$ Modèle 3 : $t_p = Cte L^b Cn^c S^d$								Moyenne			1,04	1,02	1,02
								Ecart-type			0,29	0,23	0,21
								C.V.			0,28	0,22	0,21
								R ²			0,53	0,65	0,72

Bien que les équations de régression développées dans le cadre de la présente étude permettent une meilleure estimation du temps de montée que les modèles existants, le nombre de bassins mis à profit demeure cependant limité (N = 10) pour établir un tel modèle de prédiction hydrologique. La contribution d'observations d'un plus grand nombre de bassins versants sera nécessaire pour raffiner la conception du modèle et le valider. Aussi, l'utilitaire développé QmaxPBV permet à l'utilisateur de recourir aux modèles de Kirpich, Mockus, SCS-lag, Bransby-Williams d'estimation du temps de montée, en complément de l'équation du modèle de régression no 3 développée dans le cadre de la présente étude. ..

33.4.2 Coefficient de forme des hydrogrammes

Le tableau 31 présente un sommaire des coefficients de forme estimés dans le cadre du présent projet pour les 195 hydrogrammes de type simple, représentatifs de dix bassins versants du réseau d'étude. La méthode « directe ou qp tp » ($\varphi(\alpha) = qp \cdot tp$) utilise les temps de montée (tp) et des débits de pointe (qp) observés. Cette méthode utilisée par Fang et *al.* (2004) a été retenue comme méthode d'estimation du coefficient de forme car elle utilise les temps de montée (tp) et des débits de pointe (qp) observés sans avoir à estimer les paramètres de la fonction gamma.

Le coefficient moyen est de 0,73 pour l'ensemble des hydrogrammes et des bassins versants, avec un écart type de 0,11. La plus petite valeur est de 0,53 pour le bassin « Brook » et de 0,90 pour le bassin « Cass ». Une analyse de variance montre que le coefficient de forme est affecté par un effet bassin. Une analyse de la plus petite différence significative montre que les facteurs de forme ne sont pas différents d'un bassin à l'autre, sauf pour les bassins « Brook », « Esturgeon » et « Cass ». À titre de comparaison, dans une étude réalisée au Texas sur 90 bassins versants avec 1600 événements, Fang et *al.* (2004) ont déterminé un coefficient de forme de 0,57 avec un écart type de 0,12. Ils n'ont cependant pas pu établir de relation avec les caractéristiques des bassins versants à l'étude. Pour le moment, aucun facteur ne semble pouvoir expliquer les différences de coefficients observées entre les différents bassins versants et le petit nombre de bassins étudiés oblige à la prudence.

Il faut aussi savoir que la méthode rationnelle correspond à un coefficient de forme de 1,00 alors que la méthode de l'hydrogramme triangulaire ou unitaire du SCS correspond à un coefficient de forme de 0,75. Théoriquement, les bassins versants avec une topographie accidentée devraient avoir des coefficients de forme plus grands que les bassins versants possédant une plaine inondable importante. Selon le USDA-NRCS (2007), le coefficient de forme pourrait varier de 0,23 à 0,93.

L'évaluation relativement homogène du coefficient de forme pour l'ensemble des bassins à l'étude (tableau 32), présentant pourtant des caractéristiques physiographiques très contrastées, de même que la faiblesse de l'écart-type, militent en faveur de retenir la valeur moyenne 0,73 comme coefficient de forme d'hydrogramme ($\varphi(\alpha)$) pour les prédictions hydrologiques applicables à l'ensemble des petits bassins versants ruraux au Québec. L'utilitaire développé QmaxPBV propose cette valeur comme l'une des options.

Tableau 31. Distribution des coefficients de forme d'hydrogrammes $\varphi(\alpha)$ observés pour les dix bassins versants à l'étude et calculés en lissant la fonction de probabilité gamma par les méthodes des moments et des moindres carrés.

Estimation de $\varphi(\alpha)$																		
#	Bassin	N	Qp tp				Moments				LSQ_1_tp				LSQ_2_tp			
			μ	σ	C_v	Nash	μ	σ	C_v	Nash	μ	σ	C_v	Nash	μ	σ	C_v	Nash
1	Castors	29	0,69	0,14	0,20	0,93	0,98	0,37	0,37	0,95	0,55	0,14	0,26	0,99	0,53	0,13	0,24	0,99
2	Esturgeon Br. 21	15	0,58	0,18	0,31	0,95	0,77	0,15	0,20	0,95	0,52	0,21	0,41	0,99	0,49	0,17	0,35	0,99
3	Ewing	30	0,75	0,25	0,33	0,93	0,85	0,26	0,30	0,96	0,66	0,34	0,51	0,99	0,62	0,29	0,47	0,99
4	Fourchette amont	37	0,80	0,19	0,24	0,90	1,05	0,50	0,48	0,94	0,66	0,64	0,98	0,98	0,60	0,52	0,87	0,98
5	Fourchette aval	14	0,83	0,14	0,17	0,88	0,97	0,25	0,26	0,95	0,65	0,27	0,42	0,98	0,59	0,20	0,33	0,98
6	Petite Savane	5	0,72	0,25	0,35	0,91	0,85	0,07	0,09	0,92	0,70	0,46	0,65	0,98	0,68	0,44	0,65	0,98
7	Cass	7	0,90	0,28	0,31	0,90	1,02	0,34	0,33	0,95	0,81	0,35	0,43	0,97	0,74	0,26	0,36	0,97
8	Brook	8	0,53	0,16	0,31	0,88	0,69	0,11	0,17	0,91	0,34	0,15	0,44	0,99	0,35	0,14	0,40	0,99
9	Walbridge amont	29	0,74	0,22	0,30	0,88	1,00	0,70	0,70	0,92	0,58	0,27	0,47	0,97	0,54	0,22	0,41	0,97
10	Walbridge aval	21	0,76	0,21	0,28	0,92	1,15	0,43	0,37	0,91	0,65	0,24	0,38	0,97	0,62	0,23	0,37	0,97
	Minimum		0,53	0,14	0,17	0,88	0,69	0,07	0,09	0,91	0,34	0,14	0,26	0,97	0,35	0,13	0,24	0,97
	Maximum		0,90	0,28	0,35	0,95	1,15	0,70	0,70	0,96	0,81	0,64	0,98	0,99	0,74	0,52	0,87	0,99
	Moyenne		0,73		0,28	0,91	0,93		0,33	0,94	0,61		0,49	0,98	0,58		0,45	0,98

N = nombre d'événements

μ = moyenne

σ = écart Type

C_v = coefficient de variation

Nash = coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe

33.4.3 Estimation et prédiction des hauteurs de ruissellement

L'étude des relations entre les précipitations (Ppt) et les hauteurs de ruissellement (Hru) générées aux exutoires des onze bassins versants à l'étude découle de l'analyse des hydrogrammes supportée par le logiciel VisuHydro. L'analyse préliminaire de l'ensemble des données a d'abord permis de cerner l'influence de la saison, du type d'hydrogramme et de la hauteur de précipitation sur la relation Hru : Ppt. Le tableau 33 décrit la distribution des hauteurs de ruissellement et des coefficients de ruissellement des 709 hydrogrammes analysés individuellement pour chacun des bassins versants à l'étude. Les coefficients de ruissellement (Cru) excessivement élevés sont systématiquement associés aux épisodes de fonte et de pluie hivernale (décembre à avril), plus élevés que les coefficients résultant de précipitations en saison de croissance (mai-novembre). La contribution de la fonte du couvert neigeux au ruissellement de surface explique ces surestimations en période d'influence hivernale, tel qu'illustré par les observations colligées sur le bassin du ruisseau au Castor en Montérégie (figure 49). Pour cette raison, l'analyse de covariance (ANCOVA) des hauteurs de ruissellement, utilisant les observations de précipitations en covariable, a été restreinte aux 463 événements analysés en période de croissance (mai-novembre) aux fins de la présente étude (tableau 34).

L'analyse préliminaire des jeux de données a aussi démontré que le type d'hydrogramme (unitaire, simple, multi-pics ou complexe) n'avait pas d'influence sur la relation Hru : Ppt (figure 50). Les observations de ruissellement associées à un événement hydrologique dont le coefficient de ruissellement était supérieur à deux fois la moyenne plus l'écart-type ont été exclues des analyses ANCOVA. Une dizaine d'observations ont ainsi été retranchées. Ces événements sont pour la plupart des cas associés à des données de précipitations manquantes ou déficientes.

L'analyse de la distribution de l'ensemble des observations Hru a mis en relief une distribution non normale des observations car l'erreur est proportionnelle à la hauteur de précipitation. Cette situation est problématique dans la réalisation des analyses ANCOVA. En effet, le postulat de l'homogénéité de la variance n'est alors pas respecté et les résidus du modèle de prédiction sont mal distribués. Afin de mieux respecter le postulat d'hétéroscédasticité propre à l'ANCOVA, les variables Hru et Ppt ont été transformées sur une base logarithmique, générant une distribution normale des observations et des résidus des prédictions (figure 51). L'erreur est alors proportionnelle à la hauteur de précipitation.

Dans ce contexte, les modèles de régression auront la forme suivante :

$$\log(\text{Hru}) = a \log(\text{Ppt}) + b \quad [15]$$

ce qui correspond aux modèles physiques suivants :

$$\text{Hru} = 10^b + \text{Ppt}^a \quad [16]$$

Ainsi, dans la discussion qui va suivre, la pente « a » du modèle de régression correspond à l'exposant de la précipitation et l'ordonnée à l'origine du modèle de régression (la constante « b ») exprime en réalité le coefficient de ruissellement (10^b).

Tableau 33. Distributions des volumes, hauteurs et coefficients de ruissellement associés aux 709 hydrogrammes analysés individuellement.

Estimation des Volumes de Ruissellement														
#	Bassin	N	V _{ru} (m ³)				H _{ru} (mm)				C _{ru}			
			μ	σ	Min	Max	μ	σ	Min	Max	μ	σ	Min	Max
1	Castor	112	67 429	115 577	999	1 029 709	5,49	9,41	0,11	83,87	0,24	0,25	0,01	1,88
2	Esturgeon Br.21	46	22 359	20 392	995	90 418	9,68	8,83	0,43	39,15	0,42	0,49	0,03	2,73
3	Ewing	82	285 897	387 261	702	2 575 492	10,28	13,92	0,03	92,56	0,65	1,49	0,01	12,32
4	Fourchette Amont	113	22 828	44 600	132	286 769	9,14	17,85	0,05	114,79	0,35	0,60	0,00	4,83
5	Fourchette Aval	55	28 854	76 307	553	470 913	15,00	39,67	0,29	244,83	0,28	0,46	0,02	2,93
6	Petite Savane	32	154 000	470 931	471	2 655 001	10,14	31,00	0,03	174,80	0,21	0,37	0,01	1,94
7	Cass	33	39 329	53 543	999	277 969	6,36	8,66	0,32	44,96	0,19	0,45	0,02	2,48
8	Brook	32	58 134	71 288	999	315 643	8,14	9,99	0,41	44,22	0,25	0,14	0,03	0,54
9	Walbridge Amont	114	38 822	53 090	284	361 835	6,16	8,42	0,05	57,37	0,31	0,34	0,00	2,04
10	Walbridge Aval	90	73 663	115 784	888	845 654	9,27	14,58	0,11	106,46	0,51	1,11	0,02	9,10
Valeur Minimum		32	22 359	20 392	132	90 418	5,49	8,42	0,03	39,15	0,19	0,14	0,00	0,54
Valeur Maximale		114	285 897	470 931	999	2 655 001	15,00	39,67	0,43	244,83	0,65	1,49	0,03	12,32
Valeur μ Consolidé		71	79 131		702	890 940	8,97		0,18	100,30	0,34		0,01	4,08

N = Nombre d'événements

μ = Moyenne

σ = Écart type

Min = Valeur minimale

Max = Valeur maximale

V_{ru} = Volume de ruissellement (m³)

H_{ru} = Hauteur de ruissellement (mm)

C_{ru} = Coefficient de ruissellement (adimensionnel)

Les analyses ANCOVA ont ensuite été réalisées sur les jeux de données transformées. Le jeu final de données utilisé dans les analyses ANCOVA comprend 463 observations colligées en saison de croissance (mai-novembre) aux exutoires des onze bassins versants à l'étude, tous types d'hydrogrammes confondus (simple, multi-pics et complexe). Les analyses de l'ensemble des observations ou de leurs sous-ensembles ont systématiquement été réalisées suivant une ANCOVA typique en quatre étapes, incluant :

- la détection de relation significative entre H_{ru} et Ppt (test de pente de régression non nul);
- la détection de pentes de régression significativement différentes entre les bassins ou les regroupements de bassins à l'étude et la variable explicative Ppt (test d'interaction *Bassin X Ppt*);
- la détection d'ordonnées à l'origine significativement différentes entre les bassins ou les regroupements de bassins à l'étude en présence de pentes de régression communes (test du facteur *Bassin ou regroupement de bassin*);
- la détermination d'un modèle général à pente et ordonnée commune pour l'ensemble des bassins ou regroupement de bassins à l'étude.

Suivant les étapes de la démarche de l'ANCOVA, un modèle complet (lorsque les pentes et les ordonnées à l'origine sont significativement distinctes pour chacun des bassins), un modèle réduit (lorsque la pente des bassins est commune, mais que les ordonnées à l'origine sont significativement distinctes) ou un modèle unique (pente et ordonnée à l'origine communes pour tous les bassins) a été retenu pour prédire la hauteur de ruissellement d'un événement donné (H_{ru}) en fonction des précipitations associées à l'évènement (Ppt) pour un bassin ou regroupement de bassins donné.

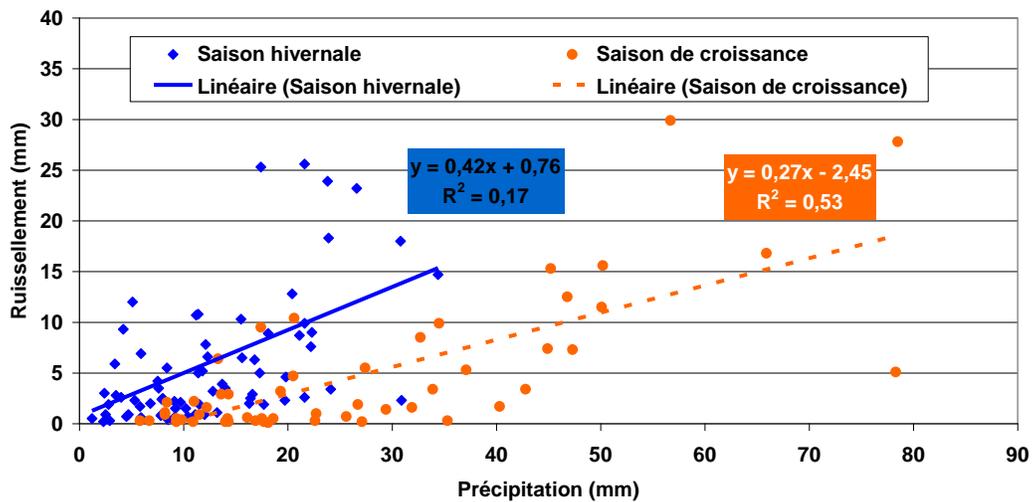


Figure 47. Hauteurs de ruissellement estimées à l'exutoire du bassin versant du ruisseau au Castor en Montérégie en fonction de la précipitation et selon la saison hivernale (décembre à avril) ou la saison de croissance (mai à novembre).

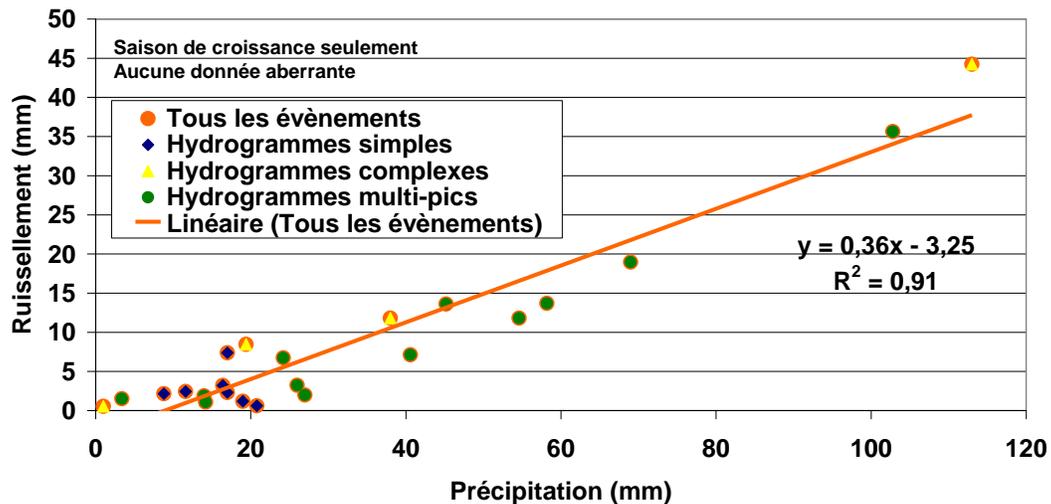


Figure 48. Hauteurs de ruissellement estimées à l'exutoire du bassin versant du ruisseau Brook en Estrie en fonction de la précipitation selon différents types d'hydrogrammes.

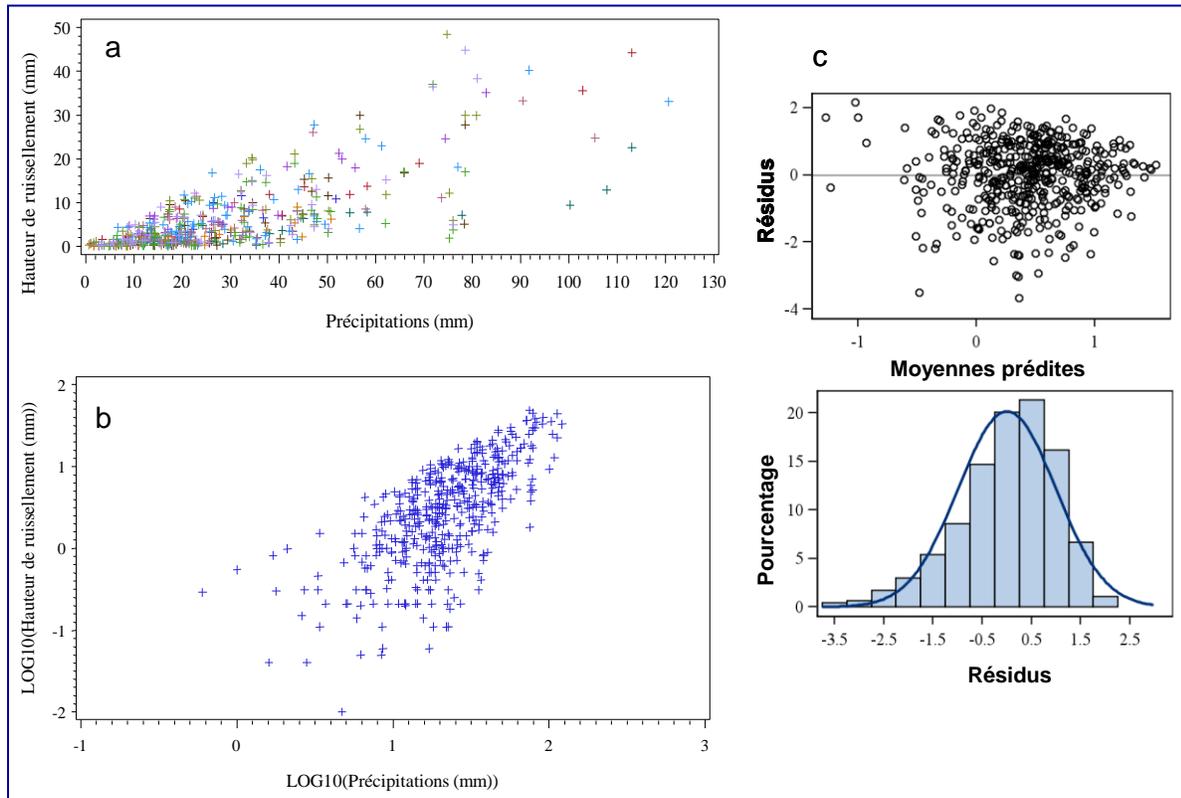


Figure 49. Distribution des hauteurs de précipitation (N = 463 évènements) en fonction des précipitations pour les données originales (a) et pour les données transformées (log) (b), de même que la distribution des résidus de l'ANCOVA des hauteurs de ruissellement pour l'effet « Bassin » utilisant la hauteur de précipitation en covariable pour les données transformées (c).

Tableau 34. Distribution mensuelle du nombre d'hydrogrammes analysés par bassin versant et utilisés dans les analyses statistiques des relations entre les hauteurs de ruissellement et de précipitation.

BASSIN	mois							Total
	5	6	7	8	9	10	11	
Bélaïr (Turmel)	3	5	3	1	8	1	2	23
Castors	8	11	6	10	6	12	0	53
Esturgeon Br. 21	3	3	5	4	4	3	4	26
Ewing	8	5	3	4	4	8	12	44
Fourchette Amont	8	15	18	8	10	21	10	90
Fourchette Aval	3	6	6	7	6	11	5	44
Petite Savane	1	3	4	1	10	0	4	23
Cass	2	3	3	2	1	0	1	12
Brook	2	3	4	3	9	1	3	25
Walbridge Amont	11	9	4	6	8	12	17	67
Walbridge Aval	10	5	2	6	7	13	13	56
Total	59	68	58	52	73	82	71	463

Résultats du modèle global des effets des onze bassins

L'ANCOVA des hauteurs de ruissellement de l'ensemble des bassins versants à l'étude observations (N = 463) a démontré l'absence d'interactions entre les facteurs « Bassin » et la covariable (Ppt). Les onze bassins versants partagent ainsi la même pente de régression d'un modèle réduit, exprimant $\log(\text{Hru})$ en fonction de $\log(\text{Ppt})$, où les effets des bassins versants sont exprimés par des ordonnées à l'origine distinctes. Les résultats de l'ANCOVA, exprimés au tableau 35, témoignent du caractère significatif de cet effet « Bassin » ($p < 0,001$). Le modèle permet dès lors de détecter, quantifier et comparer les différences dans les coefficients de ruissellement (ordonnées à l'origine « b » du modèle de régression) associées aux différents bassins versants. Le modèle résultant, considérant les ordonnées à l'origine propres à chacun des bassins, est illustré en figure 52.

Dans l'ensemble, les modèles de régression appliqués aux onze bassins versants témoignent de contrastes très importants dans les relations Hru : Ppt. Considérant une valeur de précipitations moyenne de 21,3 mm associée à l'ensemble des hydrogrammes analysés, les hauteurs moyennes de ruissellement prédites varient de 1,56 mm à l'exutoire du bassin Cass en Estrie à 5,67 mm au bassin Esturgeon en Montérégie (Figure 52). Conceptuellement, ce gradient dans les activités hydrologiques de surface reflète des interactions complexes entre les effets de la forme des paysages, des propriétés des sols et de l'occupation des sols.

Tableau 35. Résultats de l'analyse de covariance (ANCOVA) des hauteurs de ruissellement (log Ru) selon des modèles réduits (pente unique) considérant l'effet « Bassin » et utilisant la hauteur de précipitation (log Ppt) en covariable pour l'ensemble des onze bassins versants (a), les cinq bassins montérégiens (b) et les six bassins appalachiens (c).

a) Modèle local (11 bassins) $R^2 = 0,52$

Source	DL	S.C.	M.C.	Erreur DL	Valeur F	Pr > F
Bassin	10	12,19	1,22	451	6,52	<,0001
LOG_PPT	1	77,95	77,95	451	416,72	<,0001
Résidu	451	84,36	0,19			

b) Modèle montérégien (5 bassins) $R^2 = 0,52$

Bassin	4	7,56	1,89	240	8,84	<,0001
LOG_PPT	1	48,29	48,29	240	225,86	<,0001
Résidu	240	51,31	0,21			

c) Modèle appalachien (6 bassins) $R^2 = 0,51$

Bassin	5	4,48	0,90	210	5,7	<,0001
LOG_PPT	1	29,69	29,69	210	188,8	<,0001
Résidu	210	33,02	0,16			

Parmi les bassins démontrant les plus fortes activités hydrologiques, nous retrouvons en tête de liste la branche 21 de la rivière Esturgeon en Montérégie Ouest. Il s'agit d'un paysage plat, dominé par les sols argileux à vocation culturale intensive (horticole et grandes cultures; Michaud et *al.*, 2012). Les bassins Ewing (Michaud et *al.*, 2009a) et Walbridge aval dans le secteur Missisquoi de la Montérégie Est (Michaud et *al.*, 2009b) témoignent aussi d'une activité hydrologique de surface relativement intense, malgré un terrain plat. Une occupation basse dans le relief du bassin de la rivière aux Brochets, la présence de sols lourds et une vocation de grandes cultures expliquent la relative sensibilité au ruissellement de surface de ces bassins. Les sous-bassins voisins, soit le Ruisseau aux Castors (Michaud et *al.*, 2005; Michaud et *al.*, 2009a) et le ruisseau Walbridge amont (Michaud et *al.*, 2009b) occupent des positions relativement plus hautes dans le relief. Ce gradient expliquerait les émissions de ruissellement de surface relativement moins intenses que le ruisseau Ewing et Walbridge aval.

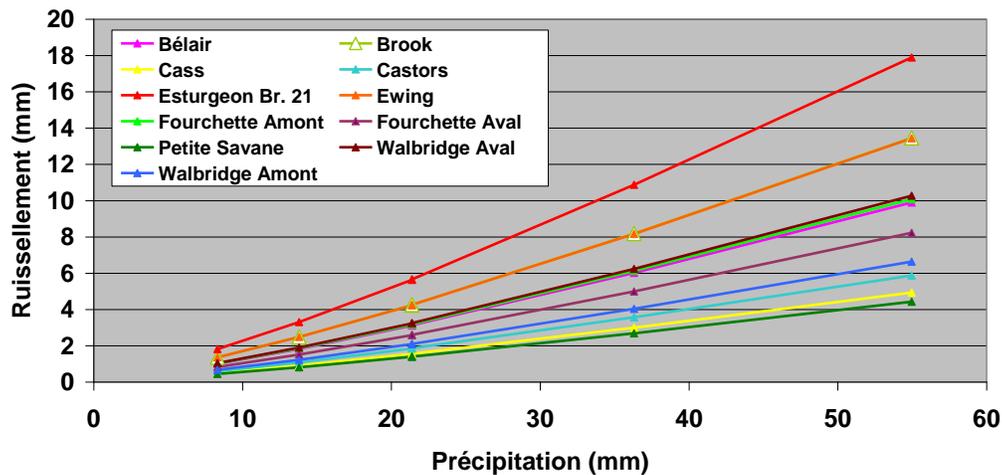


Figure 50. Modèle réduit (pente unique) d'analyse de covariance des hauteurs de ruissellement (Hru) considérant l'effet « Bassin », utilisant la hauteur de précipitation en covariable et appliqué aux observations transformées (log).

Du côté de l'Estrie, malgré sa position relativement élevée dans le relief appalachien, le ruisseau Brook témoigne d'une forte activité hydrologique de surface. La nature argileuse des sols expliquerait ces fortes réponses hydrologiques. À l'opposé, le ruisseau Cass, situé à proximité, témoigne des plus faibles hauteurs de ruissellement de surface de tout le réseau d'étude. Le relief du bassin du ruisseau Cass est pourtant plus accidenté que son voisin, le ruisseau Brook, et présente une occupation du sol similaire. Une meilleure qualité du drainage expliquerait en partie la différence dans les réponses hydrologiques de ces ruisseaux de l'Estrie. Aussi, la présence de nombreux milieux humides et de barrages de castors dans le bassin versant du ruisseau Cass contribue certainement à des réponses hydrologiques fortement atténuées (Michaud et *al.*, 2012).

Les trois bassins beaucerons (Bélair, Fourchette amont et aval) ne témoignent pas de différences significatives dans leurs hauteurs de ruissellement prédites, reflétant des occupations du sol semblables, malgré des reliefs et des groupes hydrologiques de sol pourtant différenciés (Michaud et *al.*, 2009b). Les intervalles de confiance (90 %) des prédictions sont par ailleurs les plus élevés du réseau d'étude (figure 53), reflétant possiblement l'influence des paysages sur le développement des zones de saturation du sol et l'émission de ruissellement à surface variable. Enfin, les prédictions d'hauteurs de ruissellement du ruisseau de la Petite Savane au Témiscouata témoignent d'une faible activité hydrologique de surface en lien avec une occupation du sol dominée par la forêt, et ce malgré une dominance de groupes hydrologiques de sol « D ». Ce territoire est aussi soumis à l'influence de milieux humides et de barrages de castors, qui se reflète dans les hydrogrammes et les sédigrammes en période de crue du ruisseau (Michaud et *al.*, 2012).

Les figures 54 et 55 illustrent respectivement les observations et les prédictions des hauteurs de ruissellement en Montérégie et dans le relief appalachien selon les modèles de régression locaux développés dans le cadre de la présente étude. Ces modèles sont comparés aux prédictions des modèles de Monfet (1979) et SCS (Soil conservation service; USDA-SCS, 1986) couramment utilisés en milieu de pratique au Québec à titre de référence. De façon

générale, le modèle du SCS sous-estime grandement le ruissellement pour les précipitations inférieures à 100 mm. Le modèle de Monfet (1979) se situe près de la valeur moyenne ou légèrement au-dessus.

