



PCAA

Programme canadien d'adaptation agricole

Rapport final

Développement et validation de méthodes de prédiction du ruissellement et des débits de pointe en support à l'aménagement hydro-agricole

Titre du projet

6805

Numéro du projet

IRDA

Nom du demandeur

Décembre 2012 à Décembre 2013

Rédigé par

Aubert, Michaud, chercheur

Nestor Raul Rocha Medrano, professionnel de recherche

Robert Lagacé, professeur-chercheur

Ariane Drouin, professionnelle de recherche

Collaborateurs :

François Chrétien, AAC

Julie Drapeau, MDDEFP

Mikaël Guillou, MAPAQ

Christian Poirier, MTQ

31 janvier 2014

Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) s'est engagé à travailler avec des partenaires de l'industrie. Les opinions exprimées dans le présent document sont celles du demandeur et ne sont pas nécessairement partagées par AAC et le CDAQ.

Préparé par :

Aubert Michaud, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)
Nestor-Raul Rocha Medrano, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)
Robert Lagacé, Université Laval
Ariane Drouin, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

Collaborations scientifiques :

François Chrétien, Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC)
Julie Drapeau, Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP)
Mikaël Guillou, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ)
Christian Poirier, Ministère des Transports du Québec (MTQ)

Le rapport peut être cité comme suit :

Michaud, A.R., N.-R. Rocha Medrano, R. Lagacé et A. Drouin. 2014. Développement et validation de méthodes de prédiction du ruissellement et des débits de pointe en support à l'aménagement hydro-agricole. Rapport final. Projet réalisé dans le cadre du Programme canadien d'adaptation agricole (PCAA) en collaboration avec le Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Québec, Canada, 142 pp.

Remerciements

Cette étude a été rendue possible grâce à la participation financière du Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec et d'Agriculture et Agroalimentaire Canada dans le cadre du Programme canadien d'adaptation agricole. Les auteurs tiennent donc à remercier ces organismes pour le financement accordé. Les auteurs souhaitent également remercier François Chrétien, Julie Drapeau, Mikaël Guillou et Christian Poirier pour leurs judicieux conseils. Enfin, un grand merci aux personnes et organismes ayant fourni les données hydrométriques et météorologiques essentielles à la réalisation de ce projet, incluant Jacques Gallichand de l'Université Laval, Mikaël Guillou du MAPAQ et le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP).

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	4
LISTE DES TABLEAUX.....	5
LISTE DES FIGURES	7
LISTE DES ANNEXES	9
1. OBJECTIFS	10
1.1. Objectif général.....	10
1.2. Objectifs spécifiques.....	10
2. RÉSULTATS ET ANALYSE	11
2.1. Caractérisation des bassins versants à l'étude.....	12
2.1.1. Segmentation et caractérisation du réseau hydrique	15
2.1.2. Classification de l'utilisation du territoire.....	18
2.1.3. Indexation des groupes hydrologique du sol.....	23
2.1.4. Délimitation des unités de réponse hydrologique (URH) et attribution des numéros de courbe (CN)	24
2.2. Description des séries de données hydrométriques et météorologiques	27
2.3. Développement de l'outil d'analyse hydrologique VisuHydro	31
2.4. Analyses hydrologiques	32
2.4.1. Temps de montée t_p (h)	33
2.4.2. Coefficient de forme de l'hydrogramme $\phi(\alpha)$	40
2.4.3. Estimation et prédiction des hauteurs de ruissellement	42
2.4.4. Estimation de débit de crue Q_{max} (m^3/s)	57
2.4.4.1. Concept de courbes enveloppes	60
2.4.5. Séparation géochimique (conductivité électrique).....	65
3. DIFFUSION DES RÉSULTATS.....	75
4. CONCLUSIONS.....	78
5. SOMMAIRE DES ACCOMPLISSEMENTS DU PROJET.....	79
6. PLAN DE FINANCEMENT ET CONCILIATION DES DÉPENSES.....	81
RÉFÉRENCES	82
ANNEXES.....	84

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Localisation et caractéristiques physiques des bassins versants à l'étude.	14
Tableau 2. Sources et résolutions des MNT utilisés.	16
Tableau 3. Classes de cultures de la Banque de données des cultures assurées (BDCA) de la Financière agricole du Québec.	18
Tableau 4. Classes d'utilisation du territoire de la carte écoforestière.	19
Tableau 5. Superficie des milieux humides par bassin versant.	20
Tableau 6. CN (de type II) 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 22 sites expérimentaux à l'étude.	25
Tableau 7. Description des stations de jaugeage.	28
Tableau 8. Description des stations météorologiques.	29
Tableau 9. Stations de jaugeage et météorologiques par bassin versant.	30
Tableau 10. Résumé des temps de montée observés - t_p (h)	35
Tableau 11. Sommaire de l'estimation des temps de concentration - T_c (h).	36
Tableau 12. Sommaire des ratios entre les temps de montée observés et les temps de concentration estimés.	37
Tableau 13. ANOVA des temps de montée observés (t_p).	39
Tableau 14. Coefficients du modèle de régression en fonction de l'aire.	39
Tableau 15. Résumé des coefficients de forme des hydrogrammes - $\phi(\alpha)$	41
Tableau 16. ANOVA des coefficients de forme de l'hydrogramme - $\phi(\alpha)$	42
Tableau 17. Distributions des volumes, hauteurs et coefficients de ruissellement associés aux 802 hydrogrammes analysés individuellement.	44
Tableau 18. Valeurs F du modèle d'analyse de covariance des hauteurs de ruissellement en fonction des précipitations totales	46
Tableau 19. Moyennes et erreurs types ajustées au modèle de covariance des hauteurs de ruissellement prédites pour la précipitation moyenne de 35 mm pour l'ensemble des bassins versants à l'étude.	47
Tableau 20. Estimateurs des pentes de régression pour la précipitation ruisselante (P_{pt_ru}) par bassin en fonction de la précipitation total (P_{pt}), en ordre croissant. Modèle avec pentes distinctes, ordonnées à l'origine égale à 0. Erreurs types, degrés de liberté et bornes d'un intervalle de confiance à 95%.	51
Tableau 21. Estimateurs des pentes de régression pour la hauteur de ruissellement (H_{ru}) en fonction de la précipitation ruisselante (P_{pt_ru}) par bassin, en ordre croissant. Modèle avec	

pentes distinctes, ordonnées à l'origine égales à 0. Erreurs types, degrés de liberté et bornes d'un intervalle de confiance à 95 %	54
Tableau 22. Séries annuelles des évènements de ruissellement retenus pour la validation de la prédiction des débits de pointe.	58
Tableau 23. Paramètres observés pour les bassins versants mis à contribution dans la validation de la méthode de prédiction des débits de pointe.	63
Tableau 24. Paramètres observés et comparaison des débits de crue prédits aux débits observés.	64
Tableau 25. Résumé des valeurs moyennes observées selon la méthode manuelle de séparation des hydrogrammes.	68
Tableau 26. Résumé des valeurs moyennes observées selon la méthode géochimique (conductivité électrique) de séparation des hydrogrammes.	69
Tableau 27. Sommaire des valeurs moyennes observées de hauteurs de ruissellement (mm), pour les deux méthodes de séparation des hydrogrammes : manuelle et géochimique (conductivité électrique).	71
Tableau 28. Sommaire des valeurs moyennes observées des débits maximum de ruissellement (m^3/s), pour les deux méthodes de séparation des hydrogrammes: manuelle et géochimique (conductivité électrique).	73

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation des bassins versants.	13
Figure 2. Localisation des nœuds et segments pour le bassin versant du ruisseau Couturier.....	17
Figure 3. Utilisation du territoire et milieux humides du bassin versant Dauphine.	21
Figure 4. Utilisation du territoire et milieux humides du bassin versant Couturier.....	21
Figure 5. Utilisation du territoire et milieux humides du bassin versant de la Petite rivière Savane.....	22
Figure 6. Utilisation du territoire et milieux humides du bassin versant de la Petite rivière Bellevue.....	22
Figure 7. Utilisation du territoire et milieux humides du bassin versant Cass.	23
Figure 8. Formation des URH pour le bassin du ruisseau Cass à partir de l'utilisation du territoire et des groupes hydrologiques.	26
Figure 9. Spatialisation des numéros de courbe du bassin du ruisseau Cass.....	26
Figure 10. Interface visuelle du logiciel VisuHydro permettant la séparation des hydrogrammes.	31
Figure 11. Temps montée en fonction de l'aire du bassin.	40
Figure 12. Hauteurs de ruissellement observées et prédites selon les modèles de Monfet (1979) et SCS (1986) pour le bassin versant Aux Castors (CN=78).	45
Figure 13. Hauteurs de ruissellement observées et prédites selon les modèles de Monfet (1979) et SCS (1986) pour le bassin versant Fourchette Aval (CN=56).	45
Figure 14. Représentation dans VisuHydro de la précipitation avant le début du ruissellement et de la précipitation ruisselante.	49
Figure 15. Composantes de la précipitation totale.....	50
Figure 16. Précipitation ruisselante en fonction de la précipitation totale pour chacun des bassins versants à l'étude.....	52
Figure 17. Hauteurs de ruissellement en fonction de la précipitation ruisselante pour chacun des bassins versants à l'étude.	55
Figure 18. Coefficient de ruissellement de la précipitation ruisselante en fonction du groupe hydrologique pondéré pour la superficie des séries de sol du bassin versant.....	56
Figure 19. Coefficient de ruissellement provenant de la précipitation ruisselante en fonction du coefficient de précipitation avant le début du ruissellement.	56
Figure 20. Hauteurs de ruissellement observées et prédites avec ses courbes enveloppes respectives de récurrence 2 et 5 ans pour le bassin versant Aux Castors.....	62
Figure 21. Hauteurs de ruissellement observées et prédites avec ses courbes enveloppes respectives de récurrence 2 et 5 ans pour le bassin versant Fourchette Aval.....	62

Figure 22. Petites différences obtenues pour les débits de base et ruisselé par les deux méthodes de séparation de l'hydrogramme (manuelle et géochimique).	66
Figure 23. Grandes différences obtenues pour les débits de base et ruisselé par les deux méthodes de séparation de l'hydrogramme (manuelle et géochimique).	67
Figure 24. Ratio de hauteurs de ruissellement (Hru) (en mm) pour les deux méthodes de séparation des hydrogrammes : manuelle et géochimique (conductivité électrique).	72
Figure 25. Ratio de coefficient de débit maximum ruisselé (Qmax_ru) (en m ³ /s) pour les deux méthodes de séparation des hydrogrammes : manuelle et géochimique (conductivité électrique).	74

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1. Localisation et cartographie des bassins versants à l'étude.....	85
Annexe 2. Utilisation du sol, groupes hydrologiques et CN des bassins versants à l'étude.....	91
Annexe 3. Hauteurs de ruissellement observées et prédites selon les modèles de Monfet (1979) et SCS (1986) pour chacun des bassins versants à l'étude.....	110
Annexe 4. Débits en fonction de la conductivité électrique pour chacun des bassins versants à l'étude.....	121
Annexe 5. Hauteurs de ruissellement observés et prédits en fonction de la précipitation efficace, plus les courbes enveloppes de récurrence 2, 5 et 10 ans pour chacun des bassins versants à l'étude.....	130
Annexe 6. Complément d'information sur les stations météorologiques.....	138

1. OBJECTIFS

1.1. Objectif général

L'objectif principal du présent projet était de bonifier et de valider les méthodes de prédiction des hauteurs de ruissellement et des débits de pointe en support à la conception d'aménagements hydro-agricoles au Québec. Le renouvellement de ces méthodes en support à la conception des ouvrages hydro-agricoles 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.

Le présent projet s'inscrit à la suite et en complémentarité du projet « Mise à jour des normes et procédures de conception d'ouvrages hydrauliques en milieu rural dans un contexte de changements climatiques¹ » (Michaud et al., 2013) ciblé sur l'actualisation des méthodes de conception des ouvrages hydro-agricoles. L'analyse hydrologique des onze bassins versants a fourni les premières balises au développement et à la validation d'équations prédictives du ruissellement. La mise à contribution de plusieurs relevés hydrométriques supplémentaires, dans le cadre du présent projet, a permis le raffinement des équations développées.

1.2. Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques étaient les suivants :

- Caractériser les réponses hydrologiques du parcellaire agricole québécois, notamment les hauteurs de ruissellement de surface et les débits de pointe;
- Bonifier les méthodes de prédiction des hauteurs de ruissellement et des débits de pointe adaptés au contexte agro-climatique québécois;
- Développer des outils d'analyse (hydrologique) des relevés hydrométriques colligés par des dispositifs de suivi des débits et de qualité de l'eau (VisuHydro 5.0).

¹ Les coûts relatifs aux travaux réalisés dans le cadre de ce 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.

2. RÉSULTATS ET ANALYSE

Le présent projet a été réalisé en quatre étapes :

- 1) La caractérisation des bassins versants à l'étude a été réalisée à partir d'un système d'information géographique sur la base des données géospatiales pertinentes à l'utilisation du territoire, des propriétés physiques des sols et de leurs groupes hydrologiques, des attributs du relief, et ainsi que du parcours de l'eau;
- 2) Le logiciel d'analyse hydrologique VisuHydro a été bonifié de façon à simplifier, par son interface visuelle, l'analyse des hydrogrammes et signaux géochimiques hydrologiques colligés à l'exutoire de petits bassins versants. La nouvelle version VisuHydro permet notamment la séparation des hydrogrammes à partir de données de conductivité électrique. Un manuel de l'utilisateur a été rédigé de façon à assurer la dissémination de l'outil.
- 3) Les relevés hydrométriques des 22 bassins versants à l'étude, de même que les données météorologiques correspondantes, ont été intégrés au logiciel VisuHydro afin d'en faire l'analyse hydrologique, permettant de générer les paramètres de réponse hydrologique propres aux bassins versants, incluant les temps de montée, les paramètres de forme des hydrogrammes, les hauteurs de ruissellement et les débits de pointe.
- 4) Les résultats des analyses hydrologiques obtenues avec le support de VisuHydro ont par la suite été utilisés dans des analyses statistiques plus poussées permettant de faire des liens entre les caractéristiques des bassins et leurs paramètres de réponse hydrologique.

Les sections suivantes du rapport scientifique présentent successivement les principaux livrables du projet, soit:

- La caractérisation des bassins à l'étude;
- L'outil d'analyse hydrologique VisuHydro (le manuel de l'utilisateur est déposé en complément du présent rapport scientifique);
- La présentation et la discussion des résultats des analyses hydrologiques.

2.1. Caractérisation des bassins versants à l'étude

Les suivis hydrologiques de 20 bassins versants (3 à 30 km²) et 2 parcelles (7-16 ha) instrumentés situés dans diverses régions agricoles du Québec ont été mis à profit dans le cadre de cette étude. Ces sites expérimentaux sont représentatifs d'une large gamme d'occupations du sol et de paysages. La figure 1 localise les bassins versants retenus pour l'étude, alors que le tableau 1 présente quelques attributs physiographiques et relatifs à l'occupation du territoire. Dans l'ensemble, les 20 bassins à l'étude sont représentatifs de quatre classes physiographiques du sud du Québec. Les neuf bassins versants et les parcelles de la Montérégie (Berna, Esturgeon Branches 6 et 21, Girard, Petite rivière Bellevue, Petite rivière Pot-au-Beurre, Ewing, Aux Castors) appartiennent à la plaine du Saint-Laurent. Ils ont un relief plat, une occupation du sol presque exclusivement agricole et des systèmes culturaux dominés par la grande culture (maïs et soya). Les deux bassins Walbridge (amont et aval), tributaires de la rivière aux Brochets, chevauchent la transition entre la plaine et les terrasses du Piedmont Appalachien et ont une occupation du sol similaire aux autres sites expérimentaux de la Montérégie. Les bassins des régions de l'Estrie (ruisseaux Cass et Brook), de la Beauce (Fourchette amont et aval, Turmel et Binet), du Bas-Saint-Laurent (ruisseau Couturier et Petite Rivière Savane) et de Québec (Dauphine) sont associés à des paysages appalachiens, présentant un relief ondulé à accidenté. Les bassins des rivières Brûlé et Noire sont les seuls bassins de la rive Nord du Saint-Laurent et sont représentatifs du piedmont Laurentien. De façon générale, un plus grand pourcentage de la superficie des bassins appalachiens laurentiens est occupé par la forêt. La présence de milieux humides y influence également les réponses hydrologiques. Une localisation plus détaillée ainsi que l'environnement topographique des bassins versants à l'étude sont présentés en Annexe 1 au moyen de cartes.

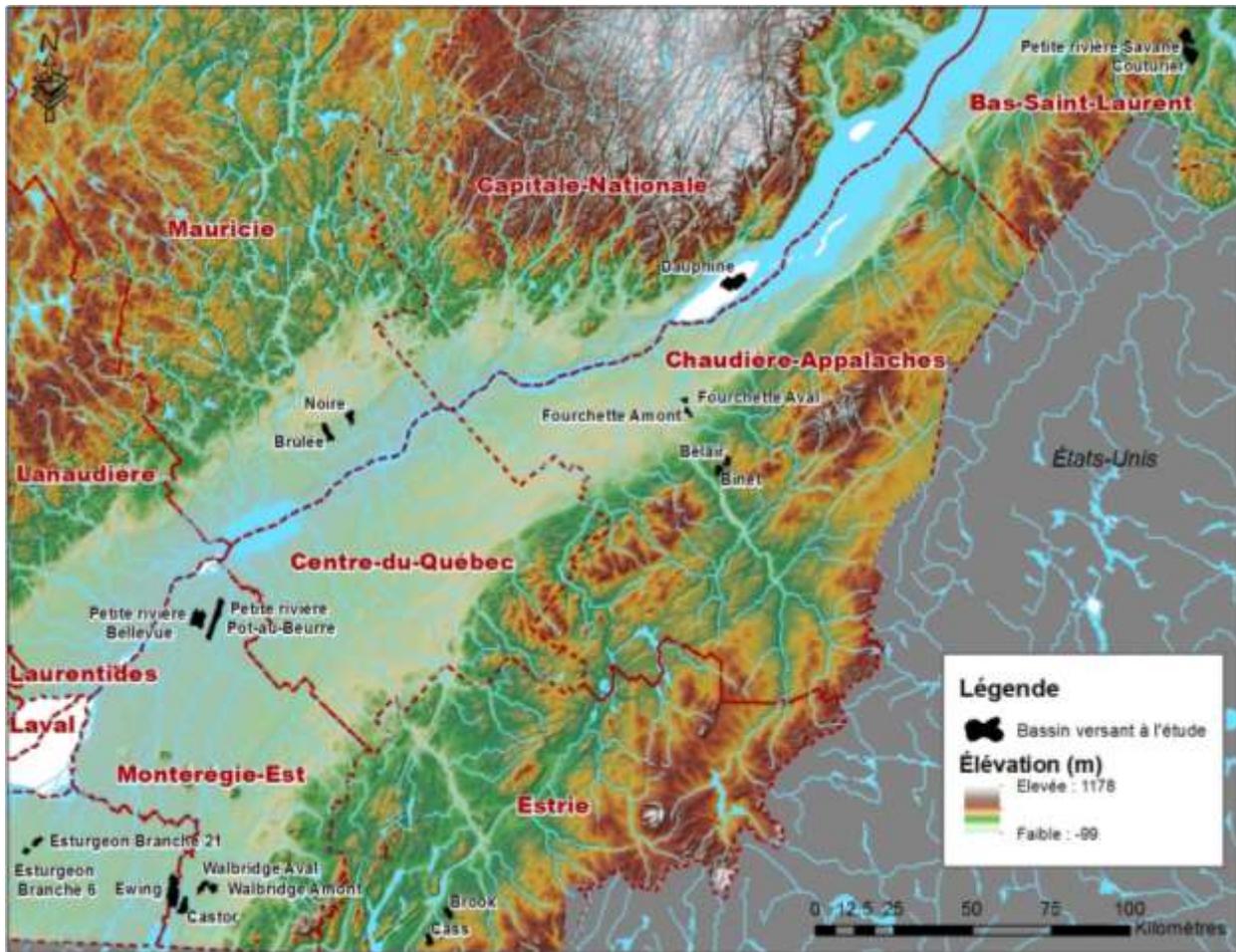


Figure 1. Localisation des bassins versants.

En support aux analyses de leurs réponses hydrologiques, plusieurs propriétés des 22 sites à l'étude ont été caractérisées, incluant la répartition des branches de cours d'eau, les pentes et le parcours de l'eau, le relief, l'occupation du territoire et les propriétés des sols. Chaque bassin à l'étude a été découpé en multiples unités de réponses hydrologiques (URH) distinctes. Celles-ci ont été définies par le croisement des distributions spatiales de l'occupation du sol, du territoire, des parcours de l'eau (micro-bassins) et des groupes hydrologiques du sol. Chacune des URH se voit ainsi attribué une combinaison unique de propriétés et d'occupation du sol. Ces caractéristiques propres à chacune des URH supportent par la suite l'attribution d'un numéro de courbe (CN pour Curve Number). Cet indice témoigne de la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol, permettant d'associer les propriétés des paysages et de l'occupation des sols à la vulnérabilité à l'émission de ruissellement de surface.

Tableau 1. Localisation et caractéristiques physiques des bassins versants à l'étude.

#	Bassin Versant	Localisation centroïde BV			A (ha)	CN 2	S (%)	LCdE (Km)	SCdE (m/km)
		Lat (°)	Long (°)	Alt (m)					
1	Aux Castors	45,131	-73,040	40	1033	78	1,30	7,42	1,3
2	Berna	45,077	73,360	42	7	91	0,48	0,56	4,8
3	Binet	46,446	-70,946	301	485	73	3,72	4,12	26,1
4	Cloutier	45,172	73,306	49	445	85	0,36	4,57	3,6
5	Dauphine	46,960	-70,900	60	2098	63	2,26	11,61	2,2
6	Esturgeon Branche 21	45,283	-73,649	50	310	83	0,84	3,98	1,2
7	Esturgeon Branche 6	45,255	-73,691	45	317	61	0,80	2,71	1,4
8	Ewing	45,170	-73,086	45	2734	78	0,86	12,96	1,2
9	Fourchette Amont	46,604	-71,085	139	338	73	0,98	3,97	5,2
10	Fourchette Aval	46,625	-71,081	119	229	56	1,25	2,24	6,6
11	Girard	45,167	73,296	43	16	87	0,51	1,44	5,1
12	Petite rivière Bellevue	45,939	-73,056	20	1800	74	0,68	7,02	0,7
13	Petite rivière Pot-au-Beurre	45,907	-72,999	26	2006	83	0,66	16,09	1,0
14	Petite rivière Savane	47,684	-69,011	279	1386	76	9,33	8,13	3,4
15	Rivière Brûlée	46,480	-72,565	60	1207	68	2,06	6,99	4,1
16	Rivière Noire	46,535	-72,479	71	671	62	2,56	5,07	2,0
17	Ruisseau Brook	45,159	-71,979	270	598	65	4,34	4,46	12,2
18	Ruisseau Cass	45,075	-72,040	354	547	64	8,23	5,07	10,2
19	Ruisseau Couturier	47,631	-68,994	277	1979	74	5,61	4,81	2,0
20	Ruisseau Turmel	46,470	-70,895	348	393	73	3,64	3,95	12,8
21	Walbridge Amont	45,199	-72,955	75	549	77	1,32	4,02	5,2
22	Walbridge Aval	45,187	-72,925	84	659	79	1,26	6,50	1,7

Lat (°) = Latitude (degrés décimaux)

Long (°) = Longitude (degrés décimaux)

Lat (°) = Altitude (m)

Distance = Distance entre la station météorologique et le centroïde du bassin versant (km)

A = superficie du bassin versant (ha)

CN 2 = numéro de courbe type II

S = pente moyenne bassin versant (%)

LCdE = longueur maximale du parcours de l'eau dans le bassin versant (km)

SCdE = pente moyenne du cours d'eau (m/km)

La génération et l'intégration des données géospatiales pour l'ensemble des 20 bassins versants à l'étude ont été réalisées à l'aide d'un système d'information géographique (SIG). Les méthodes utilisées dans la caractérisation des chevelus hydrographiques, du relief, de l'occupation des sols, et de la classification du groupe hydrologique et des CN sont présentés ci-après. Ces méthodes font appel à des données géospatiales généralement disponibles pour l'ensemble du territoire agricole québécois, et peuvent ainsi y être appliquées ailleurs dans la province.

2.1.1. Segmentation et caractérisation du réseau hydrique

La division et la caractérisation des segments de cours d'eau des bassins à l'étude ont été établies sur la base de leurs confluences, reliefs et parcours de l'eau. Les traitements des données ont tous été réalisés suivant les mêmes méthodes pour tous les bassins versants à l'étude. Les données utilisées pour identifier les segments et les nœuds d'entrée et de sortie du chevelu hydrographique incluent :

- la couche vectorielle linéaire des cours d'eau verbalisés, modifiée manuellement dans certains cas à l'aide d'orthophotos récentes, afin d'assurer la représentativité du terrain;
- les plans profils de cours d'eau du MAPAQ, qui nous renseignent sur les élévations du fond et des talus des ruisseaux (lorsque disponibles);
- un modèle numérique de terrain (MNT) représentant la topographie du bassin versant à l'étude. La précision et la résolution des MNT utilisés dans le cadre du projet varient en fonction des sources de données disponibles. Les MNT représentant avec la plus grande justesse la topographie sont ceux réalisés à partir de données GPS (Global Positioning System) et de données LiDAR. 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 modèles numériques d'élévation (MNE) au 1 : 50 000 (taille du pixel de 20 m par 20 m) provenant du gouvernement fédéral canadien (<http://www.geobase.ca/geobase/fr/data/cded/description.html>) et au 1 : 20 000 (taille du pixel de 10 m par 10 m) provenant du gouvernement provincial québécois (Base de données topographiques du Québec – BDTQ) ont également été utilisés en support à l'analyse du relief des autres bassins versants. Le tableau 2 présente, par bassin versant, les sources et les résolutions des données topographiques utilisées.

Tableau 2. Sources et résolutions des MNT utilisés.

Bassin	Source du MNT	Résolution	Donnée supplémentaire
Dauphine	Géobase 50k	20 m	
Brûlée	BDTQ 20k	10 m	
Noire	Géobase 50k	20 m	
Branche 6	LiDAR	0.5 m	
Branche 21	LiDAR	1 m	
Petite rivière Pot-au-Beurre	LiDAR	2 m	
Petite rivière Bellevue	LiDAR	1 m	
Couturier	Géobase 50k	20 m	
Petite rivière Savane	Géobase 50k	20 m	
Fourchette Amont	LiDAR	1 m	
Fourchette Aval	LiDAR	1 m	
Cass	Géobase 50k	20 m	
Brook	Géobase 50k	20 m	
Binet	Le projet	5 m	
Bélaïr	Le projet	5 m	
Walbridge Amont	BDTQ 20k	10 m	
Walbridge Aval	BDTQ 20k	10 m	
Castors	BDTQ 20k	10 m	Plan MAPAQ
Ewing	LiDAR	1 m	Plan MAPAQ

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/>) intégré à ArcGIS (ESRI) 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 (MNT et cours d'eau verbalisés);
- les cours d'eau sont encavés (creusés) dans le MNT 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 figure 2 illustre un exemple de génération des nœuds et de caractérisation des segments pour un bassin versant du réseau d'étude.

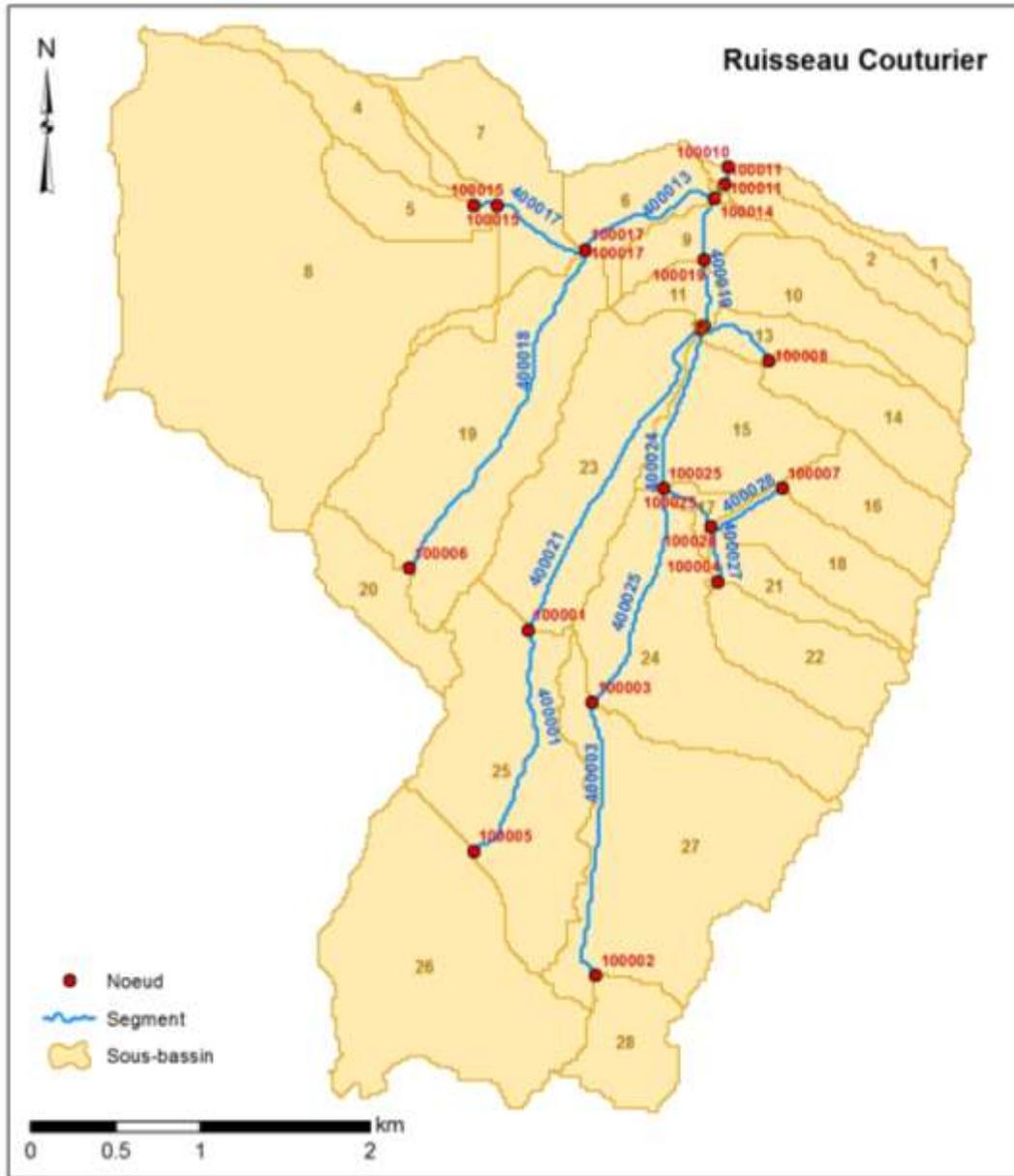


Figure 2. Localisation des nœuds et segments pour le bassin versant du ruisseau Couturier.

2.1.2. Classification de l'utilisation du territoire

La représentation de l'utilisation du territoire, croisée avec celle des séries de sol documentées dans les rapports pédologiques, délimitent les unités de réponse hydrologique (URH). Dans le cadre de cette étude, la couche d'utilisation du territoire a été créée à partir de cinq 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 3 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 4 présente l'ensemble des utilisations du sol possibles. On y retrouve notamment les secteurs urbain et agricole. La carte écoforestière permet, entre autres, d'identifier les zones agricoles non assurées.;
- le réseau hydrographique provenant de la BDTQ (Base de données topographique du Québec) (MRN, 2006) est utilisée pour représenter plus précisément les milieux humides puisque certains ne sont pas localisés sur la carte écoforestière;
- le réseau routier provenant de la BDTQ (Base de données topographique du Québec) (MRN, 2006);
- 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.

Tableau 3. Classes de cultures de la Banque de données des cultures assurées (BDCA) de la Financière agricole du Québec.

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

Tableau 4. 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

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 > milieux humides de la BDTQ > 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 mètres 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.

Le tableau 5 présente la superficie en milieux humides des bassins versants à l'étude. Seul cinq des bassins versants étudiés sont couverts en partie par des milieux humides. Les figures 3 à 7 présente la localisation de ces milieux humides à l'intérieur des bassins versants.

Tableau 5. Superficie des milieux humides par bassin versant.

Bassin	Superficie des MH (ha)	Superficie du bassin (ha)	% de la sup. des MH sur la sup. du bassin
Dauphine	4.17	2097.64	0.20
Ruisseau Couturier	9.2	1979.32	0.44
Petite rivière Savane	5.2	1385.96	0.38
Petite rivière Bellevue	22	1799.70	1.22
Ruisseau Cass	12.3	546.48	2.25

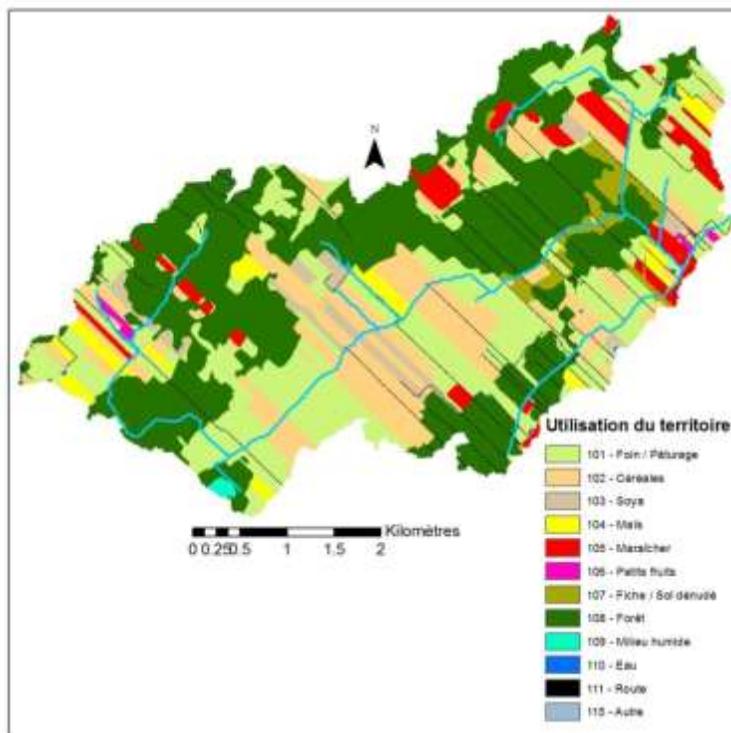


Figure 3. Utilisation du territoire et milieux humides du bassin versant Dauphine.

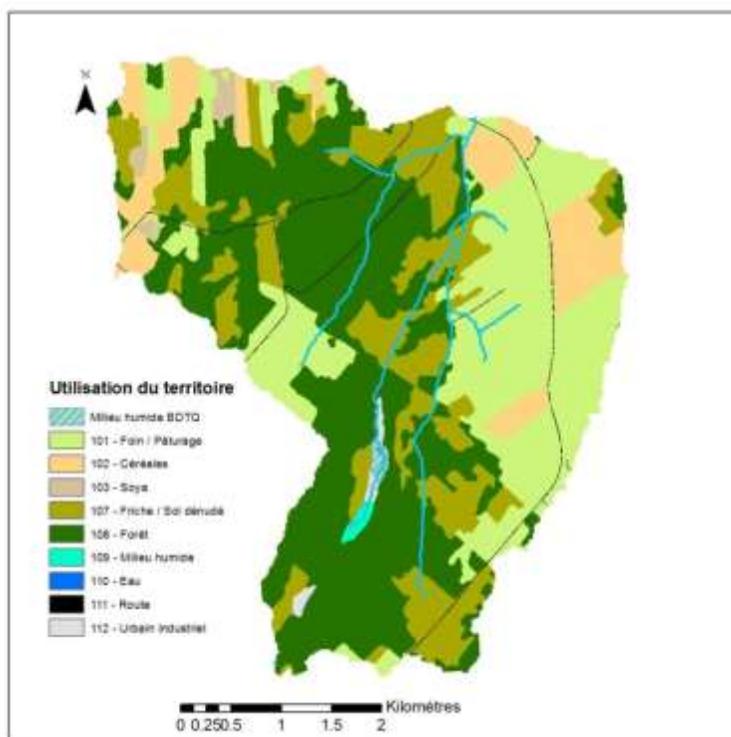


Figure 4. Utilisation du territoire et milieux humides du bassin versant Couturier.

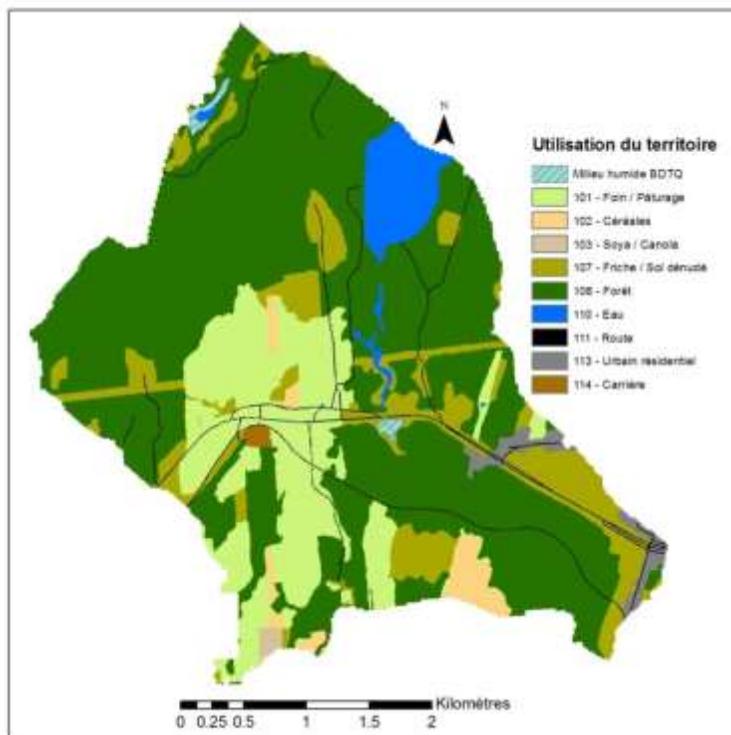


Figure 5. Utilisation du territoire et milieux humides du bassin versant de la Petite rivière Savane.

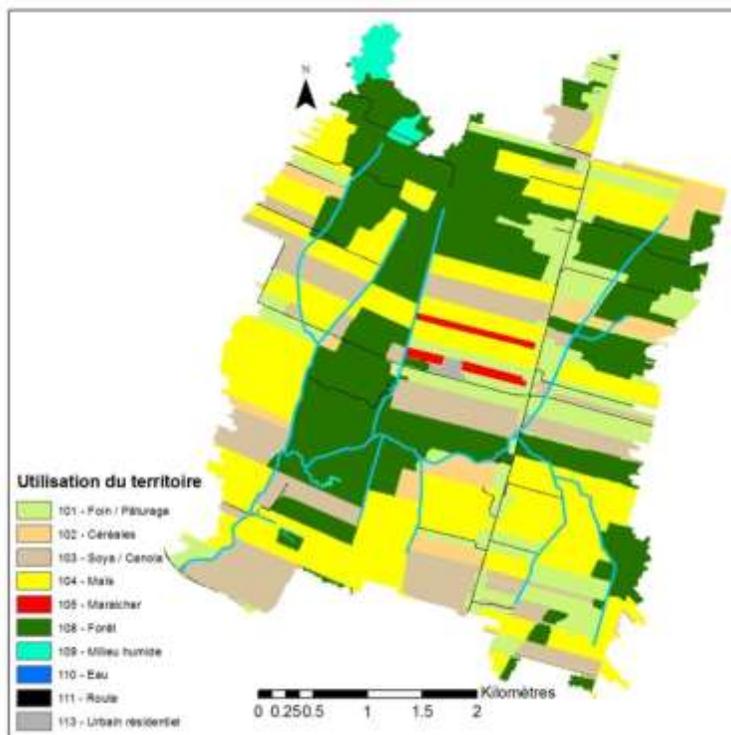


Figure 6. Utilisation du territoire et milieux humides du bassin versant de la Petite rivière Bellevue.

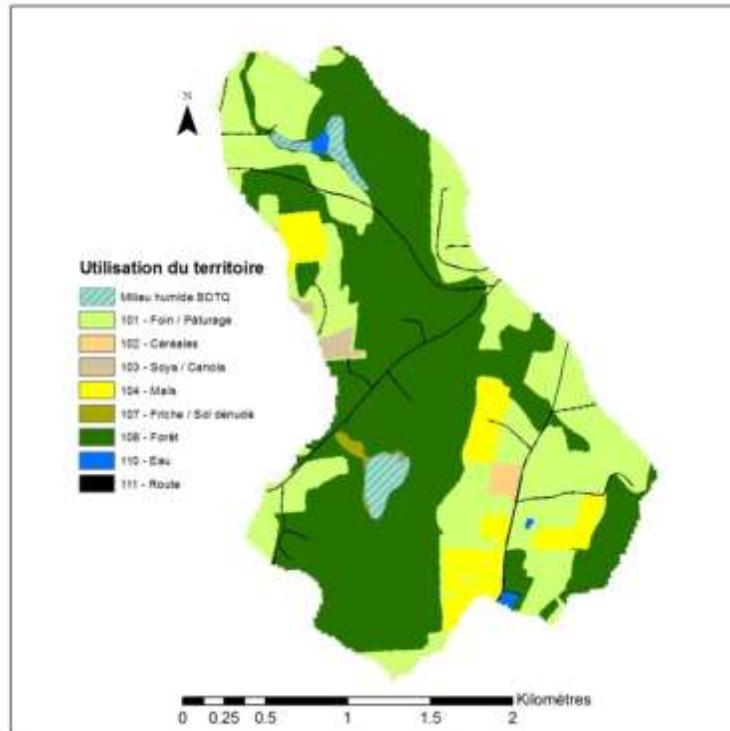


Figure 7. Utilisation du territoire et milieux humides du bassin versant Cass.

2.1.3. Indexation des groupes hydrologique du sol

Un groupe hydrologique a été attribué à chaque unité cartographique (polygone) de la couche d'information pédologique (polygones de séries de sols) des bassins versants à l'étude. Cette indexation des URH des bassins à l'étude a mis à profit la récente classification des séries de sol du Québec selon leur groupe hydrologique mise à jour dans le cadre du projet de *Mise à jour des normes et procédures de conception d'ouvrages hydro-agricoles dans un contexte de changements climatiques* (Michaud et al., 2013; Gagné et al., 2013).

De manière succincte, les groupes hydrologiques des sols se définissent comme suit :

- Groupe A : Ce groupe comprend les sols possédant un taux d'infiltration élevé même lorsqu'ils sont saturés en eau. Typiquement, la texture de ces sols est grossière et ils sont très rapidement à rapidement drainés. Ces sols possèdent une conductivité hydraulique élevée qui est associée à un faible potentiel de ruissellement.
- Groupe B : Ce groupe inclut les sols possédant un taux d'infiltration modéré lorsqu'ils sont saturés. Typiquement, la texture de ces sols, bien à modérément bien drainés, varie de fine à moyennement grossière. Ces sols présentent un taux de transmission de l'eau et un potentiel de ruissellement modérément faible.
- Groupe C : Ce groupe de sols est caractérisé par un taux d'infiltration lent, possédant une couche qui empêche le mouvement de l'eau vers le bas ou ayant typiquement une texture très fine. Ces sols présentent une conductivité hydraulique lente et ils sont associés à un potentiel modérément élevé de ruissellement.

- Groupe D : Ce groupe comprend les sols ayant un taux d'infiltration très lent lorsqu'ils sont saturés. Le groupe D comprend principalement des argiles qui sont pourvues d'une nappe d'eau près de la surface. Ces sols présentent un potentiel élevé de ruissellement.

À l'instar de presque toutes les régions agricoles du Québec, les bassins versants à l'étude profitent d'une cartographie de leurs sols (IRDA, 2008). Les polygones des cartes pédologiques sont fréquemment composés de plusieurs séries de sols, selon des proportions variables. Un polygone de sols peut ainsi regrouper jusqu'à quatre séries de sol différentes. L'attribution, dans le cadre de cette étude, des groupes hydrologiques aux polygones de sol a été réalisée en tenant compte de cette disparité suivant l'application de la méthode suivante :

- La couche pédologique vectorielle a d'abord été coupée aux limites de chacun des bassins à l'étude.
- 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, selon la normalisation utilisée lors de la numérisation vectorielle des cartes de sols originales, 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 %. 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.

2.1.4. Délimitation des unités de réponse hydrologique (URH) et attribution des numéros de courbe (CN)

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 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 6 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 bassins à l'étude, une moyenne pondérée de la valeur du 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 8 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 9 illustre la distribution spatiale des valeurs de CN résultantes pour l'ensemble des URH du même bassin versant. Les numéros de courbe moyens pondérés pour les superficies des vingt bassins versants à l'étude sont présentés à l'intérieur du tableau 1. Une caractérisation plus détaillée (utilisation du sol, groupes hydrologiques, CN) des bassins versants à l'étude est présentée en annexe 2.

Tableau 6. CN (de type II) 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 22 sites expérimentaux 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

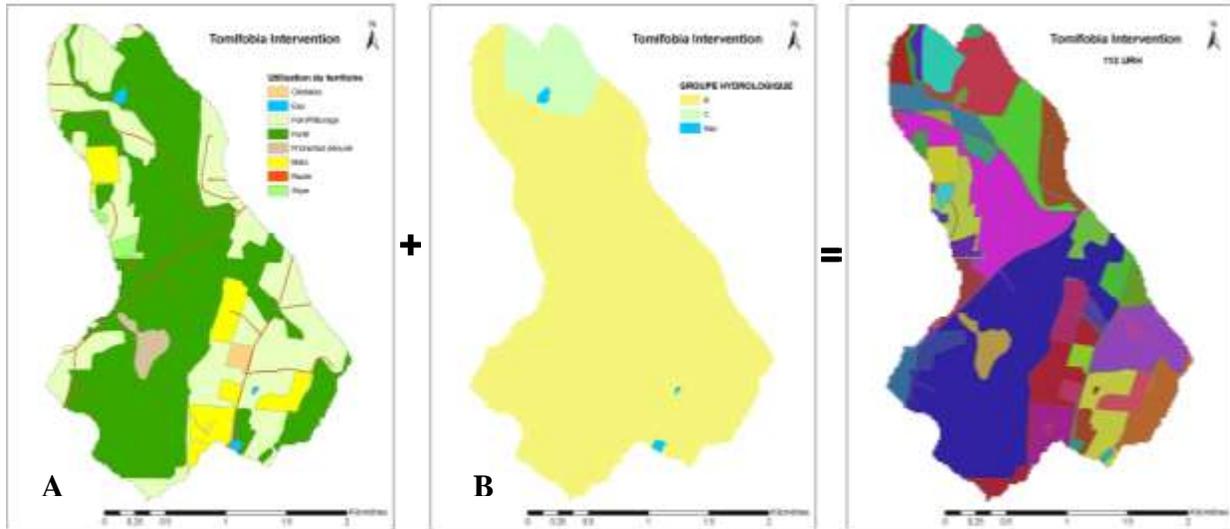


Figure 8. Formation des URH pour le bassin du ruisseau Cass à partir de l'utilisation du territoire et des groupes hydrologiques.

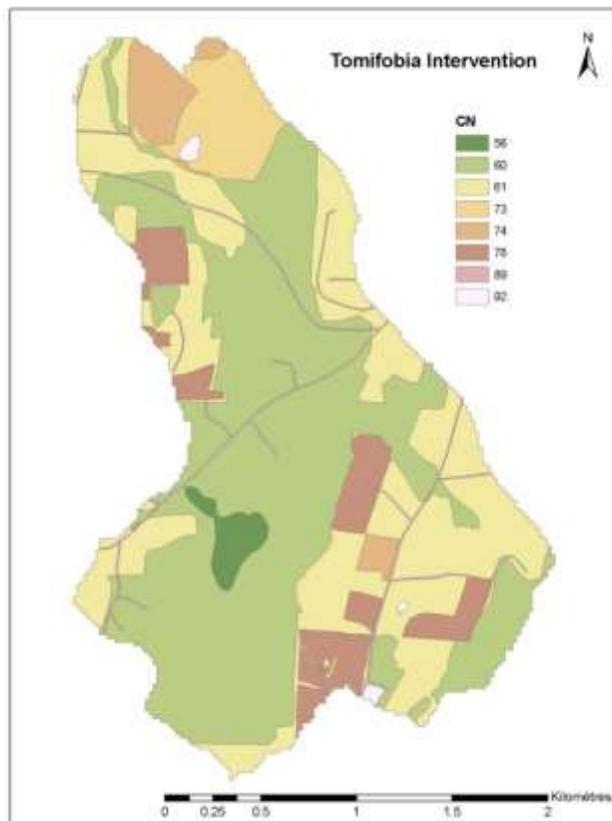


Figure 9. Spatialisation des numéros de courbe du bassin du ruisseau Cass.

2.2. Description des séries de données hydrométriques et météorologiques

Les analyses des hydrogrammes propres à chacun des sites à l'étude ont requis l'intégration de banques de données météorologiques et hydrométriques. Le tableau 7 présente les séries chronologiques de données hydrométriques. À chaque bassin versant à l'étude correspond une station de jaugeage. La plupart des bassins à l'étude ont aussi fait l'objet d'un suivi de la conductivité électrique, utilisé dans la séparation des hydrogrammes suivant la méthode géochimique. Le tableau 7 présente la localisation des stations de jaugeage ainsi que des informations sur les dates des suivis. Les données hydrométriques ont été fournies par M. Jacques Gallichand (2012), professeur à l'Université Laval (Binet et Turmel); Mikaël Guillou du MAPAQ (Berna, Cloutier et Girard), le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune, et des Parcs du Québec MDDEFP (Dauphine); et par l'IRDA pour tous les autres bassins (Michaud et al., 2009a; Michaud et al., 2009b; Michaud et al., 2012).

Le tableau 8 présente les séries chronologiques de données météorologiques utilisées dans le cadre du présent projet. La localisation ainsi que les années de suivi météorologiques des stations sont présentées. À chaque bassin versant à l'étude a été associée une ou plusieurs stations météorologiques. Le tableau 9 fait le lien entre les bassins à l'étude et les stations météorologiques utilisées. Les distances entre les stations météorologiques et les centroïdes des bassins sont également rapportées dans ce tableau. Conscient du fait que certaines stations météorologiques étaient relativement plus éloignées des centroïdes des bassins versants à l'étude, l'effet du recours à des séries distinctes de données météorologiques sur les paramètres hydrologiques estimés aux exutoires a été évalué sur certains sites où nous disposons de plusieurs stations météo. Les résultats de cette évaluation sommaire sont reproduits en annexe 6. Les données météorologiques utilisées dans le cadre du projet proviennent de Jacques Gallichand de l'Université Laval (Binet et Turmel), du MDDEFP (Henryville, Sainte-Victoire-2, François, Saint-Narcisse, Lacolle et Saint-Blaise), et de l'IRDA (Estrugeon, Madawaska, Saint-Lambert, et Tomifobia).

Tableau 7. Description des stations de jaugeage.

