

RAPPORT SCIENTIFIQUE FINAL

MODELISATION HYDROLOGIQUE DES EXPORTATIONS DE SÉDIMENTS DE LA RIVIÈRE BULSTRODE EN CLIMAT ACTUEL ET FUTUR

PARTENAIRES DE RÉALISATION



JUILLET 2020

MODELISATION HYDROLOGIQUE DES EXPORTATIONS DE SÉDIMENTS DE LA RIVIÈRE BULSTRODE EN CLIMAT ACTUEL ET FUTUR

Présenté à :

COPERNIC

ATTN: Karine DAUPHIN, MSc Env.

Directrice générale

1000 rue Champoux

Saint-Albert (Qc) J0A 1E0

ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

- Responsable scientifique : Aubert Michaud, Ph. D., IRDA
- Colline Gombault, IRDA
- Mohamed Abou Niang, IRDA
- Arianne Blais Gagnon, IRDA
- William Huertas, IRDA

LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

Michaud, A.R., C. Gombault, M. Niang, A. Blais-Gagnon, W. Huertas. 2020. Modélisation hydrologique des exportations de sédiments de la rivière Bulstrode en climat actuel et futur. Rapport scientifique. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA). 60 pages.

Table des matières

1.1	Mise en contexte.....	7
1.2	Description du modèle.....	8
1.2.1	Modules hydrologiques	9
1.2.2	Érosion et transport de sédiments	10
1.2.3	Écoulement, érosion et transport des sédiments en rivière	11
1.3	Paramétrage du modèle hydrologique	13
1.3.1	Paramétrage agroclimatique	13
1.3.2	Paramétrage hydro-pédologique.....	15
1.3.3	Itinéraires de gestion des sols et des cultures.....	15
1.3.4	Paramétrage des chenaux en rivière de la phase aquatique de modélisation	16
1.4	Procédure de calage du modèle hydrologique	18
1.5	Données hydrométriques de validation du modèle	20
1.6	Résultats de la modélisation hydrologique.....	21
1.6.1	Débits et bilan hydrologique.....	21
1.6.2	Charge de sédiments	31
1.7	Scénarios climatiques et projections en climat futurs.....	34
1.7.1	Description des scénarios climatiques.....	34
1.7.2	Projections 2026-2055 et 2061-2090 des débits et de la charge en sédiments à la station Bulstrode	35
1.8	Conclusion du volet de modélisation hydrologique en climat actuel et futur ..	44
1.9	Références citées	46
1.10	Annexes	51

LISTES DES FIGURES

Figure 1: Composantes hydrologiques du modèle SWAT	9
Figure 2: Débits journaliers simulés et observés à la station hydrométrique de la rivière Bulstrode entre 2004 et 2010.....	28
Figure 3: Ajustement des débits journaliers et coefficients de performance du modèle.	29
Figure 4: Débits mensuels simulés et observés à la station hydrométrique de la rivière Bulstrode entre 2004 et 2010 et coefficient de performance du calage du modèle SWAT-MAC.....	30
Figure 5 : Débits simulés pour un horizon proche (2026-2055) et futur (2061-2090) pour des scénarios de GES optimistes RCP #4.1 à la station de suivi hydrométrique Bulstrode	37
Figure 6: Débits simulés pour un horizon proche (2026-2055) et futur (2061-2090) pour des scénarios de GES pessimistes RCP #8.1 à la station de suivi hydrométrique Bulstrode	38
Figure 7: Delta des débits entre l’horizon 2026-2055 et 2061-2090 à la station Bulstrode pour 2 scénarios optimistes (ESM et INM) et 3 scénarios pessimistes (MIROC, A13 et MIC) de GES	39
Figure 8: Charges sédimentaires (en T) simulés pour un horizon proche (2026-2055) et futur (2061-2090) pour des scénarios de GES optimistes RCP #4.1 à la station de suivi hydrométrique Bulstrode	40
Figure 9: Charges sédimentaires (en T) pour un horizon proche (2026-2055) et futur (2061-2090) pour des scénarios de GES pessimistes RCP #8.1 à la station de suivi hydrométrique Bulstrode.....	41
Figure 10: Delta de la charge sédimentaire entre l’horizon 2026-2055 et 2061-2090 à la station Bulstrode pour 2 scénarios optimistes (ESM et INM) et 3 scénarios pessimistes (MIROC, A13 et MIC) de GES.....	42
Figure 11: Projections annuelles moyennes pour la charge en sédiments à la station hydrométrique de la rivière Bulstrode pour les horizons 2026-2055 et 2061-2090 (a), ainsi que leurs delta (b).....	43
Figure 12: Carte 1 : Découpage des sous-bassins et chenaux de la rivière Bulstrode par le modèle SWAT.....	52
Figure 13: Carte 2: Observations des études terrain Cima+ et du Laboratoire de gestion des rivières de Concordia superposées au découpage SWAT.....	53
Figure 14: Carte 3. Visualisation des chenaux catégorisé en tronçons relativement homogènes pour la paramétrisation de la phase aquatique de la modélisation.....	55

Liste des tableaux

Figure 1: Composantes hydrologiques du modèle SWAT	9
Tableau 1: Charge annuelle moyenne mesurée à la station hydrométrique Bulstrode de Novembre 2017 à Avril 2020.	20
Tableau 2 : Descriptions des paramètres de calage et valeurs retenues en calage optimal des composantes hydrologiques du modèle hydrologique SWAT-MAC pour la phase terrestre.	23
Tableau 3: Descriptions des paramètres de calage et valeurs retenues en calage optimal du modèle hydrologique SWAT-MAC pour la phase aquatique.....	25
Tableau 4: Bilan hydrique annuelle moyen après calibration entre 2004 et 2010	27
Figure 2: Débits journaliers simulés et observés à la station hydrométrique de la rivière Bulstrode entre 2004 et 2010.....	28
Figure 3: Ajustement des débits journaliers et coefficients de performance du modèle.....	29
Figure 4: Débits mensuels simulés et observés à la station hydrométrique de la rivière Bulstrode entre 2004 et 2010 et coefficient de performance du calage du modèle SWAT-MAC.....	30
Tableau 5: Descriptions des paramètres de calage et valeurs retenues en calage optimal du modèle hydrologique SWAT-MAC pour la phase aquatique.....	32
Tableau 6: Spécificités techniques des cinq scénarios utilisés provenant du Projet d'Inter-comparaison des Modèles Couplés -Phase 5 (CIMP5) du Programme Mondial de la Recherche sur le Climat.	35
Figure 5 : Débits simulés pour un horizon proche (2026-2055) et futur (2061-2090) pour des scénarios de GES optimistes RCP #4.1 à la station de suivi hydrométrique Bulstrode	37
Figure 6: Débits simulés pour un horizon proche (2026-2055) et futur (2061-2090) pour des scénarios de GES pessimistes RCP #8.1 à la station de suivi hydrométrique Bulstrode	38
Figure 7: Delta des débits entre l'horizon 2026-2055 et 2061-2090 à la station Bulstrode pour 2 scénarios optimistes (ESM et INM) et 3 scénarios pessimistes (MIROC, A13 et MIC) de GES	39
Figure 8: Charges sédimentaires (en T) simulés pour un horizon proche (2026-2055) et futur (2061-2090) pour des scénarios de GES optimistes RCP #4.1 à la station de suivi hydrométrique Bulstrode	40
Figure 9: Charges sédimentaires (en T) pour un horizon proche (2026-2055) et futur (2061-2090) pour des scénarios de GES pessimistes RCP #8.1 à la station de suivi hydrométrique Bulstrode.....	41

Figure 10: Delta de la charge sédimentaire entre l’horizon 2026-2055 et 2061-2090 à la station Bulstrode pour 2 scénarios optimistes (ESM et INM) et 3 scénarios pessimistes (MIROC, A13 et MIC) de GES.....	42
Figure 11: Projections annuelles moyennes pour la charge en sédiments à la station hydrométrique de la rivière Bulstrode pour les horizons 2026-2055 et 2061-2090 (a), ainsi que leurs delta (b).....	43
Figure 12: Carte 1 : Découpage des sous-bassins et chenaux de la rivière Bulstrode par le modèle SWAT.....	52
Figure 13: Carte 2: Observations des études terrain Cima+ et du Laboratoire de gestion des rivières de Concordia superposées au découpage SWAT.....	53
Annexe II – Paramétrisation des chenaux pour la phase de modélisation aquatique	54
Tableau 7: Segmentation du réseau hydrographique du bassin de la rivière Bulstrode à des fins de paramétrisation et correspondance des tronçons avec les chenaux et sous-bassins délimités par SWAT (Voir carte figure 6 pour visualisation spatiale)	54
Figure 14: Carte 3. Visualisation des chenaux catégorisé en tronçons relativement homogènes pour la paramétrisation de la phase aquatique de la modélisation.....	55
Tableau 8a: Valeurs des paramètres pour le facteur de couvert végétal des berges de la rivière Bulstrode - CH_COV1.....	56
Tableau 8b : Valeurs des paramètres pour le facteur de couvert végétal du lit de la rivière Bulstrode - CH_COV2	56
Tableau 8c: Signification des valeurs des paramètres de couvert végétal.....	57
Tableau 9a: Valeurs des paramètres des Masses Volumique Apparentes (MVA) des matériaux constituant le lit et les berges (CH_BED/BNK_BD).....	58
Tableau 9b: Classes des MVA utilisés pour différents types de matériaux constituant les berges et le lit de la rivière Bulstrode	58
Tableau 10a: Valeurs des paramètres de la taille médiane des matériaux constituant le lit et les berges – CH_BED/BNK_D50.....	59
Tableau 10b: Classes des valeurs médianes pour la taille des particules sédimentaires.	59
Tableau 11: Fenêtre de valeurs des paramètres de puissance spécifique (CH_BNK/BED_TC) attribuées aux différents chenaux de la rivière Bulstrode. Des valeurs identiques ont été attribuées aux berges et au lit de la rivière.	60

1.1 Mise en contexte

La modélisation semi-déterministe des écoulements des eaux, des débits et des exports de sédiments, du bassin versant de la rivière Bulstrode en climat actuel et futur s'inscrit dans la série des études coordonnées par l'organisme de bassin versant COPERNIC auprès des équipes de laboratoire de gestion des rivières de l'université de Concordia, de CIMA+ et de l'IRDA afin de comprendre la dynamique de la rivière, de même que l'érosion de ses berges, de son lit et des terres de son bassin versant. Ces processus d'érosion sont à la source de l'ensablement du réservoir Beaudet, principale source d'eau potable de Victoriaville, qui cherchent des solutions durables à la problématique. Ce rapport spécifique est le quatrième livrable des études de l'IRDA faisant suite au suivi hydrométrique du bassin versant de la Rivière Bulstrode et de ses affluents grâce à six stations installées entre Novembre 2017 et Avril 2020, dont deux sur le segment principal de la rivière, deux aux exutoires des sous-bassins agricoles Parents et Perreault, et deux aux exutoires des sous-bassins forestiers Gobeil et Michaud (Michaud et al., 2020a). Deux autres livrables spécifiques aux études de cas des ruisseaux Parents (Michaud et al., 2020b) et Gobeil (Michaud et al., 2020c) complètent le portrait complet du bassin et ses sous-bassins et des problématiques de perte de sol et d'érosion provenant des terres du bassin.

Dans le cadre de la présente étude, le modèle hydrologique SWAT-MAC a d'abord été paramétré et calibré dans sa phase terrestre (ruissellement des terres), puis dans sa phase en cours d'eau, soit au niveau du chenal principal et des ruisseaux affluents de la rivière. Les nombreuses mesures et observations réalisées par les équipes de CIMA+ et de l'Université Concordia, dans le cadre des études mentionnées antérieurement, ont été valorisées dans le paramétrage du modèle. Les suivis hydrométriques réalisés par l'IRDA ont pour leur part appuyé les démarches de calage et de validation du modèle hydrologique. Dans un second temps, cinq scénarios climatiques réalisés par le consortium OURANOS ont été utilisés en intrants au modèle hydrologique afin de projeter les débits et les exportations de sédiments de la rivière en climat futur.

La version SWAT-MAC du modèle hydrologique a été mise à profit dans cet exercice. Cette version développée par Poon (2016) en collaboration avec l'équipe de l'IRDA a été réalisée dans le but d'assurer une meilleure représentation de l'hydrologie du parcellaire agricole spécifique au Québec, dominée par les écoulements souterrains via les systèmes de drainage artificiel. L'adaptation du module d'écoulement souterrain du code SWAT-MAC (Mac pour macropores) en 2016 a permis de contourner les difficultés du modèle hydrologique SWAT à bien représenter la séparation des écoulements de surface et souterrains mis en relief dans des cycles précédents de modélisation hydrologique appliqués à la Montérégie (Deslandes et al., 2006; Michaud et al, 2007, Gombault et al, 2015a; Gombault et al., 2015b). Pour une description détaillée des fondements

théoriques et des algorithmes de modélisation des modules hydrologiques de SWAT-MAC, le lecteur est invité à consulter le mémoire de Poon (2016) disponible en ligne.

1.2 Description du modèle

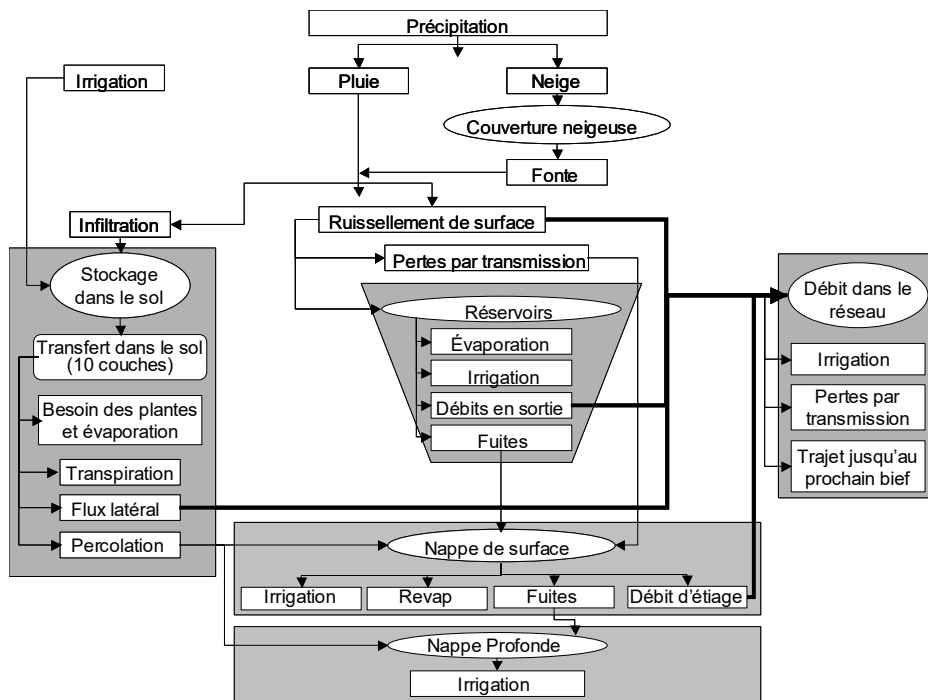
Le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool; Arnold et al., 1998) constitue aujourd'hui un outil bien intégré au plan agronomique et hydrologique. Il est largement utilisé en Amérique du Nord et en Europe pour prédire les transferts diffus de sédiments, de nutriments et de pesticides. SWAT est un modèle déterministe semi-distribué destiné à simuler les effets de différents scénarios de gestion du territoire sur les transferts hydriques et la mobilité des sédiments et des éléments nutritifs à l'échelle de grands bassins versants hétérogènes et sur de longues périodes. Le modèle SWAT emprunte les bases conceptuelles de différents outils de modélisation agroenvironnementale développés antérieurement, notamment les modèles :

- SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Bassins) conçu par Williams et al. (1985);
- EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator) développé par Williams et al.,(1984) ;
- CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems), développé par Knisel (1980);
- GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems), créé par Leonard et al. (1987).

Dans sa phase terrestre, SWAT simule de façon continue l'évolution des stocks terrestres de nutriments, la croissance et les prélèvements des plantes, de même que les transferts d'eau, de sédiments et nutriments vers le réseau hydrographique. La simulation des cycles terrestres des nutriments et du bilan hydrique est tributaire des conditions climatiques, des particularités physiques du territoire et de la gestion du parcellaire. L'ensemble des processus sont simulés de façon journalière à l'échelle de petites unités de territoire, soit les unités de réponse hydrologique (URH). Celles-ci présentent une combinaison unique de propriétés géophysiques et d'utilisation du sol à l'intérieur d'un sous-bassin. L'activité hydrologique modélisée au sein de chacune des URH est cumulée à l'échelle du sous-bassin versant. Dans la phase aquatique du modèle, les exportations d'eau, de sédiments et de nutriments en provenance des sous-bassins sont prises en charge par diverses routines qui simulent les processus de transport, de déposition et de re-suspension des sédiments, de transformation des nutriments ainsi que l'érosion des berges.

1.2.1 Modules hydrologiques

Dans SWAT, les précipitations fournissent l'énergie nécessaire aux mouvements de l'eau en surface et dans le sol ainsi qu'au transport des sédiments et nutriments (figure 4). Les précipitations sous forme liquide et la fonte de neige sont d'abord séparées entre ruissellement et infiltration à l'aide de la méthode du numéro de courbe du Soil Conservation Service (USDA-SCS, 1972). Cette méthode attribue un numéro de courbe (CN) à chacune des URH selon le groupe hydrologique du sol, l'utilisation du sol ainsi que les pratiques agricoles. Les numéros de courbe sont ensuite ajustés journalièrement en fonction du CN de la journée précédente et du contenu en eau du sol.



Adapté de Eckhardt et Arnold, 2001

Figure 1: Composantes hydrologiques du modèle SWAT

Le cycle de l'eau est reproduit journalièrement de manière simplifiée pour chacune des URH selon l'équation 1. L'eau qui s'infiltré dans le sol percole d'une couche à l'autre lorsque la capacité au champ de la couche est atteinte, pour atteindre l'aquifère peu profond et possiblement, l'aquifère profond. Les cours d'eau sont ensuite alimentés par l'aquifère peu profond et les sols. Seul l'eau dans le sol est disponible pour répondre aux besoins des plantes. L'accumulation d'unités de

chaleur ainsi que les besoins/prélèvements en eau, en azote et en phosphore régissent la croissance de ces dernières. SWAT modélise également l'évapotranspiration du sol et des plantes.