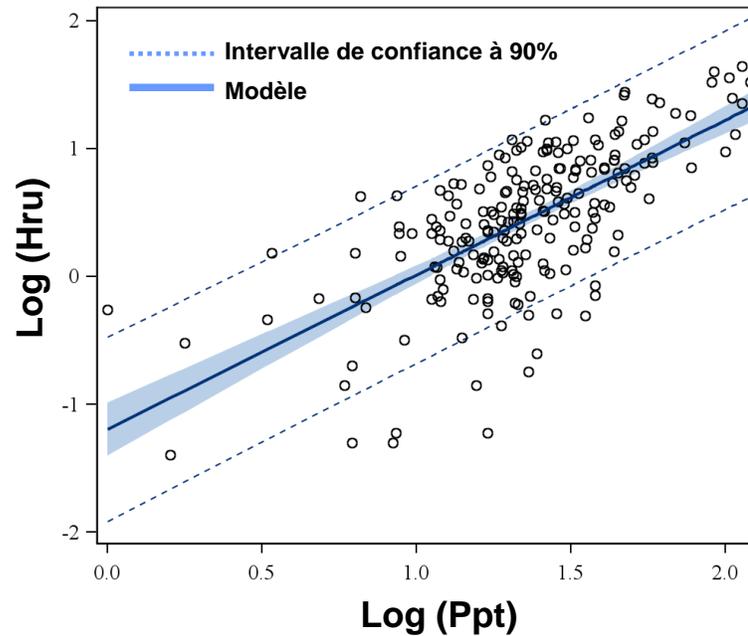
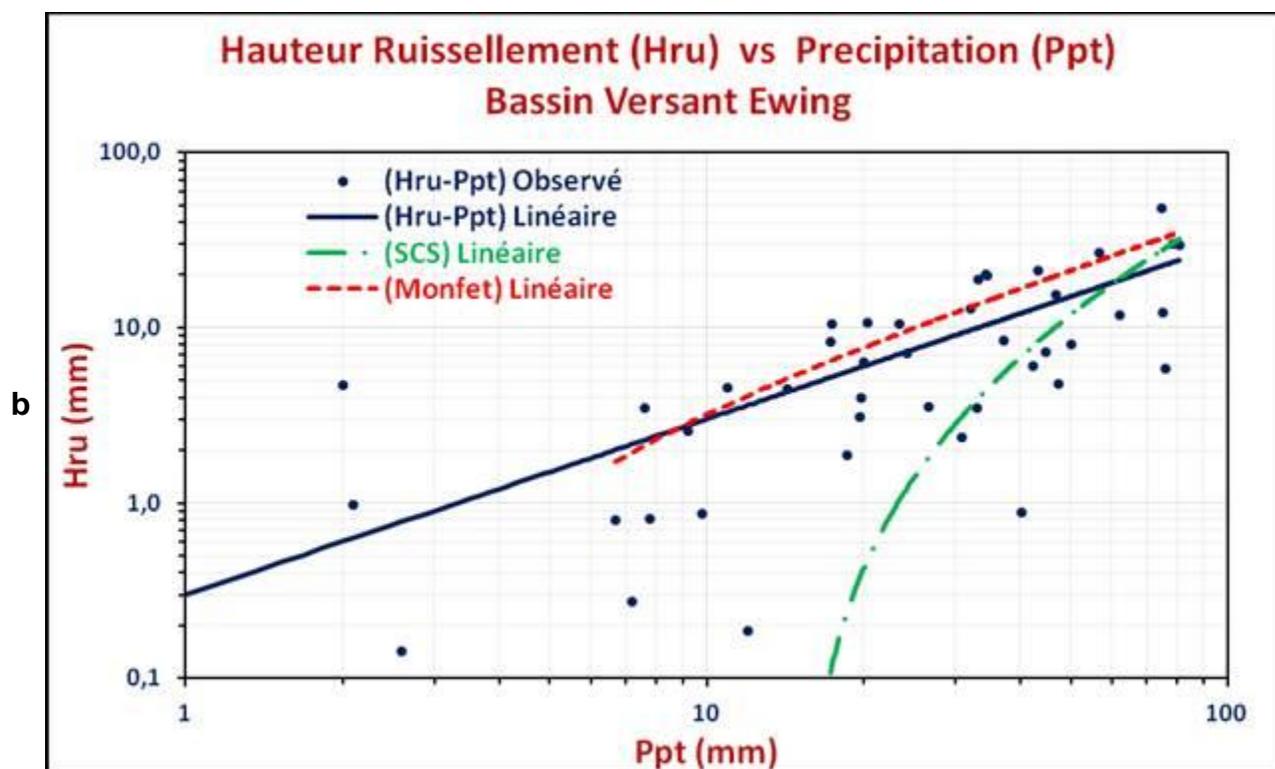
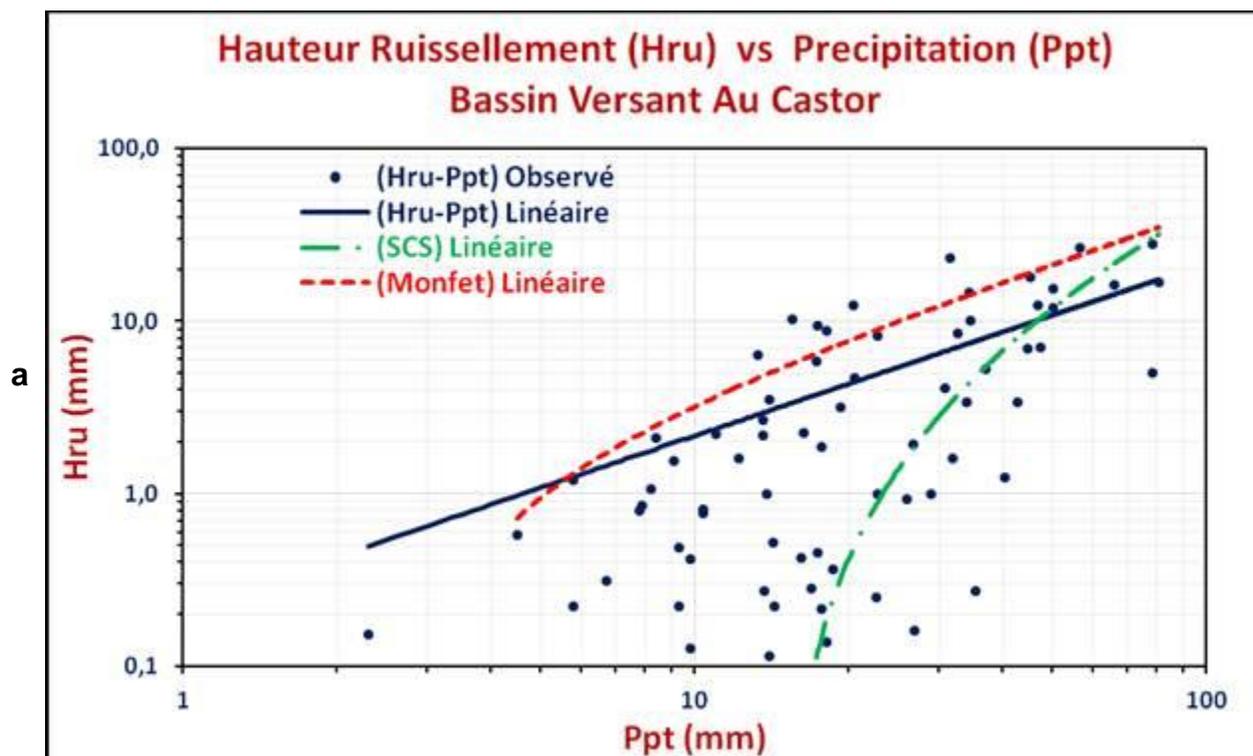
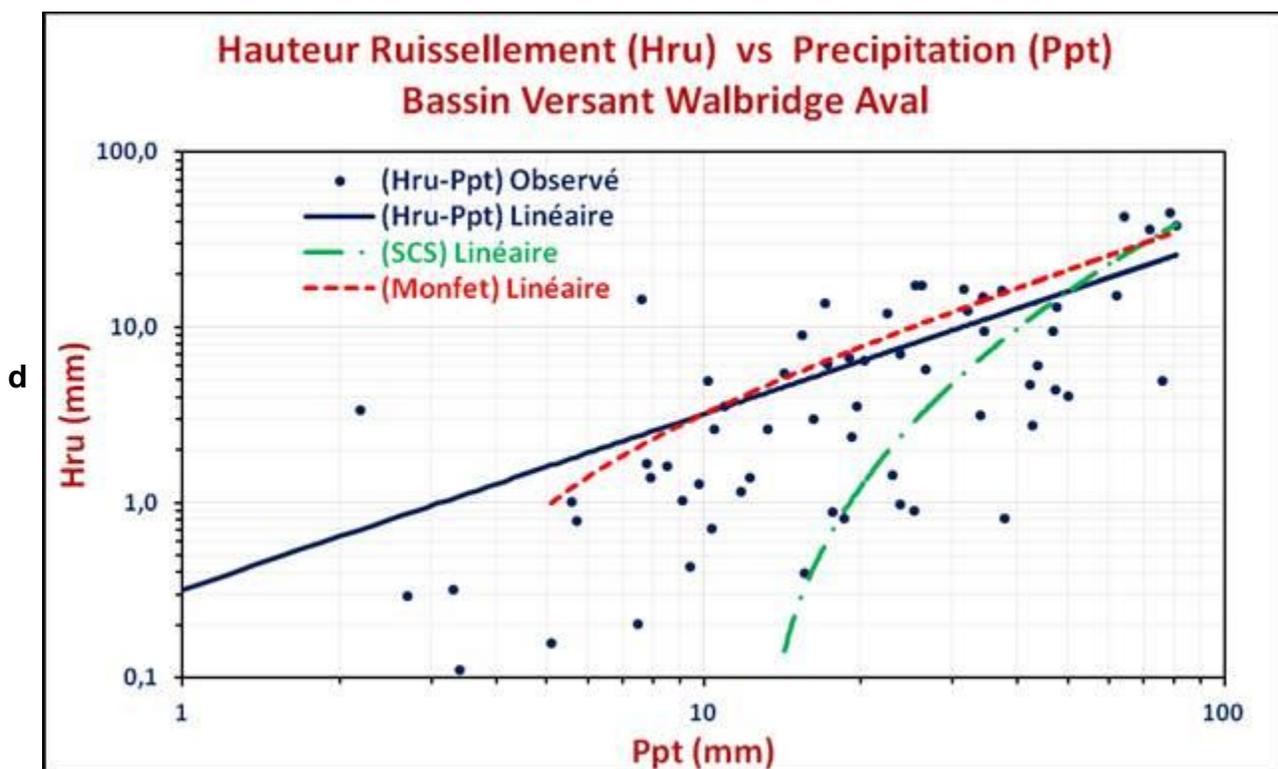
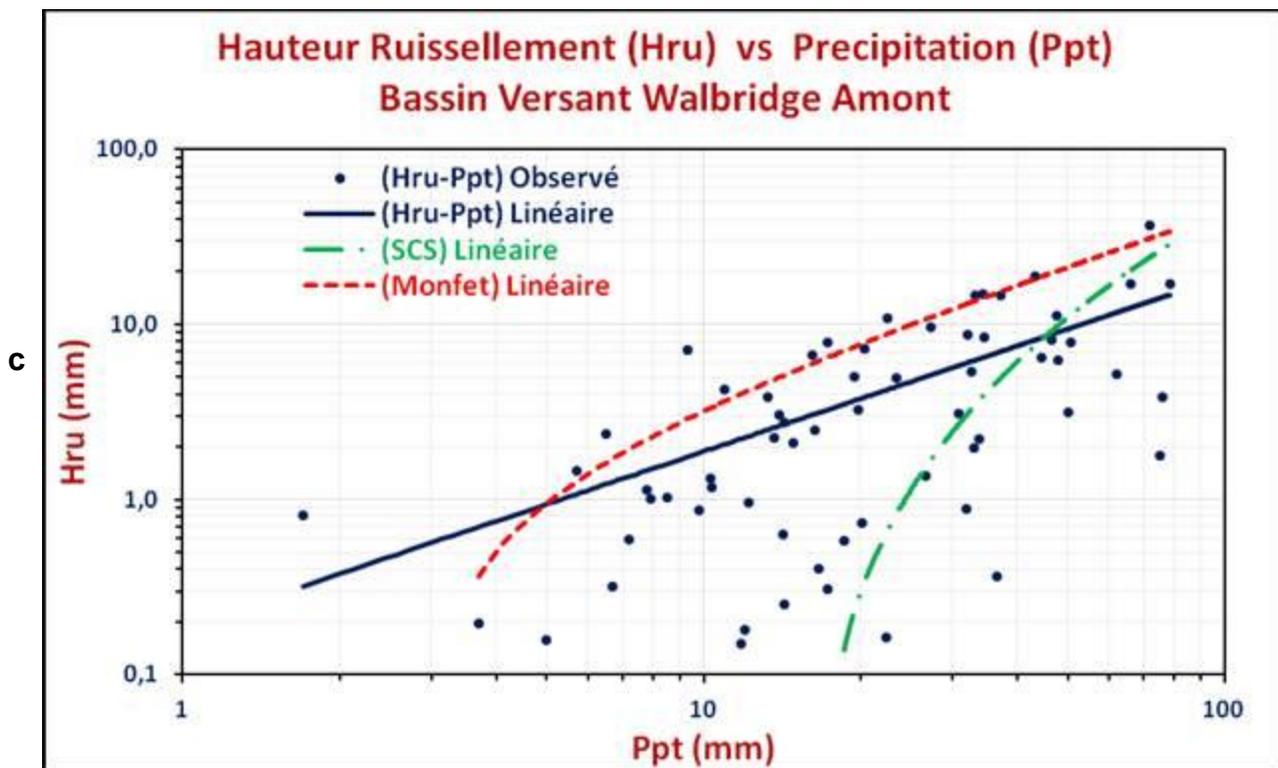
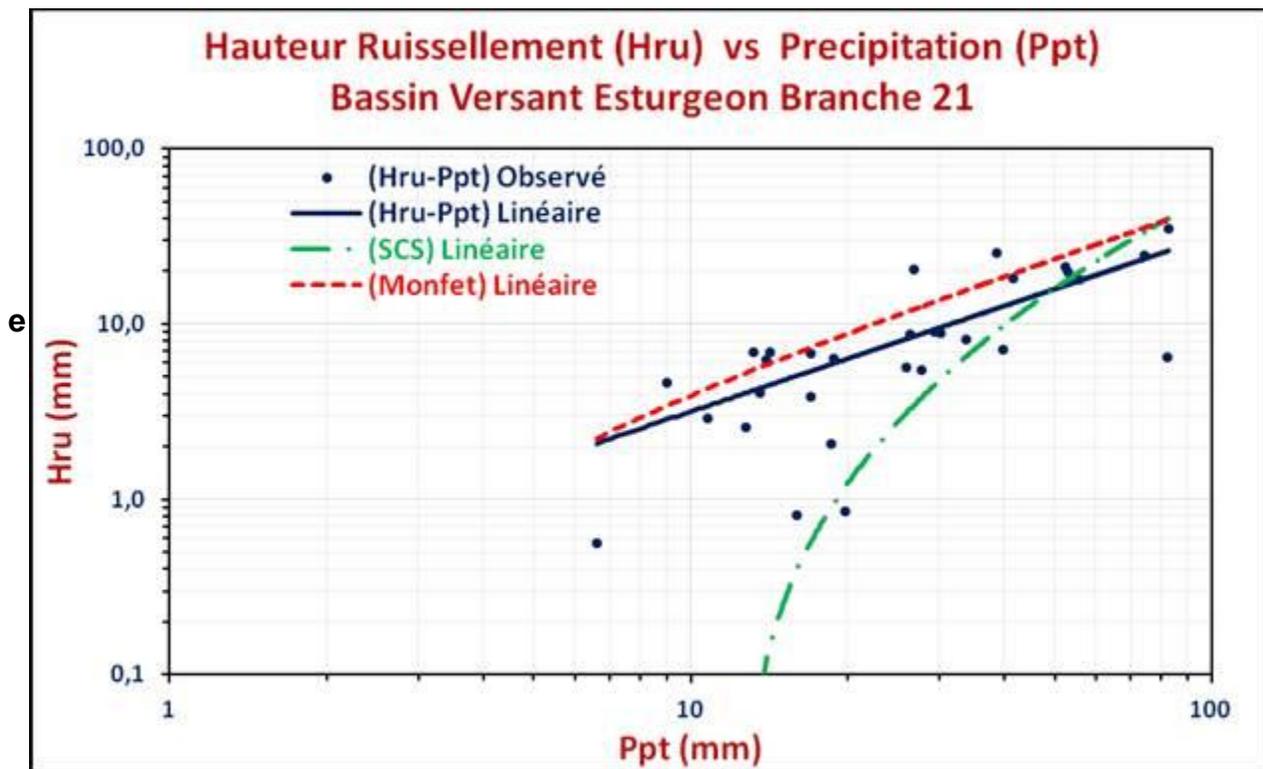


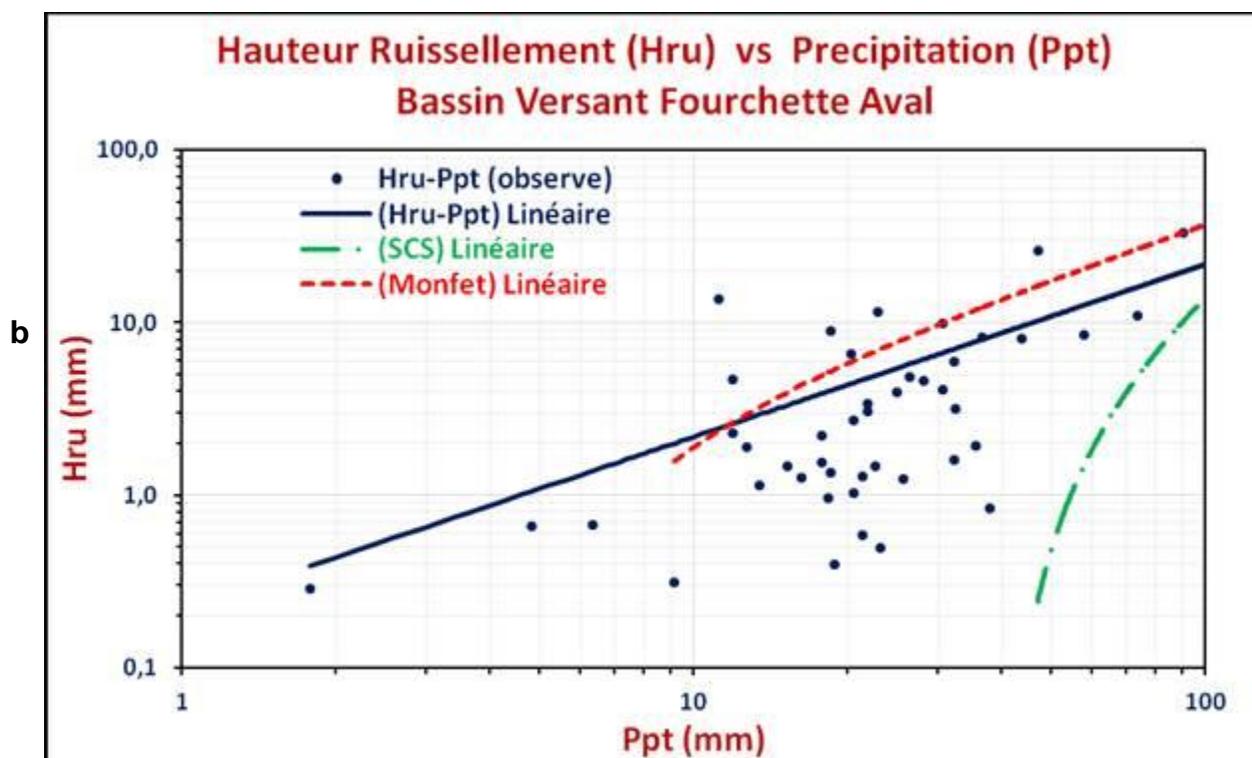
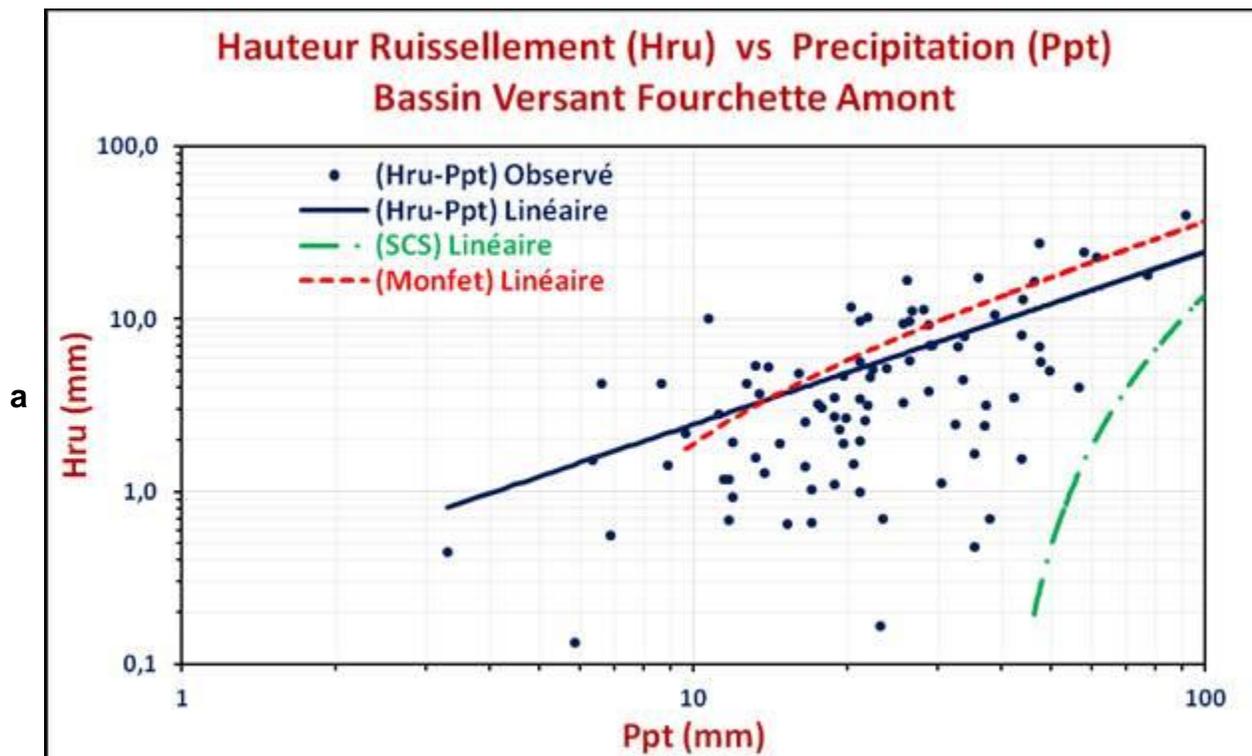
Figure 51. Prédications et intervalles de confiance associés (10 %) du modèle réduit (pente unique) d'analyse de covariance des hauteurs de ruissellement (Hru) pour le modèle régional appalachien combinant les observations des six bassins, utilisant la hauteur de précipitation en covariable et appliqué aux observations transformées (log).

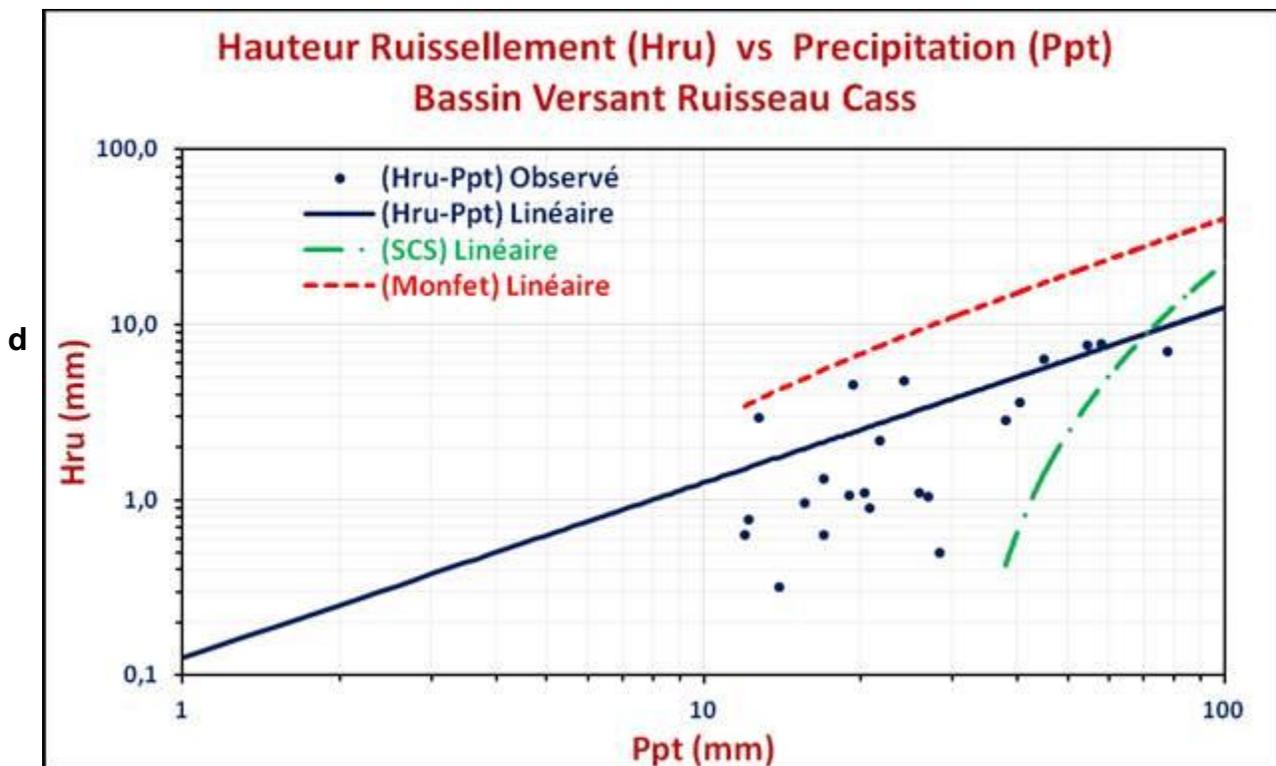
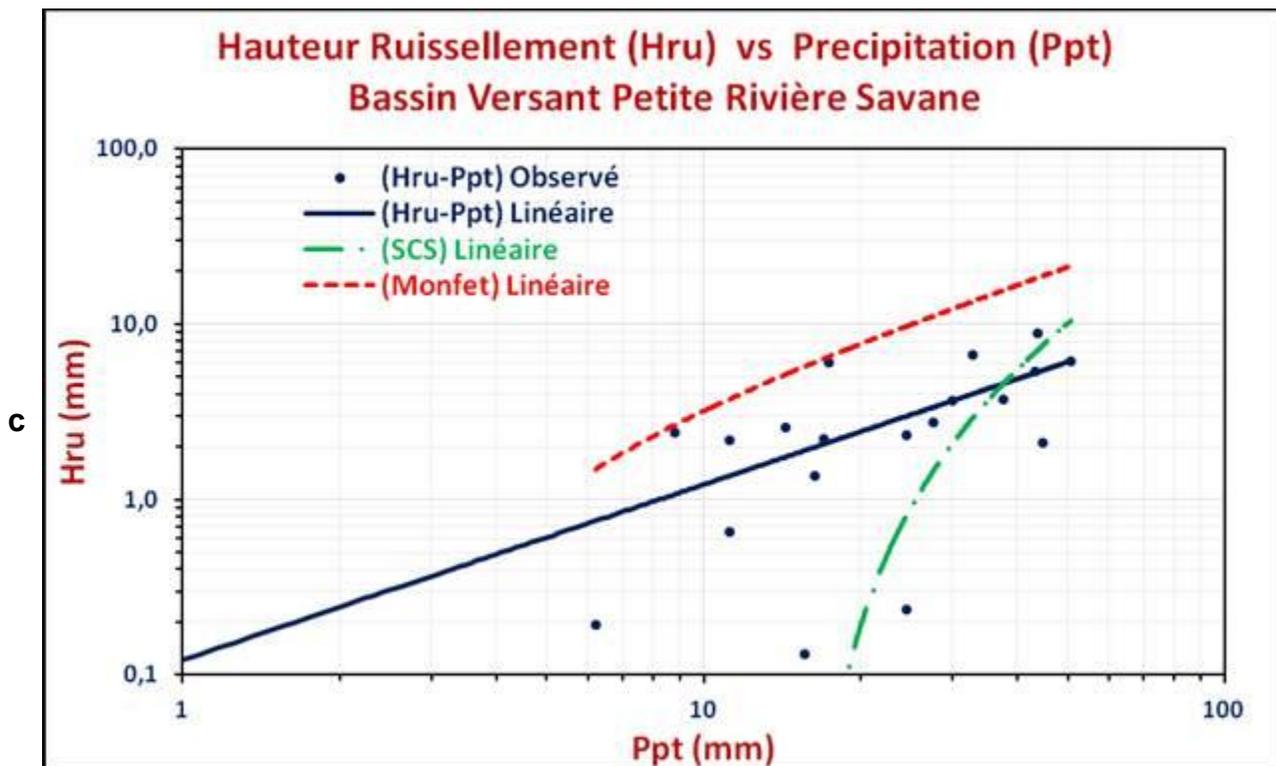


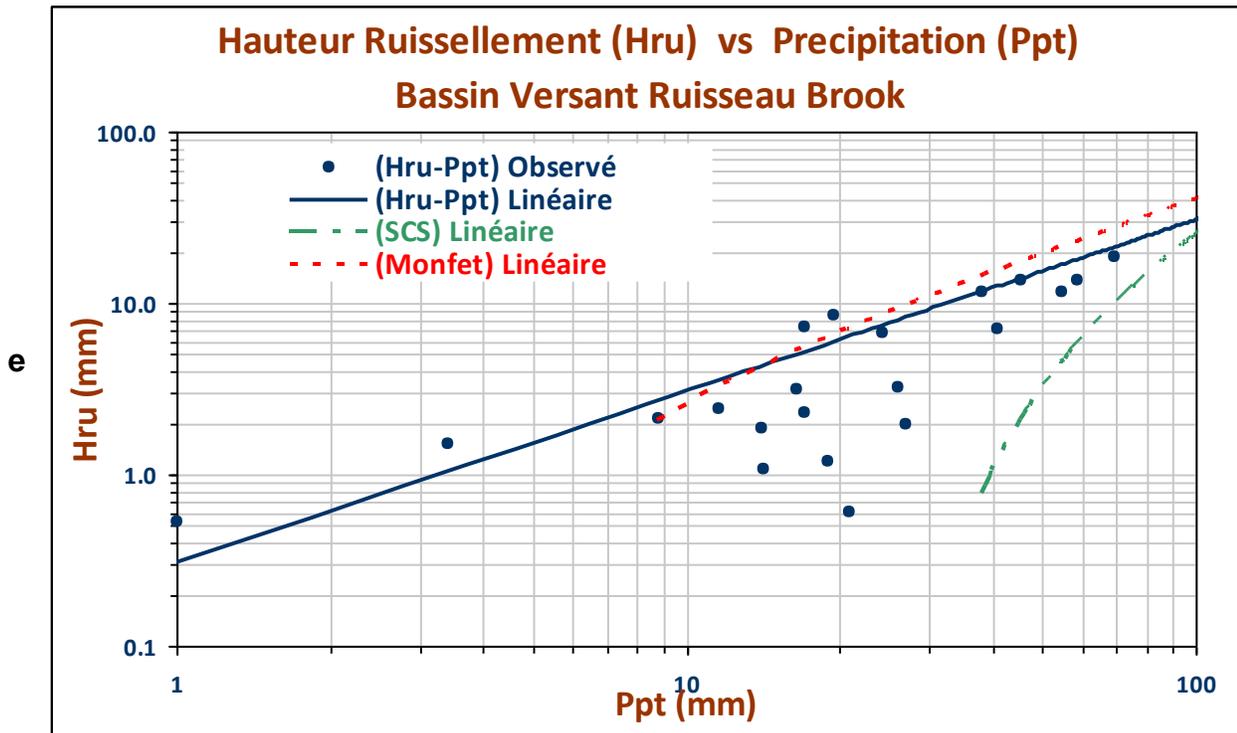




Figures 52 a à e. Prédictions des hauteurs de ruissellement en Montérégie selon les modèles locaux de régression comparées aux prédictions des modèles de Monfet (1979) et SCS.







Figures 53 a à e. Prédictions des hauteurs de ruissellement pour les bassins appalachiens selon les modèles locaux de régression comparées aux prédictions des modèles de Monfet (1979) et SCS.

Résultats du modèle régional montréalais

Suivant l'analyse globale des hydrogrammes de l'ensemble des bassins versants à l'étude (N = 463), le jeu de données a été scindé en deux groupes, selon leur appartenance à la région physiographique de la plaine du Saint-Laurent (modèle montréalais) ou du relief plus accentué des appalaches (modèle appalachien). Cette séparation a été motivée par le fait que les coefficients de ruissellement (paramètre « b », ordonnées à l'origine du modèle de régression) des bassins montréalais apparaissaient corrélés ($R^2 = 0,60$) avec les CN moyens respectifs des cinq bassins à l'étude (figure 56). Cette relative cohérence entre les CN et les coefficients de ruissellement est cependant totalement exclue dans le cas des autres bassins versants (figure 56).

Dans l'ensemble, les bassins versants de la Montérégie, malgré un relief plat, sont associés à des hauteurs de ruissellement relativement plus élevées qu'en relief appalachien. L'occupation du territoire et l'intensité des systèmes culturels expliquent en partie cette activité hydrologique accrue. À l'instar du modèle de régression associé aux onze bassins versants, les équations de régression des cinq bassins montréalais partagent la même pente et se distinguent de façon significative dans leurs coefficients de ruissellement (paramètre « b », correspondant aux ordonnées à l'origine). Compte tenu d'un relief relativement homogène et de systèmes culturels dominés par les cultures annuelles, ces coefficients de ruissellement témoignent conceptuellement des différences dans les groupes hydrologiques de sol propres à chaque bassin.

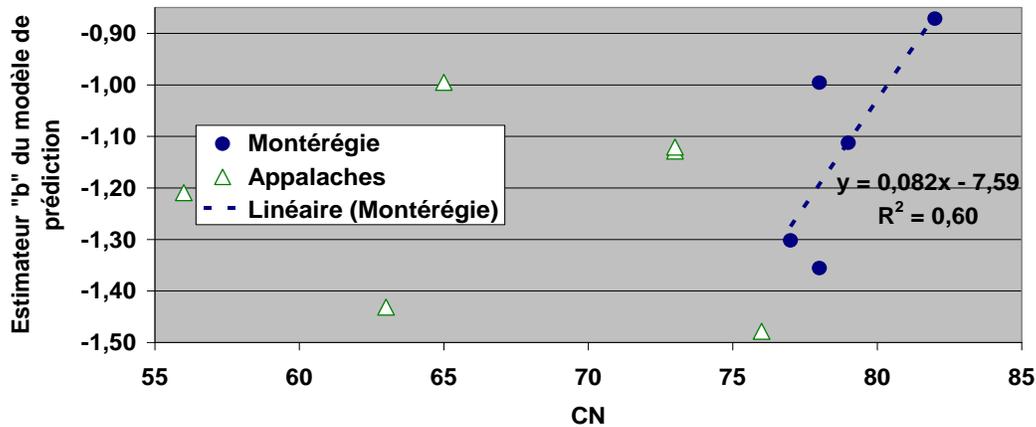


Figure 54. Estimateur "b" associé aux effets « Bassins » du modèle ANCOVA réduit (pente unique) des hauteurs de ruissellement (N = 460) considérant la précipitation en covariable, exprimé en fonction des onze CN moyens des bassins versants à l'étude.