#	Station de Jaugeage	Localisation de la station			Données de débit				Données de conductivité électrique		
		Lat. (°)	Long. (°)	Alt.(m)	Début	Fin	Années	Pas (min)	Début	Fin	Années
1	Aux Castors	45,11	-73,07	44,2	2001-12	2013-04	11,3	15	2005-03	2011-11	6,7
2	Berna				2010-05	2012-11	2,5	15			
3	Binet	46,42	-70,94	304,1	1994-02	1996-11	2,8	5			
4	Cloutier				2009-06	2012-11	3,4	10-15			
5	Dauphine	46,97	-70,86	48,0	1997-08	2013-08	16,0	15			
6	Esturgeon Branche 21	45,28	-73,65	51,0	2009-09	2011-11	2,2	15	2009-09	2011-11	2,2
7	Esturgeon Branche 6	45,26	-73,70	46,1	2009-09	2011-11	2,1	15	2009-09	2011-11	2,1
8	Ewing	45,13	-73,08	45,6	2001-11	2012-12	11,2	15	2007-06	2011-11	4,4
9	Fourchette Amont	46,60	-71,08	142,1	2002-01	2012-12	11,0	15	2005-04	2012-11	7,6
10	Fourchette Aval	46,63	-71,10	115,8	2002-01	2012-12	11,0	15			
11	Girard				2010-06	2012-11	2,4	15			
12	Petite rivière Bellevue	45,92	-73,09	20,6	2009-05	2013-04	3,9	15	2009-05	2012-11	3,5
13	Petite rivière Pot-au-Beurre	46,00	-72,97	22,7	2009-06	2013-04	3,9	15	2009-06	2012-11	3,5
14	Petite rivière Savane	47,66	-68,98	327,1	2009-11	2011-09	1,9	15	2009-11	2011-09	1,9
15	Rivière Brûlée	46,46	-72,54	71,5	2009-10	2011-11	2,1	15			
16	Rivière Noire	46,51	-72,47	75,1	2009-10	2011-11	2,1	15	2009-10	2011-11	2,1
17	Ruisseau Brook	45,17	-71,99	293,8	2009-09	2011-10	2,0	15	2009-09	2011-10	2,0
18	Ruisseau Cass	45,09	-72,06	370,7	2009-09	2011-10	2,0	15	2009-09	2011-10	2,0
19	Ruisseau Couturier	47,65	-68,98	282,8	2009-11	2011-09	1,9	15	2009-11	2011-09	1,9
20	Ruisseau Turmel	46,44	-70,91	343,5	1994-02	1996-11	2,8	5			
21	Walbridge Amont	45,19	-72,94	86,8	2001-11	2006-11	5,0	15	2005-03	2006-11	1,6
22	Walbridge Aval	45,17	-72,98	71,7	2001-11	2006-11	5,0	15	2005-03	2006-11	1,6
Total années de données							108,5				43,2

Lat. (°)= Latitude (degrés décimaux)

Long. (°)= Longitude (degrés décimaux)

Alt. (m)= Altitude (°degrés décimaux)

Tableau 8. Description des stations météorologiques.

N	Station météorologique	Localisation de la station			Données météorologiques			
		Lat. (°)	Long. (°)	Alt. (m)	Début	Fin	Années	Pas (min)
1	Esturgeon	45,26	-73,7	46	2009-12	2010-08	0,6	15
					2010-08	2010-09	0,1	5
					2010-09	2011-12	1,3	30
2	Binet	46,42	-70,94	258	1994-02	1996-11	2,8	10
3	Gagnon	45,13	-73,06	35	2001-09	2006-06	4,7	15
4	Madawaska	47,65	-68,98	230	2009-10	2011-09	1,9	15
					2011-09	2011-12	0,3	30
5	Saint-Lambert	46,61	-71,18	118	2004-01	2009-12	6,0	10
6	Tomifobia	45,09	-72,06	304	2010-06	2011-10	1,3	15
					2011-10	2011-12	0,2	30
7	Turmel	46,44	-70,91	301	1994-02	1996-11	2,8	10
8	Henryville	45,12	-73,17	37	2008-08	2012-11	4,2	1
9	Sainte-Victoire-2	45,96	-73,08	19	2009-05	2012-11	3,4	1
10	François	47,02	-70,86	54	1997-01	2013-06	16,5	60
11	Saint-Narcisse	46,54	-72,43	52	2010-08	2012-11	2,2	1
12	Lacolle	45,08	73,36	42	2010-05	2012-11	2,5	*
13	Saint-Blaise	45,17	73,29	49	2009-06	2012-11	3,4	*
14	Saint-Blaise	45,17	73,29	43	2010-06	2012-11	2,4	*
Total années de données							50,7	

Lat. (°) = Latitude (degrés décimaux)

Long. (°) = Longitude (degrés décimaux)

Alt. (m) = Altitude (°degrés décimaux)

* = mesure de chaque pluie de 0.2 mm

Tableau 9. Stations de jaugeage et météorologiques par bassin versant.

#	Bassin versant, station de jaugeage	Station météorologique	Données analysées		Distance (km)
			Début	Fin	
1	Aux Castors	Gagnon	2001-09	2007-10	1,9
		Henryville	2008-08	2012-11	10,2
2	Berna	Lacolle	2010-05	2012-11	0,5
3	Binet	Binet	1994-05	1996-11	2,9
4	Cloutier	Saint-Blaise	2009-06	2012-11	1,3
5	Dauphine	François	1997-08	2013-06	5,5
6	Esturgeon Branche 21	Esturgeon	2010-01	2011-11	4,8
7	Esturgeon Branche 6	Esturgeon	2010-01	2011-11	0,9
8	Ewing	Gagnon	2001-11	2007-10	5,2
		Henryville	2008-08	2012-11	8,1
9	Fourchette Amont	St_Lambert	2004-01	2012-12	6,8
10	Fourchette Aval	St_Lambert	2004-01	2012-12	6,0
11	Girard	Saint-Blaise	2010-06	2012-11	0,7
12	Petite rivière Bellevue	Sainte-Victoire-2	2009-05	2012-11	3,2
13	Petite rivière Pot-au-Beurre	Sainte-Victoire-2	2009-06	2012-11	8,8
14	Petite rivière Savane	Madawaska	2009-11	2011-09	4,4
15	Rivière Brûlée	Saint-Narcisse	2010-08	2011-11	11,9
16	Rivière Noire	Saint-Narcisse	2010-08	2011-11	3,4
17	Ruisseau Brook	Tomifobia	2010-06	2011-10	10,0
18	Ruisseau Cass	Tomifobia	2010-06	2011-10	2,3
19	Ruisseau Couturier	Madawaska	2009-11	2011-09	2,4
20	Ruisseau Turmel	Turmel	1994-05	1996-11	3,5
21	Walbridge Amont	Gagnon	2001-11	2006-11	11,8
22	Walbridge Aval	Gagnon	2001-11	2006-11	7,7

Distance = Distance entre la station météorologique et le centroïde du bassin versant (km)

2.3. Développement de l'utilitaire d'analyse hydrologique VisuHydro

L'ensemble des analyses hydrologiques dans le cadre de cette étude a été supporté par l'utilitaire d'analyse hydrologique VisuHydro 5.0. VisuHydro est un logiciel permettant de visualiser et d'analyser les hydrogrammes de ruissellement. Il est écrit en langage de programmation Python et a été développé sous la plate-forme Linux. VisuHydro peut toutefois être utilisé tant avec Linux qu'avec Windows. Le logiciel dispose d'une interface visuelle permettant le marquage, la séparation manuelle et le calcul des propriétés individuelles des hydrogrammes (figure 10).

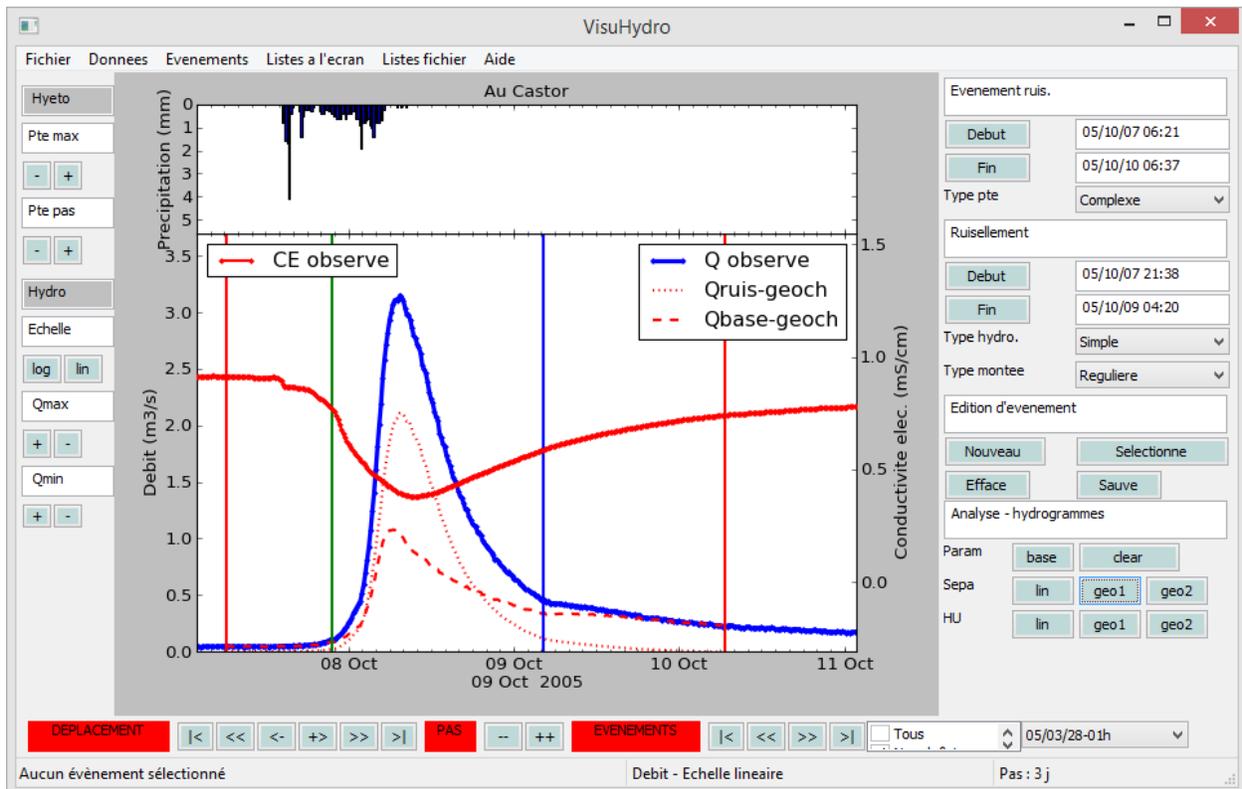


Figure 10. Interface visuelle du logiciel VisuHydro permettant la séparation des hydrogrammes.

Une version originale de cet utilitaire a été développée par Lagacé (2012b) dans le cadre du projet *Mise à jour des normes et procédure de conception d'ouvrages hydro-agricoles dans le cadre des changements climatiques* (Michaud et al., 2013). La version originale de l'utilitaire permettait de réaliser les tâches suivantes :

- Marquage du début et de la fin de chacun des évènements qui ont produit un ruissellement significatif;
- Classification de chacun des évènements en fonction du type d'hydrogramme (simple, unitaire, multipic, complexe ou non identifié), et du type de montée (régulière ou irrégulière);

- Détermination de la hauteur de précipitation (H_R), de la durée de précipitation, du débit maximum et de la hauteur de précipitation détenue (hauteur d'eau de précipitation retenue précédent l'émission du ruissellement) pour chaque événement sélectionné;
- Séparation de chaque hydrogramme en sa composante d'écoulement de base et d'hydrogramme de ruissellement (méthode manuelle);
- Détermination à partir des hydrogrammes de ruissellement classés simples ou unitaires 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); et ce à partir de la fonction de densité de probabilité gamma à trois paramètres;
- Détermination de la hauteur de ruissellement et du débit de pointe pour tous les autres types d'hydrogrammes;
- Réalisation des analyses statistiques de distribution 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).

Des fonctions supplémentaires ont été développées dans le cadre du présent projet et intégrées à l'outil. Ces nouvelles fonctions incluent la détermination des précipitations antécédentes; la séparation des précipitations totales en deux portions, soit 1) avant le début du ruissellement et 2) ruisselantes; et enfin l'analyse du signal de conductivité électrique permettant la séparation de l'hydrogramme en ses composantes d'écoulement de base et de ruissellement de surface.

Les fonctionnalités de VisuHydro 5.0 sont présentées en détails dans le manuel de l'utilisateur annexé au présent rapport.

2.4. Analyses hydrologiques

En premier lieu, les réponses hydrologiques des vingt-deux sites à l'étude, lesquelles sont répartis sur le territoire agricole du Québec, du Témiscouata jusqu'à l'ouest de la Montérégie, ont été analysés suivant une méthode semi-empirique mettant à profit l'étude de près de 1 500 hydrogrammes distincts supportée par le logiciel VisuHydro développé spécifiquement à cette fin (Lagacé, 2012b). Les séries de données hydrométriques et météorologiques à la base des analyses hydrologiques des hydrogrammes des vingt-deux bassins versants à l'étude sont sommairement décrites à la section 2.2 aux tableaux 7 à 9.

En seconde étape, les propriétés propres à chacun des hydrogrammes déterminées par VisuHydro, incluant la hauteur de ruissellement, les paramètres de forme, le temps de montée et les débits de pointe, ont été mises en relation avec les propriétés physiques des bassins à l'étude de façon à expliquer leur variabilité. Les propriétés des hydrogrammes observés ont également été comparées aux prédictions de diverses méthodes couramment utilisées en milieu de pratique au Québec ou rapportées dans la littérature.

Enfin, les différentes propriétés des hydrogrammes ont été mises à profit dans la validation d'une méthode de prédiction des débits de pointe inspirée de la méthode rationnelle. Cette dernière est adaptée aux banques de données agrométéorologiques (IDF) et pédologiques récemment mises à la disposition des intervenants québécois en aménagement hydro-agricole.

Les sections suivantes présentent successivement les résultats de ces analyses hydrologiques pertinentes aux temps de montée, aux paramètres de forme de l'hydrogramme, aux hauteurs de ruissellement et enfin à la prédiction du débit de pointe. L'ensemble de ces analyses hydrologiques découlent d'une procédure de séparation manuelle des hydrogrammes en ses composantes de ruissellement de surface et d'écoulement souterrain. À titre prospectif, ces paramètres hydrologiques ont également été générés sur la base d'hydrogrammes séparés suivant une méthode géochimique. La méthode met alors à profit le signal de conductivité électrique, disponible pour la plupart des sites à l'étude, de même que les nouvelles fonctionnalités de VisuHydro développées dans le cadre de ce projet.

2.4.1. Temps de montée t_p (h)

Le temps de montée (t_p) 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, 601 hydrogrammes de type simple ont été étudiés et leur temps de montée a été estimé à l'intérieur de VisuHydro. Un hydrogramme a été classifié simple, si et uniquement si, sa forme et sa montée sont régulières 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 (t_c) 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 ». Roussel et al. (2006) présentent une revue de littérature des différents paramètres de temps associés aux hydrogrammes et illustrent les difficultés associées aux divers termes présentant 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 (t_p) 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 Roussel et al. (2006), la relation est influencée par la forme de l'hydrogramme $t_c = [1,15-1,82] t_p$. Le USDA-NRCS (2007) suggère $t_p = 0,6 t_c$ ou $t_c = 1,67 t_p$. Avec certaines autres définitions du « lagtime », les temps de concentration (t_c) et temps de montée sont très semblables. Ces contradictions ne pouvant être résolues dans le cadre de ce projet, certaines définitions ont été privilégiées dans une perspective de détermination des débits de crue. Comme tous les hydrogrammes unitaires, incluant celui du USDA-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.

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 bassins versants à l'étude. Ces méthodes incluent :

- 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 intrants 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 ministère des Transport (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.

L'étude des temps de montée (observés) et des temps de concentration (modélisés) s'est appuyée sur l'analyse hydrologique de 601 hydrogrammes de type simple avec une montée régulière et colligés aux exutoires des 21 bassins versants étudiés (19 bassins versants et 2 parcelles). Le bassin Girard n'avait pas d'hydrogrammes simples. Le tableau 10 présente un sommaire des résultats des temps de montée observés pour chacun des bassins versants à l'étude, tels que déduits directement des hydrogrammes. Le nombre d'hydrogrammes concerné, le temps de montée moyen, l'écart-type, le coefficient de variation et le coefficient de Nash-Sutcliffe sont présentés dans ce tableau.

Tableau 10. Résumé des temps de montée observés - tp (h)

Temps de montée tp (h)						
#	Bassin Versant	N	μ	σ	Cv	NS
1	Aux Castors	71	6,94	2,36	0,34	0,94
2	Berna	6	0,48	0,59	1,24	0,84
3	Binet	34	5,83	3,51	0,60	0,89
4	Cloutier	11	6,83	3,72	0,54	0,88
5	Dauphine	177	11,86	4,80	0,40	0,92
6	Esturgeon Branche 21	13	6,22	3,59	0,58	0,96
7	Esturgeon Branche 6	3	13,89	7,33	0,53	0,90
8	Ewing	67	9,88	4,46	0,45	0,94
9	Fourchette Amont	41	5,42	2,54	0,47	0,92
10	Fourchette Aval	44	3,79	1,88	0,50	0,92
11	Petite rivière Bellevue	18	12,12	6,07	0,50	0,87
12	Petite rivière Pot-au-Beurre	8	11,91	7,28	0,61	0,86
13	Petite rivière Savane	3	13,18	2,73	0,21	0,88
14	Rivière Brûlée	2	12,18	2,03	0,17	0,75
15	Rivière Noire	15	5,89	3,04	0,52	0,77
16	Ruisseau Brook	10	4,29	2,22	0,52	0,90
17	Ruisseau Cass	6	8,46	2,30	0,27	0,95
18	Ruisseau Couturier	6	13,78	7,93	0,57	0,81
19	Turmel	18	3,22	1,65	0,51	0,90
20	Walbridge Amont	26	7,14	2,36	0,33	0,94
21	Walbridge Aval	22	9,95	3,53	0,36	0,95
Moyenne		29	8,25	3,61	0,49	0,89
Minimum		2	0,48	0,59	0,17	0,75
Maximum		177	13,89	7,93	1,24	0,96
total général		601				

N = Nombre d'événements

μ = Moyenne

σ = Écart type

Cv = Coefficient de variation

NS = Coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe

Les valeurs moyennes du temps de montée observé varient de 0,48 heures à 13,9 heures avec un coefficient de variation (Cv) variant de 0,17 à 1,24 (moyenne de 0,49). 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 acceptable.

Les longueurs d'écoulement et les pentes des cours d'eau ont été déterminées à partir des données géospatiales décrivant les nœuds et les segments des cours d'eau ainsi que la topographie (section 2.1). Les CN moyens de type II (conditions d'humidité des sols moyennes) et III (sols humides) ont été utilisés. Un facteur est appliqué au CN de type II pour calculer le CN de type III lequel représente des sols en conditions d'humidité plus grandes.

Pour chacun des bassins versants à l'étude, le tableau 11 présente les différents paramètres requis (aire (A), longueur d'écoulement (L), pente moyenne (S), numéro de courbe (CN) moyens de type II et III) et les temps de concentration (tc) selon les diverses méthodes retenues dans l'étude,

soit Kirpich, Mockus, SCS Lag et Bransby-Williams. Les temps de montée observés sont aussi présentés.

Tableau 11. Sommaire de l'estimation des temps de concentration - Tc (h).

#	Bassin	Valeurs observées						tc modélisés (h)					
		CN2	CN3	L (m)	S (m/m)	A (ha)	tp (h)	Kirp	Mo2	Lag2	Mo3	Lag3	Bra
1	Aux Castors	78	90	7418	0,0013	1033	6,9	4,0	15,6	20,1	5,8	13,3	5,3
2	Berna	91	97	560	0,0048	7	0,5	0,3	0,3	0,8	0,2	0,6	0,5
3	Binet	73	88	4117	0,0261	485	5,8	0,8	3,1	3,2	1,0	2,0	1,7
4	Cloutier	85	94	4570	0,0036	445	6,8	1,9	3,7	6,5	1,5	4,5	2,9
5	Dauphine	63	81	11607	0,0022	2098	11,9	4,6	45,9	33,4	13,7	20,1	6,9
6	Esturgeon Branche 21	83	92	3977	0,0012	310	6,2	2,6	6,8	10,8	3,0	7,7	3,3
7	Esturgeon Branche 6	61	79	2708	0,0014	317	13,9	1,8	20,2	13,7	6,2	8,4	2,1
8	Ewing	78	90	12957	0,0012	2734	9,9	6,4	25,3	32,6	9,4	21,5	8,5
9	Fourchette Amont	73	88	3973	0,0052	338	5,4	1,5	6,7	7,0	2,1	4,4	2,4
10	Fourchette Aval	56	75	2241	0,0066	229	3,8	0,9	10,8	6,2	3,3	3,7	1,3
11	Petite rivière Bellevue	74	88	7019	0,0007	1800	12,1	4,9	26,8	29,4	9,1	18,7	5,4
12	Petite rivière Pot-au-Beurre	83	93	16085	0,0010	2006	11,9	8,1	22,8	36,4	9,0	24,6	11,3
13	Petite rivière Savane	76	89	8133	0,0034	1386	13,2	3,0	11,9	14,2	4,2	9,2	4,7
14	Rivière Brûlée	68	85	6986	0,0041	1207	12,2	2,5	15,9	14,1	4,9	8,6	3,9
15	Rivière Noire	62	80	5068	0,0020	671	5,9	2,5	26,2	18,5	8,0	11,2	3,5
16	Ruisseau Brook	65	82	4461	0,0122	598	4,3	1,1	8,0	6,2	2,5	3,8	2,1
17	Ruisseau Cass	64	81	5072	0,0102	547	8,5	1,4	10,3	7,8	3,3	4,8	2,6
18	Ruisseau Couturier	74	88	4814	0,0020	1979	13,8	2,4	11,4	12,7	4,0	8,2	3,0
19	Ruisseau Turmel	73	88	3952	0,0128	393	3,2	1,0	4,2	4,5	1,3	2,8	2,0
20	Walbridge Amont	77	90	4016	0,005	549	7,1	1,5	5,1	6,3	1,8	4,1	2,3
21	Walbridge Aval	79	91	6504	0,002	659	9,9	3,3	11,4	15,3	4,1	10,0	4,6
Mmoyenne		73	87	6011	0,0052	942	8,2	2,7	13,9	14,3	4,7	9,2	3,8
Écart type		9	6	3690	0,0060	763	3,9	2,0	10,9	10,6	3,5	6,9	2,6
Minimum		56	75	560	0,0007	7	0,5	0,3	0,3	0,8	0,2	0,6	0,5
Maximum		91	97	16085	0,0261	2734	13,9	8,1	45,9	36,4	13,7	24,6	11,3

tc = temps de concentration (h)

CN2 = numéro de courbe de type II

CN3 = numéro de courbe de type III

S = pente moyenne de l'écoulement (m/m)

A= superficie du bassin versant (ha)

tp = temps de montée (h)

L= longueur maximale du parcours de l'eau (m)

Kirp = méthode de Kirpich

Mo2 = méthode de Mockus avec CN type II

Lag2 = méthode SCS Lag avec CN type II

Mo3 = méthode de Mockus avec CN type III

Lag3 = méthode SCS Lag avec CN type III

Bra = méthode de Bransby-Williams

Puisque les temps de montée et de concentration sont différents d'un bassin versant à l'autre, le tableau 12 présente le ratio tc/tp pour les différentes méthodes et chacun des bassins versants. Un ratio se rapprochant de 1,0 signifie une bonne prédiction.

Tableau 12. Sommaire des ratios entre les temps de montée observés et les temps de concentration estimés.

#	Bassin Versant	Ratio tc / tp					
		Kirp	Mo2	Lag2	Mo3	Lag3	Bra
1	Aux Castors	0,58	2,24	2,89	0,83	1,91	0,76
2	Berna	0,70	0,72	1,76	0,36	1,31	1,06
3	Binet	0,14	0,53	0,55	0,17	0,34	0,30
4	Cloutier	0,27	0,54	0,96	0,23	0,66	0,42
5	Dauphine	0,39	3,87	2,81	1,16	1,70	0,59
6	Esturgeon Branche 21	0,41	1,09	1,74	0,48	1,24	0,52
7	Esturgeon Branche 6	0,13	1,45	0,99	0,45	0,60	0,15
8	Ewing	0,64	2,56	3,30	0,95	2,18	0,86
9	Fourchette Amont	0,27	1,23	1,30	0,39	0,80	0,44
10	Fourchette Aval	0,23	2,85	1,63	0,86	0,99	0,35
11	Petite rivière Bellevue	0,40	2,21	2,43	0,75	1,54	0,44
12	Petite rivière Pot-au-Beurre	0,68	1,92	3,06	0,75	2,07	0,95
13	Petite rivière Savane	0,23	0,91	1,08	0,32	0,70	0,35
14	Rivière Brûlée	0,20	1,31	1,16	0,40	0,71	0,32
15	Rivière Noire	0,43	4,46	3,14	1,36	1,91	0,59
16	Ruisseau Brook	0,27	1,86	1,46	0,59	0,90	0,50
17	Ruisseau Cass	0,16	1,22	0,92	0,39	0,57	0,30
18	Ruisseau Couturier	0,18	0,83	0,92	0,29	0,59	0,21
19	Ruisseau Turmel	0,32	1,32	1,39	0,42	0,86	0,61
20	Walbridge Amont	0,21	0,72	0,89	0,25	0,57	0,32
21	Walbridge Aval	0,33	1,15	1,54	0,41	1,01	0,46
Moyenne		0,34	1,67	1,71	0,56	1,10	0,50
Écart type		0,18	1,02	0,92	0,31	0,61	0,27
Maximum		0,70	3,87	3,30	1,16	2,18	1,06
Minimum		0,13	0,53	0,55	0,17	0,34	0,15
Coefficient de variation		0,52	0,61	0,54	0,55	0,55	0,55
Coefficient de détermination (R²)		0,32	0,32	0,38	0,36	0,37	0,30

tp = temps de montée (h)

tc = temps de concentration (h)

Kirp = méthode de Kirpich

Mo2 = méthode de Mockus avec CN type II

Lag2 = méthode SCS Lag avec CN type II

Mo3 = méthode de Mockus avec CN type III

Lag3 = méthode SCS Lag avec CN type III

Bra = méthode de Bransby-Williams

La méthode du SCS Lag avec un CN de type III présente le ratio le plus près de l'unité (1,10), mais montre un faible coefficient de détermination ($R^2 = 0,37$). La méthode de SCS Lag avec un CN de type II présente un coefficient de détermination marginalement supérieur ($R^2 = 0,38$), mais un ratio de 1,71. Les coefficients de déterminations (R^2) entre les temps de montée observés et les temps de concentration prédits par les différentes méthodes demeurent relativement faibles ($R^2 < 0,39$). La méthode de Mockus avec un CN de type III ou de type II montre une performance inférieure à la méthode du SCS Lag. Les méthodes de Bransby-Williams et Kirpich

sous-estiment de façon importante les temps de montée avec respectivement des ratios de 0,50 et 0,34. Il faut signaler que les calculs ont été effectués avec des données géospatiales de précisions diverses et qu'aucun relevé sur le terrain n'a été effectué en ce qui concerne les longueurs d'écoulement et les pentes. Les résultats sont donc fonction de la précision des données géospatiales disponibles.

Pour les dix bassins versants étudiés dans la première étude «Mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydro-agricoles dans un contexte de changements climatiques» (Michaud et al., 2013), la méthode du SCS Lag avec un CN de type III présentait aussi le ratio le plus près de l'unité (1,02), mais montrait un très faible coefficient de détermination ($R^2 = 0,21$). Les méthodes de Bransby-Williams et Kirpich présentaient un meilleur coefficient de détermination ($R^2 = 0,35$ et $R^2 = 0,28$) mais sous-estimaient grandement le temps de montée avec respectivement des ratios de 0,47 et 0,31.

Devant les faibles coefficients de détermination ($R^2 < 0,38$) et les coefficients de variation élevés ($Cv > 0,52$), une approche de régression a été retenue pour tenter d'estimer le temps de montée à partir des descripteurs physiques des bassins versants à l'étude. Le tableau 13 présente les résultats de l'analyse d'ANOVA. La somme des carrés (SC) est de type 1 et représente le gain de l'addition du paramètre.

Tableau 13. ANOVA des temps de montée observés (tp).

Source de variation	DL	SC	MC	F	SF	SF
Bassins versants	20	163,5095	8,1755	37,8656	1,75E-91	< 0,01
A	1	126,3155	126,3155	465,8460	7,22E-77	< 0,01
LCdE	1	1,1878	1,1878	2,4743	0,1162	> 0,01
SCdE	1	0,0063	0,0063	0,0131	0,9090	> 0,01
CN2	1	1,5802	1,5802	3,2963	0,0699	< 0,01
S	1	0,1729	0,1729	0,3589	0,5493	> 0,01
Non concordance	15	34,2468	2,2831	5,2483	6,50E-10	< 0,01
Résidu	580	125,2266	0,2159			

DL = degrés de liberté

SC = somme des carrés

MC = moyenne des carrés

F = test de Fisher

SF = signification du test de Fisher

A = aire du bassin versant

LCdE = longueur du cours d'eau

SCdE = pente moyenne du cours d'eau

CN2 = numéro de courbe type II

S = pente moyenne du bassin versant (%)

L'aire du bassin versant (A) a démontré statistiquement le meilleur pouvoir explicatif du temps de montée (tp). À elle seule, l'aire (A) explique 77 % de la variation du temps de montée observé (tp) (prob < 0,05) (tableau 15). La non concordance des modèles est significative, ce qui montre qu'une partie de la variation due aux bassins versants n'est pas expliquée. L'équation 1 illustre l'équation de prédiction du temps de montée, laquelle est fonction de l'aire du bassin versant. La figure 12 présente le temps de montée en fonction de l'aire des bassins versants. Cette régression présente un meilleur coefficient de détermination (R^2) de 0,89, ce qui est une nette amélioration par rapport à la méthode du SCS Lag avec un CN de type III ($R^2 = 0,37$).

Tableau 14. Coefficients du modèle de régression en fonction de l'aire.

Variable	Parameter Estimate	Standard Error	Type II SS	F Value	Pr > F
Intercept	-1.68543	0.30898	2.04816	29.76	<.0001
log_A	0.55661	0.04712	9.60538	139.55	<.0001

Modèle t_p

$$t_p = 0,18536 A^{0,5566}$$

[1]

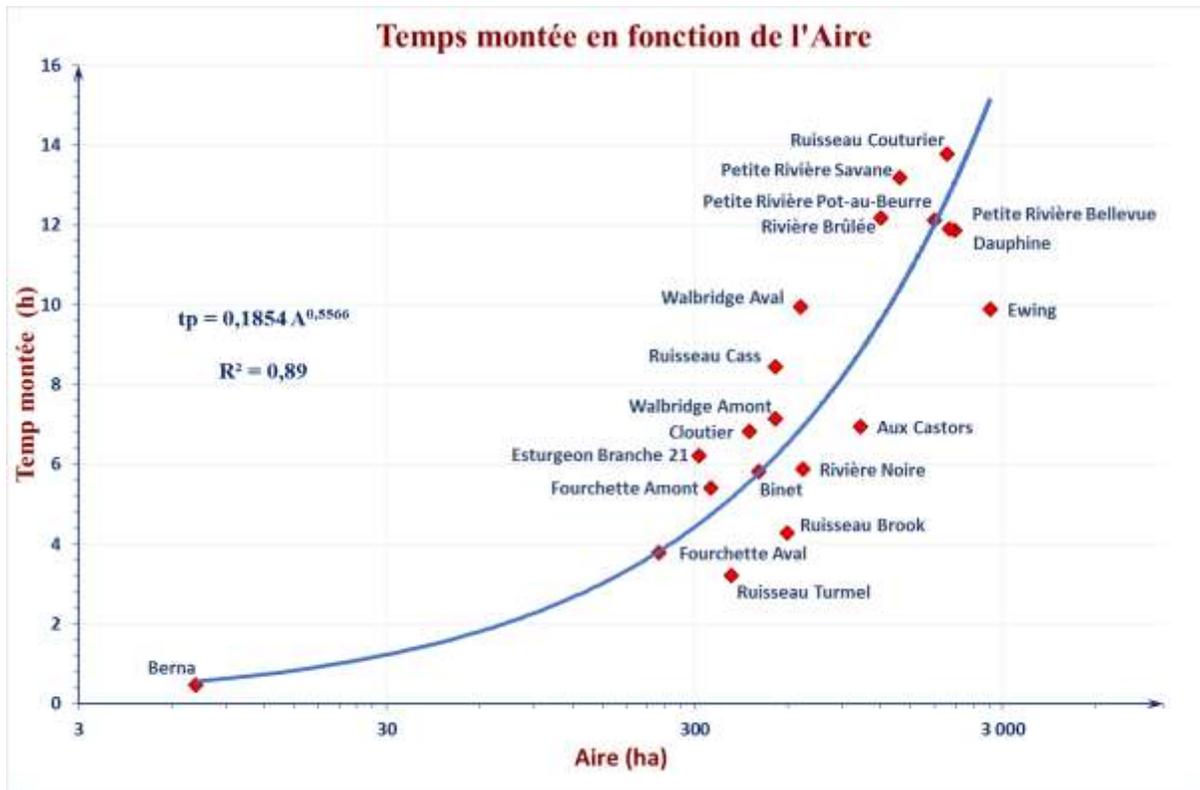


Figure 11. Temps montée en fonction de l'aire du bassin.

2.4.2. Coefficient de forme de l'hydrogramme $\phi(\alpha)$

Le tableau 15 présente un sommaire des coefficients de forme estimés dans le cadre du présent projet pour les 601 hydrogrammes classifiés de type simple, représentatifs des 21 bassins versants étudiés (19 bassins versants et 2 parcelles). Il n'y a pas hydrogrammes simples pour la parcelle Girard). La méthode « directe » ou « $q_p t_p$ » ($\phi(\alpha) = q_p t_p$) utilisant les temps de montée (t_p) et les débits unitaires de pointe (q_p) observés et qui est utilisée par Fang, Prakash et Cleveland (2005) a été retenue comme méthode d'estimation du coefficient de forme car elle utilise les temps de montée (t_p) et des débits unitaires de pointe (q_p) observés sans avoir à estimer les paramètres de la fonction Gamma.

Tableau 15. Résumé des coefficients de forme des hydrogrammes - $\phi(\alpha)$

Coefficient de forme de l'hydrogramme $\phi(\alpha)$						
#	Bassin Versant	N	μ	σ	Cv	NS
1	Aux Castors	71	0,82	0,17	0,21	0,94
2	Berna	6	0,59	0,16	0,27	0,84
3	Binet	34	0,91	0,26	0,29	0,89
4	Cloutier	11	0,59	0,28	0,47	0,88
5	Dauphine	177	0,75	0,22	0,29	0,92
6	Esturgeon Branche 21	13	0,66	0,17	0,26	0,96
7	Esturgeon Branche 6	3	0,72	0,44	0,61	0,90
8	Ewing	67	0,89	0,28	0,31	0,94
9	Fourchette Amont	41	0,93	0,22	0,24	0,92
10	Fourchette Aval	44	1,06	0,36	0,34	0,92
11	Petite rivière Bellevue	18	0,63	0,16	0,25	0,87
12	Petite rivière Pot-au-Beurre	8	0,76	0,47	0,62	0,86
13	Petite rivière Savane	3	0,91	0,12	0,13	0,88
14	Rivière Brulée	2	0,62	0,15	0,24	0,75
15	Rivière Noire	15	0,68	0,25	0,37	0,77
16	Ruisseau Brook	10	0,63	0,16	0,25	0,90
17	Ruisseau Cass	6	0,94	0,39	0,41	0,95
18	Ruisseau Couturier	6	0,72	0,32	0,44	0,81
19	Turmel	18	0,63	0,16	0,16	0,90
20	Walbridge Amont	26	0,85	0,22	0,26	0,94
21	Walbridge Aval	22	0,94	0,27	0,29	0,95
Moyenne		29	0,77	0,25	0,32	0,89
Médiane		15	0,75	0,22	0,29	0,9
Minimum		2	0,59	0,12	0,13	0,75
Maximum		177	1,06	0,47	0,62	0,96
Total d'évènements		601				

N = nombre d'évènements

μ = moyenne

σ = écart type

Cv = coefficient de variation

NS = coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe

Le coefficient de forme moyen est de 0,77 pour l'ensemble des hydrogrammes des bassins versants à l'étude, avec un écart type de 0,25. La plus petite valeur est de 0,59 pour la parcelle Berna et la plus grande valeur est de 1,06 pour le bassin Fourchette Aval.

Pour les dix bassins versants étudiés dans la première étude (Michaud et al., 2013), le coefficient moyen était de 0,73 pour l'ensemble des hydrogrammes et des bassins versants avec un écart type de 0,11. 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.

Le tableau 16 montre l'effet significatif des bassins versants sur le coefficient de forme de l'hydrogramme $\phi(\alpha)$ ($p < 0.001$). Aucune caractéristique physique associée aux bassins versants n'a pu expliquer cet effet. À titre de comparaison, dans une étude réalisée au Texas sur 90 bassins versants avec 1600 événements, Fang *et al.* (2005) 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.

Tableau 16. ANOVA des coefficients de forme de l'hydrogramme - $\phi(\alpha)$.

Source de variation	DL	SC	MC	F	SF	SF
Bassins versants	20	13,1114	0,6556	7,6282	1,51E-19	< 0,001
A	1	0,2447	0,2447	2,3376	0,1268	> 0,001
LCdE	1	1,5277	1,5277	14,8964	1,26E-04	< 0,001
SCdE	1	0,1039	0,1039	0,9902	0,3201	> 0,001
CN2	1	0,0717	0,0717	0,6831	0,4089	> 0,001
S	1	1,4175	1,4175	13,7971	2,23E-04	< 0,001
Non concordance	13	9,7459	0,7497	8,2702	1,95E-15	< 0,001
Résidu	580	49,84539	0,0859			
Total	600	62,95683	4,8567			

DL = degrés de liberté

SC = somme des carrés

MC = moyenne des carrés

F = test de Fisher

SF = signification du test de Fisher

A = aire du bassin versant

LCdE = longueur du cours d'eau

SCdE = pente moyenne du cours d'eau

CN2 = numéro de courbe type II

S = pente moyenne du bassin versant

2.4.3. 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 22 bassins versants à l'étude découle de l'analyse des hydrogrammes générés par le logiciel VisuHydro et séparés suivant la méthode manuelle. Les hauteurs estimées de ruissellement (Hru) et de précipitation (Ppt) 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. Le tableau 17 rapporte les distributions des hauteurs et coefficients de ruissellement observés aux exutoires de l'ensemble des 22 sites et 802 hydrogrammes à l'étude. Dans l'ensemble, les observations témoignent d'une forte variabilité entre les sites à l'étude. Les coefficients de ruissellement moyens varient ainsi du simple au triple, soit de 0,10 pour la parcelle Girard, à 0,32 pour les bassins Turmel en Beauce et Walbridge aval en Montérégie. En marge de cette variabilité entre les sites, les observations témoignent également d'une forte variabilité entre les événements hydrologiques. Pour l'ensemble des sites à l'étude, les écarts types des observations de coefficients de ruissellement équivalent généralement à la moitié de la valeur moyenne (tableau 18). Les figures 12 et 13 illustrent respectivement la répartition des observations de hauteurs de ruissellement pour les bassins versants du ruisseau

Aux Castors, en Montérégie et du ruisseau Fourchette aval, en Beauce. Alors que les observations du bassin Aux Castors reflètent les prédictions du modèle de Monfet (1979), celles du ruisseau Fourchette aval se distinguent à la baisse. Les observations de hauteurs de ruissellement en fonction des précipitations totales pour l'ensemble des sites à l'étude sont présentées en annexe au présent rapport, suivant les mêmes modalités.

Dans le cadre de la présente étude, l'étude de la relation entre les hauteurs de ruissellement (Hru) et les précipitations observées (Ppt) pour l'ensemble des 22 bassins versants a d'abord été supportée par une analyse de covariance (ANCOVA) de la hauteur de ruissellement (Hru) utilisant la hauteur de précipitation totale de l'évènement (Ppt) en covariable et considérant les effets « Bassin ». L'approche ciblait ainsi la détection de différences significatives entre les réponses hydrologiques des sites à l'étude. Les résultats ont aussi été comparés aux méthodes de Monfet (1979) et du SCS.

Les résultats de l'ANCOVA des hauteurs de ruissellement en fonction de la précipitation totale témoignent cependant d'une faible discrimination des réponses hydrologiques des bassins à l'étude. Une nouvelle approche a donc été développée et validée afin de mieux distinguer les effets des bassins sur les hauteurs de ruissellement prédites. L'approche retenue consiste à exprimer la réponse hydrologique des bassins à l'étude suivant deux propriétés distinctes. La première traduit la capacité du bassin à intercepter les précipitations précédant le déclenchement du ruissellement. La deuxième traduit l'intensité du ruissellement en fonction de la précipitation ruissellante, laquelle est associée à la période où le ruissellement de surface est actif. Les résultats des analyses hydrologiques propres aux deux méthodes sont présentés successivement.

Tableau 17. Distributions des volumes, hauteurs et coefficients de ruissellement associés aux 802 hydrogrammes analysés individuellement.

#	Bassin Versant	N	Vru (m ³)				Hru (mm)				Cru			
			μ	σ	min	max	μ	σ	min	max	μ	σ	min	max
1	Aux Castors	76	75960	67315	16928	287951	7,35	6,51	1,64	27,87	0,25	0,16	0,04	0,98
2	Berna	12	916	1163	139	4195	12,73	16,16	1,93	58,27	0,23	0,10	0,12	0,41
3	Binet	34	29637	31157	7379	142928	6,11	6,43	1,52	29,48	0,22	0,10	0,06	0,48
4	Cloutier	28	40753	40476	6802	148633	9,06	8,99	1,51	33,03	0,21	0,09	0,05	0,37
5	Dauphine	170	172765	147178	41409	815560	6,49	5,53	1,56	30,66	0,23	0,12	0,05	0,67
6	Esturgeon Branche 21	14	11260	6522	4658	30544	3,64	2,11	1,50	9,87	0,20	0,08	0,10	0,35
7	Esturgeon Branche 6	2	4959	190	4825	5094	1,56	0,06	1,52	1,61	0,06	0,02	0,05	0,07
8	Ewing	81	194418	192793	41502	806494	7,11	7,05	1,52	29,50	0,23	0,14	0,03	0,58
9	Fourchette Amont	69	15281	13624	5072	89796	4,52	4,03	1,50	26,59	0,15	0,09	0,03	0,37
10	Fourchette Aval	46	7819	6313	3492	38680	3,41	2,75	1,52	16,85	0,12	0,09	0,03	0,54
11	Girard	8	893	555	281	1712	5,51	3,43	1,73	10,57	0,10	0,05	0,03	0,17
12	Petite rivière Bellevue	27	119123	103685	28005	465847	6,62	5,76	1,56	25,88	0,19	0,10	0,07	0,38
13	Petite rivière Pot-au-Beurre	20	123990	113841	31283	411243	6,18	5,68	1,56	20,50	0,18	0,10	0,06	0,43
14	Petite rivière Savane	15	80849	94076	21747	400621	5,83	6,79	1,57	28,91	0,18	0,10	0,05	0,41
15	Rivière Brûlée	10	60653	31204	21879	123705	5,02	2,59	1,81	10,25	0,13	0,06	0,06	0,22
16	Rivière Noire	25	52527	45284	10202	164407	7,83	6,75	1,52	24,50	0,23	0,12	0,06	0,54
17	Ruisseau Brook	23	43486	42591	9314	197533	7,27	7,12	1,56	33,03	0,25	0,11	0,09	0,50
18	Ruisseau Cass	13	35439	27922	9522	114746	6,48	5,10	1,74	20,97	0,14	0,06	0,06	0,26
19	Ruisseau Couturier	15	155558	136914	37874	436461	7,86	6,92	1,91	22,05	0,23	0,12	0,09	0,49
20	Turmel	34	29111	27280	6363	132514	7,40	6,94	1,62	33,70	0,32	0,18	0,08	0,72
21	Walbridge Amont	36	41000	33768	8682	169530	7,47	6,15	1,58	30,89	0,27	0,18	0,04	0,90
22	Walbridge Aval	44	59696	58079	10052	261713	9,05	8,81	1,52	39,68	0,32	0,21	0,05	0,90
	Moyenne	36	61641	55542	14882	238632	6,57	5,98	1,61	25,67	0,20	0,11	0,06	0,49
	Minimum	2	893	190	139	1712	1,56	0,06	1,50	1,61	0,06	0,02	0,03	0,07
	Maximum	170	194418	192793	41502	815560	12,73	16,16	1,93	58,27	0,32	0,21	0,12	0,98

N = nombre d'événements

μ = moyenne

σ = écart type

min = valeur minimale

max = valeur maximale

Vru = volume ruisselé (m³)

Hru = hauteur de ruissellement (mm)

Cru = coefficient de ruissellement

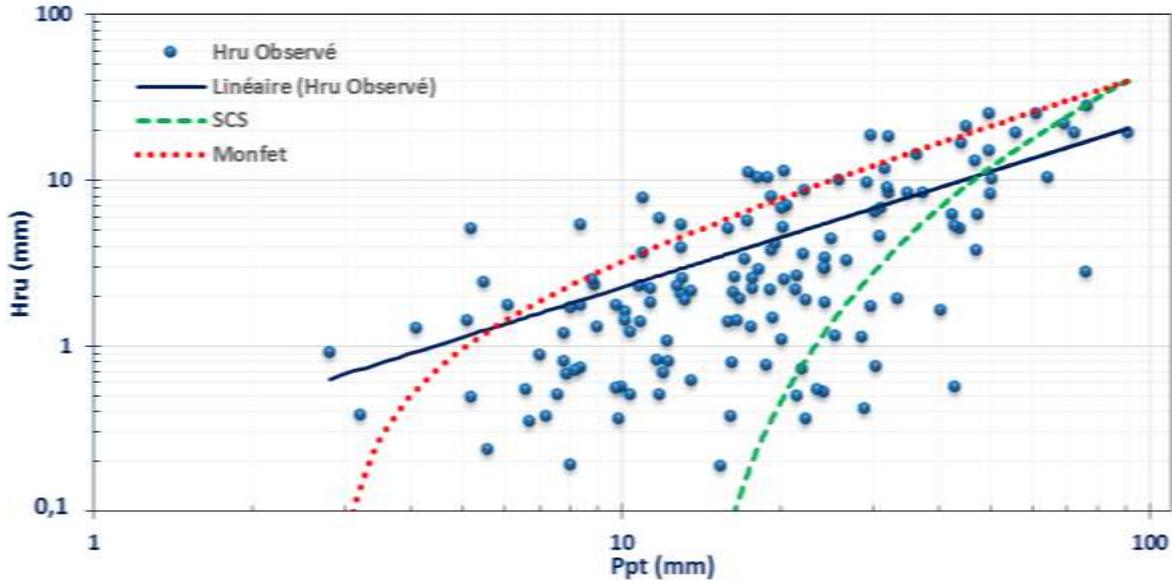


Figure 12. Hauteurs de ruissellement observées et prédites selon les modèles de Monfet (1979) et SCS (1986) pour le bassin versant Aux Castors (CN=78).

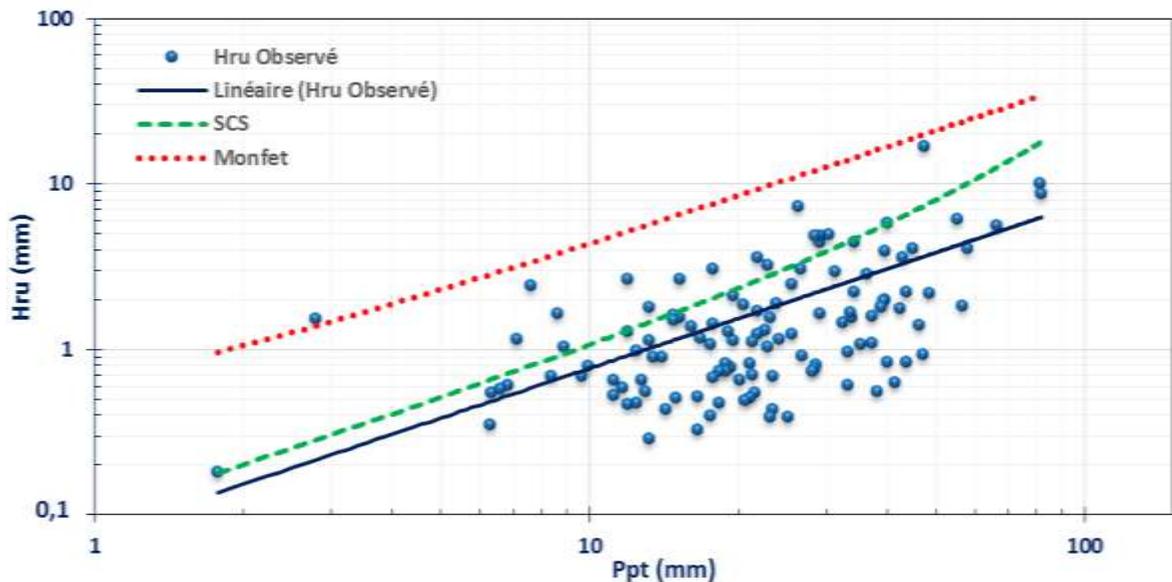


Figure 13. Hauteurs de ruissellement observées et prédites selon les modèles de Monfet (1979) et SCS (1986) pour le bassin versant Fourchette Aval (CN=56).

Prédiction du ruissellement en fonction de la précipitation totale

Une première analyse ANCOVA sur les observations originales de ruissellement et de précipitation totale a révélé une distribution hétérogène des résidus de l'analyse de régression. Une transformation logarithmique a donc été appliquée aux observations de précipitation et de hauteur de ruissellement préalablement à l'ANCOVA. L'analyse préliminaire des 1 468 hydrogrammes 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. Des coefficients de ruissellement (Cru) excessivement élevés ont été systématiquement associés aux épisodes de fonte et de pluie hivernale (décembre à avril), largement supérieurs aux coefficients résultant de précipitations en saison de production (mai à novembre). La contribution de la fonte du couvert neigeux au ruissellement de surface explique ces surestimations en période d'influence hivernal. Pour cette raison, l'analyse de covariance (ANCOVA) des hauteurs de ruissellement, utilisant les observations de précipitations en covariable, a été restreinte aux évènements analysés en période de production (mai à novembre) présentant un seuil minimal de 1,5 mm de hauteur ruissellement. L'analyse préliminaire des jeux de données a aussi démontré que le type d'hydrogramme (unitaire, simple, multiples ou complexe) n'avait pas d'influence sur la relation Hru : Ppt. Les observations de la branche 6 du bassin de l'Esturgeon (sol organique), de la parcelle Girard et de la rivière Brûlée ont été exclues de cette analyse en raison du faible nombre d'évènements de ruissellement (<10) répondant aux critères de 1,5 mm de hauteur minimale de hauteur de ruissellement.

Le tableau 18 rapporte les résultats de l'analyse de covariance (ANCOVA) des hauteurs de ruissellement utilisant la précipitation totale en covariable. L'ANCOVA met en relief la forte contribution de la précipitation totale dans l'explication de la variabilité des hauteurs de ruissellement. L'effet « Bassin » est estimé significatif, témoignant de différences dans les hauteurs de ruissellement entre les sites pour une hauteur de précipitation totale donnée. Une interaction significative est cependant détectée entre l'effet « Précipitation » et celui du « Bassin ». Cette interaction implique que les différences dans les hauteurs de ruissellement prédites entre certains bassins peuvent être significatives à un certain niveau de précipitation totale, mais ne l'est plus pour un événement de moindre envergure. Dans le modèle de régression, cette variabilité est exprimée par des pentes et des ordonnées significativement différentes entre les différents bassins à l'étude, qui demeurent fort complexes à interpréter. Par ailleurs, les moyennes prédites par le modèle (tableau 20) présentent peu de différences significatives entre les bassins versants à l'étude. Seuls les bassins Fourchette amont et aval se distinguent à la baisse de l'ensemble des autres bassins à l'étude, ces derniers ne présentant pas de différences significatives entre eux.

Tableau 18. Valeurs F du modèle d'analyse de covariance des hauteurs de ruissellement en fonction des précipitations totales

Source	Erreur DL	Den DL	Valeur F	Pr > F
Bassin	18	36,5	2,55	0,0081
PPT	1	200	507,68	<,0001
Pppt*Bassin	18	36,8	3,55	0,0006

Tableau 19. Moyennes et erreurs types ajustées au modèle de covariance des hauteurs de ruissellement prédites pour la précipitation moyenne de 35 mm pour l'ensemble des bassins versants à l'étude.