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - Qr_i) \quad (\text{mm}) \quad [1]$$

où: SW_t est le contenu final en eau disponible pour les plantes dans le sol (mm);

SW est le contenu en eau disponible pour les plantes (mm);

R_i est la pluviométrie (mm);

Q_i est le ruissellement (mm);

ET_i est l'évapotranspiration (mm);

P_i est la percolation (mm);

Qr_i est l'écoulement restitué du sol ou de l'aquifère peu profond (mm);

t est la durée en jours.

1.2.2 Érosion et transport de sédiments

L'émission et le transport des sédiments est estimé avec l'équation universelle de perte de sol modifiée (MUSLE; Williams, 1975) (équation 2). L'intérêt principal de cette méthode tient au fait que la perte de sol est estimée en fonction du développement de l'état de saturation du sol et de l'intensité du ruissellement de surface qui en résulte. Au Québec, les observations hydrométriques en micro-bassin versants expérimentaux ont démontré que les processus de ruissellement à surface variable (contrôlée par la saturation du sol) est estimée plus représentative des zones d'émission de ruissellement et d'érosion, que les méthodes basées sur la capacité d'infiltration du sol et l'intensité des précipitations (ruissellement de type *Hortonien*) en raison de l'intensité relativement faible des précipitations.

$$MUSLE = 11.8(Q_{surf} * q_{max} * SUP_{URH})^{0.56} * K_{usle} * C_{usle} * LS_{usle} * CFRG \quad [T] \quad [2]$$

où: Q_{surf} est le ruissellement (mm ha^{-1});

q_{max} est le débit de pointe ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

SUP_{URH} est l'aire de l'URH modélisée (ha);

K_{USLE} est le facteur d'érodabilité du sol ($0.013 \text{ tonne m}^2 \text{ h} (\text{m}^3 \text{ tonne cm})^{-1}$);

C_{USLE} est le facteur de couverture végétale du sol (--);

LS_{USLE} est le facteur topographique (--);

CFRG est le facteur de teneur en fragments rocheux (--).

Le débit de pointe est calculé à partir de la formule rationnelle (Akan, 2002) et le ruissellement, avec l'équation du numéro de courbe SCS (USDA-SCS, 1972). MUSLE fait aussi intervenir des facteurs reliés à l'érodabilité du sol (K_{USLE}), à la couverture végétale (C_{USLE}), à la pente (LS_{USLE}).

Le facteur d'érodabilité du sol est extrait de la banque de données hydro-pédologique de l'IRDA (2017) et est estimé à partir de l'équation de Wischmeier et al. (1971), qui tient compte de la granulométrie, de la perméabilité et de la structure du sol, ainsi que de sa teneur en matière organique. Le facteur de couverture végétale fait quant à lui l'objet d'une mise à jour quotidienne basée sur la croissance des plantes et les résidus laissés à la surface du sol. Le facteur LS_{USLE} est calculé à partir de la pente de l'URH et le facteur de fragments rocheux à partir des caractéristiques du sol.

1.2.3 Écoulement, érosion et transport des sédiments en rivière

SWAT offre la possibilité de choisir différentes méthodes pour modéliser les processus hydrologiques en cours d'eau, soit la phase aquatique de la modélisation, que ce soit pour l'écoulement hydrique ou pour le cheminement des sédiments dans le réseau.

Le taux et la vitesse d'écoulement de l'eau à travers le réseau hydrique du bassin est dans un premier temps défini avec l'équation de Manning. Dans un second temps l'utilisateur peut choisir entre la méthode de transfert de stockage variable (variable storage routing method) ou la méthode Muskingum pour transférer l'écoulement de l'eau d'un sous-bassin à l'autre. En phase aquatique les calculs sont compilés sur des segments qui correspondent au chenal (tributaire) de chaque sous-bassin. Les deux méthodes sont des variations du modèle de transfert des ondes cinétiques (kinetic wave flood routing model). La contribution de la rivière à la recharge des aquifères est aussi modélisée et est considérée comme pertes par transmission. Le paramètre de calage CH_K , reflétant la conductivité hydraulique du chenal, permet à l'utilisateur de contrôler la portion de l'écoulement, transférée dans les aquifères souterrains, en fonction des matériaux composant le chenal. Les pertes par évapotranspiration sont modélisées et contrôlées avec le paramètre $EVRCH$. Enfin l'utilisateur peut ajuster la contribution des berges dans le stockage et le relâchement de l'eau dans les chenaux (Neitsch et al., 2011).

L'érosion et le transport des sédiments sont ensuite modélisés en simulant la dégradation et le dépôt de ceux-ci à travers le réseau hydrique.

Les deux processus de dégradation et de dépôt dépendent de la puissance des flux d'écoulement, l'exposition des berges et du lit de la rivière, et de sa composition. La puissance des flux, ou

puissance spécifique, est représentée par le paramètre CH_BED/BNK_TC. L'exposition des berges ou du lit représente le niveau de couverture végétale présent, et se modélise par les paramètres CH_COV1 et CH_COV2 pour le lit et les berges respectivement. Enfin, les matériaux qui composent le chenal sont représentés à travers les valeurs médianes de la taille des sédiments (CH_BED/BNK_D50) et des masses volumétriques apparentes (CH_BED/BNK_BD).

À la dégradation du chenal, s'ajoute les sédiments érodés de la phase terrestre. Chaque sous bassin déverse une quantité de sédiment érodé des terres en amont dans son chenal respectif (Voir Cartes du bassin en annexe I pour le découpage du bassin, des sous-bassins et de leur chenaux). La charge sédimentaire totale est ensuite impliquée dans les processus de dépôt et de transport le long du réseau en étant ajouté au chenal du sous-bassin aval.

Cinq méthodes sont disponibles pour calculer la quantité d'érosion et de transport maximale de sédiments pouvant être transféré d'un bassin à l'autre (Neitsch et al., 2011), soit :

1. La méthode simplifiée de Bagnold. Elle est détachée de tout processus physique des processus d'érosion et est fonction de la vitesse maximale de l'écoulement dans le chenal.
2. La méthode de Bagnold. Elle tient en compte de la physique des processus d'érosion mais la capacité de transport est fonction de la vitesse maximale de l'écoulement dans le chenal sans tenir compte de la composition et caractéristique de la charge sédimentaire lors de son transport, ni des processus de déposition.
3. La méthode Kodatie tient compte des processus physiques de dégradation, d'érosion et des caractéristiques de matériaux lors des dynamiques sédimentaires dans le réseau. Elle est adaptée pour un large type de rivière dont la composition peut englober des matériaux allant du limon jusqu'aux graviers).
4. Le modèle de Molina et Wu, utilise les mêmes équations physiques pour la dégradation et l'érosion du lit et des berges que Kodatie. Cependant le modèle est adapté pour les larges rivières sableuses pour les équations concernant la capacité de transport et la discrimination des types de matériaux sédimentaires.
5. Le modèle sable et gravier de Yang, tout comme Molina et Wu utilise le même processus physique d'érosion et dégradation du lit et des berges, mais les équations gérant la capacité de transport s'adaptent pour un type de rivières majoritairement constituées de sable et de graviers.

Les méthodes de Bagnold sont des fonctions de la vitesse maximale de l'écoulement de l'eau dans le chenal et, ne tiennent pas compte de la composition et taille des particules des sédiments. Elles ont été jugées trop simples pour la problématique du projet. En effet, la problématique centrale

étant l'ensablement du réservoir Beaudet, il est jugé pertinent de choisir une méthode permettant de distinguer les matériaux sédimentaires et leur capacité de transport dans le réseau hydrographique. Duhamel et al. (2012) des études Poly-Géo Inc. précisent que les particules plus fines pourraient être retenues en amont contrairement au sable qui descendrait jusque dans le réservoir. De plus l'érosion des berges doit être prise en compte ce qui n'est pas le cas pour la méthode simplifiée de Bagnold. Processus, qui a été fortement mis de l'avant lors du suivi hydrique du premier volet de cette étude (Michaud et al, 2020a). Les trois autres méthodes quant à elles simulent l'érosion du chenal, tiennent compte de la composition et de la taille des particules sédimentaires, ainsi que des caractéristiques du chenal dans les processus d'érosion, de dépôt et de transport. C'est la méthode Kodatie qui a été choisie pour sa capacité à prendre en compte une composition variée de sédiments et qui s'apparentait le plus aux caractéristiques de la rivière Bulstrode. Neitsch et al., (2011), détaillent les équations physiques impliquées dans la modélisation de la charge sédimentaire de la phase aquatique dans le manuel théorique de SWAT.

1.3 Paramétrage du modèle hydrologique

SWAT est un modèle complexe qui requiert la mise en forme et l'intégration d'une multitude de paramètres biophysiques, climatiques, d'occupation du territoire et de régime des sols et des cultures. Le paramétrage du modèle hydrologique consiste à colliger et structurer toutes les bases de données requises au fonctionnement de l'ensemble des routines de calcul du modèle. La présente section décrit brièvement le paramétrage des différentes composantes du modèle hydrologique retenu pour le présent exercice de modélisation. La base de données hydro-pédologique de l'IRDA (2017) de même que plusieurs bases de données à référence spatiale générées dans le cadre d'exercices précédents de modélisation hydrologique avec la plate-forme SWAT et SWAT-MAC ont été mis à profit pour les fins de la présente étude (Michaud et al. 2007, 2008; Gombault et al. 2015a, 2015b; Poon, 2016). Les sources de données utilisées et traitées dans le présent exercice de modélisation hydrologique sont ici présentées.

1.3.1 Paramétrage agroclimatique

Les données journalières de précipitation et de température utilisées en support à la modélisation hydrologique pour la période d'étude 2004-2010 ont été fournies par Ouranos. Le jeu de données est une combinaison des observations sur grille de NRCan (NRCan Canada Daily; Hutchinson et al., 2009; McKenney et al., 2011). La localisation des centroïdes des stations météorologiques virtuelles sont illustrées sur la carte 1 en annexe I.

Dans le bassin versant de la Rivière Bulstrode, à l'instar de l'ensemble du territoire québécois, les périodes hivernales et printanières occupent une place importante dans les dynamiques hydrologiques. Les précipitations liquides sur sol gelé et la fonte de la neige contribuent de façon importante au bilan des exportations de sédiments et de nutriments. La modélisation de ces épisodes hydrologiques demeure cependant fort complexe. Conceptuellement, le modèle SWAT classe le type de précipitation sur une base journalière, soit à titre de pluie ou neige, en utilisant la température moyenne journalière et un seuil fixé par l'utilisateur. La couverture de neige au sol et la fonte sont alors modélisées à partir de différents paramètres de calage, incluant :

- La température à partir de laquelle les précipitations sont neigeuses;
- La température minimale de fonte de neige;
- Le taux maximum de fonte de neige;
- Le taux minimum de fonte de neige;
- Le facteur de délais associé à la température antécédente du couvert nival;
- La teneur en eau minimale contenue dans la totalité du couvert nival;
- La fraction du volume de neige correspondant à 50% du couvert nival.

La modélisation de la croissance des cultures a pour sa part été ajustée aux unités thermiques de croissance (UTC) requises pour chacune des cultures modélisées. Ces UTC ont été calculées à partir des données de températures de la période à l'étude ainsi qu'à l'aide des dates de semence et de récolte de chacune des cultures. Avec ses 2 500 à 2 900 unités thermiques maïs (UTM) (Bootsma *et al.*, 1999), cette région est parmi les plus productives au Québec. Globalement, les températures moyennes mensuelles observées pour la période d'étude aux trois stations correspondent aux normales climatiques à long terme. La température annuelle moyenne oscille autour de 6°C. En plus des données climatiques journalières, la simulation de la croissance des cultures s'appuie sur plusieurs paramètres propres aux différents végétaux, dont la température minimale de croissance, la courbe de croissance et l'indice foliaire (LAI - *Leaf Area Index*) maximum potentiel. Dans le cadre de la présente étude, les paramètres de croissance des cultures ont été ajustés par itérations de façon à reproduire les biomasses et les rendements généralement observés dans la région. Les données régionales colligées par La Financière Agricole (2007-2011) ont servi de base de référence pour ajuster la croissance des cultures.

1.3.2 Paramétrage hydro-pédologique

Les simulations hydrologiques supportées par le modèle SWAT s'appuient sur les propriétés biophysiques du milieu terrestre et du réseau hydrographique. Le bassin versant de la rivière Bulstrode et de ses sous-bassins ont été délimités sur la base du modèle numérique d'altitude dérivé du relevé LiDAR fournit par le Laboratoire de gestion des rivières de Concordia (Biron et al., 2013).

La délimitation des unités de réponse hydrologique (URH) a été obtenue au moyen d'intersections spatiales entre les limites des sous-bassins, de la carte d'utilisation du sol et de la couverture pédologique. La représentation spatiale de l'utilisation du sol, pour l'ensemble du territoire à l'étude, a été supportée par les couches vectorielles de la base de données des parcelles et productions agricoles déclarées de La Financière (BDPPAD) et du système d'information écoforestière (SIEF) du Ministère des Forêts, Faune et Parcs pour l'année de référence 2011.

Les propriétés physico-chimiques des sols relatives à la granulométrie, la conductivité hydraulique, la densité apparente et le pourcentage de matière organique ont été extraites de la banque de données hydro-pédologiques de l'IRDA (2017) et intégrées au système d'information géographique (SIG) du modèle hydrologique selon un découpage en trois couches des profils culturaux. Les teneurs en eau utile (capacité au champ - point de flétrissement) ont été dérivées des données de texture et de matière organique du sol selon la méthodologie prescrite dans le *National Soil Survey Handbook* (USDA-NCRS, 2001).

En absence de données relatives à la distribution spatiale du drainage souterrain pour l'ensemble du bassin versant, les superficies en cultures annuelles (17%) ont été considérées comme étant drainées pour les fins de la modélisation hydrologique. Pour les besoins du modèle, la profondeur moyenne des drains a été fixée à 900 mm; le temps requis pour atteindre la capacité au champ à 48 heures et la durée du délai d'évacuation au cours d'eau à 10 heures.

1.3.3 Itinéraires de gestion des sols et des cultures

La modélisation du cycle de l'eau et de la mobilité des sédiments à l'échelle du parcellaire agricole requiert la description ainsi que la représentation spatiale et temporelle des itinéraires techniques de gestion des sols et des cultures, incluant le semis, la fertilisation, la récolte et le travail du sol. Ces itinéraires techniques comprennent également les pratiques, les dates, les quantités et le fractionnement des fertilisants appliqués. Un scénario de référence, regroupant les itinéraires de gestion constitués pour chacune des 266 URH agricoles du bassin versant, a été développé et utilisé pour le calage du modèle hydrologique. Les principes suivants ont été retenus dans la génération des itinéraires du scénario de référence sur les URH à vocation agricole du site d'étude:

- La distribution spatiale des cultures, dérivée de la BDPPAD (La Financière, 2011) a été maintenue pour l'ensemble de la période de modélisation. Les classes retenues incluent le maïs grain, le soya, les céréales à paille, le foin à dominance de graminées et le foin à dominance de légumineuses.
- La distribution spatiale des apports d'engrais de ferme et d'engrais minéraux, a été générée à l'échelle des 4660 URH et maintenue pour l'ensemble de la période calibrée de modélisation 2004 à 2010. Les taux et périodes d'apport sont dérivées des recommandations du CRAAQ (2010) et ajustées sur la base de la valeur fertilisante des cheptels de la zone d'étude. Pour le maïs grain, la moitié des superficies sous fertilisation minérale ont profité d'apport en post-levée. Les applications d'engrais de ferme ont été limités à la période de pré-semis pour le maïs et les céréales. Le soya n'a reçu aucune fertilisation, alors que les prairies ont profité d'épandages après la première et deuxième coupe de foin.
- Un scénario unique de travail du sol, basé sur la pratique conventionnelle de labour automnal et hersages printaniers, a été retenu pour l'ensemble des cultures annuelles;
- Les dates de semis, le travail du sol et les apports de fertilisants ont été modulés annuellement en fonction du type de culture, du calendrier probable de gestion du parcellaire et des précipitations observées pour la période d'étude.

1.3.4 Paramétrage des chenaux en rivière de la phase aquatique de modélisation

Pour déterminer la longueur, la largeur, la profondeur et la pente des chenaux du réseau hydrographique de la rivière, les algorithmes d'ArcSWAT¹ ont utilisé les données Lidar décrites dans la section 1.3.2.

Ensuite, les études terrains de Lamont et al. (2020) de Cima+ et, Duhamel et al., (2012) de Poly-Géo Inc. ont fourni les masses volumétriques apparentes des matériaux composant les berges et le lit, pour les paramètres CH_BNK_BD et CH_BED_BD. La médiane de la taille des particules pour les paramètres CH_BNK_D50 et CH_BED_D50 a aussi été tirée de l'étude terrain Cima+ (Lamont, et al., 2020). La puissance spécifique de l'écoulement de l'eau pour les paramètres CH_BNK_TC et CH_BED_TC vient de la carte produite par l'étude de Biron et al. (2020) à Concordia. Finalement le degré de protection ou de couverture des berges et du lit, représenté par les paramètres CH_COV 1 et CH_COV 2, a été estimé grâce aux nombreuses photos dont la

¹ Module ArcGis développé pour la paramétrisation du modèle

localisation était reportée dans les rapports de Biron et al. (2020) de Concordia et Duhamel et., (2012) de Poly-Géo Inc., ainsi que grâce à la description des tronçons étudiés.

L'absence de données probantes pour les paramètres de Manning (CH_N(2)) - taux et vitesse d'écoulement – et, de la conductivité hydraulique (CH_K(2)) a supporté le choix de les déterminer de façon automatique lors du calage du modèle. Les bornes inférieure et supérieure de la fenêtre de valeurs choisie pour le calage ont quant à elles été déterminées en fonction des connaissances générales sur la rivière et des indications du guide théorique du modèle (Neitsch et al., 2011).