Sur la base de la cohérence entre les coefficients de ruissellement et les CN moyens des bassins versants montérégiens, les valeurs de CN peut ainsi être intégrées à l'équation de prédiction des hauteurs de ruissellement dérivée du modèle de régression, suivant l'approche suivante :

$$\text{Hru} = (10)^b * (\text{Ppt})^a \quad (\text{eq. 1})$$

$$b = c * \text{CN} + d \quad (\text{eq. 2})$$

$$\text{Hru} = (10)^{c * \text{CN} + d} * (\text{Ppt})^a \quad (\text{eq. 2 dans eq. 1})$$

[17]

où : Hru : Hauteur de ruissellement (mm)
 Ppt : Précipitation (mm)
 b : Estimateur du paramètre d'ordonnée à l'origine dans le modèle de régression
 a : Estimateur du paramètre de pente dans le modèle de régression
 CN : Numéro de courbe SCS-CN

Considérant le modèle de régression Hru:Ppt déterminé pour la Montérégie et celui expliquant les coefficients de ruissellement « b » par les CN :

$$b = 0,082 * (\text{CN}) - 7,587 \quad R^2 = 0,60$$

[18]

On obtient l'équation de prédiction du modèle régional montérégien de régression Hru:Ppt expliquant la hauteur de ruissellement par le CN moyen du bassin versant :

$$\text{Hru} = (10)^{0,082 * \text{CN} + d} * (\text{PPT})^{1,223} * (10)^{-7,587}$$

[19]

Ce modèle peut dès lors être utilisé pour la prédiction des hauteurs de ruissellement dans les petits bassins de la Montérégie, et par extension à d'autres régions agricoles présentant un relief plat et un CN moyen > 75 .

Résultats du modèle appalachien

À l'instar du modèle global (onze bassins) et du modèle montérégien (5 bassins), l'analyse de covariance des hauteurs ruisselées des bassins appalachiens (6 bassins) ne permet pas d'identifier d'interactions significatives entre l'effet du bassin et les hauteurs de précipitation. Il en résulte une fois de plus un modèle à pente unique où les bassins versants se distinguent quant à leurs ordonnées à l'origine, ou coefficients de ruissellement (tableau 36). L'ordre et l'amplitude des différences dans les Hru prédites et les ordonnées à l'origine du modèle sont cohérents avec les résultats du modèle global (11 bassins). Le ruisseau Brook se distingue à la hausse, reflétant le drainage déficient du parcellaire. Le ruisseau Cass en Estrie et le ruisseau Petite Savane au Témiscouata se distinguent à la baisse, reflétant des vocations forestières, de même que l'influence des milieux humides et des barrages de castors sur l'hydrodynamique du cours d'eau. Les trois bassins beaucerons affichent des hauteurs prédites de ruissellement similaires, intermédiaires entre les prédictions pour les bassins de l'Estrie et du Témiscouata.

Bien que les bassins versants appalachiens se distinguent de façon significative dans les hauteurs de ruissellement prédites, ces dernières ne reflètent en rien la distribution des CN moyens des bassins à l'étude (figure 56). Contrairement aux bassins versants de la Montérégie, le CN ne peut donc pas se substituer, conceptuellement, aux ordonnées à l'origine proposées par le modèle de régression appalachien. Des facteurs, autres que ceux reflétés par la méthode courante d'indexation des CN (basée exclusivement sur le groupe hydrologique et l'occupation du sol), expliqueraient la variabilité des hauteurs de ruissellement observées dans les bassins au relief accentué. L'influence des formes du paysage sur la saturation des sols et l'émission de ruissellement à surface variable, de même que l'influence hydrodynamique des milieux humides sont deux pistes suggérées par les résultats de la présente étude.

Un modèle de régression général, à pente et ordonnée à l'origine communes est donc proposé en support à la prédiction des hauteurs de ruissellement pour les bassins appalachiens, et par extension, aux bassins versants d'autres régions agricoles présentant un relief accentué et un CN < 75 .

Le tableau 40 présente les coefficients de régression « a » et « b » ainsi que les écart-types de l'estimation des coefficients de régression « a » et « b » pour les différents modèles testés.

Tableau 36. Estimateurs des paramètres de régression des modèles ANCOVA¹ prédictifs des hauteurs de ruissellement utilisant les hauteurs de précipitation en covariable et écarts-types associés.

Bassin ou région	Paramètre "b" ¹		Paramètre "a" ¹	
	Estimation	Ecart-type	Estimation	Ecart-type
Modèle global, 11 bassins versants ("a" commun, "b" distincts)				
Bélaïr	-1,136	0,168	1,228	0,060
Brook	-1,003	0,144	1,228	0,060
Cass	-1,439	0,142	1,228	0,060
Castors	-1,399	0,127	1,228	0,060
Esturgeon Br.21	-0,879	0,141	1,228	0,060
Ewing	-1,003	0,130	1,228	0,060
Fourchette Amont	-1,148	0,121	1,228	0,060
Fourchette Aval	-1,241	0,130	1,228	0,060
Petite Savane	-1,485	0,144	1,228	0,060
Walbridge Amont	-1,309	0,124	1,228	0,060
Walbridge Aval	-1,120	0,096	1,228	0,060
Modèle régional, Montérégie, 5 bassins versants ("a" et "b" communs)				
	-1,224	0,119	1,258	0,088
Modèle régional, Montérégie, 5 bassins versants ("a" commun, "b" distincts)				
Castors	-1,424	0,151	1,247	0,083
Esturgeon Br.21	-0,905	0,165	1,247	0,083
Ewing	-1,028	0,154	1,247	0,083
Walbridge Amont	-1,333	0,148	1,247	0,083
Walbridge Aval	-1,144	0,122	1,247	0,083
Modèle régional, Appalaches, 6 bassins versants ("a" et "b" communs)				
	-1,194	0,125	1,209	0,090
Modèle régional, Appalaches, 6 bassins versants ("a" et "b" distincts)				
Bélaïr	-1,096	0,196	1,200	0,087
Brook	-0,964	0,179	1,200	0,087
Cass	-1,398	0,178	1,200	0,087
Fourchette Amont	-1,110	0,164	1,200	0,087
Fourchette Aval	-1,202	0,170	1,200	0,087
Petite Savane	-1,450	0,135	1,200	0,087

¹ $Hru = (10)^b * (Ppt)^a$

33.4.4 Validation des débits de pointe

La méthode de prédiction de débit de crue proposée dans le cadre de la présente étude (Q_{max}) est déterminée par la formule générale suivante :

$$Q_{max} = H_{ru} A \varphi(\alpha) / 360 t_p$$

[20]

où :

- Q_{max} : débit de crue (m^3/s)
- H_{ru} : hauteur de ruissellement (mm)
- A : superficie du bassin versant (ha)
- t_p : temps de montée du bassin versant (h)
- $\varphi(\alpha)$: coefficient de forme de l'hydrogramme
- 360 : facteur d'unité

Dans cette étude, les paramètres (R_u , t_p , $\varphi(\alpha)$) ont été déterminés par des méthodes indépendantes sur la base d'études d'évènements s'étant produits sur l'ensemble des bassins versants à l'étude. La prédiction du ruissellement a utilisé un grand nombre d'évènements en saison de croissance ($N = 463$) alors que les temps de montée et le facteur de forme ont utilisé un nombre restreint d'évènements répondant à certaines caractéristiques des hydrogrammes mis à contribution. Fondamentalement, la combinaison de ces facteurs validés individuellement devrait donner un résultat valable.

Une validation objective exigerait normalement l'utilisation de bassins versants n'ayant pas été utilisés lors de l'étude des différents facteurs. Compte tenu du nombre limité de bassins versants mis à contribution dans le cadre de la présente étude, cette avenue n'était pas possible. La validation a donc été réalisée suivant une approche plus faible. Celle-ci repose sur l'hypothèse que pour un bassin versant donné, le recours à la précipitation de récurrence associée au temps de montée prédit du bassin versant, de même que de la hauteur de ruissellement prédite pour cette même précipitation, devrait prédire le débit observé pour cette récurrence.

Concept de courbes enveloppes

Les équations de régression prédictive de Hru développées dans le cadre de la présente étude prédisent des hauteurs moyennes de ruissellement en réponse aux précipitations. Rappelons ici que les débits de crue sont plutôt reliés aux hauteurs extrêmes de ruissellement. Ces dernières peuvent être représentées par une courbe enveloppe définie en fonction d'une probabilité de dépassement. Dans le cas d'une régression linéaire d'une fonction $y = b + a x$, les limites de confiance sont définies par les limites de confiance des paramètres :

$$\begin{aligned} a \pm t(\alpha/2, n-2) \text{ Se}(a) \\ b \pm t(\alpha/2, n-2) \text{ Se}(b) \end{aligned} \quad [21]$$

α = niveau de confiance
 t = valeur de la fonction de Student
 n = nombre d'observations
 $\text{Se}(a)$ = écart type de l'estimateur de « a »
 $\text{Se}(b)$ = écart type de l'estimateur de « b »

[22]

et la courbe enveloppe se définit :

$$y \cong b + t(\alpha/2, n-2) \text{ Se}(b) + (a + t(\alpha/2, n-2) \text{ Se}(a)) x \quad [23]$$

Dans le cas des hauteurs de ruissellement (Hru), l'équation de régression en fonction de la hauteur de la précipitation (Ppt) a la forme :

$$\log(\text{Hru}) = b + a \log(\text{Ppt}) \quad [24]$$

et la courbe enveloppe est définie :

$$\log(\text{Hru}) \cong b + t(\alpha/2, n-2) \text{ Se}(b) + (a + t(\alpha/2, n-2) \text{ Se}(a)) \log(\text{Ppt}) \quad [25]$$

Ces équations peuvent être réécrites sous une forme plus pratique :

$$\text{Hru} \cong 10^{b + t(\alpha/2, n-2) \text{ Se}(b)} \text{Ppt}^{a + t(\alpha/2, n-2) \text{ Se}(a)} \quad [26]$$

$$\text{Hru} \cong 10^b 10^{t(\alpha/2, n-2) \text{ Se}(b)} \text{Ppt}^a \text{Ppt}^{t(\alpha/2, n-2) \text{ Se}(a)} \quad [27]$$

$$\text{Hru} \cong 10^b \text{Ppt}^a 10^{t(\alpha/2, n-2) \text{ Se}(b)} \text{Ppt}^{t(\alpha/2, n-2) \text{ Se}(a)} \quad [28]$$

La question qui se pose est comment définir le niveau de confiance « α » qui est normalement fonction la récurrence d'intérêt. Pour les séries des maximums annuels utilisées lors de la définition des événements extrêmes, la probabilité de dépassement ($x > x_a$) est définie :

$$P(x > x_a) = 1 / T \quad \text{où} \quad T = \text{récurrence (an)} \quad [29]$$

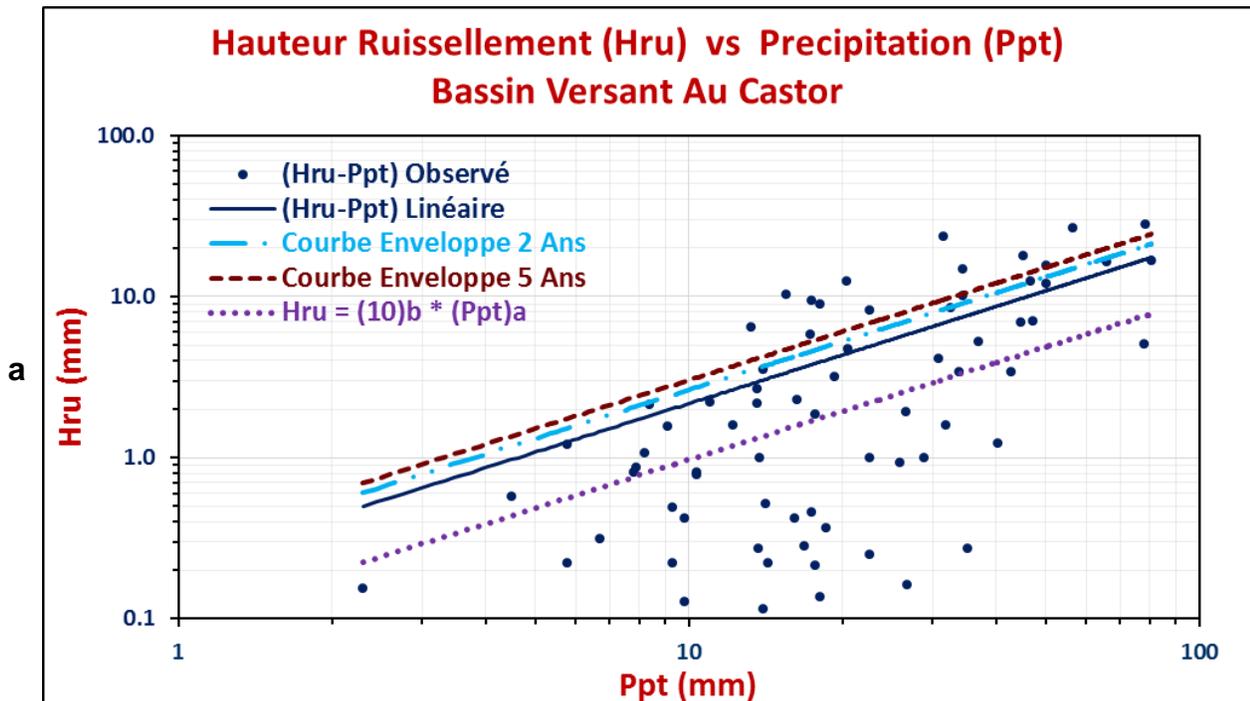
Dans cette étude, tous les évènements ayant produit du ruissellement (en moyenne 11 par année) ont été retenus. Si 55 évènements se sont produits au cours de 5 ans, il est vraisemblable de penser que l'évènement de récurrence de 5 ans sera le plus grand avec une probabilité de dépassement de $1 / 55 + 1$ et pour deux ans d'observations de $1 / 22 + 1$. Il en sera de même pour des récurrences de 10, 25, 50 et 100 ans. Ainsi, la probabilité approximative peut être établie de la façon suivante :

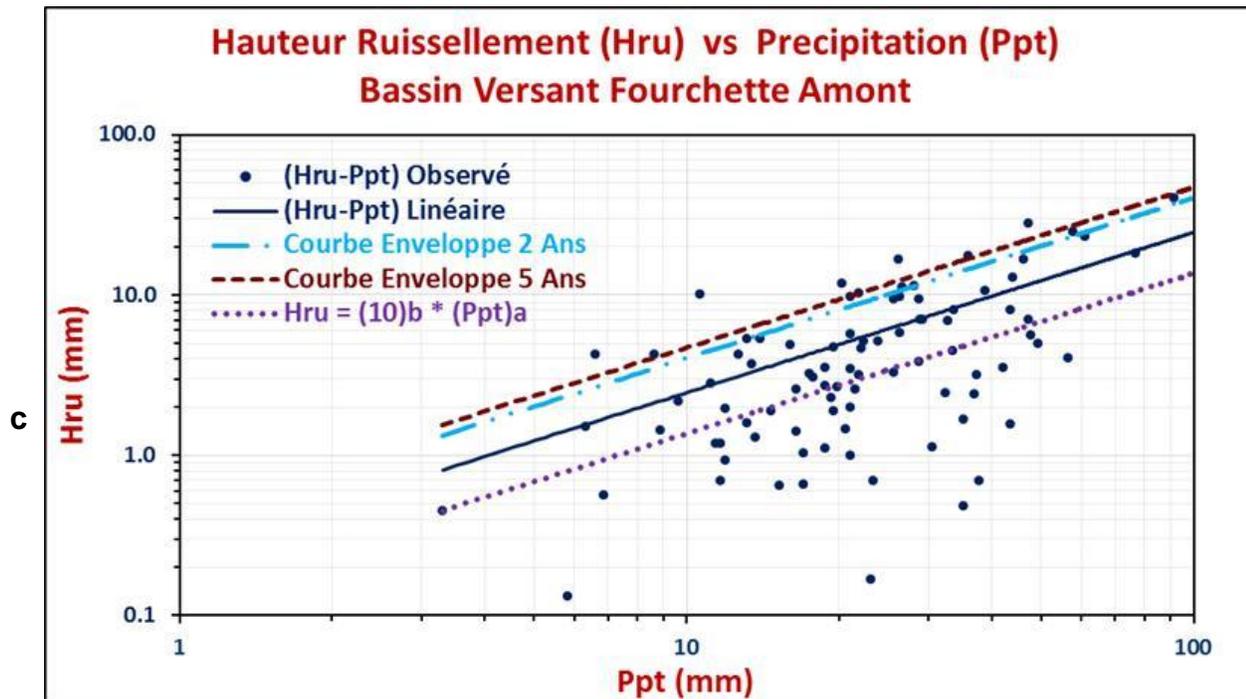
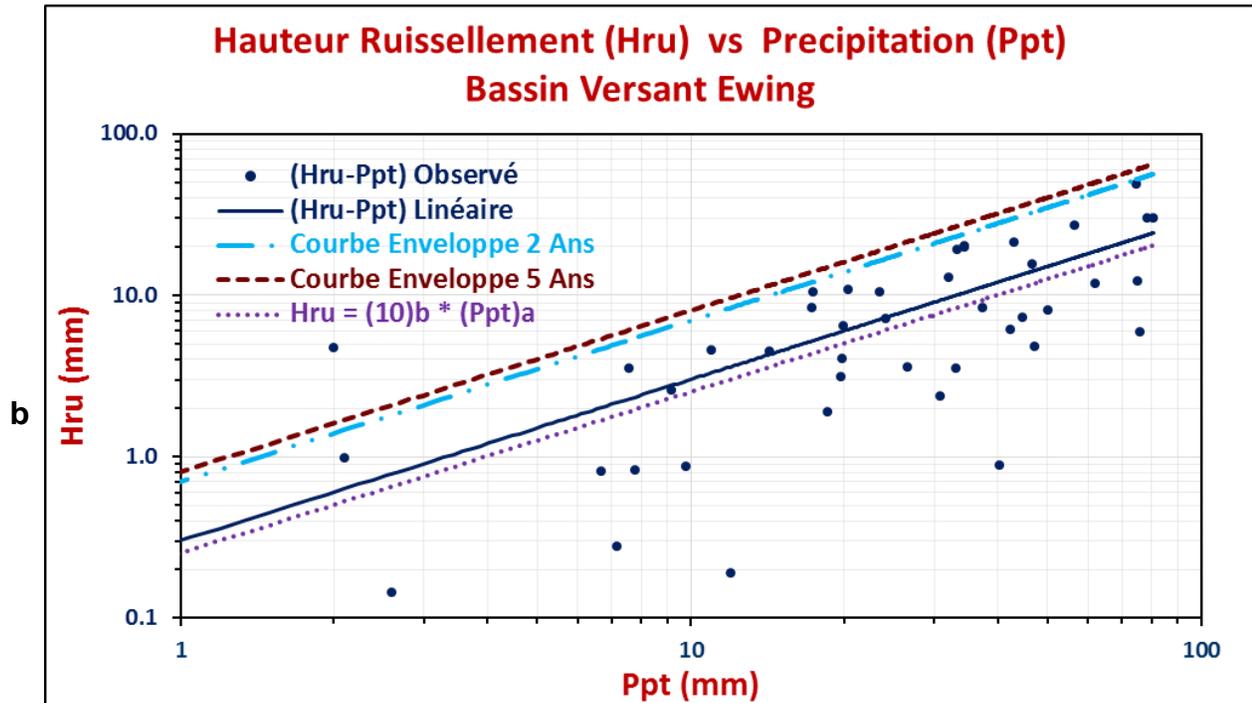
$$P(x > x_a) = (1 / T) (\text{durée} / n + 1) = \alpha / 2$$

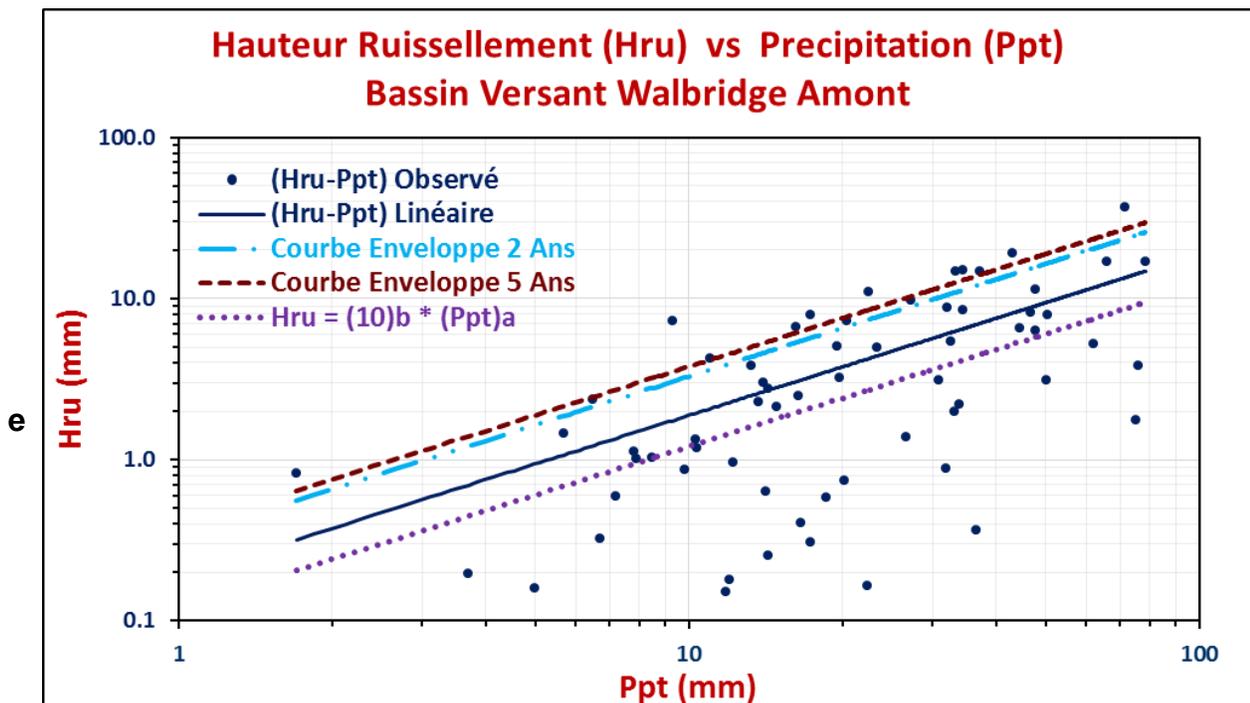
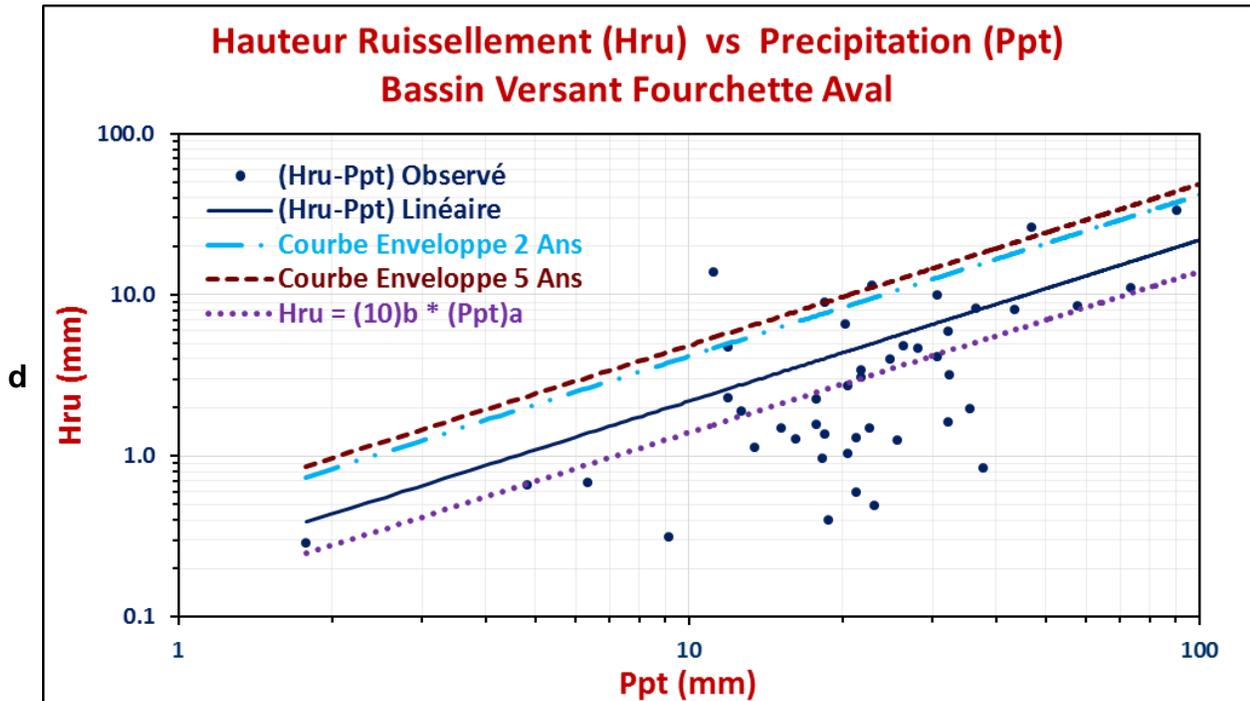
[30]

Cette probabilité correspond au niveau de confiance $\alpha / 2$.

La figure 55 présente les courbes enveloppes de récurrence 2 ans et 5 ans ainsi générées à partir des modèles locaux de régression pour les six bassins versants mis à contribution dans la validation des projections des débits de pointe.







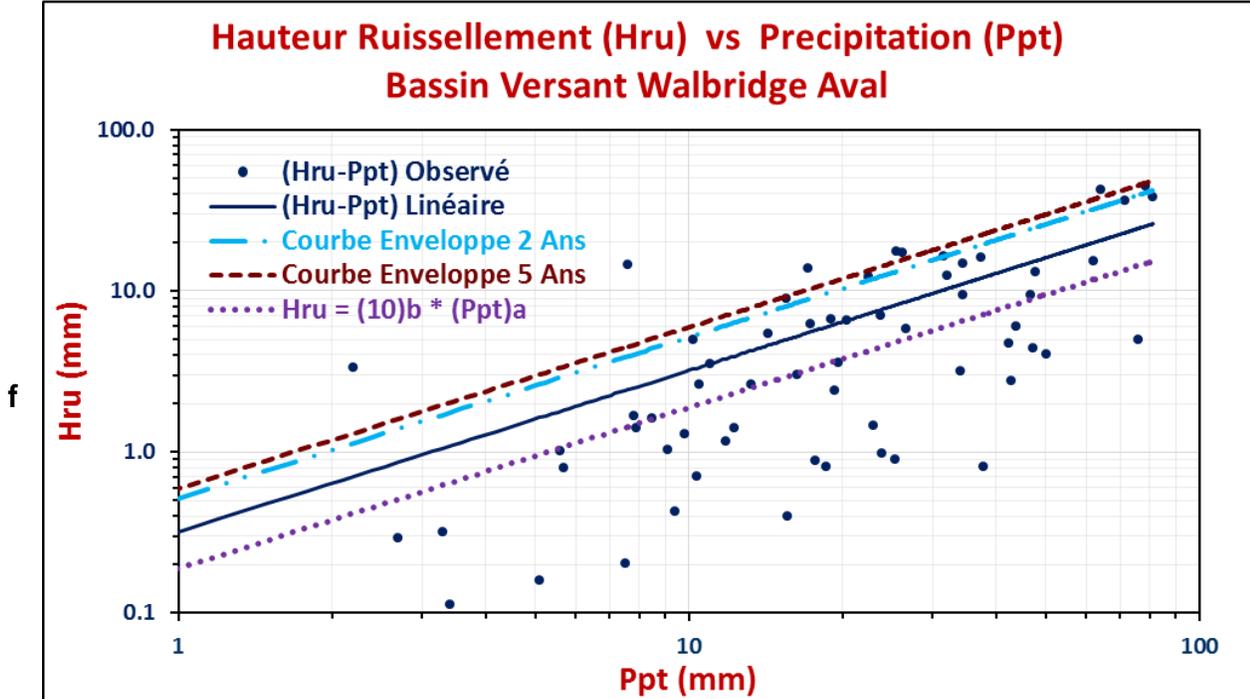


Figure 55a à f. Observations et prédictions des hauteurs moyennes de ruissellement et des courbes enveloppes de récurrence 2 ans et 5 ans dérivées des modèles locaux ANCOVA pour les six bassins versants mis à contribution dans la validation des projections des débits de pointe.

Dans le présent exercice de validation de modèles de prédiction des maxima de débits, les bassins versants ayant plus de deux ans de données ont été retenus. Pour chaque bassin versant, les maxima de débits (Q_{max}) de ruissellement de chaque année ont été identifiés pour générer des séries annuelles. Pour chaque série, les données ont été ordonnées, les fréquences de dépassement et les récurrences calculées, ce qui a permis d'estimer les débits de deux et cinq ans de récurrence qui sont identifiés « Q_{max} 2ans » et « Q_{max} 5 ans » au tableau 37. Le tableau 37 présente les événements annuels retenus pour les différents bassins versants. Notons ici que les plus grandes précipitations ne produisent pas nécessairement les plus grands débits, contredisant ainsi l'hypothèse que les précipitations d'une récurrence donnée produisent normalement des débits de même récurrence.

Par la suite, les débits prédits de deux ans et cinq ans de récurrence ont été déterminés en suivant les étapes suivantes. Les temps de montée ont été déterminés en utilisant le modèle de régression (méthode 3) développé dans le cadre de la présente étude et présenté à la section 5.4.1. Les IDF des stations Vallée-Jonction (Fourchette) et de Granby (Castor, Ewing et Walbridge) ont été utilisées pour générer les précipitations de récurrence de 2 ans et 5 ans associées aux durées du temps de montée spécifique à chaque bassin. Le ruissellement a été estimé par les courbes enveloppes présentées ci-haut. Les bassins Fourchette ont utilisé les coefficients « a » et « b » du modèle de ruissellement pour les Appalaches et les autres bassins ont utilisé ceux du modèle de ruissellement pour la Montérégie. Finalement, les débits prédits pour les récurrences de 2 ans et 5 ans ont été calculés en utilisant la valeur de 0,73

pour le facteur de forme $\phi(\alpha)$, tel que déterminé dans le cadre de cette étude (section 5.4.2). Les ratios entre les débits prédits et observés ont été calculés afin d'évaluer la performance du modèle de prédiction proposé. Le tableau 38 présente les différents paramètres utilisés en intrants au modèle de prédiction des débits de crue et le tableau 39 en présente les résultats.

En utilisant les courbes enveloppes et les coefficients « a » et « b » des modèles locaux, les ratios Q_{\max} prédit/ Q_{\max} moyens estimés sont respectivement de 1,01 et 1,13 pour les récurrences de 2 et 5 ans (tableau 39). En utilisant les modèles montérégien et appalachien, suivant la même approche, les ratios moyens Q_{\max} prédit/ Q_{\max} sont du même ordre, soit respectivement 1,02 et 1,17 pour les récurrences de 2 et 5 ans (tableau 40). Dans l'ensemble, ces ratios sont dans l'ordre de grandeur espéré, avec des coefficients de variation acceptables. L'approche proposée de prédiction des débits de pointe, recourant aux modèles prédictifs du temps de montée, du ruissellement et du paramètre de forme développés dans le cadre de la présente étude, est donc estimée valide. Cette validité demeure cependant conditionnelle à une bonne prédiction de la hauteur de ruissellement. La présente étude a mis en relief que l'approche du numéro de courbe (CN) ne permet pas de caractériser le ruissellement des bassins appalachiens et s'est montrée peu performante avec le bassin Walbridge aval de la Montérégie. Le CN ne semble donc pas un indicateur permettant de caractériser le ruissellement des bassins versants au Québec, mais cette affirmation doit être modérée par le nombre limité de bassins versants utilisés. Les données d'autres bassins versants devront être analysées pour raffiner l'approche proposée.

Tableau 37. Séries annuelles des évènements de ruissellement retenus dans la validation du modèle de prédiction des débits de pointe.