Bassin	log (HRU)	Ecart-type	HRU (anti-log)
Aux Castors	0,735	0,032	5,43
Berna	0,687	0,043	4,86
Binet	0,742	0,039	5,52
Cloutier	0,683	0,041	4,82
Dauphine	0,730	0,017	5,37
Esturgeon Branche21	0,507	0,049	3,21
Ewing	0,709	0,031	5,11
Fourchette_Amont	0,541	0,030	3,47
Fourchette_Aval	0,439	0,032	2,75
Petite-Rivière-Bellevue	0,660	0,048	4,57
Petite-Rivière-Pot-au-Beurre	0,631	0,055	4,27
Petite-Rivière-Savane	0,624	0,063	4,21
Rivière Noire	0,736	0,048	5,45
Ruisseau Brook	0,798	0,043	6,27
Ruisseau Cass	0,586	0,055	3,86
Ruisseau_Couturier	0,744	0,060	5,54
Turmel	0,851	0,053	7,09
Walbridge Amont	0,764	0,047	5,80
Walbridge Aval	0,828	0,047	6,74

Prédiction du ruissellement en fonction de la précipitation ruisselante

Devant le constat du faible pouvoir discriminant de la précipitation totale dans la distinction des réponses hydrologiques des sites à l'étude, une nouvelle approche d'analyse des hauteurs de ruissellement et de précipitation a été développée. La méthode proposée découle du concept que la hauteur de ruissellement d'un site donné, en réponse à la précipitation totale d'un évènement donné, est expliquée par deux composantes, soit 1) un facteur de capacité, exprimant la quantité de la précipitation avant le début du ruissellement, et 2) un facteur d'intensité, exprimant la hauteur du ruissellement en fonction de la précipitation ruisselante (Ppt_ru). Cette dernière exprime la précipitation cumulée durant la période de ruissellement et correspond à la différence entre la précipitation totale et la précipitation avant le début du ruissellement (Ppt_in).

L'algorithme de séparation de la précipitation totale en ses composantes de précipitation avant le début du ruissellement (Ppt_in) et ruisselante (PPTruis) a été programmée à cette fin dans VisuHydro afin de générer systématiquement ces variables pour l'ensemble des 802 hydrogrammes précédemment analysées. La figure 15 illustre un exemple de séparation de l'hyétogramme en ses composantes de précipitations avant le début du ruissellement et ruisselante, suivant les termes et équations suivantes :

Précipitation ruisselante	$Ppt_{ru} = Ppt - Ppt_{in}$	[2]
Coefficient de précipitation ruisselante	$CPpt_{ru} = Ppt_{ru}/Ppt$	[3]
Coefficient de ruissellement	$Cru = Hru/Ppt$	[4]
Coefficient de ruissellement provenant de la précipitation ruisselante	$Cru_{Pru} = Hru/Ppt_{ru}$	[5]

Où :

- Ppt_ru est la précipitation ruisselante;
- Ppt est la précipitation totale
- Ppt_in est la précipitation avant le début du ruissellement ;
- CPpt_ru est le coefficient de précipitation ruisselante;
- Cru est le coefficient de ruissellement;
- Cru_pru est le coefficient de ruissellement provenant de la précipitation ruisselante.

La figure 14 illustre les séparations des précipitations totales en ses composantes avant le début du ruissellement et ruisselante pour l'ensemble des évènements hydrologiques mis à contribution dans l'analyse des hauteurs de ruissellement suivant la méthode de la précipitation ruisselante.

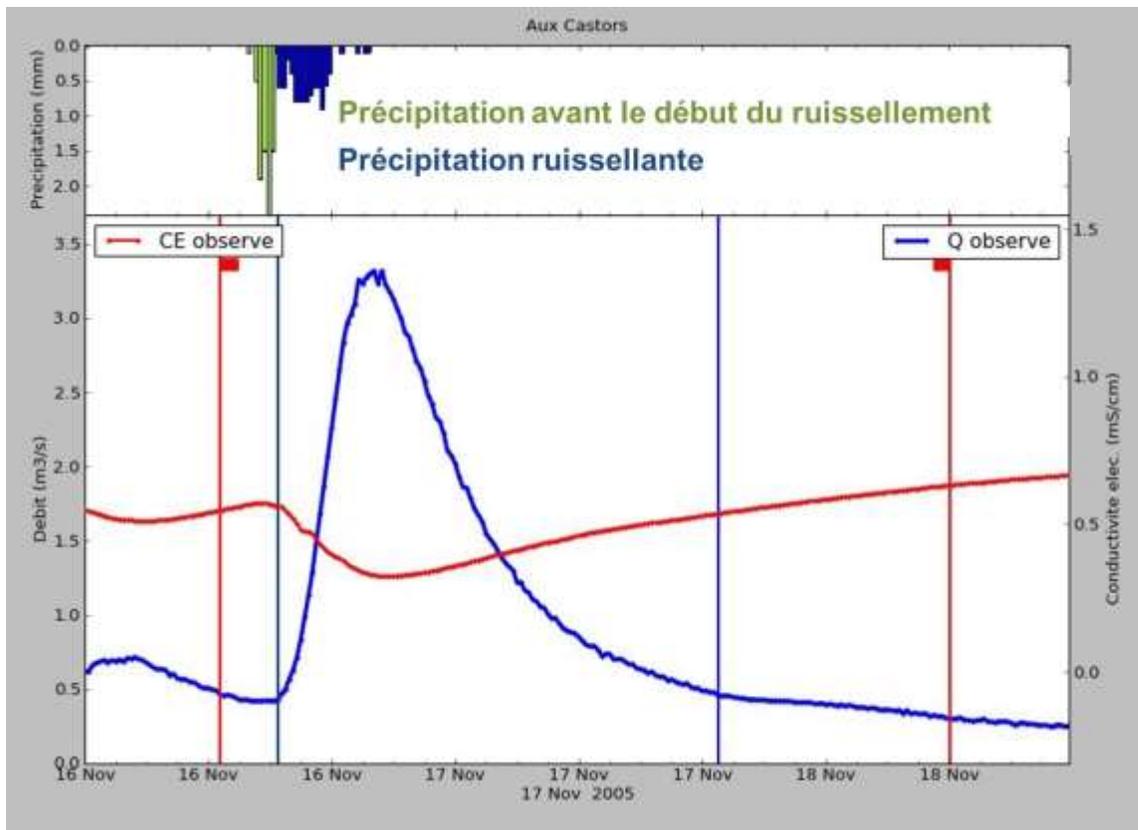


Figure 14. Représentation dans VisuHydro de la précipitation avant le début du ruissellement et de la précipitation ruissellante.

Les jeux de données de hauteurs de ruissellement, de précipitation totale et de précipitation ruissellante ont par la suite été analysés en deux étapes distinctes. Une première analyse ANCOVA de la précipitation ruissellante en fonction de la précipitation totale a permis de comparer les bassins versants par rapport à leurs capacités à stocker la précipitation précédant l'émission du ruissellement. Dans le modèle de régression, cette capacité propre à chacun des bassins est exprimée au plan mathématique par la régression linéaire expliquant la hauteur de précipitation ruissellante (Ppt_{ru}) en fonction de la précipitation totale (Ppt). La pente de la régression du modèle pour un bassin versant donné correspond dès lors à son coefficient de précipitation ruissellante ($CPpt_{ru}$).

En deuxième étape, les hauteurs de ruissellement (Hru) ont été expliquées par les hauteurs de précipitation ruissellante (Ppt_{ru}) au moyen d'une approche de régression similaire. Les coefficients de ruissellement provenant de la précipitation ruissellante (Cru_{Pru}) expriment la pente de la régression du modèle ANCOVA propre à chaque bassin. Conceptuellement, le Cru_{Pru} exprime la capacité d'un bassin versant donné à soutenir un taux de ruissellement élevé, après que les conditions propres à l'initiation du ruissellement aient été réunies.

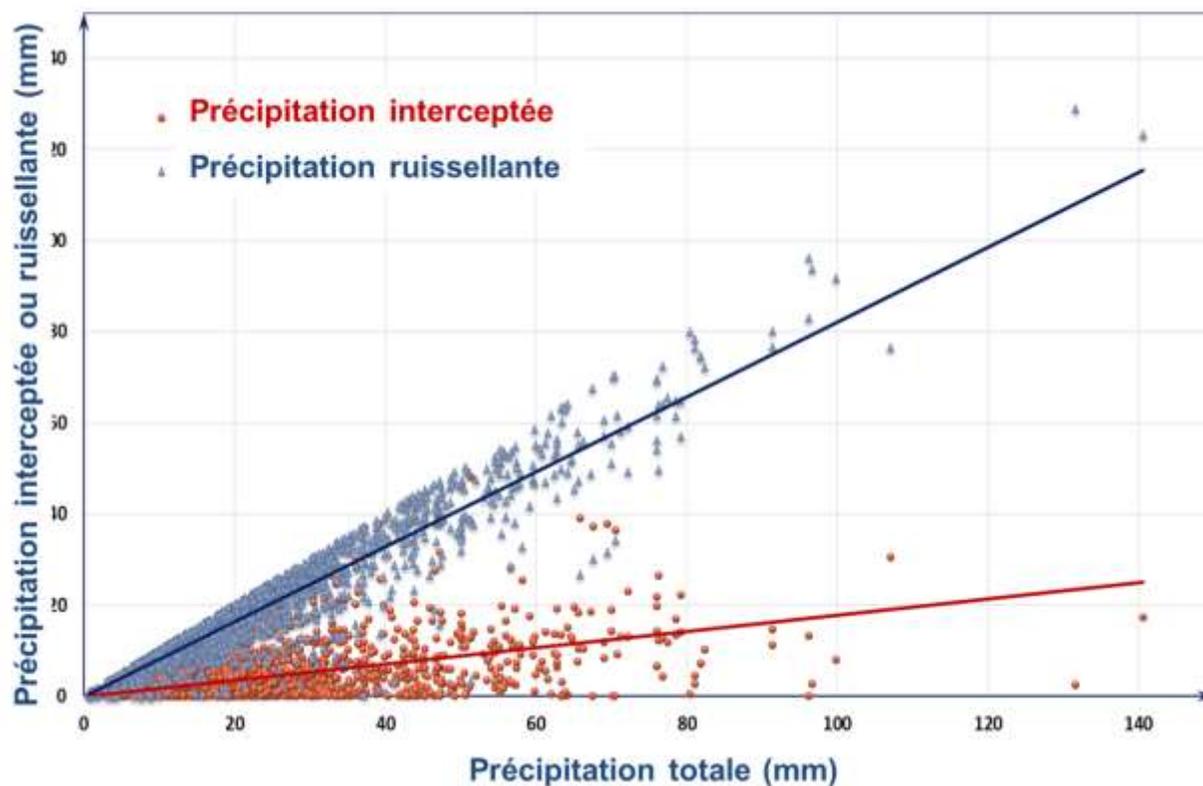


Figure 15. Composantes de la précipitation totale.

Précipitation précédant le début du ruissellement

L'étude de la séparation des précipitations totales en ses composantes ruisselées et précédant le début du ruissellement s'est appuyée sur une démarche ANCOVA réalisée en trois étapes et appliquée à l'ensemble des observations, excluant les données de la branche 6 de l'Esturgeon (sol organique) en raison du faible nombre d'observations. La variabilité de l'ensemble des observations de Ppt_ru, tous bassins confondus, en fonction de Ppt a d'abord été analysée au moyen d'un modèle de régression complet (comportant un estimateur de pente et un estimateur d'ordonnée à l'origine). Cette première analyse globale des observations des précipitations ruisselantes en fonction des précipitations totales a produit un modèle comportant une ordonnée à l'origine commune à l'ensemble des sites et significative, d'une valeur de 1,5 mm de précipitation totale. Compte tenu de la valeur marginale de cet estimateur, il a été décidé d'en négliger l'effet et de considérer un modèle réduit, sans ordonnée à l'origine (modèle passant par « 0 ») pour exprimer la variabilité des précipitations efficaces des bassins à l'étude. Le passage à un modèle de régression réduit n'a impliqué qu'une augmentation mineure de l'erreur quadratique moyenne, relativement à celle du modèle complet. Au plan de l'analyse hydrologique, un modèle avec une ordonnée à l'origine commune présente l'avantage de permettre de comparer directement les bassins entre eux au moyen d'un seul coefficient de précipitation ruisselante (CPpt_net), ce qui facilite grandement l'interprétation des résultats.

Le tableau 20 rapporte les estimateurs du paramètre de pente de régression (CPpt_net) des 21 bassins à l'étude, de même que les écarts types et intervalles de confiance à 95 % (N = 800, événements de 1,5 mm et plus de précipitation totale). Compte tenu de l'hétérogénéité des variances associées aux observations des différents bassins (le nombre d'observations est variable entre les bassins), celle-ci a été prise en compte dans les calculs des paramètres de régression du modèle. La figure 16 illustre le modèle de régression résultant de l'ANCOVA appliqué à l'ensemble des bassins versants à l'étude. Dans l'ensemble, les différents bassins à l'étude démontrent des capacités très variables à intercepter les pluies, avec des coefficients de précipitation ruisselante variant d'une valeur minimale de 0,61 à 0,93.

Tableau 20. Estimateurs des pentes de régression pour la précipitation ruisselante (Ppt_ru) par bassin en fonction de la précipitation total (Ppt), en ordre croissant. Modèle avec pentes distinctes, ordonnées à l'origine égale à 0. Erreurs types, degrés de liberté et bornes d'un intervalle de confiance à 95%.

Obs	Bassin	Pente	Erreur-type	d.l.	borne inf.	borne sup.
1	Esturgeon Branche 21	0,61	0,05	13	0,50	0,71
2	Turmel	0,67	0,04	33	0,59	0,76
3	Ruisseau Brook	0,75	0,04	22	0,67	0,83
4	Rivière Noire	0,76	0,04	24	0,68	0,83
5	Fourchette Amont	0,77	0,02	68	0,73	0,81
6	Aux Castors	0,77	0,02	75	0,74	0,80
7	Petite rivière Pot-au-Beurre	0,78	0,03	19	0,72	0,84
8	Rivière Brûlée	0,81	0,06	9	0,68	0,93
9	Walbridge Amont	0,82	0,03	35	0,77	0,87
10	Ruisseau Cass	0,83	0,03	12	0,76	0,90
11	Berna	0,83	0,02	11	0,79	0,88
12	Walbridge Aval	0,85	0,02	43	0,80	0,89
13	Binet	0,85	0,03	33	0,79	0,90
14	Petite rivière Bellevue	0,85	0,02	26	0,81	0,90
15	Ewing	0,85	0,01	80	0,83	0,88
16	Girard	0,86	0,03	7	0,80	0,92
17	Dauphine	0,86	0,01	169	0,85	0,88
18	Fourchette Aval	0,87	0,02	45	0,84	0,90
19	Cloutier	0,90	0,02	27	0,86	0,94
20	Ruisseau Couturier	0,93	0,03	14	0,87	0,98
21	Petite rivière Savane	0,93	0,02	14	0,89	0,97

d.l. = degrés de liberté

Les taux les plus faibles de précipitation avant le début du ruissellement sont observés dans le bassin de la Petite rivière Savane, un bassin de grande superficie caractérisé par le relief parmi les plus accidentés du réseau d'étude (pente moyenne de 9,3 %) et une utilisation du sol dominée

par la forêt. À l’opposé, les taux d’interception les plus élevés sont associés au bassin de l’Esturgeon (Branche 21) présentant une très faible pente moyenne (0,84 %) et une vocation agricole intensive. À priori, la variabilité observée dans l’interception des précipitations ne peut être liée significativement à l’une ou l’autre des propriétés physiques ou à l’occupation du sol des bassins versants à l’étude. L’explication tiendrait plutôt à la combinaison ou l’agencement spatial de ces facteurs. La production relativement hâtive de ruissellement des bassins à vocation extensive et au relief accidenté du Témiscouata tiendrait par exemple à la position basse dans le relief occupée par l’activité agricole. La proximité de la nappe et la connectivité hydrologique au réseau hydrographique favoriserait alors l’émission hâtive de ruissellement dans les secteurs localisés le plus près de l’exutoire du bassin. Le nombre limité de sites mis à profit dans cette étude ne permet cependant pas d’expliquer de façon significative la variabilité des coefficients de précipitation ruisselante observés pour l’ensemble du réseau à l’étude.

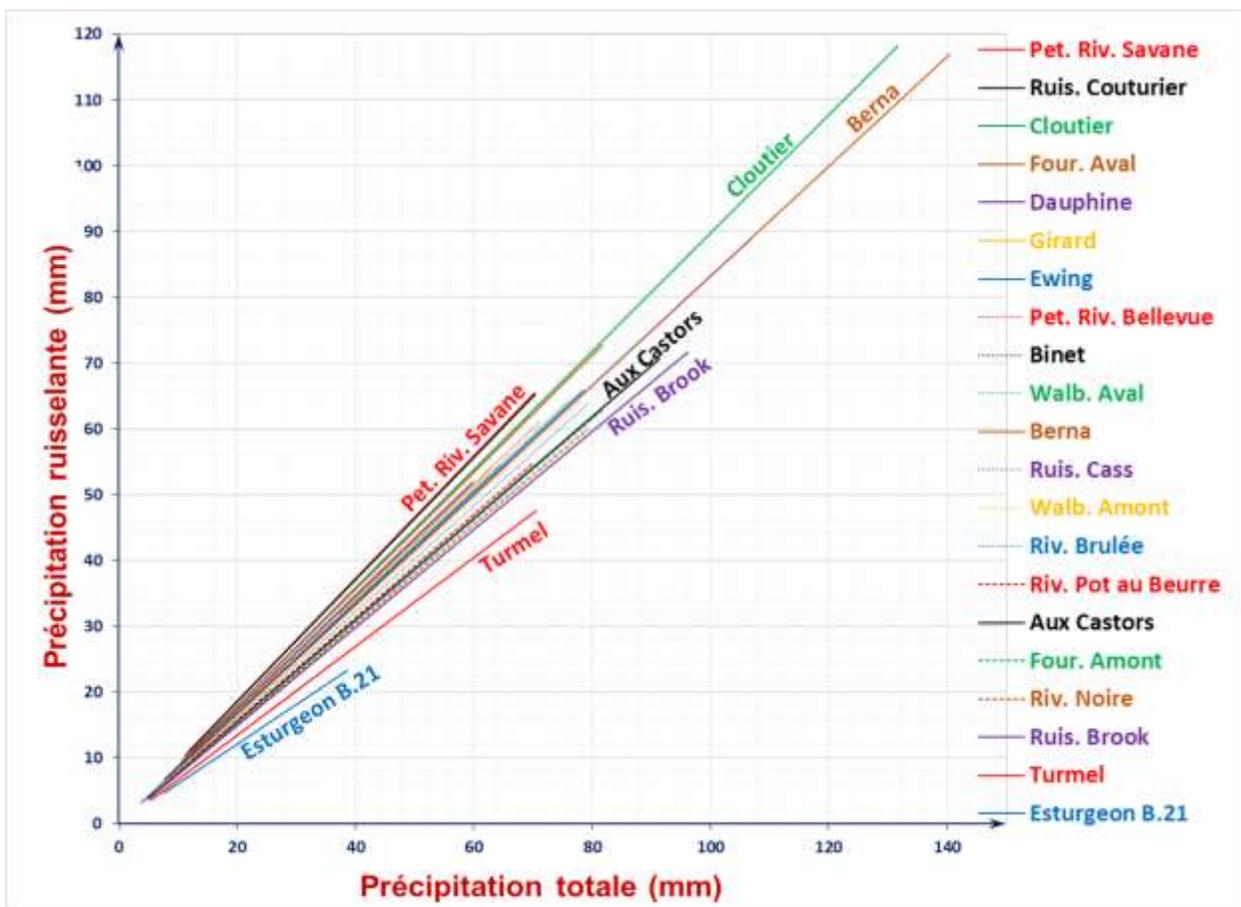


Figure 16. Précipitation ruisselante en fonction de la précipitation totale pour chacun des bassins versants à l’étude.

Ruissellement provenant de la précipitation ruisselante

L'étude des hauteurs de ruissellement en fonction des hauteurs de précipitations ruisselantes s'est appuyée sur une démarche ANCOVA similaire à celle retenue pour l'étude des précipitations ruisselantes. Encore ici, les données de la branche 6 de l'Esturgeon (sol organique) ont été exclues en raison du faible nombre d'observations. La variabilité des observations de hauteurs de ruissellement (Hru) en fonction de la précipitation ruisselante (Ppt-ru), tous bassins confondus, a d'abord été analysée au moyen d'un modèle de régression complet, comportant un estimateur de pente et un estimateur d'ordonnée à l'origine. Les résultats de ce modèle complet de l'ANCOVA témoignent de valeurs d'ordonnées à l'origine qui ne sont pas significativement différentes de la valeur nulle. Conceptuellement, ce résultat exprime le fait qu'une précipitation ruisselante de valeur nulle ne produit pas de ruissellement de surface. Ce résultat vient confirmer indirectement la cohérence dans les séparations appliquées aux précipitations totales observées en ses composantes d'avant le début du ruissellement et ruisselantes. Il permet aussi de retenir un modèle réduit, sans ordonnée à l'origine (qui passe par « 0 ») dans l'expression des coefficients de ruissellement net des bassins versants à l'étude. À l'instar de l'étude de la variabilité des précipitations ruisselantes, la variabilité des variances associées aux observations des différents bassins a été prise en compte dans l'ANCOVA. Le tableau 21 rapporte les estimateurs du paramètre de pente de régression des 21 bassins à l'étude, de même que les écarts types et intervalles de confiance à 95% qui s'y rattachent. Les pentes du modèle de régression associées à chaque bassin versant, correspondant à leurs coefficients respectifs de ruissellement provenant de la précipitation ruisselante sont aussi reproduits à la figure 17.

Dans l'ensemble les coefficients de ruissellement provenant de la précipitation ruisselante présentent une forte variabilité, relativement plus importante que celle associée à la précipitation ruisselante. Les CPpt_net varient d'un minimum de 0,11 pour le petit bassin beauceron Fourchette aval à 0,44 pour le bassin Turmel localisé tout à proximité dans la même région. Pour l'ensemble des 21 sites à l'étude, le coefficient de ruissellement provenant de la précipitation ruisselante est corrélé significativement avec l'indice CN2 ($r=0,47$, $p<0,05$) et le groupe hydrologique du sol pondéré pour la superficie du bassin versant ($r=0,62$, $p<0,01$). La figure 18 illustre la relation observée entre cette dernière et le coefficient de ruissellement provenant de la précipitation ruisselante des bassins à l'étude. Pour les bassins à vocation intensive, dont la superficie totale est dominée à plus de 70 % par les cultures, le groupe hydrologique pondéré des sols explique 75 % de la variabilité observée dans les coefficients de ruissellement provenant de la précipitation ruisselante ($p<0,01$). La relation est moins éloquente pour les bassins à vocation plus extensive, qui présentent une gamme plus étendue d'occupation du territoire.

L'absence de corrélation entre les coefficients de précipitation ruisselante et de ruissellement provenant de la précipitation ruisselante pour l'ensemble du réseau à l'étude (figure 19) indique que ces propriétés hydrologiques se complètent bien dans l'explication du fonctionnement hydrologique du bassin et traduisent fort probablement l'influence de facteurs distincts. Le phénomène d'interception de la précipitation (précipitation avant le début du ruissellement) semble refléter l'interaction spatiale de plusieurs facteurs, incluant le relief et l'occupation du sol. Le nombre restreint de sites dans le cadre de la présente étude n'a cependant pas permis d'expliquer la variabilité dans les précipitations d'avant le début du ruissellement. L'intensité du ruissellement s'est avérée pour sa part clairement liée aux propriétés des sols. Des coefficients de

ruissellement provenant de la précipitation ruisselante relativement bien corrélés avec le groupe hydrologique de sol et indépendants de la précipitation d'avant le début du ruissellement sont cohérents avec l'hypothèse de départ, soit de distinguer les réponses hydrologiques des bassins suivant leur capacité à intercepter la précipitation, puis suivant l'intensité du taux de ruissellement généré.

Tableau 21. Estimateurs des pentes de régression pour la hauteur de ruissellement (Hru) en fonction de la précipitation ruisselante (Ppt_ru) par bassin, en ordre croissant. Modèle avec pentes distinctes, ordonnées à l'origine égales à 0. Erreurs types, degrés de liberté et bornes d'un intervalle de confiance à 95 %.

Obs	Bassin versant	Pente	Erreur-type	d.l.	borne inf.	borne sup.
1	Fourchette Aval	0,11	0,01	45	0,09	0,13
2	Girard	0,13	0,02	7	0,08	0,18
3	Rivière Brûlée	0,14	0,02	9	0,10	0,18
4	Ruisseau Cass	0,17	0,01	12	0,14	0,20
5	Fourchette Amont	0,18	0,01	68	0,15	0,20
6	Petite rivière Bellevue	0,24	0,02	26	0,19	0,29
7	Petite rivière Savane	0,24	0,04	14	0,17	0,32
8	Petite rivière Pot-au-Beurre	0,25	0,03	19	0,18	0,31
9	Dauphine	0,26	0,01	169	0,24	0,28
10	Ewing	0,27	0,02	80	0,23	0,31
11	Walbridge Amont	0,27	0,03	35	0,22	0,33
12	Cloutier	0,29	0,02	27	0,25	0,32
13	Esturgeon Branche 21	0,30	0,03	13	0,24	0,35
14	Ruisseau Couturier	0,30	0,03	14	0,23	0,37
15	Aux Castors	0,30	0,02	75	0,26	0,34
16	Rivière Noire	0,32	0,02	24	0,27	0,37
17	Binet	0,33	0,02	33	0,28	0,38
18	Walbridge Aval	0,34	0,04	43	0,26	0,41
19	Ruisseau Brook	0,36	0,02	22	0,32	0,39
20	Berna	0,42	0,03	11	0,36	0,48
21	Turmel	0,44	0,04	33	0,35	0,53

d.l. = degrés de liberté

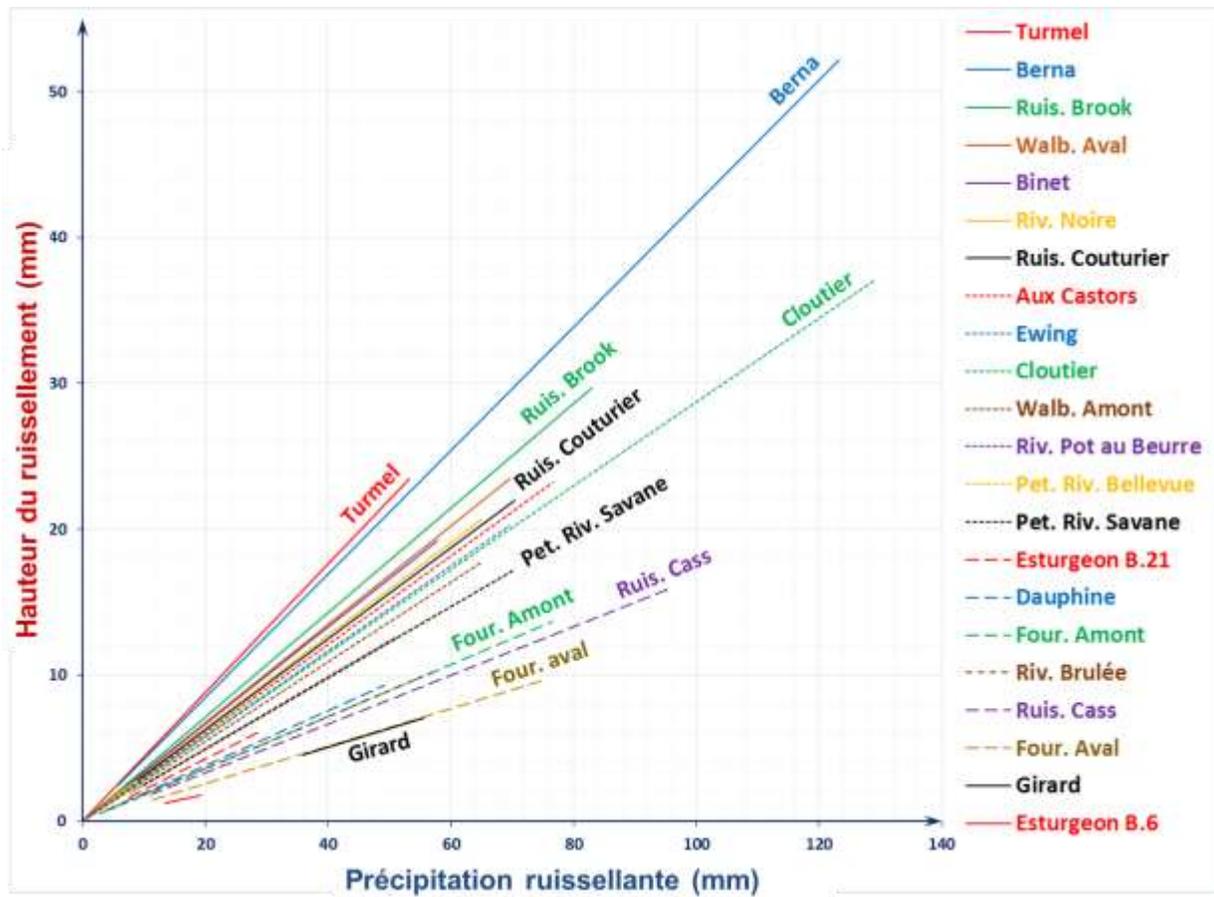


Figure 17. Hauteurs de ruissellement en fonction de la précipitation ruisselante pour chacun des bassins versants à l'étude.

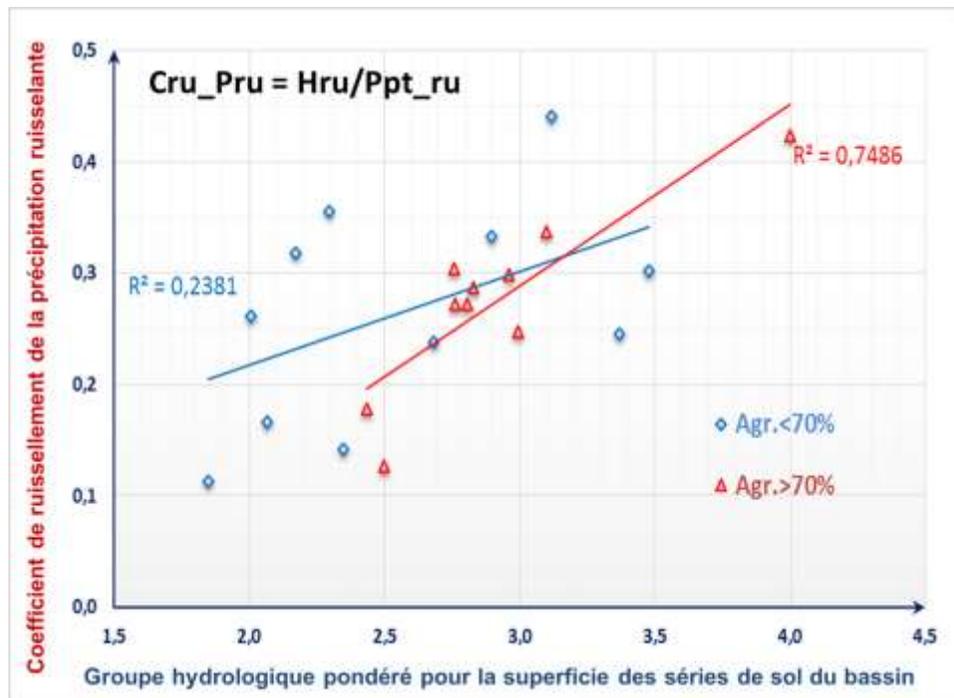


Figure 18. Coefficient de ruissellement de la précipitation ruisselante en fonction du groupe hydrologique pondéré pour la superficie des séries de sol du bassin versant.

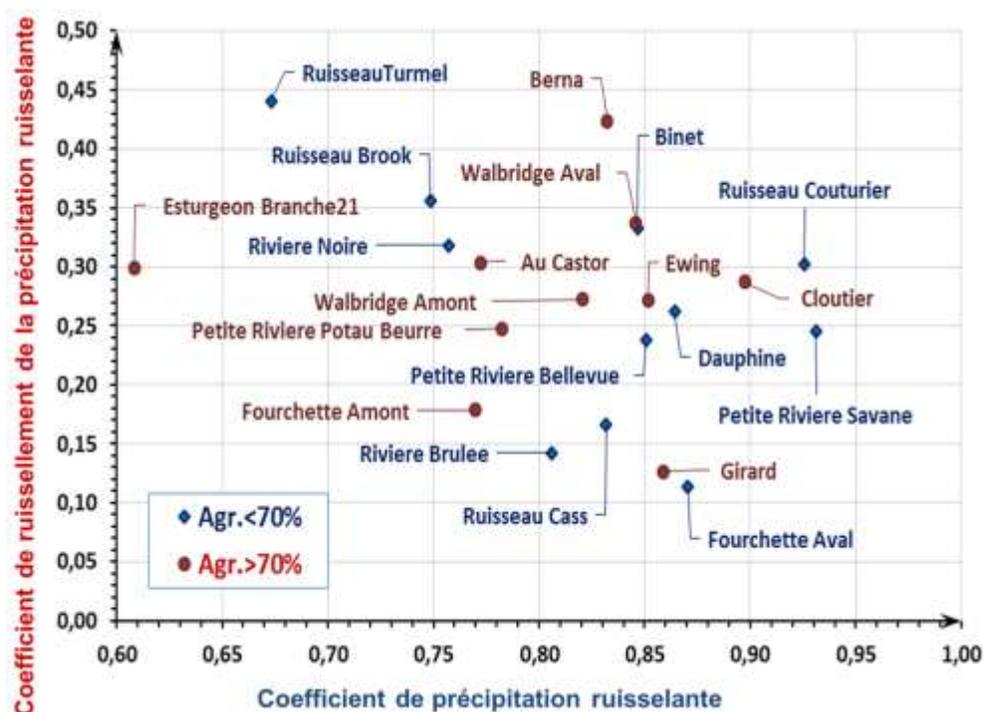


Figure 19. Coefficient de ruissellement provenant de la précipitation ruisselante en fonction du coefficient de précipitation avant le début du ruissellement.

2.4.4. Estimation de débit de crue Q_{max} (m^3/s)

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 6.

$$\text{Débit de crue } (Q_{max}) \qquad Q_{max} = \frac{H_{ru} * A * \Phi(\alpha)}{360 t_p} \qquad [6]$$

- 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)
 - $\Phi(\alpha)$: coefficient de forme de l'hydrogramme
 - 360 : facteur d'unité

L'équation de l'estimation du débit de crue est basée sur l'hypothèse qu'une précipitation de récurrence donnée produira un débit de même récurrence. Cette hypothèse est parfois contestée mais l'estimation est utilisée depuis près d'un siècle. La validation consiste à vérifier que si, en prenant l'IDF de récurrence appropriée, le temps moyen de montée observé sur le bassin versant, la hauteur de ruissellement produite par les courbes enveloppes du bassin versant et l'équation de l'estimation nous pouvons estimer la crue de cette récurrence observée sur le bassin versant.

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 24. Le tableau 22 présente les événements annuels retenus pour les différents bassins versants.

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 et le coefficient de forme sont ceux observés. Les IDF des stations Ste-Clothilde (Berna, Cloutier), François (Dauphine), St-Guillaume (Petite rivière Bellevue et Petite rivière Pot-au-Beurre), Auclair (Petite rivière Savane et ruisseau Couturier), Vallée-Jonction (Binet, Fourchette amont et aval, Turmel) et Granby (Castor, Ewing et Walbridge amont et aval) 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 propres à chaque bassin.

Tableau 22. Séries annuelles des évènements de ruissellement retenus pour la validation de la prédiction des débits de pointe.

Id	Bassin versant	Date réf.	Ppt (mm)	Durée Ppt (h)	tp (h)	Hru (mm)	Qmax Ru (m³/s)	Rang	Prob.	Récur-rence
1	Aux Castors	2011-08-28 06	91,40	18,75	8,34	19,42	5,45	1	0,08	13,0
2		2004-09-08 22	49,70	53,75	14,34	15,20	5,15	2	0,15	6,5
3		2002-06-11 07	76,20	28,25	8,56	27,87	4,80	3	0,23	4,3
4		2003-06-13 08	50,10	24,25	6,49	8,22	4,43	4	0,31	3,3
5		2005-11-29 15	20,40	6,25	3,88	11,35	4,37	5	0,38	2,6
6		2010-09-30 05	69,00	27,50	20,08	21,79	4,22	6	0,46	2,2
7		2008-10-28 07	29,20	24,00	9,15	9,66	2,84	7	0,54	1,9
8		2009-10-23 21	35,00	19,75	5,43	8,41	2,28	8	0,62	1,6
9		2012-10-06 00	31,00	14,25	8,96	6,78	2,02	9	0,69	1,4
10		2007-09-27 17	50,10	24,00	6,66	4,91	1,59	10	0,77	1,3
11		2006-05-18 19	10,80	4,75	3,37	2,31	1,37	11	0,85	1,2
12		2001-11-29 08	30,90	35,50	6,71	4,59	0,67	12	0,92	1,1
1	Berna	2011-08-28 07	140,60	18,05	3,71	58,27	0,30	1	0,25	4,0
2		2010-09-30 06	65,60	27,75	5,84	25,12	0,13	2	0,50	2,0
3		2012-10-06 02	31,40	9,45	4,08	5,45	0,04	3	0,75	1,3
1	Binet	1995-07-23 05	64,60	12,42	6,17	20,84	4,14	1	0,25	4,0
2		1996-07-19 13	61,60	30,92	24,50	29,48	2,19	2	0,50	2,0
3		1994-11-02 02	31,00	11,83	4,45	9,23	1,86	3	0,75	1,3
1	Cloutier	2011-07-03 19	96,60	2,35	1,89	31,19	6,78	1	0,20	5,0
2		2010-10-14 21	59,60	27,60	12,25	20,27	1,78	2	0,40	2,5
3		2009-07-29 16	32,40	11,00	3,14	9,27	1,28	3	0,60	1,7
4		2012-10-19 04	50,60	37,45	28,91	10,31	0,71	4	0,80	1,3
1	Dauphine	2007-07-19 16	76,80	37,00	11,56	28,09	10,76	1	0,06	18,0
2		2006-10-28 06	77,50	42,00	20,19	30,66	10,22	2	0,11	9,0
3		2003-08-04 03	99,80	44,00	26,36	25,61	8,86	3	0,17	6,0
4		2011-08-28 11	57,40	15,00	12,00	22,22	7,65	4	0,22	4,5
5		2008-09-14 07	62,80	21,00	12,78	17,96	6,68	5	0,28	3,6
6		1999-06-07 10	52,00	18,00	17,43	11,74	5,99	6	0,33	3,0
7		2004-09-09 08	82,40	20,00	13,94	18,08	5,94	7	0,39	2,6
8		2013-05-10 17	57,30	19,00	17,53	13,90	5,85	8	0,44	2,3
9		2005-11-15 20	23,80	20,00	20,88	15,91	5,45	9	0,50	2,0
10		2010-09-30 08	54,70	32,00	12,56	17,78	5,34	10	0,56	1,8
11		1998-07-10 03	55,40	25,00	14,92	9,43	4,60	11	0,61	1,6
12		2012-06-02 13	38,10	28,00	8,75	12,05	4,01	12	0,67	1,5
13		2000-09-14 18	62,40	40,00	8,07	8,96	3,57	13	0,72	1,4
14		2009-10-23 19	20,00	22,00	19,28	13,19	3,13	14	0,78	1,3
15		1997-11-04 15	49,20	9,00	11,06	5,64	3,02	15	0,83	1,2
16		2001-10-23 15	76,80	16,00	11,66	5,48	2,76	16	0,89	1,1
17		2002-11-22 02	13,40	12,00	27,95	7,88	2,08	17	0,94	1,1

Id	Bassin versant	Date réf.	Ppt (mm)	Durée Ppt (h)	tp (h)	Hru (mm)	Qmax Ru (m³/s)	Rang	Prob.	Récur-rence
1	Ewing	2006-05-19 09	63,40	31,50	16,92	29,50	16,32	1	0,08	13,0
2		2003-08-12 11	42,30	8,50	3,04	7,69	12,37	2	0,15	6,5
3		2011-08-28 04	91,40	18,75	9,61	15,61	12,25	3	0,23	4,3
4		2010-10-14 19	56,00	33,25	11,52	26,25	11,85	4	0,31	3,3
5		2002-06-10 20	78,50	34,25	13,24	22,46	10,40	5	0,38	2,6
6		2005-06-15 08	63,30	70,50	45,56	29,30	9,01	6	0,46	2,2
7		2008-10-28 06	29,20	24,00	10,87	11,38	6,57	7	0,54	1,9
8		2012-10-19 08	32,20	37,25	21,24	11,94	5,30	8	0,62	1,6
9		2009-06-15 11	10,40	3,00	3,67	2,72	4,41	9	0,69	1,4
10		2004-09-08 10	50,20	58,50	17,05	10,04	4,22	10	0,77	1,3
11		2007-06-05 09	29,80	9,25	5,84	2,43	3,15	11	0,85	1,2
12		2001-11-30 06	6,10	15,00	17,07	2,41	0,99	12	0,92	1,1
1	Fourchette Amont	2006-10-20 17	46,74	10,17	6,91	14,16	1,89	1	0,10	10,0
2		2011-08-28 03	81,03	16,83	12,04	26,59	1,64	2	0,20	5,0
3		2004-09-03 13	28,45	4,33	3,07	5,11	1,22	3	0,30	3,3
4		2008-06-28 09	32,63	18,33	2,54	7,63	1,16	4	0,40	2,5
5		2005-06-16 04	19,05	7,00	3,35	2,80	0,91	5	0,50	2,0
6		2012-06-02 01	67,31	25,83	6,54	5,10	0,75	6	0,60	1,7
7		2007-07-28 17	21,08	6,33	2,20	1,97	0,72	7	0,70	1,4
8		2009-07-02 13	65,53	57,33	40,05	10,78	0,65	8	0,80	1,3
9		2010-06-23 21	43,69	7,67	3,33	2,63	0,61	9	0,90	1,1
1	Fourchette Aval	2006-10-20 14	47,50	13,00	3,33	16,85	2,80	1	0,10	10,0
2		2004-09-03 20	28,45	4,33	0,94	4,86	2,26	2	0,20	5,0
3		2007-07-19 03	30,48	3,33	1,59	4,92	1,55	3	0,30	3,3
4		2008-09-14 16	44,96	5,00	1,08	4,03	1,25	4	0,40	2,5
5		2011-08-28 01	81,03	16,83	8,07	10,09	1,13	5	0,50	2,0
6		2012-06-29 06	17,78	4,17	1,62	3,07	0,87	6	0,60	1,7
7		2009-06-25 16	37,08	2,67	1,50	1,09	0,39	7	0,70	1,4
8		2005-06-16 04	19,05	7,00	5,27	1,29	0,23	8	0,80	1,3
9		2010-06-23 17	43,69	7,67	5,47	0,84	0,21	9	0,90	1,1
1	Petite rivière Bellevue	2010-09-30 05	71,20	26,50	11,73	25,88	4,69	1	0,20	5,0
2		2011-08-28 07	70,00	17,25	16,38	16,65	4,68	2	0,40	2,5
3		2009-06-28 17	55,60	54,25	16,70	16,90	3,05	3	0,60	1,7
4		2012-05-29 11	21,80	41,25	7,70	6,11	1,83	4	0,80	1,3
1	Petite rivière Pot-au-Beurre	2011-08-28 06	70,00	17,25	7,32	7,60	3,61	1	0,20	5,0
2		2010-10-15 03	47,40	51,25	10,78	20,50	2,65	2	0,40	2,5
3		2009-06-28 23	54,40	48,25	14,92	13,07	1,99	3	0,60	1,7
4		2012-10-18 23	54,00	121,25	8,40	3,45	0,48	4	0,80	1,3
1	Petite rivière Savane	2011-05-03 09	70,20	98,50	30,71	28,91	2,02	1	0,25	4,0
2		2010-09-23 23	43,00	33,25	11,53	5,12	1,66	2	0,50	2,0
3		2009-11-27 05	36,80	34,75	13,20	4,21	0,96	3	0,75	1,3

Id	Bassin versant	Date réf.	Ppt (mm)	Durée Ppt (h)	tp (h)	Hru (mm)	Qmax Ru (m³/s)	Rang	Prob.	Récur-rence
1	Ruisseau Couturier	2010-11-04 13	32,60	27,00	13,77	10,03	3,15	1	0,25	4,0
2		2011-08-10 22	30,00	32,50	4,45	3,66	2,96	2	0,50	2,0
3		2009-11-27 08	38,40	51,00	7,82	9,35	2,48	3	0,75	1,3
1	Turmel	1994-08-14 02	51,20	12,08	4,62	13,00	2,58	1	0,25	4,0
2		1995-07-23 10	70,60	13,00	3,30	21,63	2,27	2	0,50	2,0
3		1996-07-04 16	14,60	10,75	2,77	8,51	1,74	3	0,75	1,3
1	Walbridge Amont	2006-05-19 10	63,60	32,75	15,45	30,89	2,84	1	0,14	7,0
2		2002-07-17 16	7,60	3,00	3,14	6,86	2,11	2	0,29	3,5
3		2003-11-19 17	32,20	12,50	9,62	13,61	2,08	3	0,43	2,3
4		2005-11-29 19	20,40	6,25	4,90	7,57	1,84	4	0,57	1,8
5		2004-09-09 15	18,90	13,50	6,03	7,15	1,14	5	0,71	1,4
6		2001-11-29 09	30,90	35,50	13,82	3,86	0,41	6	1,00	1,0
1	Walbridge Aval	2002-05-31 03	44,00	20,00	14,68	28,96	5,24	1	0,17	6,0
2		2006-05-19 09	63,90	36,25	22,50	32,44	2,36	2	0,33	3,0
3		2003-11-19 16	32,20	12,50	13,68	15,81	1,81	3	0,50	2,0
4		2005-10-13 05	56,70	90,00	43,46	21,22	1,45	4	0,67	1,5
5		2004-09-08 16	50,20	58,50	21,91	15,06	1,13	5	0,83	1,2

Date réf. = Date de référence

Ppt (mm) = Précipitation total observée

Durée Ppt (h) = durée de la précipitation total

tp (h) = temps de montée observé

Hru (mm) = hauteur de ruissellement observée

Qmax Ru (m³/s) = débit maximum ruisselé (m³/s) observé

Prob. = probabilité de dépassement

2.4.4.1. Concept de courbes enveloppes

Les équations de régression de Hru développées dans le cadre de la présente étude prédisent les 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 de la régression linéaire d'une fonction $y = b + ax$, les limites de confiance sont définies par les limites de confiance des paramètres (équation 7) :

$$\begin{aligned}
 & \text{limites de confiance} & a \pm t(\alpha/2, n - 2) Se(a) \\
 & \text{des paramètres :} & b \pm t(\alpha/2, n - 2) Se(b)
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Où :

- α = niveau de confiance
- t = valeur de la fonction de Student
- n = nombre d'observations

- $Se(a)$ = écart type de l'estimateur de « a »
- $Se(b)$ = écart type de l'estimateur de « b »

Et la courbe enveloppe se définit comme suit :

Courbe enveloppe
$$y \cong b + t(\alpha/2, n - 2) Se(b) + (a + t(\alpha/2, n - 2) Se(a)) x \quad [8]$$

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

$$P(x > xa) = 1 / T \quad [9]$$

Où : T = récurrence (an)

Dans cette étude, tous les évènements ayant produit du ruissellement (en moyenne 11 évènements 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'observation de $1 / 22 + 1$. Ainsi, la probabilité approximative peut être établie de la façon suivante :

$$P(x > xa) \cong (1 / T) (durée / n + 1) = \alpha / 2 \quad [10]$$

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

Les figures 20 et 21 et l'annexe 5 présentent les hauteurs de ruissellement observées et prédites avec les courbes enveloppes respectives de récurrence 2 et 5 ans pour les bassins versants mis à contribution dans la validation des projections des débits de pointe. Seuls les bassins versants ayant plus de deux années de données ont été retenus pour cette étape.

Les ratios entre les débits prédits et observés ont été calculés afin d'évaluer la performance du modèle de prédiction proposé. Le tableau 23 présente les différents paramètres utilisés en intrants au modèle de prédiction des débits de crue et le tableau 24 en présente les résultats.

En utilisant les courbes enveloppes, les ratios Q_{max} prédit/ Q_{max} moyens estimés sont respectivement de 1,13 et 0,89 pour les récurrences de 2 et 5 (tableau 25). Les ratios jouent entre 0,22 et 2,28, ce qui montre une grande variation. Le coefficient de variation est en moyenne de 0,41.

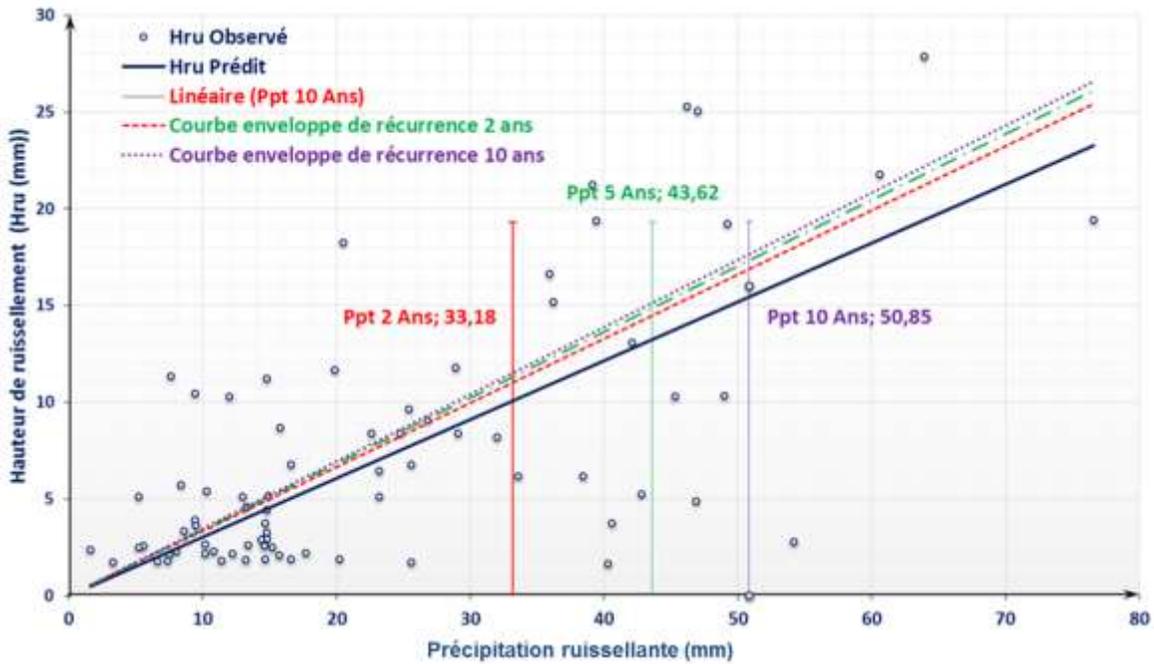


Figure 20. Hauteurs de ruissellement observées et prédites avec ses courbes enveloppes respectives de récurrence 2 et 5 ans pour le bassin versant Aux Castors.

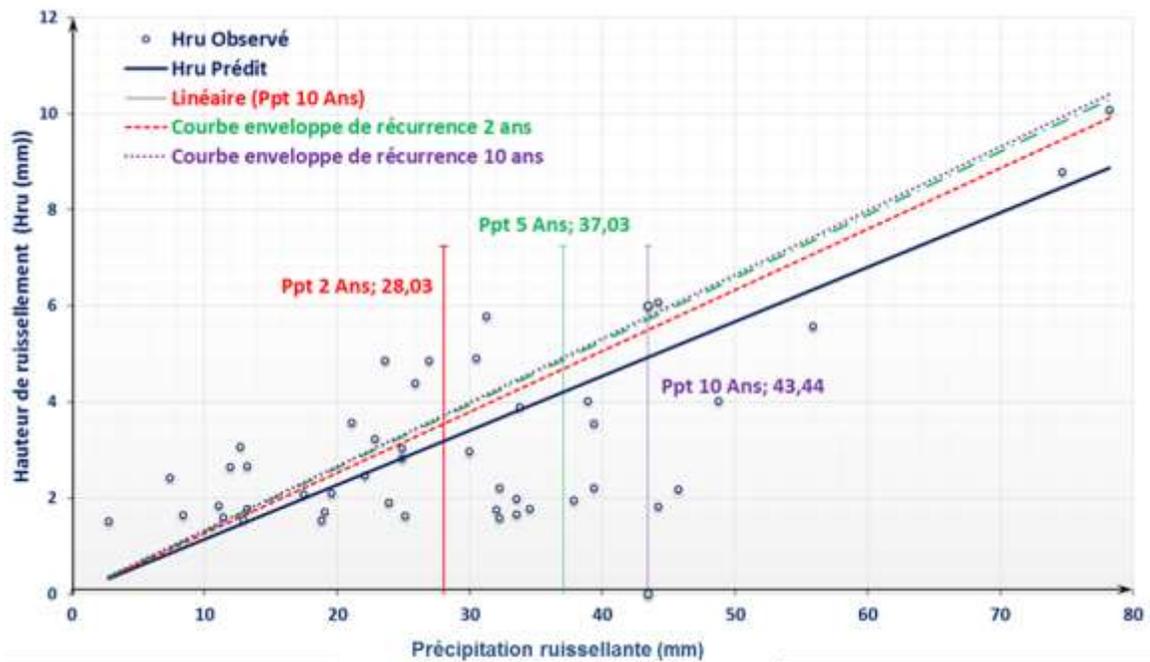


Figure 21. Hauteurs de ruissellement observées et prédites avec ses courbes enveloppes respectives de récurrence 2 et 5 ans pour le bassin versant Fourchette Aval.