Il est à noter que les chenaux et sous-bassins délimités par SWAT ne correspondent pas à la délimitation des tronçons d'étude et de mesures des études mentionnées ci-haut fournissant les données nécessaires à la paramétrisation. Les tronçons des études terrains sont relativement homogènes en termes d'observations. Les chenaux des sous-bassins du modèle SWAT chevauchent ou incluent différents tronçons des études terrains ce qui rend leurs caractéristiques de paramétrage (composition des matériaux du lit et des berges, puissance spécifique des cours d'eau, protection végétale) hétérogène. Par exemple, il arrive souvent qu'un chenal de sous-bassin SWAT inclut des portions rocheuses et des portions érosives, ou des portions nues et des portions protégées par la couverture végétale, ainsi que des différences importantes dans la composition des matériaux constituant le lit et les berges. Les règles de décision dans ces cas précis furent de favoriser les valeurs de paramètre qui simuleraient une érosion et l'ensablement du réservoir. Par exemple, lorsqu'une portion de chenal était généralement boisée mais qui démontrait des traces d'érosion certaine à certains endroits, le paramètre de couverture végétale reflétait des berges nues prônes à l'érosion². Dans le même esprit un sous-bassin dont le chenal présentait une succession de berges enrochées et de berges érodées, les valeurs de paramètres favorisant l'érosion étaient choisies

Les valeurs des paramètres et leurs justifications sont détaillées en annexe II.

² Ceci fut le cas pour les sous-bassins du ruisseau Gobeil et des sous-bassins en amont où l'étude de Lamont et al. (2012) – Poly-Géo Inc. - démontrait des glissements de terrains et zones d'érosions actives en milieu boisé. PK 46.5 et 48 de la rivière principale, par exemple.

1.4 Procédure de calage du modèle hydrologique

La procédure de calage du modèle hydrologique consiste à optimiser les prédictions générées par les équations du modèle hydrologique et les données de paramétrage en les comparant avec les mesures réelles acquises à l'exutoire du bassin versant pour la même période d'étude. Concrètement, la procédure consiste à exécuter des itérations du modèle en faisant varier les valeurs des paramètres de calage, de façon à ce que les résultats de la simulation représentent le plus fidèlement possible les observations colligées à la station hydrométrique à l'exutoire du bassin (hauteurs d'eau, et flux de sédiments). En complément des bases de données de paramétrage décrites antérieurement, les équations du modèle hydrologique font appel à une multitude de paramètres de calage dont les valeurs sont ajustées lors du processus d'optimisation des prédictions du modèle. Compte tenu de la complexité d'une telle opération, l'optimisation des paramètres de calage dans le cadre de la présente étude a été supportée par l'outil biostatistique SWAT-CUP spécifiquement dédié à cette tâche.

Le calage des prédictions du modèle, confrontées aux observations de la station hydrométrique Bulstrode (Michaud et al, 2020a) situé à quelques kilomètres en amont du réservoir, a été réalisée suivant un processus en quatre étapes successives ciblées sur l'ajustement des composantes suivantes du modèle:

- Bilan hydrologique globale du bassin versant
- Débits journaliers, dont les périodes de fontes et crues estivales
- La charge annuelle moyenne des sédiments et leur origine terrestre ou aquatique

La performance du modèle a été évaluée à l'aide de trois indices statistiques et de l'appréciation visuelle des hydrogrammes journaliers et des séries mensuelles de de débits et des charges de sédiments.

Le coefficient de détermination (R^2) témoigne de la corrélation entre les valeurs mesurées et prédites et est défini par l'équation suivante :

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \mu_{Q_i}) - (Q'_i - \mu_{Q'_i})}{\sigma_x * \sigma_y} \quad (--) [8]$$

où Q_i est la valeur journalière mesurée, Q'_i correspond à la prédiction simulée par SWAT, μ représente la valeur moyenne mesurée ou simulée, σ est l'écart-type des valeurs mesurées ou simulées et n symbolise le nombre d'observations journalières. Les valeurs de r varient entre -1 et 1. Une valeur de -1 indique une relation inverse forte alors qu'une valeur de 1 signale une forte relation dans le même sens.

Le coefficient de Nash Sutcliffe (NS) témoigne de l'ajustement des pics des séries chronologiques mesurées et prédites selon l'équation suivante :

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (--) [9]$$

où Q_i est la valeur journalière mesurée, Q'_i correspond à la valeur journalière simulée par SWAT, \bar{Q} représente la moyenne mesurée pour la période de simulation et n symbolise le nombre d'observations comparées. Les valeurs de NS varient entre l'infini négatif et 1, où 1 témoigne d'un ajustement parfait du modèle.

La déviation des valeurs prédites (D_v) témoigne de la capacité du modèle à reproduire les volumes d'eau, et de MES, qui ont transité dans le réseau hydrographique pendant la période de référence selon l'équation suivante :

$$D_v = \frac{V^* - V}{V} * 100 \quad (\text{mm}) [10]$$

où V correspond au flux mesuré et s'écoulant à un point défini du réseau hydrographique alors que V^* représente le flux simulé par le modèle au cours pendant la même période.

1.5 Données hydrométriques de validation du modèle

La démarche de modélisation hydrologique implique à la base un processus de calage du modèle qui optimise les prédictions en fonction des mesures réelles acquises à l'exutoire de bassins versants de référence. Dans le cas de la présente étude, les données journalières de débits de la station Bulstrode ont été utilisées. Le dispositif de suivi hydrométrique localisé près de l'exutoire du bassin versant témoigne de la réponse hydrologique et de la charge en sédiments de la quasi-totalité du bassin (Michaud et al. 2020a). Il inclue l'opération de différents instruments (sondes barométriques, turbidimètres, thermomètre et conductimètre), jumelé à un programme d'échantillonnage des crues à la station et du dosage des paramètres physico-chimiques en laboratoire. Une description détaillée du dispositif expérimental et du protocole de traitement des données est présentée par Michaud et al. (2009f; 2012).

Le suivi hydrométrique et les études citées en introduction mettent en avant la contribution importante des processus d'érosion des berges de la rivière spécifiquement dans les secteurs dynamiques et à méandres entourant le barrage Princeville. C'est environ 70% de la charge sédimentaire qui viendrait des berges et du lit de la rivière. Les données suivantes (tableau 1) tirées de ces observations servent de balise au calage des charges de sédiments et de leurs origines (terrestre, soit érosion des terres vs. aquatique soit érosion des berges et du lit de la rivière).

Tableau 1: Charge annuelle moyenne mesurée à la station hydrométrique Bulstrode de Novembre 2017 à Avril 2020.

	Charge annuelle totale	Charge annuelle spécifique
<i>Charge en sédiment annuelle mesurée à la station Bulstrode (Bassin : 29 176 ha).</i>	10 378 T/an	0,35 T/ha/an
<i>Phase terrestre (30 %)</i>	3 113 T/an	0,11 T/ha/an
<i>Phase aquatique (70%)</i>	7 264 T/an	0,25T/ha/an

Pour les fins de l'exercice de modélisation hydrologique supporté par SWAT-MAC, les données journalières des années de référence 2004 à 2010 ont été utilisées dans le calage du modèle. Cette sélection a permis de tester la performance et l'ajustement du modèle sur une large gamme d'activités hydrologiques saisonnières et de prendre en compte la variabilité inter-annuelle.

1.6 Résultats de la modélisation hydrologique

Cette section présente successivement les résultats de calage et de prédiction du modèle hydrologique pour le bilan hydrologique et les débits pour les années de référence 2004 à 2010 à la station hydrométrique Bulstrode, de même que pour la charge sédimentaire annuelle basée sur les années 2017-2020.

1.6.1 Débits et bilan hydrologique

Calage du modèle. Les tableaux 2 et 3 présentent les valeurs retenues pour les paramètres de calage du modèle hydrologique SWAT-MAC reconnus comme étant particulièrement sensibles dans la prédiction des hauteurs d'eau. Dans l'ensemble les estimations optimales des paramètres de calage sont dans la plage des valeurs par défaut documentés par les auteurs du modèle (Neitsch et al., 2011). Dans certains cas, les valeurs optimales des paramètres suggérés par la procédure de calage automatique (SWAT-CUP) ont été modifiés afin d'assurer une cohérence dans les résultats d'ensemble du modèle. Par exemple, la sélection des paramètres dans l'ajustement des débits ne s'est pas limitée au seul ajustement des débits prédits aux débits observés à l'exutoire du bassin versant. Une considération importante a aussi été donnée à la représentation globale du bilan hydrique du bassin, et plus particulièrement à la séparation des écoulements de surface (ruissellement) et souterrain. Ce calage des composantes du bilan hydrique global s'est appuyé sur les séparations des écoulements de surface et souterrain du bassin versant déterminées pour l'ensemble de la période d'étude suivant une méthode géochimique.

Lors de la comparaison des hydrogrammes observés et simulés, plusieurs évènements hydrologiques important n'étaient pas représentés lors de la modélisation même après plusieurs tours de calage automatique faisant varier les combinaisons de paramètres 200 fois. Les exercices de modélisation passées ont démontré l'importance de la précision des données de précipitation dans la chronologie des évènements et la quantité reçues, pour reproduire les hydrogrammes lors de la calibration. Les précipitations sont des évènements météorologiques très localisés. N'ayant pas de données météorologiques gouvernementales du MDDELCC dans le bassin versant de la

rivière Bulstrode, des données fournies par Ouranos produites par interpolation de données NRCan ont été utilisées. Ces précipitations ont dû être ajustées manuellement en les comparant à la base de données générales proposées par SWAT qui utilise les données de la NOAA, ceci afin de capturer le maximum d'évènements hydrologiques lors du calage du modèle.

Tableau 2 : Descriptions des paramètres de calage et valeurs retenues en calage optimal des composantes hydrologiques du modèle hydrologique SWAT-MAC pour la phase terrestre.

α	Description α	Valeur-par-défaut α	Modification α
SFTMP α	Température des chutes de neige °C α	-5 et 5 α	1,2 α
SMTMP α	Température de fonte de la neige °C α	-5 et 5 α	0,1 α
SMFMX α	Facteur de fonte au 21 juin mm/H ₂ O/°C-j α	4,5 α	8 α
SMFMN α	Facteur de fonte au 21 déc mm/H ₂ O/°C-j α	4,5 α	0,02 α
TIMP α	Facteur d'ajustement de température du manteau neigeux α	1 α	0,4 α
SNOCOVMX α	Équivalent en eau de la neige minimum correspondant à 100% de la couverture neigeuse α	100 α	97 α
SNO50COV α	Fraction du volume de neige représenté par SNOCOVMX qui correspond à 50% de la couverture neigeuse α	0,5 α	0,99 α
CN2 α	Numéro de courbe du SCS α	SCS Engineering Division, 1986 α	Diminution de l'ordre de 20% à 25%
SURLAG α	Temps de latence du ruissellement de surface α	4 α	6 α
EPCO α	Facteur de compensation de l'évapotranspiration pour le prélèvement des plantes α	1 α	1 α
ESCO α	Facteur de compensation pour l'évaporation au sol α	0,95 α	0,95 α
SLSOIL α	Longueur de pente pour l'écoulement souterrain (m) α	SLSOIL=SLSUBBSN α	Diminution de 5% α
SLSUBBSN α	Longueur de pente moyenne (m) α	90 m α	Diminution de 5% α
SLOPE α	Pente moyenne (m/m) α	SLOPE du sous-bassin α	Ajustée par requête spatiale à l'échelle du URH. Diminution entre 25 et 30% α
GW-REVAP α	Coefficient permettant le transfert d'eau de l'aquifère vers les horizons sous-jacents et non-saturés du sol α	De 0.02 à 0.20 α	0.02 α

Descriptions des paramètres de calage et valeurs retenues en calage optimal des composantes hydrologiques du modèle hydrologique SWAT-MAC pour la phase terrestre (tableau 2 suite).

	Description ^a	Valeur par défaut ^a	Modification ^a
REVAPMN ^a	Hauteur d'eau minimale dans l'aquifère peu profond pour qu'il y ait un mouvement d'eau vers le sol (REVAP) ou l'aquifère profond ^a	— ^a	500 ^a
RCHRG-DP ^a	Fraction de l'eau qui percole de la zone racinaire et qui atteint l'aquifère profond ^a	0 à 1 ^a	0,17 ^a
GWQMN ^a	Hauteur d'eau minimale pour qu'il y ait un transfert d'eau de l'aquifère peu profond vers le cours d'eau ^a	— ^a	395 ^a
GW-DELAY ^a	Délai pour que l'eau souterraine qui transite par l'aquifère peu profond atteigne le cours d'eau (jours) ^a	— ^a	22 ^a
ALPHA-BF ^a	Constante de récession de l'écoulement de base souterrain ^a	<u>Lent</u> : 0.1 - 0.3 [¶] Rapide ^a : 0.9 - 1.0 ^a	0.8 ^a
CH-K et [¶] CH-K2 ^a	Conductivité hydraulique effective du cours d'eau principal (CH-K2) et des tributaires (CH-K) ^a	De 0.025 mm·hr ⁻¹ (taux de pertes non significatifs) à plus de 127 mm·hr ⁻¹ (taux de pertes très élevés) ^a	15 mm·hr ⁻¹ (taux modéré) [¶] <u>31 mm·hr⁻¹</u> ^a
CH-N et [¶] CH-N2 ^a	Coefficient de rugosité de Manning pour l'écoulement dans le cours d'eau principal (CH-N2) et ses tributaires (CH-N) ^a	De 0.025 (excavé, droit et uniforme) à <u>0.150</u> (naturel, encombré) ^a	Cours d'eau agricoles excavés, non-entretenus = 0.055 ^{a,¶} Cours d'eau en forêt, naturels et avec quelques arbres, arbustes et roches = 0.27 ^a

Tableau 3: Descriptions des paramètres de calage et valeurs retenues en calage optimal du modèle hydrologique SWAT-MAC pour la phase aquatique.

	Description	Valeur par défaut	Fenêtre de calibration	Valeur de calage optimale
Processus d'écoulement de l'eau				
IRTE	Choix de la méthode d'écoulement de l'eau (Muskingum ou Stockage variable)	0 (Stockage) ; 1 (Muskingum)	1	0
MSK_CO1	Contrôle l'impact de la durée de stockage (en seconde) lors de débits normaux.	0	0-10	Non activé
MSK_CO2	Contrôle l'impact de la durée de stockage (en seconde) lors des débits en étiage.	0	0-10	Non activé
MSK_X	Contrôle l'importance relative entre l'écoulement d'entrée et de sortie déterminant la valeur de stockage.	0,2	0-0,5	Non activé
TRNSCH	Fraction de l'écoulement perdu dans l'aquifère profond. H: Affleurement rocheux et climat non désertique: pas de perte probable dans l'aquifère profond.	0	0-0,5	0,04
EVRCH	Coefficient d'évapotranspiration	0	0-1	0,5
CH_N(2)	Contrôle le taux et la rapidité de l'écoulement dans le segment	0,14	0,025-1	0,27
CH_K(2)	Conductivité hydraulique. Contrôle connexion avec les aquifères (pertes ou résurgences). Hypothèse: peu de pertes et peu de résurgence.	0	30-90	31
ALPHA_BNK	Contrôle la contribution des berges en stockage d'eau, 0 = Forte récession.	0	0-1	Non activé

Outre l'ajustement des précipitations hivernales, la surestimation des hauteurs de ruissellement engendrée par la méthode du SCS (USDA, 1972) a requis une réduction systématique des numéros de courbe de l'ordre de 30% par rapport aux valeurs recommandées dans la littérature (Neitsch et al., 2011). De telles surestimations, attribuables à la méthode SCS, ont aussi été décrites par Perone et al. (1998) dans les basses terres du Saint-Laurent. Tolson et al. (2004) et Saleh et al. (2000) ont par ailleurs apporté des ajustements similaires aux numéros de courbe

(CN2) dans leurs simulations à l'aide de SWAT. Au Québec, le même constat découle de l'analyse des hydrogrammes d'une vingtaine de petits bassins versants en milieu agricole (Michaud et al., 2012; 2014).

Les caractéristiques de pente (longueur : SLSUBBSN et inclinaison : SLOPE) ainsi que les facteurs de compensation pour l'évapotranspiration (EPCO et ESCO) se sont avérés des paramètres sensibles dans l'ajustement des lames d'eau ruisselées prédites par le modèle. Au niveau des écoulements souterrains, l'ajustement des paramètres influants sur le transfert d'eau entre les horizons du sol, l'aquifère peu profond et l'aquifère profond (ALPHA_BF, RCHRG DP, GW_DELAY, GWQMN et REVAPMN) ont aussi contribué à la reproduction optimale de la récession des débits du ruisseau.

La répartition des écoulements de surface et souterrain s'est aussi montrée fort sensible aux propriétés des sols des URH, notamment la densité apparente, la teneur en eau utile et la conductivité hydraulique. Le paramètre de connectivité de la macroporosité (E_c), spécifiquement dédié à l'expression des écoulements souterrains préférentiels dans SWAT-MAC, a été fixé à 0.1.

Ajustement du modèle. Le tableau 4 présente le bilan hydrologique annuel moyen du bassin versant résultant de la procédure de calage. Les figures 2 et 3, quant à elles, illustrent l'ajustement des débits simulés aux débits observés sur une base journalière. Dans l'ensemble, l'ajustement du modèle pourrait être amélioré compte tenu des valeurs en dessous des seuils de performance des indicateurs d'ajustement du modèle (NSE : 0.15; R^2 :0.23 et Dv : 0,9).

Cependant, les données de précipitation et de températures étant extrapolées en l'absence d'observation précise dans le bassin, il pourrait être difficile de reproduire avec plus d'exactitude la chronologie et l'amplitude des événements hydrologiques. Malgré une difficulté à reproduire l'amplitude des pics, une inspection de l'hydrogramme en figure 2 montre que le modèle reproduit toutefois les événements saisonniers (épisodes de fonte en mars-avril et redoux hivernaux, et quelques crues estivales). Le bilan hydrique annuel témoigne aussi d'un ajustement globale satisfaisant en reproduisant les proportions et hauteurs d'eau attendues pour chaque composante du bilan et l'ajustement mensuelle (figure 3) atteint les performances acceptables trouvé dans la littérature, soit (NSE : 0.51; R^2 :0.56) (Moriasi et al., 2007)

Tableau 4: Bilan hydrique annuelle moyen après calibration entre 2004 et 2010

<i>Composante du bilan hydrique</i>	<i>Moyenne des hauteurs d'eau annuelle (mm)</i>
<i>Précipitation</i>	1 414
<i>Fonte de neige</i>	394
<i>Evapotranspiration réelle</i>	443
<i>Hauteur d'eau totale</i>	805.5
<i>Ruissellement de surface</i>	133.5
<i>Drains*</i>	13
<i>Écoulement souterrain (résurgence de la nappe de surface)</i>	625
<i>Écoulement lateral</i>	34
<i>Recharge de l'aquifer profond</i>	130

* Seul 17% de la superficie du bassin est agricole avec une relativement faible proportion des terres drainées.