Date	Ppt	Durée	tp	Ru	Qmax	Rang	Prob.	Récur.
	(mm)	Ppt (h)	obs. (h)	(mm)	(m3/s)			(ans)
Fourchette Témoin								
04/09/03-20h	32,3	3,7	0,9	5,9	2,26	2	0,50	2,0
05/09/25-12h	105,4	25,0	16,1	24,8	1,10	3	0,75	1,3
06/10/20-14h	47,0	12,0	3,8	26,1	2,96	1	0,25	4,0
Castors								
02/06/10-17h	78,5	34,2	8,0	27,8	4,95	4	0,67	1,5
03/06/13-07h	50,1	24,2	6,6	11,9	5,12	3	0,50	2,0
04/09/08-12h	50,2	58,5	14,3	15,5	5,24	2	0,33	3,0
05/10/13-11h	56,7	90,0	22,0	26,6	4,83	5	0,83	1,2
06/05/18-18h			30,2	83,9	7,84	1	0,17	6,0
Ewing								
02/06/10-20h	78,5	34,3	13,7	30,0	12,31	3	0,50	2,0
03/08/09-23h	75,2	80,8	3,0	12,2	13,64	2	0,33	3,0
04/09/07-10h	62,1	81,2	17,1	11,8	4,36	5	0,83	1,2
05/10/07-04h	34,5	18,3	16,1	19,8	9,62	4	0,67	1,5
06/05/18-18h	74,7	48,8	29,8	48,4	20,25	1	0,17	6,0
Fourchette Intervention								
04/09/03-14h	33,8	4,3	3,4	8,0	1,26	3	0,43	2,3
05/10/14-18h	91,7	54,7	8,2	40,2	1,64	2	0,29	3,5
06/10/20-14h	47,2	12,3	6,9	27,8	2,37	1	0,14	7,0
07/10/26-19h	26,7	13,7	5,0	11,1	0,83	5	0,71	1,4
08/06/28-09h	28,2	12,7	2,5	11,3	1,17	4	0,57	1,8
09/04/21-00h	27,9	43,3	37,5	16,4	0,82	6	0,86	1,2
Walbridge Intervention								
02/07/16-22h	9,3	15,0	3,1	7,2	2,19	3	0,50	2,0
03/11/19-06h	34,4	18,7	9,6	15,0	2,27	2	0,33	3,0
04/09/07-18h	62,0	61,3	6,0	5,2	1,09	5	0,83	1,2
05/11/29-17h	20,4	6,2	5,5	7,3	1,87	4	0,67	1,5
06/05/16-05h			76,5	57,4	3,50	1	0,17	6,0
Walbridge Témoin								
02/05/29-23h	64,1	71,2	14,9	42,5	7,20	1	0,17	6,0
03/11/19-12h	34,4	18,8	13,7	14,8	1,89	3	0,50	2,0
04/09/07-16h	62,1	81,3	21,9	15,2	1,17	5	0,83	1,2
05/10/12-23h	71,8	162,8	43,5	36,5	1,68	4	0,67	1,5
06/05/18-19h			35,9	52,8	3,34	2	0,33	3,0

Tableau 38. Paramètres observés et débits de pointe estimés pour les bassins versants mis à contribution dans la validation de la méthode de prédiction des débits de pointe.

Paramètres observés sur les bassins versants.							
	tp	Qmax 2 ans	Qmax 5 ans	Longueur	Pente	Aire	CN_II
Bassin versant	(h)	(m3/s)	(m3/s)	(m)	(m/m)	(ha)	
Fourchette aval	3,14	2,26	3,50	2 312	0,0042	192	56
Fourchette amont	5,29	1,21	2,00	3 973	0,0045	250	73
Castors	7,14	5,18	7,00	7 418	0,0013	1228	78
Ewing	9,80	12,30	18,00	12 957	0,0013	2782	78
Walbridge amont	7,65	2,22	2,80	4 016	0,0036	631	77
Walbridge aval	9,65	2,44	4,00	6 504	0,0014	794	82

Tableau 39. Débits de crue prédits utilisant les courbes enveloppes et les modèles locaux de prédiction de la hauteur du ruissellement.

Modèles locaux	tp	Ppt 2 ans	Ppt 5 ans	b	a	Se(b)	Se(a)	Ru		Qmax		Qprédit/Qobs		
								2 ans	5 ans	2 ans	5 ans	2 ans	5 ans	
Bassin versant	(h)	(mm)	(mm)					(mm)		(m3/s)				
Fourchette aval	3,2	29	37	-	1,2023	1,1995	0,135	0,087	9,6	15,5	1,2	1,9	0,53	0,54
Fourchette amont	7,0	37	49	-	1,1098	1,1995	0,135	0,087	16,6	28,0	1,2	2,0	0,99	1,02
Castors	8,6	44	58	-	1,4238	1,2471	0,1224	0,083	11,3	19,1	3,3	5,5	0,63	0,79
Ewing	11,1	48	63	-1,028	1,2471	0,1224	0,083	31,7	53,3	16,1	27,2	1,31	1,51	
Walbridge amont	7,5	42	54	-1,334	1,2471	0,1224	0,083	13,0	21,2	2,2	3,6	1,00	1,29	
Walbridge aval	9,1	45	59	-1,144	1,2471	0,1224	0,083	22,2	37,2	3,9	6,6	1,61	1,65	

Moyenne	1,01	1,13
Ecart type	0,41	0,43
Cv	0,40	0,38

Tableau 40. Débits de crue prédits utilisant les courbes enveloppes et les modèles régionaux de prédiction de la hauteur du ruissellement.

Modèles régionaux	tp	Pte 2 ans	Pte 5 ans	b	a	Se(b)	Se(a)	Ru 2 ans	Ru 5 ans	Qmax 2 ans	Qmax 5 ans	2 ans	5 ans
Bassin versant	(h)	(mm)	(mm)					(mm)	(mm)	(m3/s)	(m3/s)		
Fourchette aval	3,2	29	37	-1,194	1,209	0,125	0,09	10,0	16,0	1,2	2,0	0,54	0,56
Fourchette amont	7,0	37	49	-1,194	1,209	0,125	0,09	13,9	23,5	1,0	1,7	0,83	0,85
Castors	8,6	44	58	-1,224	1,258	0,119	0,088	19,0	32,3	5,5	9,4	1,06	1,34
Ewing	11,1	48	63	-1,224	1,258	0,119	0,088	21,5	36,4	10,9	18,5	0,89	1,03
Walbridge amont	7,5	42	54	-1,224	1,258	0,119	0,088	17,8	29,2	3,0	5,0	1,36	1,78
Walbridge aval	9,1	45	59	-1,224	1,258	0,119	0,088	19,6	33,1	3,5	5,9	1,43	1,47
Moyenne												1,02	1,17
Écart type												0,34	0,44
Cv												0,33	0,38

33.4.5 Description de l'utilitaire

L'utilitaire QmaxPBV (pour Qmax des petits bassins versants) est développé pour estimer les débits de crue et les volumes de ruissellement en support au dimensionnement des ouvrages hydro-agricoles. L'utilitaire met à profit les méthodes d'estimation des hauteurs de ruissellement, des temps de montée ou de concentration, des paramètres de forme des hydrogrammes et des débits de pointe développées et validées dans le cadre du présent projet de recherche.

Il est également interfacé avec les banques de données hydropédologiques et les courbes de distribution IDF des précipitations, aussi mises à jour dans le cadre du présent projet. Deux rencontres (mars 2010 et février 2011) avec un groupe de futurs usagers ont eu lieu pour définir les besoins et les interfaces. Un atelier tenu le 4 décembre 2012 a permis de présenter les résultats de ce projet de recherche et de valider l'approche développée dans le logiciel. L'utilitaire n'inclut pas les scénarios futurs d'IDF, de même que les estimations d'apports verticaux découlant d'événements de fonte et de pluie hivernale. Les IDF en scénarios futurs ont un niveau de fiabilité pour les précipitations d'une durée supérieure à 6 heures. La plupart des ouvrages hydro-agricoles sont conçus avec des temps de concentration de moins de 6 heures. Enfin, pour que les estimations d'apports verticaux soient utilisables, des méthodes

devront être développées pour transposer les résultats à des périodes de 15 minutes à 24 heures.

Courbes IDF

L'utilitaire accède directement à la base de données des IDF développées dans ce projet de recherche. Pour éviter la longueur du menu déroulant des stations, l'utilisateur peut effectuer une présélection des stations qu'il désire utiliser. Les stations sont classées par région administrative.

Classification hydropédologique des sols du Québec

L'utilitaire accède directement à la base de données de la classification hydropédologique des sols du Québec. Pour éviter la longueur des menus déroulant des séries de sols, l'utilisateur peut effectuer une présélection des séries qu'il désire utiliser. Les séries de sols sont classées par région administrative et par rapport pédologique.

Numéros de courbe (CN)

L'utilitaire inclut aussi une table définissant les CN en fonction de l'utilisation des sols et du groupe hydrologique.

Méthodes de calcul

L'utilitaire développé QmaxPBV propose plusieurs options dans les méthodes d'estimation du débit de crue, incluant les approches développées dans le cadre du présent projet et présentées à la section précédente (temps de montée selon l'équation de régression – modèle no 3 de la section 5.4.2, la hauteur de ruissellement selon la méthode des courbes enveloppes (modèles appalachien et montérégien) et un coefficient de forme de 0,79.

Les usagers ont également demandé de pouvoir effectuer les calculs non seulement selon les méthodes développées dans le projet, mais aussi selon les méthodes traditionnelles qu'ils utilisent à l'heure actuelle. Ainsi, les méthodes de calcul des temps de concentration selon Kirpich, Mockus, SCS-lag, Branby-William et l'équation de régression – modèle no 3 sont supportées par l'utilitaire. La hauteur de ruissellement peut aussi être calculée selon la méthode développée par Monfet (1979), celle du SCS et selon la méthode des courbes enveloppes (modèles appalachien et montérégien) développée dans ce projet. La méthode des coefficients de ruissellement est aussi incluse mais les valeurs doivent être définies par l'utilisateur. Le débit de crue peut aussi être calculé selon la méthode rationnelle et l'hydrogramme triangulaire du SCS.

Interface usager

L'interface usager (ce que voit l'utilisateur) est composé de cinq panneaux : Info-projet, BV (bassin versant), Tc (temps de concentration), Qmax (débits de crue), Vruis (volumes de ruissellement).

- Le panneau « Info-projet » permet de définir les informations traditionnelles (nom du projet, responsable(s), adresses, localisation, etc.), la station météo des IDF de référence et les périodes de récurrence pour effectuer les calculs de Qmax et les volumes de ruissellement, de même que les durées des précipitations pour les calculs des volumes de ruissellement.

- Le panneau « BV » permet de définir les différents tronçons (longueur, pente et tronçon receveur) du réseau d'écoulement. Ces définitions permettent de calculer la longueur d'écoulement et la pente moyenne de l'écoulement selon trois méthodes (pente simple, 85-10 et hydraulique). Ces paramètres sont nécessaires lors du calcul du temps de montée ou de concentration. Pour chaque tronçon, sous forme de tableau, il est possible de définir les superficies des différentes unités, le type de sol, son utilisation, le coefficient de ruissellement et le CN. Ces paramètres permettent de calculer la superficie totale du bassin versant, un CN et un coefficient de ruissellement moyen.
- Le panneau « Tc » présente les résultats des calculs du temps de concentration ou de montée selon les différentes méthodes.
- Le panneau « Qmax » permet de présenter les résultats des différentes combinaisons de méthodes de temps de concentration, hauteur de ruissellement et débit de crue pour les récurrences choisies.
- Le panneau « Vruis » permet de présenter les résultats des différentes méthodes d'estimation des hauteurs de ruissellement pour les durées des précipitations et des récurrences choisies.

Toutes les données d'un projet sont sauvegardées dans un fichier tout comme les résultats. L'utilisateur a aussi accès à trois panneaux de configuration (stations IDF, séries de sols, méthodes de calcul). Ces panneaux permettent une présélection des stations météorologiques, des séries de sol et des méthodes de calcul que l'utilisateur désire utiliser. Les menus permettent d'ouvrir un projet existant, de définir un nouveau projet, de sauvegarder un projet, d'accéder aux différents panneaux et d'initier les calculs.

L'utilitaire a été conçu pour être éventuellement interfacé à un système d'information géographique (SIG). Cet aspect, quoique fortement désiré, ne faisait pas partie des objectifs de ce projet. L'utilitaire a par ailleurs été conçu pour pouvoir ajouter facilement de nouvelles méthodes et y inclure les nouveaux résultats de la recherche.

34 Analyse et discussion

La réalisation du projet de Mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydro-agricoles a permis de répondre au principal objectif à l'origine du projet, soit celui de proposer à la communauté d'intervenants en aménagement des terres et des cours d'eau au Québec, une actualisation des méthodes et des paramètres utilisés lors de la conception des ouvrages hydro-agricoles et permettant une prise en compte de l'évolution des intensités de précipitations en climat futur. Rappelons que les critères de conception couramment utilisés en milieu de pratique au Québec dans le dimensionnement des ouvrages hydrauliques répondent de méthodes proposées dans les années '60 aux États-Unis, dont on ne retrouve peu ou pas de validation exhaustive publiée en journaux scientifiques. Les banques de données pertinentes aux précipitations et aux propriétés des sols, conjuguées au développement et à la validation de nouvelles méthodes de prédiction hydrologique dans le cadre du présent constituent un ensemble d'outils fonctionnels, développées à 100 % sur la base d'observations hydrométriques et météorologiques québécoises. À ce titre, la présente étude constitue à plusieurs égards une initiative inédite au Québec, et un important jalon dans le développement d'outils de prédiction hydrologique reflétant les particularités agroclimatiques et géophysiques québécoises. Le nombre et la durée des suivis hydrométriques en petits bassins versants mis à profit dans le cadre de l'étude appelle cependant à la poursuite des efforts de monitoring en bassins et parcelles agricoles, de même qu'en développement de méthodes alternatives de prédiction hydrologique, particulièrement en ce qui a trait aux hauteurs de ruissellement.

En parallèle au besoin d'actualisation des bases de données et des méthodes de prédiction des hauteurs de ruissellement, des temps de montée/concentration et des débits de crue sur la base de données historiques, il importait de prendre en considération les tendances dans l'évolution du climat et d'assurer que les aménagements hydro-agricoles mis en place aujourd'hui répondent aux régimes hydriques de demain. La réalisation du projet a ainsi fait appel à un large partenariat interdisciplinaire, assurant la complémentarité et la cohérence entre les différents volets. Rappelons ici les principaux objectifs opérationnels, soit 1) d'actualiser les distributions actuelles des IDF de précipitations, 2) de prendre en compte l'occurrence des redoux hivernaux la conception d'ouvrages, 3) de prendre en compte l'influence des changements climatiques sur les distributions IDF des précipitations 4) de proposer et valider de nouvelles méthodes d'estimation des paramètres hydrologiques en support au dimensionnement des ouvrages hydrauliques, et enfin 5) d'intégrer ces banques de données et outils dans un utilitaire convivial destiné milieu de pratique.

Distribution des IDF de précipitations en climat récent et futur

Les réalisations de la présente étude permettent aux usagers de recourir à des données récentes de distribution des intensités de précipitations en climat récent. Les implications des changements climatiques sur la conception des ouvrages hydrauliques sont également documentées. Les courbes IDF, maintenant en ligne sur le site agrometeo.org, renseignent sur les quantités de précipitations extrêmes pouvant s'abattre en un endroit. Ces quantités varient dans l'espace, mais également en fonction de la durée des événements. En climat récent, 98 séries d'observations récentes colligées aux stations opérées par Environnement Canada (EC) et le Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et

des Parcs (MDDEFP) comportant plus de 15 années de données ont été colligées et analysées. Les méthodes de construction des estimateurs des IDF et HDF (Intensités/Hauteurs-Durée-Fréquence) retenues dans le cadre de la présente étude se distinguent des méthodes traditionnelles à plusieurs égards. D'abord, la méthode d'Analyse Fréquentielle Régionale (AFR) a été utilisée pour construire les estimateurs IDF et HDF plutôt que l'approche traditionnelle reposant sur une analyse des séries locales à chaque station de mesure. La méthode AFR permet en effet de regrouper les séries de plusieurs stations et d'ainsi améliorer la qualité des estimateurs. Autre différence importante, la distribution Generalized Extreme Value (GEV) a été utilisée dans le cadre des présents travaux, alors que la distribution Gumbel était utilisée antérieurement. Considérant que la distribution Gumbel est un cas particulier de la distribution GEV, pour lequel le paramètre de forme est nul, des différences entre les résultats des estimateurs issus de ces deux distributions peuvent apparaître pour les périodes de retour élevées. L'examen des résultats obtenus montre d'ailleurs que, pour les durées 15 minutes à 12 heures, les valeurs du paramètre de forme régional sont négatives (valeurs comprises entre -0,021 et -0,069). Cet indicateur d'un comportement à queue lourde (heavy tail) est de nature à affecter de façon importante l'estimation des quantiles associés aux grandes périodes de retour (événements rares). L'utilisation de l'approche AFR permet cependant une estimation plus juste de ce paramètre, autrement difficile à estimer à partir de séries locales souvent de courtes durées. Les estimateurs IDF/HDF obtenus suivant les méthodes de la présente étude sont de ce fait, moins incertains et plus justes. Notons toutefois certaines sources d'incertitude à prendre en compte, notamment celles liées à la mesure, à la construction des séries IDF, et à l'échantillonnage. Afin d'avoir une appréciation des incertitudes pour une localité située à une distance des stations évaluées dans le cadre de la présente étude, il est recommandé de se référer aux valeurs moyennes des intervalles de confiance des stations les plus près.

En ce qui a trait aux implications du climat futur sur la distribution des intensités de précipitations, rappelons que le territoire n'a pas été divisé en fonction des stations, mais suivant quatre régions, soit l'Abitibi, la Gaspésie, le Saguenay – Lac-Saint-Jean et la Vallée du Saint-Laurent. L'évaluation des extrêmes annuels de précipitations modélisés par le MRCC révèle que leur distribution est comparable à celle des extrêmes observés à la même échelle spatiale pour les événements d'une durée de 24 heures. Pour les durées de 1, 2, 6 et 12 heures, il n'existe pas d'observations sur grille ayant la résolution spatiale nécessaire à ce type d'évaluation. Ceci dit, il est peu probable que la correspondance soit aussi bonne car les événements de courtes durées sont aussi plus localisés et donc plus difficiles à reproduire avec un modèle dont chaque tuile correspond à une moyenne sur une aire de 45 X 45 km. Basée sur un ensemble de cinq simulations régionales pilotées par quatre MCG différents, une comparaison des extrêmes en climat futur (2041–2070) et en climat de référence indique que les extrêmes annuels sont appelés à augmenter. Par exemple, pour les précipitations de 24h ayant un temps de retour de deux ans, on estime l'augmentation à 7 ± 5 % dans la vallée du St-Laurent. Considérant que cette incertitude inclut la variabilité régionale et l'incertitude sur les paramètres de la GEV, le signal paraît robuste. On remarque toutefois que l'incertitude augmente avec le temps de retour considéré et la durée des événements. Cela s'explique, d'une part, par la sensibilité des précipitations extrêmes à la valeur des paramètres GEV qui augmente avec le temps de retour, D'autre part, le contraste dans les prédictions des modèles s'exprime plus fortement pour les événements de longues durées.

Bien qu'il soit essentiel de considérer et de s'adapter dès maintenant aux changements climatiques, notons que la majorité des structures hydrauliques en milieu agricole ont une

durée de vie inférieure à 25 ans, limitant ainsi la pertinence de considérer des gradients temporels dans l'évolution des intensités de précipitations dont la période se situe à plus de 30 ans. Leur conception peut ainsi se référer qu'aux courbes IDF en climat récent. Pour les ouvrages majeurs de retenue d'eau, ou pour le dimensionnement des ponts routiers dont la durée de vie excède 25 ans, il devient cependant pertinent de considérer les effets anticipés des changements climatiques sur les courbes IDF afin de d'assurer la vie utile de l'ouvrage.

Fonte et pluie hivernale en climat récent

En ce qui a trait au volet d'étude pertinent aux fontes et pluies hivernales, rappelons ici que l'objectif de la démarche visait à proposer des indices climatiques développés sur la seule base d'observations journalières de température et de précipitations. D'une part, cette approche a été motivée par le fait que les observations météorologiques hivernales disponibles pour l'ensemble du territoire rural se limitaient au pas de temps journalier. D'autre part, bien que la fonte de neige ait tôt démontré au cours de l'étude un pouvoir explicatif des crues, le recours aux observations de hauteur de neige des stations météorologiques a été exclu, compte tenu de la qualité variable de cette observation. Les prédictions des apports verticaux, traduisant le cumul des eaux de fonte et de précipitations, se sont plutôt appuyées sur une approche simplifiée de modélisation, adaptée du modèle CEQUeau. La comparaison des prédictions avec les observations de stations nivométriques (MDDEFP) a démontré un bon ajustement du modèle. Celui-ci a permis de reproduire de façon satisfaisante l'évolution du couvert de neige dans les deux régions agricoles à l'étude, sur la seule base des données de température et de précipitations journalières. Par extension, il est estimé que les apports verticaux résultants de la transformation du couvert neigeux sont aussi raisonnablement prédits.

La démarche de validation du pouvoir explicatif des apports verticaux à traduire les crues de fonte et de pluie hivernale a cependant conclu à une performance mitigée. La traduction des apports verticaux modélisés en hauteurs d'eau ruisselées, au moyen d'une modélisation hydrologique simplifiée (modèle MOHYSE), a en effet témoigné de R^2 en dessous de la barre des 50 %, sur la base des observations des débits aux exutoires des bassins à l'étude. Cet ajustement limité du modèle, en soi, n'est pas surprenant. Il est en effet compréhensible que les crues de petits bassins résultant de tels processus ne puissent être expliquées que par les seuls facteurs climatiques. Bien qu'il soit évident que les redoux hivernaux soient la cause d'augmentations importantes des débits des rivières, plusieurs autres facteurs influencent la réponse hydrologique, notamment les caractéristiques physiographiques des bassins versants, les conditions de gel du sol et les effets hydrodynamiques des glaces. Le recours qu'aux seules observations météorologiques d'un pas de temps journalier limitait, d'entrée de jeu, le pouvoir explicatif de la modélisation des crues. Rappelons que les temps de concentration des petits bassins versants à l'étude se situent bien en deçà de 24 heures, et que les crues de fonte procèdent typiquement selon un cycle intra-journalier de gel-dégel. Le recours à la modélisation hydrologique dans le cadre de cette étude n'avait pas pour objectif de modéliser la complexité des crues de fonte et de pluie hivernale, mais bien de valider le pouvoir explicatif des indices météorologiques proposés. En ce sens, les résultats de ce volet d'étude témoignent de la pertinence et de la validité de la méthode à prédire l'évolution du couvert neigeux et la génération des apports verticaux, de même que de son potentiel à prédire l'occurrence et l'intensité des crues de fonte et pluie hivernale.

Dans le contexte actuel où les critères hydrologiques de conception des aménagements hydrauliques en milieu rural ne prennent pas en compte les événements de fonte et de pluie

hivernale, les indices proposés pour l'ensemble des stations météorologiques à l'étude constituent un premier jalon dans l'éventuelle considération de ces processus dans le dimensionnement des ouvrages hydrauliques en milieu rural. L'augmentation anticipée des intensités de précipitations en climat futur, de même les enjeux liés aux crues hivernales, telles les inondations dans le bassin du Richelieu au printemps 2011 en Montérégie, militent pour un développement scientifique plus en aval dans la compréhension et la prédiction de ces phénomènes. Le recours à une approche de modélisation hydrologique plus complexe, intégrant entre autres les influences du gel, de l'utilisation du sol, du paysage et des propriétés des sols sur l'hydrologie du cours d'eau, permettront à terme d'améliorer le pouvoir prédictif des indices de fonte et pluie hivernale.

Banque de données hydro pédologiques

L'indexation et la validation du groupe hydrologique de l'ensemble des sols du Québec en milieu rural, constitue un important actif en support à la conception des ouvrages hydro-agricoles. Rappelons que le groupe hydrologique du sol constitue un important intrant aux méthodes d'évaluation du ruissellement, en contribuant à la définition des numéros de courbe (CN). Alors que la géomatique fait maintenant partie du quotidien en milieu de pratique, la base de données applicable à toutes les unités cartographiques de l'ensemble des rapports pédologiques du Québec facilitera la préparation des projets en aménagement hydro-agricole.

Les données de conductivité hydraulique nécessaires à la classification en groupes hydrologiques n'étant pas disponibles pour toutes les séries de sol québécoises, une méthode de classification-expert a été développée à l'IRDA. L'exercice de validation, appuyé par la base de données de l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols du Québec, a démontré la cohérence de la méthode proposée avec la méthode originale proposée par le USDA-NCRS. Les succès de classification du système de classification-expert sont ainsi estimés satisfaisants. Les profondeurs repères pour les mesures de conductivité hydraulique (USDA : 0-100 cm; IRDA : maximum 40-60) sont estimées comme les principales sources de divergence au plan méthodologique. La méthode de l'USDA considère en effet une profondeur de sol pouvant aller jusqu'à 100 cm, ce qui est le cas de la grande majorité des sols en culture du Québec. Il est donc probable que le classement proposé surévalue dans certains cas le potentiel de ruissellement.

Par ailleurs, mentionnons qu'une évaluation indirecte de la conductivité hydraulique saturée par fonction dite de pédotransfert (prédiction d'une propriété en fonction d'autres propriétés mesurées), en alternative à la méthode de classification-expert retenue, aurait été est très hasardeuse. Il a en effet été estimé que les mesures de conductivité des sols québécois n'étaient pas directement reliées à des propriétés physiques et chimiques des sols (% d'argile, de limon ou de sable, matière organique, CEC, etc.). La méthodologie de l'USDA indique des classes texturales et des teneurs d'argile et de sable de référence pour chacun des groupes hydrologiques (*typiquement*). De telles relations mathématiques selon la granulométrie ont été testées dans le cadre de la présente étude, sur la base des données de l'Inventaire québécois sur la dégradation des sols, et les résultats ont été très peu concluants. Aucune corrélation valable ne s'est dégagée selon la granulométrie. Le classement des groupes hydrologiques (ou l'évaluation de la conductivité hydraulique saturée) par classe texturale ou teneur en sable, limon ou argile, ne semble donc pas approprié pour les sols minéraux du Québec. L'approche de classification basée sur les propriétés descriptives a donc été retenue pour les séries de sols qui n'ont pas profité de mesures de conductivité lors de l'Inventaire de 1991. Rappelons cependant que la granulométrie est mise à profit, à l'instar d'autres propriétés du

sol, dans le classement proposé des groupes hydrologiques. L'état structural des couches de sol (type, dimension, degré d'agrégation) apparaît comme un meilleur indice révélateur de la conductivité hydraulique saturée. Les propriétés structurales ne sont cependant pas systématiquement documentées pour les sols du Québec.

Il est dès lors proposé d'adopter cette première classification des séries de sol en groupes hydrologiques développé sur la base du système-expert de l'IRDA, considérant qu'elle traduit bien le potentiel de ruissellement des sols et qu'elle est adaptée au dimensionnement des ouvrages hydrauliques en milieu rural selon les pratiques en usage en milieu de pratique. La banque de données hydro-pédologiques est interfacée avec l'utilitaire QmaxPBV de dimensionnement des ouvrages hydrauliques développé dans le cadre du présent projet.

Développement et validation d'une méthode de prédiction hydrologique

Le développement et la validation des méthodes d'estimation des paramètres hydrologiques (temps de montée, hauteur de ruissellement, débit de crue) propres au dimensionnement des ouvrages hydro-agricoles se sont appuyés sur la caractérisation des réponses hydrologiques de onze petits bassins versants en milieu rural québécois (3 à 30 km²). L'analyse de plus de 700 hydrogrammes individuels a été supportée par le logiciel VisuHydro, spécialement développé à cette fin dans le cadre du projet. Le logiciel a permis de modéliser les principales propriétés des hydrogrammes analysés, incluant leur forme, les temps de montée, les hauteurs de ruissellement et les débits de pointe. Les résultats de ces analyses hydrologiques détaillées (observations) ont servis de bases de développement et de validation des diverses méthodes de prédiction de ces paramètres. Au terme du présent projet, toutes les méthodes proposées d'estimation des paramètres hydrologiques (ruissellement, temps de concentration, forme et débits de pointe) se distinguent de celles couramment utilisées en milieu de pratique au Québec.

En ce qui a trait aux prédictions de hauteur de ruissellement, l'étude des relations entre les précipitations (Ppt) et les hauteurs de ruissellement (Hru) générés aux exutoires des onze bassins versants à l'étude a d'abord mis en relief une distribution non normale des observations. Cette constatation a conduit au développement de modèles sur la base de données de précipitations et de débits transformées (base logarithmique), afin de respecter le postulat d'homogénéité de la variance (distribution proportionnelle des erreurs et des observations) propre à ce type d'étude.

Un autre choix méthodologique important fut d'exclure les événements possiblement influencés par la fonte et la pluie hivernale des analyses hydrologiques des relations Précipitations : Débits. Il a été en effet conclu qu'une approche distincte devait s'appliquer à la prédiction de ce type d'évènement. En restreignant les analyses de covariance (ANCOVA) aux débits et aux précipitations observées à la période non influencée par les épisodes de fonte et de pluie hivernale, des modèles de prédiction des hauteurs de ruissellement, démontrant un pouvoir explicatif significatif, ont été développés pour tous les bassins versants à l'étude. Il a par ailleurs été estimé que le modèle du SCS sous-estimait grandement le ruissellement pour les précipitations inférieures à 100 mm, alors que le modèle de Monfet (1979) se situait près de la valeur moyenne ou légèrement au-dessus.

De façon systématique, les ANCOVA réalisées sur les différents jeux de données de bassins ont démontré l'absence d'interactions entre les facteurs « Bassin » et la covariable

(précipitations). Ainsi, la variabilité dans les réponses hydrologiques entre bassins versants a été expliquée par des modèles réduits de régression linéaire (sur données transformées). Les différents bassins partagent alors la même pente dans le modèle statistique (l'exposant de la précipitation dans le modèle physique), mais se distinguent par leurs ordonnées à l'origine (le coefficient de ruissellement dans le modèle physique) respectives. Suivant une première analyse globale de l'ensemble des observations (N = 463) ciblée sur la détection des effets individuels des bassins versants (modèles locaux), le jeu de données a été scindé en deux groupes, représentatifs des régions physiographiques de la plaine du Saint-Laurent (modèle régional montréalais) et de reliefs plus accentués (modèle régional appalachien).

En Montérégie, les estimateurs du coefficient de ruissellement (ordonnées à l'origine dans le modèle statistique) se sont avérés corrélés avec les numéros de courbe (CN) respectifs des bassins versants à l'étude. Il a dès lors été postulé que cette corrélation traduisait l'influence des propriétés du sol et des systèmes culturaux, compte tenu du relief relativement homogène de ces bassins versants. Les CN ont donc pu être intégrés aux modèles de prédiction des hauteurs du ruissellement (modèle montréalais). Pour les autres bassins à l'étude, représentatifs des régions de l'Estrie, du Témiscouata et de la Beauce, les CN moyens des bassins à l'étude ne pouvaient expliquer les coefficients de ruissellement des différents bassins versants. Il a plutôt été estimé que des facteurs, autres que ceux reflétés par la méthode courante d'indexation des CN (groupe hydrologique et occupation du sol), expliqueraient la variabilité des hauteurs de ruissellement observées dans les bassins au relief accentué. L'influence des formes du paysage sur la saturation des sols, l'influence hydrodynamique des milieux humides, sont les deux principales pistes suggérées par les résultats de la présente étude. Une équation générale applicable aux six bassins versants a été proposée en guise de modèle régional appalachien, prédisant les hauteurs moyennes de ruissellement sur la seule base des précipitations (non hivernales) comme variable explicative.

L'étude des temps de montée (observés) s'est appuyée sur l'analyse hydrologique de 193 hydrogrammes de type simple colligés aux exutoires de 10 bassins versants du réseau d'étude. Les temps de concentration ont été estimés par les différents modèles utilisés au Québec en utilisant les paramètres descriptifs des bassins versants étudiés (pente du cours d'eau, longueur de parcours de l'eau, CN moyen). Aucune des méthodes de détermination du temps de concentration à l'étude et les plus utilisées en milieu de pratique au Québec (Kirpich, Mockus, SCS-lag et Bransby-Williams) ne permettaient d'estimer correctement le temps de montée. Devant ce constat, une approche de régression a été retenue dans le développement d'une méthode alternative de prédiction du temps de montée/concentration sur la base des descripteurs physiques des bassins versants à l'étude. Dans l'ensemble, la longueur d'écoulement a démontré le meilleur pouvoir explicatif du temps de montée ($\text{prob} < 0,05$), alors que les contributions du CN et de la pente des bassins sont associés respectivement à des taux de probabilité de 15 et 25 %. Un modèle de régression intégrant ces variables explicatives a été retenu et proposé pour l'estimation du temps de montée en alternative aux méthodes « traditionnelles », compte tenu de sa meilleure corrélation avec les temps de montée observés. Il est toutefois reconnu que le nombre de bassins versants mis à profit dans la présente étude (N = 10) est relativement faible pour établir un tel modèle de prédiction hydrologique du temps de concentration.

En ce qui a trait aux paramètres de forme des hydrogrammes étudiés, le coefficient moyen de forme est de 0,73 pour l'ensemble des hydrogrammes et des bassins versants, avec un écart

type de 0,11. La plus petite valeur est de 0,53 pour le bassin « Brook » en Estrie à 0,90 pour le bassin « Cass » dans la même région. L'analyse de variance montre que le coefficient de forme est affecté de façon significative par l'effet « Bassin ». Le temps de montée et le CN II (numéro de courbe) des bassins à l'étude contribuent tous deux à expliquer de façon significative la variabilité du coefficient de forme ($r^2 = 52$). Bien que le petit nombre de bassins étudiés appelle à la prudence, l'évaluation relativement homogène du coefficient de forme pour l'ensemble des bassins à l'étude, présentant pourtant des caractéristiques physiographiques très contrastées, de même que la faiblesse de l'écart-type, milite en faveur de retenir la valeur moyenne 0.73 comme coefficient de forme d'hydrogramme pour les prédictions hydrologiques applicables à l'ensemble de petits bassins versants ruraux au Québec. Rappelons que cette valeur se rapproche de celle inhérente à la méthode de l'hydrogramme triangulaire ou unitaire du SCS, qui correspond à un coefficient de forme de 0,75. La méthode rationnelle utilise pour sa part à un coefficient de forme de 1,00.