Tableau 23. Paramètres observés pour les bassins versants mis à contribution dans la validation de la méthode de prédiction des débits de pointe.

Valeurs Observées									
#	Bassin Versant	Obs	tp (h)	$\phi(\alpha)$	A (ha)	Qmax ruisselé (m ³ /s)		Ppt_ru IDF (mm)	
						2 ans	5 ans	2 Ans	5 Ans
1	Aux Castors	71	6,94	0,82	1033	3,04	4,94	33,27	43,71
2	Berna	6	0,48	0,59	7	0,14	0,38	10,05	14,76
3	Binet	34	5,83	0,91	485	2,61	4,78	30,58	40,25
4	Cloutier	11	6,83	0,59	445	2,34	6,67	32,04	42,28
5	Dauphine	177	11,86	0,75	2098	5,27	8,07	45,57	59,97
6	Ewing	67	9,88	0,89	2734	7,42	12,77	39,28	51,56
7	Fourchette_Amont	41	5,42	0,93	338	1,00	1,56	27,31	35,97
8	Fourchette_Aval	44	3,79	1,06	229	1,07	2,17	28,17	37,21
9	Petite_Riviere_Bellevue	18	12,12	0,63	1800	3,41	5,57	38,92	50,93
10	Petite_Riviere_Potau_Beurre	8	11,91	0,76	2006	2,04	4,08	35,67	46,68
11	Petite_Riviere_Savane	3	13,18	0,91	1386	1,50	2,44	43,63	57,10
12	Ruisseau_Couturier	6	13,78	0,72	1979	2,83	3,44	43,91	57,44
13	Turmel	18	3,22	0,63	393	2,16	2,90	20,83	27,55
14	Walbridge_Amont	26	7,14	0,85	549	1,63	2,78	35,54	46,70
15	Walbridge_Aval	22	9,95	0,94	659	2,21	4,57	39,06	51,27
Moyenne		37	8,15	0,80	1076	2,58	4,47	33,59	44,22
Écart type		44	4,02	0,15	852	1,80	3,04	9,44	12,05
Cv		1,2	0,49	0,18	0,79	0,70	0,68	0,28	0,27

A (ha) = superficie du bassin versant (ha)

Obs = nombre d'observations

tp (h) = temps de montée

$\phi(\alpha)$ = paramètre de forme de l'hydrogramme

Ppt_ru IDF = hauteur de précipitation ruisselante en fonction de la précipitation totale dérivée de la courbe IDF

Cv = coefficient de variation

Tableau 24. Paramètres observés et comparaison des débits de crue prédits aux débits observés.

#	Bassin Versant	Obs	tp (h)	$\phi(\alpha)$	A (ha)	Qmax prédit (m ³ /s)		Qmax prédit/ Qmax observé	
						2 ans	5 ans	2 ans	5 ans
1	Aux Castors	71	6,94	0,82	1033	3,74	5,05	1,23	1,02
2	Berna	6	0,48	0,59	7	0,11	0,17	0,80	0,45
3	Binet	34	5,83	0,91	485	2,40	3,25	0,92	0,68
4	Cloutier	11	6,83	0,59	445	1,07	1,45	0,46	0,22
5	Dauphine	177	11,86	0,75	2098	4,65	6,21	0,88	0,77
6	Ewing	67	9,88	0,89	2734	8,07	10,90	1,09	0,85
7	Fourchette Amont	41	5,42	0,93	338	0,86	1,17	0,86	0,75
8	Fourchette Aval	44	3,79	1,06	229	0,64	0,87	0,60	0,40
9	Petite rivière Bellevue	18	12,12	0,63	1800	2,79	3,80	0,82	0,68
10	Petite rivière Pot-au-Beurre	8	11,91	0,76	2006	3,69	5,10	1,81	1,25
11	Petite rivière Savane	3	13,18	0,91	1386	3,42	4,77	2,28	1,95
12	Ruisseau Couturier	6	13,78	0,72	1979	4,35	5,96	1,53	1,74
13	Turmel	18	3,22	0,63	393	2,30	3,15	1,07	1,09
14	Walbridge Amont	26	7,14	0,85	549	2,02	2,77	1,24	1,00
15	Walbridge Aval	22	9,95	0,94	659	2,70	3,70	1,23	0,81
Moyenne		37	8,15	0,80	1076	2,85	3,89	1,12	0,91
Écart type		44	4,02	0,15	852	1,99	2,68	0,47	0,47
Cv		1,2	0,49	0,18	0,79	0,70	0,69	0,42	0,51
Coefficient de détermination R²								0,79	0,62

A (ha) = superficie du bassin versant (ha)

Obs = nombre d'observations

tp (h) = temps de montée

$\phi(\alpha)$ = paramètre de forme de l'hydrogramme

Qmax observé (m³/s) = débit maximum ruisselé (m³/s) observé

Qmax prédit (m³/s) = débit maximum ruisselé (m³/s) prédit

2.4.5. Séparation géochimique (conductivité électrique)

La plupart des sites expérimentaux mis à profit dans le cadre de cette étude ont profité d'un suivi en continu de plusieurs paramètres physico-chimiques au moyen de sondes multi-paramètres (Michaud et al., 2009a, 2012). Le signal de conductivité électrique typiquement colligé au pas de temps de 15 minutes aux exutoires de ces bassins versants expérimentaux permet la séparation des hydrogrammes de crue en ses composantes d'écoulement rapide, associée au ruissellement surface, et d'écoulement lent, associée aux écoulements souterrains. Cette approche de séparation géochimique est réputée produire une estimation plus représentative de la composante du ruissellement de surface que la méthode de séparation manuelle, basée uniquement sur l'interprétation de l'hydrogramme. Suivant une approche de bilan de masse, le débit total du ruisseau cumule les contributions du ruissellement et de l'écoulement souterrain, associés à des conductivités électriques distinctes. La conductivité dans la colonne d'eau change en fonction des proportions variables des écoulements de surface et souterrain. Ainsi, en période d'étiage, la concentration en sels dissous a tendance à être élevée, alors qu'en période de crue elle diminue en réponse à la dilution occasionnée par la pluie et le ruissellement de surface.

Pour résoudre l'équation de bilan de masse, il est nécessaire d'estimer la composition chimique des composantes du ruissellement et de l'écoulement lent. L'approche retenue dans le cadre de la présente étude est fondée sur les hypothèses suivantes :

- la conductivité de l'écoulement lent est estimée égale à la conductivité des écoulements des avant-crués;
- la conductivité de référence du ruissellement correspond aux plus petites valeurs de conductivité électrique observées au site à l'étude, découlant des plus fortes crues à dominance de ruissellement de surface;
- les valeurs de la conductivité électrique du ruissellement et de l'écoulement souterrain sont supposées constantes au cours de la période d'enregistrement.

Dans la perspective où un seul traceur est utilisé et que l'hydrogramme est séparé en deux composantes, les équations du bilan sont les suivantes:

$$QT = QS + QL \quad [11]$$

$$CT * QT = CS QS + CL QL \quad [12]$$

Où :

QT, QS, QL sont les débits instantanés des eaux associés à l'écoulement total, au ruissellement et à l'écoulement lent;

CT, CR, CL sont les conductivités électriques instantanées de l'écoulement total, rapide et lent.

La proportion relative de l'écoulement lent QL/QT peut alors être calculée en combinant les deux équations précédentes en celle-ci :

$$\frac{Q_L}{Q_T} = \frac{C_T - C_R}{C_L - C_R} \quad [13]$$

Les hydrogrammes de 14 bassins versants expérimentaux du réseau d'étude ont été séparés suivant la méthode du bilan de masse appliquée au signal de conductivité électrique à l'intérieur du logiciel VisuHydro. Les figures 22 et 23 illustrent l'application de la méthode aux observations du ruisseau Aux Castors en Montérégie. Les résultats de la séparation manuelle sont également présentés pour fins de comparaison. Dans le premier cas (figure 22), il est observé que les deux méthodes produisent des estimations équivalentes du ruissellement de surface, reflétant une forte intensité de précipitation s'abattant sur un bassin en condition d'étiage. Dans le deuxième cas, à l'exutoire du même bassin (figure 23), la méthode manuelle surestime la contribution du ruissellement au débit total du ruisseau. Une intensité décroissante de la précipitation, de même qu'un débit initial relativement élevé, attribué à un écoulement souterrain, contribuerait à expliquer les divergences dans les méthodes. Cet exemple traduit bien l'avantage de la méthode de séparation géochimique qui s'appuie sur les signatures distinctes des écoulements plutôt que sur la seule variation du débit total.

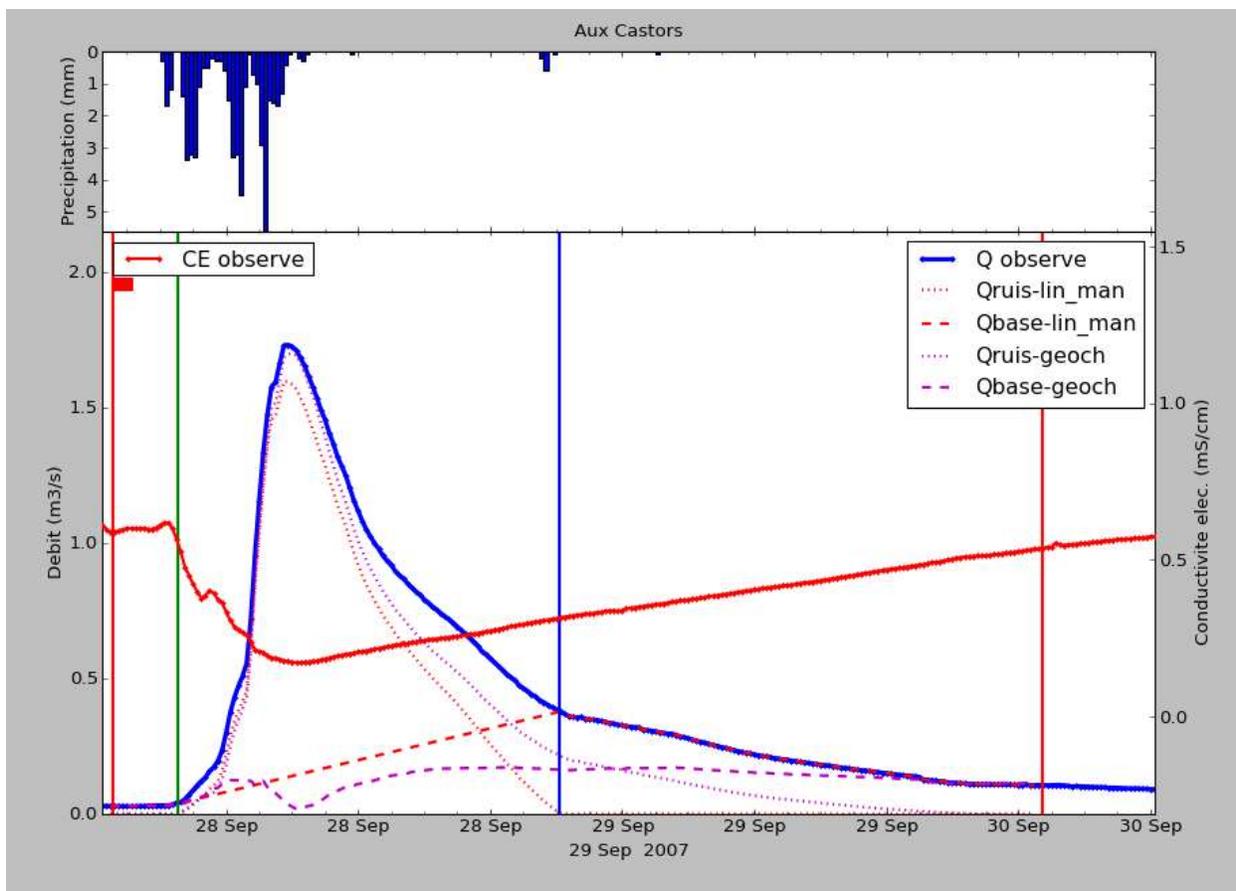


Figure 22. Petites différences obtenues pour les débits de base et ruissellé par les deux méthodes de séparation de l'hydrogramme (manuelle et géochimique).

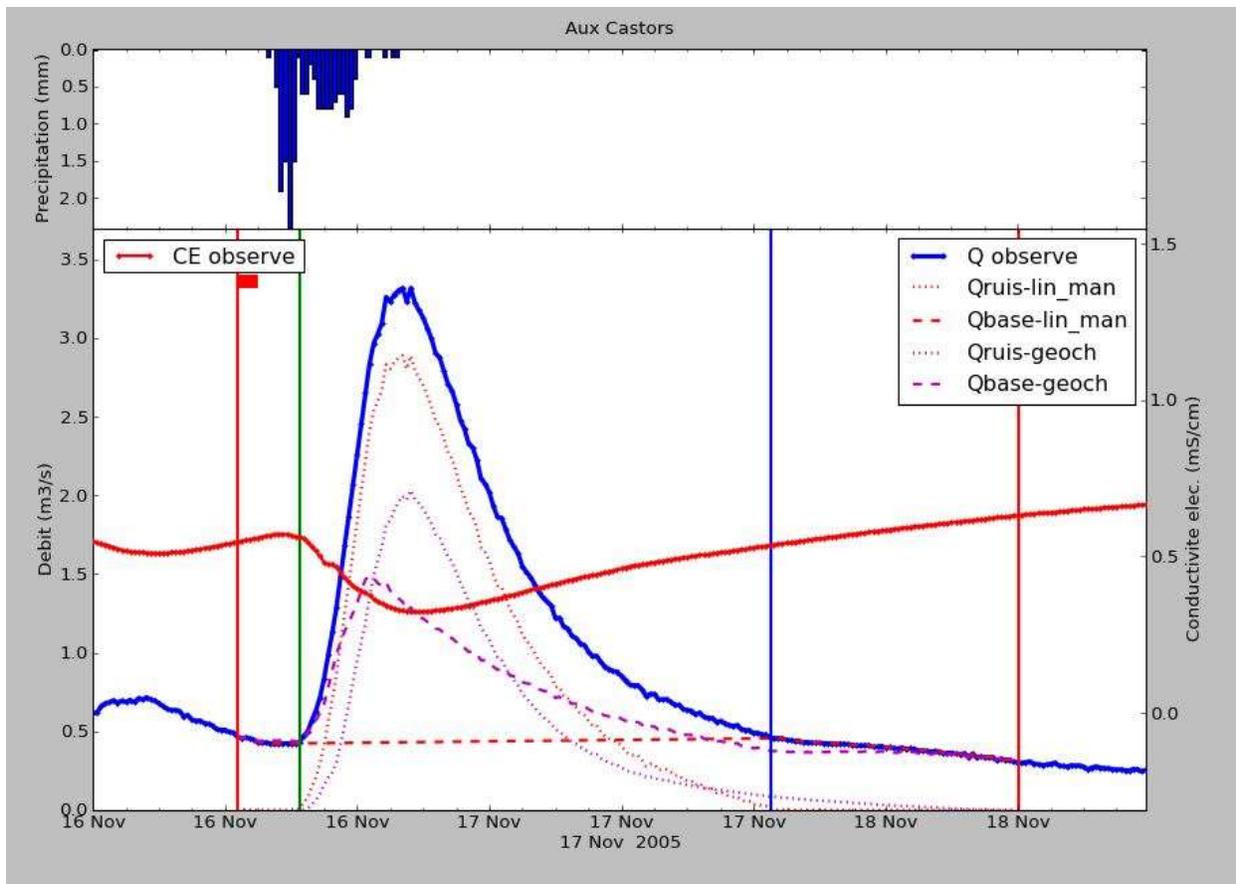


Figure 23. Grandes différences obtenues pour les débits de base et ruisselé par les deux méthodes de séparation de l'hydrogramme (manuelle et géochimique).

Les valeurs moyennes des hauteurs et coefficients de ruissellement estimés selon les méthodes de séparation des hydrogrammes manuelle et géochimique sont respectivement présentées aux tableaux 25 et 26. La comparaison des moyennes de maxima de débits ruisselés et de coefficients de ruissellement démontre qu'à chacun des sites, la méthode manuelle conduit à une surestimation du ruissellement. La moyenne de la surestimation est de l'ordre de 46 % en ce qui a trait au coefficient de ruissellement pour l'ensemble des sites. Les différences sont particulièrement marquées aux sites expérimentaux du Témiscouata (ruisseau Couturier et Petite rivière Savane) où le coefficient de ruissellement moyen estimé pour les mêmes évènements hydrologiques est trois fois plus élevé suivant la méthode manuelle. Une explication à cette importante différence tiendrait au relief accidenté, à la perméabilité des sols et à l'occupation forestière dominante dans de ces bassins. Ces conditions favoriseraient les écoulements latéraux, relativement rapides et chargés en électrolytes. Le bassin de la Petite rivière Pot-au-Beurre, dans la Baie Lavallière, affiche lui aussi un coefficient de ruissellement moyen estimé par la méthode géochimique (0,07) beaucoup plus faible que par la méthode manuelle (0,16). La perméabilité élevée des sols et l'efficacité du drainage souterrain systématique des terres y expliqueraient cette différence.

Le tableau 27 compare les temps de montée estimés à partir des hydrogrammes séparés selon les méthodes manuelle et géochimique. Les résultats sont également illustrés en figure 24. De façon

générale, la surestimation de la hauteur de ruissellement avec la méthode manuelle se traduit en surestimation du temps de montée de l'ordre de 20 % par rapport à la méthode géochimique. Cette différence exprime le rabattement plus rapide de la hauteur d'eau ruisselée observée fréquemment sur les hydrogrammes de ruissellement compilés à partir du signal de conductivité (figure 23). Seuls deux bassins se distinguent à la baisse dans les ratios de temps de montée estimés suivant les méthodes manuelle et géochimique. Cette sous-estimation de la méthode manuelle reflète les différences dans les paramètres de forme des hydrogrammes estimés selon les deux méthodes. En effet, le bassin Fourchette amont en Beauce, de même que le bassin de la Petite rivière Savane au Témiscouata témoignent non seulement de temps de montée sous-estimés en méthode manuelle, mais ils témoignent aussi de coefficients de forme plus élevés qu'en méthode de séparation géochimique (tableau 28).

Tableau 25. Résumé des valeurs moyennes observées selon la méthode manuelle de séparation des hydrogrammes.

Méthode de séparation des hydrogrammes : manuelle											
Id	Bassin versant	Obs	Ppt (mm)	Durée (h)	Ppt_in	Ppt_ru	Qmax (m³/s)	Qmax_ru (m³/s)	Qmax_ba (m³/s)	Hru (mm)	Cru
1	Aux Castors	83	23,64	18,60	6,22	17,42	1,69	1,35	0,35	4,84	0,20
2	Esturgeon Branche 21	20	17,52	18,29	6,44	11,08	0,26	0,21	0,05	2,54	0,15
3	Esturgeon Branche 6	16	18,54	18,80	4,95	13,59	0,12	0,09	0,03	1,01	0,07
4	Ewing	69	23,86	23,59	4,83	19,03	2,82	2,29	0,53	4,36	0,16
5	Fourchette Amont	86	27,56	15,90	6,34	21,22	0,53	0,40	0,13	3,59	0,13
6	Petite rivière Bellevue	43	28,36	34,35	4,17	24,19	1,14	0,95	0,19	4,50	0,14
7	Petite rRivière Pot-au-Beurre	32	25,95	43,59	4,19	21,76	1,05	0,78	0,27	4,13	0,16
8	Petite rivière Savane	20	27,38	29,43	2,10	25,28	1,29	1,00	0,29	5,05	0,17
9	Rivière Noire	21	31,43	20,14	8,32	23,10	1,44	1,22	0,22	6,21	0,20
10	Ruisseau Brook	33	23,48	12,00	5,83	17,65	1,57	1,22	0,35	6,12	0,29
11	Ruisseau Cass	14	33,11	18,95	8,01	25,10	1,02	0,72	0,29	3,89	0,12
12	Ruisseau Couturier	15	28,85	37,85	2,48	26,37	1,94	1,55	0,39	7,78	0,25
13	Walbridge Amont	27	23,06	25,92	3,64	19,42	0,90	0,67	0,23	5,59	0,23
14	Walbridge Aval	28	23,06	27,62	3,45	19,61	0,96	0,64	0,32	5,70	0,23
Moyenne		36	25,41	24,64	5,07	20,34	1,19	0,94	0,26	4,66	0,18
Écart type		25	4,43	9,04	1,89	4,46	0,70	0,57	0,14	1,67	0,06
Minimum		14	17,52	12,00	2,10	11,08	0,12	0,09	0,03	1,01	0,07
Maximum		86	33,11	43,59	8,32	26,37	2,82	2,29	0,53	7,78	0,29
Total des évènements		507									

Ppt = précipitation total (mm)

Durée = durée de la précipitation total (h)

Ppt_in = précipitation avant le début du ruissellement (mm)

Ppt_ru = précipitation ruisselante (mm)

Hru = hauteur de ruissellement (mm)

Cru = coefficient de ruissellement

Qmax = débit maximum de crue (m³/s)

Qmax_ba = débit maximum de base (m³/s)

Qmax_ru = débit maximum ruisselé (m³/s)

Obs = Nombre d'observations

Tableau 26. Résumé des valeurs moyennes observées selon la méthode géochimique (conductivité électrique) de séparation des hydrogrammes.

Méthode de séparation des hydrogrammes géochimique (conductivité électrique)										
Id	Bassin versant	Obs	Qmax (m³/s)	Qmax_ru (m³/s)	Qmax_ba (m³/s)	Hru (mm)	Cru	CE_0	CE_f	CE_R
1	Aux Castors	83	1,69	1,17	0,53	4,47	0,17	0,67	0,61	0,17
2	Esturgeon Branche 21	20	0,26	0,19	0,06	2,16	0,13	1,05	0,96	0,17
3	Esturgeon Branche 6	16	0,12	0,06	0,06	0,35	0,02	0,80	0,75	0,22
4	Ewing	69	2,82	1,95	0,87	3,70	0,12	0,62	0,58	0,15
5	Fourchette Amont	86	0,53	0,31	0,22	3,03	0,11	0,57	0,50	0,11
6	Petite rivière Bellevue	43	1,14	0,67	0,47	2,94	0,09	0,46	0,46	0,13
7	Petite rivière Pot-au-Beurre	32	1,05	0,44	0,61	1,68	0,07	0,81	0,81	0,18
8	Petite rivière Savane	20	1,29	0,67	0,62	2,46	0,07	0,93	0,46	0,09
9	Rivière Noire	21	1,44	1,02	0,42	4,46	0,13	0,34	0,27	0,08
10	Ruisseau Brook	33	1,57	1,02	0,55	5,39	0,21	0,31	0,28	0,10
11	Ruisseau Cass	14	1,02	0,64	0,38	3,54	0,09	0,29	0,26	0,10
12	Ruisseau Couturier	15	1,94	0,64	1,30	2,96	0,08	0,17	0,15	0,08
13	Walbridge Amont	27	0,90	0,61	0,29	5,22	0,20	0,53	0,49	0,17
14	Walbridge Aval	28	0,96	0,59	0,37	5,06	0,18	0,45	0,43	0,14
Moyenne		36	1,19	0,71	0,48	3,39	0,12	0,57	0,50	0,13
Écart type		25	0,70	0,47	0,32	1,46	0,06	0,26	0,23	0,04
Minimum		14	0,12	0,06	0,06	0,35	0,02	0,17	0,15	0,08
Maximum		86	2,82	1,95	1,30	5,39	0,21	1,05	0,96	0,22
Total des évènements		507								

Qmax = débit maximum de crue (m³/s)

Qmax_ba = débit maximum de base (m³/s)

Qmax_ru = débit maximum ruisselé (m³/s)

Cru = coefficient de ruissellement

Obs = nombre d'observations

Hru = hauteur de ruissellement (mm)

CE_0 = conductivité électrique initiale

CE_f = conductivité électrique finale

CE_R = conductivité électrique au niveau de référence

Le tableau 28 compare les moyennes de hauteurs de ruissellement estimées suivant les méthodes manuelle et géochimique de séparation des hydrogrammes. Considérant l'ensemble des sites, la méthode manuelle surestime en moyenne la hauteur de ruissellement à une hauteur de 22 % par rapport à la méthode géochimique. Représentant les résultats observés sur les coefficients de ruissellement, quelques bassins contribuent de façon importante à élever ce ratio. Des conditions particulièrement favorables à l'écoulement souterrain expliqueraient alors une estimation de la hauteur de ruissellement à la baisse suivant la méthode géochimique. Ces conditions favorables à l'écoulement correspondent, entre autres, aux sols organiques de la Branche 6 de l'Esturgeon, au drainage souterrain systématique de la Petite rivière-Pot-au-Beurre et de la Branche 21 de l'Esturgeon, ou à l'écoulement latéral dans le ruisseau Couturier.

À l'instar des estimations des hauteurs de ruissellement, la méthode manuelle de séparation des hydrogrammes conduit à des estimations de débits de pointe plus élevées qu'en méthode géochimique, de l'ordre de 37 % en moyenne. Les ratios observés (tableau 29) pour les différents bassins reflètent ceux estimés pour les hauteurs de ruissellement. En contre-partie, les

estimations de hauteurs de ruissellement relativement plus basses suivant la méthode géochimique pour certains bassins versants traduisent des contributions importantes de l'écoulement base, ou souterrain, au débit de pointe. Les moyennes dans les maxima de débits de base rapportées au tableau 28 sont particulièrement éloquents à cet égard. En effet, ces dernières dépassent généralement les maxima estimés du ruissellement de surface. Les gradients à la hausse dans les maxima d'écoulement de base, par rapport aux maxima ruisselés, sont d'autant plus importants dans les bassins systématiquement drainés souterrainement. L'implication pratique de ces résultats de séparations géochimiques des hydrogrammes de crue repose sur l'importance de considérer les écoulements de base, ou souterrain, dans la prédiction des débits de pointe des petits bassins versants en milieu agricole au Québec.

En terminant, soulignons ici que l'opportunité d'étudier le comportement hydrologique des bassins agricoles québécois en combinant les perspectives géochimique et hydrométrique est toute récente. La présente étude, grâce au support des nouvelles fonctionnalités de VisuHydro, a permis une ouverture considérable sur le sujet, en mettant à profit l'analyse d'un grand nombre d'évènements hydrologiques. Il faut toutefois souligner ici que la méthode de séparation géochimique s'est avérée très sensible à la valeur de conductivité électrique de référence associée au ruissellement de surface. Dans le cadre de la présente étude, une valeur de référence unique a été retenue pour chaque bassin versant, quel que soit l'année ou l'évènement à l'étude. Considérons ainsi le caractère exploratoire de ce volet d'étude. L'interprétation du signal géochimique mérite définitivement une analyse plus approfondie que celle permise dans le cadre de cette courte étude.

Tableau 27. Sommaire des valeurs moyennes observées de hauteurs de ruissellement (mm), pour les deux méthodes de séparation des hydrogrammes : manuelle et géochimique (conductivité électrique).

Hru (mm)									
Id	Bassin versant	Obs	Séparation manuelle			Séparation géochimique			Ratio manuelle/ géochimique
			Moyenne	Écart type	Cv	Moyenne	Écart type	Cv	
1	Aux Castors	83	4,84	5,79	1,20	6,75	4,47	0,66	0,72
2	Esturgeon Branche 21	20	2,54	1,48	0,58	1,52	2,16	1,42	1,67
3	Esturgeon Branche 6	16	1,01	0,75	0,74	0,30	0,35	1,18	3,39
4	Ewing	69	4,36	5,66	1,30	6,28	3,70	0,59	0,70
5	Fourchette Amont	86	3,59	3,85	1,07	4,27	3,03	0,71	0,84
6	Petite rivière Bellevue	43	4,50	5,39	1,20	5,12	2,94	0,57	0,88
7	Petite rivière Pot-au-Beurre	32	4,13	4,35	1,05	2,52	1,68	0,67	1,64
8	Petite rivière Savane	20	5,05	6,50	1,29	4,87	2,46	0,50	1,04
9	Rivière Noire	21	6,21	6,05	0,98	5,45	4,46	0,82	1,14
10	Ruisseau Brook	33	6,12	6,78	1,11	7,93	5,39	0,68	0,77
11	Ruisseau Cass	14	3,89	3,61	0,93	4,29	3,54	0,83	0,91
12	Ruisseau Couturier	15	7,78	7,22	0,93	3,77	2,96	0,79	2,06
13	Walbridge Amont	27	5,59	6,97	1,25	8,79	5,22	0,59	0,64
14	Walbridge Aval	28	5,70	7,24	1,27	9,04	5,06	0,56	0,63
Moyenne		36	4,66	5,12	1,06	5,06	3,39	0,75	1,22
Écart type		25	1,67	2,07	0,22	2,59	1,46	0,26	0,77
Minimum		14	1,01	0,75	0,58	0,30	0,35	0,50	0,63
Maximum		86	7,78	7,24	1,30	9,04	5,39	1,42	3,39
Total d'évènements		507							

Obs = nombre d'observations (évènements)

Cv = coefficient de variation

Hru (mm) = hauteur de ruissellement (mm)

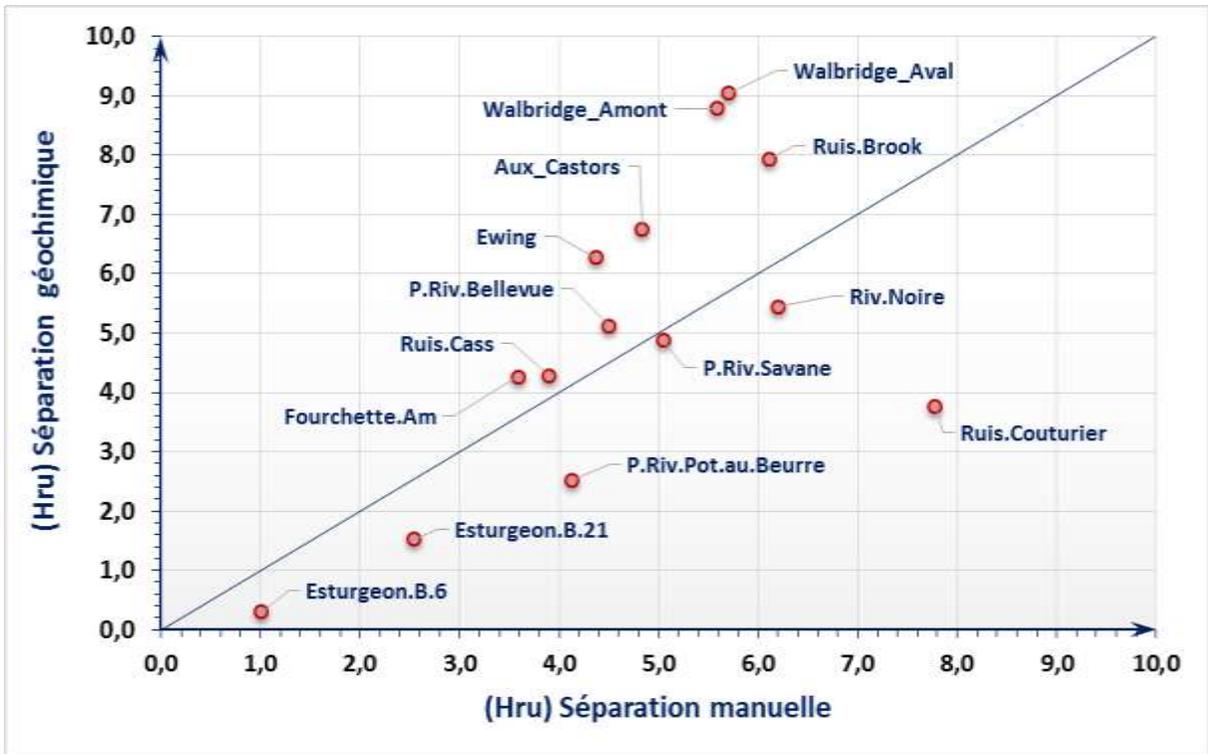


Figure 24. Ratio de hauteurs de ruissellement (Hru) (en mm) pour les deux méthodes de séparation des hydrogrammes : manuelle et géochimique (conductivité électrique).

Tableau 28. Sommaire des valeurs moyennes observées des débits maximum de ruissellement (m^3/s), pour les deux méthodes de séparation des hydrogrammes: manuelle et géochimique (conductivité électrique).

Qmax_ru (m^3/s)									
Id	Bassin versant	Obs	Séparation manuelle			Séparation géochimique			Ratio manuelle/ géochimique
			Moyenne	Écart type	Cv	Moyenne	Écart type	Cv	
1	Aux Castors	83	1,35	1,34	0,99	1,17	1,56	1,33	1,16
2	Esturgeon Branche 21	20	0,21	0,15	0,72	0,19	0,17	0,90	1,10
3	Esturgeon Branche 6	16	0,09	0,08	0,83	0,06	0,08	1,30	1,58
4	Ewing	69	2,29	2,63	1,15	1,95	2,91	1,49	1,17
5	Fourchette Amont	86	0,40	0,31	0,78	0,31	0,40	1,29	1,31
6	Petite rivière Bellevue	43	0,95	1,04	1,09	0,67	1,07	1,59	1,42
7	Petite rivière Pot-au-Beurre	32	0,78	0,68	0,87	0,44	0,57	1,30	1,78
8	Petite rivière Savane	20	1,00	0,59	0,60	0,67	0,83	1,24	1,49
9	Rivière Noire	21	1,22	1,40	1,15	1,02	1,49	1,46	1,20
10	Ruisseau Brook	33	1,22	1,20	0,98	1,02	1,37	1,34	1,19
11	Ruisseau Cass	14	0,72	0,88	1,22	0,64	1,01	1,58	1,13
12	Ruisseau Couturier	15	1,55	0,99	0,64	0,64	0,96	1,49	2,41
13	Walbridge Amont	27	0,67	0,67	1,01	0,61	0,81	1,33	1,10
14	Walbridge Aval	28	0,64	0,55	0,86	0,59	0,75	1,27	1,08
Moyenne		36	0,94	0,89	0,92	0,71	1,00	1,35	1,37
Écart type		25	0,57	0,65	0,20	0,47	0,71	0,17	0,37
Minimum		14	0,09	0,08	0,60	0,06	0,08	0,90	1,08
Maximum		86	2,29	2,63	1,22	1,95	2,91	1,59	2,41
Total des évènements		507							

Obs = nombre d'observations (évènements)

Cv = coefficient de variation

Qmax_ru = débit maximum de ruissellement (m^3/s)

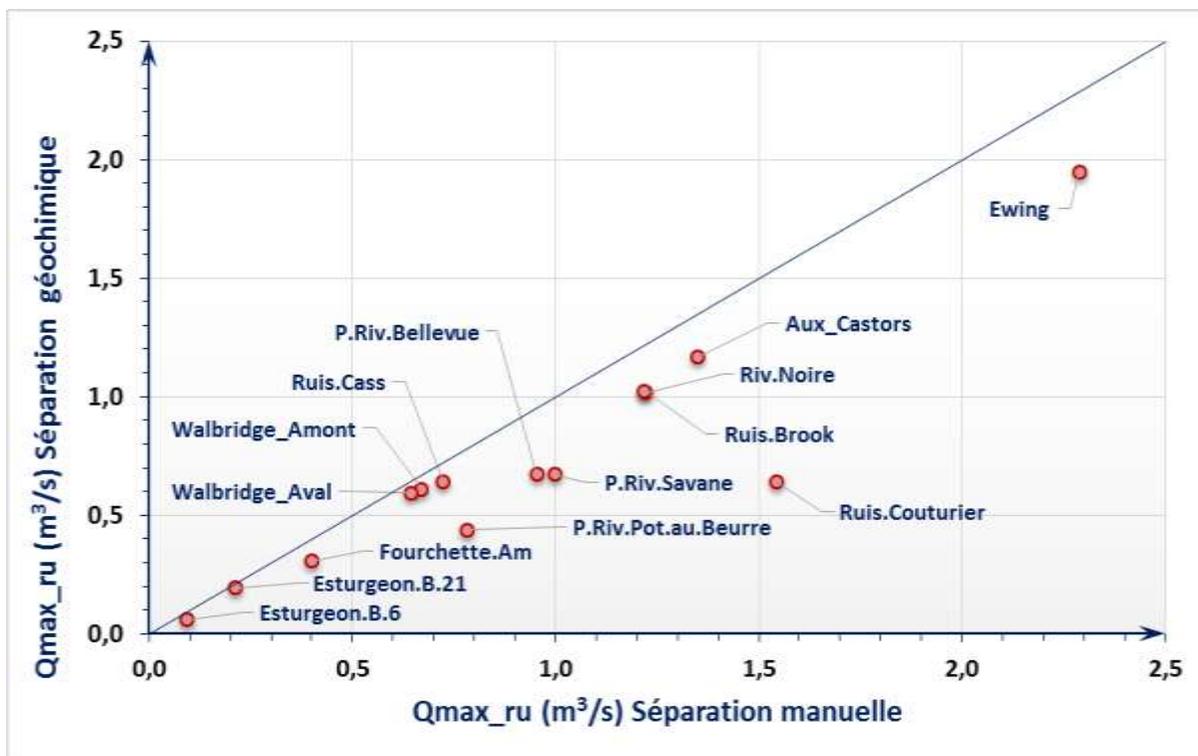


Figure 25. Ratio de coefficient de débit maximum ruisselé (Q_{max_ru}) (en m^3/s) pour les deux méthodes de séparation des hydrogrammes : manuelle et géochimique (conductivité électrique).

3. DIFFUSION DES RÉSULTATS

Le tableau « Diffusion des résultats » présenté ci-après décrit les activités de communication réalisées dans le cadre du projet. Compte tenu de la courte durée du projet (une année), les réalisations du projet feront l'objet de présentations ultérieures dans le cadre de symposiums spécialisés en hydrologie. Une proposition de communication est actuellement en attente d'acceptation en vue du prochain congrès de l'ASABE à Montréal cet été (2014). Un atelier est par ailleurs prévu avec un groupe de conseillers agricoles intervenants en aménagement hydro-agricole au cours de l'hiver 2014 afin notamment de convenir des suites à donner au projet.

DIFFUSION DES RÉSULTATS

*Supprimer ou ajouter les activités qui s'appliquent à votre projet et remplir les colonnes suivantes.
Annexer au rapport les documents de diffusion produits.*

Activités prévues de l'ANNEXE A	Activités réalisées	Description (thème, titre, endroit, etc.)	Date de réalisation	Nombre de personnes rejointes	Visibilité accordée au PCAA (logo, mention)
Présentations régionales, colloques régionaux et assemblées annuelles de clubs conseils	Présentation conjointe de Messieurs Robert Lagacé et Aubert Michaud au Congrès de l'AGRCQ (Association des gestionnaires régionaux des cours d'eau du Québec)	Conception des ouvrages hydro-agricoles dans un contexte de changements Climatiques, Mont Saint-Anne	10 avril 2013	80	Mention
Présentations régionales, colloques régionaux et assemblées annuelles de clubs conseils	Présentation de M. Robert Lagacé à l'Université du Québec à Rimouski dans le cadre d'un séminaire sur la gestion de l'eau	Débits de crue au Québec – 12 bassins versants, Rimouski	28 juin 2013	8	Mention
Présentations dans le cadre de colloques scientifiques provinciaux (AQSSS, colloques CRAAQ, etc.)	Présentation orale de 15 minutes par M. Nestor-Raul Rocha dans le cadre du colloque 2013 de l'AQSSS	Débit de crue et analyse hydrologique de petits bassins versants	28 mai 2013	50	Mention et logo
Journée de formation auprès de conseillers en agroenvironnement du MAPAQ et des clubs conseils en agroenvironnement	Présentation orale de M. Robert Lagacé d'une durée de 30 minutes dans le cadre du symposium L'ingénieur et les changements climatiques en agriculture de l'Association des ingénieurs en agroalimentaire du	Conception des ouvrages hydro-agricoles dans un contexte de changements climatiques	25 février 2014	À venir	Mention et logo

Activités prévues de l'ANNEXE A	Activités réalisées	Description (thème, titre, endroit, etc.)	Date de réalisation	Nombre de personnes rejointes	Visibilité accordée au PCAA (logo, mention)
	Québec				
Présentation dans le cadre d'un colloque international	Séminaire avec présentation de Robert Lagacé à la North Carolina Stat University	VisuHydro – Software to analyse flow and precipitation data, North Carolina State University.	27 mars 2013	10	Mention
Présentation dans le cadre d'un colloque international	Séminaire avec présentation de Robert Lagacé à la North Carolina Stat University	Peak flow validation in Quebec on 12 agricultural watersheds, North Carolina State University.	10 mai 2013	25	Mention
Diffusion des résultats du projet sur Agri-Réseau et site WEB IRDA	Une fois le rapport accepté, celui-ci sera publié sur le site Internet de l'IRDA, l'outil VisuHydro et le manuel de l'utilisateur seront également disponibles sur le site de l'IRDA dans la section Outils et services.		Janvier 2014	Les personnes consultant le site Internet de l'IRDA	Logo

4. CONCLUSIONS

L'étude des temps de montée (observés) et des temps de concentration (modélisés) s'est appuyée sur l'analyse hydrologique de 601 hydrogrammes classifiés de type simple, présentant une montée régulière, et colligés aux exutoires des 21 bassins versants étudiés (19 bassins versants et 2 parcelles). Les valeurs moyennes du temps de montée observé varient de 0,48 heures à 13,9 heures avec un coefficient de variation (Cv) variant de 0,17 à 1,24 (moyenne de 0,49). La méthode du SCS Lag avec un CN de type III estime le mieux le temps de montée, mais montre un faible coefficient de détermination ($R^2 = 0,37$). Les méthodes de Bransby-Williams et Kirpich sous-estiment de façon importante les temps de montée. L'aire des bassins versants explique à elle seule 77 % de la variation du temps de montée interbassins observé. Le temps de montée peut ainsi être prédit en fonction de son aire (coefficient de détermination (R^2) de 0,89). Une portion de la variation interbassin non expliquée demeure cependant significative.

Les analyses des coefficients de forme des hydrogrammes ont porté sur les mêmes hydrogrammes que ceux utilisés pour l'étude du temps de montée. Le coefficient de forme moyen est de 0,77 pour l'ensemble des hydrogrammes et des bassins versants, avec un écart type de 0,25. La plus petite valeur est de 0,59 estimée pour une parcelle expérimentale en Montérégie (Berna) et la plus grande valeur est de 1,06 pour un petit bassin versant beauceron (Fourchette Aval de moins de 3 km²). La valeur moyenne de 0,77 s'apparente à celle de l'hydrogramme unitaire du SCS (0,75), mais est plus éloignée de la valeur de la méthode rationnelle (1,0).

À l'instar de la plupart des études réalisées au Québec sur le sujet, les résultats du présent projet confirment que la méthode du SCS n'est pas valide sous nos conditions pour estimer la hauteur de ruissellement, car elle sous-estime grandement la hauteur de ruissellement. La méthode Monfét (1979) produit de meilleures estimations, mais l'ajustement aux observations est loin d'être idéale. Dans ce contexte, une étude a été entreprise pour mieux comprendre le ruissellement et les paramètres qui l'influencent. L'analyse de la hauteur de ruissellement en fonction de la hauteur de la précipitation totale et des caractéristiques des bassins (sols, topographie, utilisation du territoire) a été peu fructueuse, car une portion significative de la variation due aux bassins n'a pu être expliquée. Les nouvelles fonctionnalités de VisuHydro permettent d'identifier la précipitation précédant le début du ruissellement de celle contribuant au ruissellement. Une nouvelle approche dans l'analyse des hauteurs de ruissellement a ainsi été explorée afin de mieux distinguer les effets des bassins sur les hauteurs de ruissellement prédites. L'approche retenue consiste à exprimer la réponse hydrologique des bassins à l'étude suivant deux propriétés distinctes. La première traduit la capacité du bassin à intercepter les précipitations avant le déclenchement du ruissellement. La deuxième traduit l'intensité du ruissellement en fonction de la précipitation ruisselante, associée à la période où le ruissellement de surface est actif. L'analyse des observations a permis de générer des couples de coefficients de précipitation ruisselante et de ruissellement net pour l'ensemble des 21 bassins à l'étude. Des coefficients de ruissellement provenant de la précipitation ruisselante corrélés avec le groupe hydrologique de sol et indépendant de la précipitation interceptée est cohérent avec l'hypothèse de départ, soit de distinguer les réponses hydrologiques des bassins suivant leur capacité à intercepter la précipitation, puis à soutenir un taux de ruissellement élevé par la suite.

5. SOMMAIRE DES ACCOMPLISSEMENTS DU PROJET

Ce projet s'est inscrit à la suite de projet « Mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydro-agricoles dans un contexte de changements climatiques » (Michaud et al., 2013), permettant d'analyser les résultats de 12 bassins versants additionnels pour un total de 22 bassins versants variant de 7 ha à 27 km². Le projet actuel a permis d'ajouter plus de 66 années de données hydrométriques aux 42 années déjà analysées, permettant une analyse de plus de 800 hydrogrammes additionnels aux 700 analysés précédemment. La réalisation du présent projet a ainsi permis d'atteindre une base d'analyse statistique appréciable, permettant de consolider les résultats du projet initial, de valider les modèles utilisées, d'approfondir l'étude de certains phénomènes et de développer de nouveaux modèles dans certains cas.

Ces réalisations ont été rendues possibles par l'amélioration des capacités de l'utilitaire d'analyse hydrologique VisuHydro développé dans le cadre du projet précédent, permettant notamment de déterminer les précipitations antécédentes, de séparer les précipitations totales en ses composantes d'avant le début du ruissellement et ruisselante, et enfin de permettre le traitement du signal géochimique en support à la séparation des hydrogrammes de 14 bassins versants correspondant à 43 années de données.

Un des objectifs principaux du projet consistait à valider l'approche proposée dans la prédiction du débit de crue, fondée 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 qu'à la hauteur de ruissellement prédite pour cette même précipitation, devrait permettre de prédire le débit observé pour cette récurrence. L'approche de validation a consisté à vérifier si le recours aux temps moyens de montée observés (tp), aux intensités de précipitation (courbe IDF) correspondant au tp et à la récurrence appropriée, de même qu'aux courbes enveloppes de la hauteur de ruissellement prédites permettait d'estimer correctement les débits de pointe observés pour les bassin versant à l'étude. Les ratios Qmax prédit/Qmax moyens observés sont respectivement de 1,13 et 0,89 pour les récurrences de 2 et 5 ans. Les ratios jouent entre 0,22 et 2,28, ce qui démontre une grande variation. Le coefficient de variation moyen estimé pour l'ensemble des bassins est de 0,41. Il est dès lors conclu que l'hypothèse est moyennement valide.

L'augmentation du nombre de bassins versants à l'étude a permis de consolider les résultats, mais n'a pas permis de répondre à toutes les questions. L'effet de l'échelle est un facteur important, mais seulement deux bassins versants de la taille d'une parcelle ont pu profiter à l'étude. Dans l'ensemble, les variations du temps de montée tout comme les hauteurs de ruissellement ne sont pas toutes expliquées. Rappelons par ailleurs que le ruissellement dû aux fontes hivernales et printanières n'a pas été traité, mais devrait faire l'objet d'une étude ultérieure compte tenu de l'importance des volumes de ruissellement générés et de la fréquence accrue de ce type d'évènement en lien avec les changements climatiques.

Le projet s'est par ailleurs centré sur la prédiction des débits de crue en analysant la contribution du ruissellement. Puisqu'il a été identifié que l'écoulement de base ou souterrain représente une

portion importante du débit dans plusieurs cas, cette contribution devra aussi être caractérisée pour permettre à terme sa prise en compte dans la prédiction du débit de pointe.

Si les résultats des analyses hydrologiques se montrent intéressants, la prudence est de mise quant à leurs implications en milieu de pratique. Une rencontre avec les intervenants responsables du champ de pratique, ingénieurs et agronomes, pour discuter des résultats et baliser les implications de ceux-ci sur les méthodes de conception des ouvrages hydro-agricoles s'inscrit en une suite logique à la réalisation de ce projet.

6. PLAN DE FINANCEMENT ET CONCILIATION DES DÉPENSES

Le plan détaillé de conciliation des dépenses dans le cadre du projet RéZoTaGFe sont conciliées en annexe au présent rapport scientifique.

RÉFÉRENCES

Fang, X., K. Prakash, T. Cleveland, D. Thompson and P. Pradhan. 2005. Revisit of NRCS Unit Hydrograph Procedures. Proceeding of the ASCE, Austin, Texas.

Gallichand, J. 2012. Données de suivi hydrologique du ruisseau Bélair. Communication personnelle.

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.

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 numérisation1 : 20 000, échelle originale des données variable, année de numérisation : 1998-2006, disponible via l'IRDA : www.irda.qc.ca.

Lagacé, R. 2012a. Notions d'hydrologie et d'hydraulique en aménagement des sols. Département de sols et génie agroalimentaire. Université Laval, Québec, Canada, 110 p.

Lagacé, R. 2012b. VisuHydro. Logiciel d'analyse hydrologique développé dans le cadre du projet de Mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydroagricoles 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 Nolin, M.C. 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,

Michaud, A.R., A. Drouin, A. Mailhot, G. Talbot, D. Huard, S. Biner, R. Lagacé, N-R. Rocha et G. Gagné. 2013. Mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydroagricoles 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.

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.

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.

Michaud, A.R., J. Desjardins, N. Coté, 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.

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.

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

USDA-NRCS. 2007. Hydrologic Soil Group. Dans : National Engineering Handbook, titre 210-VI-NEH. Part 630, chapter 7. Disponible à l'adresse : <http://directives.sc.egov.usda.gov/>

Roussel, M. C., Thompson, D. B., Fang, X., Cleveland, T. G., and Garica, A. C., 2005. Timing parameter estimation for applicable Texas Watersheds. Research Report 0-4696-2, Texas Department of Transportation, Austin, Texas, 31 pp.

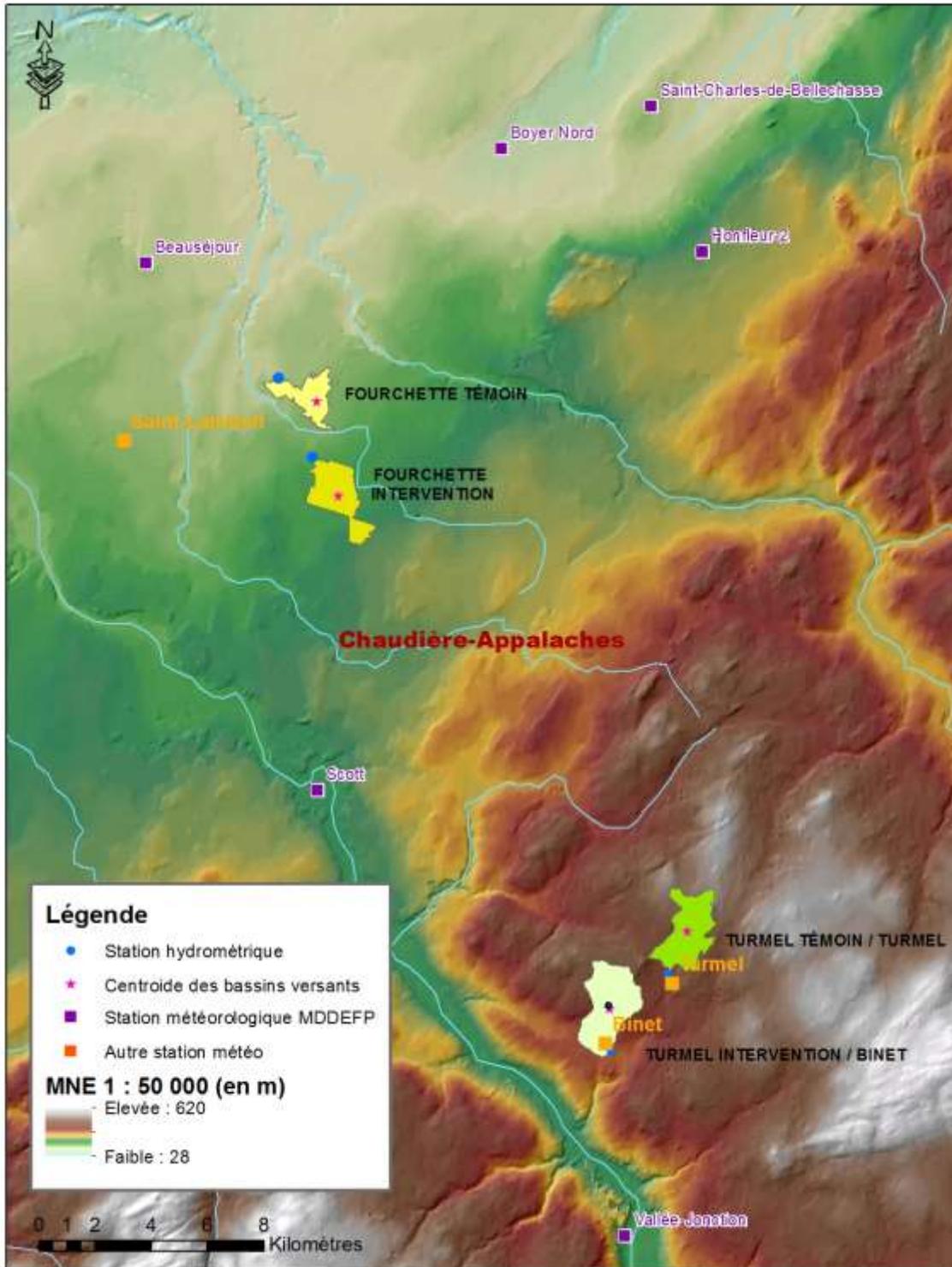
Tabi, M., L. Tardif, D., Carrier, G. Laflamme et M., Rompré. 1990., Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. Entente auxiliaire Canada-Québec. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.