Figure 2: Débits journaliers simulés et observés à la station hydrométrique de la rivière Bulstrode entre 2004 et 2010.

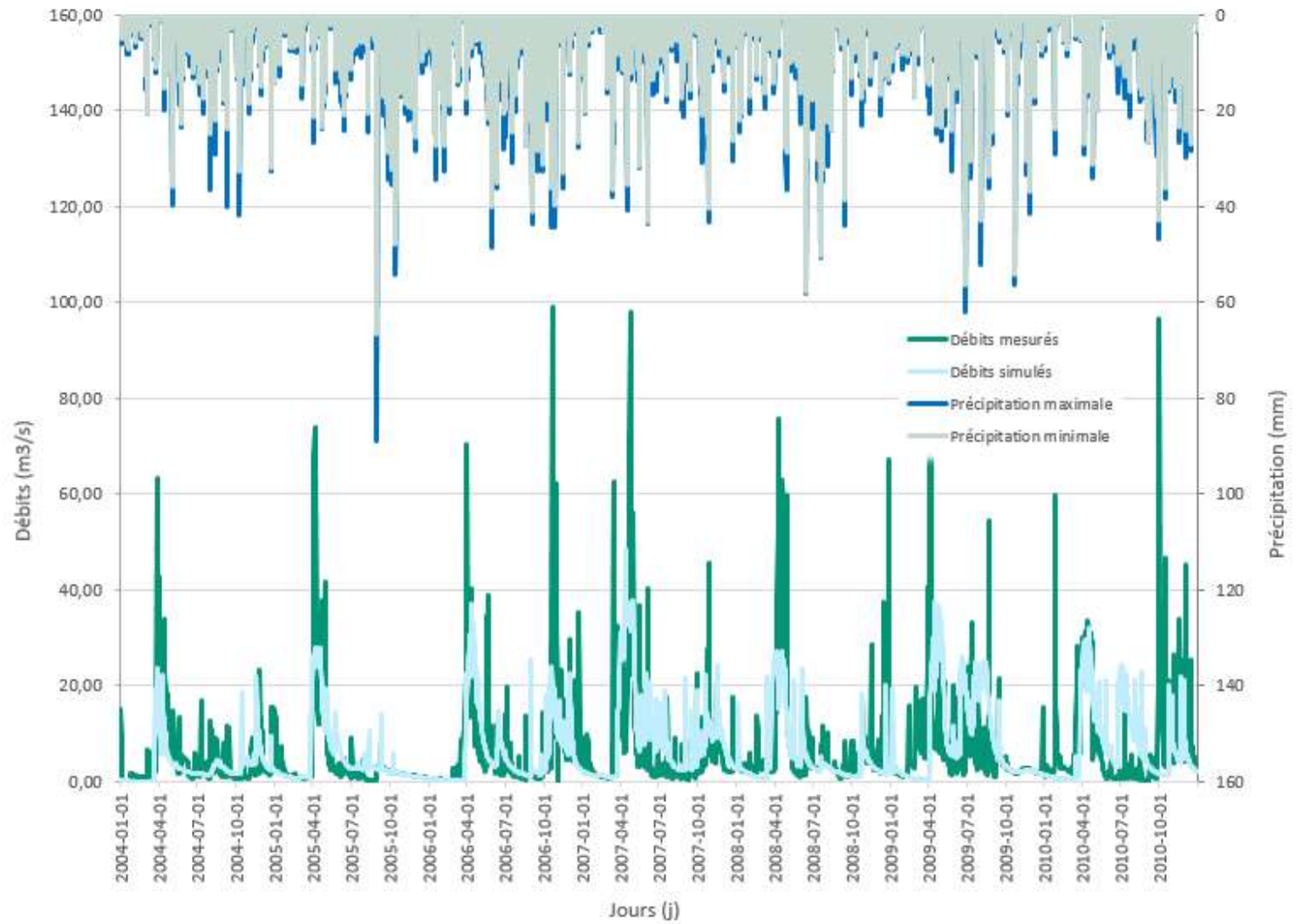


Figure 3: Ajustement des débits journaliers et coefficients de performance du modèle.

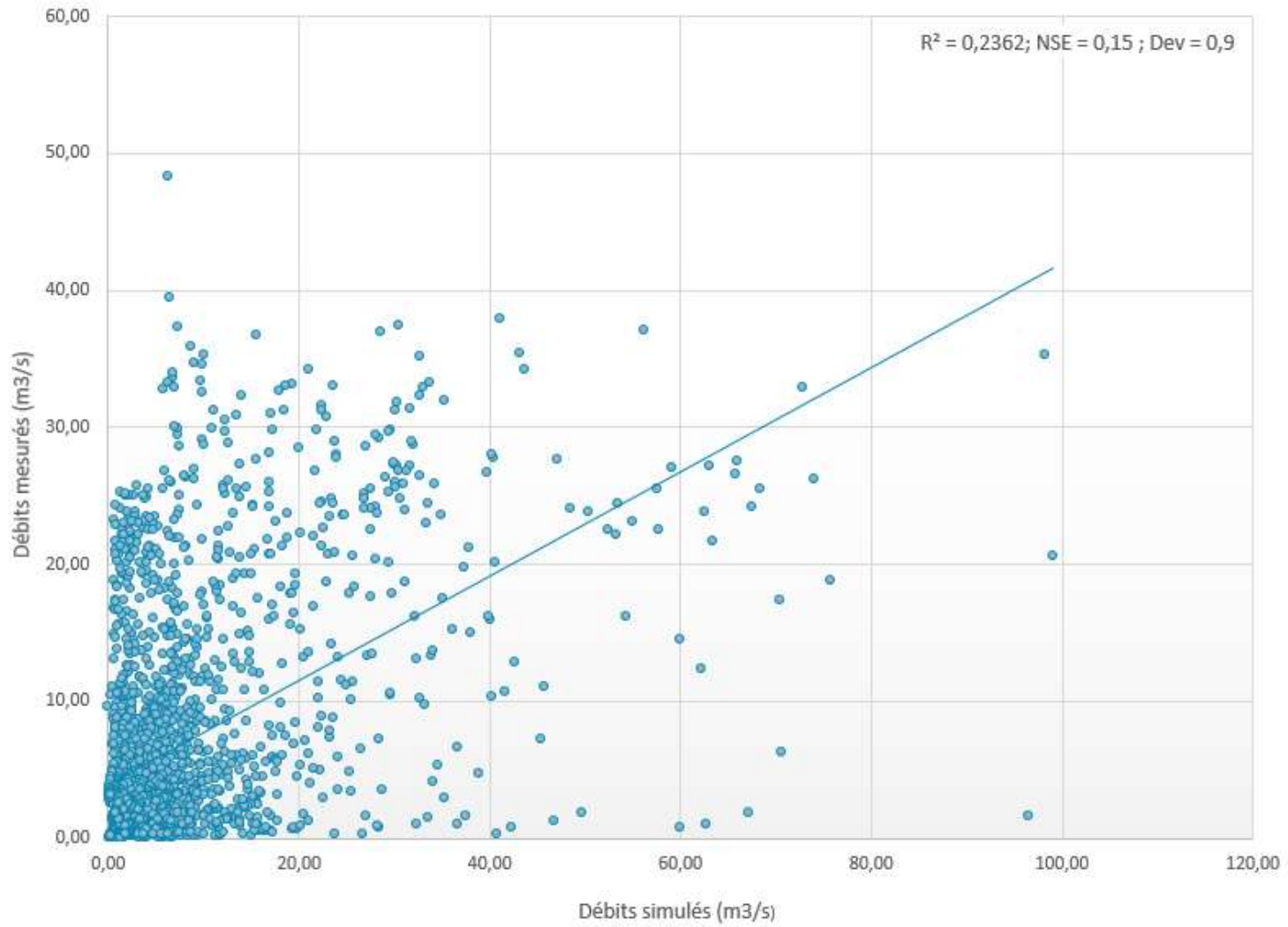
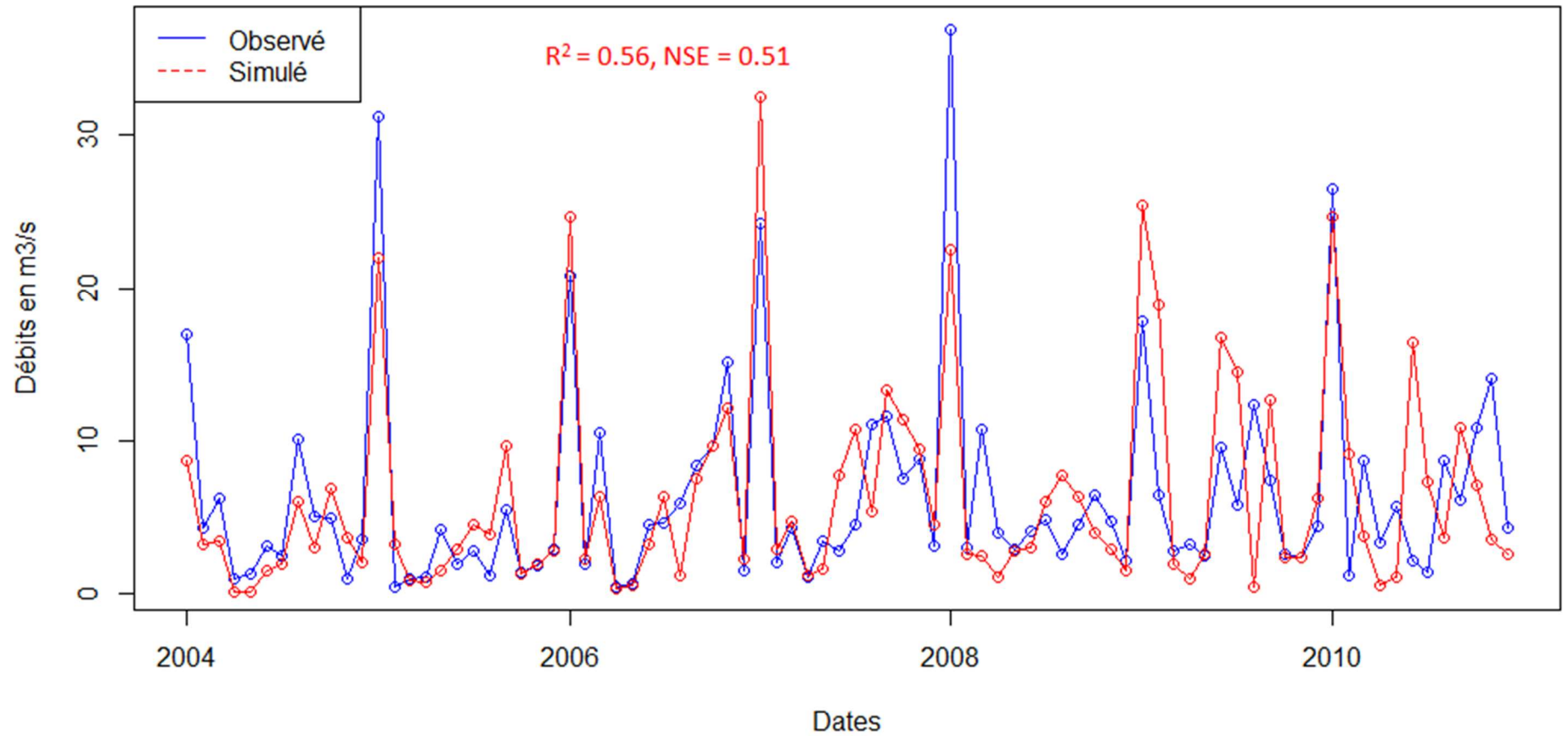


Figure 4: Débits mensuels simulés et observés à la station hydrométrique de la rivière Bulstrode entre 2004 et 2010 et coefficient de performance du calage du modèle SWAT-MAC



1.6.2 Charge de sédiments

Calage du modèle. Les paramètres qui se sont avérés les plus sensibles dans le calage des charges de sédiments sont regroupés au tableau 5 pour la phase terrestre de modélisation. Une fois l'assise hydrologique calibrée, les prédictions de MES exportés ont démontré une grande sensibilité aux paramètres de l'équation universelle modifiée de perte de sol (MUSLE), notamment les caractéristiques texturales et l'indice d'érodabilité du sol. Le coefficient de rugosité de Manning des champs, a été ajustés afin de reproduire le plus fidèlement possible les dynamiques d'exportation des sédiments à la station hydrométrique Bulstrode située à l'exutoire du sous-bassin 35 sur la carte 1 en Annexe I.

Au niveau de l'érosion du chenal, la méthode de stockage variable a été retenue pour évaluer la variation spatiale du débit dans le réseau hydrographique qui régit le transport des sédiments. Tel que soulevé par la littérature (Neitsch et al., 2011; Tolson et al., 2004), les facteurs d'érodabilité et de couverture végétale du réseau hydrographique se sont avérés forts sensibles lors du calage des exportations de la phase aquatique du modèle. Les dynamiques de déposition et de resuspension des sédiments demeurent cependant peu documentées pour les conditions semblables à la zone d'étude. Winchell et al. (2011) ont estimé les processus d'érosion en rive et des émissions de phosphore qui leur sont associées pour les bassins versants transfrontaliers du Vermont et du Québec. Jusqu'à 40% des charges de phosphore ont ainsi été associées aux processus d'érosion en rive. Dans le bassin versant Ewing, plus proche du bassin Bulstrode, Michaud et al. (2018) ont estimé la proportion des sédiments et de phosphore associée aux processus actifs en aval des champs à environ 30% des charges totales du ruisseau, sur la base de la comparaison de bilans de masses estimés au champ (N=10) et à l'exutoire du ruisseau.

Pour des fins de validation de la paramétrisation et du calage, les données observées de la charge annuelle moyenne en sédiments lors du suivi hydrométrique à la station de la rivière Bulstrode sont utilisées. Le suivi montre que la contribution des rives et du lit de la rivière à la charge totale annuelle en sédiments pouvait atteindre 70%, basée sur la période d'observation de l'automne 2017 au printemps 2020 (tableau 1).

Les dynamiques d'exportation de sédiments en chenal ont été simulées grâce à la méthode de Kodatie faisant intervenir les paramètres et valeurs présentées dans le tableau 6 et en annexe II.

Tableau 5: Descriptions des paramètres de calage et valeurs retenues en calage optimal du modèle hydrologique SWAT-MAC pour la phase aquatique.

	Description	Valeur par défaut	Fenêtre de calibration	Valeur de calage optimale
Processus de dégradation chenal et du transport des sédiments dans le réseau				
CH_EQN	Méthode de calcul de l'érosion et transport des sédiment	Bagnold simplifiée	--	2
CH_COV 1	Coefficient de couverture végétale pour le lit du chenal	0	Voir Annexe X	Voir Annexe X
CH_COV 2	Coefficient de couverture végétale pour les berges	0	Voir Annexe X	Voir Annexe X
CH_BED_BD	Masse Volumique apparente du matériel constituant le lit du chenal	0	Voir Annexe X	Voir Annexe X
CH_BNK_BD	Masse Volumique apparente du matériel constituant les berges	0	Voir Annexe X	Voir Annexe X
CH_BED_D50	Taille médiane des sédiments et du matériel composant le lit	1.4	Voir Annexe X	Voir Annexe X
CH_BNK_D50	Taille médiane des sédiments et du matériel composant le lit	1.5	Voir Annexe X	Voir Annexe X
CH_BED_TC	Puissance spécifique critique	0	Voir Annexe X	Voir Annexe X
CH_BNK_TC	Puissance spécifique critique	0	Voir Annexe X	Voir Annexe X
CH_BED_KD	Coefficient d'érodabilité du lit	0	0 – 3.75 cm ³ /N.s	Calculé par SWAT en fonction de CH_BNK/BED_TC
CH_BNK_KD	Coefficient d'érodabilité des berges	0	0 – 3.75 cm ³ /N.s	Calculé par SWAT en fonction de CH_BNK/BED_TC

Ajustement du modèle. Après calibration, la contribution du ruissellement des terres à la charge annuelle moyenne de la rivière est de l'ordre de 0,51 T/ha, soit une différence de 0,4T/ha par rapport à la valeur cible de 0,11 T/ha estimée (tableau 1). Le modèle surestime donc encore la contribution de la phase terrestre.

Les exportations moyennes annuelles totales simulées à l'exutoire du sous-bassin 35 (ou station hydrométrique Bulstrode), incluant la contribution des processus d'érosion en rivière, s'élève à 20 971 T/an pour la période 2004-2010, soit deux fois plus que la valeur cible. Ramenée à la

superficie du bassin en aval de la station hydrométrique (29 176 ha), la charge totale moyenne annuelle spécifique modélisée est de 0,71T/ha/an pour la période 2004-2010. Une rapide soustraction permet de déterminer que les dynamiques d'érosion et de dépôt en rivière, modélisées avec le jeu de paramètres testés contribuent pour 0,2T/ha de la charge globale, soit 28%. Ces pourcentages sont loin des cibles souhaitées qui démontrent la tendance inverse de 30 % originaire des processus terrestres, et 70% originaire des processus aquatiques.

Cependant, lors d'une analyse plus détaillée des sorties du modèle, la dégradation des berges a été simulée pour 28 chenaux de sous-bassins localisés sur le tronçon principale de la rivière et les sous-bassins étudiés (Parent, Gobeil, Michaud, et Perreault). À eux seuls, ces 28 chenaux, émettent en moyenne annuellement 42 012 T/an dans le réseau hydrographique, soit l'équivalent de 1,44 T/ha/an. Quant à la charge sédimentaire produite par l'érosion du lit, elle n'est simulée que pour une quinzaine de sous-bassins, et atteint une contribution annuelle moyenne de 9 315 T/ha, soit 0,32 T/ha/an. Une partie de cette charge sédimentaire, ainsi que celle de l'apport terrestre se redépose le long du réseau avant d'arriver à l'exutoire du sous bassin 35 où la station hydrométrique est localisée. Une seconde observation lors de cette analyse plus détaillée montre que le modèle tend à dissocier les particules de sédiments en fonction de leur taille entre l'argile, le limon, le sable et les petits et gros agrégats, tel que planifié suivant la méthode retenue.