La méthode de prédiction de débit de crue proposée s'est appuyée sur les différents paramètres hydrologiques (hauteur de ruissellement, temps de montée, facteur de forme $\phi(\alpha)$) tels que déterminés au moyen de méthodes indépendantes développées dans le cadre de la présente étude, sur la base des hydrogrammes analysés pour l'ensemble des onze bassins versants. Dans ce contexte, la comparaison des débits de crue prédits par le modèle proposé, avec les débits de crue observés, constitue un exercice de validation globale de la cohérence entre les méthodes d'estimation des différents paramètres hydrologiques. Cet exercice de validation inclut aussi les banques de données météorologiques (IDF) et hydro-pédologiques mises à jour dans le cadre de la présente étude. Rappelons en effet que la méthode de prédiction des débits de crue fait appel aux courbes IDF et à l'indexation des groupes hydrologiques dans le calcul du CN moyen du bassin à l'étude. Une validation objective aurait cependant exigé l'utilisation de bassins versants n'ayant pas été utilisés lors de l'étude des différents facteurs. Compte tenu du nombre limité de bassins versants mis à contribution dans le cadre de la présente étude, cette avenue n'était pas possible. La validation de la méthode proposée de prédiction des débits de crue a donc reposé sur l'hypothèse que pour un bassin versant donné, le recours à la précipitation de récurrence associée au temps de montée prédit du bassin versant, de même que de la hauteur de ruissellement prédite pour cette même précipitation, devrait prédire le débit observé pour cette récurrence.

En utilisant les courbes enveloppes associées aux prédictions des hauteurs de ruissellement des deux modèles régionaux, l'approche proposée de prédiction des débits de pointe, recourant aux modèles prédictifs du temps de montée, du ruissellement et du paramètre de forme développés dans le cadre de la présente étude, est estimée valide. Cette validité demeure cependant conditionnelle à une bonne prédiction de la hauteur de ruissellement. La présente étude a mis en relief que l'approche du numéro de courbe (CN) ne permettait pas de caractériser le ruissellement des bassins appalachiens et s'est montré peu performant avec un bassin en Montérégie. Le CN ne semble donc pas un indicateur d'application générale permettant de caractériser le ruissellement des bassins versants au Québec. Ce constat doit cependant être modéré par le nombre limité de bassins versants utilisés. Les données d'autres bassins versants devront être analysées pour raffiner l'approche proposée.

Développement de l'utilitaire

L'ensemble des équations prédictives des différents paramètres hydrologiques évaluées ou validées dans le cadre de la présente étude ont été intégrées à l'utilitaire informatique *QmaxPBV* (pour Q_{max} des petits bassins versants). Ce dernier est destiné à supporter, auprès du milieu de pratique, l'estimation des débits de crue et des volumes de ruissellement en support au dimensionnement des ouvrages hydro-agricoles. L'utilitaire met à profit les méthodes d'estimation des hauteurs de ruissellement, des temps de montée, du paramètre de forme des hydrogrammes et des débits de pointe développées et validées dans le cadre du présent projet de recherche. Il est également interfacé avec les banques de données hydro-pédologiques et les courbes de distribution IDF des précipitations, aussi mises à jour dans le cadre du présent projet. Deux rencontres auprès d'un groupe de futurs usagers en cours de projet ont permis au préalable de définir les besoins et les interfaces de l'outil informatique. À la demande des usagers, l'utilitaire inclus aussi les méthodes traditionnelles d'estimation couramment utilisées. La validation opérationnelle de l'outil, incluant ses fonctionnalités et ses interfaces, a été présentée lors d'un atelier tenu le 4 décembre 2012 à Drummondville. Cette journée a permis de rassembler un forum d'une vingtaine d'usagers en provenance de différentes régions et différents milieux afin de leur présenter les développements réalisés dans le cadre du projet. Le compte-rendu de l'atelier est présenté en annexe au présent rapport. Dans l'ensemble, les participants soulignent leur intérêt pour les outils développés. L'installation de *QmaxPBV* sur les ordinateurs des employés du MAPAQ est cependant soulignée, compte tenu des règles administratives actuelles. Quelques avenues sont proposées afin de contourner cette problématique. Il est également proposé de cibler l'intégration des outils proposés avec ceux destinés aux calculs hydrauliques et au design des ouvrages, tels que logiciel HEC-HMS. Enfin, les pistes de développement futur sont abordées.

Concrètement, les objectifs du projet de *Mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydro-agricoles* ont été rencontrés, à l'exception de la prise en compte de l'occurrence des redoux hivernaux dans les paramètres de conception des ouvrages. Rappelons qu'à l'instar des pratiques courantes en milieu de pratique, les méthodes de prédiction hydrologique proposées ont été développées sur la base des observations de précipitations et de débits restreinte à la période non influencée par des événements de fonte et de pluie hivernale (mai-novembre). L'ensemble des livrables du projet proposent toutefois une nette amélioration par rapport aux bases de données utilisées jusqu'à ce jour dans le dimensionnement des ouvrages hydro-agricoles en milieu rural. Le contexte de réalisation du projet n'a cependant pas permis de compléter l'étape de proposer et de valider une méthode de prédiction hydrologique adaptée au contexte très particulier, et complexe, des crues de fonte et de pluie hivernale. Les principaux actifs nécessaires à cette démarche ont cependant été acquis, à savoir 1) le développement d'une méthode simplifiée de prédiction d'apports verticaux sur la seule base d'observations de température et de précipitations, 2) leur projection en climat actuel à une large proportion des stations météorologiques de la province, 3) l'évaluation de la performance du MRCC à simuler ces indicateurs en climat futur et enfin 4) la détermination des paramètres hydrologiques de centaines de crues de fonte et de pluie hivernale pour l'ensemble du réseau de petits bassins versants à l'étude. La prochaine étape consistera à traduire la relation entre les crues observées, les indices de fonte et de pluie hivernale développés, et les propriétés physiographiques et l'occupation des bassins versants. Une étape qui s'inscrit en suite logique à la présente étude.

35 Conclusion et recommandations

La réalisation des différents volets du projet de *Mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydro-agricoles* s'est appuyée sur un large partenariat d'expertises multidisciplinaires dans la mise en valeur d'observations du climat, des débits des rivières et des propriétés des sols propres au Québec. Plusieurs approches innovantes ont été mises à profit dans l'analyse, l'interprétation et la prédiction de ces composantes déterminantes de notre environnement, en climat actuel comme en climat futur.

Au plan opérationnel, les outils et banques de données découlant du présent projet et proposées au milieu de pratique constituent à plusieurs égards une nette avancée par rapport aux méthodes utilisées antérieurement. L'actualisation des banques de données pertinentes aux précipitations (IDF) et aux propriétés des sols, conjuguée au développement et à la validation de nouvelles méthodes de prédiction hydrologique constituent un ensemble cohérent d'outils, fonctionnels, et prêts pour une validation opérationnelle en milieu de pratique. Ce dernier rassemble une large gamme d'intervenants, incluant notamment :

- les conseillers des clubs-conseils en agroenvironnement (83 clubs-conseils desservant 8287 entreprises agricoles);
- les conseillers œuvrant au sein d'une quarantaine d'organisations à but non lucratif parrainant des actions concertées en bassins versants agricoles au Québec, dont les zones d'intervention prioritaires sur le phosphore et découlant du plan d'action gouvernemental sur les cyanobactéries;
- les ingénieurs et agronomes œuvrant dans les services gouvernementaux provinciaux, principalement au MAPAQ;
- les ingénieurs et agronomes œuvrant dans des bureaux de services conseils;
- le personnel des municipalités et MRC qui ont juridiction en matière de gestion des cours d'eau municipaux;
- de même qu'auprès des entrepreneurs privés impliqués dans la planification et la réalisation de chantiers d'amélioration foncière des terres, de même que dans la conception et la réalisation des aménagements de cours d'eau en milieu agricole.

Il est par ailleurs estimé que les outils et banques de données générées par le projet épauleront les programmes de formation offerts en milieu collégial et universitaire en lien avec la régie des sols et des eaux en milieu agricole.

Bien que les banques de données et les utilitaires informatiques développés permettront de mieux épauler les tâches liées à la conception d'ouvrages hydrauliques en milieu rural, il n'en demeure pas moins que l'outil ne se substituera pas à l'exercice du jugement professionnel. La familiarisation avec les méthodes appliquées et leurs incertitudes demeure essentielle afin d'interpréter convenablement les intrants aux modèles, de même que leurs prédictions. Rappelons aussi que les tâches reliées au dimensionnement des ouvrages fait aussi appel à la documentation de bon nombre de données à référence spatiale (DRS), telles que l'utilisation du territoire, la forme et la longueur des cours d'eau, la superficie et la pente

moyenne des bassins versants, l'identification des séries de sol, etc. En parallèle à la diffusion des outils développés dans le cadre de la présente étude, il y a lieu d'assurer l'accès convivial à ces DRS pour l'ensemble du territoire agricole du Québec.

Enfin, toutes bases de données ou outils informatiques sont appelés tôt ou tard à être mis à jour et requièrent un support à l'utilisateur. Bien que l'équipe du présent projet assume une première diffusion de l'outil, dans un contexte de validation opérationnelle, il est fondamental d'identifier à court terme les intervenants et le partage de responsabilités inhérent à la mise à jour, à la diffusion et au support aux usagers des livrables de la présente étude. À l'instar des bases de données agrométéorologiques dont la mise à jour est supportée et diffusée par la commission d'agrométéorologie du CRAAQ, la création d'une commission sur la gestion de l'eau au sein de la même organisation apparaît comme une avenue souhaitable à considérer dans le développement concerté, la mise à jour et à la diffusion des outils de gestion de l'eau en milieu agricole au Québec.

Au plan du développement de connaissances, cette étude aura permis de mieux comprendre et d'appréhender les réponses hydrologiques des petits bassins versants ruraux, en lien avec la variabilité spatiale des intensités de précipitations, et leur projection en climat futur. La réalisation de ce projet a cependant soulevé un certain nombre d'interrogations, particulièrement en ce qui a trait aux explications des variabilités spatiale et saisonnière des crues, et interpelle autant de développements futurs. Nous concluons ainsi cette étude par l'identification des besoins de développement des connaissances en lien avec la détermination des pluies extrêmes en climat futur, de la classification hydro-pédologique des sols, des méthodes de prédiction hydrologique en petits bassins ruraux de même qu'à l'égard de la prédiction des crues de fonte et de pluie hivernale.

Pluies extrêmes en climat futur

L'évaluation des simulations du MRCC s'est limitée aux pluies extrêmes de 24 heures, compte tenu de la disponibilité des données de validation. Pour pallier à cette faiblesse, il serait possible d'utiliser les données horaires de stations dans la région densément instrumentée de la vallée du St-Laurent pour créer une grille de précipitations horaires à haute résolution spatiale. Ces données pourraient alors être agrégées à 45 km afin d'être comparées aux sorties de modèles. Bien que ce genre d'analyse ne puisse couvrir un large territoire, ce type de résultats serait néanmoins pertinent afin d'évaluer la performance du modèle à reproduire les extrêmes de pluie sur de courtes périodes. Aussi, pour agrandir la taille de l'ensemble, des simulations réalisées par d'autres modèles régionaux pourraient être ajoutées. Toutefois, tous les modèles n'archivent pas les précipitations extrêmes, ce qui complique le pré-traitement des simulations.

La classification hydro-pédologique de sols

Il y aurait intérêt à réaliser des travaux complémentaires afin de bonifier la présente méthode d'indexation du groupe hydrologique proposée et basée sur le système de classification expert :

- La classification originale (provenant du USDA) distingue les profils de sol qui présentent un horizon imperméable dans la section (0-100 cm) ou dans la section supérieure (100 cm et +). Puisque ce paramètre est susceptible de varier d'un site à l'autre, il serait préférable de fournir à l'utilisateur les deux classifications possibles dépendamment de la position de la nappe. Il faut noter toutefois que nous ne

disposons de très peu de données de conductivité hydraulique sur les sols à des profondeurs supérieures à 100 cm au Québec. Ainsi, cette avenue nécessiterait l'acquisition de données de conductivité hydraulique complémentaires à plus de un mètre de profondeur.

- La phase de sol correspond à la partie supérieure du sol (horizon A entre 0 et 40 cm) qui ne relève pas de la classification au niveau de la série. La classification des groupes hydrologiques proposée dans le cadre de la présente étude ne tient pas en compte de cette portion du sol, puisque l'identification de la série est basée sur l'horizon B, voir plus en profondeur. Éventuellement, la prise en compte de la phase de sol pourrait être ajoutée à la classification québécoise des groupes hydrologiques.

Les méthodes de prédiction hydrologique

L'analyse hydrologique des onze bassins versants à l'étude a fourni les premières balises au développement et à la validation d'un ensemble cohérent d'équations prédictives des paramètres hydrologiques (ruissellement, temps de montée, paramètre de forme et débits de pointe) requis au dimensionnement des ouvrages hydrauliques. Il est toutefois reconnu que le nombre de bassins versants mis à profit est relativement faible pour établir ces modèles de prédiction hydrologique. Une première suite à donner au présent projet serait de mettre à contribution d'autres relevés hydrométriques existants ou en cours d'acquisition dans le raffinement et la validation objective des équations.

Les séparations des 700 hydrogrammes mis à contribution dans le cadre de la présente étude ont été réalisées sur une base manuelle, comportant une certaine part de subjectivité. Le recours à des méthodes alternatives de séparation, notamment sur la base du signal de conductivité électrique de l'eau développée par l'IRDA (Michaud et col. 2009a,b) offre l'opportunité de tabler sur des observations plus précises des hauteurs de ruissellement dans le développement et la validation d'équations prédictives. Dans la mesure où la conception du logiciel *VisuHydro* permet l'intégration de nouvelles séries chronologiques de données et de modules de calcul, le développement des modules de traitement du signal de conductivité présente un vif intérêt. Il en va de pareille façon pour le signal de turbidité, aussi colligé sur 18 bassins versants du réseau opéré par l'IRDA depuis 2003.

Rappelons que les modèles de prédiction hydrologique développées et validées dans le cadre de la présente étude ont été basés sur des petits bassins versants d'une superficie de trois à trente kilomètre carrés approximativement. En milieu de pratique, les conseillers sont le plus souvent interpellés par la conception d'aménagement des terres pour des micro-bassins de superficie beaucoup plus petite (ordre de 10 ha). Il y aurait donc lieu d'étudier les effets d'échelles sur l'ajustement des prédictions des modèles proposés dans le cadre de la présente étude. Les observations colligées dans le cadre de suivi à l'échelle parcellaire, telles que celles rapportées par Guillou (2012a et b), fournissent une base de validation appropriée à ce type d'analyse.

Au plan méthodologique, les hauteurs de ruissellement estimées dans le cadre de la présente étude remettent en question le pouvoir explicatif du facteur CN dans sa forme actuelle. Bien que les observations sur les bassins en Montérégie suggèrent une certaine cohérence entre les CN et les estimateurs des paramètres de régression des modèles proposés, l'adéquation ne tient plus en relief accentué, en Estrie, en Beauce ou dans le Témiscouata. Il est postulé que la prise en compte des processus de saturation du sol et d'émission du ruissellement à surface variable, largement contrôlés par les propriétés du paysage, pourraient nettement

améliorer les prédictions des hauteurs de ruissellement dans ces bassins, voire dans l'ensemble des bassins versants ruraux au Québec. L'introduction d'indices topographiques d'humidité du sol (wetness index) est un facteur de plus en plus utilisé dans le paramétrage des facteurs physiographiques en modélisation hydrologique. Au Vermont, où le concept a été développée en premier lieu (Dunne and Black, 1970), l'indice topographique a été récemment intégré au paramétrage du modèle hydrologique des tributaires de la baie Missisquoi. L'indexation des indices topographiques aux micro-bassins de la région développés sur till glaciaire, s'est traduit en un excellent ajustement de leur modèle de prédiction (Winchell et al., 2011). La disponibilité de modèles numériques d'élévation de plus en plus précis au Québec en milieu rural favorise cette piste de développement.

Les indices de fonte et de pluie hivernale

La présente étude a démontré la pertinence de l'approche de modélisation des apports verticaux dans l'explication des crues de fonte et de pluie hivernale. Conceptuellement, les apports verticaux cumulent les influences des précipitations et du processus de fonte sur la génération de la hauteur d'eau quotidienne disponible à l'exportation, exprimées en mm/jour. Les apports verticaux extrêmes ont ainsi pu être calculés pour 100 stations météorologiques québécoises en climat récent, à l'instar des données de précipitations extrêmes (IDF). Bien que la portée de la présente étude n'ait pas permis de développer plus en aval les relations entre les indices de fonte et pluie hivernale et les hauteurs de ruissellement, ce thème de recherche demeure des plus pertinent et s'inscrit en suite logique à la présente étude.

Suivant une démarche d'analyse des hydrogrammes pluies/fontes s'apparentant à celles des hydrogrammes en saison de croissance (mai-novembre) réalisées dans le cadre de la présente étude, il y aurait lieu d'expliquer les hauteurs observées de ruissellement tributaires de fonte et de pluie hivernale par les apports verticaux prédits par le modèle CEQUEAU_modIRDA. Cette approche permettrait ainsi de proposer et de valider une méthode empirique de prédiction des crues sous influence de la fonte et de la pluie hivernale sur la base des récurrences des apports verticaux. Les résultats obtenus dans le cadre de la présente étude sur les bassins versants de la Montérégie et de la Beauce sont prometteurs et invitent à poursuivre les travaux de recherche et de développement dans cette direction. À terme, les méthodes proposées et validées viendraient compléter le coffre à outils du milieu de pratique, actuellement restreint aux événements de ruissellement sans influence de la fonte et de la pluie hivernale. Rappelons en terminant que la pertinence de prédire les réponses hydrologiques à la fonte et à la pluie hivernale ne s'inscrit pas tant au niveau des débits extrêmes de faible récurrence. Ces derniers sont en effet le plus souvent associés aux intensités extrêmes de précipitations estivales. C'est plutôt la pertinence d'appréhender les volumes totaux de ruissellement associés à la fonte et à la pluie sur couvert neigeux, source d'inondation et principal vecteur de transferts diffus de sédiments et de nutriments vers les plans d'eau, qui milite pour ce développement. L'augmentation appréhendée de la fréquence des redoux hivernaux en climat futur ajoutent à la pertinence de développer les outils de prédiction appropriés. Aussi, en étape subséquente à la validation d'une méthode de prédiction de ruissellement de fonte et de pluie hivernale en climat récent, il y aurait lieu de développer une projection des apports verticaux en climat futur et d'en évaluer l'impact potentiel sur les crues en période de fonte et de pluie hivernale.

36 Références

- Alila Y.1999. A hierarchical approach for the regionalization of precipitation annual maxima in Canada. *J. Geophys. Res.* 104(D24) : 31645–31655.
- ASCE Task Committee on definition of criteria for evaluation of watershed models of the watershed management Committee, Irrigation and Drainage Division. 1993. Criteria for evaluation of watershed models. *Journal of irrigation and Drainage Engineering*, vol. 119 (3), pp. 429-442.
- Balakrishnan, N. et J. Wang. 2000. Simple efficient estimation for the three-parameter gamma distribution, *Journal of Statistical Planning and Inference* 85 (1-2), 115-126.
- Basak, I. et N. Balakrishnan. 2011. Estimation for the three-parameter gamma distribution based on progressively censored data, *Statistical Methodology*, doi :10.1016/j.stamet.2011.08.05.
- Beaudin, J. Deslandes, A. Michaud, F. Bonn et C.A. Madramootoo. 2006. Variabilité spatio-temporelle des exportations de sédiments et de phosphore dans le bassin versant de la Rivière aux Brochets au sud-ouest du Québec. Partie I – Paramétrage, calibrage et validation du modèle SWAT. *Agrosol.* 17 (1) : 4-20.
- Bergström, S. 1995. The HBV model. In : V.P. Singh (Editor), *Computer Models of Watershed Hydrology*, Chapter 13. Water Resources Publications, pp. 443-476.
- Bhunya, P. K., S. K. Mishra, C. S. P. Ojha et R. Berndtsson. 2004. Parameter estimation of beta- distribution for unit hydrograph derivation, *J. Hydrol. Eng.*, 9, 325– 332.
- Bhunya P.K., S.K. Mishra et R. Berndtsson. 2003. Simplified two-parameter gamma distribution for derivation of synthetic unit hydrograph. *Journal of Hydrologic Engineering ASCE* 8(4) : 226–230.
- Bhunya P.K., S.N. Panda et M.K. Goel. 2011. Synthetic Unit Hydrograph Methods : A Critical Review. *The Open Hydrology Journal*, 1-8.
- Bindoff, N. et *al.* 2007. *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, chap. Observations : Oceanic Climate Change and Sea Level, in Solomon et *al.* (2007b).
- Brown, R.D. et D. Chaumont. 2009. Analyse de simulations régionales du climat et d'indices climatiques associés au transport routier dans le sud du Québec, *Proc. Congrès International de la Viabilité Hivernale*, Québec.
- Caya, D. et R. Laprise. 1999. A semi-implicit semi-Lagrangian regional climate model :the Canadian RCM, *Monthly Weather Review*, 127, 341–362.

- Chen, C.-T., et T. Knutson. 2008. On the verification and comparison of extreme rainfall indices from climate models, *Journal of Climate*, 21(7), 1605–1621, doi :10.1175/2007JCLI1494.1.
- Chico Bermejo, J. 2010. Estimación de los parámetros de forma y escala en una distribución gamma, Escuela Politécnica Superior de Zamora Universidad de Salamanca.
- Coles S. 2001. An introduction to statistical modeling of extreme values, Springer series in statistics, Springer-Verlag, London, UK, 208 p.
- Collins, W. D. et al. 2006. The community climate system model version 3 (ccsm3), *J.Climate*, 19(11), 2122–2143.
- Côté, D. 1977. Description et performance d'un prototype d'infiltromètre à charge constante. Génie Rural, Université Laval, Québec, vol. 9, no 3.
- CSA. 2010. Technical Guide - Development, interpretation and use of rainfall intensity-duration-frequency (IDF) information : Guideline for Canadian water resources practitioners, Canadian Standards Association, Special Publication, Mississauga, Ontario, Canada, 149 p.
- de Elía, R., D. Caya, H. Côté, A. Frigon, S. Biner, M. Giguère, D. Paquin, R. Harvey et D. Plummer. 2008. Evaluation of uncertainties in the crcm-simulated north American climate, *Climate Dynamic*, 30, 113–132.
- de Elía, R., and H. Côté , 2010 : Climate and climate change sensitivity to model configuration in the Canadian RCM over North America. *Meteorol. Z.*, Vol. 19, No. 4, 325-339. DOI : 10.1127/0941- 2948/2010/0469.
- Déqué, M., et J. Piedelievre. 1995. High-resolution climate simulation over europe, *Climate*, 11, 321–339.
- DHI, 2009. MIKE 11, A Modelling System for Rivers and Channels, Reference Manual.
- Drouin, A., G. Talbot, S. Biner, J-D. Sylvain, A. Michaud, O. Le Bourgeois, I. Beaudin, M. Grenier, G. Baribeau et J. Desjardins. 2013. Indicateurs de redoux hivernaux adaptés à la prévision hydrologique en bassins versants agricoles. Rapport d'étape du projet « Mise à jour des normes et procédures de conception d'ouvrages hydrauliques en milieu rural dans un contexte de changements » réalisé dans le cadre du programme ICAR et de la mesure 26 du Plan d'action sur les changements climatiques 2006-2012 (PACC) du gouvernement du Québec en collaboration avec Ressources naturelles Canada. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Québec, Canada.
- Dunne, T. et R.D. Black. 1970. Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed. *Water Resour. Res.* 6 :1298-3311.
- Environnement Canada - Service météorologique du Canada, région du Québec. (Page consultée le 11 septembre 2012), [En ligne]. Adresse URL : www.climat-Québec.qc.ca

- Fang, X., K. Prakash, T. Cleveland, D. Thompson et P. Pradhan. 2005. [Revisit of NRCS Unit Hydrograph Procedures](#). ASCE Proceedings, Austin, Texas.
- Forster, P. et al. 2007. *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, chap. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing, in *Solomon et al.* (2007b).
- Fortier-Filion, T-C. 2011. Développement d'une procédure de mise en place d'un modèle hydrologique global sur des bassins jaugés et non jaugés : application du modèle MOHYSE au Québec. Mémoire de maîtrise. INRS-Eau, Terre et Environnement. 122 p.
- Fortin, V. et R. Turcotte. 2006. Le modèle hydrologique MOHYSE, Note de cours pour SCA7420, Université du Québec à Montréal : Département des sciences de la terre et de l'atmosphère.
- Gagné G., I. Beaudin, M. Leblanc, A. Drouin, G. Veilleux, J.D. Sylvain et A.R. Michaud. 2013. Classement des séries de sols minéraux du Québec selon les groupes hydrologiques. Dans le cadre du projet « Mise à jour des normes et procédures de conception d'ouvrages hydrauliques en milieu rural dans un contexte de changements ». Programme ICAR et Mesure 26 du Plan d'action sur les changements climatiques 2006-2012 (PACC) du gouvernement du Québec en collaboration avec Ressources naturelles Canada. Consortium de recherche Ouranos. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Québec, Canada. 81 p.
- Garçon, R., 1996. Préviation opérationnelle des apports de la Durance à Serre-Ponçon à l'aide du modèle MORDOR. Bilan de l'année 1994-1995. La Houille Blanche, 5 : 71-76.
- Gallichand, J. 2012. Données de suivi hydrologique du ruisseau Bélair. Communication personnelle.
- GTCS, Groupe de travail sur la classification des sols. 2002. Le système canadien de classification des sols (SCCS). 3^e édition. Agriculture et Agroalimentaire Canada. Direction générale de la recherche. Publication 1646. Ottawa. 196 p.
- Guillou, M. 2012a. Analyse hydrologique et morphologique d'un cours d'eau agricole de la plaine du Saint-Laurent. Mémoire de maîtrise. Université Laval. 212 p.
- Guillou, M. 2012b. Hydrologie à l'échelle de la parcelle agricole en Montérégie. MAPAQ. Rapport d'étape 2012.
- Habib, E., W. F. Krajewski et A. Kruger. 2001. Sampling errors of tipping-bucket rain gauge measurements, *J. Hydrol. Eng.*, 6(2) : 159– 166.
- Haktanir T. et N. Sezen. 1990. Suitability of two-parameter Gamma distribution and three-parameter Beta distribution as synthetic hydrographs in Anatolia. *Hydrological Sciences Journal* 35(2) : 167–184.

- Hogg W.D. et D.A. Carr. 1985. Rainfall Frequency Atlas for Canada/Atlas de la fréquence des pluies au Canada, Programme climatologique canadien, Ministère des Approvisionnement et Services Canada, 17 p. + 6 annexes.
- Hosking, J., et J. Wallis. 1993. Some statistics useful in regional frequency analysis, *Water Resources Research*, 29, 271 – 281.
- Hosking, J. et J. Wallis. 1997. *Regional Frequency Analysis : An approach based on L-Moments*, Cambridge Univ. Press. Cambridge, UK, 224 p.
- Huard, D. 2011. Extrêmes de précipitations en climat future sur les régions agricoles du Québec. Rapport final du projet Mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydro-agricoles dans un contexte de changements climatiques – volet scénarios climatiques. Ouranos, Montréal, 55 p.
- Huard, D., A. Mailhot et S. Duchesne. 2010. Bayesian estimation of intensity–duration–frequency curves and of the return period associated to a given rainfall event, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 24(3), 337–347, doi :10.1007/s00477-009-0323-1.
- Hutchinson, M. F., D. W. McKenney, K. Lawrence, J. H. Pedlar, R. F. Hopkinson, E. Milewska et P. Papadopol. 2009. Development and testing of canada-wide interpolated spatial models of daily minimum–maximum temperature and precipitation for 1961–2003, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(4), 725–741, doi : 10.1175/2008JAMC1979.1.
- Institut de recherche et développement en agroenvironnement inc. (IRDA). 2008. Feuilles pédologiques numériques. Données du Ministère de l’Agriculture, des Pêcheries et de l’Alimentation du Québec (MAPAQ) et de l’Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA), échelle de numérisation : 1 : 20 000, échelle originale des données : variable, année de numérisation : 1998-2006, disponible via l’IRDA : www.irda.qc.ca.
- Jarrett P. 2010. IDF Curves : Current Status and Plans for the Future, Journée-conférence de l’Association canadienne des ressources hydriques (ACRH), intitulée *Courbes IDF : enjeux et défi*, 6 mai 2010, Hôtel Holiday Inn Midtown, rue Sherbrooke, Montréal (Québec).
- Katz R.W., M.B. Parlange et P. Naveau. 2002. Statistics of extremes in hydrology. *Adv. Water Resour.*, 25(8-12) : 1287-1304.
- Kingumbi A. et A. Mailhot. 2010. Courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) : Comparaison des estimateurs des durées partielles et des maximums annuels. *Hydrological Sciences Journal des Sciences Hydrologiques*, 55(2) : 162-176. DOI :10.1080/02626660903545995.
- Koutsoyiannis, D., et T. Xanthopoulos. 1989. On the parametric approach of unit hydrograph identification, *Water Resour. Manage. J.*, 3, 107– 128.
- La Financière agricole du Québec. 2010. L’état des cultures au Québec. Publication disponible en ligne pour les années 2000-2010. Site internet : http://www.fadq.qc.ca/acces_medias/evenements/etats_des_cultures.

- Lagacé, R. 2012. VisuHydro. Logiciel d'analyse hydrologique développé dans le cadre du projet de Mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydro-agricoles dans un contexte de changements climatiques. Mesure 26 du Plan d'action sur les changements climatiques 2006-2012 (PACC) du gouvernement du Québec en collaboration avec Ressources naturelles Canada (ICAR).
- Lamontagne, L et M. C. Nolin. 1997. Dossier des noms de sol du Québec. Équipe pédologique du Québec 1997, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Sainte-Foy (QC), Bulletin d'extension # 8 : 59 p.
- Laprise, R. 2008. Regional climate modelling, *J. Comput. Phys.*, 227, 3641–3666, doi :10.1016/j.jcp.2006.10.024.
- Le Bourgeois, O. 2010. Élaboration d'un indicateur de redoux hivernal basé sur la fonte du couvert neigeux au Québec, Canada. Rapport de stage, ENSAT et IRDA, Québec, Québec, Canada, 54 p.
- Lemke, P. et al. 2007. Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, chap. Observations : Changes in Snow, Ice and Frozen Ground, in Solomon et al. (2007b).
- Lemmen, D.S., F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éditeurs). 2008. Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007, Gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, 448 p.
- Lindström, G., B.Johansson, M. Persson, M. Gardelin et S. Bergström. 1997. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*, 201(1-4) : 272-288.
- Mailhot A. et G. Talbot. 2011a. Mise à jour des estimateurs Intensité-Durée-Fréquence (IDF) et Hauteur-Durée-Fréquence (HDF) pour le sud-Québec, Tome I – Données et méthodes. Rapport final du projet Mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydro-agricoles dans un contexte de changements climatiques – volet météorologique. Rapport de recherche No R-1259, Institut National de la Recherche Scientifique INRS-Eau, Terre et Environnement, Québec, 60 p.
- Mailhot A. et G. Talbot. 2011b. Mise à jour des estimateurs Intensité-Durée-Fréquence (IDF) et Hauteur-Durée-Fréquence (HDF) pour le sud-Québec, Tome 2 – Résultats. Rapport final du projet Mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydro-agricoles dans un contexte de changements climatiques – volet météorologique. Rapport de recherche No R-1259, Institut National de la Recherche Scientifique INRS-Eau, Terre et Environnement, Québec, 230 p.
- Mathworks. 2006. MATLAB R2006a.