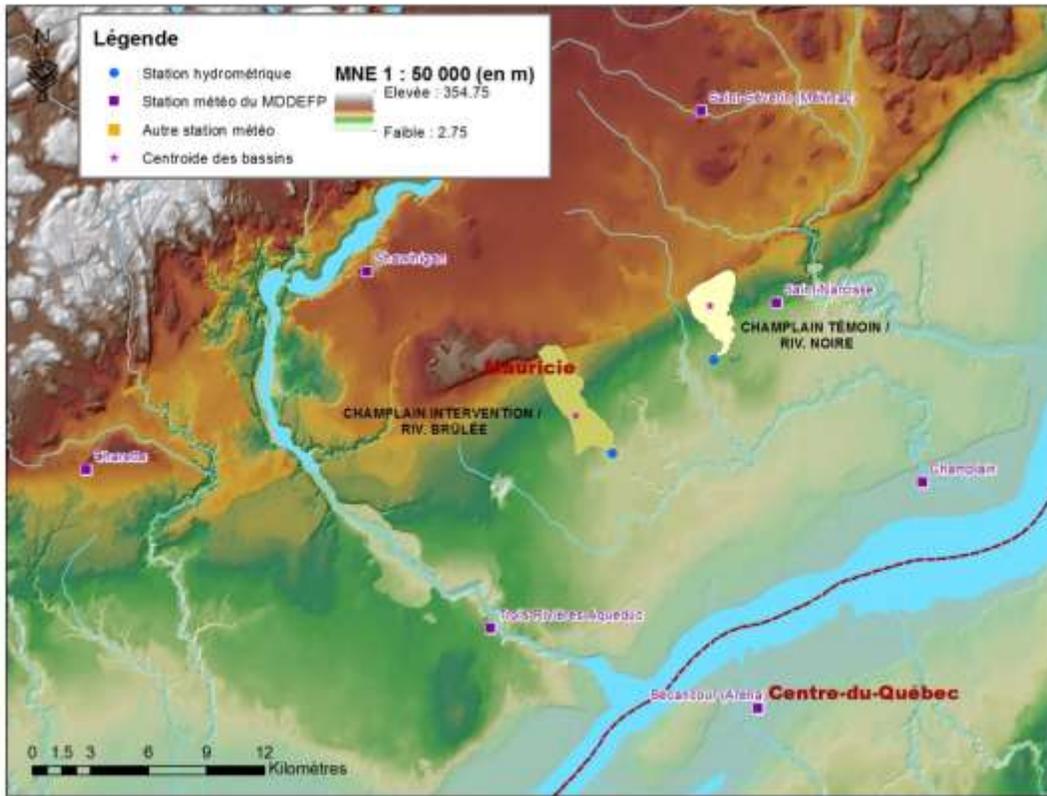
USDA-NRCS. 2007. Hydrologic Soil Group. Dans : National Engineering Handbook, titre 210-VI-NEH. Part 630, chapter 7. Disponible à l'adresse : <http://directives.sc.egov.usda.gov/>

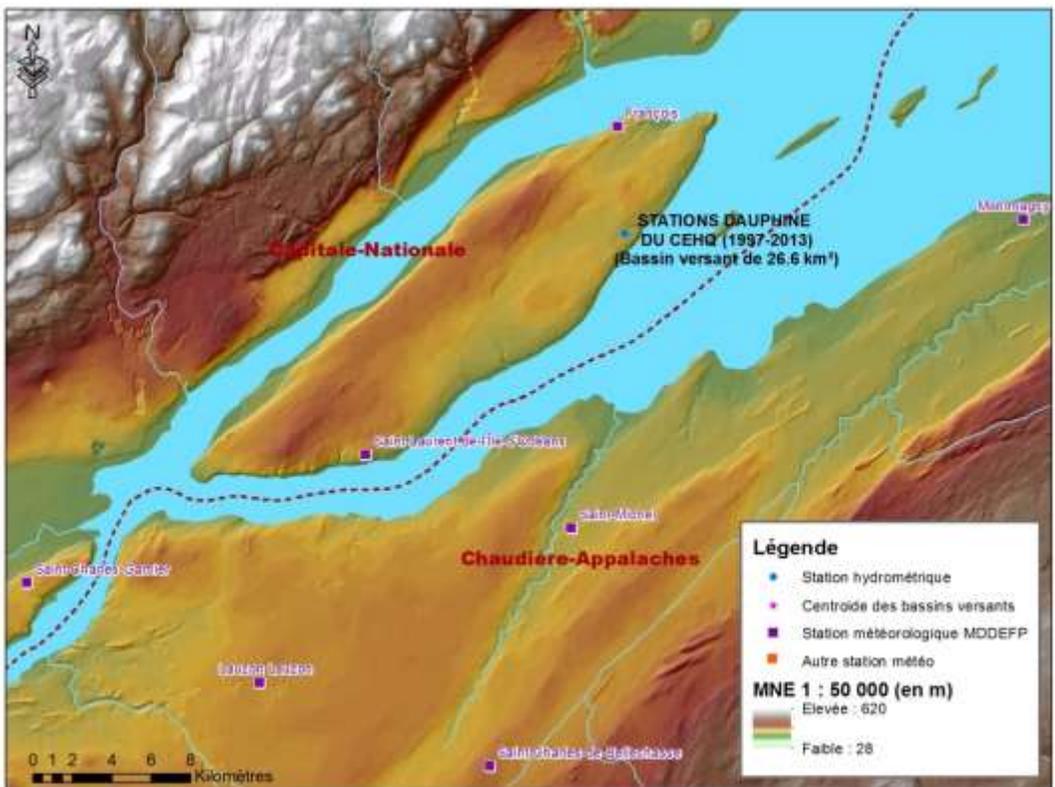
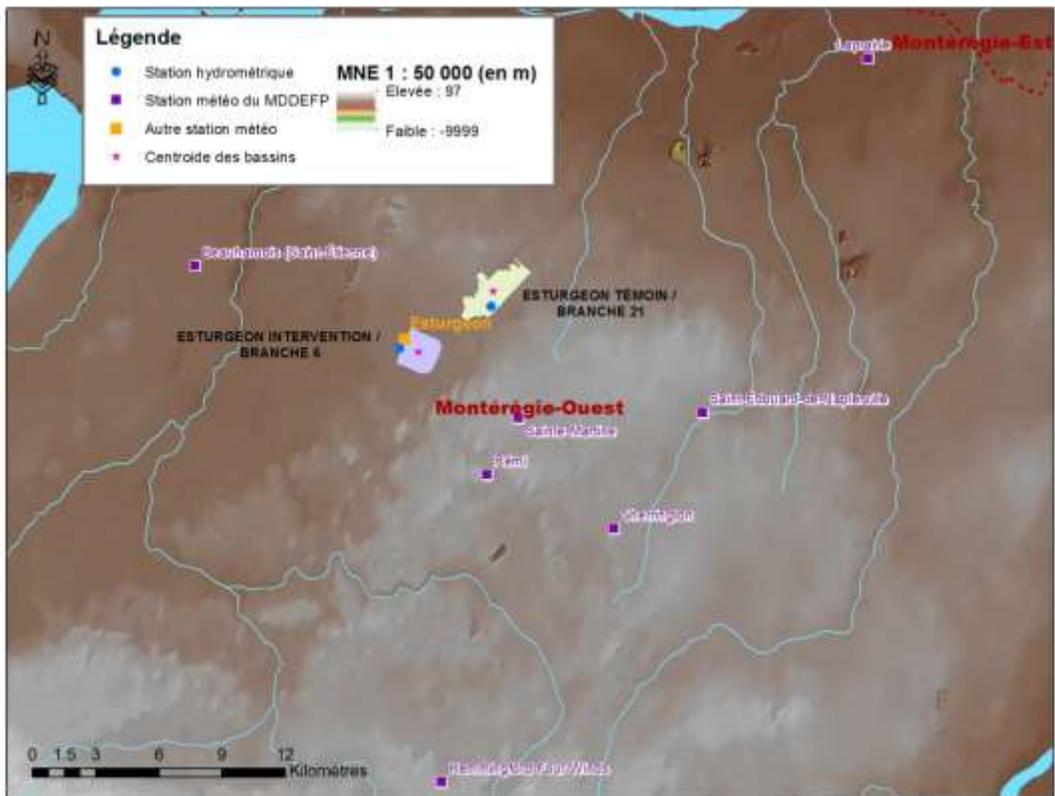
USDA-SCS. 1986. Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release 55, United States Department of Agriculture - Soil Conservation Service, 156 pp.

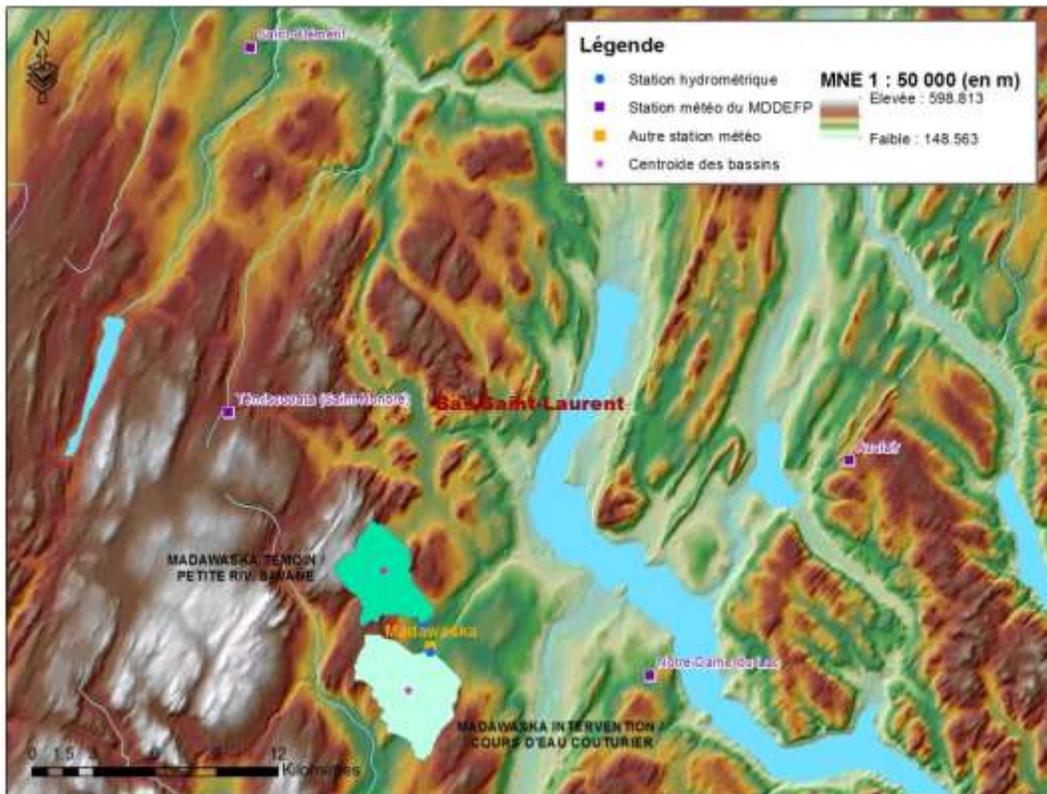
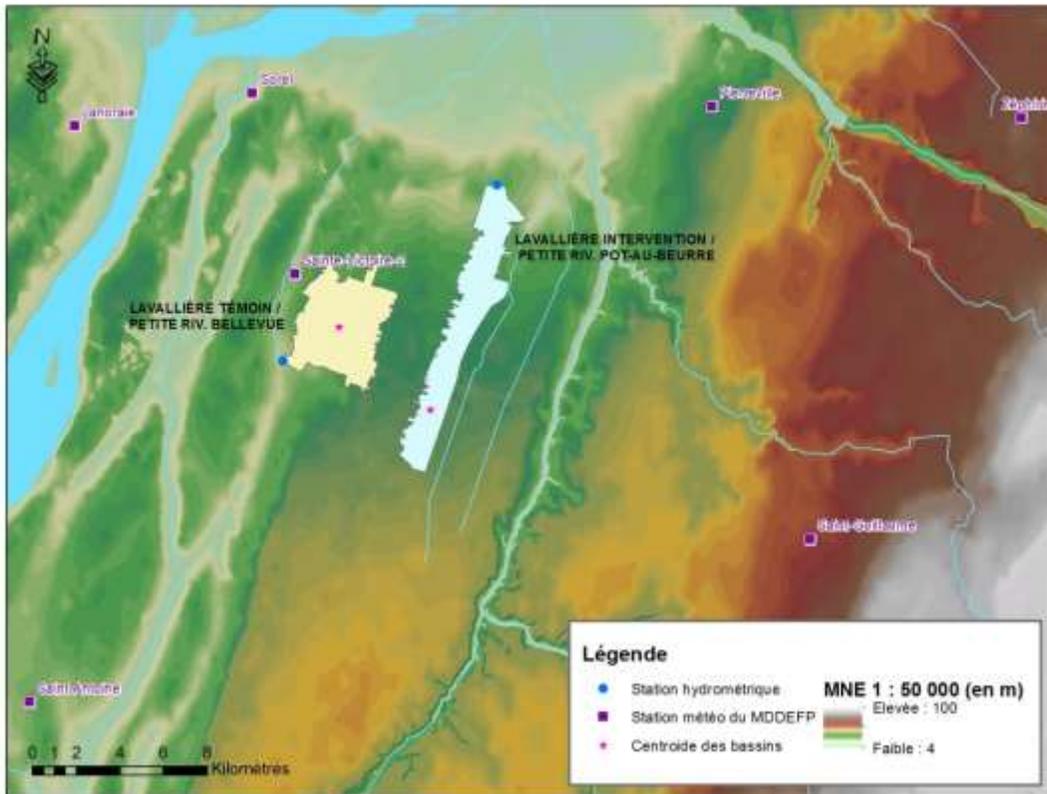
ANNEXES

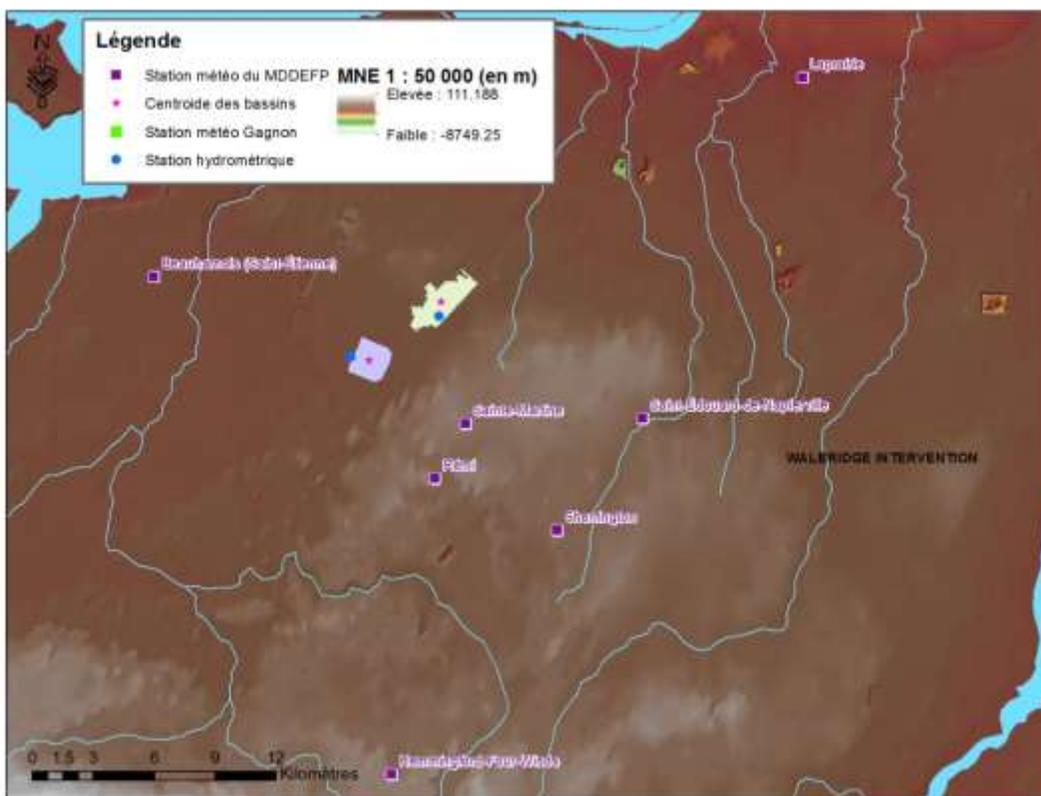
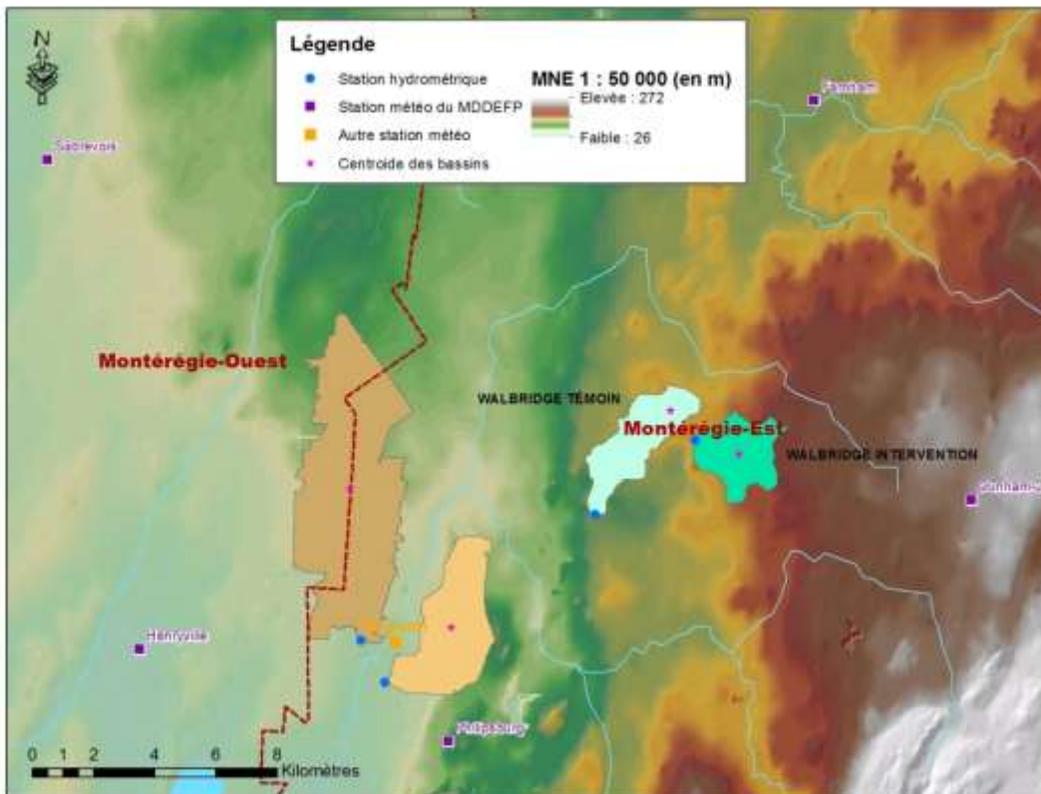
Annexe 1. Localisation et cartographie des bassins versants à l'étude.

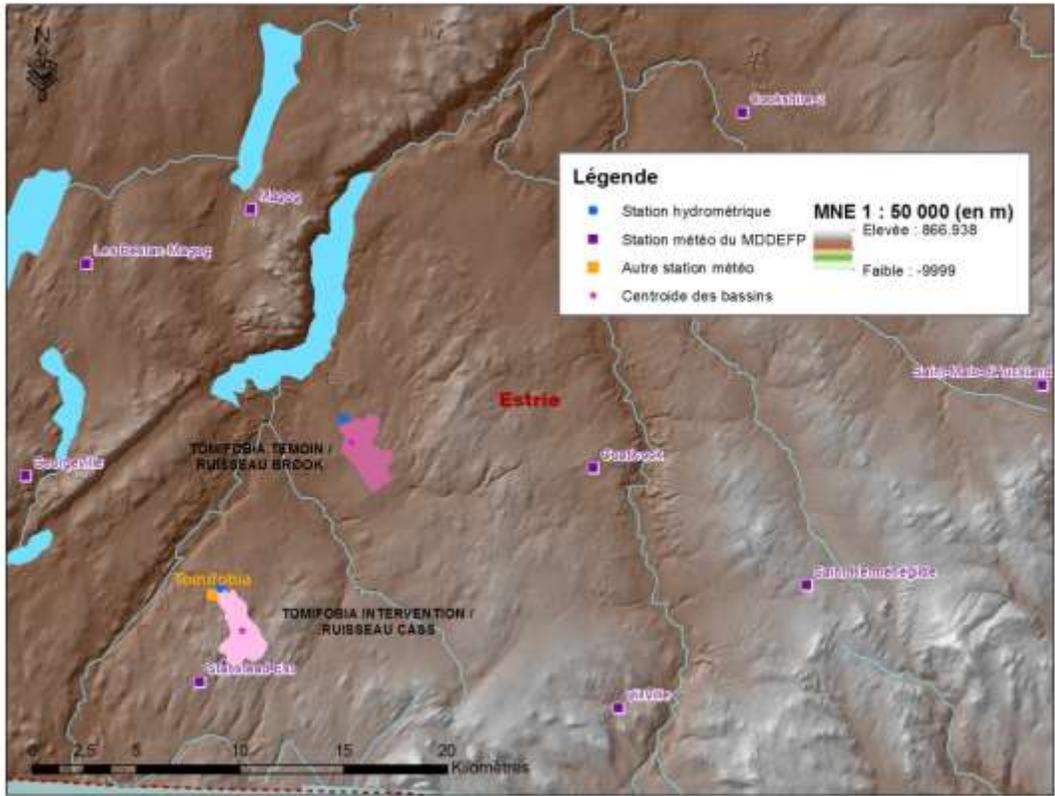












**Annexe 2. Utilisation du sol, groupes hydrologiques et CN des bassins versants à l'étude.
Ruisseau Couturier (Madawaska Intervention) : (CN = 74)**

Utilisation du sol	Superficie (ha)	% de la superficie	CN	Superficie (ha)	% de la superficie
Céréales	181.25	9.16	35	53.14	2.68
Eau	0.23	0.01	36	118.01	5.96
Foin/pâturage	547.20	27.65	39	9.87	0.50
Foret	808.87	40.87	45	10.05	0.51
Friche/Sol dénude	388.24	19.61	63	8.51	0.43
Milieu humide	10.05	0.51	70	86.04	4.35
Route	12.03	0.61	73	261.74	13.22
Soya	21.20	1.07	74	45.98	2.32
Urbain industriel	10.25	0.52	77	249.06	12.58
Total général	1979.32	100.00	79	429.12	21.68
			80	491.35	24.82
Groupe hydrologique	Superficie (ha)	% de la superficie	81	10.25	0.52
A	210.02	10.61	83	2.48	0.13
C	398.91	20.15	87	170.46	8.61
D	1370.16	69.22	89	21.20	1.07
Eau	0.23	0.01	92	3.11	0.16
			93	8.97	0.45
Total général	1979.32	100.00	Total général	1979.32	100.00

Utilisation du sol	Groupe hydrologique							
	A		C		D		Eau	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Céréales	8.51	0.43	2.28	0.12	170.46	8.61		
Eau							0.23	0.01
Foin/pâturage	9.87	0.50	45.98	2.32	491.35	24.82		
Foret	118.01	5.96	261.74	13.22	429.12	21.68		
Friche/Sol dénudé	53.14	2.68	86.04	4.35	249.06	12.58		
Milieu humide	10.05	0.51						
Route	0.20	0.01	2.87	0.15	8.97	0.45		
Soya					21.20	1.07		
Urbain industriel	10.25	0.52						
Total général	210.02	10.61	398.91	20.15	1370.16	69.22	0.23	0.01

Petite rivière Savane (Madawaska Témoin) : (CN = 76)

Utilisation du sol	Superficie (ha)	% de la superficie	CN	Superficie (ha)	% de la superficie
Carrière	3.37	0.24	56	8.96	0.65
Céréales	28.49	2.06	60	84.52	6.10
Eau	53.97	3.89	61	55.83	4.03
Foin/pâturage	245.15	17.69	70	50.24	3.63
Foret	829.47	59.85	73	232.40	16.77
Friche/sol dénudé	176.30	12.72	74	31.65	2.28
Milieu humide	4.92	0.36	77	119.24	8.60
Route	20.97	1.51	79	512.55	36.98
Soya	3.80	0.27	80	170.89	12.33
Urbain résidentiel	19.47	1.40	83	3.25	0.23
Total général	1385.91	100.00	85	9.89	0.71
			86	3.37	0.24
			87	26.20	1.89
			89	7.26	0.52
			92	62.60	4.52
			93	7.05	0.51
			Total général	1385.91	100.00

Groupe hydrologique	Superficie (ha)	% de la superficie	Groupe hydrologique							
			B		C		D		Eau	
			ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
B	159.79	11.53								
C	337.00	24.32								
D	835.14	60.26								
Eau	53.97	3.89								
Total général	1385.91	100.00	159.79	11.53	337.00	24.32	835.14	60.26	53.97	3.89

Utilisation du sol	Groupe hydrologique B		Groupe hydrologique C		Groupe hydrologique D		Eau	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Carrière	3.37	0.24						
Céréales	1.81	0.13	0.48	0.03	26.20	1.89		
Eau							53.97	3.89
Foin/pâturage	55.83	4.03	29.84	2.15	159.47	11.51		
Foret	84.52	6.10	232.40	16.77	512.55	36.98		
Friche/sol dénudé	8.96	0.65	50.24	3.63	117.09	8.45		
Milieu humide			2.16	0.16	2.77	0.20		
Route	5.30	0.38	8.62	0.62	7.05	0.51		
Soya			1.84	0.13	1.96	0.14		
Urbain résidentiel			11.42	0.82	8.05	0.58		
Total général	159.79	11.53	337.00	24.32	835.14	60.26	53.97	3.89

Dauphine (Île d'Orléans) : (CN = 63)

Utilisation du sol	Superficie (ha)	% de la superficie	CN	Superficie (ha)	% de la superficie
Autre	0.20	0.01	35	6.54	0.31
Céréales	327.76	15.63	36	177.19	8.45
Eau	2.07	0.10	39	248.09	11.83
Foin/pâturage	616.77	29.40	56	1.22	0.06
Foret	835.50	39.83	60	308.38	14.70
Friche/Sol dénudé	51.44	2.45	61	180.28	8.59
Mais	59.49	2.84	62	0.20	0.01
Maraicher	92.59	4.41	63	111.68	5.32
Milieu humide	4.17	0.20	67	121.48	5.79
Petits fruits	7.47	0.36	70	43.69	2.08
Route	37.55	1.79	73	349.93	16.68
Soya	62.63	2.99	74	346.44	16.52
Total général	2097.64	100.00	77	4.17	0.20
			78	65.71	3.13
			83	82.22	3.92
			85	27.51	1.31
			89	4.97	0.24
			92	17.93	0.85
			Total général	2097.64	100.00

Groupe hydrologique	Superficie (ha)	% de la superficie	Groupe hydrologique							
			A		B		C		Eau	
			ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
A	681.91	32.51								
B	711.15	33.90								
C	702.51	33.49								
Eau	2.07	0.10							2.07	0.10
Total général	2097.64	100.00	681.91	32.51	711.15	33.90	702.51	33.49	2.07	0.10

Utilisation du sol	Groupe hydrologique									
	A		B		C		Eau			
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Autre	0.20	0.01								
Céréales	111.68	5.32	150.58	7.18	65.50	3.12				
Eau							2.07	0.10		
Foin/pâturage	242.07	11.54	180.28	8.59	194.42	9.27				
Foret	177.19	8.45	308.38	14.70	349.93	16.68				
Friche/Sol dénudé	6.54	0.31	1.22	0.06	43.69	2.08				
Mais	35.11	1.67	16.84	0.80	7.54	0.36				
Maraicher	63.65	3.03	16.95	0.81	11.99	0.57				
Milieu humide					4.17	0.20				
Petits fruits	6.03	0.29			1.44	0.07				
Route	16.72	0.80	4.97	0.24	15.85	0.76				
Soya	22.72	1.08	31.93	1.52	7.98	0.38				
Total général	681.91	32.51	711.15	33.90	702.51	33.49	2.07	0.10		

Brûlée (Champlain Intervention) : (CN = 68)

Utilisation du sol	Superficie (ha)	% de la superficie	CN	Superficie (ha)	% de la superficie
Carrière	6.22	0.52	36	56.52	4.68
Céréales	93.49	7.75	56	39.30	3.26
Eau	2.65	0.22	60	423.84	35.11
Foin/pâturage	279.57	23.16	61	82.82	6.86
Foret	512.62	42.47	70	15.94	1.32
Friche/Sol dénudé	39.30	3.26	73	32.26	2.67
Mais	139.17	11.53	74	224.49	18.60
Maraicher	18.69	1.55	77	6.22	0.52
Route	24.89	2.06	78	40.92	3.39
Soya	55.64	4.61	80	18.86	1.56
Urbain résidentiel	34.80	2.88	83	67.64	5.60
Total général	1207.03	100.00	85	172.58	14.30
			89	17.19	1.42
			92	8.45	0.70
			Total général	1207.03	100.00

Groupe hydrologique	Superficie (ha)	% de la superficie	Groupe hydrologique							
			A		B		C		Eau	
			ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
A	64.63	5.35								
B	647.76	53.67								
C	491.99	40.76								
Eau	2.65	0.22							2.65	0.22
Total général	1207.03	100.00	64.63	5.35	647.76	53.67	491.99	40.76	2.65	

Utilisation du sol	Groupe hydrologique									
	A		B		C		Eau			
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Carrière	6.22	0.52								
Céréales			27.74	2.30	65.75	5.45				
Eau							2.65	0.22		
Foin/pâturage			82.82	6.86	196.75	16.30				
Foret	56.52	4.68	423.84	35.11	32.26	2.67				
Friche/Sol dénudé			39.30	3.26						
Mais			10.82	0.90	128.35	10.63				
Maraicher			18.69	1.55						
Route	1.89	0.16	17.19	1.42	5.80	0.48				
Soya			11.41	0.95	44.22	3.66				
Urbain résidentiel			15.94	1.32	18.86	1.56				
Total général	64.63	5.35	647.76	53.67	491.99	40.76	2.65			

Noire (Champlain Témoin) : (CN = 62)

Utilisation du sol	Superficie (ha)	% de la superficie	CN	Superficie (ha)	% de la superficie
Carrière	0.01	0.00	35	23.57	3.51
Céréales	1.44	0.21	36	88.98	13.26
Eau	0.10	0.01	39	4.53	0.68
Foin/Pâturage	227.97	33.98	60	225.70	33.64
Foret	334.08	49.79	61	78.31	11.67
Friche/Sol dénudé	23.57	3.51	67	0.26	0.04
Mais	44.13	6.58	73	19.40	2.89
Route	11.15	1.66	74	145.13	21.63
Soya	28.51	4.25	77	0.01	0.00
Total général	670.96	100.00	78	5.95	0.89
			83	4.59	0.68
			85	66.43	9.90
Groupe hydrologique	Superficie (ha)	% de la superficie	89	5.20	0.78
A	120.51	17.96	92	2.90	0.43
B	315.16	46.97	Total général	670.96	100.00
C	235.20	35.05			
Eau	0.10	0.01			
Total général	670.96	100.00			

Utilisation du sol	Groupe hydrologique							
	A ha	%	B ha	%	C ha	%	Eau ha	%
Carrière	0.01	0.00						
Céréales					1.44	0.21		
Eau							0.10	0.01
Foin/Pâturage	4.53	0.68	78.31	11.67	145.13	21.63		
Foret	88.98	13.26	225.70	33.64	19.40	2.89		
Friche/Sol dénudé	23.57	3.51						
Mais	0.26	0.04	4.09	0.61	39.78	5.93		
Route	3.15	0.47	5.20	0.78	2.80	0.42		
Soya			1.86	0.28	26.65	3.97		
Total général	120.51	17.96	315.16	46.97	235.20	35.05	0.10	0.01

Castor : (CN = 78)

Utilisation du sol	Superficie (ha)	% de la superficie	CN	Superficie (ha)	% de la superficie
Céréales	67.51	6.53	60	7.41	0.72
Eau	0.15	0.01	61	122.18	11.82
Foin/Pâturage	375.76	36.37	73	1.29	0.12
Foret	8.70	0.84	74	267.33	25.87
Mais	497.85	48.18	78	99.67	9.65
Route	20.83	2.02	83	53.77	5.20
Soya	62.45	6.04	85	460.62	44.58
Total général	1033.24	100.00	89	8.18	0.79
			92	12.80	1.24
			Total général	1033.24	100.00
Groupe hydrologique	Superficie (ha)	% de la superficie			
B	251.26	24.32			
C	781.98	75.68			
Total général	1033.24	100.00			

Utilisation du sol	Groupe hydrologique			
	B		C	
	ha	%	ha	%
Céréales	13.75	1.33	53.77	5.20
Eau	0.07	0.01	0.08	0.01
Foin/Pâturage	122.18	11.82	253.58	24.54
Foret	7.41	0.72	1.29	0.12
Mais	93.40	9.04	404.44	39.14
Route	8.18	0.79	12.65	1.22
Soya	6.27	0.61	56.17	5.44
Total général	251.26	24.32	781.98	75.68

Esturgeon Branche 6 (Esturgeon Intervention) : (CN = 61)

Utilisation du sol	Superficie (ha)	% de la superficie	CN	Superficie (ha)	% de la superficie
Eau	1.70	0.54	39	129.22	40.73
Foin/pâturage	158.67	50.02	60	1.92	0.60
Foret	2.50	0.79	61	14.44	4.55
Mais	75.48	23.79	67	35.42	11.16
Maraicher	38.02	11.98	73	0.59	0.19
Route	1.88	0.59	74	15.00	4.73
Soya	38.98	12.29	78	84.04	26.49
Total général	317.23	100.00	83	0.85	0.27
			85	33.02	10.41
Groupe hydrologique	Superficie (ha)	% de la superficie	89	0.83	0.26
A	165.49	52.17	92	1.89	0.60
B	101.23	31.91	Total général	317.23	100.00
C	48.80	15.38			
Eau	1.70	0.54			
Total général	317.23	100.00			

	Groupe hydrologique							
	A		B		C		Eau	
Utilisation du sol	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Eau							1.70	0.54
Foin/pâturage	129.22	40.73	14.44	4.55	15.00	4.73		
Foret			1.92	0.60	0.59	0.19		
Mais	0.36	0.11	53.24	16.78	21.88	6.90		
Maraicher	35.04	11.04			2.98	0.94		
Route	0.85	0.27	0.83	0.26	0.19	0.06		
Soya	0.02	0.00	30.80	9.71	8.16	2.57		
Total général	165.49	52.17	101.23	31.91	48.80	15.38	1.70	0.54

Esturgeon Branche 21 (Esturgeon Témoin) : (CN = 83)

Utilisation du sol	Superficie (ha)	% de la superficie	CN	Superficie (ha)	% de la superficie
Céréales	9.03	2.92	39	0.06	0.02
Eau	0.11	0.03	54	0.04	0.01
Foin/Pâturage	47.64	15.39	60	0.82	0.27
Foret	0.87	0.28	61	0.63	0.20
Mais	25.50	8.24	67	0.23	0.07
Maraicher	148.17	47.87	73	0.05	0.01
Route	0.94	0.30	74	47.13	15.23
Soya	63.40	20.48	78	10.05	3.25
Urbain résidentiel	13.89	4.49	80	13.86	4.48
Total général	309.56	100.00	83	8.87	2.87
			85	226.79	73.26
			92	1.03	0.33
			Total général	309.56	100.00

Groupe hydrologique	Superficie (ha)		% de la superficie	
	ha	%	ha	%
A	0.34	0.11		
B	11.68	3.77		
C	297.43	96.08		
Eau	0.11	0.03		
Total général	309.56	100.00		

Utilisation du sol	Groupe hydrologique							
	A		B		C		Eau	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Céréales			0.18	0.06	8.86	2.86		
Eau							0.11	0.03
Foin/Pâturage	0.06	0.02	0.63	0.20	46.95	15.17		
Foret			0.82	0.27	0.05	0.01		
Mais			0.11	0.03	25.39	8.20		
Maraicher	0.23	0.07	7.56	2.44	140.39	45.35		
Route	0.02	0.01			0.92	0.30		
Soya			2.39	0.77	61.02	19.71		
Urbain résidentiel	0.04	0.01			13.86	4.48		
Total général	0.34	0.11	11.68	3.77	297.43	96.08	0.11	0.03

Ewing : (CN = 78)

Utilisation du sol	Superficie (ha)	% de la superficie	CN	Superficie (ha)	% de la superficie
Autre	0.25	0.01	36	1.39	0.05
Carrière	4.30	0.16	39	12.75	0.47
Céréales	156.78	5.73	56	0.88	0.03
Eau	0.25	0.01	60	161.40	5.90
Foin/pâturage	742.00	27.14	61	196.69	7.19
Forêt	230.30	8.42	67	20.75	0.76
Friche/Sol dénudé	0.88	0.03	70	1.47	0.05
Mais	1200.97	43.92	73	65.91	2.41
Maraîcher	19.74	0.72	74	489.36	17.90
Route	43.33	1.58	75	0.22	0.01
Soya	331.23	12.11	77	4.30	0.16
Urbain résidentiel	4.32	0.16	78	406.78	14.88
Total général	2734.33	100.00	79	1.60	0.06
			80	74.00	2.71
			83	107.60	3.94
			85	983.11	35.95
			86	0.00	0.00
			87	21.31	0.78
			89	156.69	5.73
			92	23.85	0.87
			93	4.24	0.16
Total général	2734.33	100.00	Total général	2734.33	100.00

Utilisation du sol	Groupe hydrologique									
	A		B		C		D		Eau	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Autre			0.22	0.01	0.02	0.00				
Carrière	4.30	0.16	0.00	0.00						
Céréales			28.76	1.05	106.71	3.90	21.31	0.78		
Eau			0.01	0.00					0.23	0.01
Foin/pâturage	12.75	0.47	196.69	7.19	460.60	16.85	71.96	2.63		
Forêt	1.39	0.05	161.40	5.90	65.91	2.41	1.60	0.06		
Friche/Sol dénudé			0.88	0.03						
Mais	13.76	0.50	316.92	11.59	767.86	28.08	102.42	3.75		
Maraîcher			3.06	0.11	16.68	0.61				
Route	0.87	0.03	14.61	0.53	23.61	0.86	4.24	0.16		
Soya	6.99	0.26	86.81	3.17	197.77	7.23	39.65	1.45		
Urbain résidentiel			1.47	0.05	2.05	0.07	0.80	0.03		
Total général	40.06	1.47	810.84	29.65	1641.2	60.02	241.97	8.85	0.23	0.01

Fourchette Amont (Fourchette Intervention) : (CN= 73)

Utilisation du sol	Superficie (ha)	% de la superficie	CN	Superficie (ha)	% de la superficie
Céréales	48.98	14.50	36	1.01	0.30
Eau	0.10	0.03	39	20.53	6.08
Foin/pâturage	159.84	47.33	54	5.83	1.73
Foret	8.93	2.64	60	2.76	0.82
Mais	52.06	15.41	61	49.32	14.60
Route	8.32	2.46	63	2.48	0.73
Soya	44.75	13.25	67	6.01	1.78
Urbain résidentiel	14.75	4.37	70	2.20	0.65
Total général	337.72	100.00	73	5.15	1.53
			74	111.30	32.96
			78	37.97	11.24
			79	0.01	0.00
			80	6.90	2.04
			83	26.40	7.82
			85	52.82	15.64
			87	0.09	0.03
			89	3.00	0.89
			92	3.95	1.17
			Total général	337.72	100.00

Groupe hydrologique	Superficie (ha)	% de la superficie	Groupe hydrologique									
			A		B		C		D		Eau	
			ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
A	37.35	11.06										
B	116.74	34.57										
C	183.27	54.27										
D	0.27	0.08										
Eau	0.09	0.03										
Total général	337.72	100.00	37.35	11.06	116.74	34.57	183.27	54.27	0.27	0.08	0.09	0.03

Utilisation du sol	Groupe hydrologique									
	A		B		C		D		Eau	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Céréales	2.48	0.73	21.49	6.36	24.92	7.38	0.09	0.03		
Eau			0.00	0.00	0.01	0.00			0.09	0.03
Foin/pâturage	20.53	6.08	49.32	14.60	89.81	26.59	0.17	0.05		
Foret	1.01	0.30	2.76	0.82	5.15	1.53	0.01	0.00		
Mais	2.38	0.70	20.93	6.20	28.75	8.51				
Route	1.48	0.44	3.00	0.89	3.85	1.14				
Soya	3.64	1.08	17.04	5.05	24.07	7.13	0.00	0.00		
Urbain résidentiel	5.83	1.73	2.20	0.65	6.73	1.99				
Total général	37.35	11.06	116.74	34.57	183.27	54.27	0.27	0.08	0.09	0.03

Fourchette Aval (Fourchette Témoin) : (CN = 56)

Utilisation du sol	Superficie (ha)	% de la superficie	CN	Superficie (ha)	% de la superficie
Céréales	8.71	3.80	36	83.94	36.58
Foin/Pâturage	79.61	34.69	39	34.24	14.92
Foret	97.03	42.28	54	4.79	2.09
Mais	26.58	11.58	60	2.06	0.90
Route	7.06	3.07	61	2.96	1.29
Soya	3.71	1.61	63	2.97	1.29
Urbain résidentiel	6.80	2.96	67	10.15	4.42
Total général	229.49	100.00	70	0.91	0.40
			73	0.92	0.40
			74	32.94	14.35
			78	1.51	0.66
			79	10.11	4.40
			80	10.12	4.41
			83	8.26	3.60
			85	18.33	7.99
			87	1.13	0.49
			89	1.62	0.71
			92	1.17	0.51
			93	1.37	0.60
			Total général	229.49	100.00

	Groupe hydrologique	Superficie (ha)		% de la superficie	
		ha	%	ha	%
A		140.37	61.17		
B		8.30	3.62		
C		55.58	24.22		
D		25.23	10.99		
Total général		229.49	100.00		

Utilisation du sol	Groupe hydrologique							
	A		B		C		D	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Céréales	2.97	1.29	0.65	0.28	3.97	1.73	1.13	0.49
Foin/pâturage	34.24	14.92	2.96	1.29	32.29	14.07	10.12	4.41
Foret	83.94	36.58	2.06	0.90	0.92	0.40	10.11	4.40
Mais	9.35	4.08	1.18	0.51	14.99	6.53	1.05	0.46
Route	4.29	1.87	0.22	0.10	1.17	0.51	1.37	0.60
Soya	0.79	0.35	0.33	0.14	2.23	0.97	0.35	0.15
Urbain résidentiel	4.79	2.09	0.91	0.40			1.10	0.48
Total général	140.37	61.17	8.30	3.62	55.58	24.22	25.23	10.99

Petite rivière Pot-au-Beurre (Lavallière Intervention) : (CN = 83)

Utilisation su sol	Superficie (ha)	% de la superficie	CN	Superficie (ha)	% de la superficie
Céréales	50.17	2.50	61	1.38	0.07
Eau	0.16	0.01	73	50.65	2.53
Foin/pâturage	330.08	16.46	74	331.39	16.52
Foret	50.65	2.53	78	5.30	0.26
Mais	1270.77	63.36	83	47.47	2.37
Maraicher	25.38	1.27	85	1551.79	77.37
Route	17.56	0.88	89	1.00	0.05
Soya	260.95	13.01	92	16.72	0.83
Total général	2005.72	100.00	Total général	2005.72	100.00

Groupe hydrologique	Superficie (ha)	% de la superficie
B	10.39	0.52
C	1995.16	99.47
Eau	0.16	0.01
Total général	2005.72	100.00

Utilisation du sol	Groupe hydrologique						
	B		C		Eau		
	ha	%	ha	%	ha	%	
Céréales	2.70	0.13	47.47	2.37			
Eau					0.16	0.01	
Foin/pâturage	1.38	0.07	328.69	16.39			
Foret			50.65	2.53			
Mais	3.75	0.19	1267.02	63.17			
Maraicher			25.38	1.27			
Route	1.00	0.05	16.56	0.83			
Soya	1.56	0.08	259.39	12.93			
Total général	10.39	0.52	1995.16	99.47	0.16	0.01	

Petite rivière Bellevue (Lavallière Témoin) : (CN = 74)

Utilisation du sol	Superficie (ha)	Somme de %	CN	Superficie (ha)	% de la superficie
Céréales	74.40	4.13	36	39.90	2.22
Eau	0.05	0.00	39	22.20	1.23
Foin/pâturage	280.87	15.61	45	0.46	0.03
Forêt	580.57	32.26	54	3.45	0.19
Mais	531.37	29.53	60	261.82	14.55
Maraicher	14.76	0.82	61	50.54	2.81
Milieu humide	22.01	1.22	66	0.92	0.05
Route	19.07	1.06	67	60.65	3.37
Soya	272.76	15.16	73	402.53	22.37
Urbain résidentiel	3.81	0.21	74	241.78	13.43
Total général	1799.68	100.00	77	15.57	0.87
			79	23.02	1.28
			80	2.47	0.14
			83	43.84	2.44
			85	609.32	33.86
			87	1.21	0.07
			89	5.36	0.30
			92	14.12	0.78
			93	0.55	0.03
			Total général	1799.68	100.00

Utilisation du sol	Groupe hydrologique									
	A		B		C		D		Eau	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Céréales			35.75	1.99	37.44	2.08	1.21	0.07		
Eau									0.05	0.00
Foin/pâturage	22.20	1.23	50.54	2.81	206.03	11.45	2.10	0.12		
Forêt	39.90	2.22	115.13	6.40	402.53	22.37	23.02	1.28		
Mais	36.58	2.03	91.72	5.10	401.64	22.32	1.43	0.08		
Maraicher	7.72	0.43			7.04	0.39				
Milieu humide	0.46	0.03	0.92	0.05	15.57	0.87	5.07	0.28		
Route	1.33	0.07	3.12	0.17	14.06	0.78	0.55	0.03		
Soya	16.35	0.91	54.97	3.05	200.63	11.15	0.80	0.04		
Urbain résidentiel	3.45	0.19			0.36	0.02				
Total général	127.98	7.11	352.15	19.57	1285.31	71.42	34.19	1.90	0.05	0.00

Ruisseau Cass (Tomifobia Intervention) : (CN = 64)

Utilisation du sol	Superficie (ha)	% de la superficie	Groupe hydrologique	Superficie (ha)	% de la superficie		
Céréales	3.49	0.64	56	2.19	0.40		
Eau	2.10	0.38	60	268.09	49.00		
Foin/pâturage	184.37	33.70	61	169.70	31.02		
Foret	290.93	53.17	66	8.34	1.52		
Friche/sol dénudé	2.19	0.40	73	22.84	4.17		
Mais	39.11	7.15	74	18.16	3.32		
Milieu humide	12.35	2.26	77	4.02	0.73		
Route	8.59	1.57	78	39.11	7.15		
Soya	4.00	0.73	89	12.47	2.28		
Total général	547.13	100.00	92	2.22	0.41		
			Total général	547.13	100.00		
Groupe hydrologique	Superficie (ha)	% de la superficie					
B	503.38	92.00					
C	41.65	7.61					
Eau	2.10	0.38					
Total général	547.13	100.00					
		Groupe hydrologique					
		B		C		Eau	
		ha	%	ha	%	ha	%
Utilisation du sol	Céréales	3.49	0.64				
	Eau					2.10	0.38
	Foin/pâturage	169.70	31.02	14.68	2.68		
	Foret	268.09	49.00	22.84	4.17		
	Friche/sol dénudé	2.19	0.40				
	Mais	39.11	7.15				
	Milieu humide	8.34	1.52	4.02	0.73		
	Route	8.47	1.55	0.12	0.02		
	Soya	4.00	0.73				
	Total général	503.38	92.00	41.65	7.61	2.10	0.38

Ruisseau Brook (Tomifobia Témoin) : (CN = 65)

Utilisation du sol	Superficie (ha)	% de la superficie	CN	Superficie (ha)	% de la superficie
Céréales	0.95	0.16	36	19.59	3.28
Eau	1.51	0.25	39	9.93	1.66
Foin/pâturage	276.40	46.22	56	4.22	0.71
Foret	267.89	44.80	60	187.04	31.28
Friche/Sol dénudé	13.39	2.24	61	139.07	23.26
Mais	9.62	1.61	70	23.83	3.99
Route	11.18	1.87	73	61.26	10.24
Urbain résidentiel	17.07	2.85	74	128.34	21.46
Total général	598.00	100.00	78	3.79	0.63
			80	2.41	0.40
			83	1.25	0.21
			85	5.83	0.98
			89	5.36	0.90
			92	6.08	1.02
			Total général	598.00	100.00

Groupe hydrologique	Superficie (ha)	% de la superficie	Groupe hydrologique							
			A		B		C		Eau	
			ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
A	30.78	5.15			0.95	0.16				
B	355.09	59.38					0.02	0.00	1.48	0.25
C	210.65	35.23			139.07	23.26	127.39	21.30		
Eau	1.48	0.25			19.59	3.28	187.04	31.28	61.26	10.24
Total général	598.00	100.00	30.78	5.15	355.09	59.38	210.65	35.23	1.48	0.25

Utilisation du sol	Groupe hydrologique		A		B		C		Eau	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Céréales			0.95	0.16						
Eau	0.01	0.00					0.02	0.00	1.48	0.25
Foin/pâturage	9.93	1.66	139.07	23.26	127.39	21.30				
Foret	19.59	3.28	187.04	31.28	61.26	10.24				
Friche/Sol dénudé			4.22	0.71	9.17	1.53				
Mais			3.79	0.63	5.83	0.98				
Route	1.25	0.21	5.36	0.90	4.57	0.76				
Urbain résidentiel			14.66	2.45	2.41	0.40				
Total général	30.78	5.15	355.09	59.38	210.65	35.23	1.48	0.25		

Binet (Turmel Intervention) : (CN = 73)

Utilisation du sol	Superficie (ha)	% de la superficie	CN	Superficie (ha)	% de la superficie
Céréales	7.09	1.46	60	25.49	5.26
Eau	0.79	0.16	61	21.93	4.52
Foin/Pâturage	284.26	58.63	70	13.66	2.82
Foret	168.73	34.80	73	143.24	29.54
Friche/Sol dénudé	13.66	2.82	74	262.99	54.24
Route	10.33	2.13	80	0.78	0.16
Total général	484.86	100.00	83	5.65	1.17
			89	0.45	0.09
			92	10.67	2.20
			Total général	484.86	100.00

Groupe hydrologique	Superficie (ha)	% de la superficie
B	49.31	10.17
C	434.33	89.58
D	0.78	0.16
Eau	0.44	0.09
Total général	484.86	100.00