Le modèle démontre ainsi un bon potentiel pour la simulation des processus sédimentaires en cours d'eau. Une analyse plus poussée permettrait d'affiner la paramétrisation qui a dû être généralisée sur les tronçons hétérogènes pouvant causer cette sous-estimation de la proportion de la contribution de la phase aquatique. Bien que les processus de dégradation et d'érosion de certains chenaux soit pris en compte, le modèle tend à favoriser les processus de dépôt des sédiments le long du cours d'eau avant leur arrivée à la station hydrométrique, situé quelques kilomètres en amont du réservoir Beaudet. La paramétrisation du modèle s'est par ailleurs limitée aux sous-bassins documentés et au chenal de la rivière principale. Il y aurait ainsi avantage à extrapoler les valeurs des paramètres à l'ensemble des 181 chenaux composant le réseau hydrographique tel que représenté dans SWAT.

1.7 Scénarios climatiques et projections en climat futurs

Cinq scénarios de données climatiques provenant de Modèles Climatique Globaux (MCG) furent entrés dans le modèle SWAT, paramétrisé et calé, pour projeter les débits, la quantité de ruissellement et la charge sédimentaire de la rivière Bulstrode en climat futur sur l’horizon 2021-2070. L’utilisation du sol et la gestion des terres sont restées identiques à la période de calage.

L’utilisation de cinq scénarios permet de prendre en compte un large éventail de possible futures et d’intégrer le degré d’incertitude lié aux changements climatiques. Afin de capturer ces incertitudes, ces scénarios ont été choisis par le Consortium Ouranos, spécialiste au Québec sur la climatologie régionale et l’adaptation au changement climatique (Ouranos, 2020), parmi un ensemble de simulations produites par le projet d’envergure mondiale d’inter-comparaison des modèles climatiques couplés (CMIP5)³ (Taylor et al., 2013), intégrant différentes projections d’émission de gaz à effet serre (GES).

1.7.1 Description des scénarios climatiques

Les données des cinq scénarios climatiques consistent en cinq séries distinctes de précipitation, températures maximum et températures minimales journalières simulés par divers modèles climatiques globaux (GCM) du CMIP5 et corrigés par Ouranos. Les données fournies couvrent la période 1951-2100. Pour l’exercice, nous nous sommes concentrés sur la fenêtre 2021-2070. Le tableau 7 détaille le GCM, l’Institut de développement du modèle, et scénario de gaz à effet de serre utilisé pour ces cinq scénarios.

Les biais inhérents associés aux modèles climatiques globaux ont été corrigés par Ouranos sur la grille NRCAN de 10km² en utilisant la méthode de correction par quantiles avec un fenêtrage mobile tel que procédé pour les données observées.

Finalement, deux scénarios d’émission GES (rcp 4.1 et rcp 8.1) alimentent les différentes simulations climatiques produites par les GCM. Ces scénarios sont connus sous l’acronyme RCP,

³ CMIP5 : Coupled Model Intercomparison Project Phase 5.
<https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/citation.html>

soit, Representative Concentration Pathway, et sont nommées d'après la quantité de radiation net (W/m^2) projeté en 2100. Le scénarios 4.1 représente une vision optimiste des projections avec des forces radiatives se stabilisant en 2100, à la suite de l'implémentation de mesures économiques consistant à mettre un prix sur les émissions de GES. Le scénarios 8.1, quant à lui représente l'un des pires cas de scénarios en termes d'augmentation de la concentration des GES.

Tableau 6: Spécificités techniques des cinq scenarios utilisés provenant du Projet d'Inter-comparaison des Modèle Couplé-Phase 5 (CIMP5) du Programme Mondial de la Recherche sur le Climat.

<i>ID simplifié du scénario</i>	<i>GCM abréviation</i>	<i>Institute ID</i>	<i>RCP</i>	<i>Description</i>
<i>A13</i>	ACCESS1.3	CSIRO-BOM	8.1	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) and Bureau of Meteorology (BOM), Australia
<i>ESM</i>	CanESM2	CCCMA	4.1	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
<i>MIROC</i>	MIROC-ESM-CHEM	JAMSTEC – AORI - NIES	8.1	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies
<i>INM</i>	INM-CM4	INM	4.1	Institute for Numerical Mathematics
<i>MIC</i>	---	--	4.1	--

1.7.2 Projections 2026-2055 et 2061-2090 des débits et de la charge en sédiments à la station Bulstrode

Les figures 5, 6 et 7 illustrent respectivement les projections moyennes mensuelles pour les débits des horizons 2026-2055 et 2061-2090, ainsi que les deltas entre ces deux horizons, à la station hydrométrique Bulstrode située quelques kilomètres en amont du réservoir Beaudet.

Similaire à plusieurs régimes hydriques de rivières méridionales québécoises sous influences de scénarios climatiques (Gombault et al. 2015a ; Boyer et al., 2010), les débits mensuels moyens de la rivière Bulstrode augmentent sauf au mois d'avril où les pics de crues printanières ont tendance

à baisser. Cette baisse s'explique par l'étalement du pic printanier sur plusieurs mois et son décalage vers le mois de mars, causé par des températures plus élevées et l'atteinte de température de fonte plus rapidement ou durant les mois d'hiver. Les redoux hivernaux décroissent aussi le couvert neigeux soit par fonte soit par la tombée de précipitation pluvieuse plutôt que neigeuse. En moyenne, les débits les plus forts se manifestent sur l'horizon 2061-2090 en mars-avril avec des moyennes mensuelles allant de 7 à 14 m³/s selon le scénario. De légères hausses pouvant aller jusqu'à 1,6 m³/s (figure 7, scénario MIC) sont simulées pour les mois d'hivers, mais ceux-ci restent les plus bas de l'année même sur un horizon lointain. Il est à noter que les barrages Sainte-Sophie et Princeville n'ont pas été inclus dans le modèle.

Les figures 8, 9 et 10 illustrent quant à elles respectivement les projections de la charge sédimentaire pour ces mêmes horizons et la différence entre ceux-ci. Le comportement du bassin pour la charge sédimentaire suit celui des réponses hydrologiques. Les mois de janvier, février et de mars reflètent d'importantes hausses de la charge sédimentaire avec des augmentations pouvant atteindre plus de 1 500 tonnes au mois de mars. En contrepartie des baisses sont à noter pour les mois suivants jusqu'en juin, sans toutefois contrebalancer les hausses printanières. Pour les bilans annuels (figure 11), les scénarios choisis pour ce projet projettent respectivement des augmentations annuelles moyennes entre 345 et 4 149 tonnes. Seul 1 scénario projette une relativement faible augmentation. La hausse du second scénario optimiste dépasse les 1 000 tonnes annuelles, quant au 3 plus pessimistes, ils se rapprochent tous d'une hausse de 4 000 tonnes annuelles.

Les détails des projections se trouvent dans les tableaux incorporés aux figures.

Figure 5 : Débits simulés pour un horizon proche (2026-2055) et futur (2061-2090) pour des scénarios de GES optimistes RCP #4.1 à la station de suivi hydrométrique Bulstrode

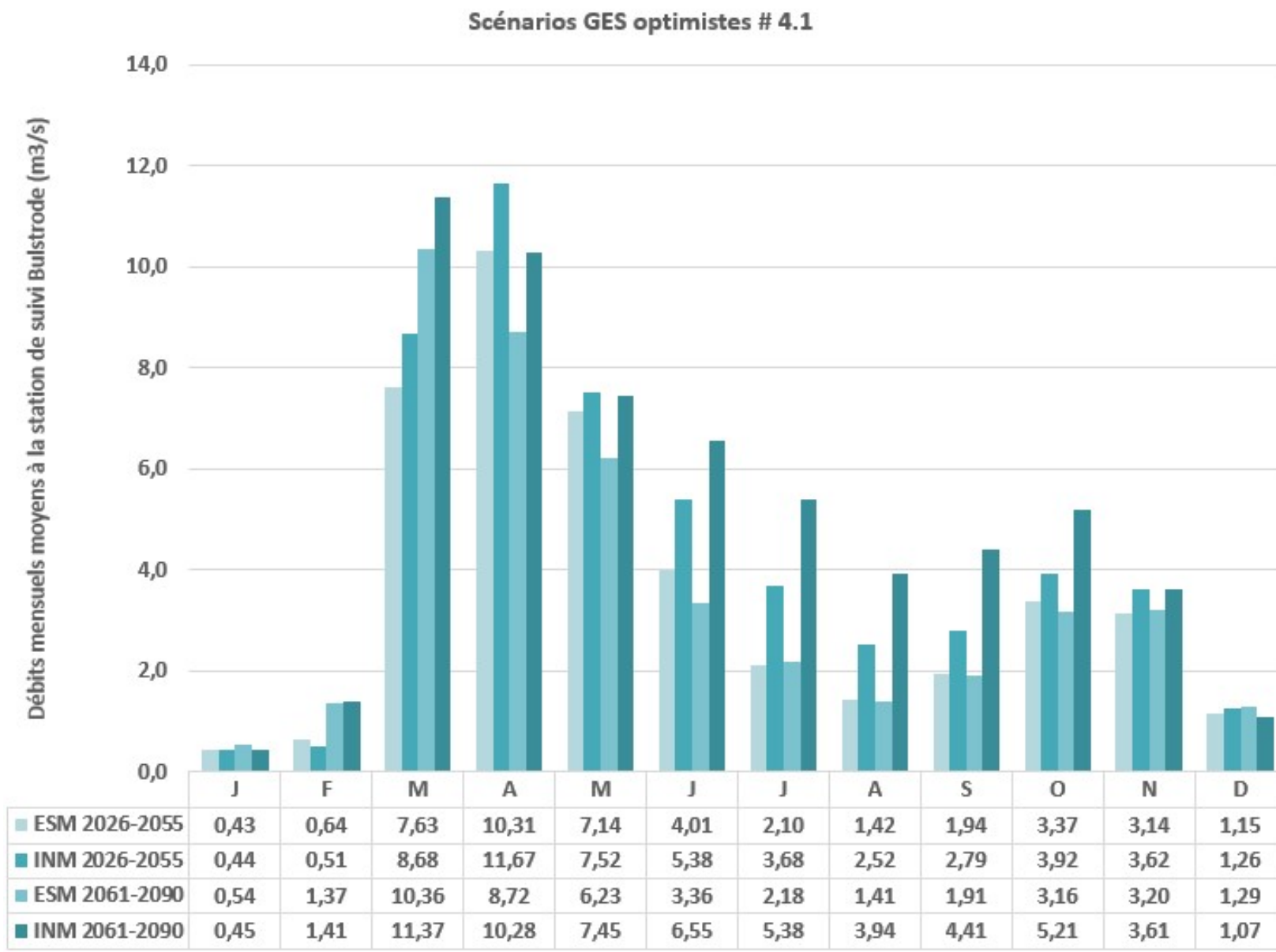


Figure 6: Débits simulés pour un horizon proche (2026-2055) et futur (2061-2090) pour des scénarios de GES pessimistes RCP #8.1 à la station de suivi hydrométrique Bulstrode

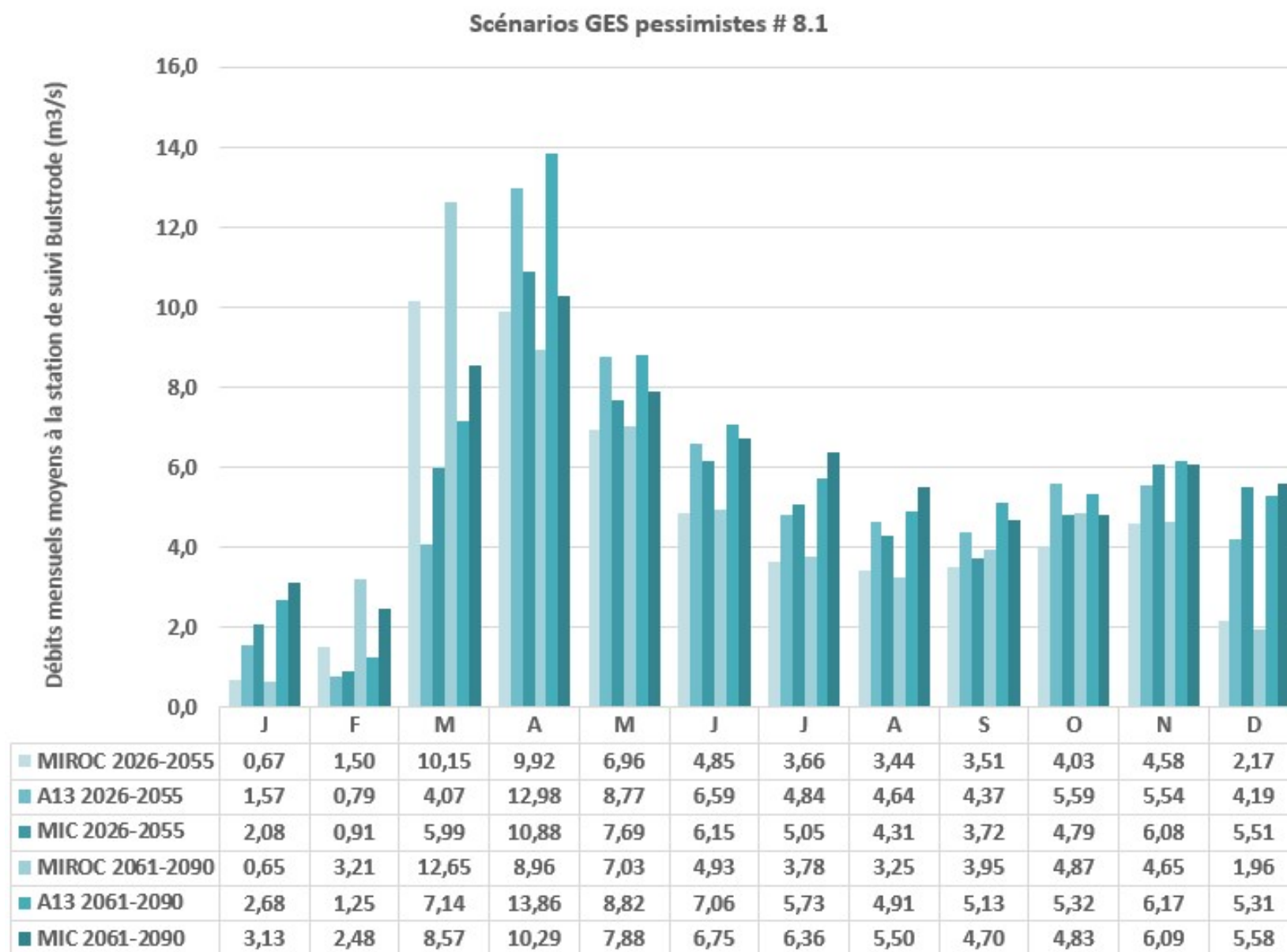


Figure 7: Delta des débits entre l'horizon 2026-2055 et 2061-2090 à la station Bulstrode pour 2 scénarios optimistes (ESM et INM) et 3 scénarios pessimistes (MIROC, A13 et MIC) de GES

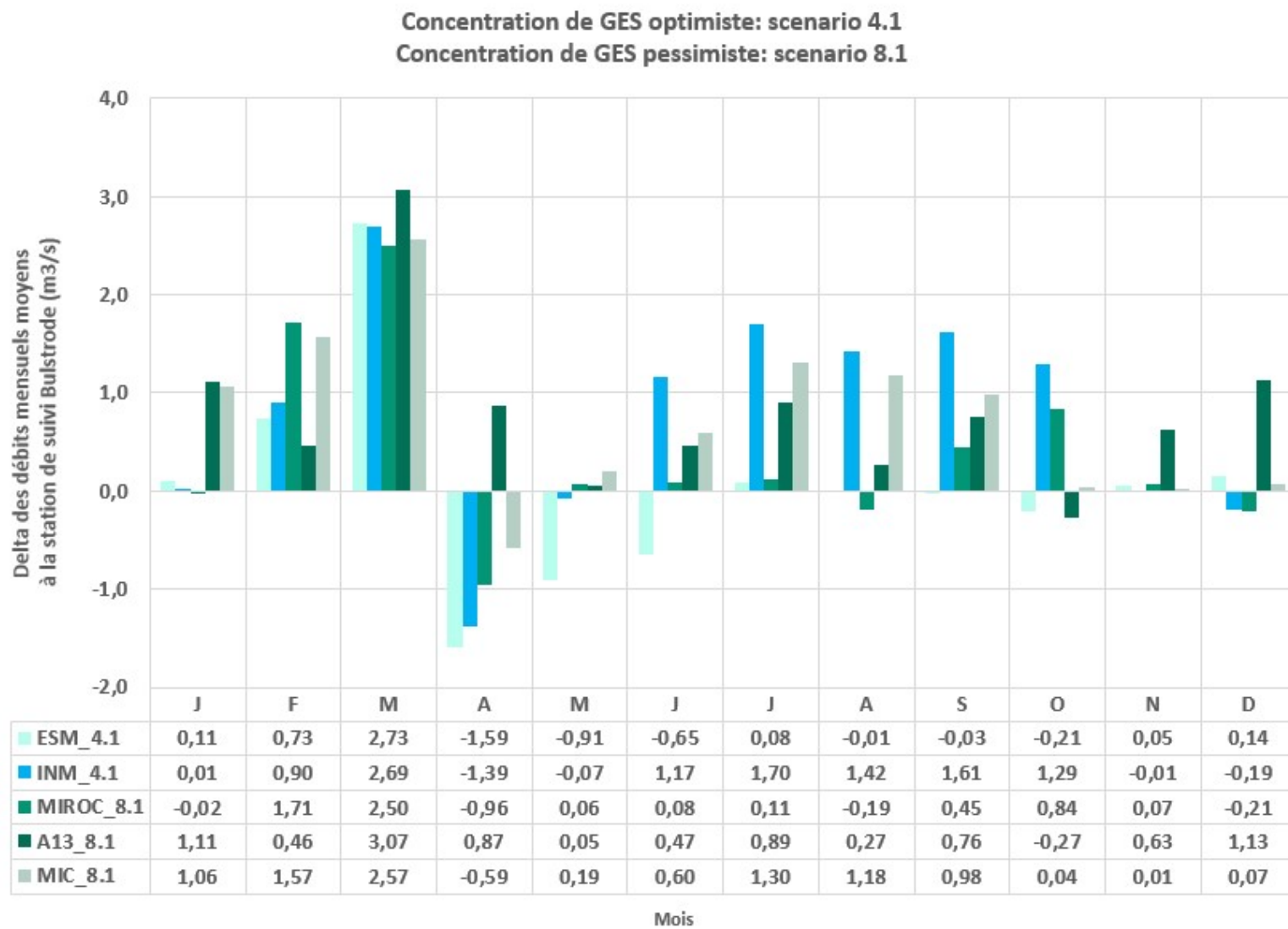


Figure 8: Charges sédimentaires (en T) simulés pour un horizon proche (2026-2055) et futur (2061-2090) pour des scénarios de GES optimistes RCP #4.1 à la station de suivi hydrométrique Bulstrode