- McFarlane, N., J. F. Scinocca, M. Lazare, R. Harvey, D. Verseghy et J. Li. 2005. The CCCma Third Generation Atmospheric General Circulation Model. CCCma Internal Report, Tech. rep., Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, viewed in September 2009.
- Meylan P., A.-C. Favre et A. Musy. 2008. Hydrologie fréquentielle. Une science prédictive. Presses Polytechniques et universitaires romandes, 174 p.
- Michaud, A., J. Desjardins, M. Grenier et R. Lauzier. 2009a. Suivi de la qualité de l'eau des bassins versants expérimentaux Ewing et Aux Castor - Dans le cadre du projet Lisière verte. Rapport final de projet. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Coopérative de solidarité du bassin versant de la rivière aux brochets, AAC (PASCAA) et MAPAQ, Québec, Québec, Canada, 27 p. <http://www.irda.qc.ca/resultats/publications/197.html>
- Michaud, A.R., J. Deslandes, J. Desjardins et M. Grenier. 2009b. Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles. Rapport final de projet. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). Fonds d'action québécois pour le développement durable, Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec et Programme d'aide technique de Couverture végétale du Canada. Québec, Québec, Canada, 155 p. <http://www.irda.qc.ca/resultats/publications/204.html>
- Michaud, A.R., J. Desjardins, N. Côté, I. Beaudin, A. Drouin, S. Seydoux et I. Saint-Laurent. 2012. Rapport de l'Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles. Rapport réalisé dans le cadre du projet Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). Québec, Canada. 84 pages et annexes.
- Michaud, A.R., M. Giroux, I. Beaudin, J. Desjardins, G. Gagné, M. Duchemin, J. Deslandes, C. Landry, P. Beaudet et J. Lagacé. 2008. ODEP; un Outil de diagnostic des exportations de phosphore. Projet « Gestion du risque associé aux facteurs source et transport du phosphore des sols cultivés au Québec », réalisé dans le cadre de l'Initiative d'appui aux conseillers agricoles (PIACA-204). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA) et Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), Québec, Canada.
- Michaud, A.R., R. Lauzier et M.R.Laverdière. 2005. Mobilité du phosphore et intervention agroenvironnementale en bassin versant agricole : Etude de cas du bassin versant du ruisseau au Castor, tributaire de la rivière aux Brochets, Québec. Agrosol 16(1), pp. 47-59.
- Ministères des ressources naturelles du Québec (MRN). 2003. Le Système d'information écoforestière. Site internet : <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-inventaire-cartes-sief.jsp>
- Ministères des ressources naturelles du Québec (MRN). 2006. Base de données topographiques du Québec (BDTQ) échelle 1/20 000 – Structure physique des données. Site Internet : http://geoboutique.mrnf.gouv.qc.ca/PDF_ZIP/Structure_Topo-20K.pdf

- Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec. 2012. Surveillance du climat. Description du contenu des fichiers de données en format .txt. Site Internet : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/climat/surveillance/sommaire-donnees.htm#statut-don>
- Monfet, J. 1979. Évaluation du coefficient de ruissellement à l'aide de la méthode SCS modifiée. Service de l'hydrométrie, Ministère des Richesses Naturelles. Gouvernement du Québec. Publication HP-51. 35 p.
- Morin, G. 1997. Le modèle hydrologique CEQUEAU, INRS-ÉTÉ, Résumé du manuel CEQUEAU 4.0, Québec, Québec, 83 p. <http://www1.ete.inrs.ca/activites/modeles/cequeau/ceqo-rf.pdf>
- Morin, G. et P. Paquet. 2007. Modèle hydrologique CEQUEAU, INRS-ETE, rapport de recherche no R000926, 458 p.
- Music, B., and D. Caya, 2007 : Evaluation of the Hydrological Cycle over the Mississippi River Basin as Simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM). J. Hydromet., 8(5), 969-988. DOI : 10.1175/JHM627.1.
- Musy, A. et C. Higgy. 2004. Hydrologie : Une science de la nature. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne. Suisse. P.78.
- Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, R. Srinivasan et J.R. William. 2011. Soil and water assessment tool - theoretical documentation, version 2009. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Blackland Research Center, Texas AgriLife Research, Texas, États-Unis. 618 p.
- Nicolle, P. 2010. Prise en compte de la neige dans la prévision hydrologique : quel apport pour mieux prévoir les crues nivales ? Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Écologie. Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris et École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts. Paris, France, 53 p.
- Ouranos. 2010. *Savoir s'adapter aux changements climatiques*. Rédaction : C. DesJarlais, M. Allard, D. Bélanger, A. Blondlot, A. Bouffard, A. Bourque, D. Chaumont, P. Gosselin, D. Houle, C. Larrivée, N. Lease, A.T. Pham, R. Roy, J.-P. Savard, R. Turcotte et C. Villeneuve. Ouranos, Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques, Montréal, Québec. 128 p.
- Paquet, E. 2004. Évolution du modèle hydrologique MORDOR : modélisation du stock nival à différentes altitudes. La Houille Blanche, n°2 : 75-82.
- Pramanik, N., R. K. Panda et D. J. Sen, 2010. Development of design flood hydrographs using probability density functions Hydrological Processes, 24 (4) : 415-428

- Rai, R. K., S. Sarkar et V. P. Singh. 2009. Evaluation of the Adequacy of Statistical Distribution Functions for Deriving Unit Hydrograph Water Resources Management, Volume 23, Number 5, 899-929
- Ressources Naturelles Canada. L'Atlas du Canada - Couverture de neige, (page consultée le 27 juillet 2011), [En ligne]. Adresse URL : <http://atlas.nrcan.gc.ca/auth/francais/maps/environment/climate/snowcover/1>
- Rocha Medrano, N.-R. 2013. Analyse hydrologique de petits bassins versants. Mémoire de maîtrise. Université Laval. Mémoire non publié, en cours.
- Roeckner, E., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kornblueh, L., Manzini, E., Schlese, U., and Schulzweida, U. 2004. The atmospheric general circulation model ECHAM5. PART II : Sensitivity of Simulated Climate to Horizontal and Vertical Resolution, Tech. rep., Max Planck Institute for Meteorology, MPI-Report 354, http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/20_publicationen/Reports/max_scirep_354.pdf, 2004. 6959
- Scinocca, J. F., N. A. McFarlane, M. Lazare, J. Li, et D. Plummer. 2008. Technical Note : The CCCma third generation AGCM and its extension into the middle atmosphere, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(23), 7055–7074.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. Averyt, M. Tignor, and H. Miller (Eds.) (2007), *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Stampfli, N., R. Beaulieu, I. Breune et M. Guillou. 2007. Évaluation des débits de pointe pour les petits bassins versants agricoles du Québec, Fiche technique produite en partenariat entre Agriculture et Agroalimentaire Canada et le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec, 6 p. Site Internet : www.agrireseau.gc.ca/agroenvironnement/documents/Evaluation%20des%20debits%20de%20pointe_AAC2007.pdf
- Tabi, M., L. Tardif, D. Carrier, G. Laflamme et M. Rompré, 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. Entente auxiliaire Canada-Québec. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.
- Trenberth, K. et al. 2007. *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, chap. Observations : Surface and Atmospheric Climate Change, in *Solomon et al.* (2007b).
- Uppala, S. M. et al. 2005. The era-40 re-analysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131, 2961–3012, doi :10.1256/qj.04.176.
- USDA-NRCS. 2007. Hydrologic Soil Group. Dans : *National Engineering Handbook*, title 210-VI-NEH. Part 630, chapter 7. Disponible à l'adresse : <http://directives.sc.egov.usda.gov/>

- USDA-SCS. 1986. Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release 55, United States Department of Agriculture - Soil Conservation Service, 156 pp.
- Valéry, A. 2010. Modélisation précipitations-débit sous influence nivale, élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. Thèse de doctorat, ENGREF, Cemagref, Paris, 405 p.
- Wallis J.R., M.G. Schaefer, B.L. Barker et G.H. Taylor. 2007. Regional precipitation-frequency analysis and spatial mapping for 24-hour and 2-hour durations for Washington State. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11(1) : 415-442.
- Winchell, M., D. Meals, S. Folle, J. Moore, D. Braun, C. DeLeo et K. Budreski. 2011. Identification of critical sources areas of phosphorus within the Vermont sector of the Missisquoi bay basin. Final report. Stone Environmental Inc. Lake Champlain Basin Program. 158 pages plus annexes.

37 Annexes

37.1 Annexe 1. Méthodologie développée pour l'estimation des apports verticaux extrêmes en climat futur

La méthode développée pour estimer les impacts des changements climatiques sur les extrêmes des apports verticaux reprend de façon générale la démarche d'analyse des extrêmes de précipitations en climat futur développée dans le cadre du même projet. Puisque les données du MRCC ne contiennent pas de données manquantes, il va de soi que les critères d'années valides ne sont pas nécessaires. Cependant, des post-traitements doivent être réalisés avant de les fournir au modèle de fonte. D'une part, il y a une différence importante entre l'échelle locale sur laquelle les résultats du modèle de fonte sont utilisés et validés, et celle des données du MRCC, typiquement associées à des tuiles de 45 par 45 km. D'autre part, les données du MRCC ont certains biais, même par rapport à des observations à échelle semblable.

Le post-traitement des données du MRCC s'est appuyé sur les observations provenant des stations météorologiques. Les données de simulations du MRCC sont tirées des mêmes simulations en climat récent (1971-2000) et futur (2041-2070) que celles utilisées dans le volet du projet portant sur les extrêmes de précipitations en climat futur (Huard, 2011). Toutes ces simulations utilisent la version 4.2.3 du MRCC et les données sont disponibles pour tout le Québec sur des tuiles d'une résolution horizontale de 45 km. Le tableau 4 présenté dans la section 4.2 du présent rapport résume les modèles pilotes, scénarios et noms de code (alias) des différentes simulations utilisées. Les données brutes du MRCC sont exprimées selon un intervalle de 6h. Elles sont ainsi cumulées sur une base quotidienne afin de permettre les comparaisons avec les observations des stations météorologiques. La frontière séparant les journées pour ces statistiques quotidiennes est fixée à 12 :00h GMT afin de se rapprocher le plus possible du 8 :00h local qui sépare les journées pour les stations. Les données quotidiennes utilisées en intrants pour les différentes simulations incluent dès lors :

- la température moyenne à une élévation de 2 m;
- la température maximum à une élévation 2 m;
- la température minimum à une élévation 2 m;
- la précipitation totale (cumul neige et pluie);

Les données aux stations proviennent du MDDEFP, et ont été mises en forme en fichiers MATLAB (MathWorks, 2006) par l'équipe de l'INRS-ETE. Les stations sont réparties selon les même quatre régions retenues dans le volet d'étude sur l'intensité des précipitations, soit la vallée du St-Laurent, l'Abitibi-Témiscamingue, le Saguenay – Lac St-Jean et la Gaspésie (figure 8) avec un nombre de stations variant entre 25 et 39 par région. Pour chacune de ces stations, les séries de données quotidiennes incluent les variables suivantes :

- Température minimum
- Température maximum
- Précipitation totale
- Précipitation sous forme de pluie
- Précipitation sous forme de neige
- Neige au sol

Les fichiers de données contiennent également un indice qui estime la validité des valeurs quotidiennes de toutes les variables.

Tableau 41. Code de statut des valeurs quotidiennes des stations météorologiques du MDDEFP

Code	Nom	Signification
1	Correct	Valeur qui a satisfait toutes les exigences du contrôle de qualité. Dans le cas d'une donnée transformée, indique également que toutes les données nécessaires au calcul de la valeur étaient disponibles et de statut « Correct », « Estimé » ou « Forcé ».
2	Douteux	Valeur qui n'a pas rempli au moins un critère de validation.
3	Estimé	Valeur estimée par les algorithmes définis dans le système ou par le personnel affecté à la validation.
4	Incomplet	Valeur calculée avec une partie seulement des données normalement nécessaires.
5	Forcé	Valeur qui ne remplissait pas tous les critères initialement mais confirmée valide par l'observateur ou le personnel affecté à la validation.
6	Cumulé	Valeur qui représente un cumul sur une période plus grande que l'intervalle normal entre deux valeurs successives.
7	Trace	Indique une hauteur de précipitation supérieure à zéro mais inférieure au seuil de détection de l'instrument de mesure.
8	Inconnu	Indique une hauteur de précipitation confirmée supérieure à zéro mais dont la valeur réelle n'est pas connue.

Une vérification a été réalisée pour chaque station afin de s'assurer qu'elle puisse être utilisée pour faire le post-traitement du MRCC. Ainsi, pour chaque station, seules les données valides ont été retenues. Pour qu'une donnée quotidienne soit jugée valide, il faut que l'indice de validité (tableau 7) soit parmi les valeurs 1, 3 et 5 pour les variables de température minimum, de température maximum et de précipitations totales simultanément, ce qui correspond à des données jugées respectivement « correctes », « estimées » et « forcées » selon le MDDEFP. De plus, pour qu'une station puisse être utilisée il faut que ses données quotidiennes respectent les critères suivants :

- La dernière année doit être plus grande que 1990;
- La série doit avoir une durée d'au moins 15 ans;
- La fraction de données manquantes entre novembre et avril doit être inférieure à 20 %.

Ces critères ont été élaborés afin de s'assurer d'une certaine compatibilité avec la série de données quotidiennes des simulations qui couvre, de manière continue, la période 1971-2000. L'application de ces critères élimine environ 32 % des stations. Le tableau 8 présente le nombre total de stations et le nombre de stations valides pour les différentes régions.

Tableau 42. Stations utilisées pour le post-traitement des données du MRCC.

Région	Nombre total de stations	Nombre de stations valides
Gaspésie	25	18
Abitibi	25	13
Saguenay	25	17
Vallée du Saint-Laurent	39	29

Le post-traitement des variables d'intérêt des simulations est supporté par deux méthodes. La « méthode de correction de biais » consiste à corriger le biais d'une simulation par rapport aux observations. Les séries temporelles tirées des simulations et des observations sont d'abord comparées en climat récent, en assumant que les deux séries sont dans des climats comparables (c'est-à-dire qu'il n'y a pas de changements climatiques). Les biais sont calculés sur une base mensuelle en divisant les différentes valeurs en un certain nombre d'intervalle de quantiles pour chaque mois. Dans le cadre de cette étude, 20 intervalles de quantile ont été utilisés. Le résultat est donc une série de 20 valeurs pour chaque mois. Notons que ces valeurs représentent un biais additif ou multiplicatif. Pour le cas du biais de température minimum par exemple, la valeur de l'intervalle 1 du mois de mai est associée au biais à corriger pour 5 % des valeurs les plus froides de ce mois. Les valeurs de biais ainsi calculées peuvent ensuite être utilisées pour corriger la simulation en climat récent ou futur.

La « méthode des deltas » consiste pour sa part à appliquer un changement climatique, un delta, aux observations météorologiques. La série quotidienne d'une variable pour une simulation en climat futur est dès lors comparée avec la série correspondante en climat récent. Comme pour la méthode de correction de biais, cette comparaison est faite sur une base mensuelle avec 20 intervalles de quantiles. On obtient donc 20 valeurs par mois qui représentent l'effet du changement climatique pour cette variable pour chaque quantile. Ainsi, par exemple, pour la précipitation (avec laquelle on utilise des valeurs multiplicatives), la valeur du 3^e intervalle du mois de janvier représente la valeur par laquelle il faut multiplier la précipitation en climat récent pour les quantiles 10-15 % afin de représenter l'effet du changement climatique. Ces valeurs de changement climatique, qu'on appelle souvent deltas, sont ensuite appliquées aux observations afin de fournir une série de valeurs quotidiennes en climat futur.

Les deux méthodes ont été utilisées dans ce projet pour chaque station valide et pour chaque simulation. Notons que la méthode de correction de biais permet de fournir des séries temporelles en climat récent et futur pour chaque simulation alors que la méthode des deltas permet uniquement de fournir des séries en climat futur (la série en climat récent correspondant aux observations). Aussi, la méthode des deltas fournit une série de données en climat futur pour un certain horizon (c'est-à-dire un nombre d'années dans le futur). Ceci implique que si des séries temporelles de différentes stations ont des dates de départ différentes en climat récent, cette différence de date se retrouvera également dans les données en climat futur. Avec la méthode des deltas, les données manquantes dans les séries temporelles des différentes stations en climat récent seront également reproduites dans les séries futures. Finalement, la variabilité des stations en climat récent sera reproduite en climat futur pour les données produites avec la méthode des deltas. Pour les données en climats récent et futur produites avec la méthode de correction de biais, la variabilité peut différer de celle des observations. Ainsi, un changement de variabilité dû au changement

climatique est possible avec les données de la méthode de correction de biais mais ne l'est pas avec la méthode des deltas.

Le post-traitement des données du MRCC est fait à partir des données quotidiennes des différentes simulations et des stations valides pour les variables de température minimum, température maximum et précipitation totale. Pour chaque combinaison de stations valides et de simulations, la tuile du MRCC la plus près est identifiée, d'où est extrait la série de données quotidiennes des différentes variables. Le post-traitement des variables d'intérêt selon les méthodes des biais et des delta est alors effectué sur les séries de données observées et simulées.

Notons que les simulations utilisant différents membres d'une même simulation de MCG (c'est-à-dire les simulations aet et aev en climat récent et les simulations aeu et aew en climat futur – voir tableau 4) sont jointes de manière à ne former qu'une seule simulation en climat récent et une seule simulation en climat futur lors des calculs des biais et du delta. Ainsi, le même biais est utilisé pour corriger les simulations aet, aev, aeu et aew. Toutes ces simulations produisent également une seule valeur de delta pour la méthode des deltas. Cette approche est retenue afin de ne pas tenir compte de la variabilité interne du MCG dans le calcul des biais et des deltas, et qui correspond à la variabilité naturelle du climat.

L'application directe de la méthode de correction des biais et de la méthode des deltas aux températures minimales et maximales peut générer des séries temporelles avec des incohérences (c'est-à-dire des cas où la température minimale générée est plus grande que la température maximale). Afin d'éviter ce problème, l'écart diurne de température à partir des séries quotidiennes de températures minimales et maximales a été calculé. Ensuite, les méthodes de correction de biais et des deltas ont été utilisées pour traiter ces séries d'écart diurnes. Finalement, des séries quotidiennes de températures maximums ont été recrées en utilisant les séries de températures minimales et d'écart diurnes. Cela a permis d'obtenir des séries cohérentes de températures minimales et maximales.

De plus, une partition entre la pluie et la neige est réalisée pour les différentes séries quotidiennes, que ces séries proviennent directement du MRCC ou qu'elles soient post-traitées avec les méthodes discutées précédemment. Pour chaque jour, on calcule la température moyenne en faisant la moyenne des températures minimales et maximales. On utilise ensuite cette température moyenne pour partitionner la précipitation en pluie et neige avec une relation linéaire selon l'équation suivante (fournie par Robert Lagacé de l'Université Laval):

$$\alpha = \frac{t_{moy} - (t_{ref} - \Delta t)}{2\Delta t} \quad [7]$$

où α est la fraction des précipitations sous forme de neige, t_{moy} est la température moyenne, t_{ref} une température de référence, Δt est un intervalle de température. Notons qu'on borne α entre 0 et 1 suite à l'application de l'équation (8) et que les valeurs de t_{ref} et Δt sont fixées à 0 et 2 ° Celsius respectivement dans le cadre de ce projet.

37.2 ANNEXE 2. Compte-rendu de l'atelier sur la conception d'ouvrages hydrauliques en milieu agricole

Compte-rendu de l'atelier sur la conception d'ouvrages hydrauliques en milieu agricole, Projet de Mise à jour des normes et procédures de conception d'ouvrages hydrauliques en milieu rural dans un contexte de changements climatiques, 4 décembre 2012, Drummondville.

Ordre du jour

- Accueil
- Présentation du projet OURANOS (A. Michaud)
- Volet Météo et climat (A. Drouin)
 - Courbes IDF climat récent et futur
 - Indices de fonte et pluie hivernale en climat récent et futur
- Groupes hydrologiques et Base de données hydro-pédologiques (G. Gagné)
- Analyse Hydrologique (R. Lagacé et A. Michaud)
 - Réseau des 11 bassins versants à l'étude
 - VisuHydro
 - Hydrogrammes analysés
 - Ruissellement
 - Temps de montée et temps de concentration
 - Paramètres de forme de l'hydrogramme
 - Débits de crue
 - Validation de la méthode Laval-IRDA
- Logiciel QmaxPBV (R. Lagacé)
- Etudes de cas (R. Lagacé)
 - Aménagement hydro-agricole au champ (Cas OAQ)
 - Aménagement en cours d'eau
- Discussion et commentaires (tous)

Présences :

Alexandre Arel (MAPAQ), Émilie Beaudoin (MAPAQ), Yves Bédard (MAPAQ), Hélène Bernard (MAPAQ), Anne Blondlot (Ouranos), Chloé Boucher Ravenhorst (Comité de bassin versant de la rivière Tomifobia), Michel Cartier (MAPAQ), François Chrétien (AAC), Ariane Drouin (IRDA), Mustapha Eddib (MAPAQ), Alain Gagnon (MAPAQ), Gerardo Gollo Gil (MAPAQ), Mikael Guillou (MAPAQ), Robert Lagacé (ULaval), Aubert Michaud (IRDA), Christian Poirier (MTQ), Ghislain Poisson (MAPAQ), Régis Potvin (MAPAQ), Nestor-Raul Rocha (ULaval), Victor Savoie (MAPAQ).

Accueil

- Mikael Guillou présente le but et le déroulement de la journée.
- Un tour de table est réalisé afin de connaître les intervenants présents à l'atelier
- Aubert Michaud fait une présentation du projet de Mise à jour des normes et procédures de conception d'ouvrages hydrauliques en milieu rural dans un contexte de changements climatiques. Il explique le contexte et les différents volets du projet : météorologique, scénarios climatiques, redoux hivernaux, hydrologique (incluant la classification hydro-pédologique des sols), et enfin le volet opérationnel. Il décrit plus en détails les présentations qui auront lieu au cours de la journée.
- Les présentations de même que le compte-rendu de la journée seront disponibles en ligne.

Courbes IDF

- Ariane Drouin présente le travail d'Alain Mailhot et Guillaume Talbot (INRS-ÉTÉ) sur la mise à jour des courbes de distribution des Intensités- Durées- Fréquences de précipitations (IDF). Ariane Drouin présente brièvement la méthodologie utilisée ainsi que les résultats obtenus. Les différences entre ces courbes et celles disponibles sur le site d'Environnement Canada sont expliquées. Elle présente également la façon de télécharger les données via le site de l'Atlas agroclimatique du Québec (Agrométéo.org).
- Une demande est formulée par Émilie Beaudoin concernant l'obtention d'information supplémentaires sur les stations, incluant notamment l'élévation de celles-ci afin de choisir celle la plus représentative du site à l'étude.

Indices de redoux hivernaux

- Ariane présente également l'indice de redoux hivernal développé dans le cadre de ce projet par l'équipe de l'IRDA en collaboration avec l'INRS et Ouranos. Les résultats présentés sont comparables dans leur forme aux IDF. En effet, les apports verticaux (cumul de la fonte et de la pluie hivernale) sont représentés sous forme d'HDF (Hauteurs-Durées-Fréquences) mais avec une seule durée de 24 heures compte tenu de la disponibilité unique de données journalières de température et de précipitations en période hivernales.

Volet hydrologique

- Aubert Michaud présente le volet hydrologique du projet, c'est-à-dire la démarche mise de l'avant dans l'analyse hydrologique des suivis hydrométriques des onze bassins mis à profit dans l'étude, de même que dans le développement des méthodes de prédiction des paramètres hydrologiques. Il présente les bassins versants à l'étude et expose les méthodes de suivi hydrométrique. Il insiste sur l'important volume de données hydrométriques à traiter considérant qu'il y a en moyenne onze crues estivales par année par bassin, justifiant ainsi le développement du logiciel VisuHydro.

VisuHydro

- Robert Lagacé enchaîne en présentant le logiciel VisuHydro qu'il a développé pour permettre un traitement plus rapide et facile des données hydrométriques et des hydrogrammes de crue. Il fait une démonstration interactive de la façon d'utiliser ce logiciel et des possibilités qu'il offre : déplacement dans les données, marquage du début et de la fin des événements et du ruissellement, calcul automatique des paramètres hydrologiques, séparation des hydrogrammes, identification des types de pluie et d'hydrogrammes, etc. De plus, les données en format .txt ou .xls peuvent être importées par le logiciel.
- Robert Lagacé présente également le calcul de la fonction Gamma qui représente la forme de l'hydrogramme.

Hauteur de ruissellement

- Aubert Michaud présente plus en détails les calculs des hauteurs de ruissellement. Onze bassins versants pour un total de 400 hydrogrammes estivaux ont été étudiés. La méthode repose sur la réalisation d'analyses de covariance (ANCOVA) entre les hauteurs de ruissellement et les précipitations en covariable. Plusieurs modèles ont été créés, incluant des modèles locaux (un modèle pour chaque bassin à l'étude), des modèles régionaux (deux régions : la Montérégie et les Appalaches), et un modèle global pour tous les bassins à l'étude. En Montérégie, on note une certaine cohérence entre les hauteurs de ruissellement et les CN (effet de l'utilisation du sol et du groupe hydrologique), toutefois pour les Appalaches, il est impossible de faire un lien entre ceux-ci. Plusieurs propositions sont faites pour identifier d'autres facteurs pouvant affecter les hauteurs de ruissellement, incluant l'épaisseur du sol, le taux de drainage souterrain, l'égouttement de surface (planches), la compaction, l'influence du relief sur la saturation du sol, etc.
- Christian Poirier propose que la méthode fonctionne peut-être mieux qu'on le pense et qu'il serait peut-être bon de considérer seulement les événements extrêmes et non tous les hydrogrammes.

- Robert Lagacé présente ensuite la comparaison pour certains bassins étudiés des résultats obtenus par les modèles statistiques avec les équations connues du SCS et de Monfet. Il présente la prédiction du modèle ainsi que le concept de courbe enveloppe développée dans le cadre du projet. En bref, l'équation du SCS performe bien quand les précipitations sont importantes tandis que Monfet surestime de façon générale.
- Les personnes présentes démontrent un intérêt de voir aussi les résultats de la méthode Aéroport utilisée par le MTQ, laquelle méthode a été validée sur le terrain. De plus, il serait intéressant de voir les résultats de cette méthode sur de plus petits bassins versants, Mikael mentionnant qu'elle surestime les débits pour de très petits bassins versants.

Temps de montée et temps de concentration

- Robert Lagacé présente cette section. Pour les calculs des temps de montée et de concentration 120 hydrogrammes simples ont été utilisés. Les temps de montée des bassins étudiés varient entre 3 et 10 heures et les coefficients de variation sont très élevés lorsqu'il y a peu d'événements d'étudiés. Des comparaisons avec le bassin Cloutier de Mikael sont réalisées. Notons toutefois qu'il est important d'utiliser la même gamme de pluie pour comparer des bassins car le type de pluie et le type d'hydrogrammes ont un impact sur le temps de montée.
- Robert présente également les ratios entre les méthodes et équations existantes et les données observées sur les bassins à l'étude. Il présente du fait même les superficies, les longueurs d'écoulement, les pentes et les CN des bassins à l'étude. Toutefois, les pentes des bassins à l'étude devront être revues.

Groupes hydrologiques

- Ariane Drouin présente brièvement les travaux réalisés sur la classification des 711 séries de sol du Québec selon leur groupe hydrologique. La banque de données hydro-pédologiques permet la classification de l'ensemble des unités cartographiques (polygones SIG) de tous les rapports pédologiques du Québec. L'indice d'érodabilité du sol est également intégré à la banque de données. Les personnes présentes se montrent intéressées par la base de données. Et, il est conclu que dans le logiciel final QmaxPBV, une pré-sélection des séries de sols sera réalisée en fonction des régions administratives et des études pédologiques.

Estimation des paramètres de forme

- Robert présente le coefficient de forme qui a été déterminé dans le cadre de la présente étude (0,73). Il y aura un seul coefficient pour tous les bassins à l'étude. Notons par ailleurs que ce coefficient est comparable à celui de la méthode du SCS de l'hydrogramme unitaire qui est de 0,75.

Prédiction des débits de pointe (Qmax)

- Robert Lagacé présente l'équation pour calculer les débits de pointe qui est fonction de la courbe IDF pour la récurrence sélectionné, du temps de montée, du coefficient de forme et de la hauteur de ruissellement prédite pour la même récurrence. Il est souligné que la courbe moyenne de prédiction de ruissellement n'est pas mise à profit, mais plutôt la courbe enveloppe qui représentent davantage les événements extrêmes.

Validation des débits de pointe

- Robert Lagacé présente la combinaison des paramètres permettant de prédire les débits maximums. Les modèles régionaux sont utilisés. François Chrétien fait remarquer qu'il faut porter attention aux récurrences des événements mis à profit dans les prédictions du ruissellement. Une récurrence de 5 ans par exemple correspond peut-être à des récurrences de 100 ans dans la réalité. Notons également que les débits de récurrence 5 ans n'égal pas nécessairement les précipitations de récurrence 5 ans.

Présentation de l'utilitaire QmaxPBV

- Robert Lagacé présente l'utilitaire qu'il a développé en faisant une démonstration interactive de celui-ci. Dans l'utilitaire, plusieurs méthodes classiques pour calculer les temps de concentration et les hauteurs de

ruissellement sont programmées en plus des méthodes développées dans le cadre du présent projet. Il est donc possible de réaliser différentes prédictions suivant un assemblage de différentes méthodes d'estimation des paramètres hydrologiques. Robert Lagacé mentionne que le module de calcul est terminé mais qu'il reste à terminer l'interface graphique.

- Alain Gagnon mentionne qu'il serait intéressant et utile d'avoir des images illustrant les différents concepts utilisés (ex : dessin d'un parcours de l'eau). Il demande également s'il y aura un QmaxTPBV (très petits bassins versants).

DISCUSSION :

Installation du logiciel sur les ordinateurs du MAPAQ

- Des discussions ont eu lieu entre Robert Lagacé, Mikael Guillou et les informaticiens du MAPAQ concernant l'installation de QmaxPBV sur les ordinateurs des employés du MAPAQ. Les informaticiens ne sont pas très ouverts pour l'instant à l'installation de la version Python de l'utilitaire compte tenu des possibilités de programmation qu'il est possible de faire avec ce logiciel.
- Les possibilités sont :
 - Rendre disponible le code source
 - Faire une version auto-installable de l'utilitaire
 - Fournir un fichier précompilé de python qui limite la programmation supplémentaire
 - Donner le logiciel aux informaticiens du MAPAQ pour qu'ils le gèrent eux-même
 - Rajouter QmaxPBV à HecHMS, logiciel accepté par le MAPAQ
 - Installer l'utilitaire sur un ordinateur personnel

Autres

- Les personnes présentes à l'atelier peuvent faire parvenir leurs questions ou commentaires à la fois à Mikael Guillou et à Aubert Michaud
- Mikael Guillou demande s'il y a un intérêt à ce que les résultats de ce projet soient présentés lors de journée spéciales, colloques particuliers.
- Anne Blondlot demande s'il y aura des tests de l'utilitaire par les usagers.
- Aubert demande des retours des personnes présentes sur : 1) les méthodes présentées, 2) le caractère applicable/utile des développements
- Alain Gagnon mentionne que l'objectif principal était d'avoir des observations du Québec afin de voir la correspondance entre les formules utilisées et la réalité. Il mentionne également l'importance qu'il y ait une interface graphique simple d'utilisation. Il dit présentement utiliser des feuilles de calcul Excel auto-développée et serait heureux d'utiliser quelque chose d'autre s'il y a quelque chose de mieux. Enfin, il démontre un intérêt pour que la méthode du MTQ soit intégrée aux prochains travaux pour valider cette approche sur de petits bassins versants puisqu'elle n'a pas été créée pour ça.
- Émilie Beaudoin mentionne également qu'elle n'a pas pour l'instant de logiciel à utiliser et donc l'utilitaire développé serait utile.
- Mikael Guillou mentionne l'importance d'utiliser des outils plus intégrés tels que présentés ici. Le logiciel HEC-HMS permet par exemple de supporter les calculs hydrauliques et le design des ouvrages. L'effet d'un bassin sur le rabattement de débit, l'étalement de l'hydrogramme, ou l'élévation de l'eau au cours du temps sont ainsi produits. Il est souligné qu'il est pertinent que l'on puisse voir l'effet des modifications aux structures sur les hydrogrammes, intégrer les effets cumulatifs, le temps de décalage, etc. En amont, le plus important est de savoir si la bonne méthode de calcul hydrologique est utilisée.
- Victor Savoie mentionne que la prochaine étape concernerait la mise en place de structures de rétention /sédimentation et leurs effets sur la circulation de l'eau et les hydrogrammes.
- Robert Lagacé mentionne que le code source pourrait être modifié par la communauté de développeur. Les gens sur place s'entendent par contre pour dire qu'ils n'ont pas les capacités pour programmer de nouveaux outils dans le logiciel.

- Ghislain Poisson mentionne son intérêt pour le défrichage et le développement d'une meilleure façon de faire qui a été mise de l'avant par ce projet. Il se demande également comment intégrer les changements climatiques.
- François Chrétien mentionne également son intérêt pour que QmaxPBV soit intégré à HecHMS.
- Christian Poirier mentionne que le projet est fort intéressant car bien que les méthodes du MTQ aient été validées sur le terrain, elles n'ont pas fait l'objet d'une validation scientifique. Il mentionne qu'ils travaillent présentement dans la modélisation des étangs et qu'ils ont un intérêt pour les méthodes développées même si le MTQ n'a pas les mêmes objectifs. Par ailleurs, le MTQ planifie d'intégrer mettre leur méthode de dimensionnement des ponceaux dans ArcGIS.