Utilisation du sol	Groupe hydrologique							
	B		C		D		Eau	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Céréales	1.44	0.30	5.65	1.17				
Eau			0.35	0.07			0.44	0.09
Foin/pâturage	21.93	4.52	261.55	53.94	0.78	0.16		
Foret	25.49	5.26	143.24	29.54				
Friche/Sol dénudé			13.66	2.82				
Route	0.45	0.09	9.88	2.04				
Total général	49.31	10.17	434.33	89.58	0.78	0.16	0.44	0.09

Bélaïr (Turmel Témoin) : (CN = 73)

Utilisation du sol	Superficie (ha)	% de la superficie	CN	Superficie (ha)	% de la superficie
Céréales	7.38	1.88	60	32.31	8.22
Foin/pâturage	124.50	31.66	61	31.49	8.01
Foret	252.56	64.22	73	127.62	32.45
Route	8.82	2.24	74	77.40	19.68
Total général	393.26	100.00	79	92.63	23.55
			80	15.61	3.97
			83	7.38	1.88
			89	1.29	0.33
			92	5.01	1.27
			93	2.52	0.64
			Total général	393.26	100.00

	Groupe hydrologique					
	B		C		D	
	ha	%	ha	%	ha	%
Util. du sol						
Céréales			7.38	1.88		
Foin/pâturage	31.49	8.01	77.40	19.68	15.61	3.97
Foret			127.62	32.45	92.63	23.55
Route	1.29	0.33	5.01	1.27	2.52	0.64
Total général	65.09	16.55	217.41	55.28	110.76	28.16

Walbridge Amont (Walbridge Intervention) : (CN = 77)

Utilisation du sol	Superficie (ha)	% de la superficie	CN	Superficie (ha)	% de la superficie
Céréales	31.36	5.71	36	0.05	0.01
Foin/pâturage	106.86	19.47	39	2.13	0.39
Foret	160.14	29.18	60	3.09	0.56
Mais	220.40	40.16	61	34.61	6.31
Route	6.18	1.13	67	6.52	1.19
Soya	22.57	4.11	70	0.13	0.02
Urbain résidentiel	1.24	0.23	73	157.00	28.61
Total général	548.74	100.00	74	72.14	13.15
			78	46.41	8.46
Groupe hydrologique	Superficie (ha)	% de la superficie	80	1.11	0.20
A	9.21	1.68	83	29.84	5.44
B	88.30	16.09	85	190.04	34.63
C	451.24	82.23	89	2.03	0.37
			92	3.64	0.66
Total général	548.74	100.00	Total général	548.74	100.00

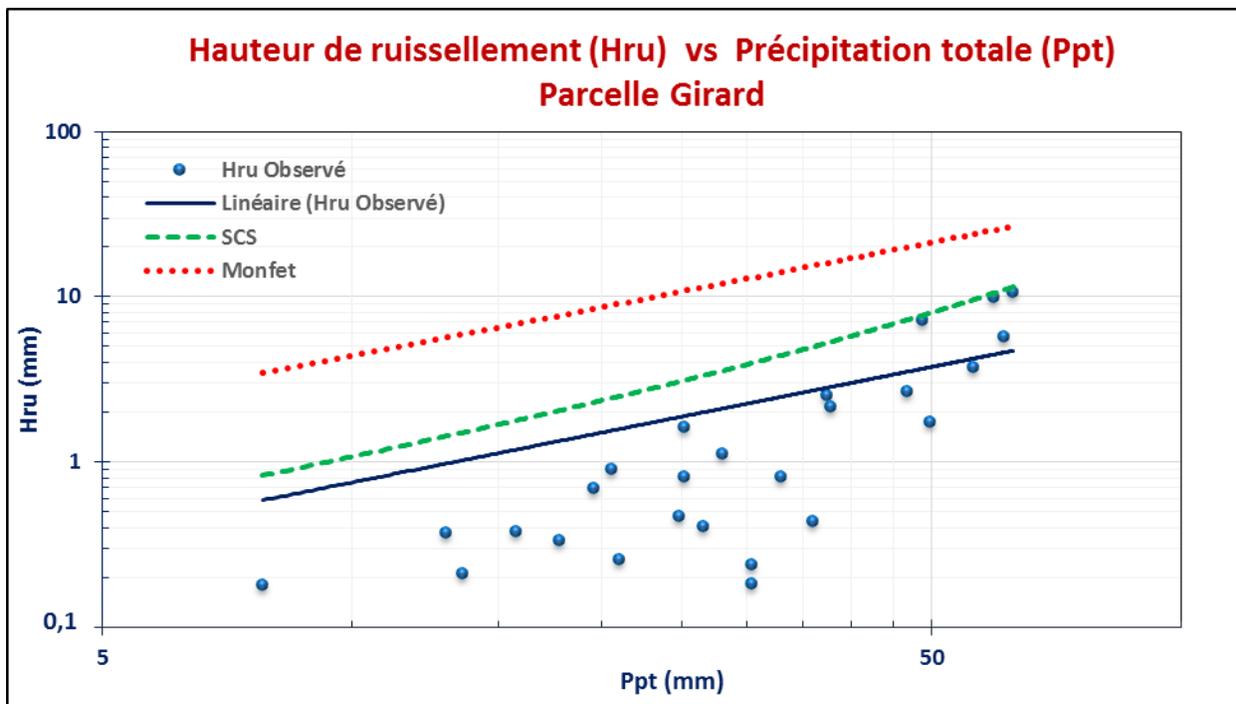
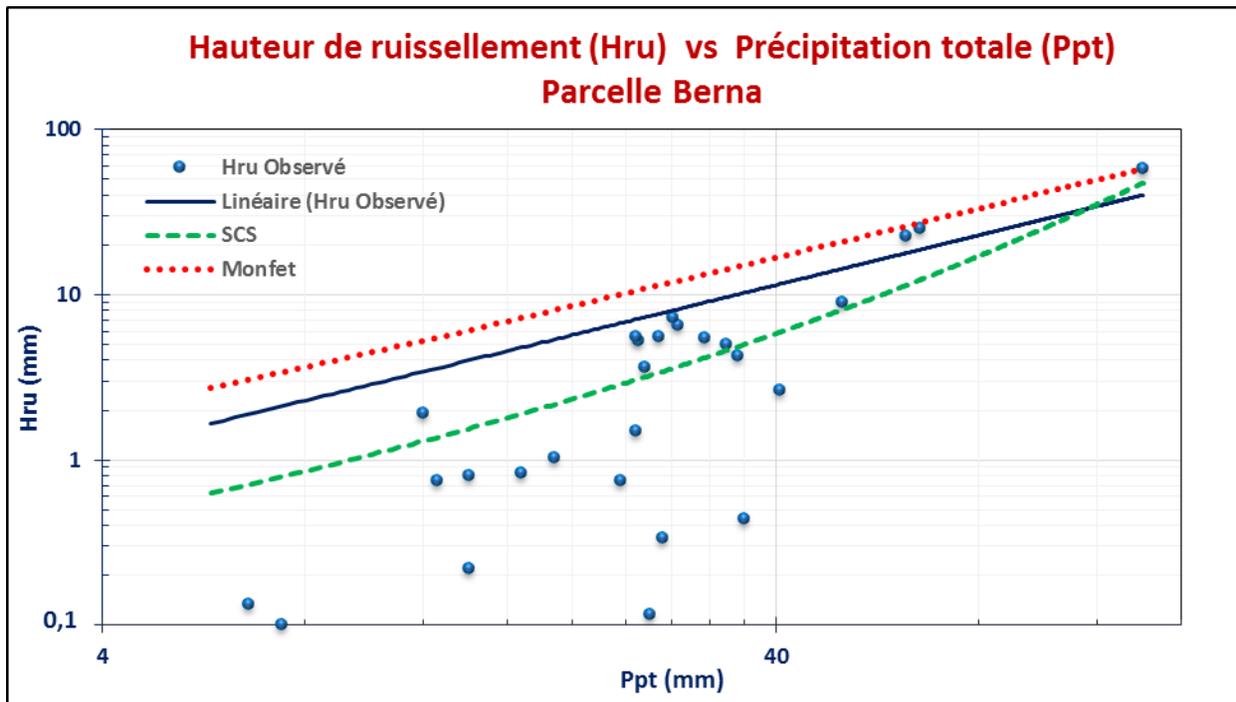
Utilisation du sol	Groupe hydrologique					
	A		B		C	
	ha	%	ha	%	ha	%
Céréales			2.02	0.37	29.34	5.35
Foin/pâturage	2.13	0.39	34.61	6.31	70.12	12.78
Foret	0.05	0.01	3.09	0.56	157.00	28.61
Mais			45.64	8.32	174.76	31.85
Route	0.51	0.09	2.03	0.37	3.64	0.66
Soya	6.52	1.19	0.78	0.14	15.27	2.78
Urbain résidentiel			0.13	0.02	1.11	0.20
Total général	9.21	1.68	88.30	16.09	451.24	82.23

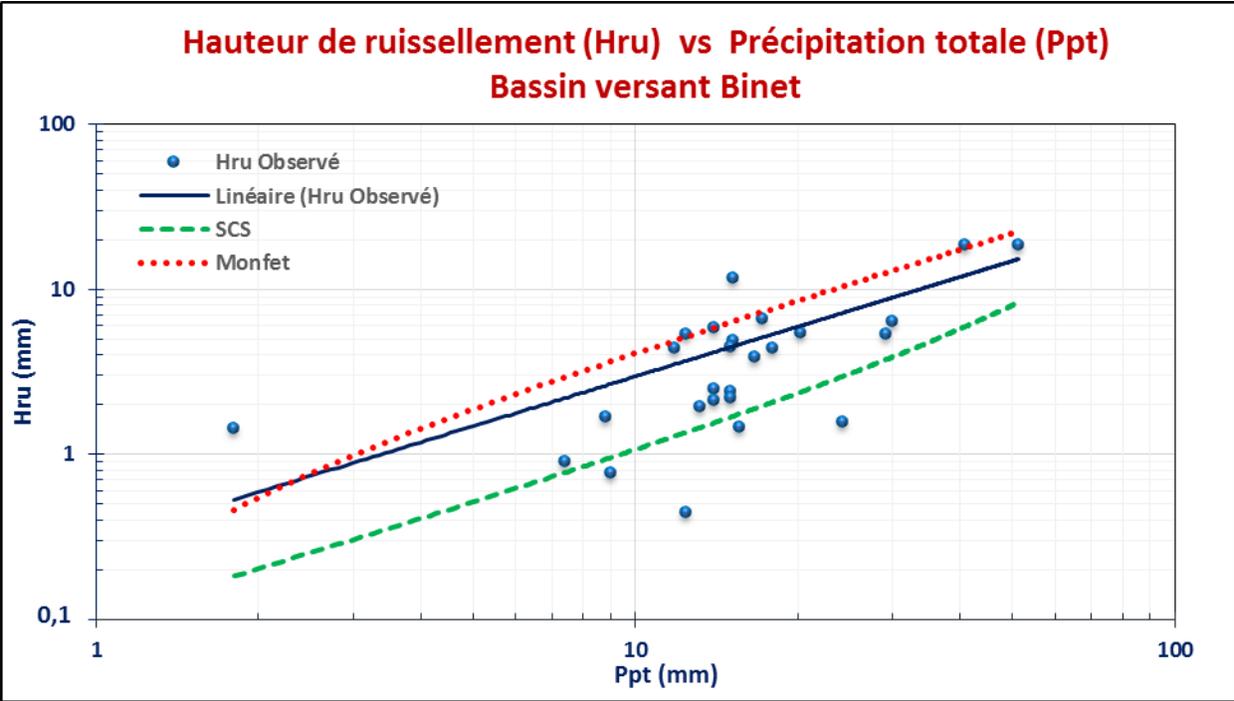
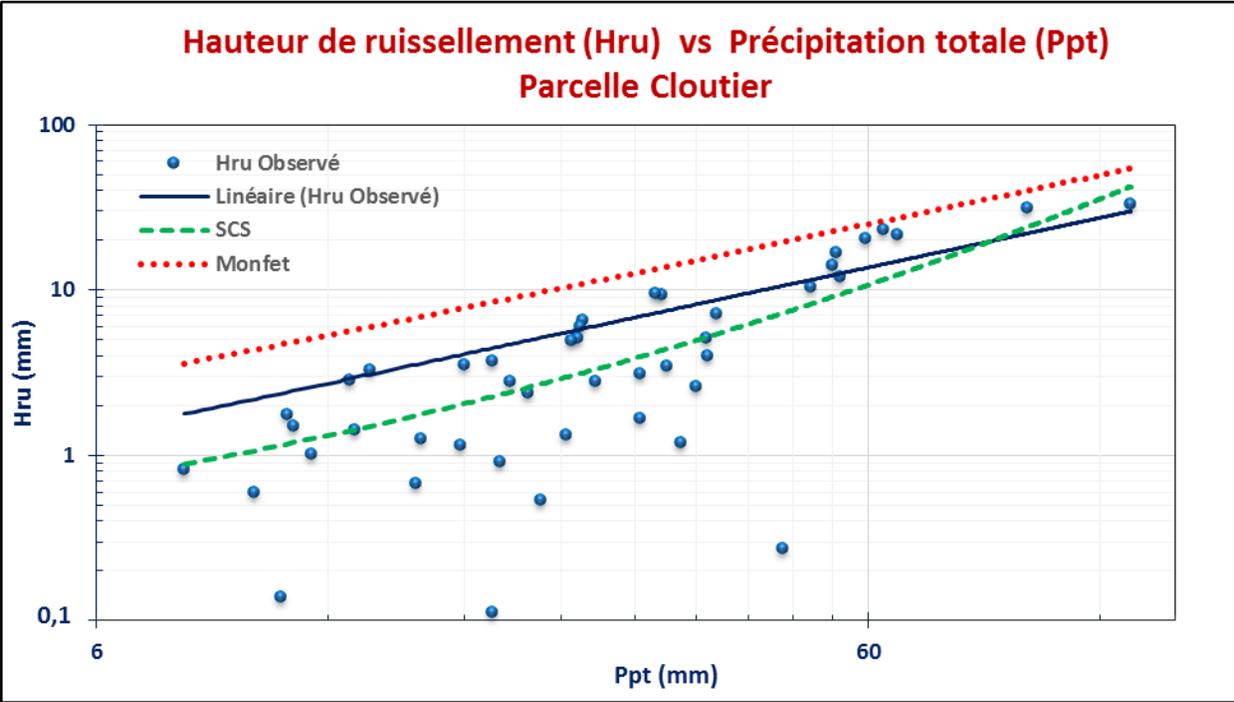
Walbridge Aval (Walbridge Témoin) : (CN = 79)

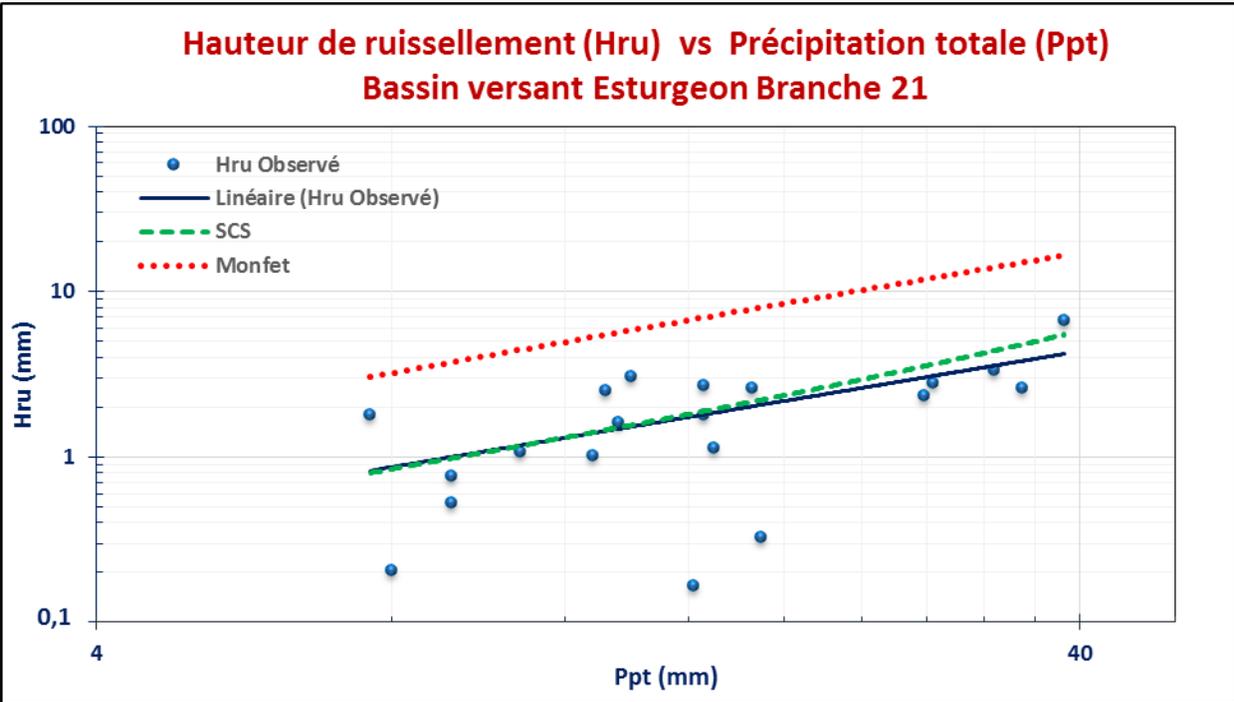
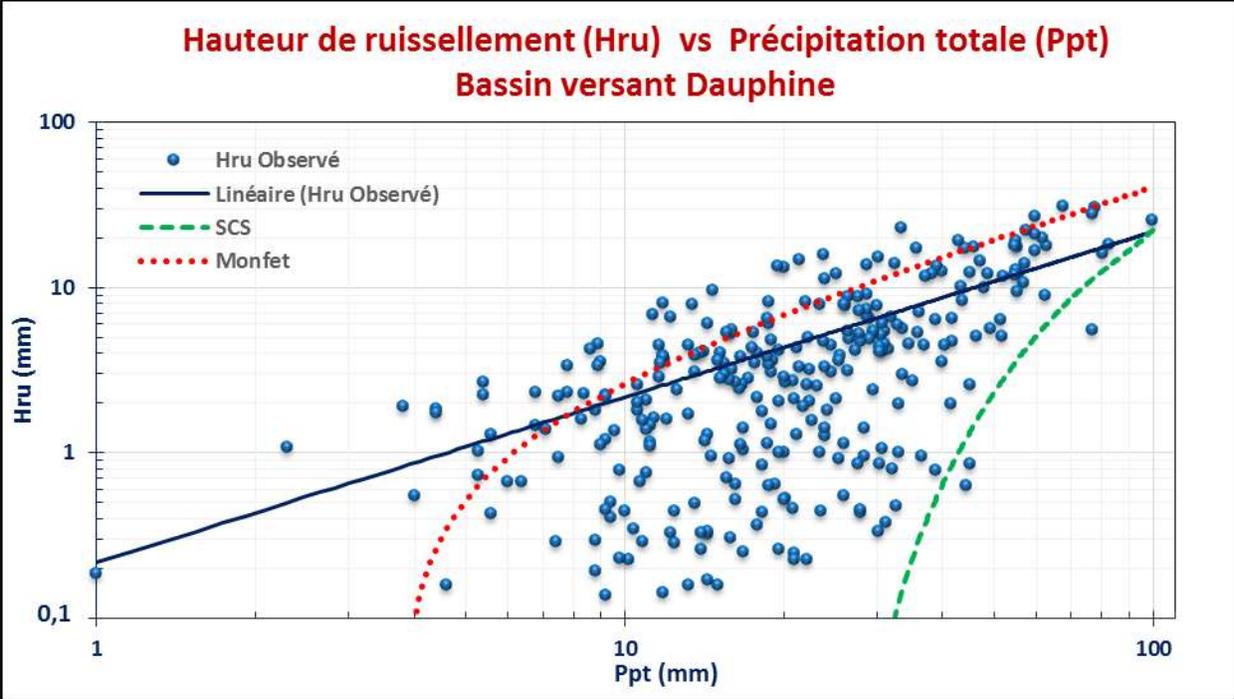
Utilisation du sol	Superficie (ha)	% de la superficie	CN	Superficie (ha)	% de la superficie
Autre	21.68	3.29	39	0.88	0.13
Céréales	37.69	5.71	54	0.01	0.00
Eau	0.08	0.01	60	43.54	6.60
Foin/pâturage	165.83	25.15	61	9.24	1.40
Foret	178.75	27.10	67	0.24	0.04
Mais	191.77	29.08	73	135.20	20.50
Maraicher	3.70	0.56	74	110.36	16.73
Petits fruits	4.57	0.69	75	1.94	0.29
Route	8.86	1.34	78	14.97	2.27
Soya	46.03	6.98	80	49.92	7.57
Urbain résidentiel	0.53	0.08	83	48.85	7.41
Total général	659.48	100.00	85	149.04	22.60
			87	8.62	1.31
Groupe hydrologique	Superficie (ha)	% de la superficie	89	78.90	11.96
A	1.17	0.18	92	6.45	0.98
B	70.84	10.74	93	1.31	0.20
C	449.27	68.13	Total général	659.48	100.00
D	138.13	20.94			
Eau	0.08	0.01			
Total général	659.48	100.00			

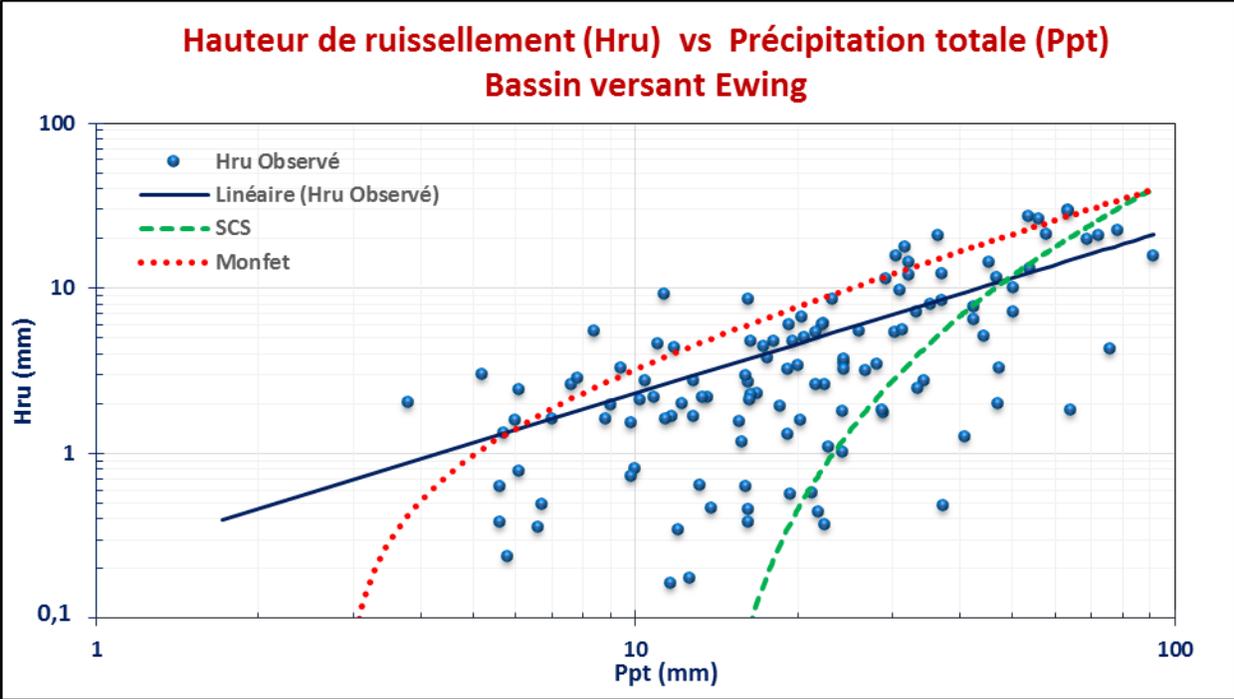
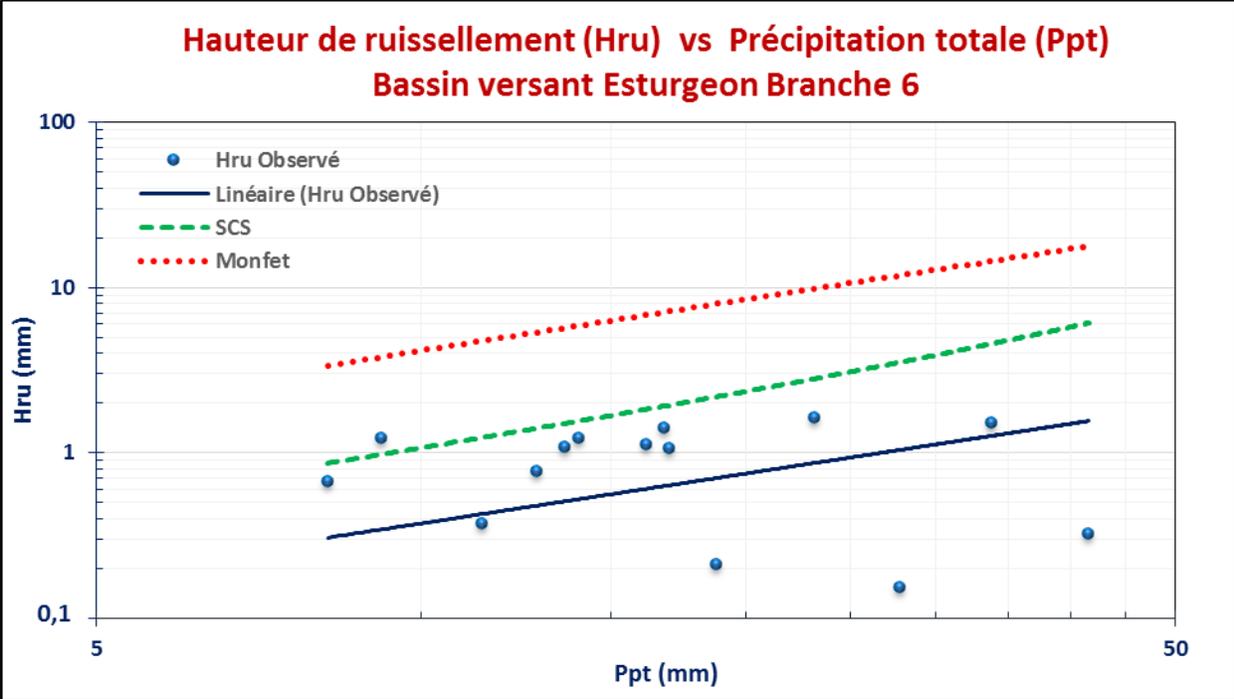
	Groupe hydrologique									
	A		B		C		D		Eau	
Utilisation du sol	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Autre			1.94	0.29	19.74	2.99				
Céréales					29.07	4.41	8.62	1.31		
Eau									0.08	0.01
Foin/pâturage	0.88	0.13	9.24	1.40	108.27	16.42	47.45	7.19		
Foret			43.54	6.60	135.20	20.50				
Mais	0.24	0.04	13.24	2.01	121.85	18.48	56.44	8.56		
Maraicher							3.70	0.56		
Petits fruits					2.10	0.32	2.47	0.38		
Route	0.03	0.00	1.14	0.17	6.37	0.97	1.31	0.20		
Soya			1.74	0.26	26.68	4.04	17.62	2.67		
Urbain résidentiel	0.01	0.00					0.52	0.08		
Total général	1.17	0.18	70.84	10.74	449.27	68.13	138.13	20.94	0.08	0.01

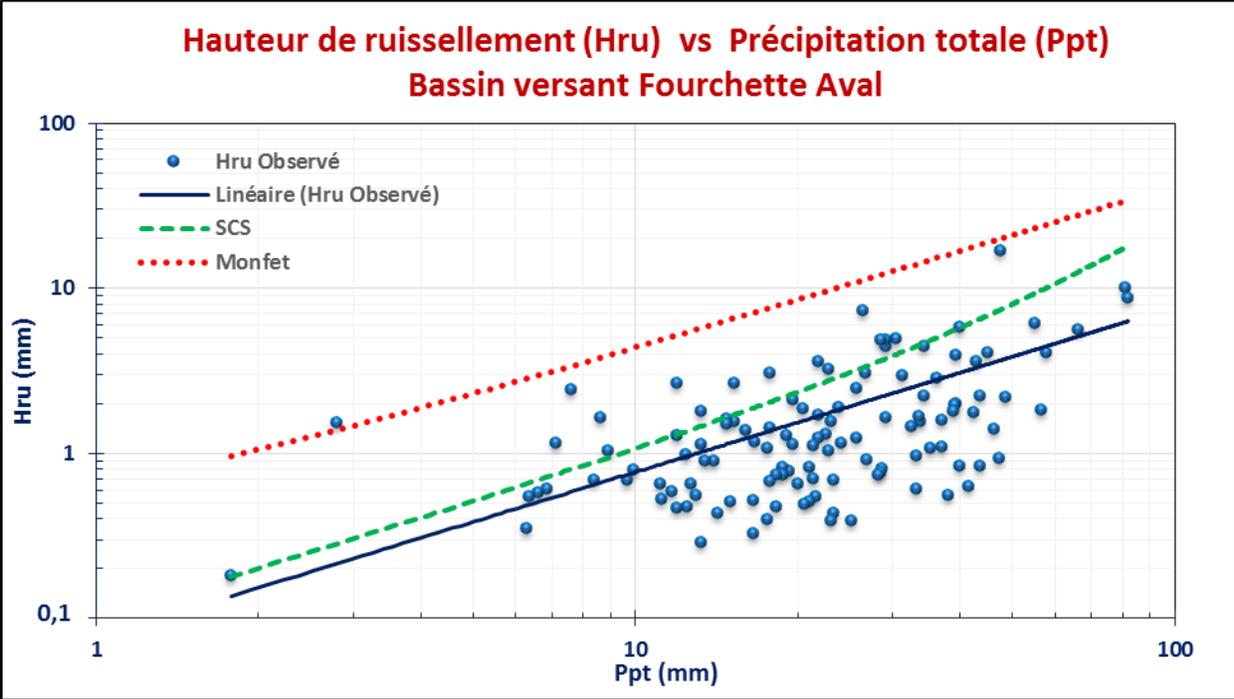
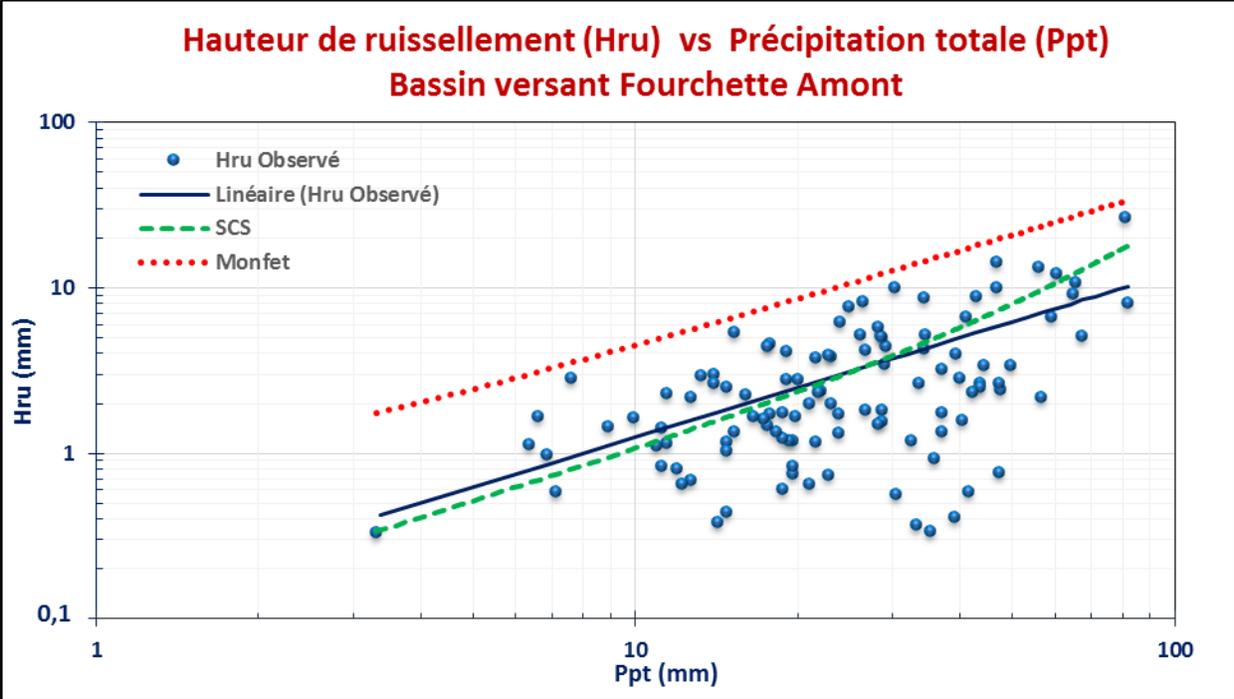
Annexe 3. Hauteurs de ruissellement observées et prédites selon les modèles de Monfet (1979) et SCS (1986) pour chacun des bassins versants à l'étude.

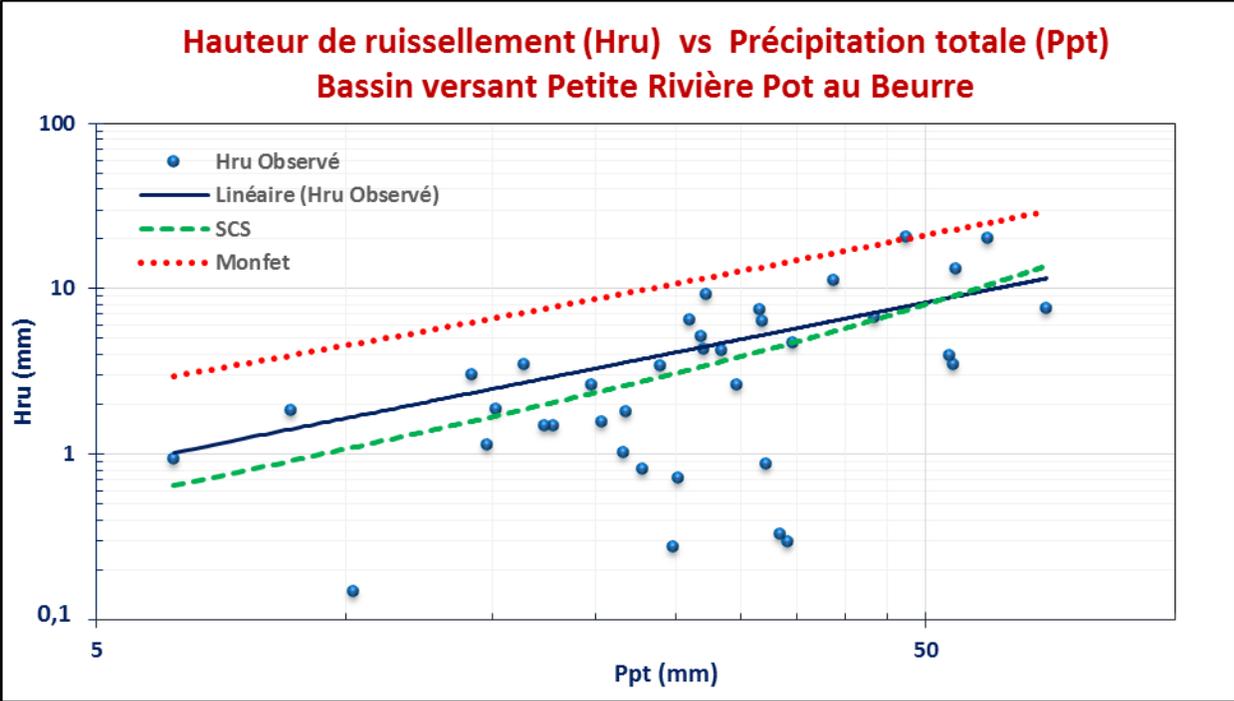
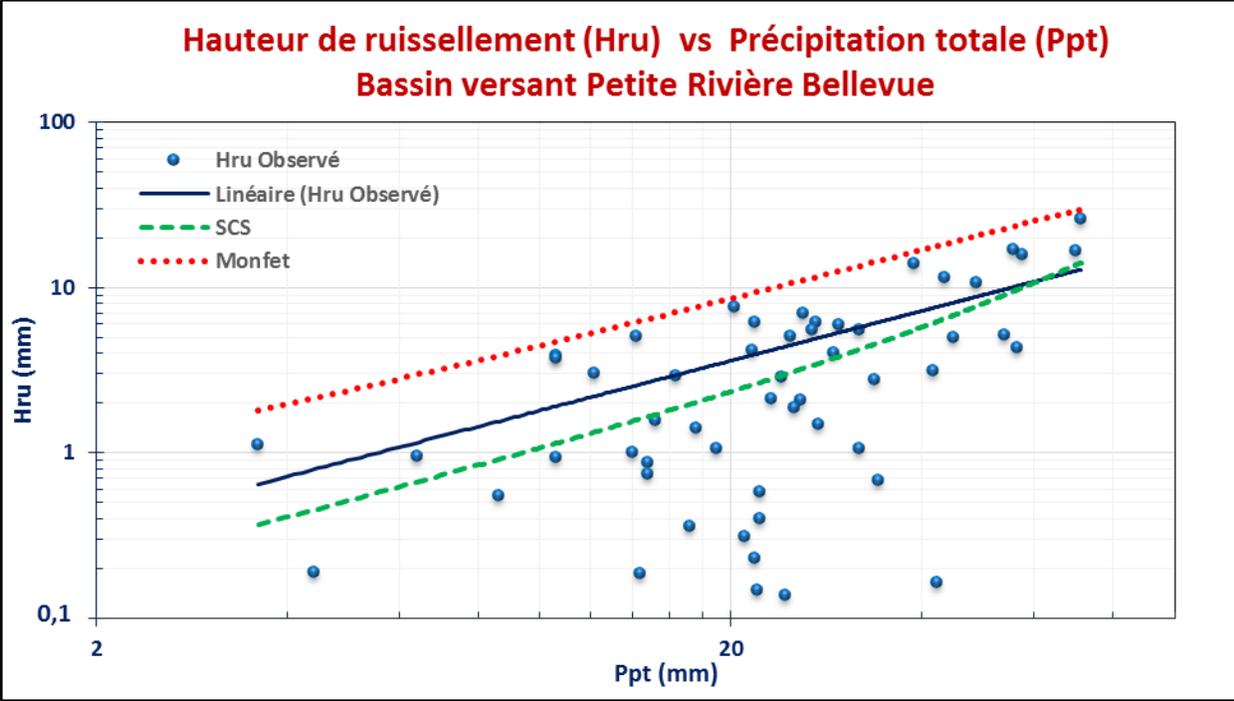


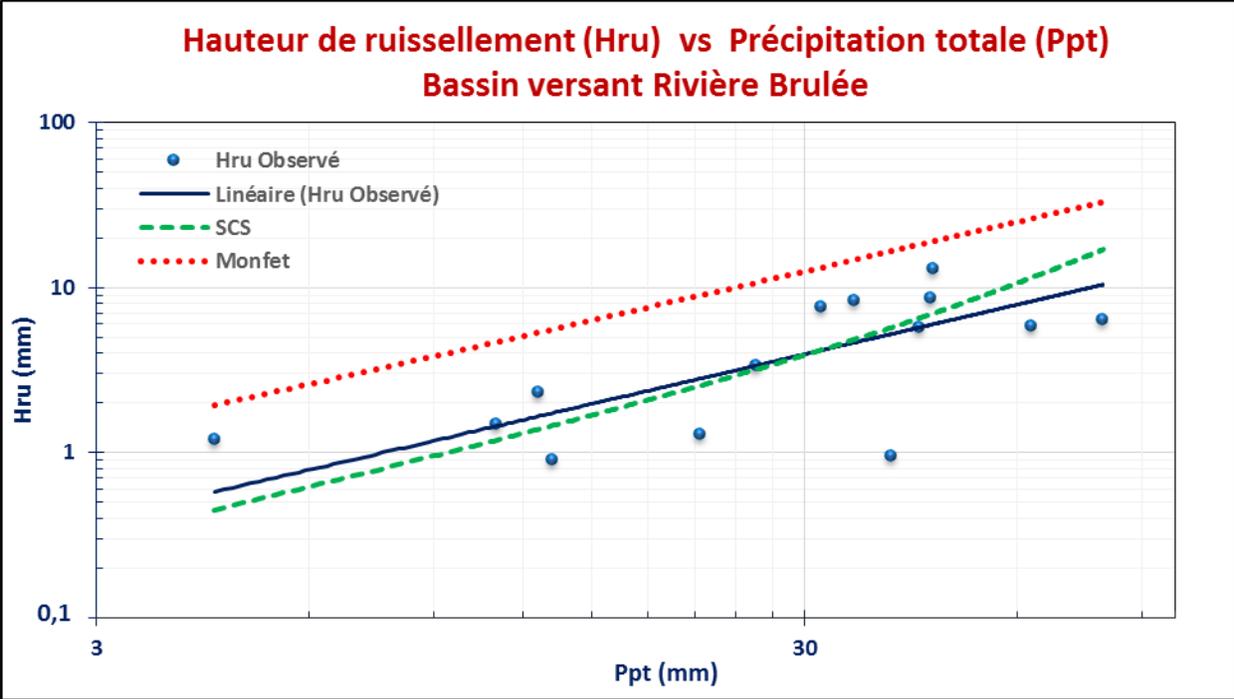
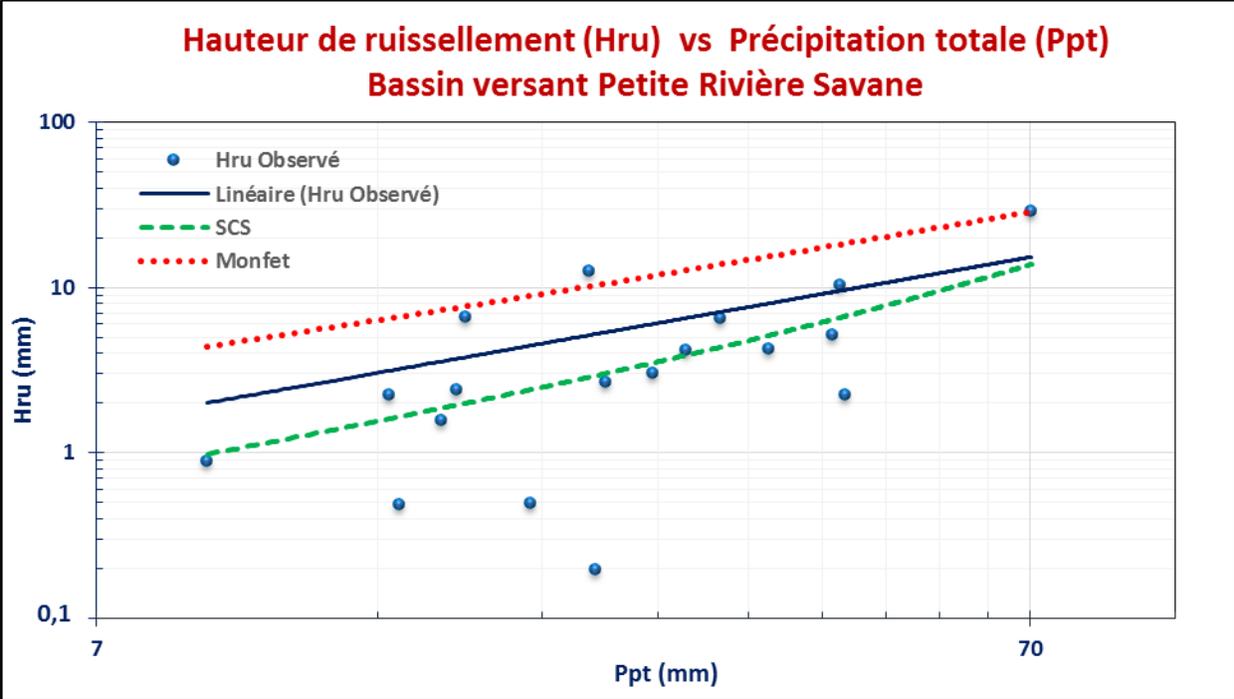


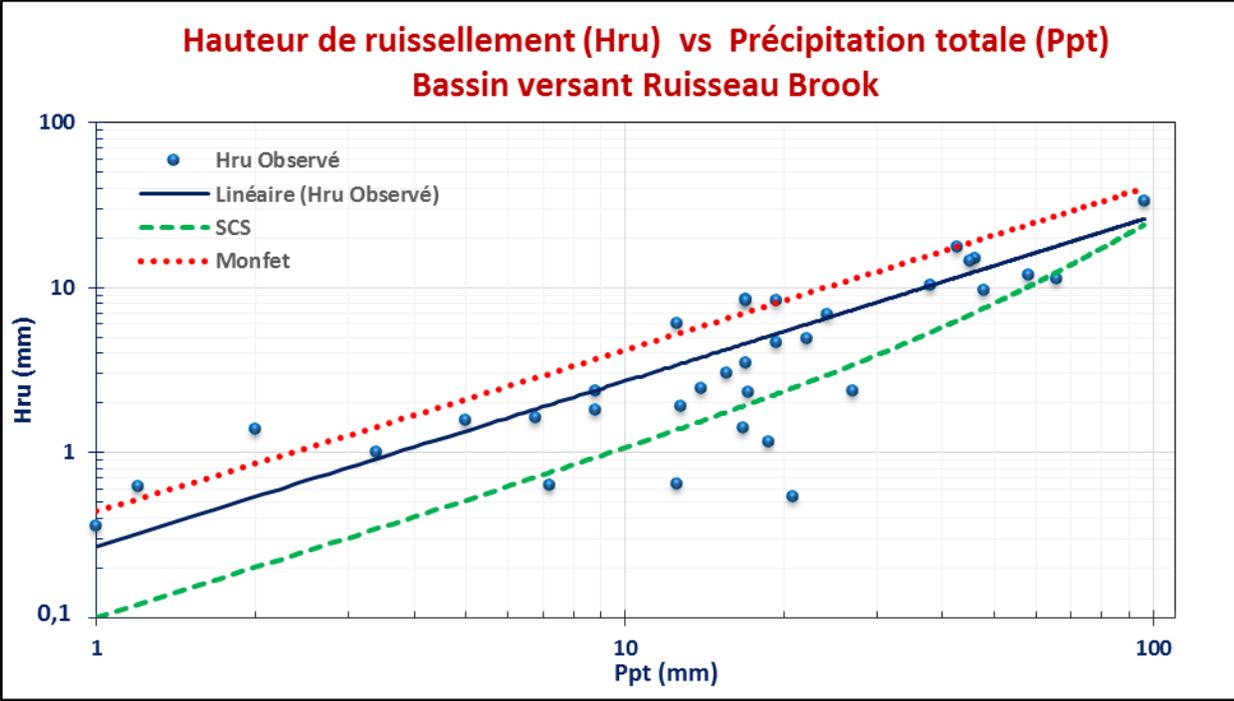
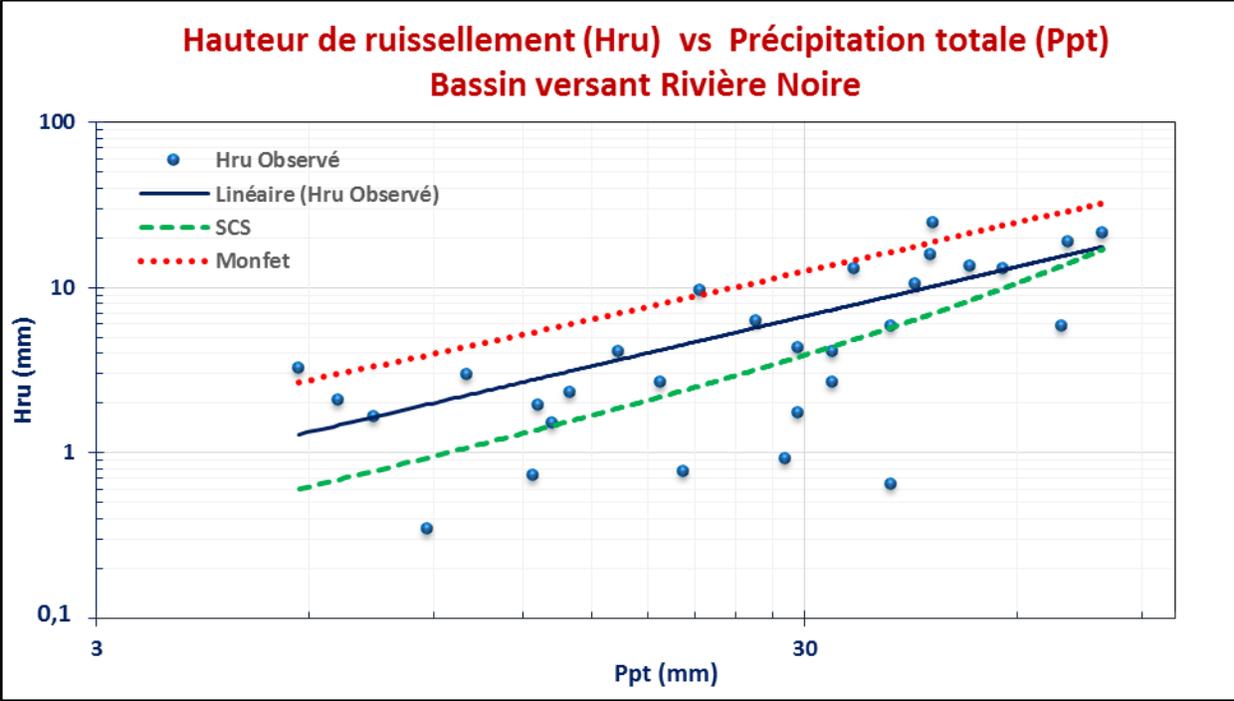