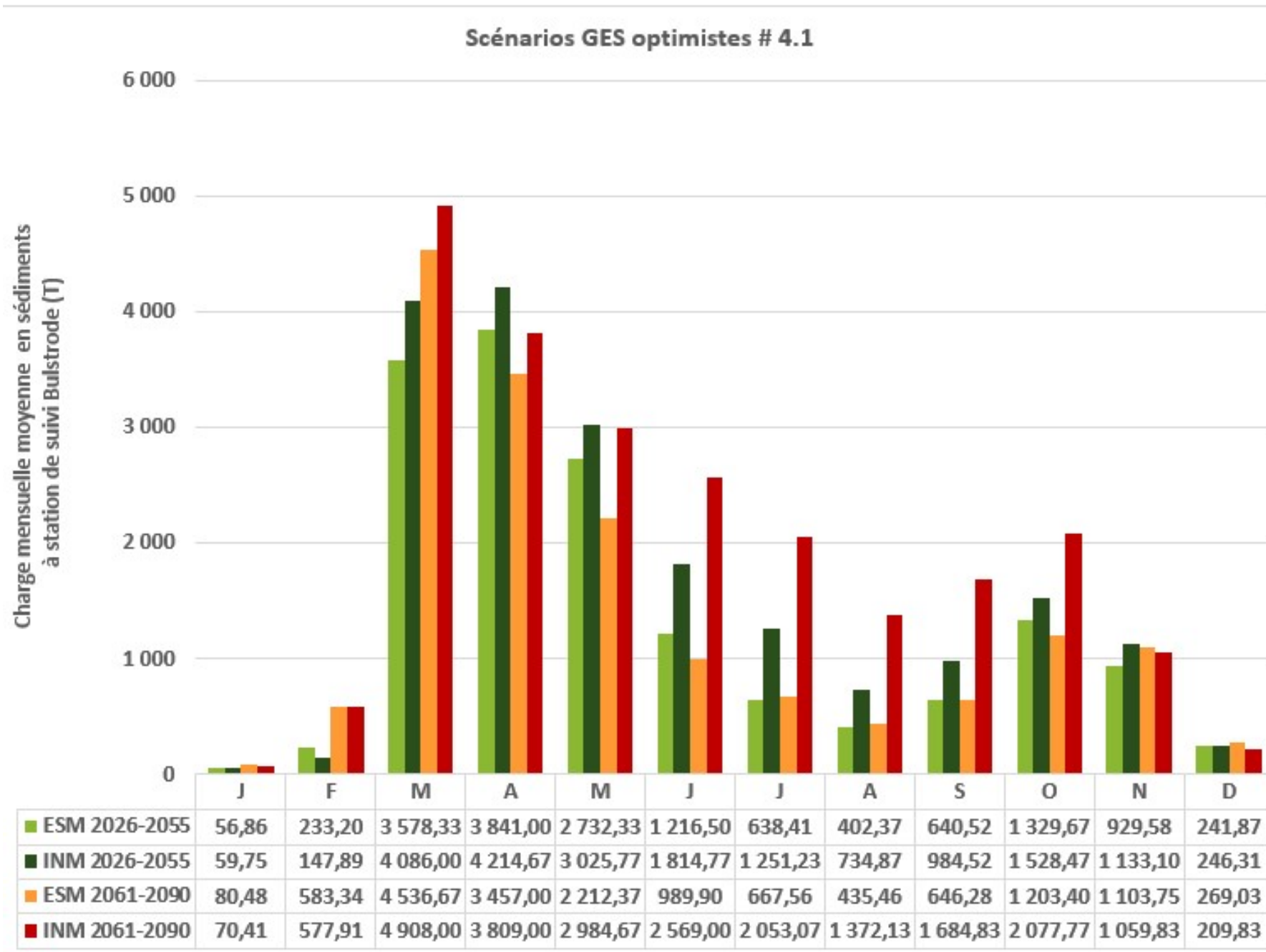


Figure 9: Charges sédimentaires (en T) pour un horizon proche (2026-2055) et futur (2061-2090) pour des scénarios de GES pessimistes RCP #8.1 à la station de suivi hydrométrique Bulstrode

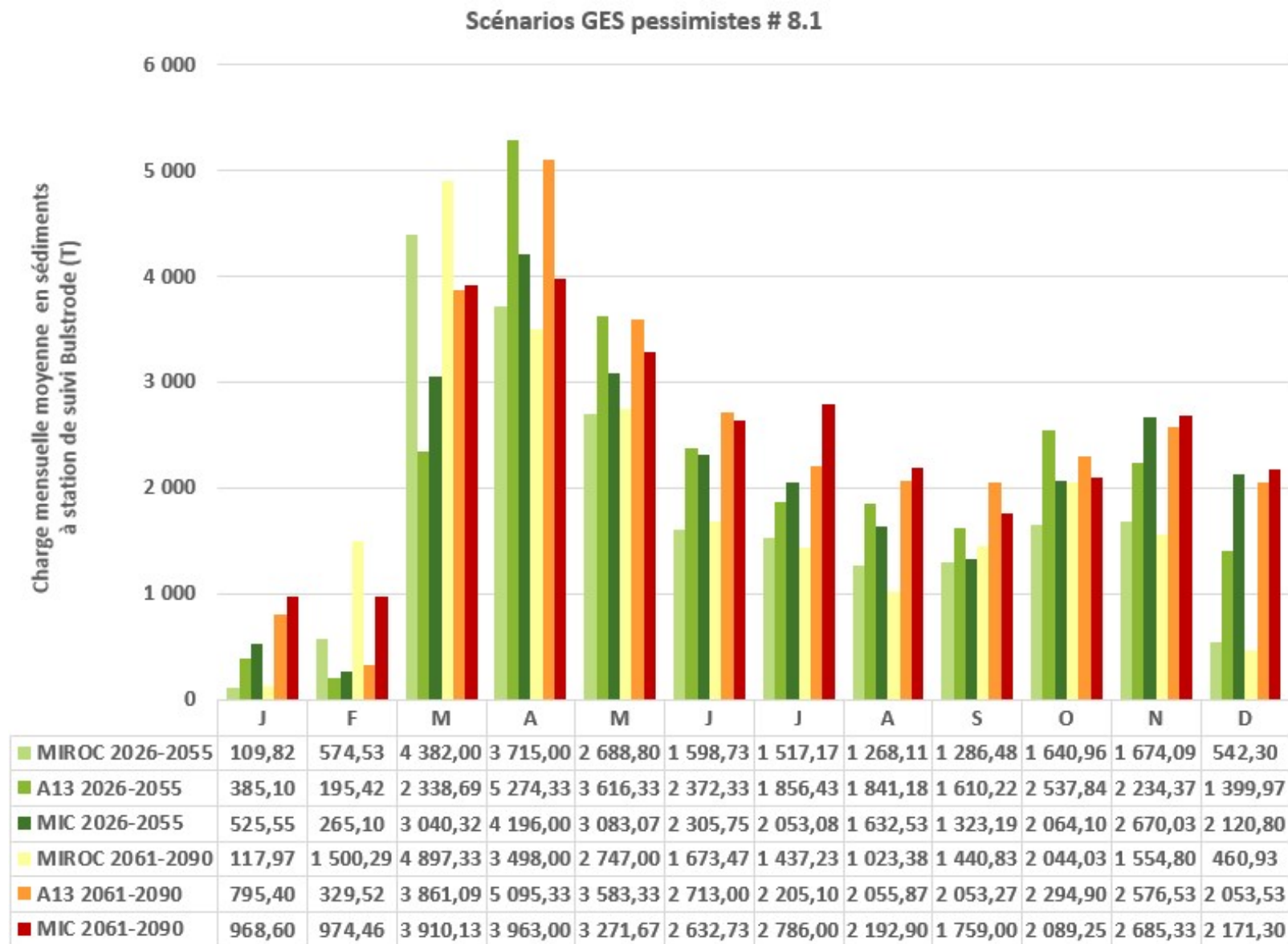


Figure 10: Delta de la charge sédimentaire entre l'horizon 2026-2055 et 2061-2090 à la station Bulstrode pour 2 scénarios optimistes (ESM et INM) et 3 scénarios pessimistes (MIROC, A13 et MIC) de GES

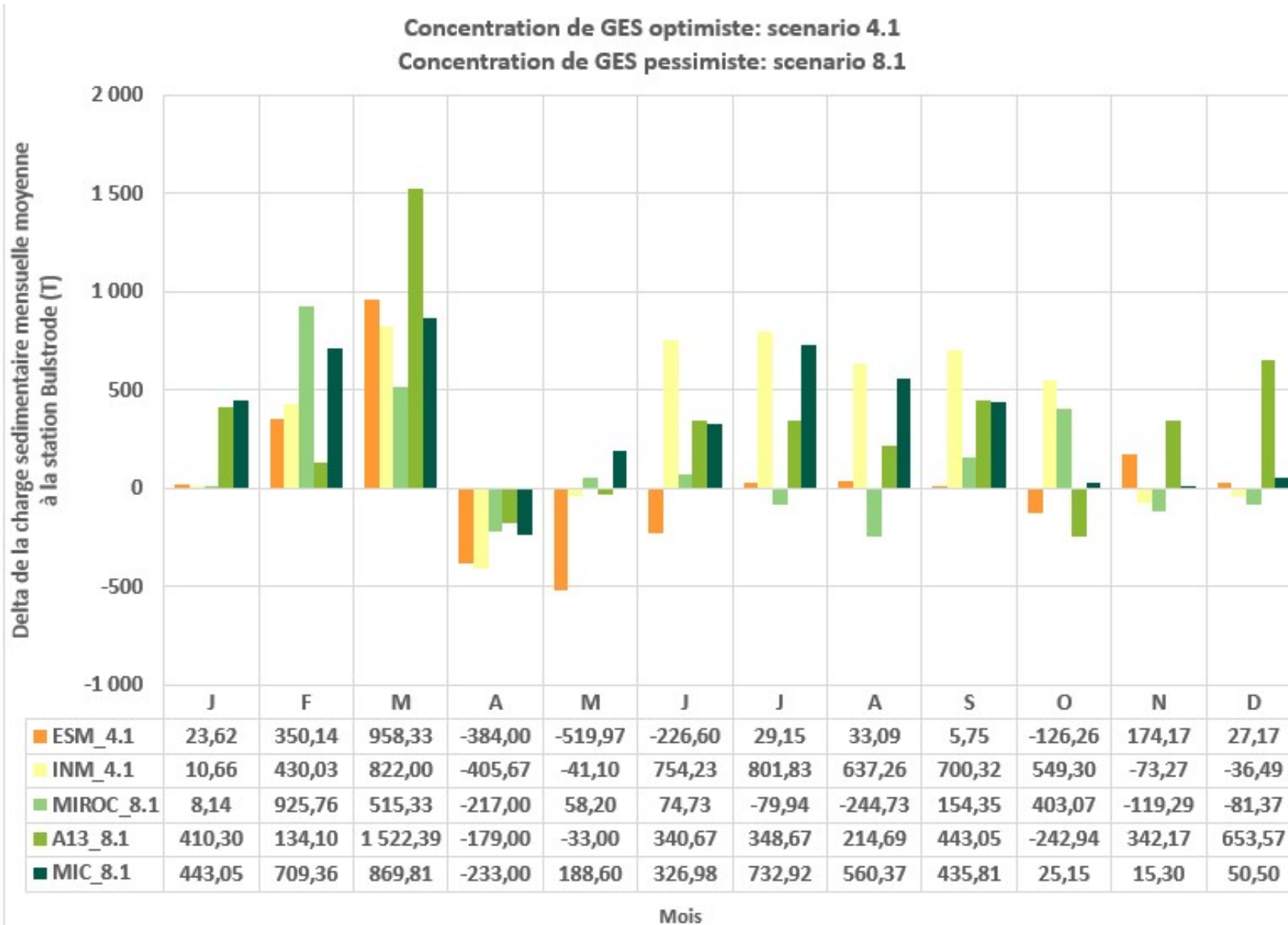
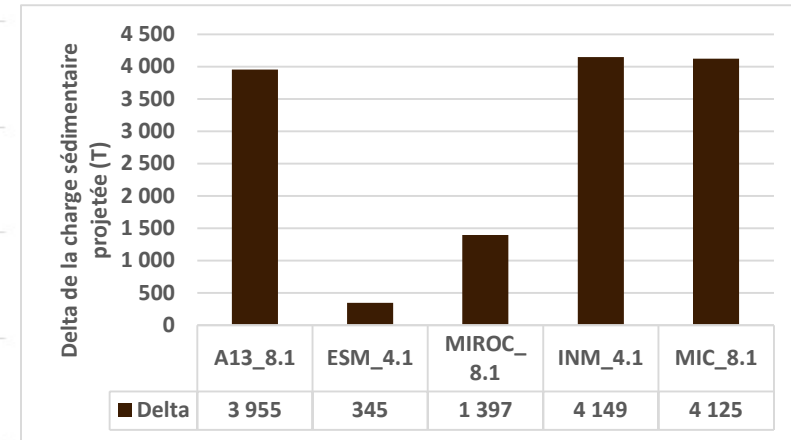
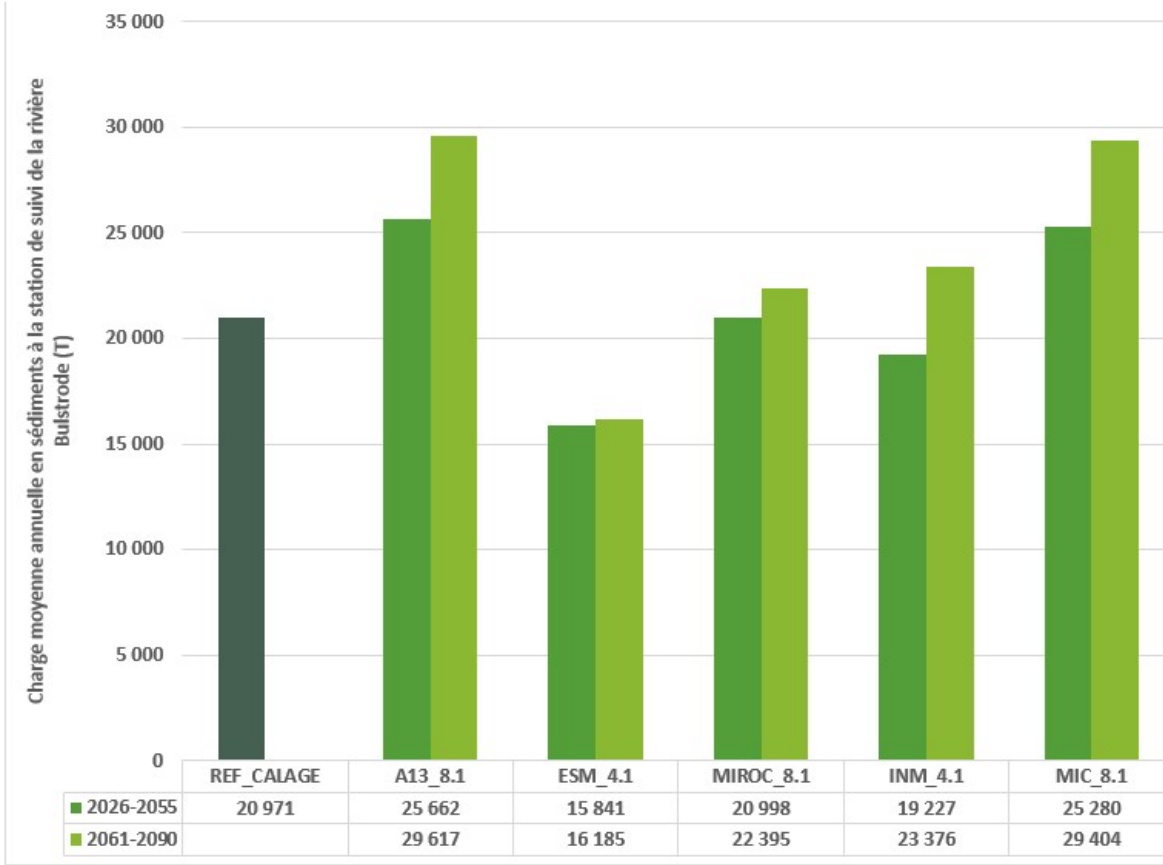


Figure 11: Projections annuelles moyennes pour la charge en sédiments à la station hydrométrique de la rivière Bulstrode pour les horizons 2026-2055 et 2061-2090 (a), ainsi que leurs delta (b).

a



b

1.8 Conclusion du volet de modélisation hydrologique en climat actuel et futur

Ce quatrième volet des études de l'IRDA sur le bassin Bulstrode ciblait la projection, en climat actuel et futur, de l'activité hydrologique et des apports en sédiments résultant des processus d'érosion des terres et du chenal de la rivière. Dans un premier temps, le modèle hydrologique SWAT-MAC a été paramétré et calibré de façon à reproduire journalièrement les débits ainsi que la charge annuelle en sédiments à la station de suivi hydrométrique aval de la rivière Bulstrode. En seconde étape, les débits et charges de sédiments ont été projetées en climat futur sur les horizons 2026-2055 et 2061-2090.