À titre de conclusion, Aubert mentionne que le calage et le développement des méthodes de prédiction des hauteurs de ruissellement pourra se poursuivre en intégrant les suivis hydrométriques d'autres bassins versants à l'étude (observatoire IRDA/MAPAQ), de même que des suivis à l'échelle parcellaire du MAPAQ. Le recours au signal de conductivité électrique, utilisé depuis 2003 à l'IRDA dans la séparation des hydrogrammes (16 bassins) pourra fournir de meilleures estimations de ruissellement et raffiner les méthodes à l'étude. De façon complémentaire, l'étude du signal de turbidité aux exutoires des mêmes dispositifs est appelé à servir de balises dans le développement et la validation de méthodes de prédiction de l'érosion adaptées au contexte du Québec, et cohérentes avec les prédictions des taux de ruissellement de surface.

37.3 ANNEXE 3. Tableaux de données et résultats complémentaires.

Tableau 43. Informations sur les stations météorologiques utilisées dans le volet redoux hivernaux (Partie 1)

Numéro de station	Nom de station	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Année de début	Année de fin
7010720	Berthierville	46,03	-73,18	12	1919	1995
7012071	Donnacona-2	46,69	-71,74	49	1952	2007
7013360	Joliette	46,03	-73,43	59	1913	1971
7014290	Les Cèdres	45,34	-74,06	45	1913	2010
7015730	Oka	45,50	-74,09	114	1937	2010
7016280	Québec	46,80	-71,24	56	1900	1958
7016800	Saint-Alban	46,71	-72,08	74	1949	2010
7016840	Sainte-Anne-de-la-Pérade	46,59	-72,23	18	1949	2010
7017080	Saint-Côme	46,28	-73,83	284	1950	2010
7017100	Saint-Donat	46,30	-74,19	390	1938	2010
7017480	Saint-Lin-des-Laurentides	45,85	-73,76	64	1913	1980
7017760	Saint-Tite	46,73	-72,56	142	1920	1984
7018000	Shawinigan	46,54	-72,71	124	1902	2010
7020560	Beauceville	46,21	-70,78	160	1913	1984
7020840	Brome	45,19	-72,56	206	1900	2010
7020860	Bromptonville	45,49	-71,96	145	1957	2010
7021840	Coaticook	45,17	-71,82	358	1949	2010
7022000	Disraeli	45,91	-71,41	350	1908	1990
7022160	Drummondville	45,88	-72,47	76	1913	2010
7022280	East-Angus	45,48	-71,66	191	1919	1984
7022320	Farnham	45,29	-72,90	68	1917	2010
7022800	Granby	45,39	-72,71	175	1948	2010
7023240	Huntingdon	45,08	-74,18	49	1913	2007
7023270	Iberville	45,34	-73,26	33	1941	2010
7023677	Lac-Mégantic-2	45,59	-70,89	457	1919	2010
7024000	Lambton	45,83	-71,08	366	1915	1993
7024250	Laurierville	46,33	-71,67	152	1937	2010
7024400	Macdonald-College	45,42	-73,93	27	1906	1975
7024440	Magog	45,26	-72,05	251	1948	2010
7024920	Milan	45,59	-71,03	533	1949	2010
7025280	Montréal-McGill	45,51	-73,59	57	1900	1992
7025440	Nicolet	46,18	-72,61	30	1913	2010
7026040	Philipsburg	45,10	-73,04	65	1950	2010
7027040	Sainte-Clothilde-CDA	45,17	-73,68	56	1937	1989
7027200	Saint-Éphrem	46,06	-70,96	322	1929	2010
7027280	Sainte-Geneviève	45,49	-73,86	23	1952	2010
7027520	Saint-Malo-d'Auckland	45,20	-71,56	436	1949	2010
7027540	Sainte-Martine	45,20	-73,71	59	1940	2010
7027750	Saint-Théophile	45,92	-70,54	435	1950	2010
7027840	Scott	46,50	-71,08	157	1950	2010
7028120	Sherbrooke	45,40	-71,90	181	1900	1971
7028200	Sorel	46,03	-73,12	15	1914	2010
7028680	Valleyfield	45,28	-74,10	46	1952	2010
7031360	Chelsea	45,50	-75,79	115	1927	2010
7033160	Huberdeau	45,98	-74,64	213	1913	1979
7033650	Lachute	45,65	-74,33	91	1958	2010
7034481	Maniwaki-2	46,38	-75,98	174	1913	1974
7035520	Nominigüe	46,39	-75,08	320	1913	2010
7035680	Notre-Dame-du-Laus	46,12	-75,63	213	1929	1990

Tableau 44. Informations sur les stations météorologiques utilisées dans le volet redoux hivernaux (Partie 2)

Numéro de station	Nom de station	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Année de début	Année de fin
7036855	Sainte-Anne-du-Lac	46,86	-75,33	260	1937	2010
7037400	Saint-Jérôme	45,81	-74,04	169	1932	2010
7040446	Baie-Saint-Paul	47,42	-70,51	32	1945	2010
7042840	Grandes-Bergeronnes	48,25	-69,52	61	1951	2010
7043000	Harrington-Harbour	50,53	-59,50	8	1911	1977
7043960	La Malbaie	47,68	-70,18	13	1913	2010
7046010	Petit-Saguenay	48,18	-70,05	122	1955	2010
7047250	Saint-Féréol	47,12	-70,82	229	1915	1982
7047770	Saint-Urbain	47,57	-70,55	110	1957	2010
7048320	Tadoussac	48,15	-69,71	53	1913	2010
7050200	Anticosti-Pointe-Sud-Ouest	49,42	-63,58	9	1900	1953
7050240	Armagh	46,75	-70,53	358	1916	1993
7051120	Caplan	48,11	-65,69	33	1947	2010
7051200	Causapsal	48,37	-67,24	172	1913	2010
7052600	Gaspé	48,83	-64,48	26	1915	1984
7052865	Grande-Vallée	49,18	-65,17	8	1940	2010
7054095	La-Pocatière-CDA	47,35	-70,03	31	1919	1995
7055200	Mont-Louis	49,22	-65,72	15	1933	1993
7055675	Notre-Dame-du-Lac	47,64	-68,84	255	1947	2010
7056067	Pointe-Au-Père	48,52	-68,47	8	1900	1981
7056120	Port-Daniel	48,15	-64,99	74	1927	2010
7056480	Rimouski	48,45	-68,51	36	1927	2010
7056600	Rivière-Bleue	47,43	-69,03	213	1950	2010
7056814	Saint-Alexis-de-Matapédia	47,98	-67,06	297	1927	2010
7056850	Sainte-Anne-des-Monts	49,13	-66,47	21	1937	2010
7057160	Saint-Elzéar-de-Bonaventure	48,18	-65,40	213	1948	2010
7057287	Sainte-Germaine	46,43	-70,50	497	1945	2010
7057304	Saint-Guy	48,01	-68,77	320	1940	2010
7057395	Saint-Jean-de-Cherbourg	48,84	-67,17	335	1939	2010
7057600	Saint-Pamphile	46,99	-69,77	366	1950	2010
7057720	Sainte-Rose-du-Dégelis	47,56	-68,64	151	1932	2010
7058520	Trinité-des-Monts	48,14	-68,48	270	1950	2010
7058560	Trois-Pistoles	48,15	-69,13	50	1951	2010
7060080	Albanel	48,88	-72,45	152	1922	1991
7060320	Arvida	48,43	-71,17	102	1931	1988
7061440	Chicoutimi	48,43	-71,08	15	1900	1978
7063320	Isle-Maligne	48,58	-71,63	76	1924	1992
7063400	Kénogami	48,42	-71,25	116	1916	1971
7063560	Lac-Bouchette	48,28	-72,17	358	1949	2010
7063690	Lac-Sainte-Croix	48,42	-71,75	157	1958	2010
7065640	Normandin-Cda	48,85	-72,53	137	1936	1991
7065960	Péribonca	48,81	-71,98	113	1951	2010
7066820	Saint-Ambroise	48,57	-71,34	128	1954	2010
7067460	Saint-Léon-de-Labrecque	48,67	-71,52	131	1940	2010
7070454	Barrage-Gouin	48,35	-74,10	404	1913	1981
7074240	La Tuque	47,41	-72,78	168	1911	2010
7080600	Belleterre	47,39	-78,71	320	1951	2010
7086460	Rémigny	47,71	-79,23	291	1943	2010
7088760	Ville-Marie	47,35	-79,44	215	1913	2010
7090120	Amos	48,57	-78,13	310	1913	1999
7095000	Mistassini-Post	50,41	-73,88	380	1900	1979

Tableau 45. Informations sur l'homogénéité des séries de données les stations météorologiques utilisées dans le volet redoux hivernaux (Partie 1)

Numéro de station	Nom de station	Homogénéité				
		1 Jour	1* Jours	3 Jours	4 Jours	5 Jours
7010720	Berthierville	1	1	1	1	1
7012071	Donnacona-2	1	1	1	1	1
7013360	Joliette	1	1	1	1	1
7014290	Les Cèdres	1*	1*	1*	1*	1*
7015730	Oka	1	1	1	1	1
7016280	Québec	1	1	1	1	1
7016800	Saint-Alban	1	1	1	1	1
7016840	Sainte-Anne-de-la-Pérade	1*	1	1	1	1
7017080	Saint-Côme	1	1	1	1	1
7017100	Saint-Donat	1	1	1	1	1
7017480	Saint-Lin-des-Laurentides	1	1	1	1	1
7017760	Saint-Tite	1	1	1	1	1
7018000	Shawinigan	1	1	1	1	1
7020560	Beauceville	1	1	1	1	1
7020840	Brome	1*	1*	1	1	1
7020860	Bromptonville	1	1	1*	1*	1*
7021840	Coaticook	1	1	1	1	1
7022000	Disraeli	1	1	1	1	1
7022160	Drummondville	1	1	1	1	1
7022280	East-Angus	1	1	1	1	1
7022320	Farnham	1	1	1	1	1
7022800	Granby	1	1	1	1	1
7023240	Huntingdon	1*	1*	1*	1*	1*
7023270	Iberville	1	1	1	1	1
7023677	Lac-Mégantic-2	1	1	1	1	1
7024000	Lambton	1	1	1	1	1
7024250	Laurierville	1	1	1	1	1
7024400	Macdonald-College	1	1	1	1	1
7024440	Magog	1	1	1	1	1
7024920	Milan	1	1	1	1	1
7025280	Montréal-McGill	1	1*	1*	1*	0
7025440	Nicolet	1*	1*	1*	1*	1*
7026040	Philipsburg	1	1	1	1	1
7027040	Sainte-Clothilde-CDA	1	1	1	1	1
7027200	Saint-Éphrem	1	1	1	1	1
7027280	Sainte-Geneviève	1	1	1	1	1
7027520	Saint-Malo-d'Auckland	1	1	1	1	1
7027540	Sainte-Martine	1	1	1	1	1*
7027750	Saint-Théophile	1	1	1	1	1
7027840	Scott	1	1	1	1	1
7028120	Sherbrooke	1	1	1	1	1
7028200	Sorel	1	1*	1*	1	1
7028680	Valleyfield	1	1	1	1	1
7031360	Chelsea	1	1	1	1	1
7033160	Huberdeau	1	1	1	1	1
7033650	Lachute	1	1	1	1	1
7034481	Maniwaki-2	1	1	1	1	1
7035520	Nomingue	1	1	1	1	1
7035680	Notre-Dame-du-Laus	1*	1*	1*	1*	1*

Note : 1* signifie que la série totale de maximum annuels n'est pas homogène, mais l'est si on ne considère que les 30 dernières années

Tableau 46. Informations sur l'homogénéité des séries de données les stations météorologiques utilisées dans le volet redoux hivernaux (Partie 2)

Numéro de station	Nom de station	Homogénéité				
		1 Jour	1* Jours	3 Jours	4 Jours	5 Jours
7036855	Sainte-Anne-du-Lac	1	1	1	1	1
7037400	Saint-Jérôme	0	1*	1*	1*	1*
7040446	Baie-Saint-Paul	1*	1	1	1	1
7042840	Grandes-Bergeronnes	1*	1	1	1	1
7043000	Harrington-Harbour	1	1	1	1	1
7043960	La Malbaie	1*	1*	1*	1*	1*
7046010	Petit-Saguenay	1*	0	0	0	0
7047250	Saint-Féréol	1	1	1	1	1
7047770	Saint-Urbain	1	1	1	1	1
7048320	Tadoussac	1	1	1	1	1
7050200	Anticosti-Pointe-Sud-Ouest	1	1	1	1	1
7050240	Armagh	1	1	1	1	1
7051120	Caplan	1	1	1	1	1
7051200	Causapscal	1	1	1	1	1
7052600	Gaspé	1	1	1	1	1
7052865	Grande-Vallée	1	1	1	1	1
7054095	La-Pocatière-CDA	1	1*	1*	1*	1*
7055200	Mont-Louis	1	1	1	1	1
7055675	Notre-Dame-du-Lac	1	1	1	1	1
7056067	Pointe-Au-Père	1	1	1	1	1
7056120	Port-Daniel	1*	1*	1*	1*	1*
7056480	Rimouski	1	1	1	1	1
7056600	Rivière-Bleue	1	1	1*	1*	1
7056814	Saint-Alexis-de-Matapédia	1	1	1	1	1
7056850	Sainte-Anne-des-Monts	1	1	1	1	1
7057160	Saint-Elzéar-de-Bonaventure	1	1	1	1	1
7057287	Sainte-Germaine	1	1*	1*	1*	1*
7057304	Saint-Guy	1	1	1	1	1
7057395	Saint-Jean-de-Cherbourg	1	1	1	1	1
7057600	Saint-Pamphile	1	1	1	1	1
7057720	Sainte-Rose-du-Dégelis	1	1	1	1	1
7058520	Trinité-des-Monts	1	1	1	1	1
7058560	Trois-Pistoles	1	1	1	1	1
7060080	Albanel	1	1	1	1	1
7060320	Arvida	1	1	1	1	1
7061440	Chicoutimi	1	1	1	1	1
7063320	Isle-Maligne	1	1	1	1	1
7063400	Kénogami	1	1	1*	1*	1*
7063560	Lac-Bouchette	1	1	1	1	1
7063690	Lac-Sainte-Croix	1	1	1	1	1
7065640	Normandin-Cda	1	1	1	1	1
7065960	Péribonca	1	1	1	1	1
7066820	Saint-Ambroise	1	1	1	1	1
7067460	Saint-Léon-de-Labrecque	1	1	1	1	1
7070454	Barrage-Gouin	1	1	1	1	1
7074240	La Tuque	1	1	1	1	1
7080600	Belleterre	1	1	1*	1	1
7086460	Rémigny	1	1	1	1	1
7088760	Ville-Marie	1	1	1	1	1
7090120	Amos	1	1	1	1	1
7095000	Mistassini-Post	1	1	1	1	1

Note : 1* signifie que la série totale de maximum annuels n'est pas homogène, mais l'est si on ne considère que les 30 dernières années

Tableau 47. Informations sur la stationnarité des séries de données les stations météorologiques utilisées dans le volet redoux hivernaux (Partie 1)

Numéro de station	Nom de station	Stationnarité				
		1 Jour	1* Jours	3 Jours	4 Jours	5 Jours
7010720	Berthierville	1	1	1	1	1
7012071	Donnacona-2	1	1	1	1	1
7013360	Joliette	1	1	1	1	1
7014290	Les Cèdres	1*	1*	1*	1*	1*
7015730	Oka	1	1	1	1	1
7016280	Québec	1	1	1	1	1
7016800	Saint-Alban	1	1	1	1*	1
7016840	Sainte-Anne-de-la-Pérade	1	1	1	1	1
7017080	Saint-Côme	1	1	1	1	1
7017100	Saint-Donat	1	1	1	1	1
7017480	Saint-Lin-des-Laurentides	1	1	1	1	1
7017760	Saint-Tite	1	1	1	1	1
7018000	Shawinigan	1	1	1	1	1
7020560	Beauceville	1	1	1	1	1
7020840	Brome	1*	1*	1	1	1*
7020860	Bromptonville	1	1	1*	1*	1*
7021840	Coaticook	1	1	1	1	1
7022000	Disraeli	1	1	1	1	1
7022160	Drummondville	1	1	1	1	1
7022280	East-Angus	1	1	1	1	1
7022320	Farnham	1	1	1	1	1
7022800	Granby	1	1	1	1	1
7023240	Huntingdon	1	1*	1*	1*	1*
7023270	Iberville	1	1	1	1	1
7023677	Lac-Mégantic-2	1	1	1	1	1
7024000	Lambton	1	1	1	1	1
7024250	Laurierville	1	1	1	1	1
7024400	Macdonald-College	1	1	1	1	1
7024440	Magog	1	1	1	1	1
7024920	Milan	1	1	1	1	1
7025280	Montréal-McGill	1*	1*	1*	1*	0
7025440	Nicolet	1*	1*	1*	1*	1*
7026040	Philipsburg	1	1	1	1	1
7027040	Sainte-Clothilde-CDA	1	1	1	1	1
7027200	Saint-Éphrem	1	1	1	1	1
7027280	Sainte-Geneviève	1	1	1	1	1
7027520	Saint-Malo-dAuckland	1	1	1	1	1
7027540	Sainte-Martine	1	1	1	1	1
7027750	Saint-Théophile	1	1	1	1	1
7027840	Scott	1	1	1	1	1
7028120	Sherbrooke	1	1*	1	1	1
7028200	Sorel	1	1	1	1	1
7028680	Valleyfield	1	1	1	1	1
7031360	Chelsea	1	1	1	1	1
7033160	Huberdeau	1	1	1	1	1
7033650	Lachute	0	1	1	1	1
7034481	Maniwaki-2	1	1	1	1	1
7035520	Nominingue	1	1	1	1	1
7035680	Notre-Dame-du-Laus	1	1	1	1	1

Note : 1* signifie que la série totale de maximum annuels n'est pas stationnaire, mais l'est si on ne considère que les 30 dernières années

Tableau 48. Informations sur la stationnarité des séries de données les stations météorologiques utilisées dans le volet redoux hivernaux (Partie 2)

Numéro de station	Nom de station	Stationnarité				
		1 Jour	1* Jours	3 Jours	4 Jours	5 Jours
7036855	Sainte-Anne-du-Lac	1	1	1	1	1
7037400	Saint-Jérôme	0	1*	1*	1*	1*
7040446	Baie-Saint-Paul	1*	1	1	1	1
7042840	Grandes-Bergeronnes	1*	1	1	1	1
7043000	Harrington-Harbour	1	1	1	1	1
7043960	La Malbaie	1*	1*	1*	1*	1*
7046010	Petit-Saguenay	1*	0	0	0	0
7047250	Saint-Férol	1	1	1	1	1
7047770	Saint-Urbain	1	1	1	1	1
7048320	Tadoussac	1	1	1	1	1
7050200	Anticosti-Pointe-Sud-Ouest	1	1	1	1	1
7050240	Armagh	1	1	1	1	1
7051120	Caplan	1	1	1	1	1
7051200	Causapscal	1	1	1	1	1
7052600	Gaspé	1	1	1	1	1
7052865	Grande-Vallée	1	1	1	1	1
7054095	La-Pocatière-CDA	1	1	1	1	1
7055200	Mont-Louis	1	1	1	1	1
7055675	Notre-Dame-du-Lac	1	1	1	1*	1*
7056067	Pointe-Au-Père	1	1	1	1	1
7056120	Port-Daniel	1*	1*	1*	1*	1*
7056480	Rimouski	1	1	1	1	1
7056600	Rivière-Bleue	1	1	1	1	1
7056814	Saint-Alexis-de-Matapédia	1	1	1	1	1
7056850	Sainte-Anne-des-Monts	1	1	1	1	1
7057160	Saint-Elzéar-de-Bonaventure	1	1	0	1	1
7057287	Sainte-Germaine	1*	1*	1*	1*	1*
7057304	Saint-Guy	1	1	1	1	1
7057395	Saint-Jean-de-Cherbourg	1	1	1	1	1
7057600	Saint-Pamphile	1	1*	1*	1*	0
7057720	Sainte-Rose-du-Dégelis	1	1	1	1	1
7058520	Trinité-des-Monts	1	1	1	1	1
7058560	Trois-Pistoles	1	1	1	1	1
7060080	Albanel	1	1	1	1*	1*
7060320	Arvida	1	1	1	1	1*
7061440	Chicoutimi	1	1	1	1	1
7063320	Isle-Maligne	1*	1*	1*	1*	1
7063400	Kénogami	1	1	1	1*	1*
7063560	Lac-Bouchette	1	1	1	1	1
7063690	Lac-Sainte-Croix	1	1	1	1	1
7065640	Normandin-Cda	1	1	1	1	1
7065960	Péribonca	1	1	1	1	1
7066820	Saint-Ambroise	1	1	1	1	1
7067460	Saint-Léon-de-Labrecque	1	1	1	1	1
7070454	Barrage-Gouin	1	1	1	1	1
7074240	La Tuque	1	1	1	1	1
7080600	Belleterre	1	1	1	1	1
7086460	Rémigny	1	1	1	1	1
7088760	Ville-Marie	1	1	1	1	1
7090120	Amos	1	1	1	1	1
7095000	Mistassini-Post	1	1	1	1	1

Note : 1* signifie que la série totale de maximum annuels n'est pas stationnaire, mais l'est si on ne considère que les 30 dernières années

Tableau 49. Hauteur des événements extrêmes de redoux, en fonction de la durée et du temps de retour (mm) – Durée 1 jour (Partie 1)

Numéro de station	Nom de station	Durée 1 Jour					Nombre d'années valides
		2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	
7010720	Berthierville	39,8	49,9	55,7	60,9	66,8	72
7012071	Donnacona-2	43,4	50,8	54,1	56,5	58,6	55
7013360	Joliette	40,7	52,7	60,2	66,9	75,1	49
7014290	Les Cèdres	35,0	41,8	46,7	51,7	58,6	30
7015730	Oka	43,5	53,3	59,2	64,4	70,6	63
7016280	Québec	48,1	59,0	65,3	70,6	76,6	58
7016800	Saint-Alban	45,8	56,4	61,8	66,1	70,6	61
7016840	Sainte-Anne-de-la-Pérade	43,6	54,7	62,0	69,1	78,2	31
7017080	Saint-Côme	45,4	55,5	61,6	67,1	73,7	52
7017100	Saint-Donat	46,0	55,8	61,3	66,1	71,5	42
7017480	Saint-Lin-des-Laurentides	39,7	49,8	55,8	61,2	67,5	60
7017760	Saint-Tite	43,7	53,7	60,1	66,1	73,6	57
7018000	Shawinigan	42,6	52,9	59,8	66,7	75,7	98
7020560	Beauceville	41,3	51,0	56,3	60,6	65,4	70
7020840	Brome	50,6	63,7	72,9	82,1	94,5	31
7020860	Bromptonville	42,3	52,3	57,8	62,3	67,3	51
7021840	Coaticook	46,4	59,1	66,9	74,1	82,8	58
7022000	Disraeli	45,6	56,5	63,8	70,8	79,9	62
7022160	Drummondville	43,7	56,6	65,3	73,7	84,8	90
7022280	East-Angus	44,8	55,2	61,0	65,8	71,2	43
7022320	Farnham	41,4	52,7	61,0	69,8	82,2	80
7022800	Granby	47,0	58,9	65,9	72,1	79,5	53
7023240	Huntingdon	40,2	49,1	52,9	55,6	58,1	27
7023270	Iberville	41,4	50,9	56,2	60,8	66,0	54
7023677	Lac-Mégantic-2	40,4	55,8	64,7	72,3	81,1	68
7024000	Lambton	47,1	61,9	70,8	78,7	88,2	51
7024250	Laurierville	46,9	59,6	67,3	74,1	82,2	66
7024400	Macdonald-College	41,5	51,7	58,0	63,5	70,2	61
7024440	Magog	43,5	56,1	66,1	77,0	93,5	53
7024920	Milan	54,0	67,5	76,2	84,2	94,3	59
7025280	Montréal-McGill	42,2	50,0	54,7	58,9	63,9	27
7025440	Nicolet	36,1	45,5	52,0	58,3	66,7	30
7026040	Phillipsburg	40,2	51,4	58,2	64,2	71,5	57
7027040	Sainte-Clothilde-CDA	43,2	54,1	60,4	65,8	71,9	52
7027200	Saint-Éphrem	45,2	56,6	62,4	67,0	71,7	63
7027280	Sainte-Genève	41,0	50,6	56,4	61,6	67,7	51
7027520	Saint-Malo-d'Auckland	53,2	67,4	75,4	82,2	89,9	54
7027540	Sainte-Martine	39,0	50,2	56,4	61,7	67,6	69
7027750	Saint-Théophile	39,9	51,3	58,1	64,0	71,0	49
7027840	Scott	42,2	52,3	58,7	64,5	71,7	54
7028120	Sherbrooke	41,2	50,3	55,4	59,7	64,5	68
7028200	Sorel	42,7	53,8	60,4	66,1	72,8	91
7028680	Valleyfield	39,8	48,4	52,6	55,8	59,0	55
7031360	Chelsea	41,4	51,6	57,9	63,6	70,6	81
7033160	Huberdeau	40,3	49,4	54,8	59,7	65,5	62
7033650	Lachute						0
7034481	Maniwaki-2	39,4	50,7	57,0	62,4	68,4	43
7035520	Nominigüe	44,8	56,8	63,7	69,6	76,4	82
7035680	Notre-Dame-du-Laus	44,9	53,8	57,9	60,9	63,7	26

Tableau 50. Hauteur des événements extrêmes de redoux, en fonction de la durée et du temps de retour (mm) – Durée 1 jour (Partie 2)

Numéro de station	Nom de station	Durée 1 Jour					Nombre d'années valides
		2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	
7036855	Sainte-Anne-du-Lac	43,1	54,5	61,1	66,8	73,4	58
7037400	Saint-Jérôme						0
7040446	Baie-Saint-Paul	55,0	69,4	77,1	83,3	89,9	31
7042840	Grandes-Bergeronnes	42,9	54,1	61,4	68,3	77,1	31
7043000	Harrington-Harbour	47,6	57,8	63,5	68,4	73,8	43
7043960	La Malbaie	34,8	43,1	47,1	50,2	53,2	29
7046010	Petit-Saguenay	51,3	62,1	68,2	73,4	79,2	28
7047250	Saint-Féréol	54,1	66,5	73,4	79,1	85,5	61
7047770	Saint-Urbain	47,6	60,6	68,9	76,7	86,4	52
7048320	Tadoussac	45,3	57,4	64,1	69,6	75,6	89
7050200	Anticosti-Pointe-Sud-Ouest	34,5	44,6	52,4	60,7	73,1	42
7050240	Armagh	48,9	59,3	65,1	70,1	75,7	54
7051120	Caplan	39,5	48,9	54,8	60,3	67,2	60
7051200	Causapscal	44,2	55,7	63,1	70,0	78,8	83
7052600	Gaspé	44,7	57,3	66,1	74,9	86,8	50
7052865	Grande-Vallée	48,5	61,2	67,6	72,6	77,8	55
7054095	La-Pocatière-CDA	46,7	61,1	70,0	78,2	88,1	65
7055200	Mont-Louis	42,4	54,3	61,6	68,3	76,5	51
7055675	Notre-Dame-du-Lac	42,8	54,8	62,4	69,5	78,4	49
7056067	Pointe-Au-Père	42,0	52,8	59,2	65,0	71,7	67
7056120	Port-Daniel	49,4	64,9	75,5	86,0	100,0	31
7056480	Rimouski	42,3	53,8	61,6	69,0	78,8	54
7056600	Rivière-Bleue	41,5	53,2	61,9	71,0	84,1	54
7056814	Saint-Alexis-de-Matapédia	47,0	58,9	67,3	75,7	87,0	44
7056850	Sainte-Anne-des-Monts	40,6	49,2	54,7	59,9	66,4	49
7057160	Saint-Elzéar-de-Bonaventure	46,3	57,9	64,5	70,2	76,7	54
7057287	Sainte-Germaine	53,7	68,4	77,3	85,2	94,7	29
7057304	Saint-Guy	55,4	69,0	77,8	86,2	96,8	60
7057395	Saint-Jean-de-Cherbourg	52,1	64,9	72,1	78,1	84,8	51
7057600	Saint-Pamphile	47,8	59,5	66,2	71,9	78,4	56
7057720	Sainte-Rose-du-Dégelis	40,2	50,1	56,1	61,5	68,0	76
7058520	Trinité-des-Monts	50,9	62,0	69,4	76,5	85,7	58
7058560	Trois-Pistoles	48,5	59,5	65,3	70,0	75,0	59
7060080	Albanel	38,4	48,9	55,3	61,0	67,9	63
7060320	Arvida	42,8	52,6	58,3	63,2	68,9	52
7061440	Chicoutimi	40,6	50,3	56,2	61,4	67,6	58
7063320	Isle-Maligne	41,6	52,7	59,9	66,7	75,2	29
7063400	Kénogami	40,7	50,8	57,0	62,8	69,8	40
7063560	Lac-Bouchette	47,6	61,3	69,6	76,8	85,4	58
7063690	Lac-Sainte-Croix	42,5	54,6	62,4	69,7	79,0	53
7065640	Normandin-Cda	40,6	51,0	57,9	64,6	73,2	56
7065960	Péribonca	36,5	44,9	50,1	55,0	60,9	46
7066820	Saint-Ambroise	42,4	54,2	62,0	69,7	79,7	48
7067460	Saint-Léon-de-Labrecque	41,6	53,1	61,9	71,4	83,3	61
7070454	Barrage-Gouin	47,5	62,2	71,7	80,5	91,6	60
7074240	La Tuque	42,5	51,2	55,8	59,4	63,2	85
7080600	Belleterre	45,7	56,0	62,6	68,8	76,6	57
7086460	Rémigny	44,9	58,6	67,5	75,9	86,5	40
7088760	Ville-Marie	42,2	54,4	61,8	68,5	76,6	81
7090120	Amos	45,6	56,5	63,2	69,4	77,0	76
7095000	Mistassini-Post	43,8	55,2	62,6	69,7	78,8	44

Tableau 51. Hauteur des événements extrêmes de redoux, en fonction de la durée et du temps de retour (mm) – Durée 5 jour (Partie 1)

Numéro de station	Nom de station	Durée 5 Jours					Nombre d'années valides
		2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	
7010720	Berthierville	115,2	151,0	171,5	189,0	208,8	72
7012071	Donnacona-2	130,3	160,4	175,0	185,9	196,8	55
7013360	Joliette	106,7	146,7	169,4	188,7	210,6	49
7014290	Les Cèdres	76,3	105,9	125,2	143,4	166,7	30
7015730	Oka	124,1	159,8	180,2	197,6	217,3	63
7016280	Québec	154,5	191,8	213,9	233,3	256,0	58
7016800	Saint-Alban	134,4	171,2	194,1	214,8	240,2	61
7016840	Sainte-Anne-de-la-Pérade	126,3	159,2	179,1	197,1	218,7	58
7017080	Saint-Côme	149,3	183,8	201,5	215,5	230,2	52
7017100	Saint-Donat	151,4	182,9	196,2	205,3	213,3	42
7017480	Saint-Lin-des-Laurentides	117,5	154,2	174,9	192,4	212,1	60
7017760	Saint-Tite	133,9	170,2	193,0	214,1	240,2	57
7018000	Shawinigan	135,6	175,4	198,7	219,2	243,1	98
7020560	Beauceville	114,2	153,4	176,7	197,2	221,4	70
7020840	Brome	118,8	169,4	207,6	248,1	307,0	31
7020860	Bromptonville	92,0	119,6	135,5	149,3	165,2	31
7021840	Coaticook	111,7	160,5	190,9	218,8	252,9	58
7022000	Disraeli	142,1	184,4	208,3	228,5	251,2	62
7022160	Drummondville	116,2	153,2	173,0	189,0	206,3	90
7022280	East-Angus	127,4	167,9	188,3	204,1	220,3	43
7022320	Farnham	102,0	142,5	170,4	197,9	234,8	80
7022800	Granby	115,3	157,3	182,4	204,5	230,7	53
7023240	Huntingdon	83,6	120,7	145,6	169,7	201,2	27
7023270	Iberville	98,1	133,8	154,8	173,2	194,6	54
7023677	Lac-Mégantic-2	104,7	154,3	182,6	206,8	234,2	68
7024000	Lambton	133,3	175,3	196,7	213,5	230,9	51
7024250	Laurierville	123,5	162,4	184,4	203,0	224,2	66
7024400	Macdonald-College	117,1	147,9	164,2	177,4	191,4	61
7024440	Magog	120,8	162,9	188,1	210,6	237,2	53
7024920	Milan	163,3	216,9	247,8	274,5	305,3	59
7025280	Montréal-McGill						0
7025440	Nicolet	101,3	136,0	161,0	186,7	222,4	30
7026040	Philipsburg	81,8	117,6	143,9	171,2	210,0	57
7027040	Sainte-Clothilde-CDA	112,2	149,3	167,6	181,5	195,5	52
7027200	Saint-Éphrem	128,9	168,9	189,6	206,1	223,3	63
7027280	Sainte-Geneviève	104,0	137,0	155,8	171,7	189,6	51
7027520	Saint-Malo-d'Auckland	157,0	205,6	231,1	251,4	272,9	54
7027540	Sainte-Martine	73,2	105,0	127,9	151,6	184,6	30
7027750	Saint-Théophile	93,8	132,5	156,8	179,2	206,9	49
7027840	Scott	132,2	168,6	188,6	205,3	223,7	54
7028120	Sherbrooke	106,3	142,9	165,0	184,5	207,7	68
7028200	Sorel	125,2	162,2	181,0	195,7	210,8	91
7028680	Valleyfield	93,6	129,6	151,4	170,8	193,9	55
7031360	Chelsea	119,5	157,5	179,9	199,6	222,7	81
7033160	Huberdeau	118,0	146,5	160,2	170,4	180,3	62
7033650	Lachute	122,0	160,1	183,0	203,6	228,1	53
7034481	Maniwaki-2	98,5	130,5	148,8	164,4	182,0	43
7035520	Nominigüe	132,7	170,6	191,9	209,9	230,1	82
7035680	Notre-Dame-du-Laus	127,2	155,8	168,1	176,6	184,2	26