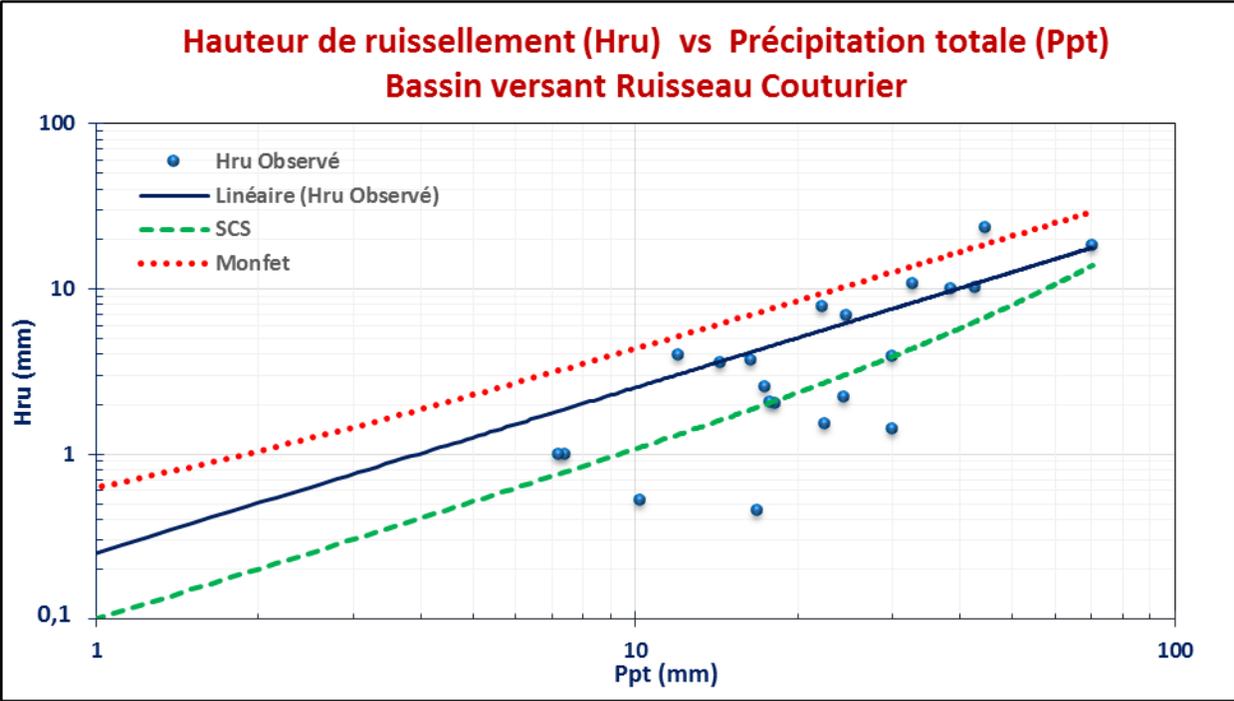
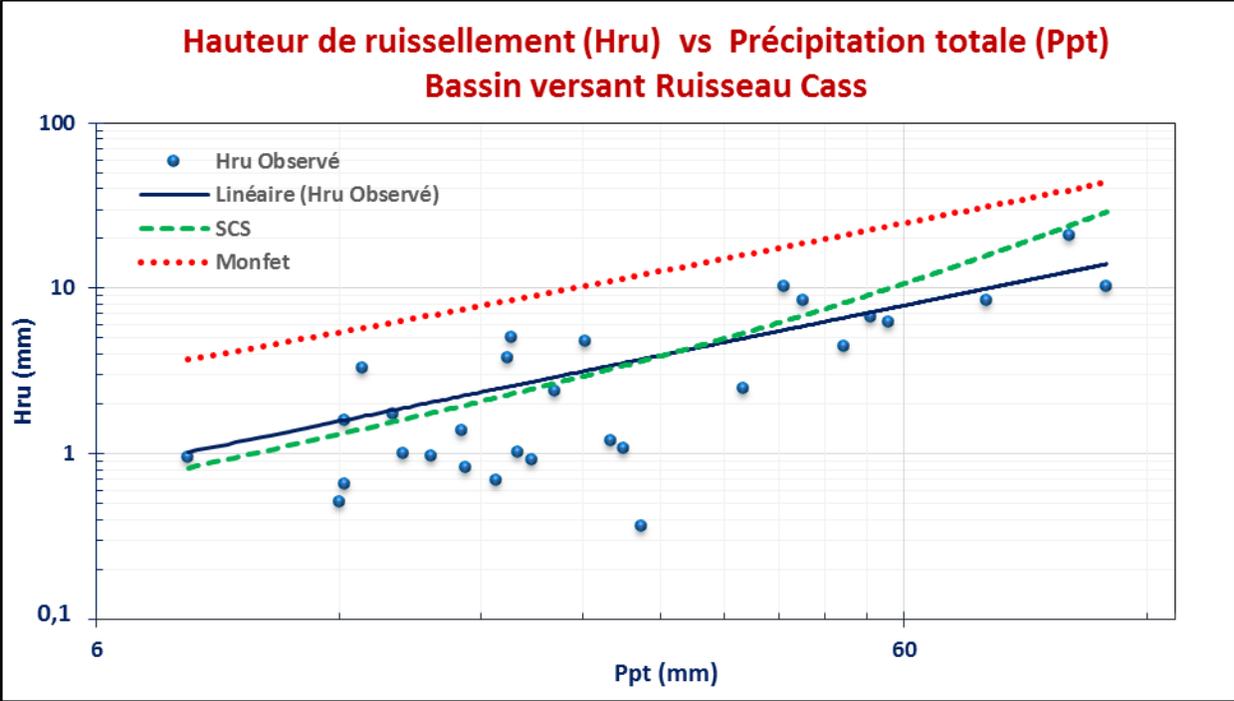


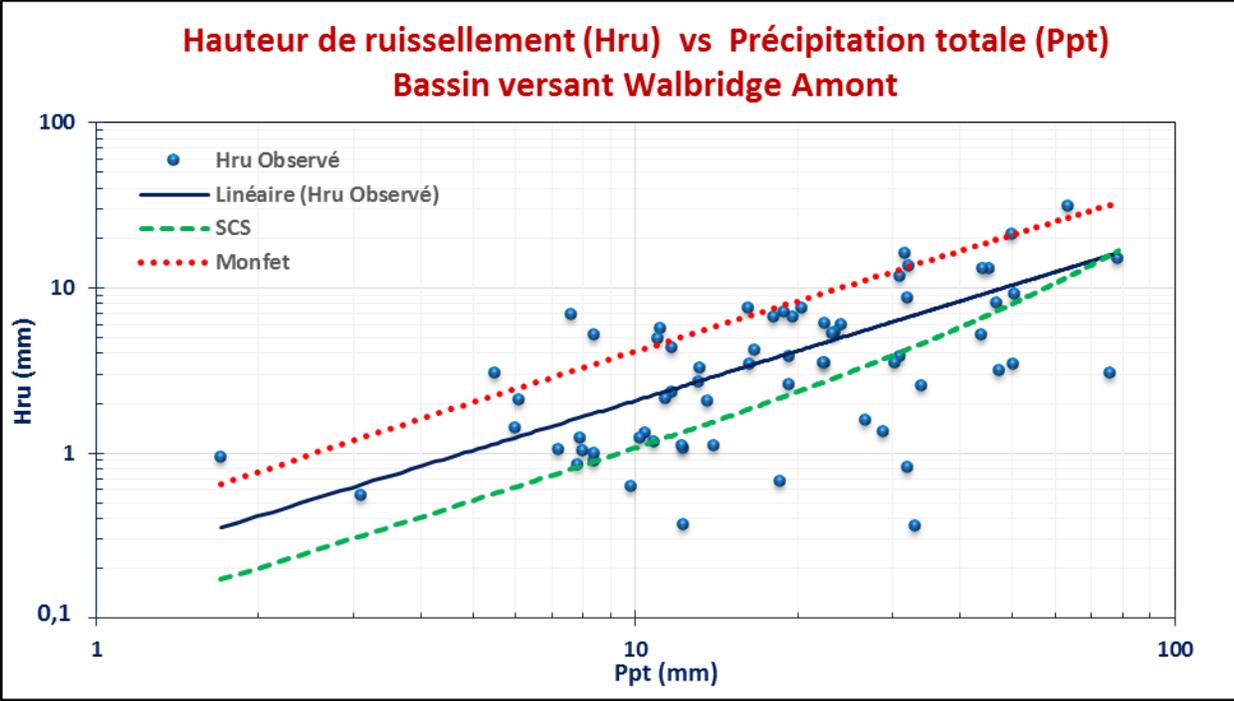
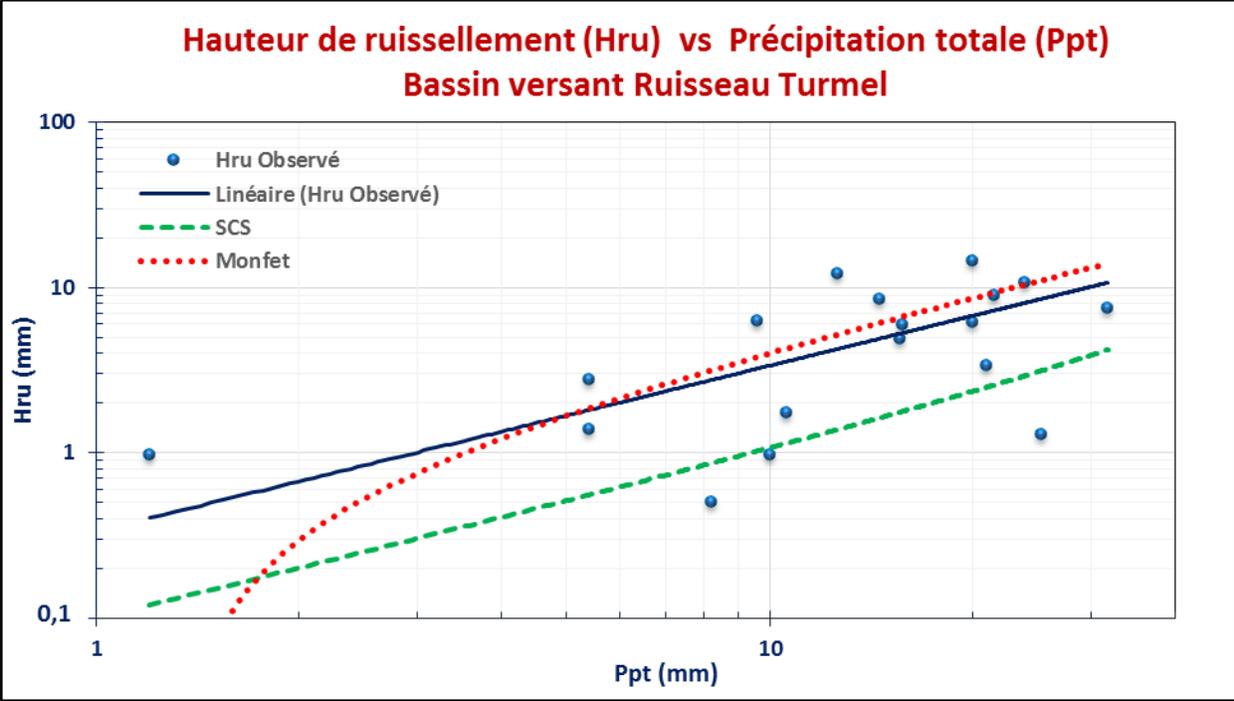


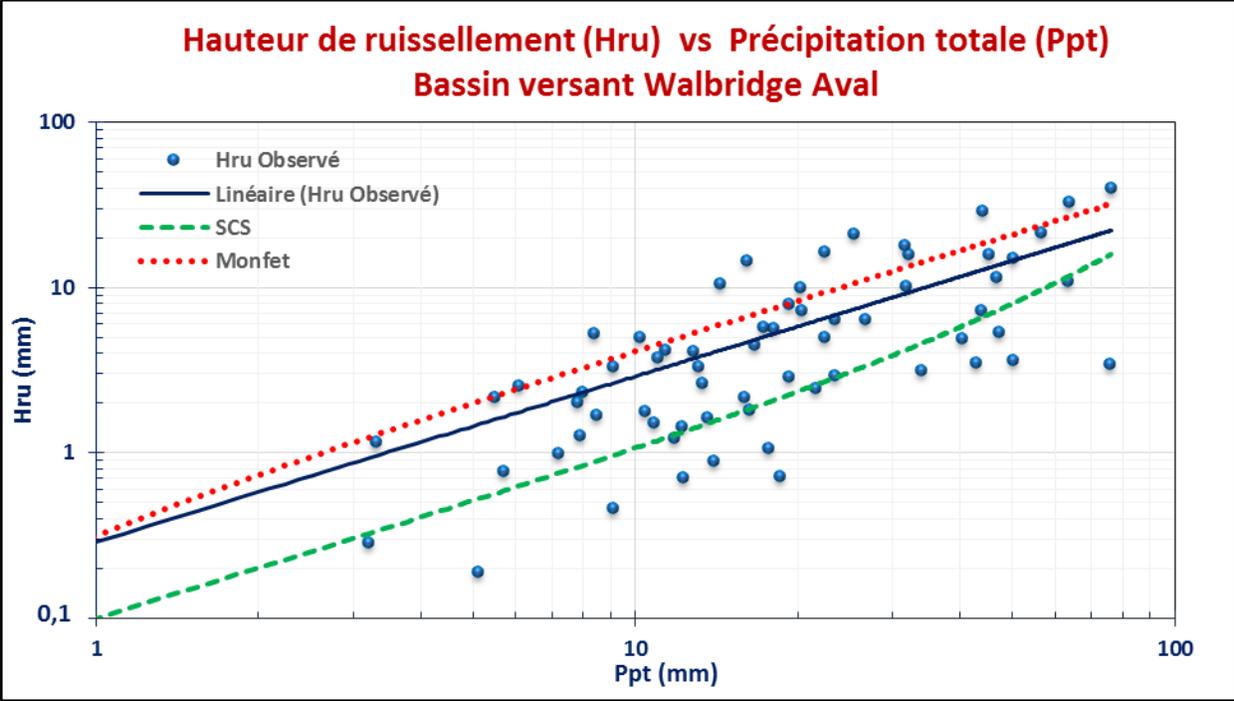




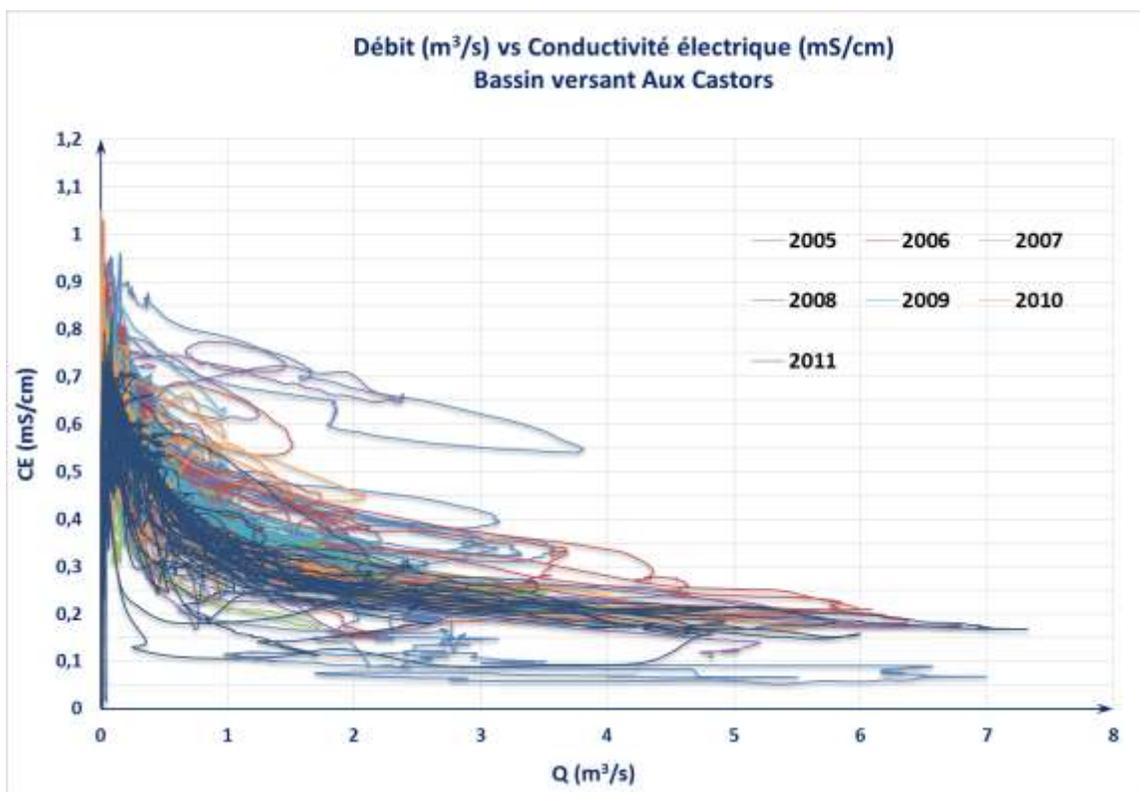


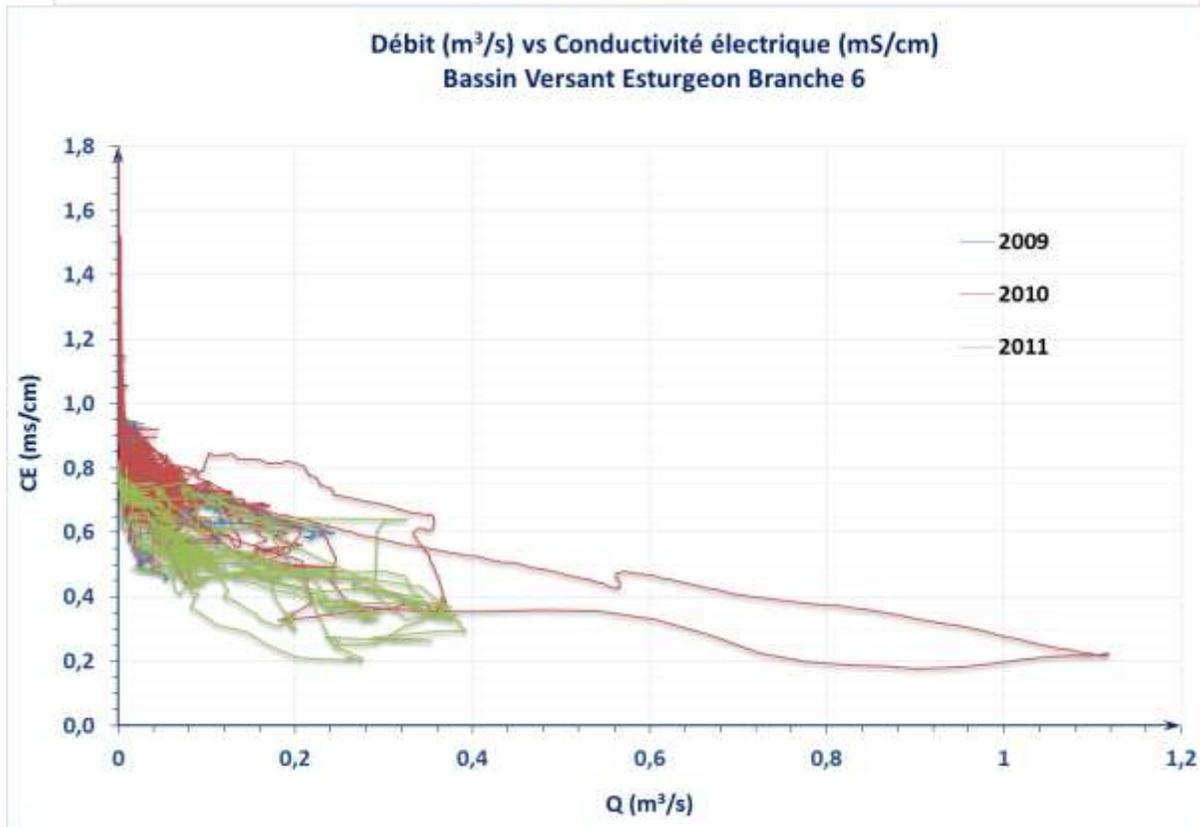
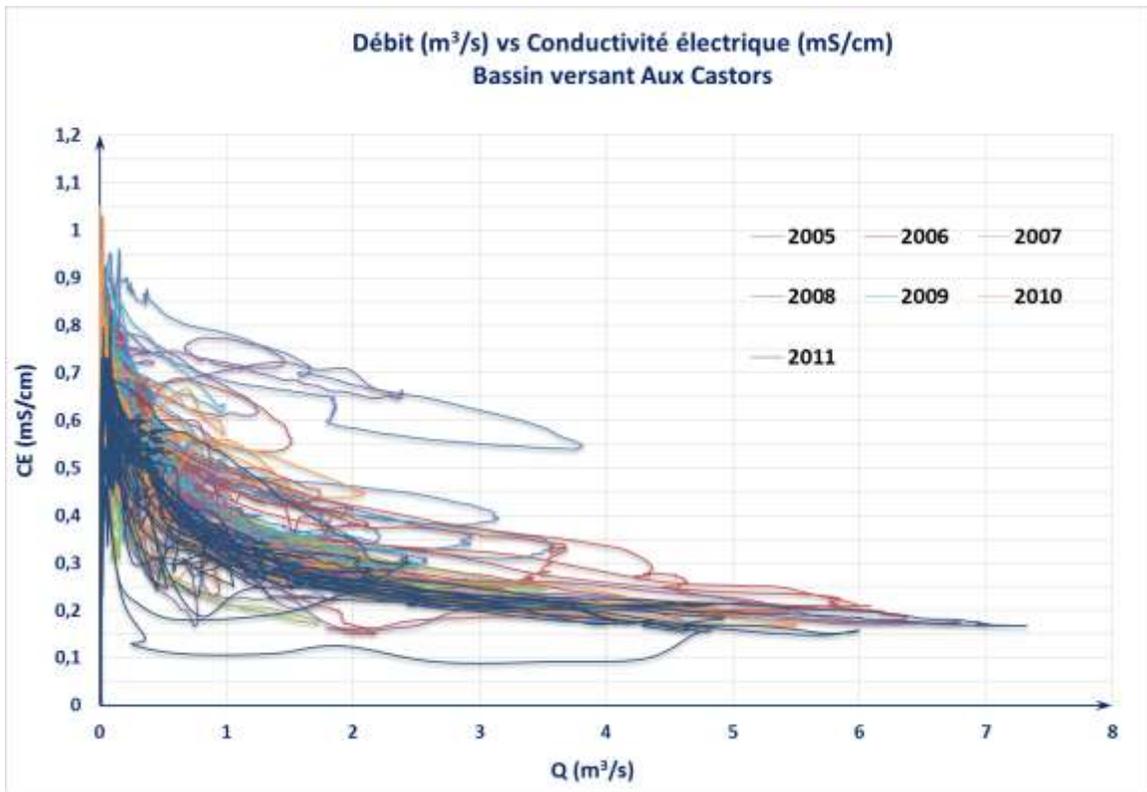


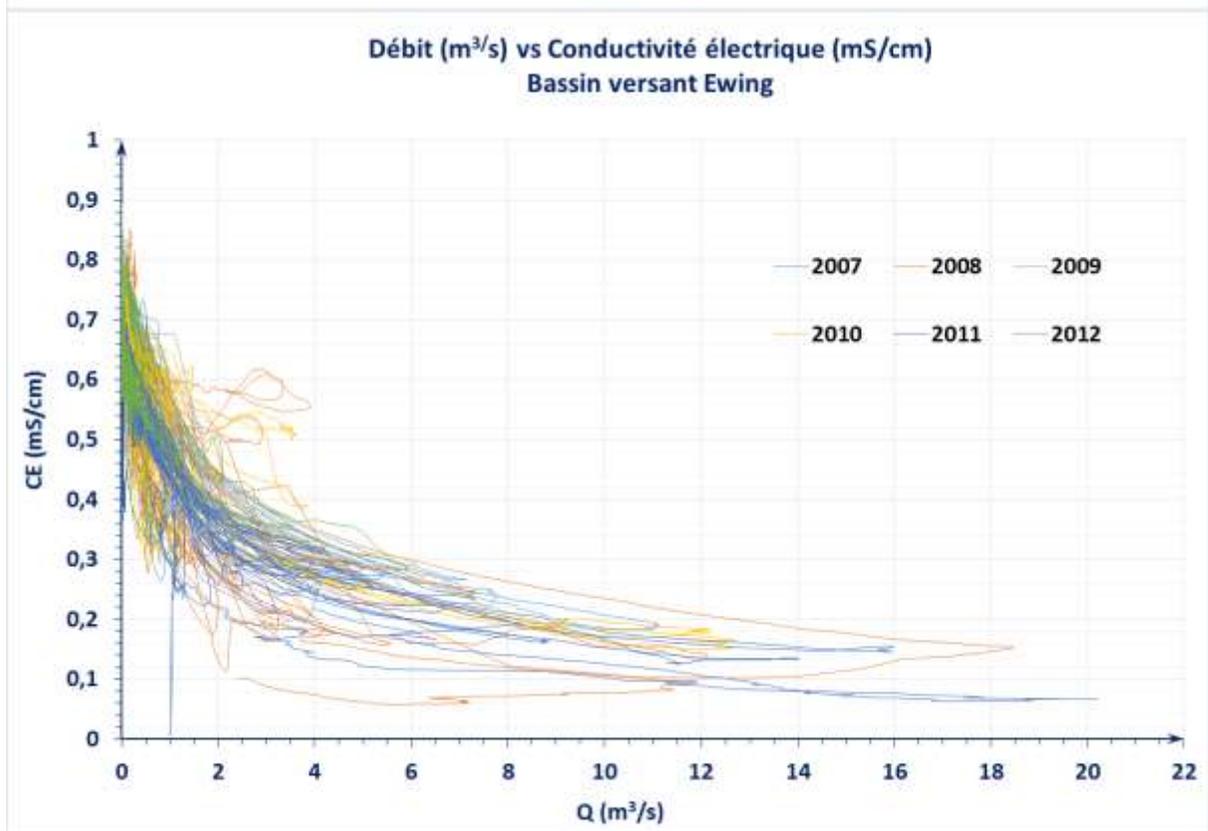
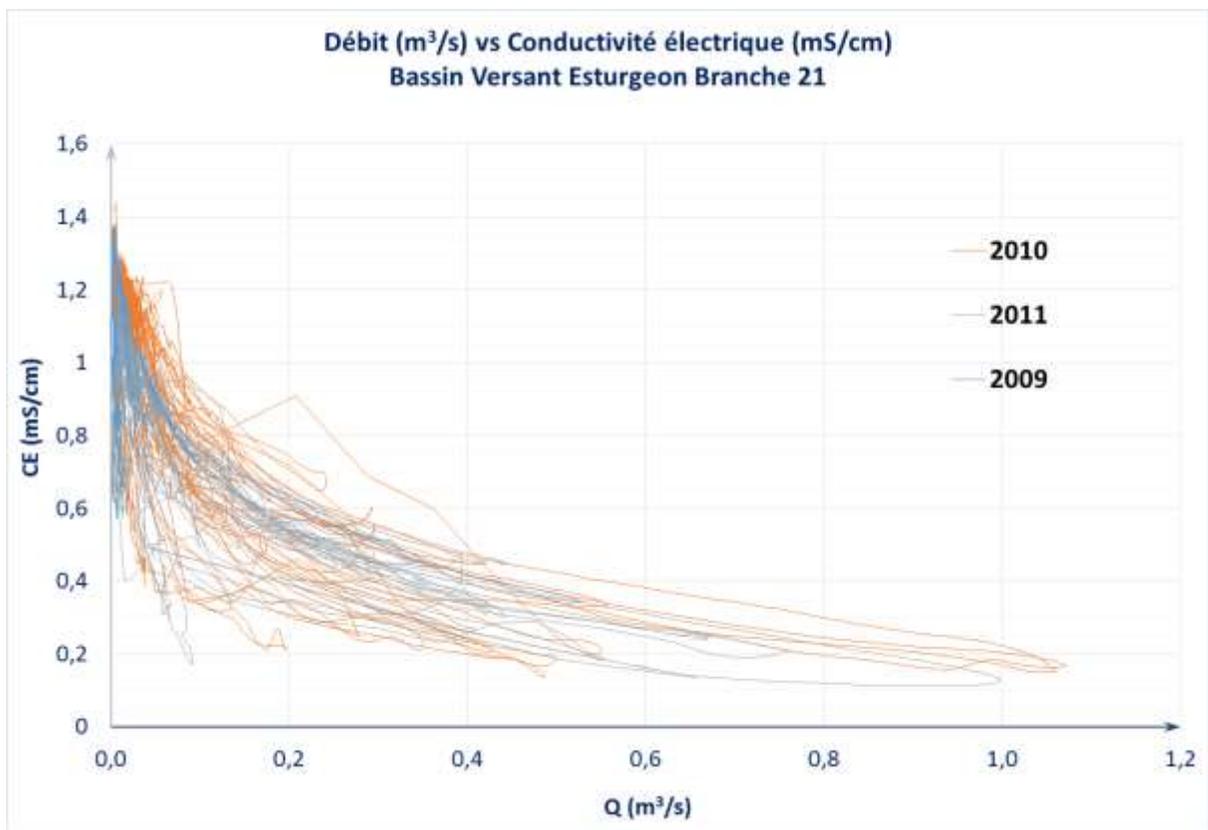


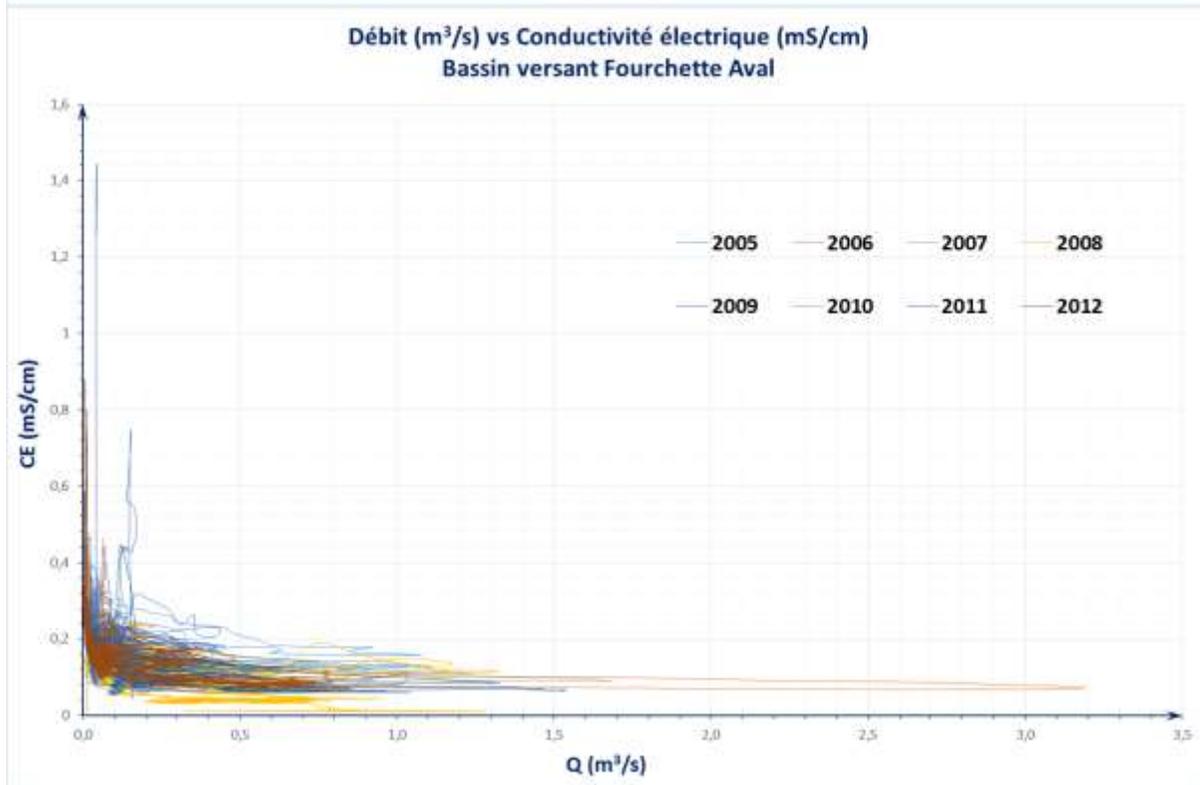
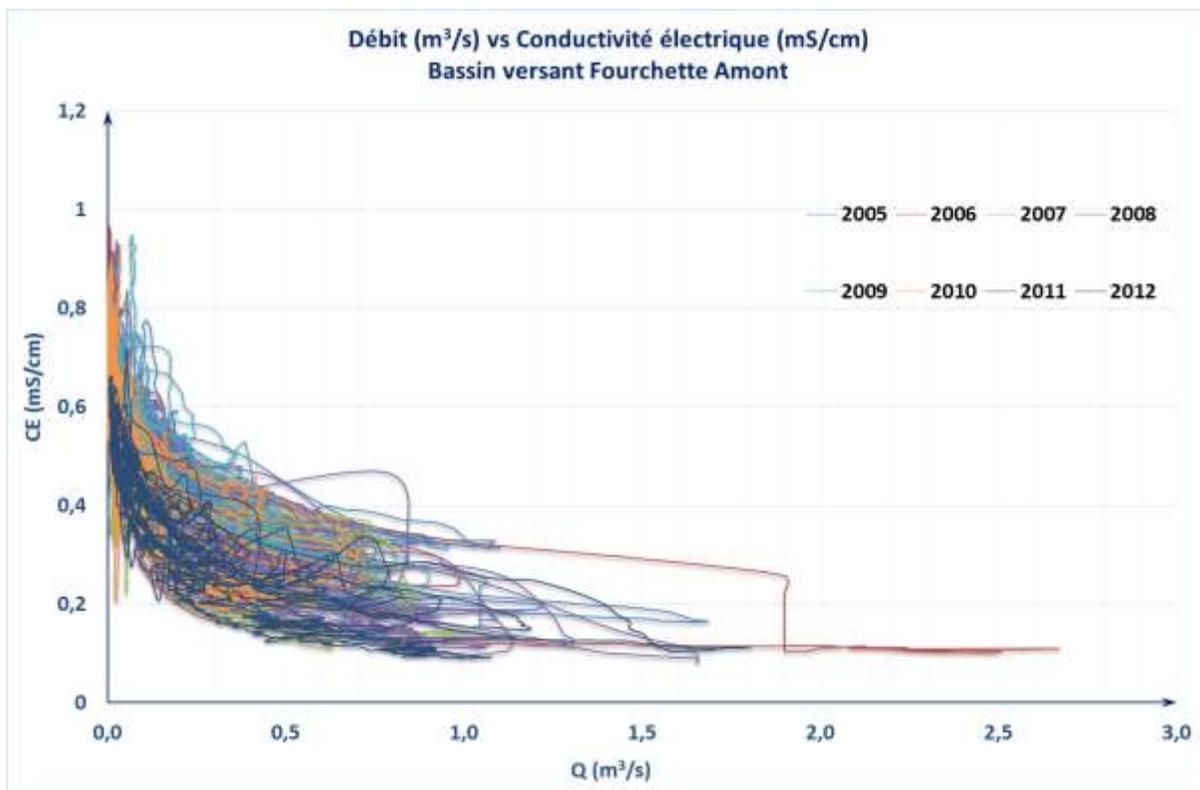


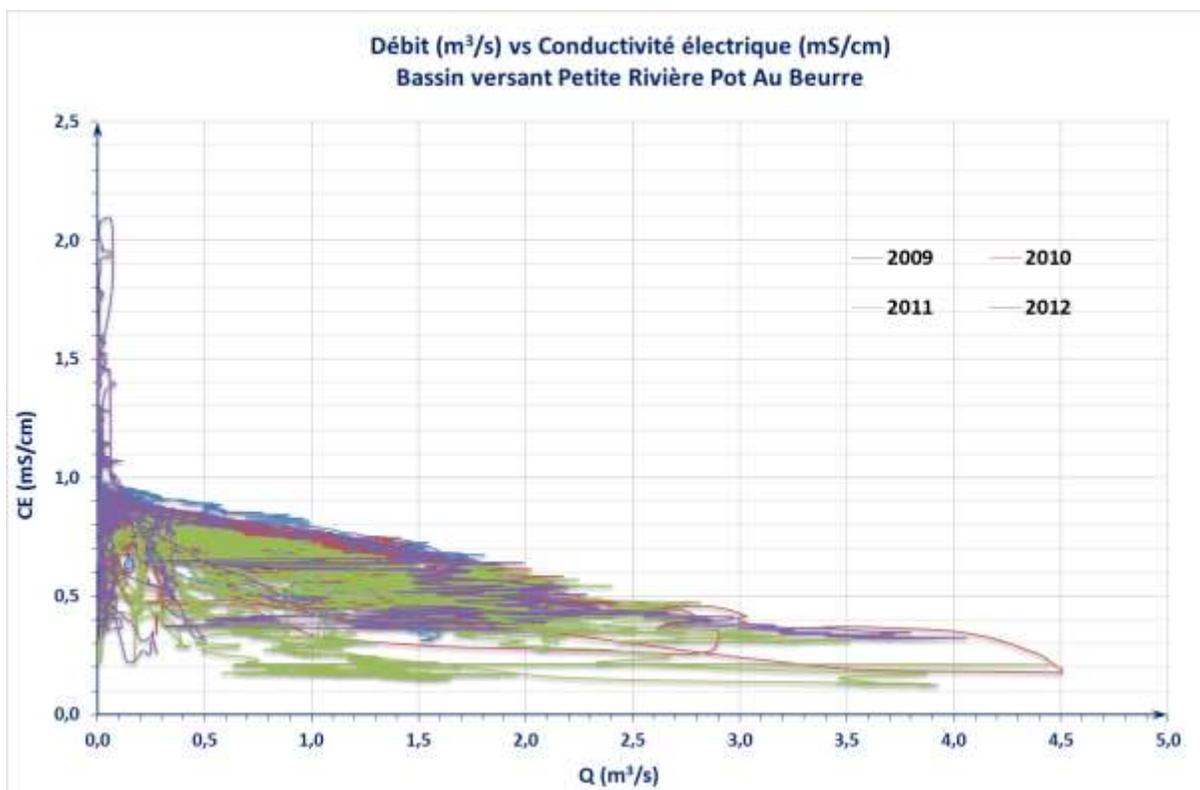
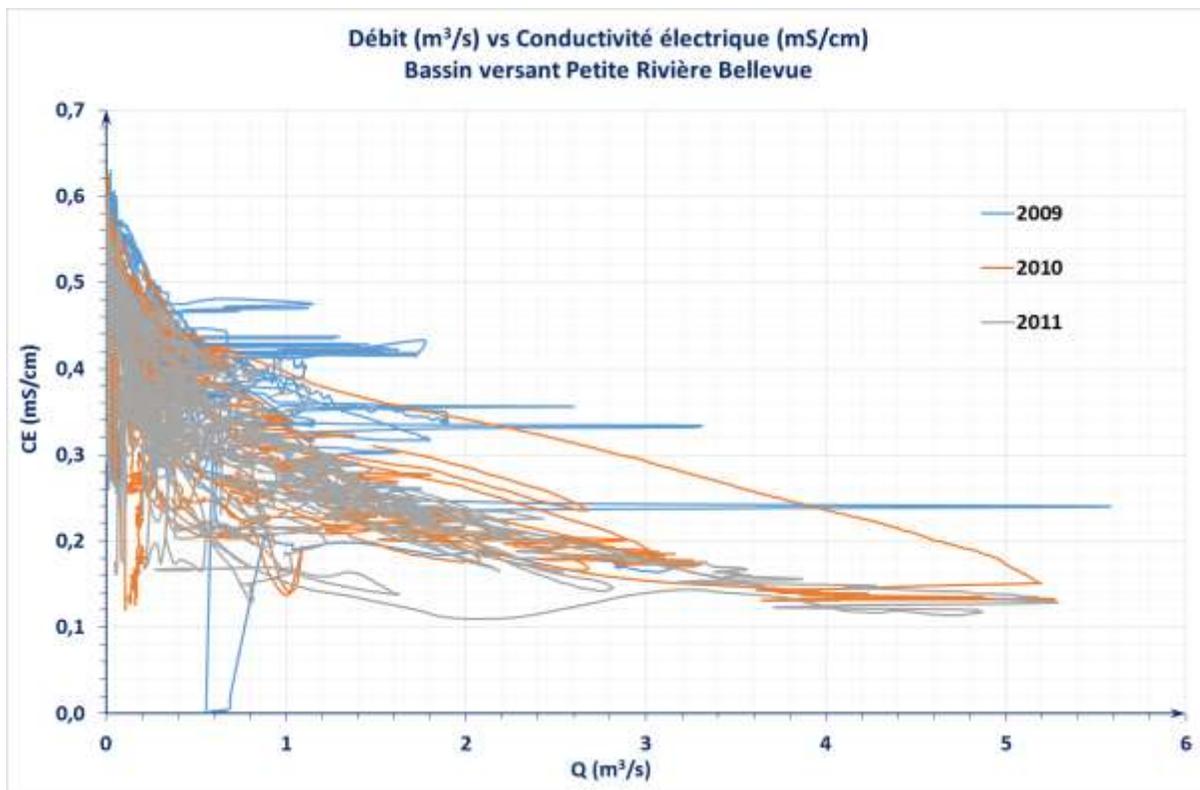
Annexe 4. Débits en fonction de la conductivité électrique pour chacun des bassins versants à l'étude.

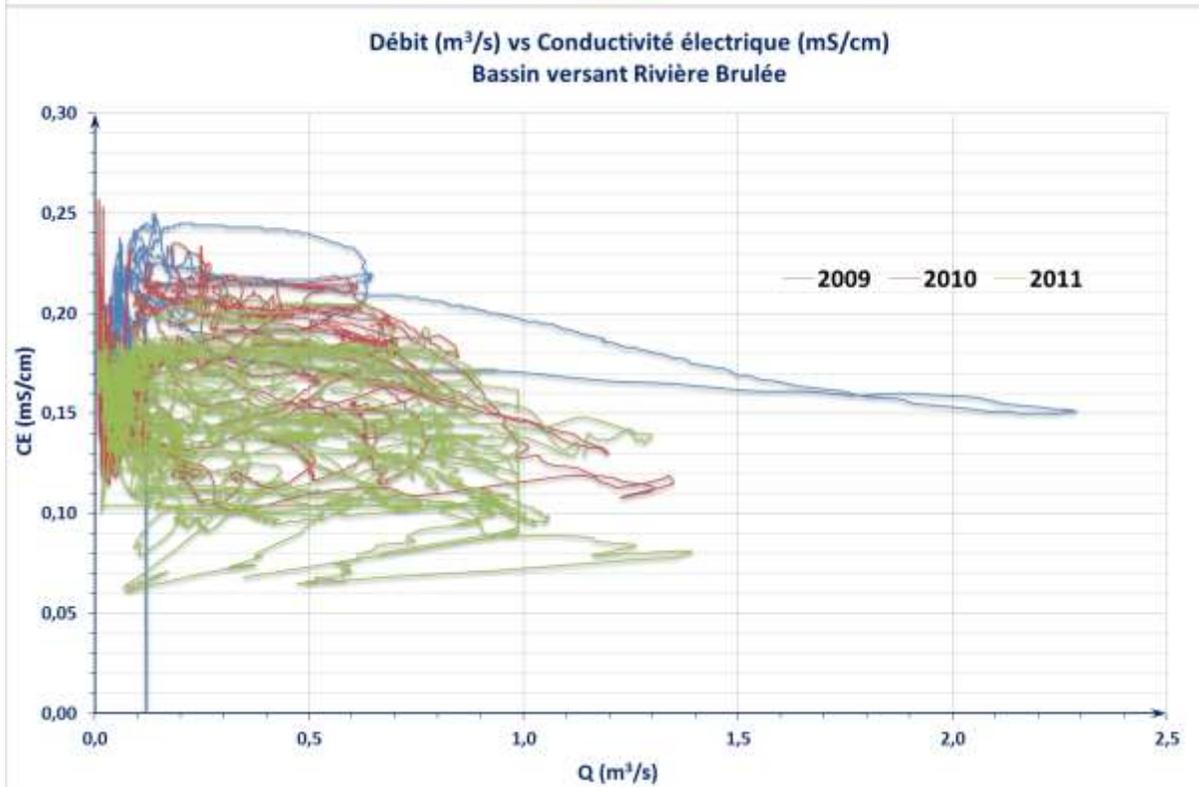
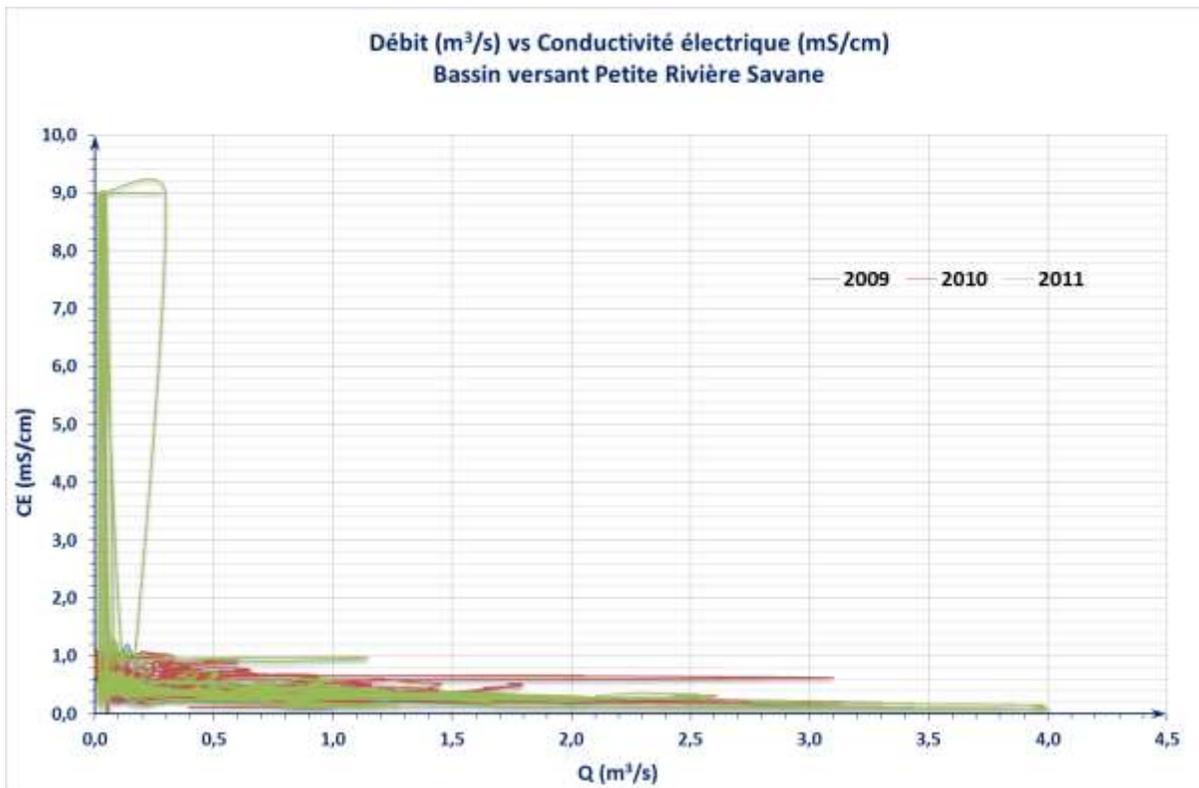


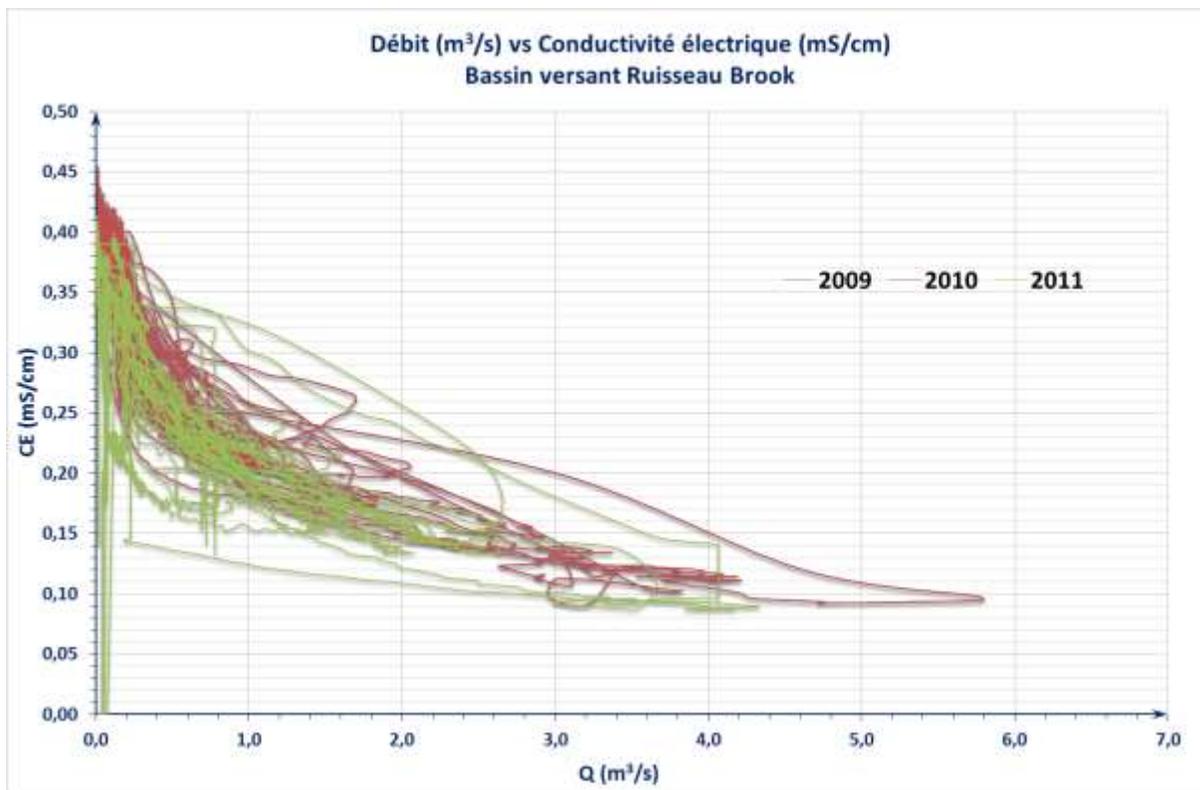
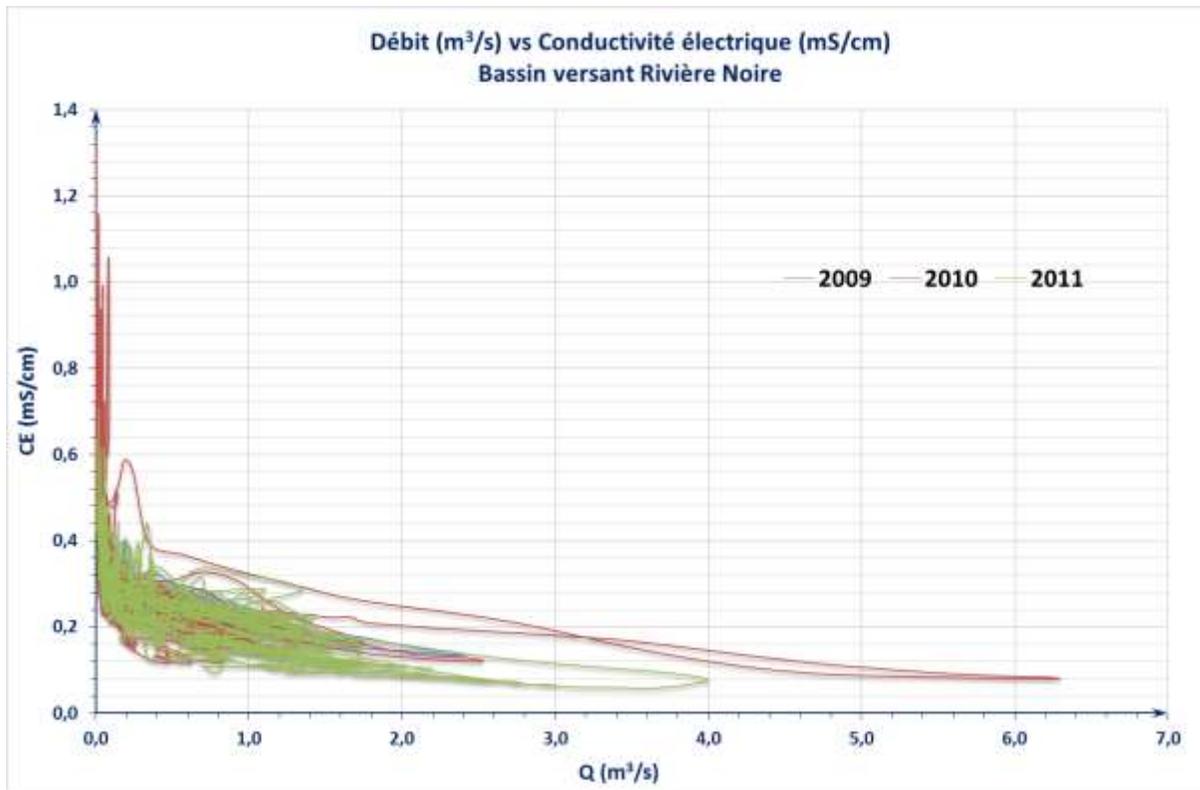