Globalement, les indicateurs d'ajustement des prédictions du modèle hydrologique aux observations journalières à la station hydrométrique pour la période 2004-2010 témoignent d'une performance suboptimale au pas de temps journalier. Ce déficit dans l'ajustement journalier du modèle est principalement attribué au manque d'observations météorologiques disponibles pour la zone d'étude, ce qui a requis le recours à des séries journalières de précipitations et températures simulées sur une grille de 10 km², utilisées en intrants au modèle. Le modèle réagissant fortement aux variables du climat, il est estimé que cette approche est problématique, dans le contexte d'une forte influence du gradient orographique sur les précipitations à l'échelle du bassin. En effet, de nombreuses incohérences ont été notées entre des pics de débits observés aux stations hydrométriques localisées dans le bassin versant et les données de précipitation utilisées.

Néanmoins, le modèle calibré reproduit de façon satisfaisante les patrons saisonniers et le bilan hydrique annuel moyen, ainsi que les débits mensuels moyens. La performance du modèle des prédictions mensuelles atteint des valeurs jugées acceptables selon la littérature (Moriasi et al., 2007). Afin de tenir compte des incertitudes relatives aux projections climatiques et d'un ensemble de futurs possibles, cinq scénarios climatiques ont été utilisés en intrants au modèle hydrologique SWAT-MAC. Deux de ces scénarios représentent des futurs optimistes avec des projections de GES contrôlés par des mécanismes de marché du carbone, et les trois autres scénarios représentent des projections pessimistes.

Les projections hydrologiques en climat futur témoignent d'une augmentation des débits en période hivernale avec un printemps devancé, à l'instar des résultats d'autres études réalisées sur des bassins méridionaux du Québec (Boyer et al. 2010; Gombault et al., 2015a; Poon et al., 2016). Ces projections ont d'importantes implications sur les phénomènes d'érosion et de transfert des sédiments en climat futur. Le suivi hydrologique de la rivière Bulstrode et de ses affluents démontre qu'en climat actuel, les redoux hivernaux et la période de fonte des neiges sont des périodes hydrologiquement très actives et sont responsables, outre l'impact de quelques orages estivaux, de la majorité des transferts de sol vers les cours d'eau. Les résultats de la modélisation

hydrologique de la rivière Bulstrode montrent que les augmentations de débits projetées se traduisent par des augmentations de la charge annuelle en sédiments dans le cours d'eau, allant de 345 à 4 149 tonnes selon le scénario. Cela correspond, dans le cadre de cet exercice, à des augmentations annuelles moyennes pouvant aller jusqu'à 16%. Plus précisément, les projections annuelles moyennes varient entre 15 841 et 25 662 tonnes pour l'horizon 2026-2055, et entre 16 185 et 29 617 tonnes pour l'horizon 2061-2090.

1.9 Références citées

Arnold, J.G., R. Srinivasan, R.S. Muttiah, and J.R. Williams. 1998. Large area hydrologic modelling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34(1):73-89.

Biron, P., W. Massey and N. Stämpfli. 2020. Analyse Hydrogéomorphologique de la rivière Bulstrode. Rapport Final présenté à l'organisme de bassin versant COPERNIC. 49p.

Boyer, C. D, Chaumont, I. Chartier, and A.G. Roy. 2010. Impact of Climate Change on the hydrology of St. Lawrence tributaries. *Journal of Hydrology* 384(1-2):65-83.

Deslandes, J., I. Beaudin, A. R. Michaud, F. Bonn and C. A. Madramootoo. 2006. Influence of landscape and cropping system on phosphorus mobility within the Pike River watershed of Southwestern Quebec. *Canadian Water Resources Journal* 32(1): 21-42. Janvier.

Duhamel, D. et Bariteau, L., Poly-Géo inc. 2012. PROJET DE RESTAURATION DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE BULSTRODE À L'AMONT DU RÉSERVOIR BEAUDET - Analyse par photo-interprétation du segment central de la rivière et validation au terrain. Rapport préliminaire présenté au Service de l'environnement de la Ville de Victoriaville. 25 pages.

Eckhardt, K. and J.G. Arnold. 2001. Automatic calibration of a distributed catchment model. *J. of Hydrology* Vol. 251 (1-2), pp. 103-109.

Gombault, C., C.A. Madramootoo, A.R. Michaud, I. Beaudin, M.F. Sottile, M. Chikhaoui, F.F. Ngwa. 2015a. Impacts of climate change on nutrient losses from the Pike River watershed of southern Québec. *Canadian journal of soil science* 95: 337-358).

Gombault, C., M.F. Sottile, F. Ngwa, C.A. Madramootoo, A.R. Michaud, I. Beaudin, M. Chikhaoui. 2015b. Modelling climate change impacts on the hydrology of an agricultural watershed in southern Québec. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 1-16.

Hutchinson, M. F., McKenney, D. W., Lawrence, K., Pedlar, J. H., Hopkinson, R. F., Milewska, E., & Papadopol, P. (2009). Development and testing of Canada-wide interpolated spatial models of daily minimum-maximum temperature and precipitation for 1961-2003. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1979.1>

IRDA, 2017. Banque de données hydro-pédologiques. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA).

Knisel, W.G. 1980. CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. USDA Conservation Research Report. No. 26, 643 p.

La Financière agricole du Québec, 2007 à 2011. Banque de données des cultures assurées (BDCA) ou des cultures généralisées (BDCG)
<https://www.fadq.qc.ca/documents/donnees/base-de-donnees-des-parcelles-et-productions-agricoles-declarees/>

Lamont, G., P-M. Pelletier, M. Lemay. (2020). Étude de la dynamique sédimentaire de la rivière Bulstrode entre les barrages Beudet et Sainte-Sophie. Rapport préliminaire. Ville de Victoriaville en collaboration en collaboration avec l'OBV Copernic. Rapport HS00232. 188p.

Leonard, R.A., W.G. Knisel, and D.A. Still. 1987. GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems. Trans. ASAE 30(5), pp. 1403-1428.

McKenney, D. W., Hutchinson, M. F., Papadopol, P., Lawrence, K., Pedlar, J. H., Campbell, K. B., ... Owen, T. W. (2011). Customized Spatial Climate Models for North America. Bulletin of American Meteorological Society-BAMS, 1612-1622.

Michaud, A.R., Lauzier, R., et M.R. Laverdière. 2004. Temporal and spatial variability in non-point source phosphorous in relation to agricultural production and terrestrial indicators. In: T. O. Manley, P. L. Manley and T.B. Mihuc ed., Lake Champlain: partnerships and research in the new millennium. Kluwer academic/plenum pub. New York NY. Pp. 97-121.

Michaud, A.R., Lauzier, R., et M. R.Laverdière. 2005. Mobilité du phosphore et intervention agroenvironnementale en bassin versant agricole: Etude de cas du bassin versant du ruisseau au Castor, tributaire de la rivière aux Brochets, Québec. Agrosol 16(1), pp. 57-59.
https://www.researchgate.net/publication/274762064_Cropping_soil_type_and_manure_application_effects_on_phosphorus_export_and_bioavailability

Michaud, A.R., J. Deslandes, G. Gagné, L. Grenon, et K. Vézina. 2009a. Gestion raisonnée et intégrée des sols et de l'eau (GRISE). Rapport final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC), Université de Sherbrooke, CDAQ, Québec, Québec, 87 p. <http://www.irda.qc.ca/resultats/publications/196.html>

Michaud, A.R. , J. Deslandes, J. Desjardins et M. Grenier. 2009b. Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles. Rapport final de projet. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), MAPAQ, Club du bassin LaGuerre, Dura-Club, Club de fertilisation de la Beauce, 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, 155 p. <http://www.irda.qc.ca/resultats/publications/204.html>

Michaud, A.R., A. Drouin, A. Mailhot, G. Talbot, D. Huard, S. Biner, R. Lagacé, N-R. Rocha et G. Gagné. 2012a. Mise à jour des normes et procédures de conception d'ouvrages hydrauliques en milieu rural dans un contexte de changements. Projet réalisé dans le cadre du projet 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. 181 p.

Michaud, A.R., A. Drouin, J. Desjardins, N. Coté. 2013. Rapport final sur le rendement pour la période 2009-2013 pour les bassins versants du ruisseau Fourchette et du Bras D'Henri. Programme d'évaluations des pratiques de gestion bénéfiques à l'échelle du bassin hydrographique. Agriculture et agroalimentaire Canada. Accord de contribution 1585-10-3-2-5-1. 68 pages avec annexes.

Michaud, A.R., J. Desjardins, N. Coté, I. Beaudin, A. Drouin, S. Seydoux et I. Saint-Laurent. 2012b. Rapport de l'Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles. Rapport sommaire pour la période de référence 2009-2011. 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. 87 pages et annexes.

Michaud, A.R., A. Drouin, I. Beaudin, L. Belzile, M.-O. Gasser, J. Desjardins et N. Côté. 2014. REZOTAGE : Réalisation de ZONES Technico-économiques Agricoles de Gestion. 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. 180 p.

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.

Michaud, A.R., S-C Poirier et J.K Whalen. 2018. Four-Component Hydrograph Model to Predict Phosphorus Export from an Agricultural Subwatershed. Soumis au Journal of Environmental Quality. 17 mars 2018.

Michaud, A.R., M.A. Niang, A. Blais-Gagnon, C. Gombault et W. Huertas, 2020a. Suivi hydrométrique du bassin versant de la rivière Bulstrode . Rapport final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), COPERNIC. 23 pages.

Michaud, A.R., M.A. Niang, et W. Huertas, 2020b. ÉTUDE DE CAS DU BASSIN VERSANT DU RUISSEAU GOBEIL, AFFLUET DE LA RIVIÈRE BULSTRODE . Rapport final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), COPERNIC. 31 pages plus annexe.

Michaud, A.R., M.A. Niang, et W. Huertas, 2020. ÉTUDE DE CAS DU BASSIN VERSANT DU RUISSEAU PARENT, AFFLUET DE LA RIVIÈRE BULSTRODE . Rapport final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), COPERNIC. 28 pages plus annexe.

Ministère des ressources naturelles du Québec, 2010. Carte écoforestière. [http://iris.banq.gc.ca/alswww2.dll/APS_CAT_IDENTIFY?Method=CatalogueExplore&IsTagged=0&DB=BookServer&ExploreType=Subject&Stem=SIEF%20\(Syst%C3%A8me%20d%27informatio](http://iris.banq.gc.ca/alswww2.dll/APS_CAT_IDENTIFY?Method=CatalogueExplore&IsTagged=0&DB=BookServer&ExploreType=Subject&Stem=SIEF%20(Syst%C3%A8me%20d%27informatio)

[n\)%20&Style=Portal3&SubStyle=&Lang=FRE&ResponseEncoding=utf-8&Parent=Obj_55181311766356](#)

Michaud, A.R., J. Desjardins, N. Coté, I. Beaudin, A. Drouin, S. Seydoux et I. Saint-Laurent. 2012b. Rapport de l'Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles. Rapport sommaire pour la période de référence 2009-2011. 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. 87 pages et annexes. <http://www.irda.qc.ca/resultats/publications/197.html>

Michaud, A. R., N.-R. Rocha Medrano, R. Lagacé et A. Drouin. 2014a. Développement et validation de méthodes de prédiction du ruissellement et des débits de pointe en support à l'aménagement hydro-agricole. Rapport final présenté au CDAQ dans le cadre du PCAA. IRDA. 142 p. <http://www.irda.qc.ca/fr/publications/developpement-et-validation-de-methodes-de-prediction-du-ruissellement-et-des-debits-de-pointe-en-support-a-l-amenagement-hydro-agricole/>

Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry et J.R. William. 2011. Soil and Water Assessment tool Theoretical Documentation, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Texas, 618 p.

Moriasi, D.N., J.G. Arnold, M.W. Van Liew, R.L. Binger, R.D. Harmel, and T.L. Veith. 2007. Model Evaluation Guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE 50(3): 885-900.

Perrone, J. et C.A. Madramootoo. 1998. Improved curve number selection for runoff prediction, Can. J. Civ. Eng. Vol. 25, pp. 728-734.

Poon, D., 2013 Re-conceptualizing the soil and water assessment tool to better predict subsurface water flow through microporous soils. Mémoire de Maîtrise, Department of Natural Resource Sciences, McGill University, Montreal. 127 pages.

Saleh, A., J. G. Arnold, P.W. Gassman, L.M. Hauck, W.D. Rosenthal, J.R. Williams, A.M.S. McFarland. 2000. Application of SWAT for the upper north Bosque river watershed, American Society of Agricultural Engineers, Vol. 43(5), pp. 1077-1087.

Tolson, B.A. and C.A. Shoemaker. 2004. Watershed modeling of the Cannonsville Basin using SWAT2000: Model development, calibration and validation for the prediction of flow, sediment and phosphorus transport to the Cannonsville Reservoir. Version 1.0. Technical Report, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, 159 p.

U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. 1972. National Engineering Handbook, Hydrology Section 4, Chapters 4-10.

U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 2001. National Soil Survey Handbook, title 430-VI. Internet: <http://www.statlab.iastate.edu/soils/nssh/>

Wall,G.J., D.R. Coote, E.A. Pringle and I.J. Shelton (editors). 2002. RUSLEFAC — Revised Universal Soil Loss Equation for Application in Canada: A Handbook for Estimating Soil Loss from Water Erosion in Canada. Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada. Ottawa. Contribution No. AAFC/AAC2244E. 117 pp. www.sis.agr.gc.ca/siscan/publications/manuals/2002-92/rusle-can.pdf

Williams, J.R., A.D. Nicks, and J.G. Arnold. 1985. Simulator for water resources in rural basins. Journal of Hydraulic Engineering 111 Vol. 6, pp. 970-986.

Williams, J.R., C.A. Jones and P.T. Dyke. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. Trans. ASAE 27(1), pp. 129-144.

Williams, J.R. 1975. Sediment routing for agricultural watersheds, Water Resources Bull, Vol. 11(5), pp. 965-974

Winchell, M., D. Meals, S. Folle, J. Moore, D. Braud, C. DeLeo et K. Budreski. 2011. Identification of critical sources areas of phosphorus within the Vermont sector of Missisquoi bay basin. Stone Environmental Inc. Project ID 092156-G. For Lake Champlain Basin Program.

Wischmeier W.H., Jonhson C.B. and Cross B.V. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites, J. Soil and Water Conservation, Vol. 26, No. 5, pp. 189-192.

1.10 Annexes

Annexe I Cartes du bassin versant et ses sous bassins

Figure 12: Carte 1 : Découpage des sous-bassins et chenaux de la rivière Bulstrode par le modèle SWAT

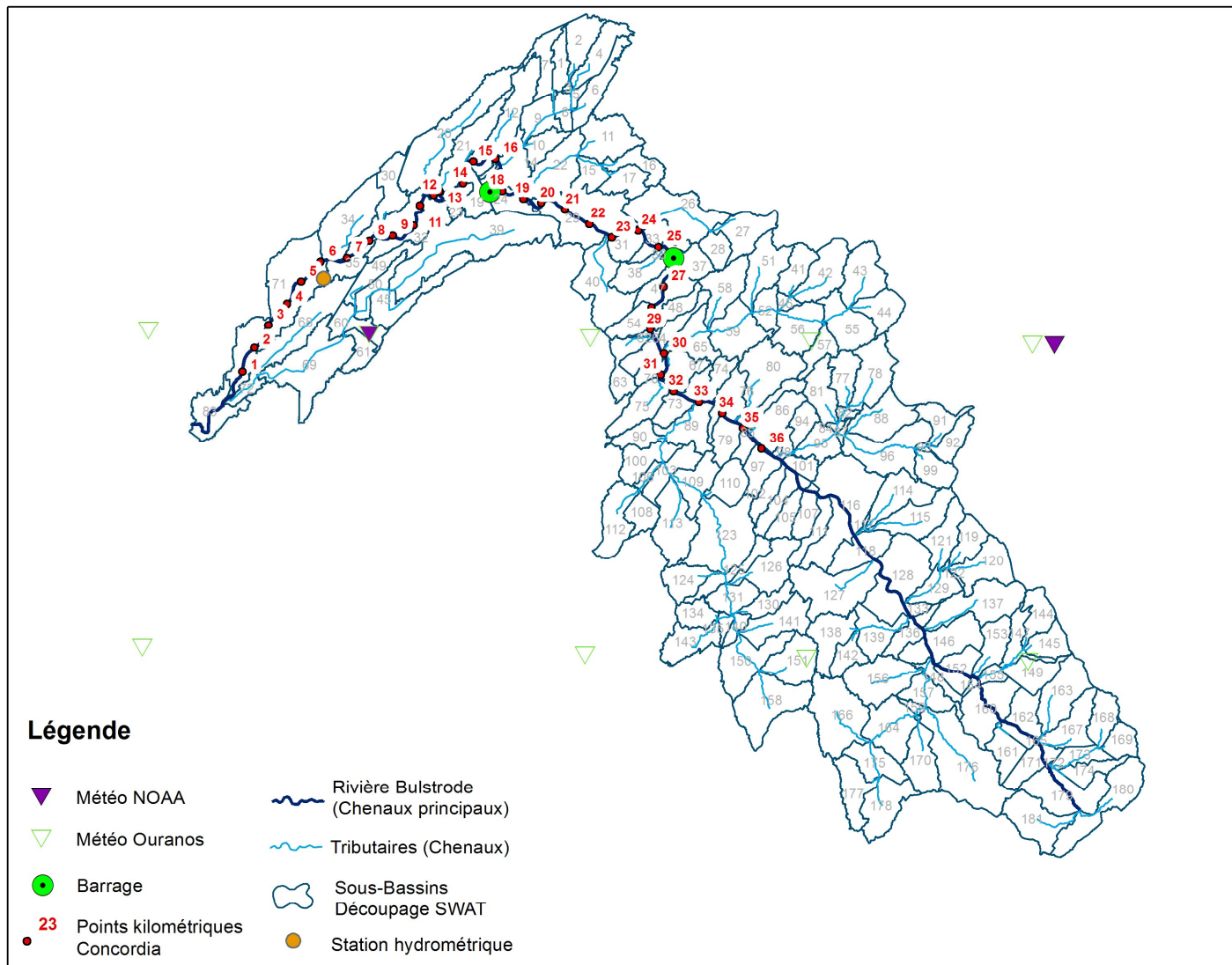
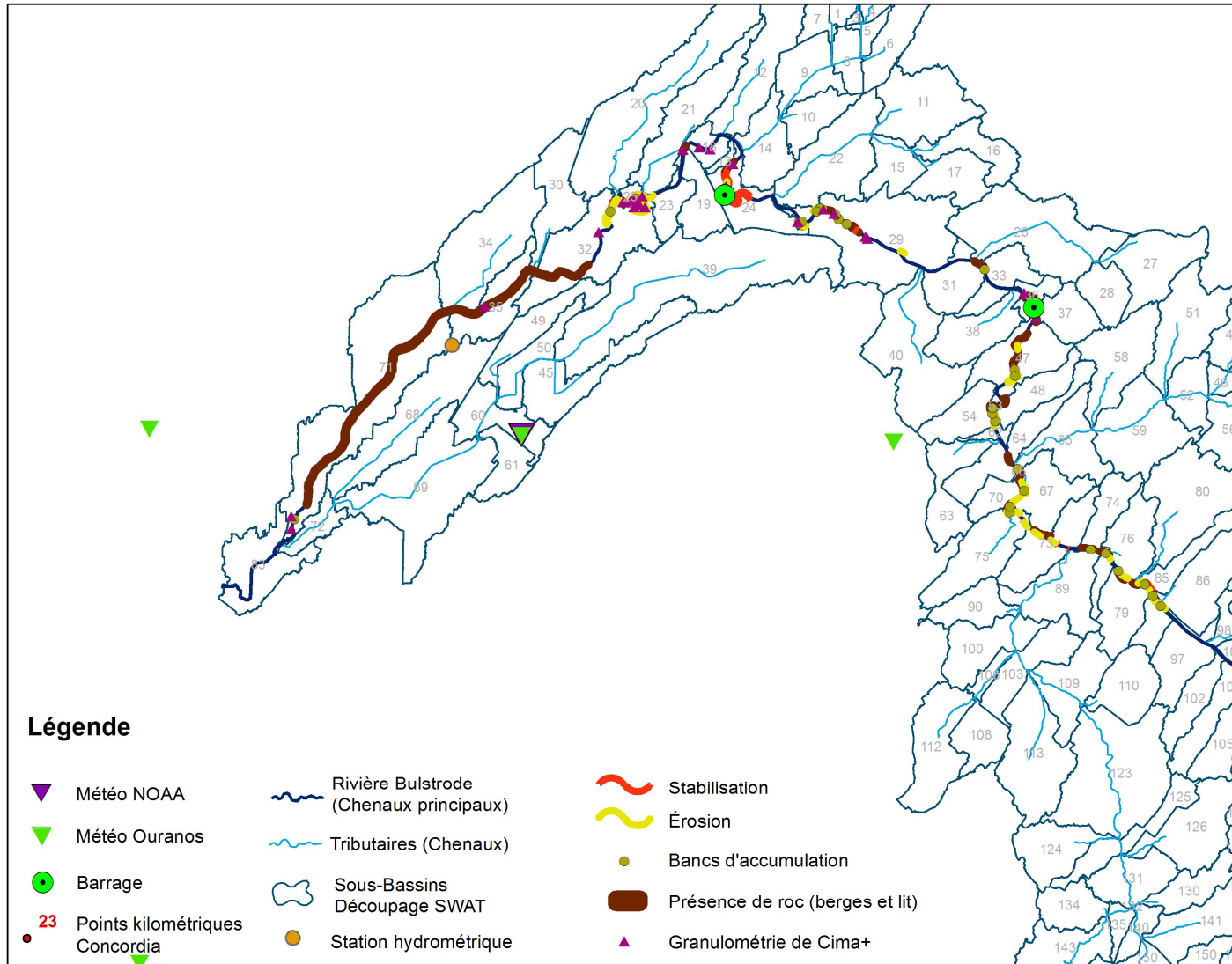