Tableau 52. Hauteur des événements extrêmes de redoux, en fonction de la durée et du temps de retour (mm) – Durée 5 jour (Partie 2)

Numéro de station	Nom de station	Durée 5 Jours					Nombre d'années valides
		2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	
7036855	Sainte-Anne-du-Lac	126,8	162,0	179,0	191,8	204,4	58
7037400	Saint-Jérôme	106,6	138,5	154,8	167,6	180,8	30
7040446	Baie-Saint-Paul	132,2	167,0	187,9	206,6	228,7	61
7042840	Grandes-Bergeronnes	148,1	192,2	218,0	240,5	266,7	53
7043000	Harrington-Harbour	172,7	218,3	242,5	262,1	283,1	43
7043960	La Malbaie	83,9	109,9	127,9	145,9	170,2	29
7046010	Petit-Saguenay						0
7047250	Saint-Féréol	167,3	209,1	235,4	259,5	289,3	61
7047770	Saint-Urbain	140,4	169,3	183,6	194,7	205,9	52
7048320	Tadoussac	138,2	176,0	198,0	217,1	239,1	89
7050200	Anticosti-Pointe-Sud-Ouest	126,5	166,1	188,6	207,7	229,5	42
7050240	Armagh	138,4	175,6	196,6	214,2	234,1	54
7051120	Caplan	121,0	153,1	168,8	180,8	192,8	60
7051200	Causapscal	142,5	174,8	190,9	203,3	215,8	83
7052600	Gaspé	140,7	184,9	213,0	239,1	271,7	50
7052865	Grande-Vallée	159,8	200,7	221,5	237,7	254,4	55
7054095	La-Pocatière-CDA	137,5	177,2	201,6	223,6	250,4	30
7055200	Mont-Louis	130,2	172,0	193,6	210,7	228,5	51
7055675	Notre-Dame-du-Lac	124,9	160,2	178,8	193,6	209,3	30
7056067	Pointe-Au-Père	131,8	167,2	189,1	209,2	233,9	67
7056120	Port-Daniel	156,7	205,1	237,0	267,4	306,6	31
7056480	Rimouski	131,7	163,8	181,0	195,0	210,0	54
7056600	Rivière-Bleue	134,5	174,8	198,2	218,4	241,8	54
7056814	Saint-Alexis-de-Matapédia	154,0	190,3	210,4	227,1	245,5	44
7056850	Sainte-Anne-des-Monts	116,4	147,9	163,9	176,4	189,3	49
7057160	Saint-Elzéar-de-Bonaventure	146,1	184,7	203,3	217,3	231,1	54
7057287	Sainte-Germaine	156,7	203,3	236,4	269,8	315,7	29
7057304	Saint-Guy	186,0	228,0	253,2	275,7	302,4	60
7057395	Saint-Jean-de-Cherbourg	168,1	223,4	256,1	284,9	318,6	51
7057600	Saint-Pamphile						0
7057720	Sainte-Rose-du-Dégelis	122,4	154,4	171,9	186,4	202,3	76
7058520	Trinité-des-Monts	169,2	205,5	224,0	238,4	253,3	58
7058560	Trois-Pistoles	155,0	188,0	204,3	216,9	229,5	59
7060080	Albanel	126,6	169,1	194,0	215,8	241,2	29
7060320	Arvida	135,9	169,9	185,6	196,9	207,7	28
7061440	Chicoutimi	127,4	162,7	182,0	197,9	215,4	58
7063320	Isle-Maligne	135,0	171,4	190,1	204,8	220,1	65
7063400	Kénogami	148,2	185,3	204,5	219,7	235,5	21
7063560	Lac-Bouchette	156,8	194,9	214,5	230,1	246,2	58
7063690	Lac-Sainte-Croix	138,9	174,5	193,5	209,0	225,6	53
7065640	Normandin-Cda	140,0	181,3	205,4	226,3	250,4	56
7065960	Péribonca	108,6	141,9	160,5	176,0	193,4	46
7066820	Saint-Ambroise	138,2	182,3	207,8	229,7	254,9	48
7067460	Saint-Léon-de-Labrecque	145,0	187,9	212,4	233,3	257,1	61
7070454	Barrage-Gouin	151,6	193,6	217,3	237,4	260,1	60
7074240	La Tuque	127,0	161,6	178,1	190,4	202,4	85
7080600	Belleterre	138,8	181,0	206,7	230,0	258,0	57
7086460	Rémigny	123,6	166,5	195,0	222,5	258,3	40
7088760	Ville-Marie	112,7	147,2	165,9	181,3	198,1	81
7090120	Amos	136,6	174,3	196,5	216,1	239,0	76
7095000	Mistassini-Post	139,8	191,7	228,5	265,8	317,1	44

Tableau 53. Intensité des événements extrêmes de redoux, en fonction de la durée et du temps de retour (mm/h) – Durée 1 jour (Partie 1)

Numéro de station	Nom de station	Durée 1 Jour					Nombre d'années valides
		2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	
7010720	Berthierville	1,7	2,1	2,3	2,5	2,8	72
7012071	Donnacoona-2	1,8	2,1	2,3	2,4	2,4	55
7013360	Joliette	1,7	2,2	2,5	2,8	3,1	49
7014290	Les Cèdres	1,5	1,7	1,9	2,2	2,4	30
7015730	Oka	1,8	2,2	2,5	2,7	2,9	63
7016280	Québec	2,0	2,5	2,7	2,9	3,2	58
7016800	Saint-Alban	1,9	2,3	2,6	2,8	2,9	61
7016840	Sainte-Anne-de-la-Pérade	1,8	2,3	2,6	2,9	3,3	31
7017080	Saint-Côme	1,9	2,3	2,6	2,8	3,1	52
7017100	Saint-Donat	1,9	2,3	2,6	2,8	3,0	42
7017480	Saint-Lin-des-Laurentides	1,7	2,1	2,3	2,5	2,8	60
7017760	Saint-Tite	1,8	2,2	2,5	2,8	3,1	57
7018000	Shawinigan	1,8	2,2	2,5	2,8	3,2	98
7020560	Beauceville	1,7	2,1	2,3	2,5	2,7	70
7020840	Brome	2,1	2,7	3,0	3,4	3,9	31
7020860	Bromptonville	1,8	2,2	2,4	2,6	2,8	51
7021840	Coaticook	1,9	2,5	2,8	3,1	3,5	58
7022000	Disraeli	1,9	2,4	2,7	2,9	3,3	62
7022160	Drummondville	1,8	2,4	2,7	3,1	3,5	90
7022280	East-Angus	1,9	2,3	2,5	2,7	3,0	43
7022320	Farnham	1,7	2,2	2,5	2,9	3,4	80
7022800	Granby	2,0	2,5	2,7	3,0	3,3	53
7023240	Huntingdon	1,7	2,0	2,2	2,3	2,4	27
7023270	Iberville	1,7	2,1	2,3	2,5	2,7	54
7023677	Lac-Mégantic-2	1,7	2,3	2,7	3,0	3,4	68
7024000	Lambton	2,0	2,6	2,9	3,3	3,7	51
7024250	Laurierville	2,0	2,5	2,8	3,1	3,4	66
7024400	Macdonald-College	1,7	2,2	2,4	2,6	2,9	61
7024440	Magog	1,8	2,3	2,8	3,2	3,9	53
7024920	Milan	2,3	2,8	3,2	3,5	3,9	59
7025280	Montréal-McGill	1,8	2,1	2,3	2,5	2,7	27
7025440	Nicolet	1,5	1,9	2,2	2,4	2,8	30
7026040	Philipsburg	1,7	2,1	2,4	2,7	3,0	57
7027040	Sainte-Clothilde-CDA	1,8	2,3	2,5	2,7	3,0	52
7027200	Saint-Éphrem	1,9	2,4	2,6	2,8	3,0	63
7027280	Sainte-Geneviève	1,7	2,1	2,3	2,6	2,8	51
7027520	Saint-Malo-d'Auckland	2,2	2,8	3,1	3,4	3,7	54
7027540	Sainte-Martine	1,6	2,1	2,4	2,6	2,8	69
7027750	Saint-Théophile	1,7	2,1	2,4	2,7	3,0	49
7027840	Scott	1,8	2,2	2,4	2,7	3,0	54
7028120	Sherbrooke	1,7	2,1	2,3	2,5	2,7	68
7028200	Sorel	1,8	2,2	2,5	2,8	3,0	91
7028680	Valleyfield	1,7	2,0	2,2	2,3	2,5	55
7031360	Chelsea	1,7	2,2	2,4	2,7	2,9	81
7033160	Huberdeau	1,7	2,1	2,3	2,5	2,7	62
7033650	Lachute						0
7034481	Maniwaki-2	1,6	2,1	2,4	2,6	2,8	43
7035520	Nominuingue	1,9	2,4	2,7	2,9	3,2	82
7035680	Notre-Dame-du-Laus	1,9	2,2	2,4	2,5	2,7	26

Tableau 54. Intensité des événements extrêmes de redoux, en fonction de la durée et du temps de retour (mm/h) – Durée 1 jour (Partie 2)

Numéro de station	Nom de station	Durée 1 Jour					Nombre d'années valides
		2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	
7036855	Sainte-Anne-du-Lac	1,8	2,3	2,5	2,8	3,1	58
7037400	Saint-Jérôme						0
7040446	Baie-Saint-Paul	2,3	2,9	3,2	3,5	3,7	31
7042840	Grandes-Bergeronnes	1,8	2,3	2,6	2,8	3,2	31
7043000	Harrington-Harbour	2,0	2,4	2,6	2,8	3,1	43
7043960	La Malbaie	1,4	1,8	2,0	2,1	2,2	29
7046010	Petit-Saguenay	2,1	2,6	2,8	3,1	3,3	28
7047250	Saint-Férol	2,3	2,8	3,1	3,3	3,6	61
7047770	Saint-Urbain	2,0	2,5	2,9	3,2	3,6	52
7048320	Tadoussac	1,9	2,4	2,7	2,9	3,2	89
7050200	Anticosti-Pointe-Sud-Ouest	1,4	1,9	2,2	2,5	3,0	42
7050240	Armagh	2,0	2,5	2,7	2,9	3,2	54
7051120	Caplan	1,6	2,0	2,3	2,5	2,8	60
7051200	Causapscal	1,8	2,3	2,6	2,9	3,3	83
7052600	Gaspé	1,9	2,4	2,8	3,1	3,6	50
7052865	Grande-Vallée	2,0	2,6	2,8	3,0	3,2	55
7054095	La-Pocatière-CDA	1,9	2,5	2,9	3,3	3,7	65
7055200	Mont-Louis	1,8	2,3	2,6	2,8	3,2	51
7055675	Notre-Dame-du-Lac	1,8	2,3	2,6	2,9	3,3	49
7056067	Pointe-Au-Père	1,8	2,2	2,5	2,7	3,0	67
7056120	Port-Daniel	2,1	2,7	3,1	3,6	4,2	31
7056480	Rimouski	1,8	2,2	2,6	2,9	3,3	54
7056600	Rivière-Bleue	1,7	2,2	2,6	3,0	3,5	54
7056814	Saint-Alexis-de-Matapédia	2,0	2,5	2,8	3,2	3,6	44
7056850	Sainte-Anne-des-Monts	1,7	2,0	2,3	2,5	2,8	49
7057160	Saint-Elzéar-de-Bonaventure	1,9	2,4	2,7	2,9	3,2	54
7057287	Sainte-Germaine	2,2	2,8	3,2	3,5	3,9	29
7057304	Saint-Guy	2,3	2,9	3,2	3,6	4,0	60
7057395	Saint-Jean-de-Cherbourg	2,2	2,7	3,0	3,3	3,5	51
7057600	Saint-Pamphile	2,0	2,5	2,8	3,0	3,3	56
7057720	Sainte-Rose-du-Dégelis	1,7	2,1	2,3	2,6	2,8	76
7058520	Trinité-des-Monts	2,1	2,6	2,9	3,2	3,6	58
7058560	Trois-Pistoles	2,0	2,5	2,7	2,9	3,1	59
7060080	Albanel	1,6	2,0	2,3	2,5	2,8	63
7060320	Arvida	1,8	2,2	2,4	2,6	2,9	52
7061440	Chicoutimi	1,7	2,1	2,3	2,6	2,8	58
7063320	Isle-Maligne	1,7	2,2	2,5	2,8	3,1	29
7063400	Kénogami	1,7	2,1	2,4	2,6	2,9	40
7063560	Lac-Bouchette	2,0	2,6	2,9	3,2	3,6	58
7063690	Lac-Sainte-Croix	1,8	2,3	2,6	2,9	3,3	53
7065640	Normandin-Cda	1,7	2,1	2,4	2,7	3,1	56
7065960	Péribonca	1,5	1,9	2,1	2,3	2,5	46
7066820	Saint-Ambroise	1,8	2,3	2,6	2,9	3,3	48
7067460	Saint-Léon-de-Labrecque	1,7	2,2	2,6	3,0	3,6	61
7070454	Barrage-Gouin	2,0	2,6	3,0	3,4	3,8	60
7074240	La Tuque	1,8	2,1	2,3	2,5	2,6	85
7080600	Belleterre	1,9	2,3	2,6	2,9	3,2	57
7086460	Rémigny	1,9	2,4	2,8	3,2	3,6	40
7088760	Ville-Marie	1,8	2,3	2,6	2,9	3,2	81
7090120	Amos	1,9	2,4	2,6	2,9	3,2	76
7095000	Mistassini-Post	1,8	2,3	2,6	2,9	3,3	44

Tableau 55. Intensité des événements extrêmes de redoux, en fonction de la durée et du temps de retour (mm/h) – Durée 5 jour (Partie 1)

Numéro de station	Nom de station	Durée 5 Jours					Nombre d'années valides
		2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	
7010720	Berthierville	1,0	1,3	1,4	1,6	1,7	72
7012071	Donnacona-2	1,1	1,3	1,5	1,5	1,6	55
7013360	Joliette	0,9	1,2	1,4	1,6	1,8	49
7014290	Les Cèdres	0,6	0,9	1,0	1,2	1,4	30
7015730	Oka	1,0	1,3	1,5	1,6	1,8	63
7016280	Québec	1,3	1,6	1,8	1,9	2,1	58
7016800	Saint-Alban	1,1	1,4	1,6	1,8	2,0	61
7016840	Sainte-Anne-de-la-Pérade	1,1	1,3	1,5	1,6	1,8	58
7017080	Saint-Côme	1,2	1,5	1,7	1,8	1,9	52
7017100	Saint-Donat	1,3	1,5	1,6	1,7	1,8	42
7017480	Saint-Lin-des-Laurentides	1,0	1,3	1,5	1,6	1,8	60
7017760	Saint-Tite	1,1	1,4	1,6	1,8	2,0	57
7018000	Shawinigan	1,1	1,5	1,7	1,8	2,0	98
7020560	Beauceville	1,0	1,3	1,5	1,6	1,8	70
7020840	Brome	1,0	1,4	1,7	2,1	2,6	31
7020860	Bromptonville	0,8	1,0	1,1	1,2	1,4	31
7021840	Coaticook	0,9	1,3	1,6	1,8	2,1	58
7022000	Disraeli	1,2	1,5	1,7	1,9	2,1	62
7022160	Drummondville	1,0	1,3	1,4	1,6	1,7	90
7022280	East-Angus	1,1	1,4	1,6	1,7	1,8	43
7022320	Farnham	0,8	1,2	1,4	1,6	2,0	80
7022800	Granby	1,0	1,3	1,5	1,7	1,9	53
7023240	Huntingdon	0,7	1,0	1,2	1,4	1,7	27
7023270	Iberville	0,8	1,1	1,3	1,4	1,6	54
7023677	Lac-Mégantic-2	0,9	1,3	1,5	1,7	2,0	68
7024000	Lambton	1,1	1,5	1,6	1,8	1,9	51
7024250	Laurierville	1,0	1,4	1,5	1,7	1,9	66
7024400	Macdonald-College	1,0	1,2	1,4	1,5	1,6	61
7024440	Magog	1,0	1,4	1,6	1,8	2,0	53
7024920	Milan	1,4	1,8	2,1	2,3	2,5	59
7025280	Montréal-McGill						0
7025440	Nicolet	0,8	1,1	1,3	1,6	1,9	30
7026040	Philipsburg	0,7	1,0	1,2	1,4	1,7	57
7027040	Sainte-Clothilde-CDA	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	52
7027200	Saint-Éphrem	1,1	1,4	1,6	1,7	1,9	63
7027280	Sainte-Geneviève	0,9	1,1	1,3	1,4	1,6	51
7027520	Saint-Malo-d'Auckland	1,3	1,7	1,9	2,1	2,3	54
7027540	Sainte-Martine	0,6	0,9	1,1	1,3	1,5	30
7027750	Saint-Théophile	0,8	1,1	1,3	1,5	1,7	49
7027840	Scott	1,1	1,4	1,6	1,7	1,9	54
7028120	Sherbrooke	0,9	1,2	1,4	1,5	1,7	68
7028200	Sorel	1,0	1,4	1,5	1,6	1,8	91
7028680	Valleyfield	0,8	1,1	1,3	1,4	1,6	55
7031360	Chelsea	1,0	1,3	1,5	1,7	1,9	81
7033160	Huberdeau	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	62
7033650	Lachute	1,0	1,3	1,5	1,7	1,9	53
7034481	Maniwaki-2	0,8	1,1	1,2	1,4	1,5	43
7035520	Nominigüe	1,1	1,4	1,6	1,7	1,9	82
7035680	Notre-Dame-du-Laus	1,1	1,3	1,4	1,5	1,5	26

Tableau 56. Intensité des événements extrêmes de redoux, en fonction de la durée et du temps de retour (mm/h) – Durée 5 jour (Partie 2)

Numéro de station	Nom de station	Durée 5 Jours					Nombre d'années valides
		2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	
7036855	Sainte-Anne-du-Lac	1,1	1,4	1,5	1,6	1,7	58
7037400	Saint-Jérôme	0,9	1,2	1,3	1,4	1,5	30
7040446	Baie-Saint-Paul	1,1	1,4	1,6	1,7	1,9	61
7042840	Grandes-Bergeronnes	1,2	1,6	1,8	2,0	2,2	53
7043000	Harrington-Harbour	1,4	1,8	2,0	2,2	2,4	43
7043960	La Malbaie	0,7	0,9	1,1	1,2	1,4	29
7046010	Petit-Saguenay						0
7047250	Saint-Féréol	1,4	1,7	2,0	2,2	2,4	61
7047770	Saint-Urbain	1,2	1,4	1,5	1,6	1,7	52
7048320	Tadoussac	1,2	1,5	1,6	1,8	2,0	89
7050200	Anticosti-Pointe-Sud-Ouest	1,1	1,4	1,6	1,7	1,9	42
7050240	Armagh	1,2	1,5	1,6	1,8	2,0	54
7051120	Caplan	1,0	1,3	1,4	1,5	1,6	60
7051200	Causapscal	1,2	1,5	1,6	1,7	1,8	83
7052600	Gaspé	1,2	1,5	1,8	2,0	2,3	50
7052865	Grande-Vallée	1,3	1,7	1,8	2,0	2,1	55
7054095	La-Pocatière-CDA	1,1	1,5	1,7	1,9	2,1	30
7055200	Mont-Louis	1,1	1,4	1,6	1,8	1,9	51
7055675	Notre-Dame-du-Lac	1,0	1,3	1,5	1,6	1,7	30
7056067	Pointe-Au-Père	1,1	1,4	1,6	1,7	1,9	67
7056120	Port-Daniel	1,3	1,7	2,0	2,2	2,6	31
7056480	Rimouski	1,1	1,4	1,5	1,6	1,8	54
7056600	Rivière-Bleue	1,1	1,5	1,7	1,8	2,0	54
7056814	Saint-Alexis-de-Matapédia	1,3	1,6	1,8	1,9	2,0	44
7056850	Sainte-Anne-des-Monts	1,0	1,2	1,4	1,5	1,6	49
7057160	Saint-Elzéar-de-Bonaventure	1,2	1,5	1,7	1,8	1,9	54
7057287	Sainte-Germaine	1,3	1,7	2,0	2,2	2,6	29
7057304	Saint-Guy	1,5	1,9	2,1	2,3	2,5	60
7057395	Saint-Jean-de-Cherbourg	1,4	1,9	2,1	2,4	2,7	51
7057600	Saint-Pamphile						0
7057720	Sainte-Rose-du-Dégelis	1,0	1,3	1,4	1,6	1,7	76
7058520	Trinité-des-Monts	1,4	1,7	1,9	2,0	2,1	58
7058560	Trois-Pistoles	1,3	1,6	1,7	1,8	1,9	59
7060080	Albanel	1,1	1,4	1,6	1,8	2,0	29
7060320	Arvida	1,1	1,4	1,5	1,6	1,7	28
7061440	Chicoutimi	1,1	1,4	1,5	1,6	1,8	58
7063320	Isle-Maligne	1,1	1,4	1,6	1,7	1,8	65
7063400	Kénogami	1,2	1,5	1,7	1,8	2,0	21
7063560	Lac-Bouchette	1,3	1,6	1,8	1,9	2,1	58
7063690	Lac-Sainte-Croix	1,2	1,5	1,6	1,7	1,9	53
7065640	Normandin-Cda	1,2	1,5	1,7	1,9	2,1	56
7065960	Péribonca	0,9	1,2	1,3	1,5	1,6	46
7066820	Saint-Ambroise	1,2	1,5	1,7	1,9	2,1	48
7067460	Saint-Léon-de-Labrecque	1,2	1,6	1,8	1,9	2,1	61
7070454	Barrage-Gouin	1,3	1,6	1,8	2,0	2,2	60
7074240	La Tuque	1,1	1,3	1,5	1,6	1,7	85
7080600	Belleterre	1,2	1,5	1,7	1,9	2,2	57
7086460	Rémigny	1,0	1,4	1,6	1,9	2,2	40
7088760	Ville-Marie	0,9	1,2	1,4	1,5	1,7	81
7090120	Amos	1,1	1,5	1,6	1,8	2,0	76
7095000	Mistassini-Post	1,2	1,6	1,9	2,2	2,6	44

Tableau 57. Prédiction de hauteur de ruissellement (anti-log) pour différentes hauteurs de précipitation (mm) (60 mm et moins).

Bassin ou région	Type de modèle	Ordonnée	Pente	Hauteur de précipitation (mm)										
				10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Bélair	Pente commune, 11 bassins	-1.136	1.228	1.24	2.03	2.89	3.81	4.76	5.75	6.78	7.83	8.91	10.02	11.15
Castor	Pente commune, 11 bassins	-1.399	1.228	0.68	1.11	1.58	2.08	2.60	3.15	3.71	4.28	4.88	5.48	6.10
Esturgeon Témoin	Pente commune, 11 bassins	-0.879	1.228	2.23	3.68	5.23	6.89	8.61	10.41	12.26	14.17	16.13	18.13	20.18
Ewing	Pente commune, 11 bassins	-1.003	1.228	1.68	2.76	3.93	5.17	6.47	7.82	9.21	10.65	12.12	13.63	15.16
Fourchette Intervention	Pente commune, 11 bassins	-1.148	1.228	1.20	1.98	2.81	3.70	4.63	5.60	6.59	7.62	8.67	9.75	10.85
Fourchette Témoin	Pente commune, 11 bassins	-1.241	1.228	0.97	1.60	2.28	2.99	3.74	4.52	5.33	6.16	7.01	7.88	8.77
Madawaska Intervention	Pente commune, 11 bassins	-1.485	1.228	0.55	0.91	1.30	1.71	2.13	2.58	3.04	3.51	3.99	4.49	5.00
Tomifobia Intervention	Pente commune, 11 bassins	-1.439	1.228	0.61	1.01	1.44	1.89	2.37	2.86	3.37	3.90	4.44	4.99	5.55
Tomifobia Témoin	Pente commune, 11 bassins	-1.003	1.228	1.68	2.77	3.94	5.18	6.48	7.83	9.23	10.66	12.13	13.64	15.18
Walbridge Intervention	Pente commune, 11 bassins	-1.309	1.228	0.83	1.37	1.94	2.56	3.20	3.87	4.56	5.27	5.99	6.74	7.50
Walbridge Témoin	Pente commune, 11 bassins	-1.120	1.228	1.28	2.11	3.01	3.96	4.95	5.98	7.05	8.14	9.27	10.42	11.59
Appalaches régional	Pente et ordonnée commune, 6 bassins	-1.194	1.209	1.03	1.69	2.39	3.13	3.90	4.70	5.53	6.37	7.24	8.12	9.03
Montérégie régional	Pente et ordonnée commune, 5 bassins	-1.224	1.258	1.08	1.80	2.59	3.42	4.31	5.23	6.19	7.18	8.19	9.24	10.31
Castor, local	Pente commune, 5 bassins montérégiens	-1.424	1.247	0.67	1.10	1.58	2.09	2.62	3.18	3.75	4.34	4.95	5.58	6.22
Esturgeon Témoin, local	Pente commune, 5 bassins montérégiens	-0.905	1.247	2.20	3.65	5.22	6.89	8.65	10.49	12.39	14.35	16.36	18.42	20.54
Ewing, local	Pente commune, 5 bassins montérégiens	-1.028	1.247	1.66	2.75	3.93	5.19	6.52	7.90	9.33	10.81	12.32	13.88	15.47
Walbridge Intervention, local	Pente commune, 5 bassins montérégiens	-1.333	1.247	0.82	1.36	1.95	2.57	3.23	3.91	4.62	5.35	6.10	6.87	7.66
Walbridge Témoin, local	Pente commune, 5 bassins montérégiens	-1.144	1.247	1.27	2.10	3.01	3.98	4.99	6.05	7.15	8.28	9.44	10.63	11.85
Castor, local	Pente commune, ordonnée définie par CN	-1.198	1.247	1.12	1.86	2.66	3.51	4.41	5.34	6.31	7.31	8.33	9.38	10.46
Esturgeon Témoin, local	Pente commune, ordonnée définie par CN	-0.862	1.247	2.43	4.02	5.76	7.61	9.55	11.58	13.68	15.84	18.06	20.34	22.67
Ewing, local	Pente commune, ordonnée définie par CN	-1.198	1.247	1.12	1.86	2.66	3.51	4.41	5.34	6.31	7.31	8.33	9.38	10.46
Walbridge Intervention, local	Pente commune, ordonnée définie par CN	-1.282	1.247	0.92	1.53	2.19	2.89	3.63	4.40	5.20	6.02	6.87	7.73	8.62
Walbridge Témoin, local	Pente commune, ordonnée définie par CN	-1.114	1.247	1.36	2.25	3.22	4.26	5.35	6.48	7.65	8.87	10.11	11.39	12.69

Tableau 58. Prédiction de hauteur de ruissellement (anti-log) pour différentes hauteurs de précipitation (mm) (65 mm et plus)

Bassin ou région	Type de modèle	Ordonnée	Pente	Hauteur de précipitation (mm)											
				65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
Bélair	Pente commune, 11 bassins	-1.136	1.228	12.30	13.48	14.67	15.88	17.10	18.35	19.61	20.88	22.17	23.48	24.79	26.12
Castor	Pente commune, 11 bassins	-1.399	1.228	6.73	7.37	8.02	8.68	9.35	10.03	10.72	11.42	12.13	12.84	13.56	14.29
Esturgeon Témoin	Pente commune, 11 bassins	-0.879	1.228	22.26	24.38	26.54	28.73	30.95	33.20	35.48	37.78	40.12	42.48	44.86	47.27
Ewing	Pente commune, 11 bassins	-1.003	1.228	16.73	18.32	19.94	21.59	23.26	24.95	26.66	28.39	30.15	31.92	33.71	35.52
Fourchette Intervention	Pente commune, 11 bassins	-1.148	1.228	11.97	13.11	14.27	15.45	16.64	17.85	19.08	20.32	21.57	22.84	24.12	25.41
Fourchette Témoin	Pente commune, 11 bassins	-1.241	1.228	9.68	10.60	11.54	12.49	13.45	14.43	15.42	16.42	17.44	18.46	19.50	20.55
Madawaska Intervention	Pente commune, 11 bassins	-1.485	1.228	5.51	6.04	6.57	7.12	7.67	8.22	8.79	9.36	9.94	10.52	11.11	11.71
Tomifobia Intervention	Pente commune, 11 bassins	-1.439	1.228	6.12	6.71	7.30	7.90	8.51	9.13	9.76	10.39	11.04	11.69	12.34	13.00
Tomifobia Témoin	Pente commune, 11 bassins	-1.003	1.228	16.75	18.34	19.96	21.61	23.28	24.97	26.69	28.42	30.18	31.95	33.75	35.56
Walbridge Intervention	Pente commune, 11 bassins	-1.309	1.228	8.27	9.06	9.86	10.67	11.50	12.33	13.18	14.04	14.90	15.78	16.67	17.56
Walbridge Témoin	Pente commune, 11 bassins	-1.120	1.228	12.79	14.01	15.25	16.50	17.78	19.07	20.38	21.71	23.05	24.40	25.77	27.15
Appalaches régional	Pente et ordonnée commune, 6 bassins	-1.194	1.209	9.94	10.87	11.82	12.78	13.75	14.74	15.73	16.74	17.75	18.78	19.82	20.86
Montérégie régional	Pente et ordonnée commune, 5 bassins	-1.224	1.258	11.40	12.51	13.65	14.80	15.97	17.16	18.37	19.60	20.84	22.10	23.37	24.65
Castor, local	Pente commune, 5 bassins montréalais	-1.424	1.247	6.87	7.54	8.21	8.90	9.60	10.31	11.03	11.76	12.50	13.24	14.00	14.76
Esturgeon Témoin, local	Pente commune, 5 bassins montréalais	-0.905	1.247	22.69	24.89	27.13	29.40	31.71	34.05	36.43	38.83	41.27	43.73	46.23	48.75
Ewing, local	Pente commune, 5 bassins montréalais	-1.028	1.247	17.10	18.75	20.44	22.15	23.89	25.65	27.44	29.25	31.09	32.95	34.83	36.72
Walbridge Intervention, local	Pente commune, 5 bassins montréalais	-1.333	1.247	8.46	9.28	10.12	10.96	11.82	12.70	13.58	14.48	15.39	16.31	17.24	18.18
Walbridge Témoin, local	Pente commune, 5 bassins montréalais	-1.144	1.247	13.09	14.36	15.65	16.96	18.30	19.65	21.02	22.41	23.81	25.24	26.67	28.13
Castor, local	Pente commune, ordonnée définie par CN	-1.198	1.247	11.56	12.68	13.82	14.97	16.15	17.34	18.55	19.78	21.02	22.28	23.54	24.83
Esturgeon Témoin, local	Pente commune, ordonnée définie par CN	-0.862	1.247	25.05	27.48	29.95	32.46	35.01	37.60	40.22	42.87	45.56	48.29	51.04	53.82
Ewing, local	Pente commune, ordonnée définie par CN	-1.198	1.247	11.56	12.68	13.82	14.97	16.15	17.34	18.55	19.78	21.02	22.28	23.54	24.83
Walbridge Intervention, local	Pente commune, ordonnée définie par CN	-1.282	1.247	9.53	10.45	11.39	12.34	13.31	14.29	15.29	16.30	17.32	18.36	19.40	20.46
Walbridge Témoin, local	Pente commune, ordonnée définie par CN	-1.114	1.247	14.02	15.38	16.76	18.17	19.60	21.04	22.51	24.00	25.50	27.03	28.57	30.13