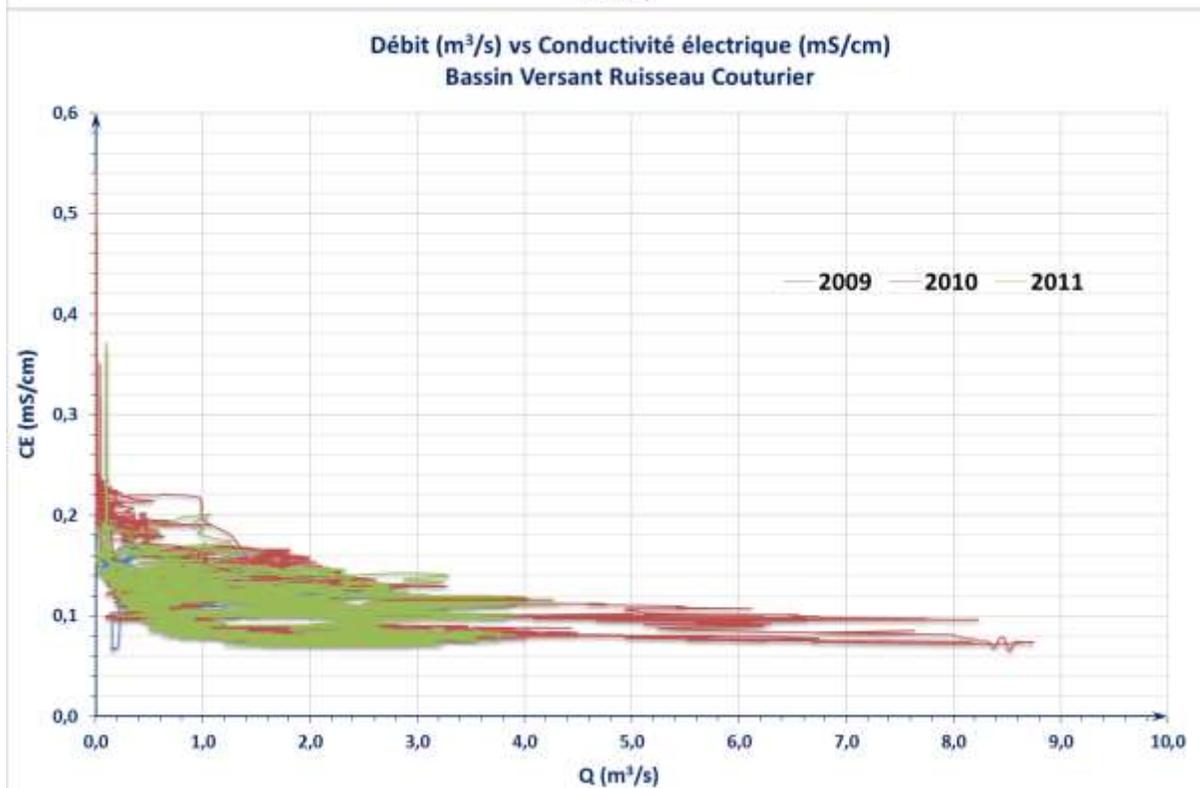
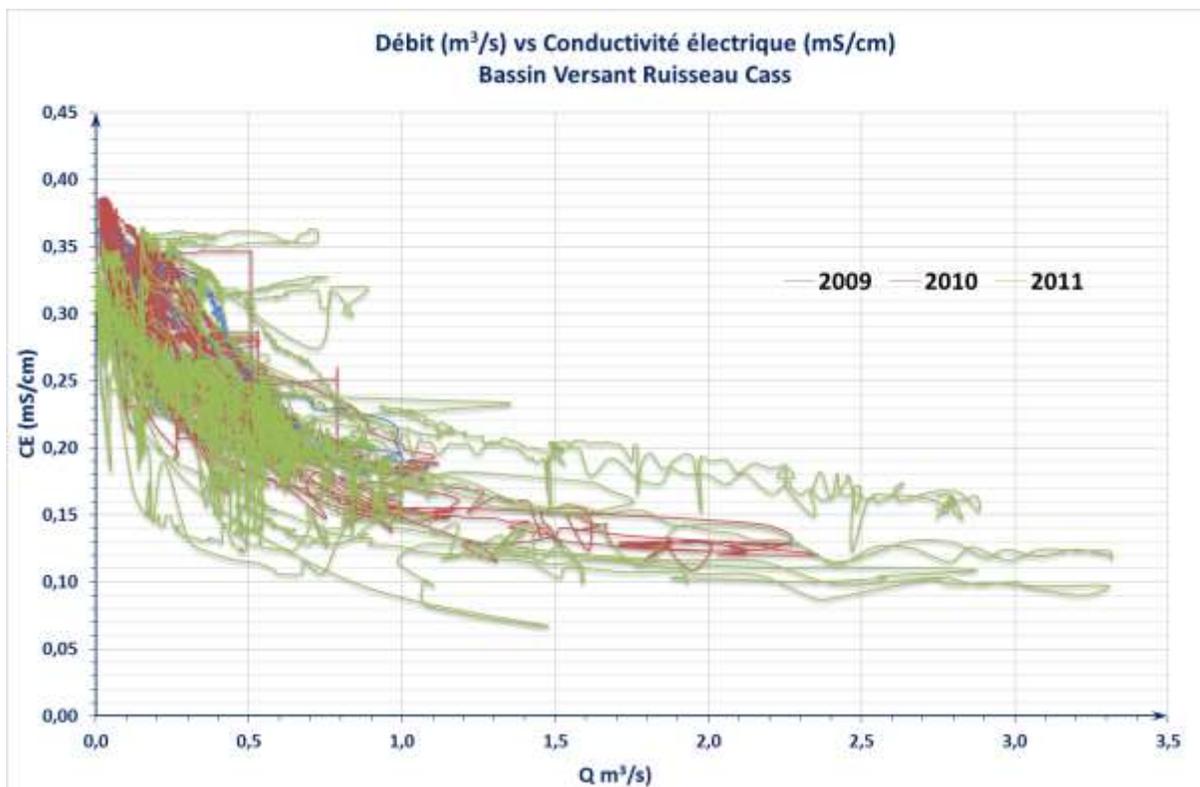


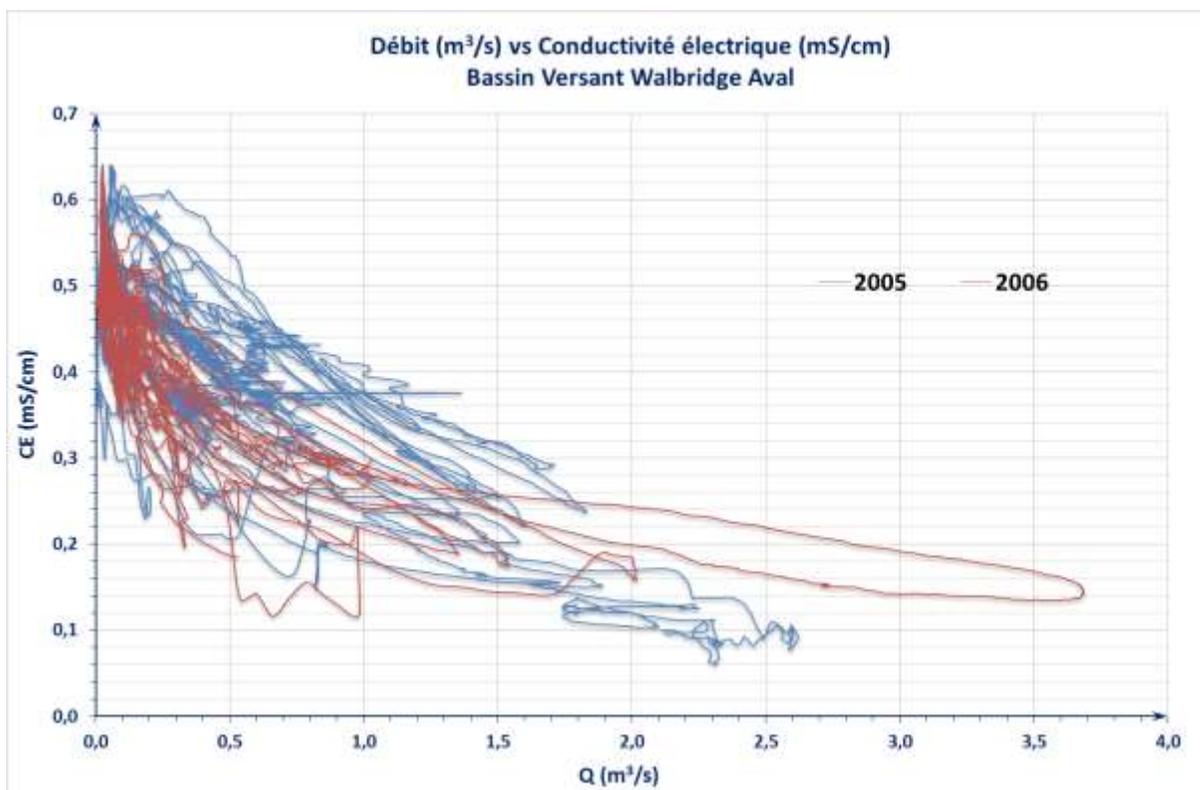
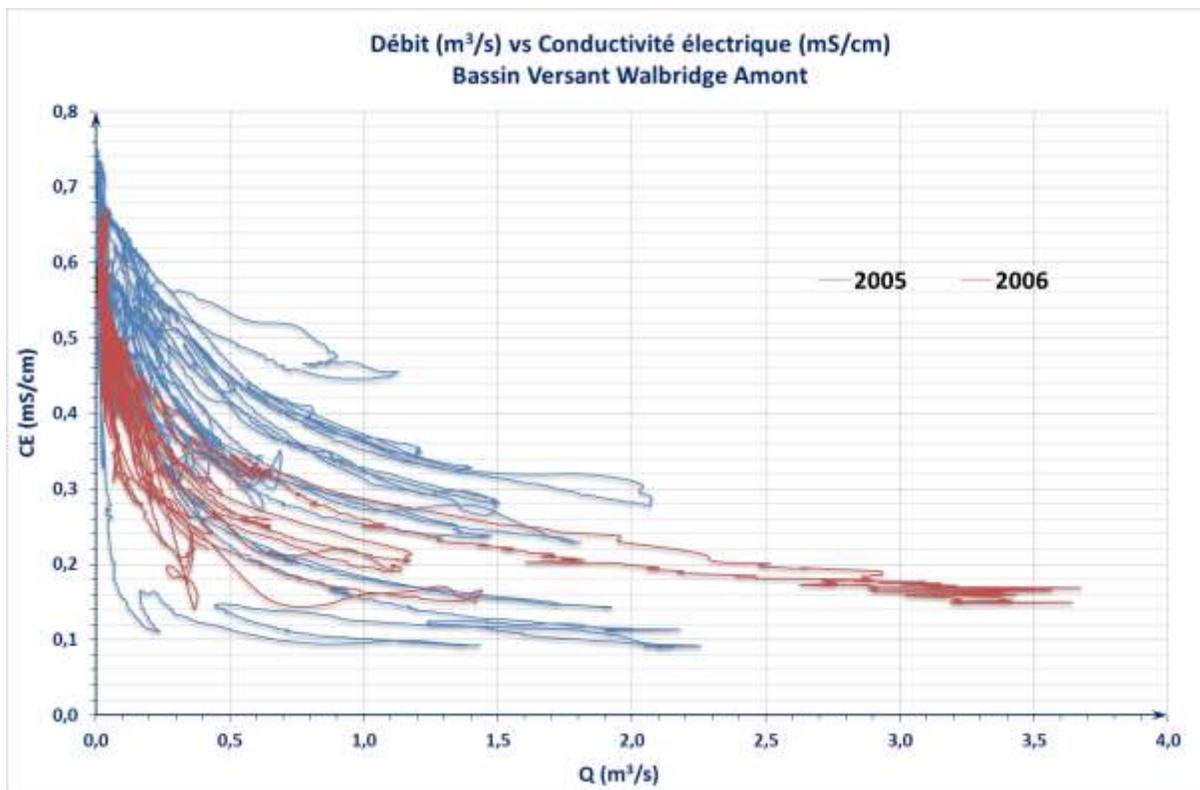




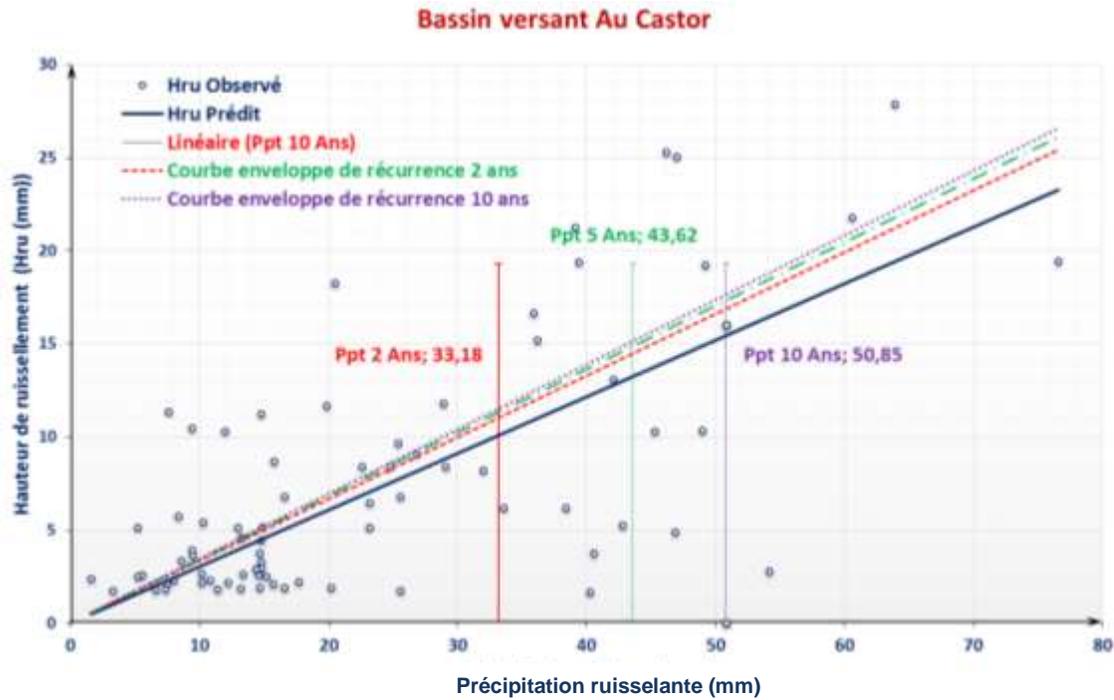




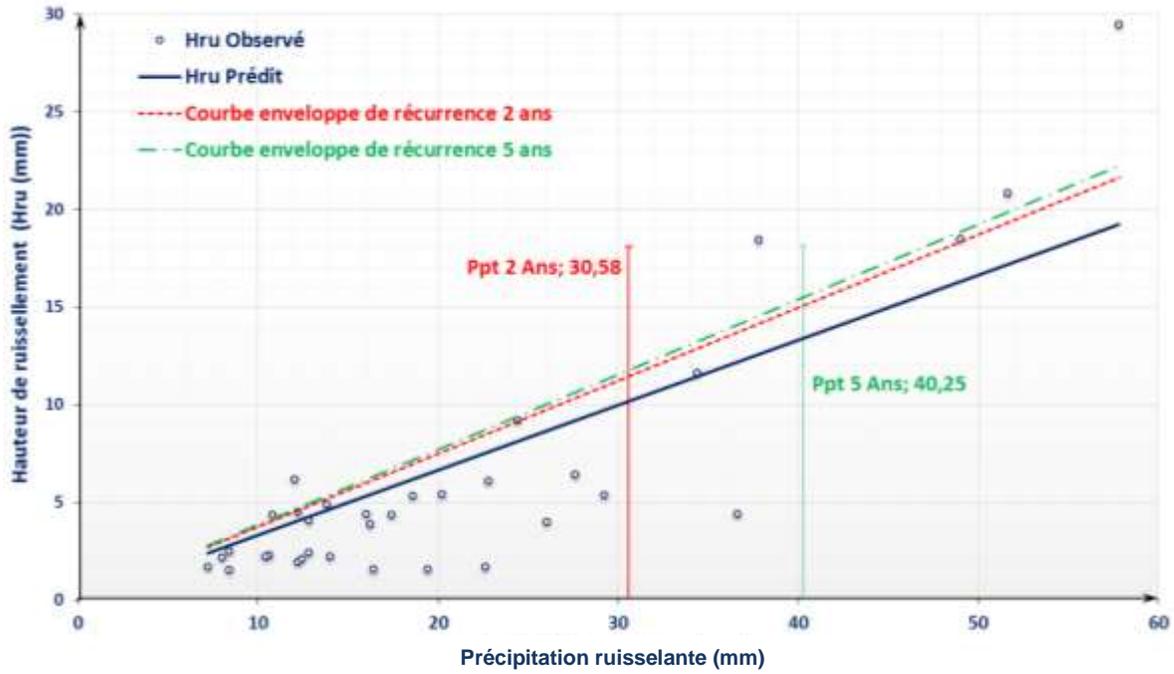




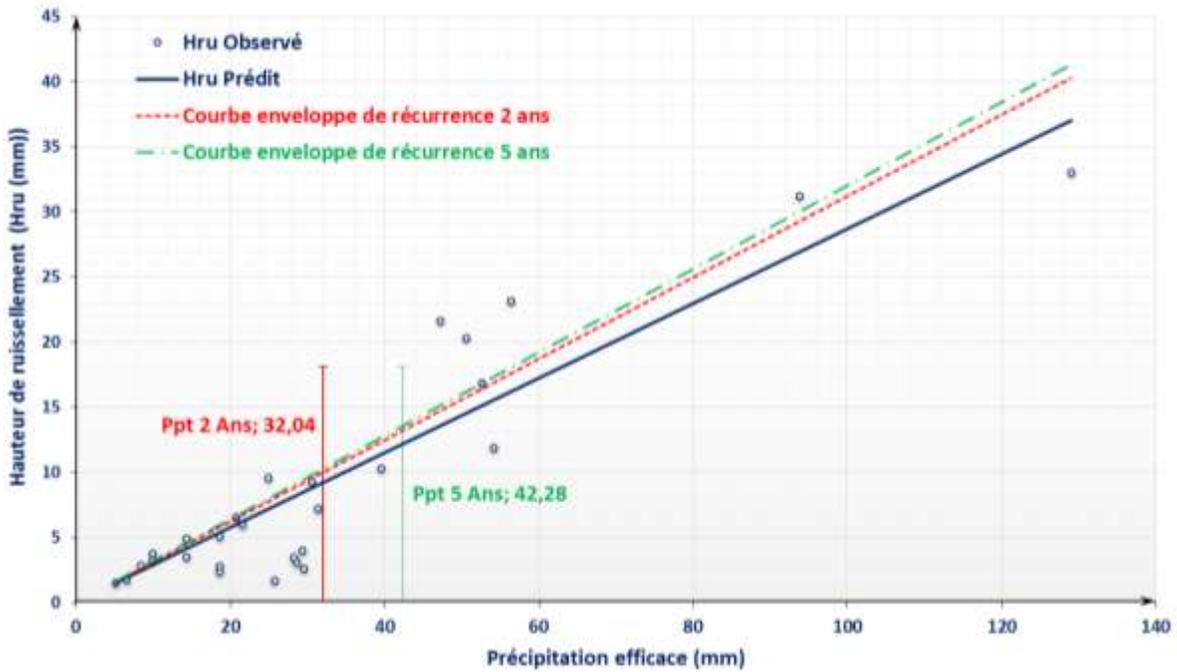
Annexe 5. Hauteurs de ruissellement observés et prédits en fonction de la précipitation efficace, plus les courbes enveloppes de récurrence 2, 5 et 10 ans pour chacun des bassins versants à l'étude.



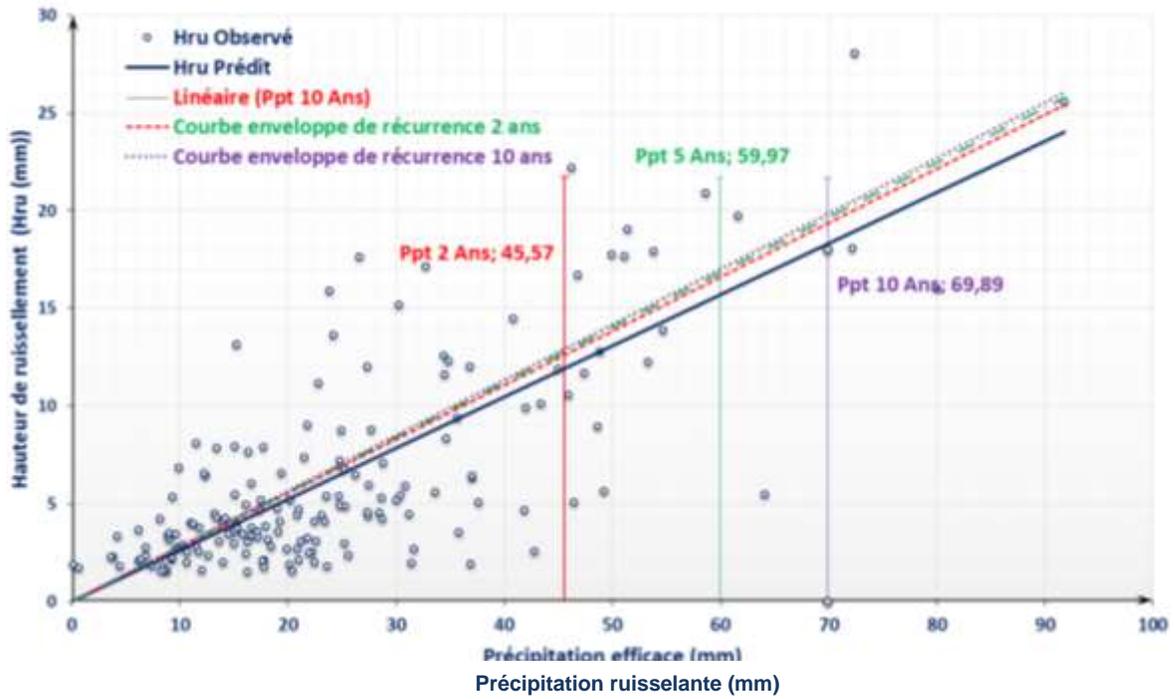
Bassin versant Binet



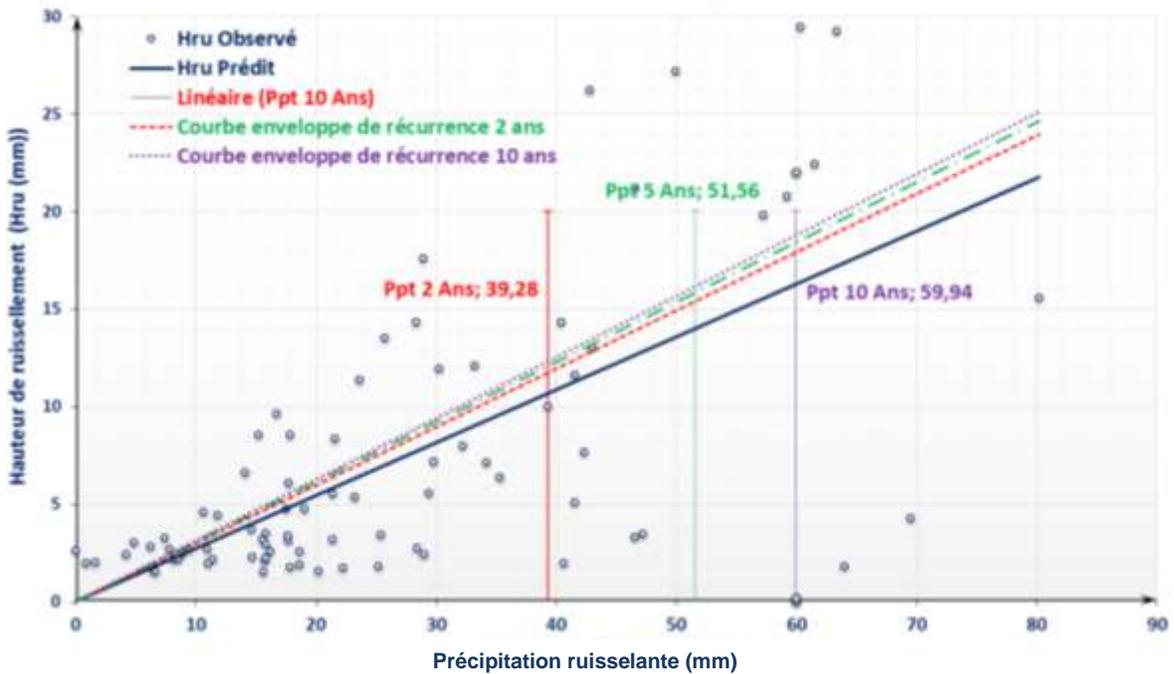
Bassin versant Cloutier



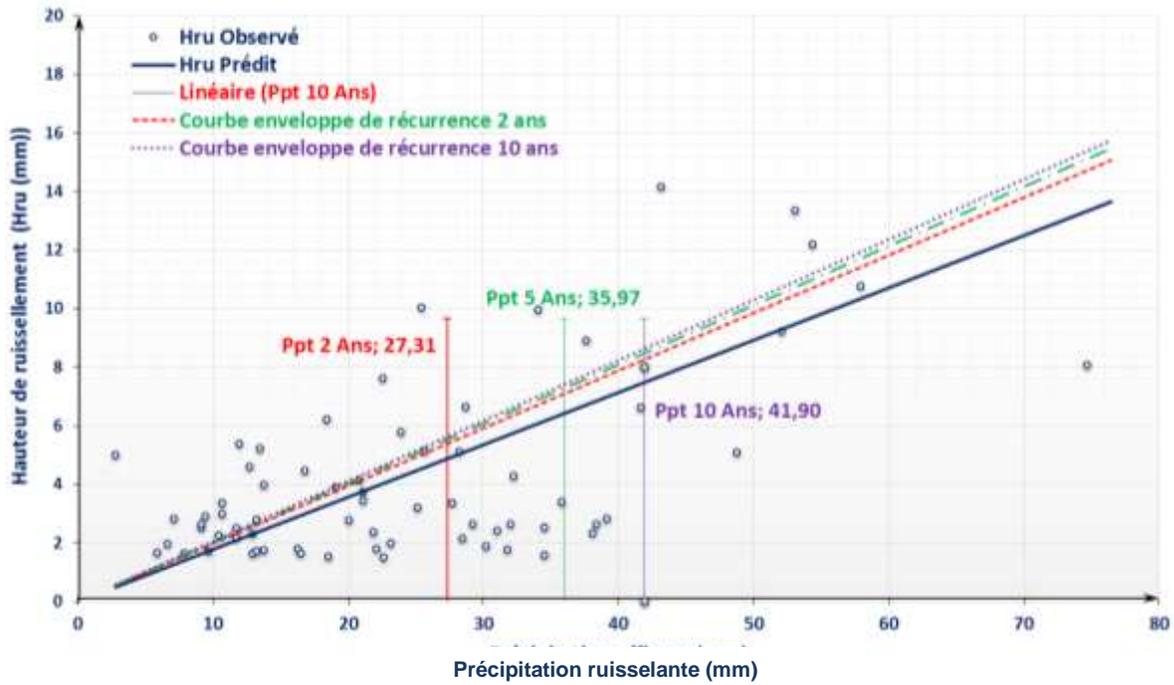
Bassin versant Dauphine



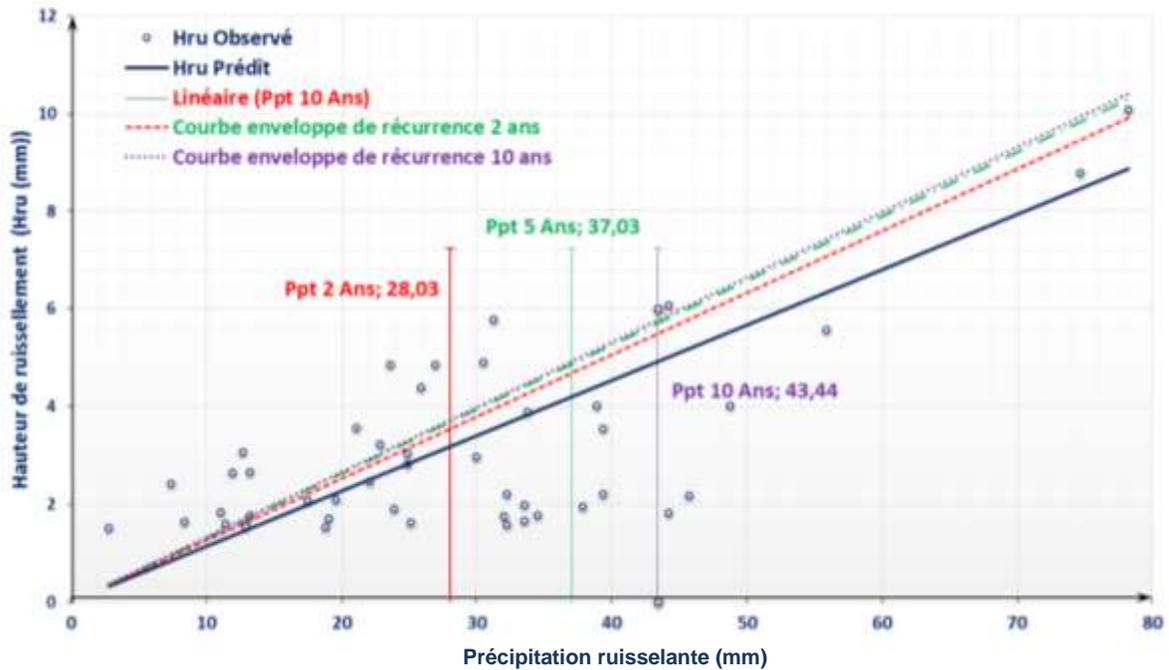
Bassin versant Ewing



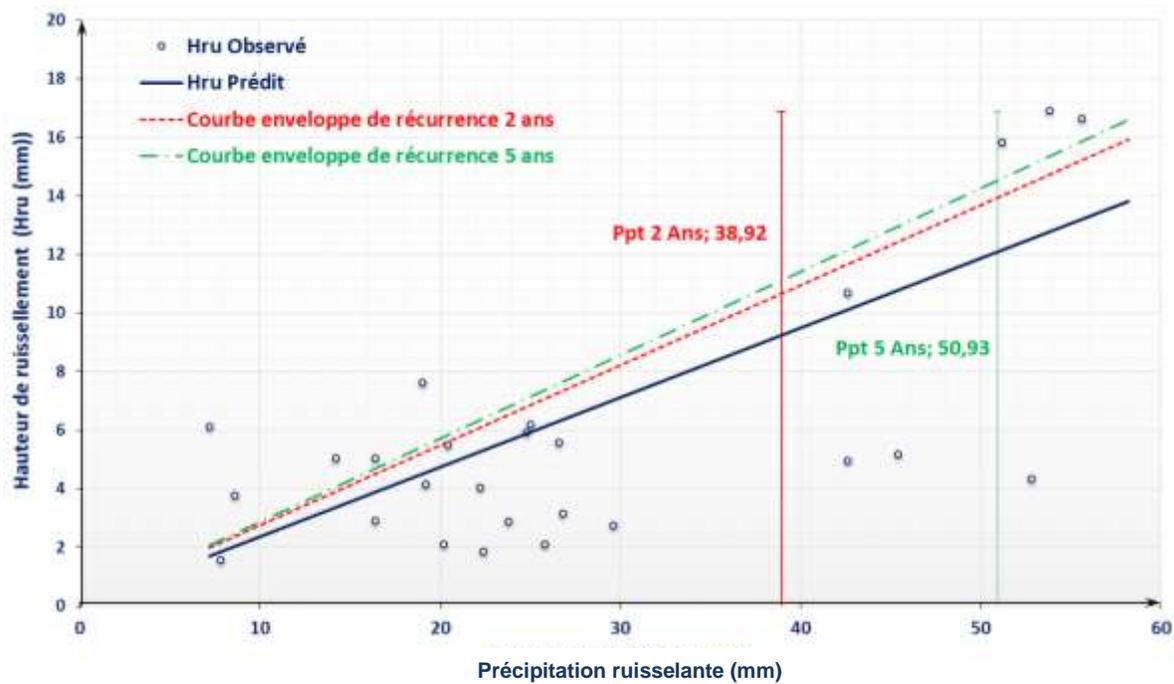
Bassin versant Fourchette Amont



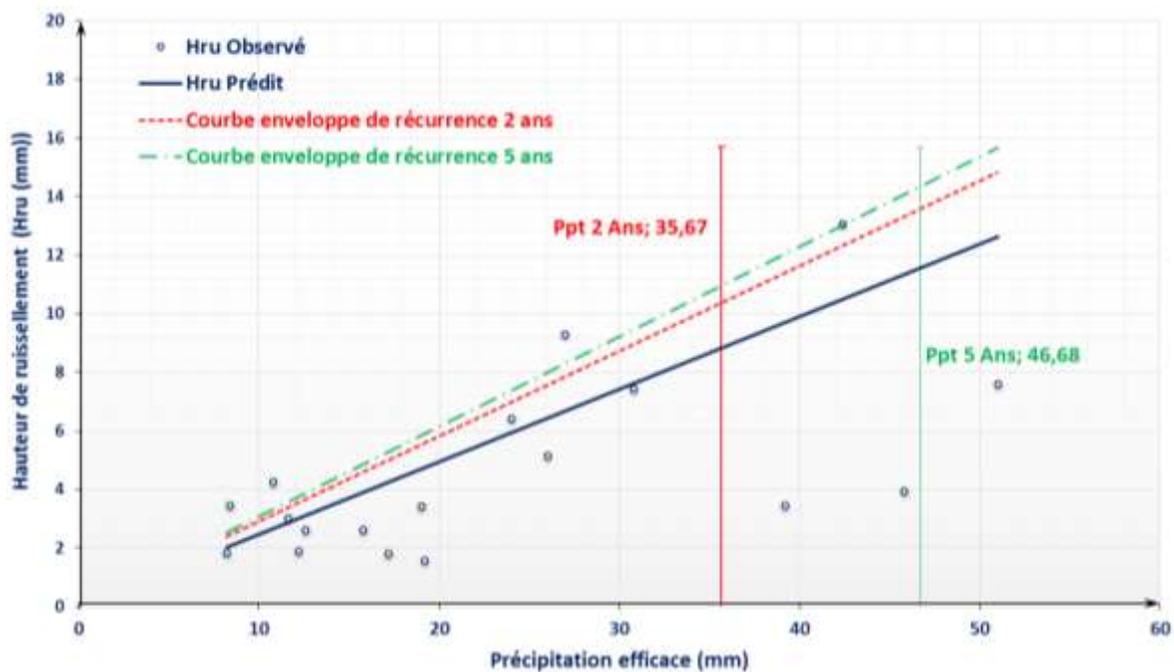
Bassin versant Fourchette Aval



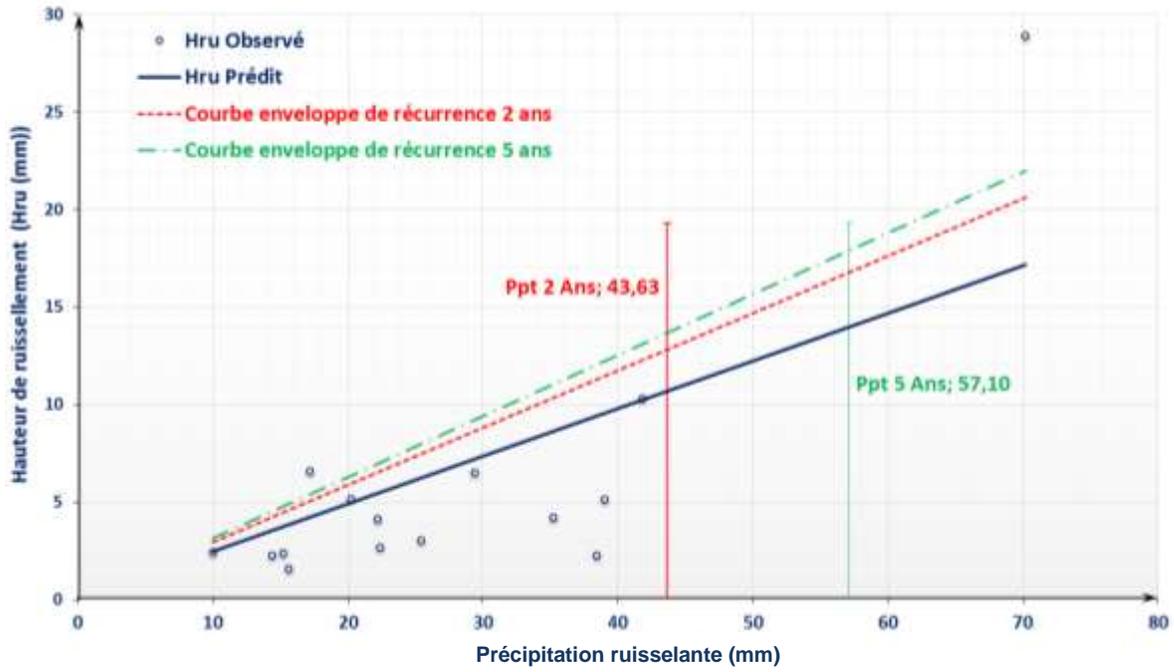
Bassin versant Petite Rivière Bellevue



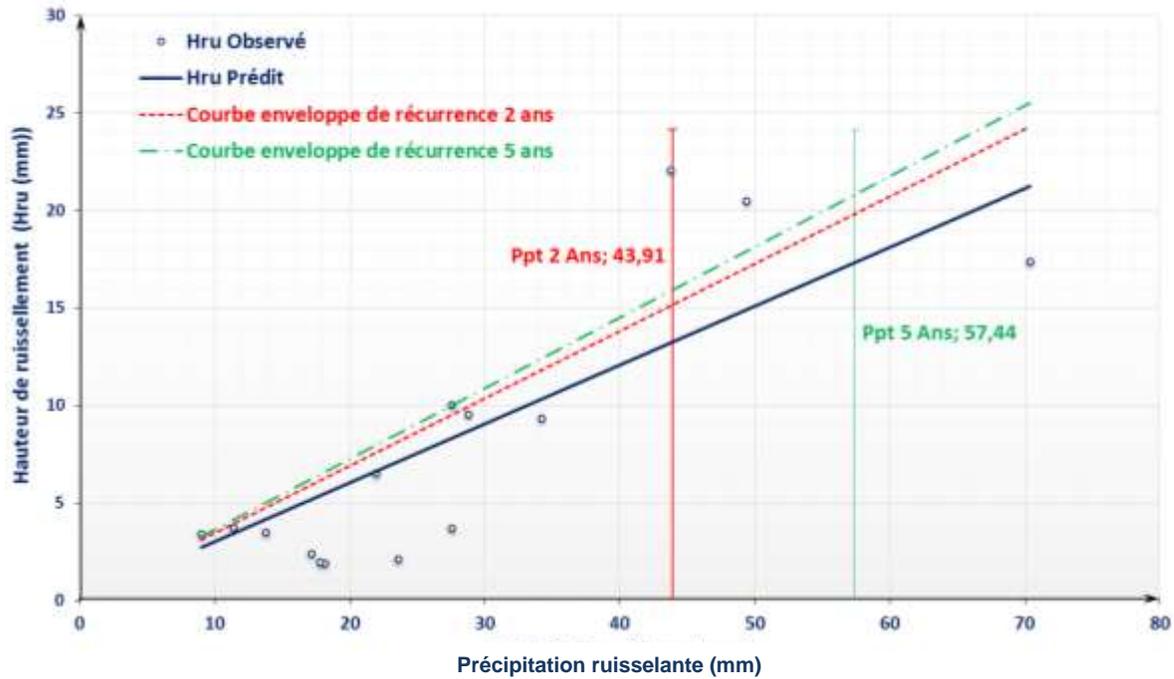
Bassin versant Petite Rivière Potau Beurre



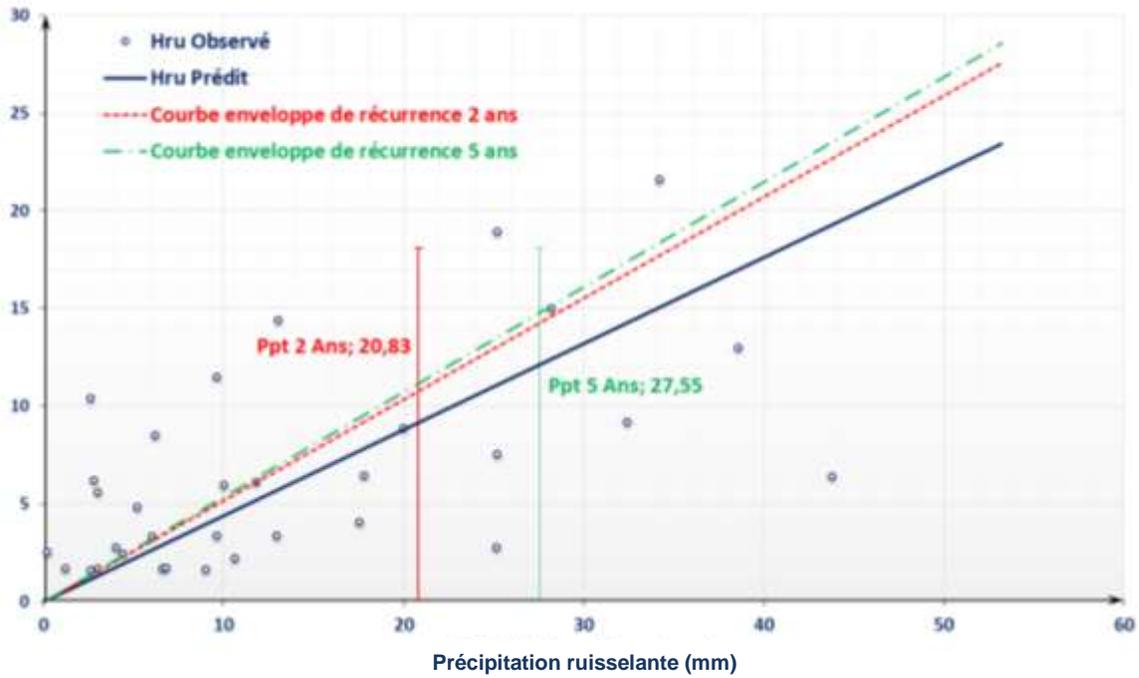
Bassin versant Petite Rivière Savane



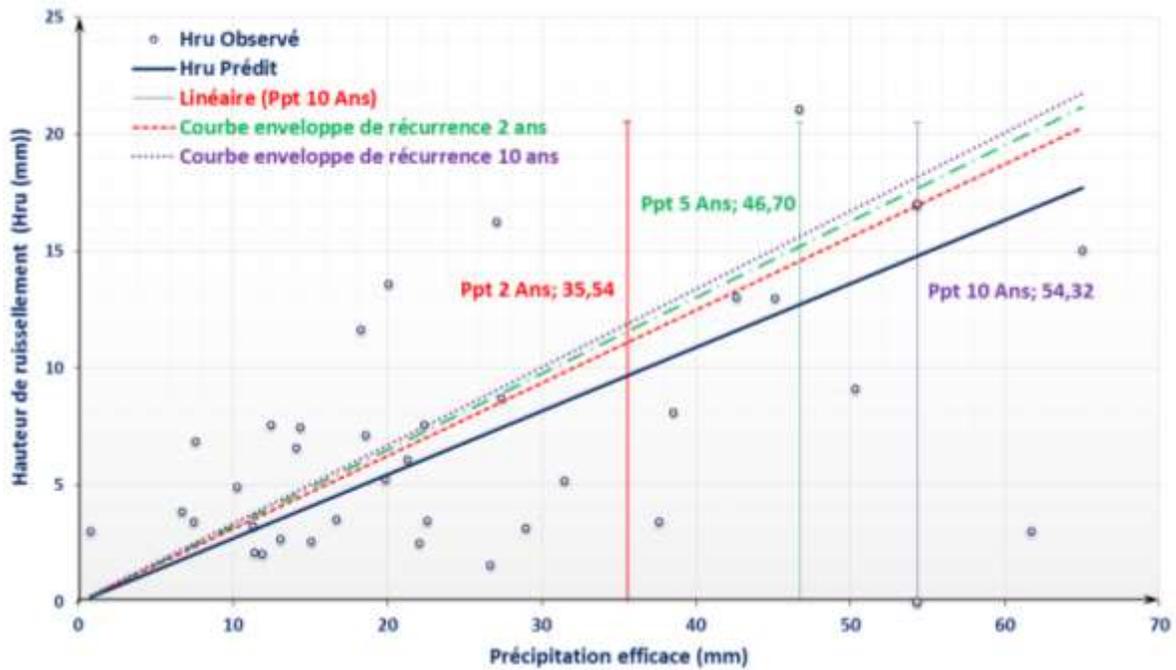
Bassin versant Ruisseau Couturier



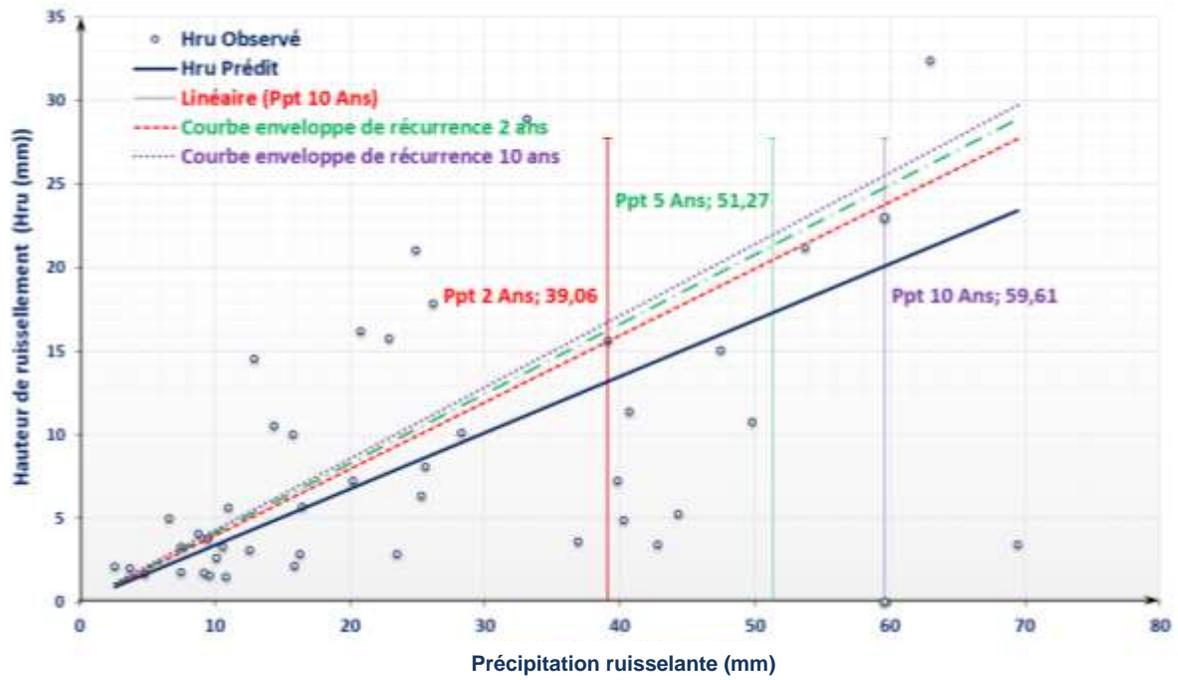
Bassin versant Ruisseau Turmel



Bassin versant Walbridge Amont



Bassin versant Walbridge Aval



Annexe 6. Complément d'information sur les stations météorologiques.

Stations météorologiques avec la même période d'analyse des données par bassin versant,

N	Bassin Versant Station Jaugeage	Station Météorologique	Dist (km)	Analyse Donnes		
				Début	Fin	Années
1	Au_Castor	Henryville	10,18	2010-04-15	2012-10-19	2,5
		Philisburg	3,73			
2	Esturgeon_Branche21	Esturgeon	4,78	2010-04-08	2010-10-30	0,6
		Sainte-Martine	6,13			
4	Ewing	Henryville	8,65	2010-04-15	2012-10-13	2,5
		Philisburg	8,88			

Comparatif des coefficients de forme de l'hydrogramme ϕ (α) pour les deux stations météorologiques analysées par bassin versant

Coefficient de forme de l'hydrogramme $\phi(\alpha)$							
#	Bassin Versant	Station Météo	N	μ	σ	Cv	E
1	Au_Castor	Henryville	28	0,78	0,16	0,20	0,94
		Philisburg	30	0,79	0,16	0,20	0,94
2	Esturgeon_Branche21	Esturgeon	10	0,61	0,14	0,23	0,97
		Sainte-Martine	6	0,80	0,20	0,24	0,92
3	Ewing	Henryville	27	0,74	0,16	0,22	0,94
		Philisburg	25	0,73	0,15	0,21	0,95
Moyenne			21	0,74	0,16	0,22	0,94
Minimum			6	0,61	0,14	0,20	0,92
Maximum			30	0,80	0,20	0,24	0,97
total général			126				

Comparatif des temps de montée pour les deux stations météorologiques analysées par bassin versant

Temps de montée t_p (h)							
#	Bassin Versant	Station Météo	N	μ	σ	Cv	E
1	Au_Castor	Henryville	28	6,32	2,25	0,36	0,94
		Philisburg	30	6,42	2,25	0,35	0,94
2	Esturgeon_Branche21	Esturgeon	10	4,99	1,35	0,27	0,97
		Sainte-Martine	6	8,94	4,08	0,46	0,92
3	Ewing	Henryville	27	10,22	5,28	0,52	0,94
		Philisburg	25	10,35	5,38	0,52	0,95
Moyenne			21	7,87	3,43	0,41	0,94
Minimum			6	4,99	1,35	0,27	0,92
Maximum			30	10,35	5,38	0,52	0,97
total général			126				

Comparatif de différents paramètres hydrologiques pour les deux stations météorologiques analysées par bassin versant

Paramètres hydrologiques												
#	Bassin versant	Station météo	Obs	Ppt	Durée	Ppt in	Qmax	Qruis	Qbas	Vruis	Hru	C_ru
1	Aux Castors	Henryville	49	25,60	18,17	6,87	1,87	1,47	0,40	54479	5,26	0,19
		Philisburg	53	28,28	18,01	6,72	1,75	1,42	0,33	56014	5,41	0,17
2	Esturgeon Branche 21	Esturgeon	15	17,28	16,60	6,95	0,27	0,23	0,04	7819	1,70	0,10
		Sainte-Martine	12	24,78	22,62	6,78	0,21	0,18	0,03	10047	2,19	0,08
3	Ewing	Henryville	49	27,01	24,63	5,22	3,41	2,74	0,67	145075	5,30	0,18
		Philisburg	51	28,27	23,93	4,25	3,28	2,75	0,53	152390	5,57	0,17
Moyenne			38	25,20	20,66	6,13	1,80	1,47	0,33	70971	4,24	0,15
Minimum			12	17,28	16,60	4,25	0,21	0,18	0,03	7819	1,70	0,08
Maximum			53	28,28	24,63	6,95	3,41	2,75	0,67	152390	5,57	0,19
Total général			229									

Obs = nombre d'observation

Ppt = précipitation total observée (mm)

Durée = durée de la précipitation total (h)

Qmax = débit maximum de crue (m³/s)

Qruis = débit ruisselé (m³/s)

Qbas = débit de base (m³/s)

Vruis = Volume de ruissellement

Hru (mm) = hauteur de ruissellement

C_ru = Coefficient de ruissellement

Comparatif des données de précipitation pour les deux stations météorologiques analysées par bassin versant

Précipitation (mm)															
#	Bassin versant	Station météo	Obs	Ppt	Ppt 15	Ppt 30	Ppt 1h	Ppt 2h	Ppt 6h	Ppt A 12h	Ppt A 12h	Ppt A 24h	Ppt A 2j	Ppt A 3j	Ppt A 5j
1	Aux Castors	Henryville	49	25,6	6,0	7,6	9,5	11,9	17,4	0,8	1,4	2,7	7,6	12,2	19,6
		Philisburg	53	28,3	7,3	8,6	10,9	13,9	19,9	0,8	1,5	2,9	7,8	12,1	18,6
2	Esturgeon Branche 21	Esturgeon	15	17,3	6,0	6,9	8,5	9,7	13,2	0,3	1,6	3,6	6,9	9,9	17,6
		Sainte Martine	12	24,8	7,7	9,0	10,5	11,6	13,9	0,9	0,9	1,6	4,6	9,7	15,8
3	Ewing	Henryville	49	27,0	6,0	7,5	9,4	11,9	17,3	0,6	1,5	2,9	6,6	10,8	19,8
		Philisburg	51	28,3	6,9	8,2	10,3	13,0	18,7	1,3	2,2	3,7	8,1	12,3	18,5
Moyenne			38	25,2	6,6	8,0	9,8	12,0	16,7	0,8	1,5	2,9	6,9	11,2	18,3
Minimum			12	17,3	6,0	6,9	8,5	9,7	13,2	0,3	0,9	1,6	4,6	9,7	15,8
Maximum			53	28,3	7,7	9,0	10,9	13,9	19,9	1,3	2,2	3,7	8,1	12,3	19,8
Total général			229												

Ppt : précipitation totale observée (mm)

Ppt 15 : précipitation maximale aux 15 minutes (mm)

Ppt 30 : précipitation maximale aux 30 minutes (mm)

Ppt 1h : précipitation maximale pour une heure (mm)

Ppt 2h : précipitation maximale pour deux heures (mm)

Ppt 6h : précipitation maximale pour six heures (mm)

Ppt A 12h : précipitation antécédente (12 heures avant) (mm)

Ppt A 24h: précipitation antécédente (24 heures avant) (mm)
Ppt A 2j: précipitation antécédente (2 jours avant) (mm)
Ppt A 3j: précipitation antécédente (3 jours avant) (mm)
Ppt A 5j: précipitation antécédente (5 jours avant) (mm)