Figure 13: Carte 2: Observations des études terrain Cima+ et du Laboratoire de gestion des rivières de Concordia superposées au découpage SWAT.



Annexe II – Paramétrisation des chenaux pour la phase de modélisation aquatique

Tableau 7: Segmentation du réseau hydrographique du bassin de la rivière Bulstrode à des fins de paramétrisation et correspondance des tronçons avec les chenaux et sous-bassins délimités par SWAT (Voir carte figure 6 pour visualisation spatiale)

Nom segment	Chenaux/ sous- bassins (rch # dans le jargon SWAT)	Description
Tr1	35; 71; 83	Pk0-9: Tronçon Concordia Aval. Piedmont, droit, roche ou matériaux fins en berge, blocs épars dans le lit, faible pente. Berges avec graminées.
Tr2	13; 18; 23-25; 32	PK10-19: Tronçon Concordia Aval. Piedmont, sinueux gravier sable. Secteur dynamique.
Tr3-1	29; 31	Pk20-Pk27: Tronçon Stable
Tr3-barrage	33-36	PK24-Pk27: Tronçon Concordia Amont-Appalaches. Barrage Ste-Sophie
Tr3-2	47; 53; 62; 64; 66; 70; 73; 74; 79; 85	Pk28-P36: Tronçon Succession érosion et berges ou lit enrochées
Tr4	97; 101; 104; 107; 116; 118; 128; 133; 136; 146; 152; 154; 160; 162; 165; 171; 172; 179	PK36-Fin: Tronçon Amont rivière principale non étudiée par les études terrains, sauf partiellement Poly-Géo Inc.
Perreault	26-28	Agricole Aval Piedmont
Parent	20	Agricole Aval Piedmont
Michaud	91; 92; 96; 99	Forestier Amont Appalaches
Gobeil	141; 150; 151; 158	Forestier Amont Appalaches
Lambert	37; 40-46; 51; 54; 57-58; 63; 67; 75-78; 80-82; 84; 86; 87; 88; 90; 93; 94; 95; 102; 105-106; 108; 110-115; 117; 119-122; 124; 126-127; 130; 134-135; 137-139; 141-145; 147; 149; 153; 155-156; 161; 163-164; 166-170; 173-178; 180; 181 ; 52; 55; 56; 59; 65; 89; 98; 100; 103; 109; 123; 125; 129; 131; 132; 140; 148; 157; 159; 184 ;	Tributaires Amont après Pk26
Bulstrode	1-12; 14-17; 19; 21; 22 ; 30 ; 34 ; 38-40; 48-50; 60-61; 68-69; 72	Tributaires Aval avant Pk26

- Les segments Tr1, Tr2 et Tr3 correspondent aux tronçons tels que définit par l'équipe de Concordia (Biron et al., 2020). Les autres segments ont été définit selon une logique qui se voulait similaire (ensemble homogènes de chenaux) afin de les regroupés pour des valeurs de paramétrisations similaires selon les paramètres.
- Pk : équivaut au point kilométrique de l'étude de Concordia

Figure 14: Carte 3. Visualisation des chenaux catégorisé en tronçons relativement homogènes pour la paramétrisation de la phase aquatique de la modélisation

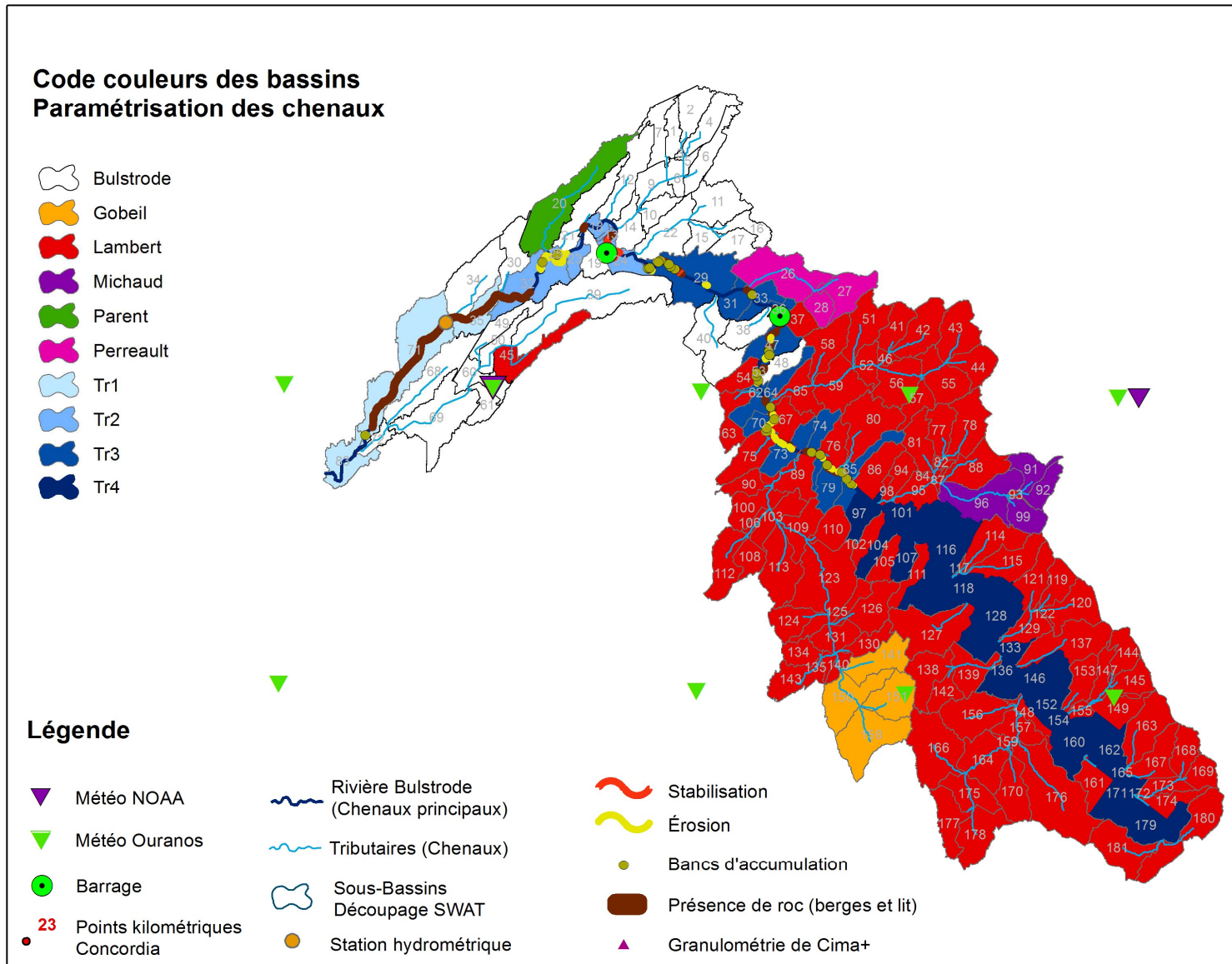


Tableau 8a: Valeurs des paramètres pour le facteur de couvert végétal des berges de la rivière Bulstrode - CH_COV1

Segment (rch number) du chenal principal	Val. Spécifique CH_COV1 (berges)	Justifications	Sources
Tr1: 83	1.97	Roc et herbacé	Photo rapport final Concordia
Tr1: 71 ; 35 section enrochée et herbacée	1.97	Roc et herbacé	Données GIS Concordia
Tr2: 13; 18; 32	1.97	Herbacé	Photo rapport final Concordia
Tr2: 23-25 (Barrage princeville)	5.40	Herbacé et arbres	Photos Concordia (N. Stampfli)
Tr3 (general): 31 ; 62 ; 64	1.97	Zones herbacées et banc d'accumulation	Photo Rapport Concordia
Tr3 (affleurement rocheux stables): 47 ; 53 ; 70	1	Succession zone érosive et affleurement rocheux	Photo Rapport Concordia
Tr3 (zones dynamiques et érosives): 73 ; 74 ; 79 ; 85 ; 97	1	Zone dynamique et érosive; Hypothèse berges dénudé	Données GIS concordia
Tr3: Barrage Ste-Sophie: 33; 36	5.40	Herbacé et arbres	Photos Concordia (N. Stampfli)
Tr4: 97; 101; 104; 107; 116; 118; 128; 133; 136; 146; 152; 154; 160; 162; 165; 171; 172; 179	19.20	Tronçon Amont ; Forestier qui ne contribue que très peu sauf exception ci-dessous; Valeur extrapolé	Poly-Géo Inc.
Tr4: 136	1	Segment ciblé nu et érodé	Poly- Géo Inc.
Perreault: 26-28	5.40	Bassin agricole ; pas d'info - valeur extrapolé des tronçons dit stable en aval	
Michaud: 91 ; 92 ; 96 ; 99	19.20	Bassin forestier ; pas d'information valeur extrapolé	
Gobeil: 151 ; 158	19.20	Bassin forestier, qui contribue peu sauf secteurs ciblés ci-dessous	Poly- Géo Inc.
Gobeil: 141; 150	1	Bassin présentant secteurs en érosion; rives nues	Poly- Géo Inc.
Parents: 20	5.40	Bassin agricole ; pas d'info - valeur extrapolé des tronçons dit stable en aval	
Lambert: voir tableau général des tronçons (Table 7)	Non paramétré	Bassin Forestier qui contribue très peu à la charge sédimentaire	Poly- Géo Inc.
Bulstrode: voir tableau général des tronçons (Table 7)	Non paramétré	Bassin agricole valeur extrapolée des tronçons aval dit stable	

Tableau 8b : Valeurs des paramètres pour le facteur de couvert végétal du lit de la rivière Bulstrode - CH_COV2

Segment (rch number) du chenal principal	Val. Spécifique CH_COV2 (lit)	Justifications	Sources
All	1	Photos; description du rapport montre que le lit est nu	Polygeo ; Concordia

Tableau 8c: Signification des valeurs des paramètres de couvert végétal

Catégories SWAT	
CH_COV1/2	Code
Nu – pas de couvert végétale	1
Herbacée	1.97
Buisson et quelques arbres	5.40
Forêt dense	19.20

Tableau 9a: Valeurs des paramètres des Masses Volumique Apparentes (MVA) des matériaux constituant le lit et les berges (CH_BED/BNK_BD)

À enter dans SWAT	
Résumé simplifié par valeur	
CH_BED_BD	Rch #
0	24; 33;64
1,6	Aucun
1,8	13; 18; 23,25; 29; 31; 32; 36; 71; 73; 83; 85; 141; 150
2	Tous les chenaux, exceptés ceux spécifiés dans les autres catégories
CH_BNK_BD	Rch #
0	24; 33;35; 64
1,6	13; 18; 23-25; 29; 31; 32; 71; 73; 83; 85; 141; 150; 151; 158
1,8	Tous les chenaux, exceptés ceux spécifiés dans les autres catégories
2	66

Tableau 9b: Classes des MVA utilisés pour différents types de matériaux constituant les berges et le lit de la rivière Bultrode

0=Roc En effet l'équation de l'érosion potentiel est un facteur de BD
 Élément de décision: favoriser les valeurs de paramètres érosives lors qu'il y a hétérogénéité dans les segments (>80%)

Classement	
Matériaux	Valeurs représentatives à entrer dans SWAT
Roc, bloc	0
Gravier, cailloux	2
Sable Graveleux	1,8
Sable Silt	1,6

Source: Théory SWATpour Roc&Bloc (équation) et courriel de Guillaume.Lapointe@cima.com le 22 Juin 2020 pour le reste.

Tableau 10a: Valeurs des paramètres de la taille médiane des matériaux constituant le lit et les berges – CH_BED/BNK_D50.

À entrer dans SWAT	
Résumé simplifié par valeurs	
CH_BED_D50	Rch #
0,04	141; 150
0,15	71; 83
0,5	18; 23
2	Tous les chenaux, exceptés ceux spécifiés dans les autres catégories
10	13; 24; 29; 31; 33; 36; 47; 53; 62; 64; 66; 70; 73; 74; 79; 85
CH_BNK_D50	Rch #
0,04	25; 32; 70; 73; 79; 85; 141; 150; 152
0,15	13; 18; 23; 24; 29; 31; 47; 53; 62; 71; 83; 136
0,5	Non utilisé
2	Tous les chenaux, exceptés ceux spécifiés dans les autres catégories
10	35; 33; 36; 64; 66; 74

Les médianes des échantillons sur le terrain ont été classées selon le tableau suivant pour ensuite les rentrer dans SWAT comme paramètres du tableau ci-dessus.

Tableau 10b: Classes des valeurs médianes pour la taille des particules sédimentaires

Valeur de classement D50*		
Matériaux	Valeur représentative entrée dans SWAT	Tailles des particules
Roc et blocs	10	> 2
Silt	0,04	0-0,05
Sable fin	0,15	0,05-0,25
Sable grossier	0,5	0,25-2
Gravier, cailloux	2	> 2

* D'après tableau 7: 2.2 SWAT Theory : Modèle Kodatie. (Neitsch et al., 2011)

Tableau 11: Fenêtre de valeurs des paramètres de puissance spécifique (CH_BNK/BED_TC) attribuées aux différents chenaux de la rivière Bulstrode. Des valeurs identiques ont été attribuées aux berges et au lit de la rivière.

Segment (rch #) du chenal principal		Catégorie Concordia	Val. Spécifique CH_BNK_TC (berges)*	Justifications
Tr1	83	0-35	0-45	Carte puissance spécifique Concordia
Tr1 enrochée	71; 35	0-66	15-70	Carte puissance spécifique Concordia
Tr2	13; 18; 32	0-35	0-45	Carte puissance spécifique Concordia
Tr2 Barrage Princeville	23-25	0-35	0-45	Carte puissance spécifique Concordia
Tr3 Stable	29; 31	36-109	35-110	Carte puissance spécifique Concordia
Tr3 Barrage Ste Sophie	33; 36	350	350	Carte puissance spécifique Concordia
Tr3 Succession Erosion et Roc	47; 53; 62; 64; 66; 70; 73; 74; 79; 85	36-109	35-110	Carte puissance spécifique Concordia
Tr4 Amont	97; 101; 104; 107; 116; 118; 128; 133; 136; 146; 154; 160; 162; 165; 171; 172; 179	67-109	40-170	Carte puissance spécifique Concordia
Tr4 Amont - Forte puissance	152	100-350	100-350	Carte puissance spécifique Concordia
Perreault	26	0-24	0-45	Carte puissance spécifique Concordia
	27	0-4	0-45	Carte puissance spécifique Concordia
	28	18-56	15-70	Carte puissance spécifique Concordia
Michaud	91; 92; 99	2-42	0-45	Carte puissance spécifique Concordia
	96	43-162	40-170	Carte puissance spécifique Concordia
Gobeil	141;151	18-57	15-70	Carte puissance spécifique Concordia
	150	58-233	50-235	Carte puissance spécifique Concordia
	158	1-17	0-45	Carte puissance spécifique Concordia
Parent	20	0-29	0-45	Carte puissance spécifique Concordia

